

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18786 N

Thema

Steigerung des Frischbetonrecyclings in der Transportbetonindustrie - Beitrag zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung bei Steigerung der Wirtschaftlichkeit

Berichtszeitraum

01.04.2017 bis 31.12.2020

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. - FTB

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Kaiserslautern

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen

Kaiserslautern, 19.07.2021

Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit
Technische Universität Kaiserslautern
Werkstoffe im Bauwesen
Gottlieb-Daimler-Straße · Gebäude 60
67663 Kaiserslautern
Tel. (06 31) 2 05 22 97 · Fax 2 05 31 01

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit
Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abstract	4
1 Projektbeschreibung	5
1.1 Projekthintergrund.....	5
1.2 Ziele	6
1.3 Aufbau.....	6
2 Stand der Technik	7
2.1 Methoden des Frischbetonrecyclings	7
2.1.1 Nass-mechanische Recyclinganlage.....	7
2.1.2 Re-Con Zero	9
2.1.3 Langzeitverzögerer und Recyclinghilfen.....	11
2.1.4 Erhärten, Brechen und Einsatz als rezyklierte Gesteinskörnung.....	12
2.1.5 Herstellung von Betonwaren.....	13
2.2 Normative Vorgaben	14
2.2.1 Vorgaben für die Wiederverwendung von Restbetonzuschlag.....	14
2.2.2 Vorgaben für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung	15
2.2.3 Vorgaben für die Verwendung von Restwasser	15
3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	16
3.1 Arbeitspaket 1	16
3.2 Arbeitspaket 2.....	25
3.3 Arbeitspaket 3.....	34
3.4 Arbeitspaket 4	44
3.5 Arbeitspaket 5	60
4 Zusammenfassung der Ergebnisse	68
5 Empfehlungen für die Regelwerke	69
6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU.....	71
7 Verwendung der Zuwendung	72
8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	72
9 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	73
10 Literatur	75
11 Anhang.....	80

Zusammenfassung

In der Betonherstellung fallen immer wieder Überschuss- und Restmengen an, die nicht mehr eingesetzt werden können. In vielen Transportbeton- und Fertigteilwerken werden diese Restbetonmengen im Rahmen der Abfallvermeidung aufbereitet, sei es durch sogenanntes Frischbetonrecycling, bei dem der Beton ausgewaschen wird, oder das Brechen des zuvor erhärteten Betons. Durch die Aufbereitung wird eine Gesteinskörnung erhalten, die im Beton wieder eingesetzt werden kann. Aufgrund der fehlenden wissenschaftlichen Datenbasis, ist der Wiedereinsatz dieses Materials jedoch stark reglementiert. Aktuell liegen die Begrenzungen für den Einsatz von wiedergewonnener bzw. rezyklierter Gesteinskörnung aus werkseigener Produktion im Beton bei max. 5 M.-%. Dieser Anteil darf ohne Einschränkung wiederverwendet werden. Überschüssiges Material wird häufig anderweitig als Verfüllmaterial eingesetzt oder entsorgt. Dies spricht jedoch dem Gedanken einer möglichst hochwertigen Wiederverwendung entgegen. Im hier dargestellten Forschungsprojekt wurde daher untersucht, ob eine Steigerung des Anteils an wiedergewonnener Gesteinskörnung bei gleichbleibend guter Betonqualität möglich ist. Um auch wirtschaftliche und prozesstechnische Aspekte mit einzubeziehen, wurde zunächst im Rahmen einer Umfrage der aktuelle Standard von Transportbeton- und Fertigteilwerken erhoben. Hier hat sich gezeigt, dass das Frischbetonrecycling im Rahmen der Restbetonaufbereitung die verbreitetste Methode ist. Weitere Technik zur Aufbereitung, wie beispielsweise Siebe, sind häufig nicht vorhanden. Anhand von Probenahmen in verschiedenen Transportbetonwerken wurde außerdem eine ausführliche Charakterisierung wiedergewonnener Gesteinskörnung durchgeführt, welche sich in ihren physikalischen Eigenschaften als weitgehend gleichwertig zu natürlicher Gesteinskörnungen gezeigt hat. Unterschiede ergeben sich in erster Linie dadurch, dass man durch den Auswaschprozess ein Korngemisch erhält, das nahezu das gesamte Sieblinienspektrum abdecken kann. Im weiteren Verlauf wurden theoretische und praktische Untersuchungen zur Bestimmung der maximal möglichen Einsatzmengen von wiedergewonnener Gesteinskörnung im Beton durchgeführt. Die Versuche fanden sowohl im Labor als auch in ausgewählten Transportbetonwerken statt. Die theoretischen Betrachtungen haben dabei gezeigt, dass sich die möglichen Einsatzmengen je nach Kombination der Sieblinien der verwendeten natürlichen und wiedergewonnenen Gesteinskörnungen unterscheiden. Gibt man die Gesteinskörnung dabei als eigene Fraktion über die gesamte Sieblinie zu, sind die möglichen Einsatzmengen dabei in der Regel höher, als wenn man, wie aktuell praktiziert, die Gesteinskörnung anteilig zur größten Fraktion der natürlichen Gesteinskörnung gibt. Ein Einsatz von 25 M.-% wiedergewonnener Gesteinskörnung hat sich indessen bei den praktischen Untersuchungen als unproblematisch dargestellt und zeigt, dass eine Erweiterung der bisherigen Regelung aus betontechnologischer Sicht möglich wäre.

Abstract

In concrete production, there are always surplus and residual quantities that can no longer be used. In many ready-mix concrete and precast plants, these residual concrete quantities are processed as part of waste avoidance, either by so-called fresh concrete recycling, in which the concrete is washed out, or by crushing the previously hardened concrete. The processing yields an aggregate that can be reused in concrete. However, due to the lack of scientific data, the reuse of this material is highly regulated. Currently, the limits for the use of recovered or recycled aggregate from factory production in concrete are max. 5 wt.%. This amount may be reused without restriction. Excess material is often used elsewhere as backfill or disposed of. However, this runs counter to the idea of reusing the material in the highest possible quality. The research project described here therefore investigated whether it is possible to increase the proportion of recovered aggregate while maintaining the same high concrete quality. In order to include economic and process-related aspects, the current standard of ready-mix concrete and precast plants was first surveyed. This showed that fresh concrete recycling in the context of residual concrete preparation is the most widespread method. Other technology for processing, such as sieves, is often not available. Based on sampling in various ready-mix concrete plants, a detailed characterization of recycled aggregates was also carried out, which were shown to be largely equivalent to natural aggregates in terms of their physical properties. Differences result primarily from the fact that the leaching process produces a mixture of aggregates that can cover almost the entire grading curve spectrum. In the further course, theoretical and practical investigations were carried out to determine the maximum possible application quantities of recovered aggregate in concrete. The tests were carried out both in the laboratory and in selected ready-mix concrete plants. The theoretical considerations showed that the possible input quantities differ depending on the combination of grading curves of the natural and reclaimed aggregates used. If the aggregate is added as a separate fraction over the entire grading curve, the possible input quantities are generally higher than if, as is currently the case, the aggregate is added proportionally to the coarsest fraction of the natural aggregate. However, the use of 25 % by weight of recovered aggregate has proved to be unproblematic in the practical tests and shows that an extension of the present regulation would be possible from the point of view of concrete technology.

1 Projektbeschreibung

1.1 Projekthintergrund

Bei Transportbetonherstellern fallen im Tagesgeschäft fortwährend Überschuss- und Restmengen von Frischbeton an. Schätzungen gehen davon aus, dass etwa 3 % der Betonproduktion als Restbeton übrig bleiben [1]. In anderen Veröffentlichungen ist die Rede von 1 % Restbeton und bis zu je einem weiteren Kubikmeter Restbeton bei der Reinigung von Fahrmischern und Betonpumpen [2]. Bei einer Betonproduktion der Transportbetonwerke von 52,66 Millionen Kubikmeter im Jahr 2018 in Deutschland [3] ergäbe sich unter der Annahme von 3 % Restbeton damit eine Restbetonmenge von 1,58 Millionen Kubikmeter, was etwa 2,9 Millionen Tonnen wiedergewonnener Gesteinskörnung entspricht. Weltweit fallen jährlich 125 Millionen Kubikmeter Restbeton an [4]. In Betonfertigteilwerken fällt deutlich weniger Restbeton an, da die einzusetzenden Mengen durch die industrielle Fertigung besser abgeschätzt werden können. Hier gibt es jedoch das Problem der Ausschuss- und Überschussproduktion.

Ökologisch ist ein Recycling erstrebenswert, da durch den Einsatz von im Betonwerk gewonnene Restbetongesteinskörnung weniger primäre Gesteinskörnung abgebaut und transportiert werden muss. Zudem wird Deponieraum für die ansonsten notwendige Entsorgung des Restbetons eingespart. Aber auch ökonomisch macht die Verwendung von wiedergewonnener Gesteinskörnung zur Betonherstellung Sinn. Es muss weniger primäre Gesteinskörnung eingekauft werden und die Entsorgungskosten für Restbeton entfallen. Auch wenn die Ressourcen an Kies und Sand in Deutschland noch nicht erschöpft sind, gibt es allerdings vielerorts Nutzungskonflikte mit Natur- bzw. Wasserschutzgebieten, der Landwirtschaft oder Flächen für den Städtebau. Darüber hinaus ist der Sand- bzw. Kiesabbau gesellschaftlich wenig erwünscht, sodass die Genehmigungsverfahren für neue Gewinnungsstätten entsprechend lange dauern. Zusätzlich erfüllen nicht alle Gewinnungsstätten die Anforderungen für Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 [5] und dürfen damit nicht zur Herstellung von Betonen nach DIN EN 206-1 [6]/DIN 1045-2 [7] verwendet werden. In der Konsequenz können damit über 85 % der theoretisch in Deutschland vorhandenen Sand- und Kiesressourcen nicht genutzt werden [8]. In Hessen werden dadurch beispielsweise bei einem Verbrauch von 19,8 Millionen Tonnen nur 10,3 Millionen Tonnen gewonnen [8], was Importe mit entsprechenden Auswirkungen auf das Klima und Transportkosten verursacht.

Im Rahmen der Abfallvermeidung wird der Restbeton bereits in vielen Werken aufbereitet. Dazu werden verschiedene Verfahren angewandt. Zum einen besteht die Möglichkeit, den Beton in eine Frischbeton-Recyclinganlage zu entleeren, in der Gesteinskörnung und Zementleim durch Auswaschen voneinander getrennt werden, und zum anderen die Variante den Frischbeton zu entleeren und nach dem Erhärten wieder zu brechen. In beiden Fällen erhält man eine Gesteinskörnung, die man zur Herstellung von neuem Beton verwenden kann. Dies ist jedoch aufgrund der aktuellen normativen Vorgaben nur in kleinem Umfang möglich. Die durch Auswaschen wiedergewonnene Gesteinskörnung darf ohne weitere Aufbereitung nur mit maximal 5 M.-% im Beton eingesetzt werden, ebenso wie die durch Brechen gewonnene Gesteinskörnung [6; 9]. Für eine Verwendung von größeren Mengen ohne weitere Einschränkung fehlt aktuell die wissenschaftliche Grundlage, die einen zielsicheren Einsatz sicherstellen würde.

Dadurch ist es zum jetzigen Zeitpunkt nur mit erheblichem Mehraufwand möglich, die anfallenden Restbetonmengen vollständig zu verwerten.

1.2 Ziele

Ziel des Forschungsprojekts ist es zunächst den Bedarf einer Erhöhung der aktuellen Begrenzung zum Einsatz von wiedergewonnener Gesteinskörnung aus dem werkseigenen Prozess festzustellen und eine wissenschaftliche Grundlage für die Verwendung dieser Gesteinskörnung bei der Herstellung von neuem Beton zu schaffen. Auf diese Weise soll ein Beitrag zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung in der Betonindustrie geleistet werden. Mithilfe eines soliden Modells zum Einsatz höherer Mengen wiedergewonnener Gesteinskörnung könnte auf Dauer eine vollständige Abfallvermeidung in der Betonindustrie erreicht werden. Bei den Untersuchungen sollen jedoch auch die verfahrenstechnischen Möglichkeiten betrachtet werden. Das Modell soll nicht nur ressourcenschonend, sondern auch wirtschaftlich und mit möglichst geringem verfahrenstechnischem Aufwand umgesetzt werden können.

1.3 Aufbau

Das Projekt ist in fünf Arbeitspakete untergliedert, die aufeinander aufbauen. Eine Übersicht ist in Abb. 1.1 dargestellt.

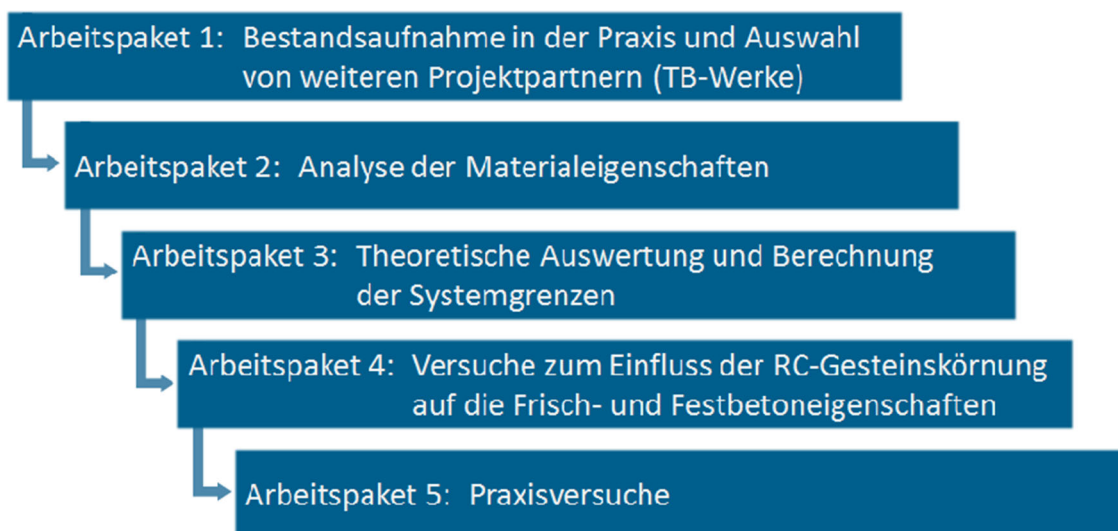


Abbildung 1.1: Projektaufbau

Im ersten Paket wurde zunächst eine Bestandsaufnahme zum aktuellen Stand der Technik in Betonwerken und dem Umgang mit Restbetonmengen durchgeführt. Im zweiten Arbeitspaket wurde eine Charakterisierung der wiedergewonnenen Gesteinskörnung vorgenommen. Dazu wurden in verschiedenen Werken über einen gewissen Zeitraum Proben entnommen und analysiert. Arbeitspaket 3 diente der theoretischen Betrachtung des Einsatzes von wiedergewonnener Gesteinskörnung im Beton. Hier sollten die theoretischen Systemgrenzen bestimmt werden, bevor im Arbeitspaket 4 der Einfluss von wiedergewonnener Gesteinskörnung auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht wurde. Im letzten Arbeitspaket sollten dann die Ergebnisse der vorhergehenden Arbeitspakete abschließend im Praxisversuch überprüft werden. Dazu wurden Versuche in ausgewählten Transportbetonwerken durchgeführt.

2 Stand der Technik

2.1 Methoden des Frischbetonrecyclings

2.1.1 Nass-mechanische Recyclinganlage

Das nass-mechanische Recycling, eher bekannt als Frischbetonrecycling, stellt das in Deutschland meist verbreitete Verfahren zum Recycling von Restbeton dar. Hierbei wird der noch nicht erhärtete Restbeton und das beim Reinigen von Transportfahrzeugen, Pumpen und Mischern mit Restbeton versetzte Washwasser in Gesteinskörnung und in Restwasser mit gelösten Feinstoffen aufgetrennt, wobei beide Komponenten im Anschluss für die Betonherstellung verwendet werden können.

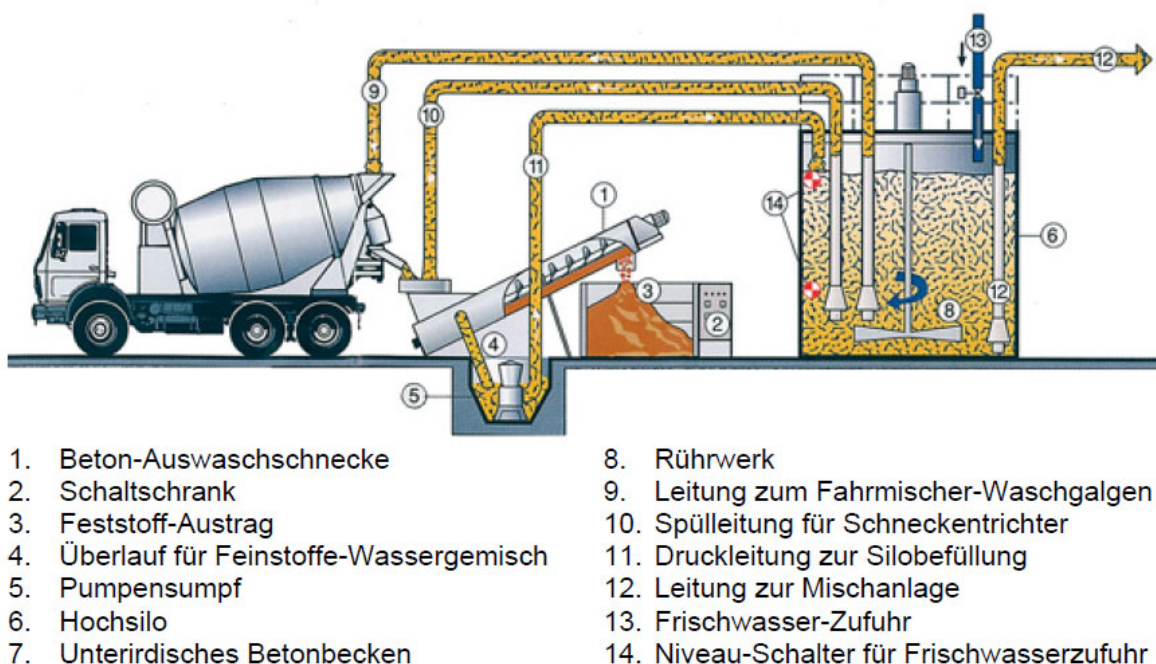


Abbildung 2.1: Funktionsschema einer Frischbetonrecyclinganlage [10]

In Abbildung 2.1 ist das Funktionsschema einer Frischbetonrecyclinganlage dargestellt. Zum Trennen des Restbetons fährt der Fahrmischer rückwärts an den Aufgabetrichter heran und es wird über den Spülgalgen Washwasser in die Mischtrummel gegeben sowie die Trummel des Fahrmischers in Drehung versetzt. Dadurch wird der vorhandene Restbeton verflüssigt und in Zusammenwirken mit den in Folge der Rotation entstehenden Reibungskräften wird der Zusammenhalt der Bestandteile des Restbetons geschwächt. Das entstehende Gemisch aus Restbeton und Washwasser bezeichnet man dabei als Restbetontrübe. Im Anschluss wird diese Restbetontrübe in den Aufgabetrichter gegeben. Dort sortiert ein mechanischer Klassierer die größere Gesteinskörnung aus dem Beton. Dazu wird weiteres Wasser zur Restbetontrübe gegeben und die Auswaschschnecke wird in Drehung versetzt. Dadurch wird ein turbulenter Strömungszustand erzeugt, der in Kombination mit der quer zur Förderrichtung der Schnecke wirkenden Querkraft dazu führt, dass sich die größere Gesteinskörnung am Boden des Trichters absetzt und die Feinstoffe in Schwebelage gehalten werden. Die größeren Bestandteile,

üblicherweise liegt der Trennschnitt bei etwa 0,2 mm Korngröße, werden durch die Förderschnecke angehoben, meist noch einmal mit Wasser abgespritzt um feine Bestandteile und Zementreste zu lösen und dann auf einer Halde zwischengelagert. Die Gesteinskörnung kann anschließend zur Herstellung von neuem Beton verwendet werden. Das Waschwasser mit den darin schwebenden Feianteilen wird über eine Pumpe in ein Zwischenlager gepumpt. Üblicherweise wird in diesem Becken über ein Rührwerk ein Sedimentieren der Feststoffe verhindert. Aus diesem Zwischenlager kann Restwasser zur Herstellung von neuem Beton sowie Waschwasser für den Spülgalgen und das weitere Verwässern der Restbetontrübe entnommen werden [11; 12]. Da zum Auswaschen eines Kubikmeters Restbeton etwa die vierfache Menge an Waschwasser benötigt wird [1], kann auf diesem Wege der Verbrauch an Frischwasser deutlich reduziert werden.

Alternativ zu den dargestellten Schneckenklassierern gibt es auch Auswaschtrommeln. Hierbei wird die Restbetontrübe in einen leicht geneigten stählernen Hohlzylinder gegeben, der um seine Längsachse rotiert. Die Wirkungsweise der Klassierung beruht dabei auf dem Gegenstromprinzip, die Gesteinskörnung wird durch eine Spirale innerhalb des stählernen Zylinders nach oben gefördert während in entgegengesetzter Richtung strömendes Wasser das Material auswäscht [11].

Es ist wichtig sicherzustellen, dass in einer Frischbetonrecyclinganlage keine Reste von Mörtel oder Estrich ausgewaschen werden. Erstens ist die Verträglichkeit der für Mörtel bzw. Estrich verwendeten Zusatzmittel mit denen für Beton meist nicht nachgewiesen und zweitens ist insbesondere Anhydritestrich sehr kritisch, da der Anhydrit das Erstarrungsverhalten des Betons ändert.

Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens zum Recycling von Restbeton ist die Möglichkeit auch das beim Reinigen von Betonpumpen, stationären Mischern und Fahrmischern anfallende Waschwasser sowie das beim Sägen, Schleifen und Wasserstrahlen entstehende Brauchwasser einer Weiterverwendung zuzuführen. Üblicherweise wird hierzu das Wasch- und Brauchwasser dem Restwasserbehälter hinzugegeben. Analog kann mit dem Oberflächenwasser auf dem Werksgelände verfahren werden, wobei hierbei der Eintrag von Fetten und Ölen in das Restwasser über entsprechende Abscheider zu verhindern ist und die Anwendung von Taumitteln auf der Werksfläche untersagt ist [13]. Wird insbesondere das Wasch- und Brauchwasser nicht betriebsintern weiterverwendet und muss daher entsorgt werden, sind aufgrund des hohen pH-Wertes Neutralisationsanlagen vor der Einleitung in das öffentliche Kanalnetz gefordert [2].

Nachteilig bei diesem Recyclingverfahren ist die fehlende Möglichkeit zur Wiederverwendung des im Restbeton enthaltenen Zementes, dessen Reaktivität bei diesem Recyclingprozess verloren geht. Außerdem ist das Verfahren energieintensiv und es wird trotz der Verwendung von Restwasser als Waschwasser relativ viel Wasser verbraucht. Ein Problem ist der Anlagenbetrieb bei Frostgraden, da ein Vereisen droht und die Trennung zwischen Feianteilen und größerer Gesteinskörnung schlechter funktioniert [11].

Ein wesentlicher Einflussfaktor für die Qualität des Trennschnittes, also der unteren Korngrenze der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und damit zugleich der oberen Korngrenze im Restwasser, ist die Dichte des Waschwassers. Da mit zunehmender Restwasserdichte der Erreichungsgrad des angestrebten Trennschnittes abnimmt und zusätzlich die Verwendung des Restwassers als Zugabewasser für neuen Beton erschwert ist, sollte das Ziel eine möglichst geringe Restwasserdichte sein. Um dieses Ziel zu erreichen, werden vereinzelt

Kammerfilterpressen eingesetzt. Hierbei wird das Restwasser durch eine Druckluftmembranpumpe in eine Kammerfilterpresse gepumpt, in der bei einem Druck von etwa 200 bar der Schlamm vom Wasser getrennt wird und man als getrennte Produkte geklärtes Wasser und den Filterschlamm erhält [14]. Alternativ ist es möglich, das Restwasser in einen Klärturm zu leiten und dort ein Flockungsmittel zuzugeben, sodass die Feinstoffe verklumpen und sedimentieren. In der Folge können über einen im oberen Bereich des Klärturms angebrachten Ablauf geklärtes Restwasser und über einen Bodenablauf die Feianteile entnommen werden. Weiter gibt es auch auf dem Zentrifugalprinzip beruhende mechanische Trennverfahren [15].

Nachteil dieses Verfahren ist, dass in Deutschland die getrennten Feinstoffe üblicherweise als Abfall entsorgt werden. Aus Hongkong gibt es Versuche diese Abfallprodukte als Ersatzstoff für natürliche Gesteinskörnung zu verwenden. Dazu werden die Feinstoffe vom Restwasser getrennt, soweit möglich entwässert und offen gelagert bis diese durch den vorhandenen Zementgehalt eine gewisse Festigkeit aufweisen. Die entstehenden Verklumpungen werden anschließend gebrochen und als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung zur Betonherstellung verwendet. Dieses Rezyklat wird in der Literatur als „fresh concrete waste“ (fcw) bezeichnet. Aufgrund der Bestandteile des Rezyklates, bestehend aus Zement, Wasser und Feinstsand, könnte man von einem Mörtelbruch sprechen. Eine Charakterisierung dieses Materials ergab dabei eine auffallend geringe Rohdichte von $1,83 \text{ g/cm}^3$, die Rohdichte der ofengetrockneten Probe betrug sogar nur $1,33 \text{ g/cm}^3$, und wies eine sehr hohe Wasseraufnahme von über 30 M.-% auf. Diese im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung ungünstigen Materialeigenschaften zeigten sich auch an Betonen, bei denen der Mörtelbruch Teile der natürlichen Gesteinskörnung ersetzte. Die Frischbetoneigenschaften verschlechterten sich, bei der Druckfestigkeit zeigte sich bereits bei einem Anteil des fresh concrete waste von 15 % der Gesteinskörnung ein Festigkeitsverlust von etwa 25 %. Bei 50 % dieser Gesteinskörnung (fcw) betrug die Druckfestigkeit nur noch die Hälfte der Referenzmischung. Ähnlich verhielt sich die Spaltzugfestigkeit mit Festigkeitsverlusten von etwa 40 %, unabhängig vom Anteil des Mörtelbruchs. Auch der Elastizitätsmodul nahm mit steigendem Anteil an fcw ab, gleiches gilt für den Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden. Die Schwindmaße stiegen durch die Verwendung von dieser Gesteinskörnung stark an [16]. Das Material (fcw) ist demnach für die Verwendung im Beton ungeeignet. Lediglich für Bauteile ohne statische Funktion und untergeordneter Bedeutung, wie z. B. Magerbetone für Sauberkeitsschichten, wäre eine Verwendung möglich, wobei auch hier vermutlich nicht die gesamte Gesteinskörnung ersetzt werden könnte. Ob sich in Anbetracht dieser Einschränkungen eine Verwendung des Mörtelbruchs zur Betonherstellung empfiehlt, ist zu bezweifeln.

2.1.2 Re-Con Zero

Die Firma Mapei S.p.A. hat eine Kombination aus zwei Zusatzmitteln entwickelt, mit denen aus dem Restbeton im Fahrmischer ein Granulat hergestellt wird, welches anschließend Teile der natürlichen Gesteinskörnung für die Betonherstellung ersetzen kann. Für dieses Produkt liegt eine bauaufsichtliche Zulassung vor [17]. Dabei wird das entstehende Granulat wie wiedergewonnene Gesteinskörnung behandelt.

Dazu wird zunächst die Komponente A mit $0,5 \text{ kg}$ pro Kubikmeter Restbeton in die Mischtrommel zum darin befindlichen Restbeton gegeben und anschließend wird das Zusatzmittel für etwa drei Minuten bei 15 Umdrehungen pro Minute untergemischt. Um eine bessere Granulometrie zu erreichen, kann zusätzlich Re-Con Zero Booster mit $0,5 \text{ kg/m}^3$ untergemischt werden. Danach

werden 6 kg der Komponente B je Kubikmeter Restbeton hinzugegeben und erneut für zwei Minuten bei hoher Umdrehungszahl gemischt. Das dabei entstehende Granulat wird anschließend auf dem Boden möglichst großflächig ausgebreitet. Nach zwei bis 40 Stunden, abhängig von der Temperatur, muss das Granulat mit einem Radlader aufgemischt werden, um Agglomerationen zu verhindern. Nach dem Aushärten kann das Granulat wie übliche Gesteinskörnung gelagert und schließlich zur Betonherstellung verwendet werden. Alternativ zu der zuvor beschriebenen Vorgehensweise kann auch erst Komponente B und dann Komponente A zugegeben werden, es dürfen nur nicht beide Komponenten zeitgleich zugegeben werden. Der Hersteller wirbt damit, dass dieses Recyclingverfahren keine Abfallprodukte erzeugt, der Restbeton vollständig für die Herstellung von neuem Beton verwendet werden kann und dass für die Reinigung der Mischtrommel deutlich weniger Spülwasser benötigt wird [18].

Aus wissenschaftlicher Sicht wurde das Verfahren unter anderem im Rahmen des BMBF-Projektes „R-Beton - Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation“ im Arbeitspaket sechs [10] durch die RWTH Aachen untersucht. Demnach handelt es sich bei Komponente A um ein SAP (superabsorbent polymer), welches dem Beton schlagartig Wasser entzieht, wodurch erste Granulatkörner entstehen. Komponente B beschleunigt den Erstarrungs- / Erhärtungsprozess durch ettringitbildende Verbindungen auf Basis von Aluminiumsulfat. Dabei binden die Ettringitkristalle noch vorhandenes freies Wasser und festigen die Struktur durch chemisches Sintern. Allerdings besteht durch Komponente B ein erhöhtes Risiko für einen internen Sulfatangriff, der Risse und Abplatzungen verursachen kann. Daher wird an ettringitbildenden Verbindungen, die nicht auf Sulfaten basieren, geforscht [4].

In Laborversuchen wurde gezeigt, dass die Granulate eine deutlich gröbere Sieblinie im Vergleich zu der Sieblinie des Restbetons ergeben. Insbesondere die Korngruppen im feinen Sandbereich fehlen fast vollständig. Ursache ist das Umhüllen der Gesteinskörnung mit dem Zementleim. Die Wasseraufnahme des Materials ist mit 3,5 M.-% bis 6,0 M.-% größer als bei natürlicher Gesteinskörnung, aber geringer als bei Betonbruch. Die Kornrohichte ist vergleichbar mit der von natürlicher Gesteinskörnung, die Kornform ist günstig, es entstehen fast nur runde Körner. Das Granulat erreicht hohe Schlagzertrümmerungswerte. Der Frostwiderstand ist jedoch sehr gering, da die Zementsteinmatrix leicht abplatzt. Bei der Prüfung von Betonen, die mit 5 M.-% bzw. 35 M.-% des Granulates hergestellt wurde, konnten im Vergleich zu Referenzbetonen ähnliche Festigkeiten beobachtet werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass durch die größere Wasseraufnahme der Granulate der effektive Wasserzementwert der Betone mit dem Granulat geringer ist und somit nicht ohne weiteres mit den Referenzbetonen vergleichbar ist. Bei den Druckfestigkeiten ist ein Einfluss des für den Restbeton, aus dem die Granulate gewonnen wurden, verwendeten Zementes feststellbar. Der Elastizitätsmodul wird durch die Verwendung des Granulates nicht wesentlich reduziert, auch die Karbonatisierungstiefen sind vergleichbar. Obwohl die Granulate an sich keinen nennenswerten Frostwiderstand aufweisen, besteht ein Beton mit den Granulaten den CIF-Test. Folglich kann das Granulat zur Betonherstellung verwendet werden, es muss jedoch die DAfStb-Richtlinie für Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen [9] beachtet und es dürfen maximal 5 M.-% der Gesteinskörnung substituiert werden [10].

Aus Japan sind Praxisversuche mit dem Granulat bekannt. Hier wurden bei nichttragenden Bauteilen bis zu 50 M.-% der Gesteinskörnung ersetzt, und aus begleitenden Untersuchungen geht hervor, dass bis zu einer Austauschquote von 30 M.-% die Eigenschaften der Betone im Vergleich zu einem Referenzbeton kaum nennenswert abweichen [4].

2.1.3 Langzeitverzögerer und Recyclinghilfen

Eine weitere Möglichkeit der Wiederverwendung von Restbeton und Waschwasser ist das starke Verzögern des Restbetons durch entsprechende Zusatzmittel und das anschließende „Verschneiden“ mit neuem Frischbeton. Diese Methode war zwischenzeitlich bauaufsichtlich geregelt, wurde in der Praxis jedoch nur sehr selten angewandt.

Grundlage des Verfahrens sind Recyclinghilfen als Zusatzmittel, häufig auch als Langzeitverzögerer bezeichnet. Im Folgenden wird unterschieden, ob sich im Mischer noch Restbeton befindet oder lediglich eine Reinigung der Mischtrommel notwendig ist.

Im ersten Fall wird dem Restbeton die sogenannte Recyclinghilfe zugegeben, die den Hydratationsfortschritt für bis zu 72 Stunden blockiert. Innerhalb dieser Zeit kann der Beton durch Zugabe eines Beschleunigers wieder „aktiviert“ und mit neuem Frischbeton ergänzt werden. Wenn die Menge an neuem Frischbeton mindestens das Vierfache der Menge an Restbeton beträgt und die Zugabemenge der Recyclinghilfe maximal 2,2 % der Zementmenge (bwoc) beträgt, kann auf die Aktivierung durch einen Beschleuniger verzichtet werden, da die Recyclinghilfe nach Zugabe von neuem Frischbeton so schwach konzentriert ist, dass von ihr keine Wirkung mehr ausgeht [19].

Für den Fall, dass nur die Mischtrommel gereinigt werden soll, wird Wasser und die Recyclinghilfe in die Trommel gegeben und durch Rotation die Innenwandung gereinigt. Zu einem späteren Zeitpunkt wird neuer Frischbeton hergestellt, wobei das im Fahrzeug vorhandene verzögerte Restwasser bei der Mischungsberechnung dieses neuen Betons zu berücksichtigen ist. Das verzögerte Restwasser wird dann durch Rotation der Mischtrommel mit dem neuen Frischbeton vermischt [13].

Vorteil dieser Methode ist, dass der im Restbeton enthaltene Zement wirksam bleibt und insbesondere die Verfahrensweise zur Reinigung der Fahrzeuge gut für Transportbetonwerke ohne Frischbetonrecyclinganlage geeignet ist. Nachteilig ist, dass der neue Beton nach der damaligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung maximal die Druckfestigkeitsklasse B25, also C 20/25 nach aktueller Bezeichnung, haben durfte, die Wirkungsweise der Recyclinghilfen und die Verträglichkeit mit anderen Zusatzmitteln nicht vollständig erforscht ist und die Dosierung der Recyclinghilfe sehr genau erfolgen muss. Die erforderliche Dosierung ist dabei abhängig von der Menge, dem Alter und der Temperatur des Restbetons, dessen Zusammensetzung, insbesondere der Zementart, und der gewünschten Verzögerungszeit [19].

Die Recyclinghilfen bestehen aus Phosphonsäuren (2-Phosphonobutan-1,2,4-Tricarbonsäure). Die Verzögerung der Hydratation resultiert aus einer Blockade der Hydratation der Calciumsilikate durch eine schwer lösliche Schicht aus Calciumphosphonat. Die Blockade verhindert, dass Wasser zu den noch nicht hydratisierten Zementpartikeln gelangen kann, sodass der Beton plastisch bleibt. Um das Calciumphosphonat bilden zu können, muss der Zement ausreichend Calcium enthalten. Damit dieses für die Reaktion zur Verfügung steht, ist die durch Calciumsulfat verursachte Bildung von primärem Ettringit und die damit verbundene Bereitstellung von Calcium-Ionen Voraussetzung für die Wirkung von Recyclinghilfen. Ist dies nicht der Fall, ändert die Recyclinghilfe ihre Wirkung. Die Hydratation von C₃A-Phasen wird stark beschleunigt, was ein schnelles Ansteifen zur Folge hat. Erst dann wird die weitere Festigkeitsentwicklung gehemmt, der Beton ist jedoch nach der Hydratation der C₃A-Phasen nicht mehr plastisch und kann somit auch nicht wiederverwendet werden [20].

Versuche an Betonen, die aus verzögertem Restbeton und neuem Frischbeton bestanden, zeigten nach 21 Tagen den gleichen Hydratationsgrad und die gleichen Hydratationsprodukte wie ein nicht verzögerter Referenzbeton. Es konnte eine geringfügige Reduktion der Frühfestigkeiten beobachtet werden, die Endfestigkeiten waren hingegen geringfügig höher. Die Konsistenzerhaltung für 72 Stunden und damit wirkungsvolle Blockierung der Hydratation konnte ebenfalls gezeigt werden. Ein Beton mit einem ursprünglichen Ausbreitmaß von etwa 500 Millimeter besaß 72 Stunden nach Zugabe der Recyclinghilfe immer noch ein Ausbreitmaß von über 400 Millimeter [21].

2.1.4 Erhärten, Brechen und Einsatz als rezyklierte Gesteinskörnung

In den Niederlanden ist es üblich, den Restbeton auf Werksflächen erhärten und nach einiger Zeit brechen zu lassen. Der gebrochene Restbeton, der dann als rezyklierte Gesteinskörnung gilt, kann anschließend bei der Herstellung von neuem Beton Teile der natürlichen Gesteinskörnung ersetzen. Positiv ist die geringe Kapitalbindung, es wird lediglich eine Lagerfläche benötigt, da das Brechen im Regelfall als Fremdleistung eingekauft wird. Insbesondere für Fertigteilwerke bietet sich dieses Verfahren an, da auf gleichem Wege Ausschuss- und Überschussproduktion recycelt werden kann. Problematisch ist, dass das Brechen meist mit Prall- oder Backenbrechern erfolgt und der dabei anfallende Brechsand nach aktuellem Regelwerk, siehe hierzu Kapitel 2.2, zumindest in Deutschland aktuell nicht für die Betonherstellung verwendet werden darf. Ein weiteres Problem ist, dass ein vollständiger Aufschluss der rezyklierten Gesteinskörnung, also eine Trennung der Zementsteinmatrix von der Gesteinskörnung, gewünscht wird, damit die rezyklierte Gesteinskörnung gleichwertig zu natürlicher Gesteinskörnung ist. Anderenfalls ist die Wasseraufnahme und Dauerhaftigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung herabgesetzt. Dieser vollständige Aufschluss ist mit den üblichen Prall- und Backenbecker nicht erreichbar [22].

Für das Ziel des vollständigen Aufschlusses gibt es aktuell verschiedene Verfahrensansätze, die meist noch im Versuchsstadium stecken. In den Niederlanden behandelt man Betonabbrüche bei 300°C thermisch vor, in Japan wählt man den gleichen Verfahrensweg lediglich mit einer deutlich höheren Temperatur. Dadurch dehydriert der Zementstein und verliert infolge dieses Wasserverlustes an Festigkeit und kann in einem nächsten Verfahrensschritt mechanisch über Mühlen und Siebe entfernt werden. Ein weiterer Forschungsansatz ist die thermische Vorbehandlung mit Mikrowellenstrahlung, wobei dieses Verfahren einen noch höheren Energieaufwand bedeutet [22].

Alternativ gibt es das Verfahren der elektrodynamischen Fragmentierung. Grundlage des Verfahrens ist die Erkenntnis, dass die elektrische Durchschlagfestigkeit antiproportional zur elektrischen Leitfähigkeit und abhängig von der Impulsdauer ist. Wasser besitzt somit bei Impulsen kürzer 500 Nanosekunden eine höhere elektrische Durchschlagfestigkeit als Festkörper. Um dies auszunutzen, wird der Betonbruch unter Wasser gelegt und im Wasser befinden sich zwei Hochspannungselektroden. Der elektrische Impuls sucht sich dann den Weg des geringsten Widerstandes, also entlang der Korngrenzen und schwächt dabei das Gestein. Die erste Entladung, welche die Gegenelektrode erreicht, führt zur Ausbildung eines sogenannten Plasmakanals, wobei dessen Ausdehnung und das Verdampfen von Wasser eine Druckwelle erzeugt, die ähnlich einer Sprengstoffexplosion das Gestein entlang der Korngrenzen zerreißt. Vorteil dieser im Bergbau zur Gewinnung von Mineralien und Diamanten bereits eingesetzten Methode ist die selektive und staubfreie Trennung. Aktuell ist jedoch der Energieaufwand für dieses Verfahren so hoch, dass es sich wirtschaftlich nicht lohnt [23; 24]. Eine Abwandlung, die

energetisch etwas günstiger ist, ist die elektrohydraulische Fragmentierung. Hierbei wird die Impulsdauer so eingestellt, dass die elektrische Entladung im Wasser neben dem Betonbruch erfolgt. Die dabei entstehende Druckwelle trennt den Zementstein von der Gesteinskörnung [22]. Beide Verfahren werden aktuell nur im Labormaßstab angewandt.

Ein dritter Verfahrensweg, um den vollständigen Aufschluss zu erreichen, ist die Präparation der Gesteinskörnung vor der Verwendung zur Betonherstellung mit dem Ziel, ein späteres Recycling vorzubereiten. Dazu werden Mineralöle oder Kunstharzdispersionen auf die Oberfläche der Gesteinskörnung aufgetragen, die eine Bildung von Hydratphasen auf der Gesteinskörnung verhindern und somit eine spätere saubere Trennung der Gesteinskörnung vom Zementstein erleichtern. Alternativ gibt es den Ansatz einer Eisenoxid-Beschichtung der Gesteinskörnung in Kombination mit einer thermisch-mechanischen Aufbereitung [22]. Nachteil dieser Methoden ist jedoch die starke Schwächung der Verbundzone Zementstein – Gesteinskörnung, die die Festigkeit und Dauerhaftigkeit herabsetzt. Zudem sind die ökologischen Auswirkungen der Beschichtung, insbesondere wenn die Gesteinskörnung nach dem Recycling mit einer immer noch vorhandenen Beschichtung aus umweltgefährdenden Stoffen der Witterung ausgesetzt ist und Teile dieser Beschichtung ausgewaschen werden und dann in den Boden gelangen, zu hinterfragen. Darüber hinaus sind auch die Kosten dieser Verfahrensweise aktuell noch nicht konkurrenzfähig zu natürlicher Gesteinskörnung, sodass auch dieses Verfahren nur im Labormaßstab existiert.

Alternativ lässt sich selbstverständlich auch Betonbruch mit unvollständigem Aufschluss für die Herstellung von neuem Beton verwenden. Detaillierte Erkenntnisse zur Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung und die gegenüber vollständig aufgeschlossener rezyklierten Gesteinskörnung bzw. gegenüber natürlicher Gesteinskörnung vorhandenen Nachteile können beispielsweise den Berichten des Forschungsvorhaben „R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation“ entnommen werden [25].

2.1.5 Herstellung von Betonwaren

Eine weitere Option für die Verwertung von insbesondere größeren Restmengen an Beton ist die Herstellung von Betonfertigteilen. Das Waschwasser aus der Reinigung von Fahrmischern, Pumpen und der Mischanlage im Transportbetonwerk mit den darin enthaltenen Resten an Beton kann bei dieser Recyclingvariante jedoch nicht wiederverwendet werden.

Bei ausreichenden Personalkapazitäten, Lagerflächen und dem Vorhandensein der notwendigen Geräte sowie eines regionalen Absatzmarktes werden in einigen Werken sogenannte „Legoblocksteine“ aus dem Restbeton hergestellt. Dabei handelt es sich um massive Betonsteine mit einer Länge von 1,60 m bis 2,20 m, einer Breite von 0,80 m bis 1,20 m und einer Höhe von 0,40 m bis 0,60 m. An der Oberseite sind Noppen vorhanden, die in entsprechende Aussparungen in der Unterseite passen, sodass in Kombination mit dem hohen Eigengewicht der Steine beispielsweise Mauern durch Stapelung der Steine ohne Vermörtelung hergestellt werden können. Da die Steine lediglich auf Druck belastet werden, ist es möglich dem Restbeton sonst zu deponierendes Abbruchmaterial beizugeben. Im Normalfall wird die Befüllung der Schalung mit der Restbetonmenge eines Mixers nicht möglich sein, daher bietet sich ein Einbau nass in nass oder ein Einbau nass auf trocken an, wobei bei der zweiten Variante eine Verdübelung der Betonlagen über Bewehrungseisen erforderlich ist. Teilweise werden auch Betonplatten als Großpflaster oder Wellenbrecher aus dem Restbeton hergestellt [14; 26]. Ob es sich bei dieser

Methode jedoch um eine Wiederverwendung im Sinne einer Kreislaufwirtschaft handelt, ist zu hinterfragen, da der Beton einer eher minderwertigen Verwertung zugeführt wird.

2.2 Normative Vorgaben

2.2.1 Vorgaben für die Wiederverwendung von Restbetonzuschlag

DIN EN 206-1 [6] definiert als wiedergewonnene Gesteinskörnung die Gesteinskörnung, die durch das Waschen von Frischbeton gewonnen wird.

Grundlegende Regeln für die Verwendung wiedergewonnener Gesteinskörnung finden sich in DIN EN 206-1 Abschnitt 5.2.3.3 [6]. Demnach darf wiedergewonnene Gesteinskörnung für die Betonherstellung innerhalb eines Herstellwerkes bzw. innerhalb einer Gruppe von Herstellerwerken verwendet werden. Darf die wiedergewonnene Gesteinskörnung für die Betonherstellung verwendet werden, wird differenziert, ob die wiedergewonnene Gesteinskörnung getrennt aufbereitet wurde oder nicht. Fand keine Siebung statt, darf die wiedergewonnene Gesteinskörnung maximal 5 % der Gesamtmenge der Gesteinskörnung ersetzen. In diesem Fall ist keine Bewertung der Gesteinskörnungseigenschaften nach DIN EN 12620 [5], DIN 4226-101 [27] und DAfStb „Alkali-Richtlinie“ gefordert [28]. Wird eine Austauschquote größer 5 % verwendet, werden verschiedene Bedingungen gestellt. Erstens muss die wiedergewonnene Gesteinskörnung in feine und grobe Gesteinskörnung aufgeteilt werden. Zweitens muss die dann getrennte wiedergewonnene Gesteinskörnung DIN EN 12620 [5] entsprechen. Drittens gelten für die wiedergewonnene Gesteinskörnung dann die Regelwerke für rezyklierte Gesteinskörnung, die im folgenden Abschnitt dargestellt sind.

In DIN 1045-2 [7], als nationales Anwendungsdokument zu DIN EN 206-1 [6], findet sich ergänzend zu den zuvor dargestellten Anforderungen die Vorgabe, dass die wiedergewonnene Gesteinskörnung so lange ausgewaschen werden muss, bis keine Kornbindung mehr vorliegt und somit ein gleichmäßiges Untermischen möglich ist.

Ergänzende Regeln findet sich in einer Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau (DAfStb). In DIN 4226-1 Tabelle 1 [29] ist die zulässige Kornzusammensetzung unterschiedlicher Korngruppen tabelliert, demnach muss geprüft werden, ob nach Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung das Gemisch aus der größten Korngruppe und aus der wiedergewonnenen Gesteinskörnung die geforderte Kornzusammensetzung erreicht, wobei insbesondere ein Überschreiten des zulässigen Anteiles an Unterkorn zu prüfen ist. Im Anschluss findet sich eine Anforderung an den Restbetonzuschlag bei Verwendung für Betone mit besonderen Eigenschaften, hierfür muss die wiedergewonnene Gesteinskörnung den entsprechenden Anforderungen an die Gesteinskörnung beispielsweise hinsichtlich Frost-Tau-Widerstand entsprechen.

In der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [9] findet sich eine weitere Regelung zu wiedergewonnener Gesteinskörnung, wobei der Anwendungsbereich dieser Regel nicht auf wiedergewonnene Gesteinskörnung aus dem Frischbetonrecycling beschränkt ist, sondern auch andere Verfahren des Restbetonrecyclings mit einschließt und auch auf Ausschuss oder Überschussproduktion in Fertigteilwerken angewandt werden darf. Die aus dem Recycling von Restbeton, Ausschuss- oder Überschussproduktion erhaltene rezyklierte Gesteinskörnung darf

innerhalb des Betonwerkes ohne weitere Einschränkungen, ohne erweiterte Erstprüfung und ohne erweiterte Produktionskontrolle sowie ohne Kennzeichnung bis zu einem Anteil von 5 M.-% der Gesamtmenge an Gesteinskörnung für die Betonherstellung verwendet werden.

2.2.2 Vorgaben für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung

Rezyklierte Gesteinskörnung wird in DIN EN 12620 [5] als „Gesteinskörnung aus aufbereitetem anorganischem Material, welches zuvor als Baustoff eingesetzt war“ definiert.

Reglementiert wird sie nach durch die Normen DIN EN 12620 [5], DIN 4226-101 [27] und DIN 4226-102 [30]. Für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung in Beton ist DIN EN 206-1 [6]/DIN 1045-2 und die DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [9] zu beachten.

DIN 4226-101 [27] definiert in Abhängigkeit der stofflichen Zusammensetzung, die nach DIN EN 933-11 [31] zu bestimmen ist, vier Typen an rezyklierter Gesteinskörnung, wobei lediglich Typ 1, häufig auch als Betonsplitt bezeichnet, und Typ 2 bzw. Bauwerkssplitt zur Herstellung von Betonen nach DIN EN 206-1 [6]/DIN 1045-2 [7] verwendet werden dürfen. Dabei darf nur der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung mit einer Korngröße größer 2 mm für Betone bis zu einer Festigkeitsklasse C 30/37 für bestimmte Expositionsklassen verwendet werden. Der Brechsand kleiner 2 mm darf in Deutschland nicht zur Betonherstellung eingesetzt werden. Die Verwendung für Spann- oder Leichtbeton ist nicht erlaubt. Auf dem Lieferschein der hergestellten Betone ist die Verwendung „rezyklierter Gesteinskörnung“ anzugeben und es wird neben einer umfangreicheren Produktionskontrolle auch eine erweiterte Erstprüfung gefordert.

Bei Verwendung von aus dem Restbeton entstandener rezyklierter Gesteinskörnung ergeben sich zwei wesentliche Vorteile im Vergleich zu üblicher rezyklierter Gesteinskörnung aus dem Rückbau von Bauwerken: Erstens ist die Herkunft bekannt und zweitens liegt ein sehr sortenreiner Betonsplitt vor, der nahezu vollständig aus dem Bestandteil Rc besteht.

2.2.3 Vorgaben für die Verwendung von Restwasser

Nach DIN EN 206-1 [6] darf Wasser, das aus der Betonherstellung wiedergewonnen wurde, alleine oder in Kombination mit Trink- bzw. Grundwasser zur Betonherstellung verwendet werden, wenn es die Anforderungen nach DIN EN 1008 [32] erfüllt. Im nationalen Anwendungsdokument zur DIN EN 206-1 [6], der DIN 1045-2 [7], wird die Verwendung von Restwasser bei hochfesten Betonen und Betonen mit Luftporenbildner ausgeschlossen.

In der DIN EN 1008 [32], die aus der Restwasser-Richtlinie des DAfStb [33] hervorgegangen ist, wird Restwasser als „Wasser aus dem Restbeton, Wasser, das zum Reinigen des Innenraums der Mischtrommel von stationären Mischern, Fahrmischern und der Betonpumpen verwendet wurde, Brauchwasser, das beim Sägen, Schleifen oder Wasserstrahlen von Festbeton anfällt [und] Wasser, das während der Herstellung von Frischbeton anfällt“, definiert. Da in diesem Wasser Feststoffe kleiner 0,25 mm enthalten sind, muss das Restwasser so zwischengelagert werden, dass diese Feststoffe entweder homogen im Wasser verteilt sind, dafür ist im Normalfall ein Rührwerk erforderlich, oder sich absetzen können, was eine ausreichend lange Zwischenlagerung erfordert. Die im Wasser enthaltenen Feststoffe dürfen im Normalfall maximal 1 M.-% der Gesamtmenge der Gesteinskörnung ausmachen und sind bei der

Mischungsberechnung, insbesondere bei der Bestimmung des Mehlkorngeltes, zu berücksichtigen. Der Gehalt an gelösten Feststoffen ist über die tägliche Bestimmung der Dichte zu berechnen. Die Messung der Dichte hat zum Zeitpunkt der höchsten zu erwartenden Dichte zu erfolgen. Die Eignung des Restwassers als Zugabewasser ist regelmäßig zu überprüfen, hierfür existieren Höchstgehalte für Chloride, Schwefel und Alkalien sowie schädliche Verunreinigungen wie Zucker, Phosphate, Nitrate, Blei und Zink. Weiter müssen der Erstarrungsbeginn und die Druckfestigkeit Anforderungen im Vergleich zu mit destilliertem Wasser hergestellten Proben erfüllen. Das Restwasser sollte möglichst gleichmäßig auf die Tagesproduktion verteilt werden, wobei die Eignungsprüfung dann ebenfalls an mit Restwasser hergestellten Probekörpern zu erfolgen hat und bei Betonen mit besonderen Eigenschaften Restwasser nur sehr vorsichtig zu verwenden ist [34].

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Arbeitspaket 1

Ablauf:

In diesem Arbeitspaket sollte eine Ist-Analyse zur Verwertung von Restbeton in Betonwerken erfolgen. Dabei sollten die vorhandene Anlagentechnik und die Massenströme in den Werken erfasst werden. Dazu wurde zunächst eine Umfrage entwickelt, die die offenen Fragen klären sollte. Dies waren beispielsweise folgende Fragen:

- Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk?
- Welche Arten von Gesteinskörnung werden verwendet?
- Wie hoch sind die Restbetonmengen im Durchschnitt?
- Wie wird mit den Restbetonmengen verfahren?
- Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll?

Dies ist nur ein kleiner Überblick über die gesamte Umfrage. Der gesamte Umfragebogen mit allen Antwortmöglichkeiten findet sich im Anhang Abschnitt 10.1 des Berichts.

Die Umfrage wurde als Online-Umfrage aufgebaut und unter anderem über den Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. (BTB) an die Mitgliedswerke verteilt. Angesprochen wurden sowohl Transportbetonunternehmen als auch Betonfertigteilterwerke. Die Umfrage wurde prinzipiell anonym durchgeführt. Allerdings gab es für den Fall, dass die Bereitschaft bestand das Projekt auch im weiteren Verlauf zu unterstützen, eine Möglichkeit für die Unternehmen Kontaktdaten zu hinterlassen. Auf diese Weise sollten erste Kontakte zu möglichen Projektpartnern für die weiteren Arbeitspakete geknüpft werden. Geplant war eine Dauer von etwa drei Monaten für diese Projektphase. Allerdings wurde sie nach einer zunächst geringen Beteiligung an der Umfrage verlängert, um mehr Datensätze zur Auswertung zu erhalten.

Anhand der erhaltenen Daten sollte nach Möglichkeit der maximale wirtschaftliche Aufbereitungsaufwand der Gesteinskörnung beziffert werden und eine erste Abschätzung erfolgen, wie hoch der Anteil an wiedergewonnener Gesteinskörnung sein müsste, um sämtlichen anfallenden Restbeton wieder in den Produktionskreislauf zurückzuführen.

Ergebnisse und Diskussion:

Eine Übersicht über alle Ergebnisse findet sich im Anhang Abschnitt 11.2.

In Deutschland gibt es rund 530 Unternehmen, die in rund 1835 Anlagen Transportbeton herstellen [3]. Zusätzlich gibt es noch eine große Anzahl an Betonfertigteilherstellern. An der hier durchgeführten Umfrage haben sich 87 Betonhersteller beteiligt. Verglichen mit der großen Anzahl an Unternehmen, ist diese Zahl mit Sicherheit als gering anzusehen, trotzdem muss man von einer guten Resonanz ausgehen, da es sich um eine freiwillige Umfrage gehandelt hat. Aus den erhaltenen Antworten lassen sich deshalb nur bedingt Rückschlüsse auf die Gesamtsituation ziehen, aber es lassen sich doch einige eindeutige Tendenzen erkennen, die Hinweise für den weiteren Verlauf des Projekts aufzeigen.

Da sich die Umfrage sowohl an Transportbetonhersteller als auch Betonfertigteilwerke richtete, wurde zuerst diese Kategorie abgefragt, da sich die folgenden Fragen in Abhängigkeit der hier gewählten Kategorie leicht unterscheiden. Der Großteil der teilnehmenden Werke waren in diesem Fall jedoch Transportbetonwerke. In Zahlen ausgedrückt bedeutet dies, dass es sich bei 73 der teilnehmenden Werke um Transportbetonwerke handelte (84 %) und nur 14 Betonfertigteilwerke an Umfrage teilgenommen haben (16 %) (vgl. Abb.3.1).

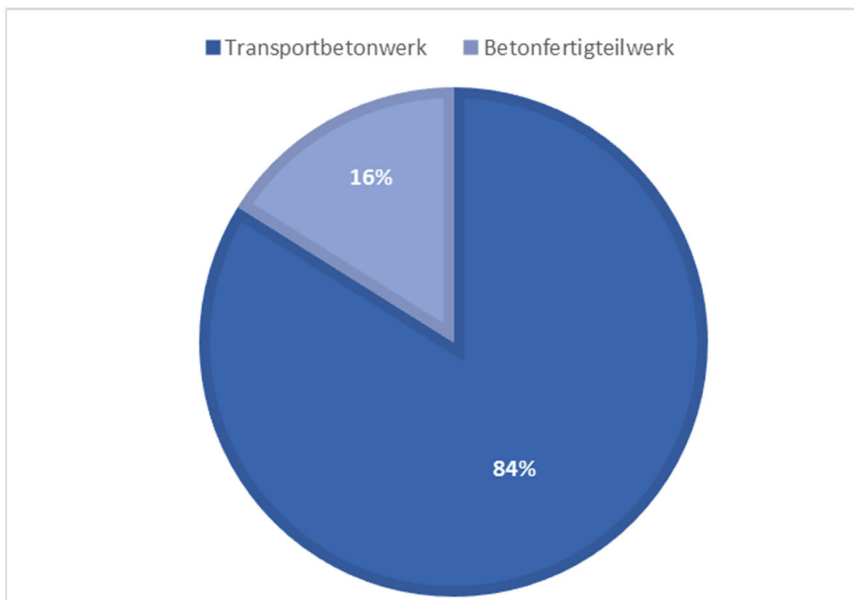


Abbildung 3.1: Verteilung der teilnehmenden Werke in Abhängigkeit der Kategorie Transportbeton bzw. Betonfertigteilwerk

Eine der zentralen Fragen war, ob eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.-%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung ohne Prüfung wieder eingesetzt werden darf, als sinnvoll erachtet wird. Diese Frage wurde von den Umfrageteilnehmern überwiegend bejaht. Sowohl Transportbetonunternehmen als auch Betonfertigteilwerke befürworteten eine solche Erhöhung der Grenzwerte (vgl. Abb 3.2 und 3.3), was für das Projekt als positiv zu bewerten ist und der primären Zielsetzung des Vorhabens entspricht.

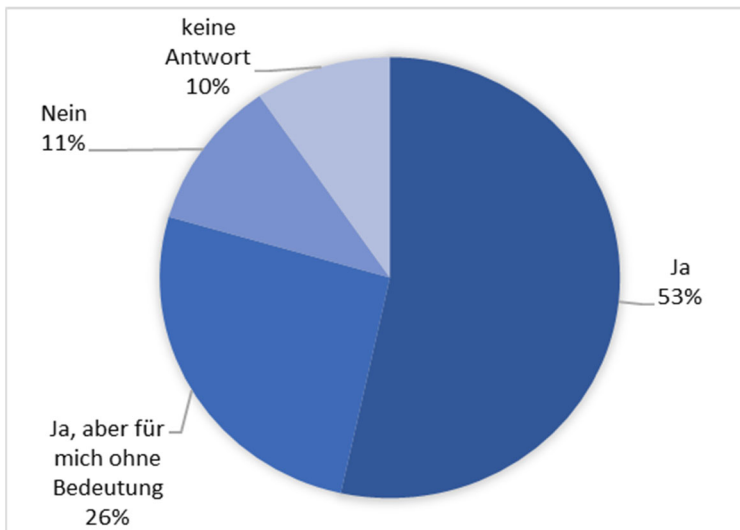


Abbildung 3.2: Umfrageergebnis der Transportbetonwerke für die Frage „Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll?“

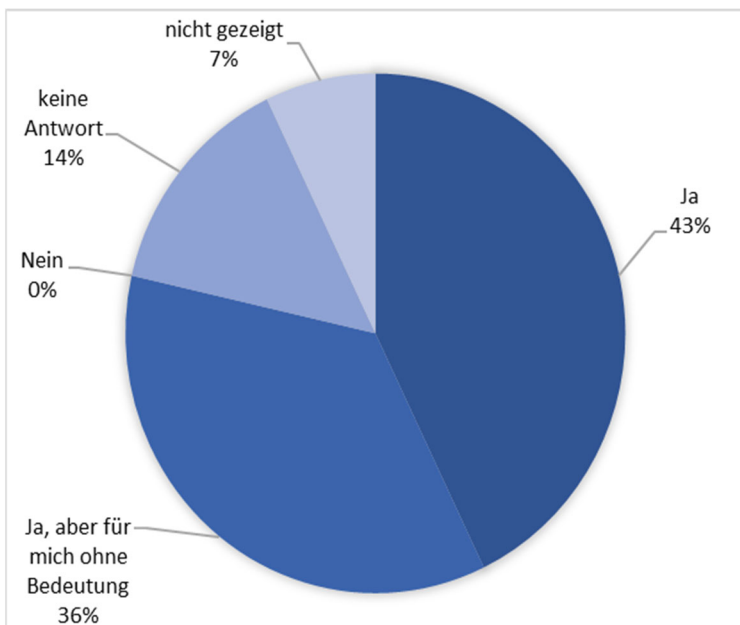


Abbildung 3.3: Umfrageergebnis der Betonfertigteilwerke für die Frage „Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung, ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll?“

Zusätzlich hatten die Teilnehmer an dieser Stelle die Möglichkeit ihre Antwort zu kommentieren. Dabei hat sich herauskristallisiert, dass viele eine Erhöhung befürworten, da sie es für eine wirtschaftliche und ressourcenschonende Möglichkeit halten, das wiedergewonnene Material im Beton wieder einzusetzen (z. B.: „wirtschaftlich sinnvoll“, „sinnvoller Stoffkreislauf von bekannten Materialien“, „ökologisch wie ökonomisch sinnvoll“). Darüber hinaus wurde mehrfach angeführt, dass die Verwendung des Materials als „unkritisch“ bzw. „unbedenklich hinsichtlich seiner Eignung, da aus eigener Produktion“ angesehen wird. Als weiterer Punkt wird die Vereinfachung des Umgangs mit wiedergewonnener Gesteinskörnung angeführt („..., das Handling vereinfacht würde“), da die aktuell erlaubten 5 M.-% verfahrenstechnisch schwer umzusetzen sind („..., 5 % für die meisten Waagen nicht zu dosieren sind“), ebenso wie sich dadurch verhindern ließe, dass sich das Material auf Halden sammelt, da es nicht direkt wieder zugegeben werden kann („...,

weil sich Recyclingmaterial nicht immer direkt zugeben lässt. Es bilden sich Halden, die erst nach und nach dem 16-22 zugegeben werden können.“). Als Gegenargument wird in erster Linie angeführt, dass das anfallende Material schon jetzt vollständig auf anderem Wege verwertet werden kann, bzw. die aktuell zulässigen 5 % für eine vollständige Verwertung der anfallenden Mengen ausreichen („... , weil wir schon jetzt anders verwerten“, ... , weil nahezu 100 % Wiederverwertung“). Einige wenige geben auch an, dass sie befürchten, dass die Betonqualität darunter leiden könnte („... , weil ich der Meinung bin, dass die Betonqualität leidet und die Schadensfälle zunehmen“). Die Gegenstimmen sind jedoch deutlich geringer.

Da die Resonanz bei den Transportbetonunternehmen deutlich größer war, als die der Betonfertigteilwerke, sollen an dieser Stelle in erster Linie die Ergebnisse dieser Gruppe beleuchtet werden. Die Ergebnisse der Betonfertigteilwerke finden sich jedoch im Anhang Abschnitt 10.2.

Zunächst ist die räumliche Verteilung der teilnehmenden Werke zu betrachten. Eine Übersicht ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

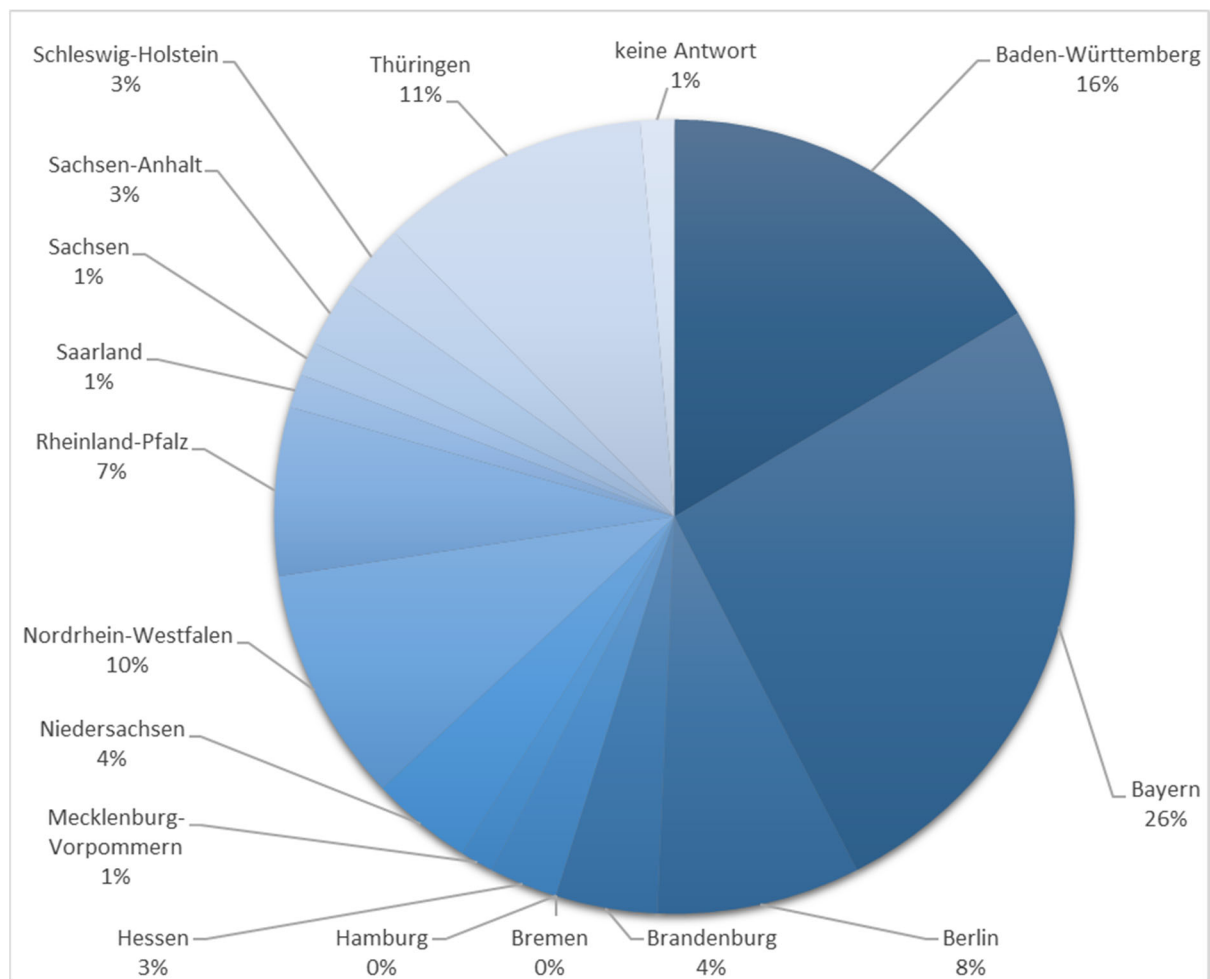


Abbildung 3.4: Standorte der teilnehmenden Transportbetonwerke bezogen auf das Bundesland

Wie in Abbildung 3.4 zu erkennen, finden sich die meisten teilnehmenden Werke in Bayern (26 %) und Baden Württemberg (16 %). Auch in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz haben einige Werke teilgenommen. Die Stadtstaaten Hamburg und Bremen sind dagegen nicht vertreten. Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Anteilen der Bundesländer an der Gesamtproduktion von

Transportbeton, wie in Abbildung 3.5 dargestellt, fällt auf, dass die Verteilung hier sehr ähnlich ausfällt. Mit rund 20 % hat Bayern den größten Anteil an der Gesamtproduktion von Transportbeton, gefolgt von Baden-Württemberg mit etwa 17 %. Hamburg hat mit 2,6 % dagegen einen deutlich geringeren Anteil. Dies zeigt, dass die Situation der Betonproduktion trotz nicht vollzähliger Beteiligung in gewissem Maße wiedergespiegelt wird.

Der Anteil der teilnehmenden Werke aus den einzelnen Bundesländern entspricht in weiten Teilen den Verhältnissen an der Gesamtproduktion von Transportbeton.

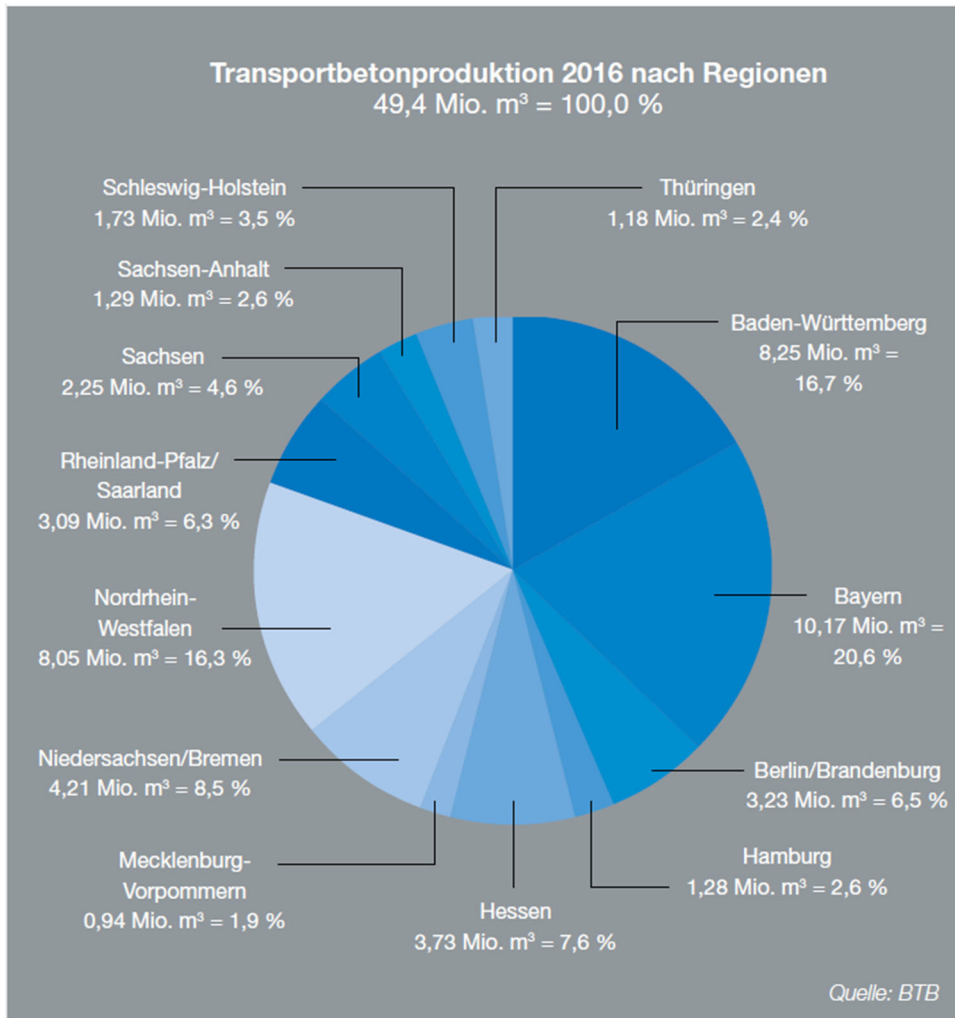


Abbildung 3.5: Transportbetonproduktion nach Regionen im Jahr 2016 [35]

Relativ deutliche Tendenzen zeigen sich bei den verwendeten Gesteinskörnungen. 64 % der Transportbetonwerke verwenden ausschließlich Kies als Gesteinskörnung. 21 % der Werke verwenden zusätzlich Splitt. Lediglich 6 % der Werke setzen auch RC-Gesteinskörnung ein.

Die durchschnittliche Tagesproduktion an Frischbeton ist dagegen deutlich weniger klar verteilt. In einem Bereich von 25 m³ bis über 500 m³ ist alles vertreten (vgl. Abb. 3.6). 10 % der Werke haben hier keine Antwort gegeben. Der größte Anteil liegt mit 41 % bei einer Tagesproduktion von 100 m³ bis 250 m³ Frischbeton.

Auch die Restbetonmengen sind nicht so eindeutig verteilt (vgl. Abb. 3.7). 32 % der Werke geben an, weniger als 2,5 m³ Restbeton zu haben, 30 % entfallen auf den Bereich 2,5 m³ bis 5,0 m³. 7 % der Werke haben Restbetonmengen von mehr als 20 m³.

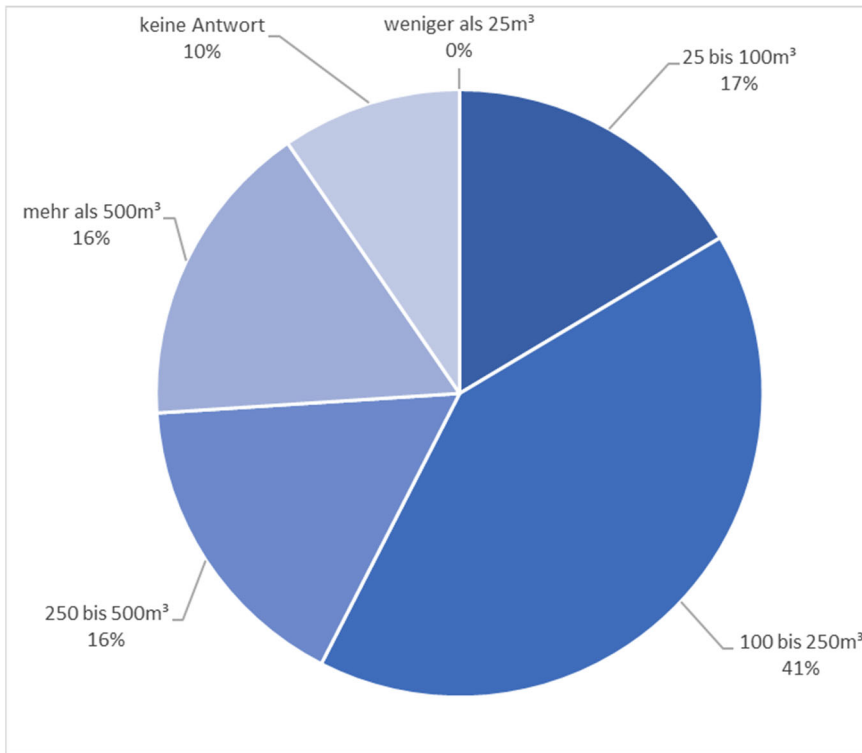


Abbildung 3.6: Durchschnittliche Tagesproduktion der Transportbetonwerke

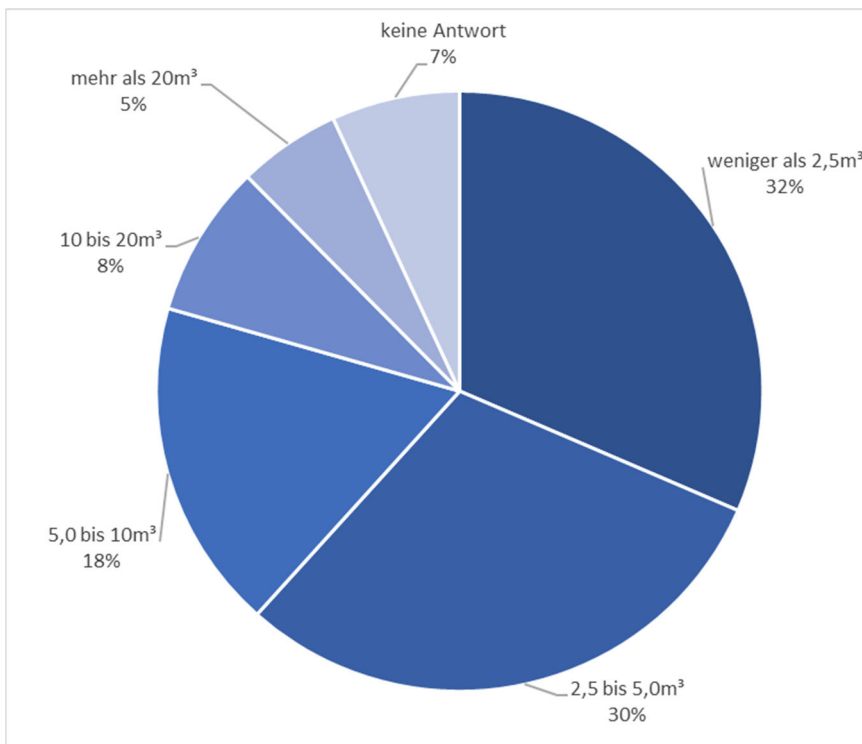


Abbildung 3.7: Durchschnittliche Restbetonmenge pro Tag pro Transportbetonwerk

Betrachtet man die Zahlen differenzierter, wird außerdem deutlich, dass sie in keinem direkten Zusammenhang stehen. Eine hohe Tagesproduktion führt nicht automatisch zu hohen Restbetonmengen und umgekehrt. In Abbildung 3.8 sind die durchschnittlichen Restbetonmengen der Werke mit einer durchschnittlichen Tagesproduktion von Frischbeton zwischen 100 m³ und 250 m³ dargestellt. Hier ist der komplette Bereich des Restbetons von < 2,5 m³ bis 20 m³ abgedeckt.

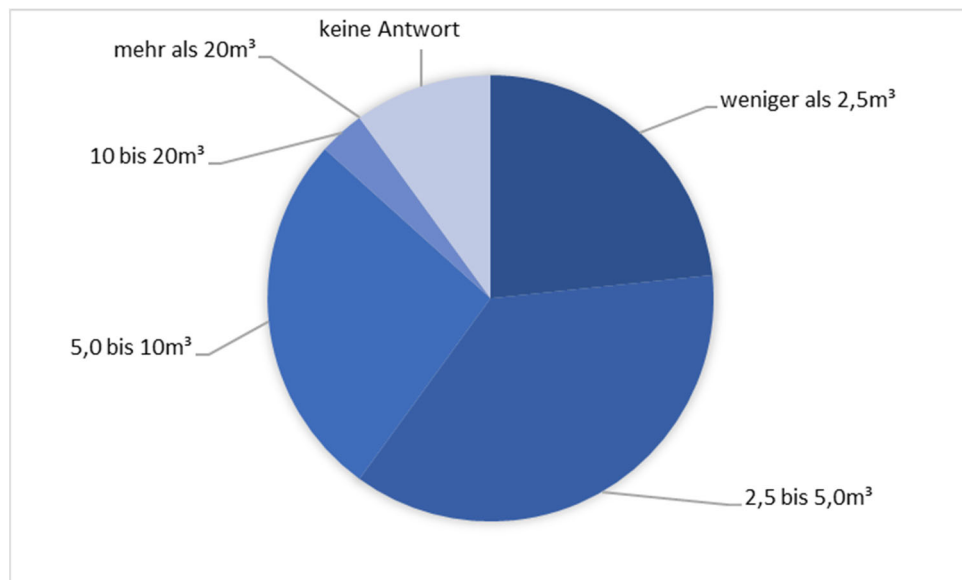


Abbildung 3.8: Verteilung der durchschnittlichen Restbetonmengen der Werke mit einer Tagesproduktion von 100 m³ bis 250 m³ Frischbeton

Deutlicher ist die Lage bei der im Werk vorhandenen Anlagentechnik. Rund 88 % der teilnehmenden Werke verfügen über eine Frischbetonrecyclinganlage, doch nur 8 % verfügen über Brecheranlagen zum Zerkleinern von Festbeton (vgl. Tabelle 3.1). Auch Siebanlagen zur weiteren Aufbereitung der Gesteinskörnung sind in nur wenigen Werken vorhanden.

Tabelle 3.1: In den Werken vorhandene Anlagentechnik zum Umgang mit den Restbetonmengen. Insgesamt stammen die Daten aus 73 Werken. Mehrfachnennungen waren möglich

Anlagentechnik	Anzahl	Prozent
Frischbetonrecyclinganlage	64	88 %
Brecher zum Zerkleinern von Festbeton	6	8 %
Siebanlage	4	5 %
Sonstiges	13	18 %

Nach diesen Werten, verwundert es nicht, dass 70 % der Unternehmen als Verfahrensweg für die Verwertung von Restbetonmengen unter anderem Frischbetonrecycling angeben, während das Brechen von erhärtetem Restbeton nur in sehr kleinem Umfang betrieben wird. In Abbildung 3.9 ist der Umgang der Transportbetonunternehmen mit den Restbetonmengen differenzierter dargestellt. Mehrfachnennungen waren hier möglich, so dass der Anteil an Frischbetonrecycling als Verfahrensweg insgesamt bei 39 % liegt. Dies ist die verbreitetste Methode. Erhärten, Brechen und die anschließende Verwendung als RC-Gesteinskörnung hat auch hier mit 4 % nur einen sehr geringen Anteil. Die Herstellung von Betonwaren ist dagegen ebenfalls eine verbreitete Methode. In 25 % der Fälle erfolgt jedoch eine Entsorgung, so dass das Material nicht mehr in den Stoffkreislauf zurückgeführt wird.

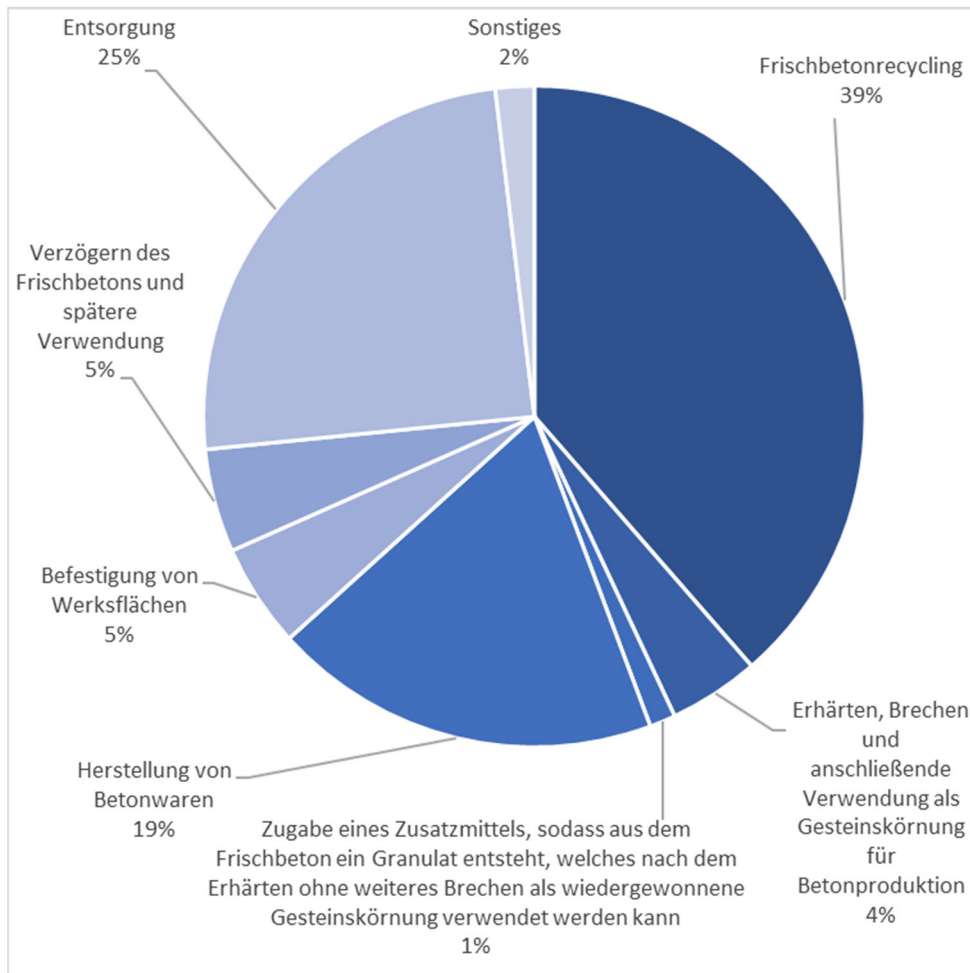


Abbildung 3.9: Umgang mit Restbetonmengen

Einige weitere Fragen beschäftigten sich damit, was mit der wiedergewonnenen Gesteinskörnung aus dem Frischbetonrecycling geschieht. Die Frage richtete sich nur an die Unternehmen, die auch tatsächlich Frischbetonrecycling betreiben. Zunächst wurde erfragt, ob die Unternehmen ihre wiedergewonnene Gesteinskörnung im Beton einsetzen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Ca. 40 % der Unternehmen setzen die Gesteinskörnung innerhalb der erlaubten Grenzen wieder ein. Eine weitere Aufbereitung, damit auch höhere Anteile eingesetzt werden können, wird in keinem Unternehmen durchgeführt. Was mit der nicht wiederverwendeten Gesteinskörnung geschieht ist in Abbildung 3.10 gezeigt. Ein großer Teil geht als Verfüllmaterial in den Straßenbau und in 36 % erfolgt eine kostenpflichtige Entsorgung des Materials.

Tabelle 3.2: Wiedereinsatz der Gesteinskörnung in der Betonherstellung (Je nach vorherigen Angaben, wurde die Frage nicht allen Teilnehmern gezeigt)

Antwort	Anzahl	Prozent
Nein	29	40 %
Ja, bis zu einem Anteil von 5 M.% der Gesamtgesteinskörnung	30	41 %
Ja, mit einem Anteil von 5 M.% der Gesteinskörnung mit vorheriger Siebung und Prüfung gemäß DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620"	0	0 %
keine Antwort	3	4 %
Nicht gezeigt	11	15 %

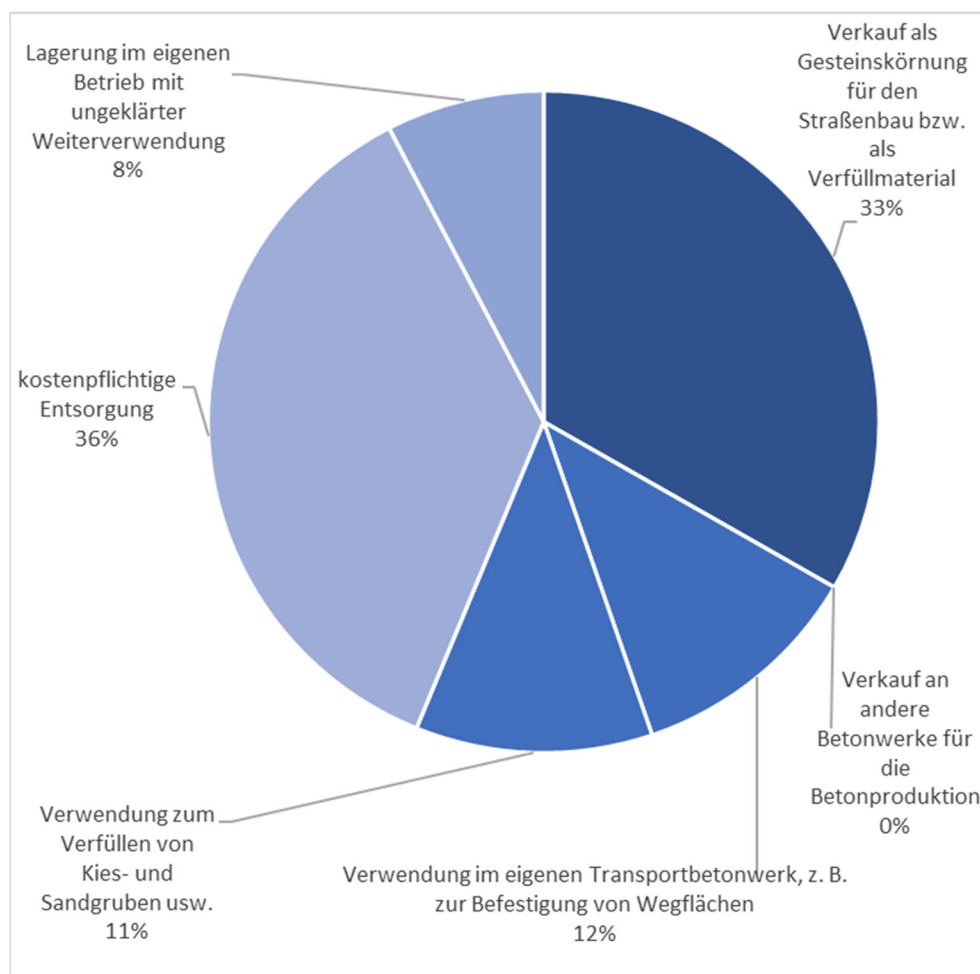


Abbildung 3.10: Umgang mit Gesteinskörnung die nicht im Beton eingesetzt wird

Die Umfrage hat gezeigt, dass generell ein Interesse an der Erhöhung der 5 M.-% Grenze besteht. Auf diese Weise könnten größere Mengen Gesteinskörnung wieder eingesetzt werden, ohne größere Aufbereitungsmaßnahmen ergreifen zu müssen. Aktuell muss Material, das nicht direkt wieder eingesetzt werden kann, noch auf Halden gesammelt werden. Hier besteht die Gefahr, dass das Material durch evtl. anhaftende Zementreste nachhärten verklumpt und dann zusätzliche Aufbereitung nötig wird. Da der Großteil der Unternehmen über eine

Frischbetonrecyclinganlage verfügt, ist dies auch die meistverwendete Variante im Umgang mit Restbetonmengen. Das anschließende Brechen von erhärtetem Restbeton hat dagegen in Transportbetonwerken keine so große Bedeutung. Außerdem hat sich gezeigt, dass sich die Tagesproduktionsmengen und die Restmengen von Werk zu Werk stark unterscheiden können. Darüber hinaus besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Frischbetonmenge und den anfallenden Restbetonmengen. Werke mit großer Tagesproduktion haben nicht automatisch auch große Mengen an Restbeton. Vielmehr scheinen hier auch die äußeren Begleitumstände, wie beispielsweise die Art der belieferten Baustellen oder ob ungeplant volle Fahrmischer zurückkommen, entscheidend zu sein. Die wiedergewonnene Gesteinskörnung wird nur in wenigen Werken zur Betonherstellung verwendet, da die verfahrenstechnische Umsetzung zum Teil aufwändig ist.

3.2 Arbeitspaket 2

Ablauf:

Im Arbeitspaket 2 sollte eine Analyse der Materialeigenschaften von der wiedergewonnenen Gesteinskörnung durchgeführt werden. Dazu wurden auf Basis der in Arbeitspaket 1 erhaltenen Datensätze verschiedene Werke ausgewählt, in denen über einen Zeitraum von mindestens drei Monaten stichprobenartig Proben der wiedergewonnenen Gesteinskörnung genommen wurden. Dabei wurde versucht, einen möglichst großen Raum in Deutschland und möglichst verschiedene Werke abzudecken. Aus logistischen Gründen liegen die Werke jedoch eher im süddeutschen/westdeutschen Raum. Dies entspricht jedoch in gewisser Weise auch den Ergebnissen der Ist-Analyse, da die Resonanz hier am größten war und die Dichte der Betonwerke hier auch höher ist als im restlichen Deutschland. Insgesamt wurden sieben Werke an folgenden Standorten beprobt:

- Kaiserslautern
- Köln
- Stuttgart
- München
- Karlsruhe
- Neumarkt i. d. Oberpfalz
- Deching

In Abbildung 3.11 sind die Standorte dargestellt.

stadplans.com



Abbildung 3.11: Übersichtskarten der beteiligten Werke

In allen Werken wurden Proben wiedergewonnener Gesteinskörnung aus dem Frischbetonrecycling genommen. Eine regelmäßige Probenahme aus dem gebrochenen Material war nicht möglich, da hier in der Regel das Material über einen längeren Zeitraum gesammelt und in unregelmäßigen Abständen gebrochen wird. Darüber hinaus hat die Umfrage gezeigt, dass dieses Verfahren nur eine geringe Marktanwendung/Verbreitung beim Umgang mit Restbetonmengen hat. Die verbreitetste Variante ist das Frischbetonrecycling.

Im Durchschnitt wurden vier bis fünf Proben in den Werken im Untersuchungszeitraum genommen. Bei der ersten Probenahme wurde zusätzlich eine Besichtigung des Werks durchgeführt, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Werke besser beurteilen zu können. Aufgrund der räumlichen Verteilungen wurden die folgenden Probenahmen durch das Werkspersonal durchgeführt und per Post an die Forschungseinrichtung verschickt. Der Probenumfang lag daher im Schnitt bei 20 kg – 30 kg.

In den Laboren der Forschungseinrichtung wurde die Charakterisierung der Gesteinskörnung vorgenommen. Neben der Sieblinie wurden die Rohdichte und die Wasseraufnahme bestimmt. Bei der Wasseraufnahme wurde nicht nur der Wert nach 24 Stunden, sondern auch nach 10, 20, 60 und 120 Minuten bestimmt, um den zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme nachverfolgen zu können. Wo möglich, wurde auch der Feinanteil bestimmt.

Ergebnisse und Diskussion:

Tabelle 3.3: Übersicht über verwendete Primärgesteinskörnungen und Aufbereitungsmethoden der Werke

Werk	1	2	3	4	5	6	7
Eingesetzte Gesteinskörnungen							
Kies	X	X	X	X	X		X
Splitt	X		X			X	X
Aufbereitung							
Recyclinganlage	X	X	X	X	X	X	X
Siebanlage	X		X				
Externe Aufbereitung		X					
Wiederverwendung des Materials	X	X	X				X

Wie in Tabelle 3.3 dargestellt, unterscheiden sich die untersuchten Werke sowohl in der verwendeten Gesteinskörnung als auch in ihrer technischen Ausstattung. Ebenso wird mit der wiedergewonnenen Gesteinskörnung unterschiedlich verfahren. Kies ist die am weitesten verbreitete Primärgesteinskörnung, drei der Werke setzen zusätzlich auch Splitt ein und nur ein Werk verwendet ausschließlich Splitt. Die Werke 1 und 3 verfügen zusätzlich über Siebanlagen zur weiteren Aufbereitung der wiedergewonnenen Gesteinskörnung. Doch auch hier bestehen deutliche Unterschiede. Während in Werk 1 lediglich ein grobes Sieb vorhanden ist, um Gesteinsbrocken > 32 mm abzusieben, kann Werk 3 auch die Sandfraktion (< 2 mm) absieben. Werk 2 gibt die Gesteinskörnung zum Teil zu einem externen Aufbereiter, um sie danach wieder als normale Gesteinskörnung einsetzen zu können. Beim Besuch der Werke hat sich außerdem gezeigt, dass sich auch die Anlagen zur Betonherstellung unterscheiden. Platzangebot und Anlagentechnik variieren von Werk zu Werk.

Die Probenahme erfolgte jeweils an einer geeigneten Stelle im Aufbereitungsprozess der einzelnen Werke. Meist war diese direkt nach der Auswaschanlage. In Werk 1 wurde die Probe erst nach der Siebung entnommen.

In den Abbildungen 3.12 bis 3.18 sind die Korngrößenverteilungen der untersuchten Proben aus den einzelnen Werken dargestellt. Nahezu alle Sieblinien haben ein Größtkorn von maximal 16 mm. Es wird jedoch deutlich, dass die Unterschiede zwischen den Werken zum Teil sehr groß sind.

Einige Werke verwenden sehr regelmäßige Sieblinien. Werk 6 hat eher eine Ausfallkörnung. Auch innerhalb eines Werkes können die Sieblinien stark variieren. Dies ist vor allem bei Werk 4 zu erkennen (vgl. Abb. 3.15). Die Abweichungen zwischen den einzelnen Sieblinien sind sehr groß. Die größte Sieblinie nähert sich bereits einer A32 Sieblinie an, die feinste liegt dagegen schon im Bereich von einer C8 Sieblinie. Werk 1 zeigt eine eher gleichmäßige Korngrößenverteilung, was sicherlich auch daran liegen kann, dass hier ein zusätzlicher Arbeitsschritt zur Aufbereitung des Materials erfolgt. Werk 3 verfügt ebenfalls über eine relativ gleichmäßige Korngrößenverteilung.

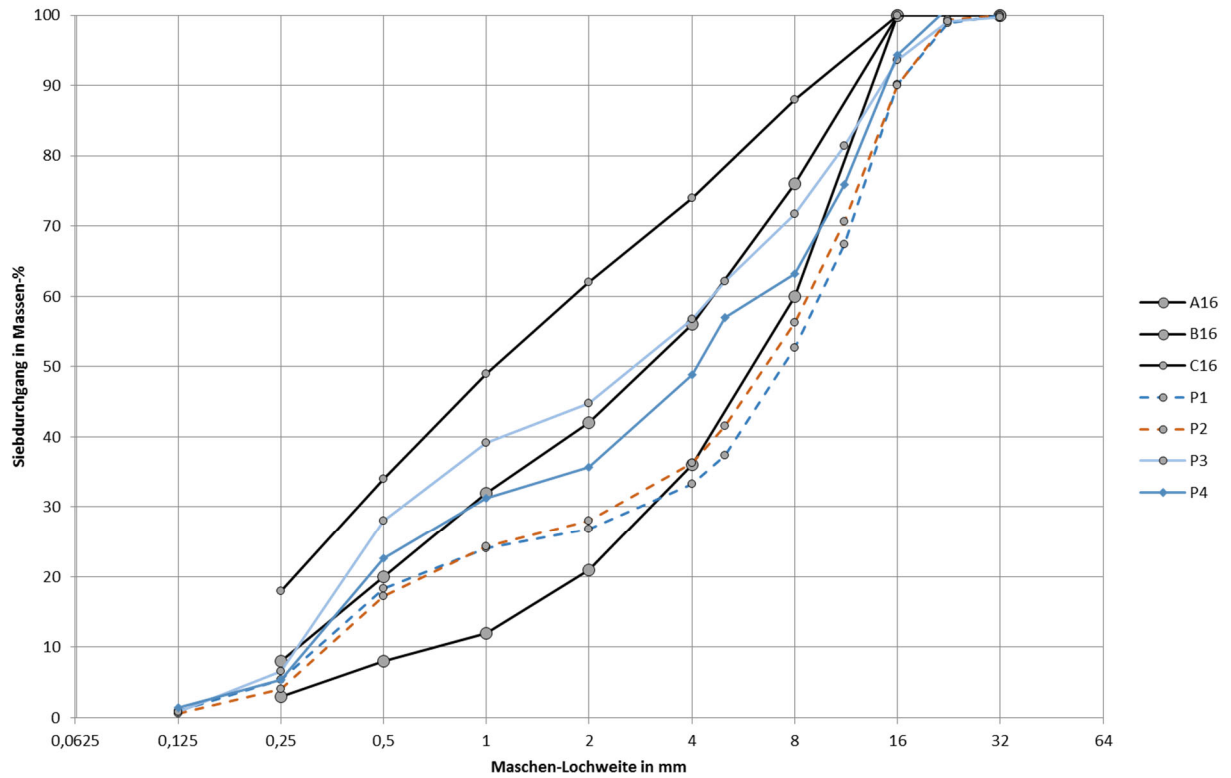


Abbildung 3.12: Korngrößenverteilung Werk 1

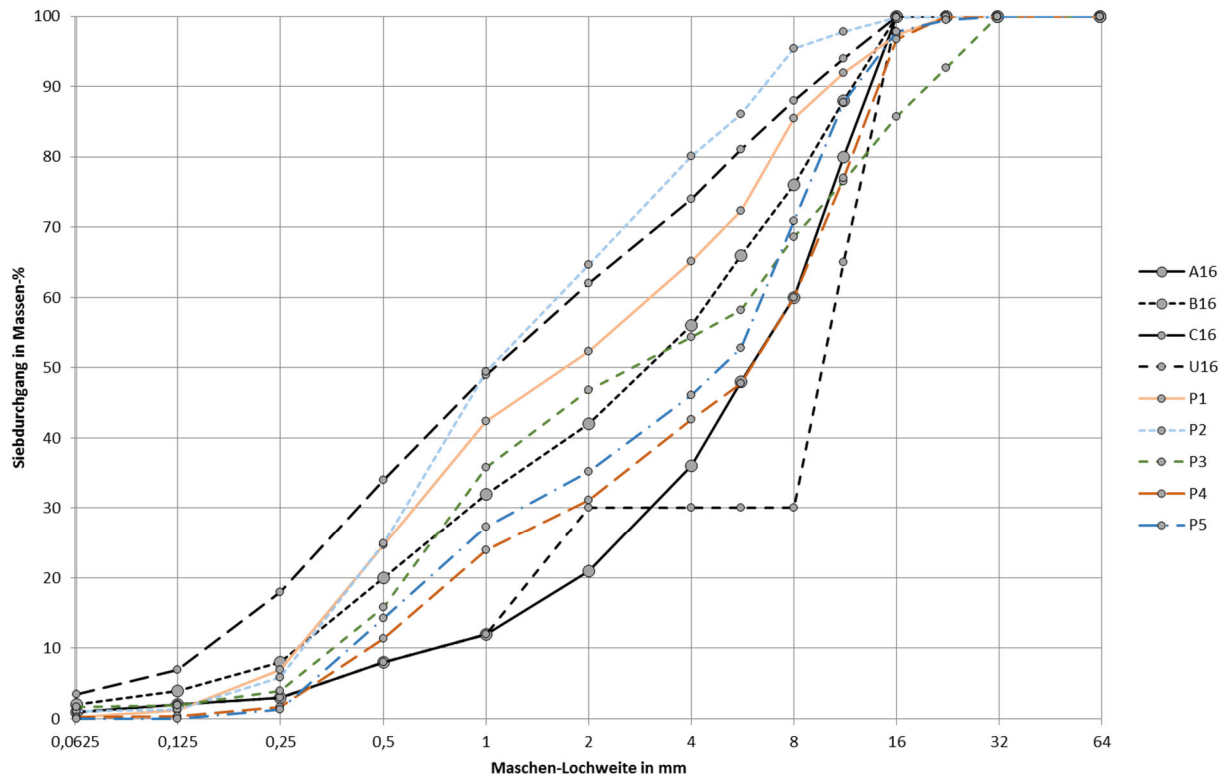


Abbildung 3.13: Korngrößenverteilung Werk 2

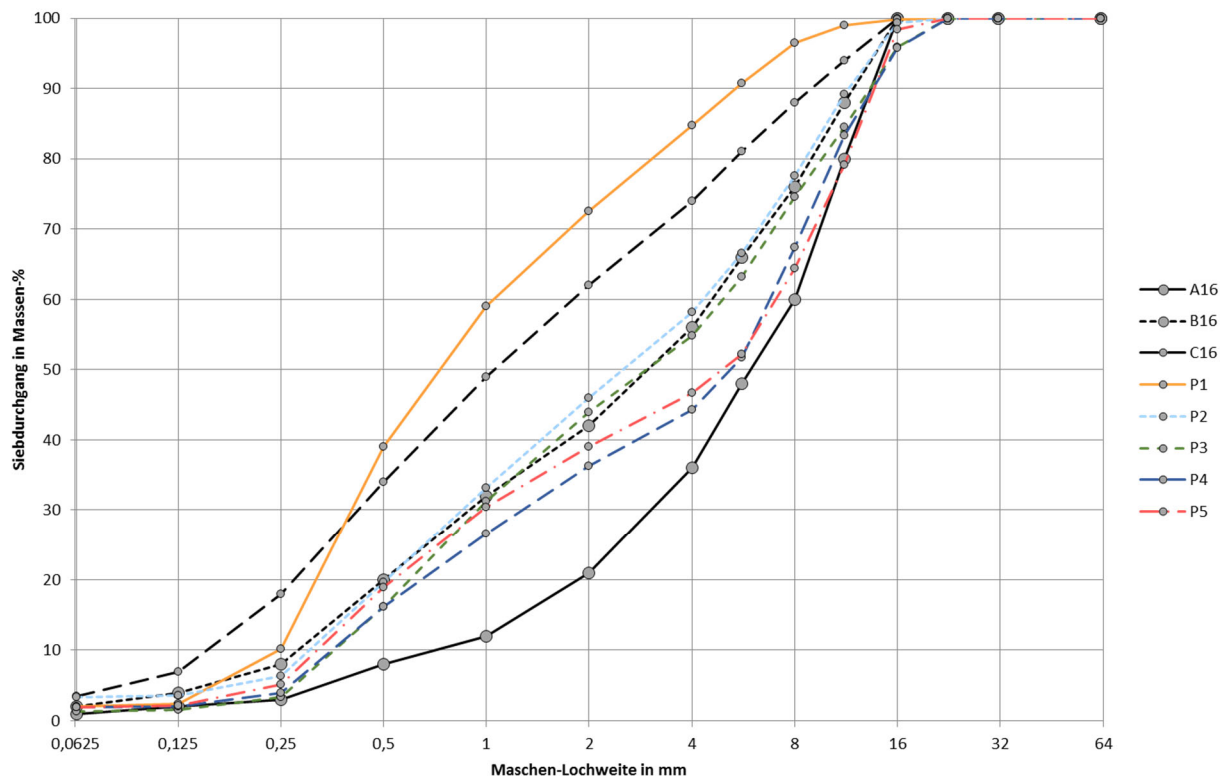


Abbildung 3.14: Korngrößenverteilung Werk 3

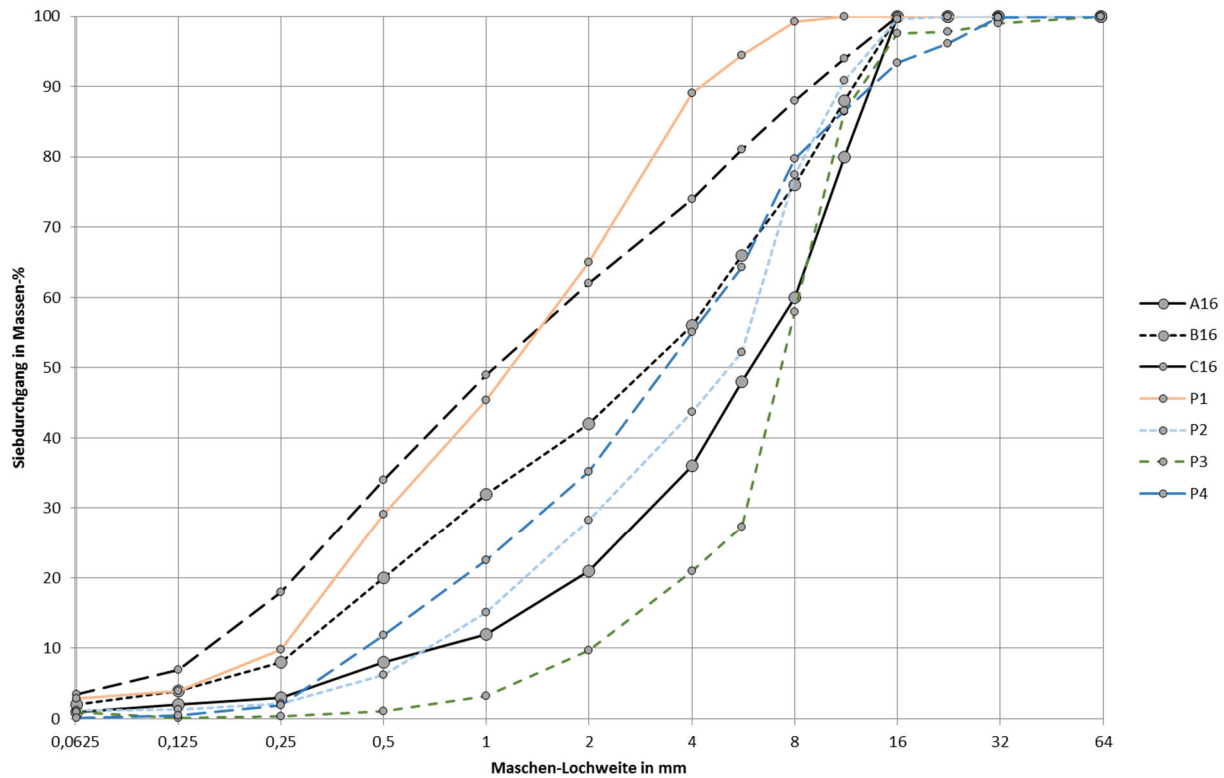


Abbildung 3.15: Korngrößenverteilung Werk 4

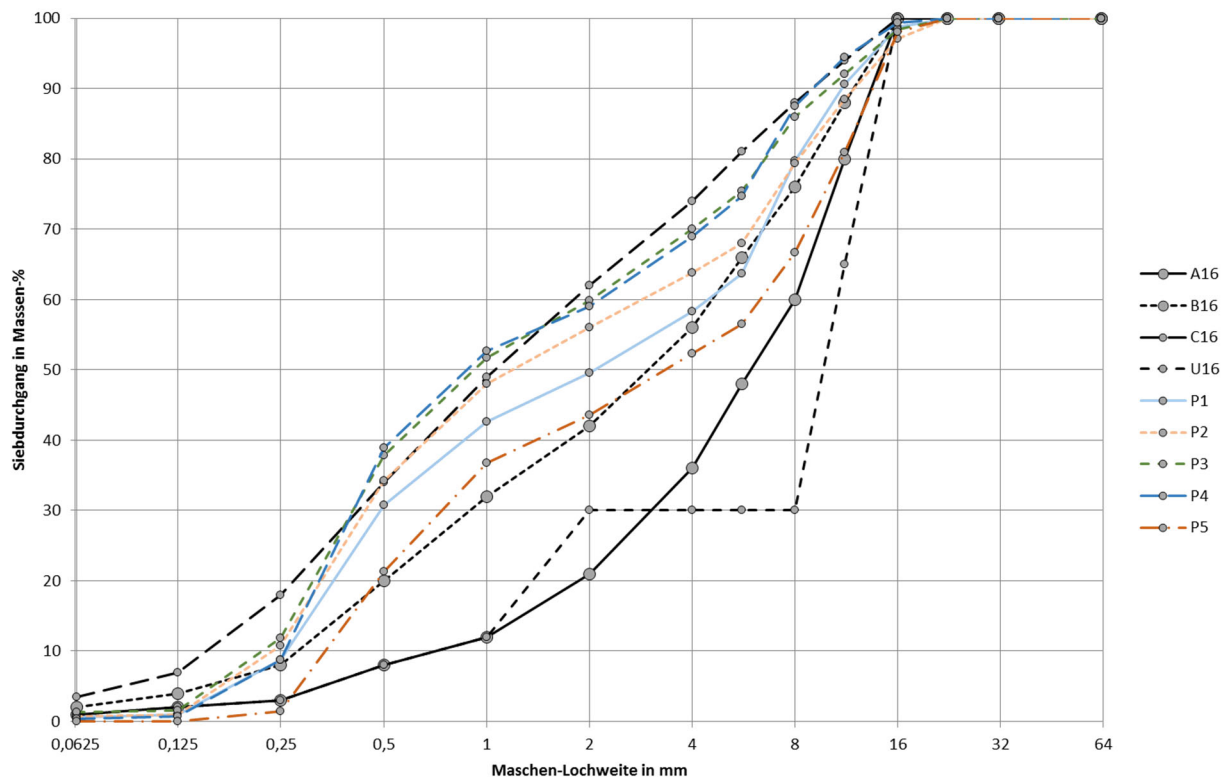


Abbildung 3.16: Korngrößenverteilung Werk 5

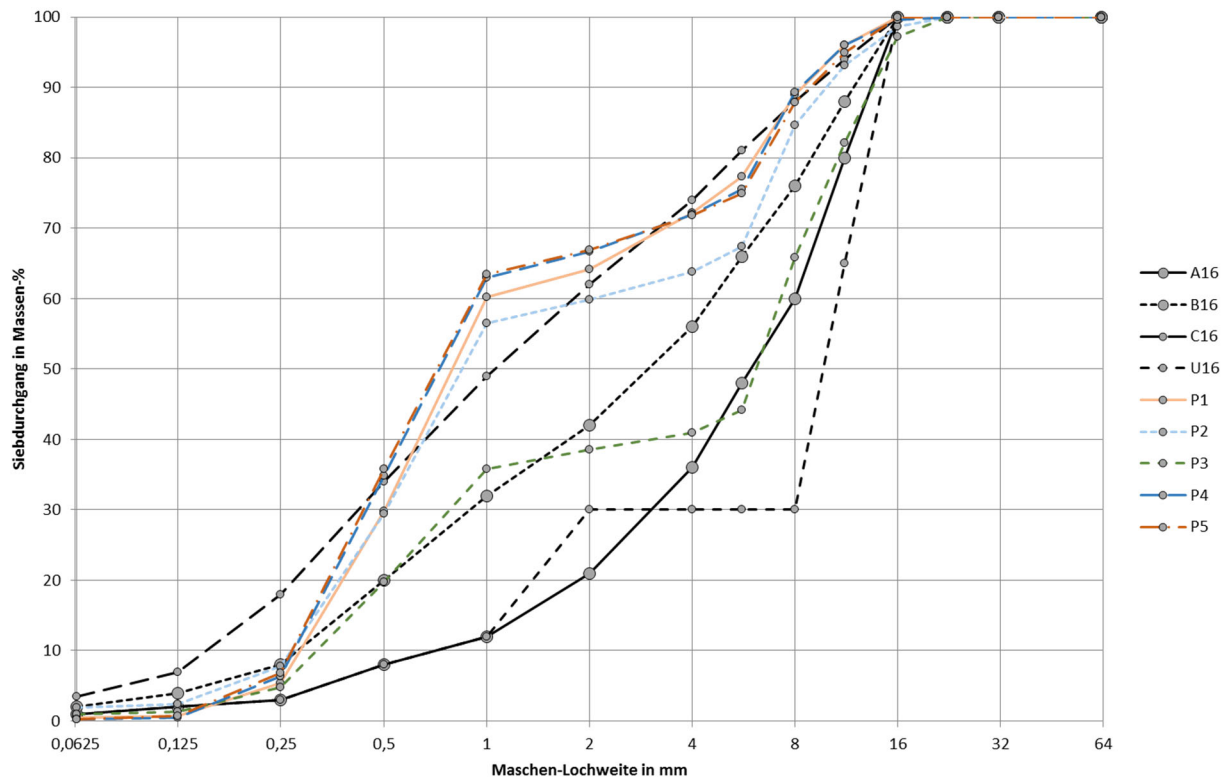


Abbildung 3.17: Korngrößenverteilung Werk 6

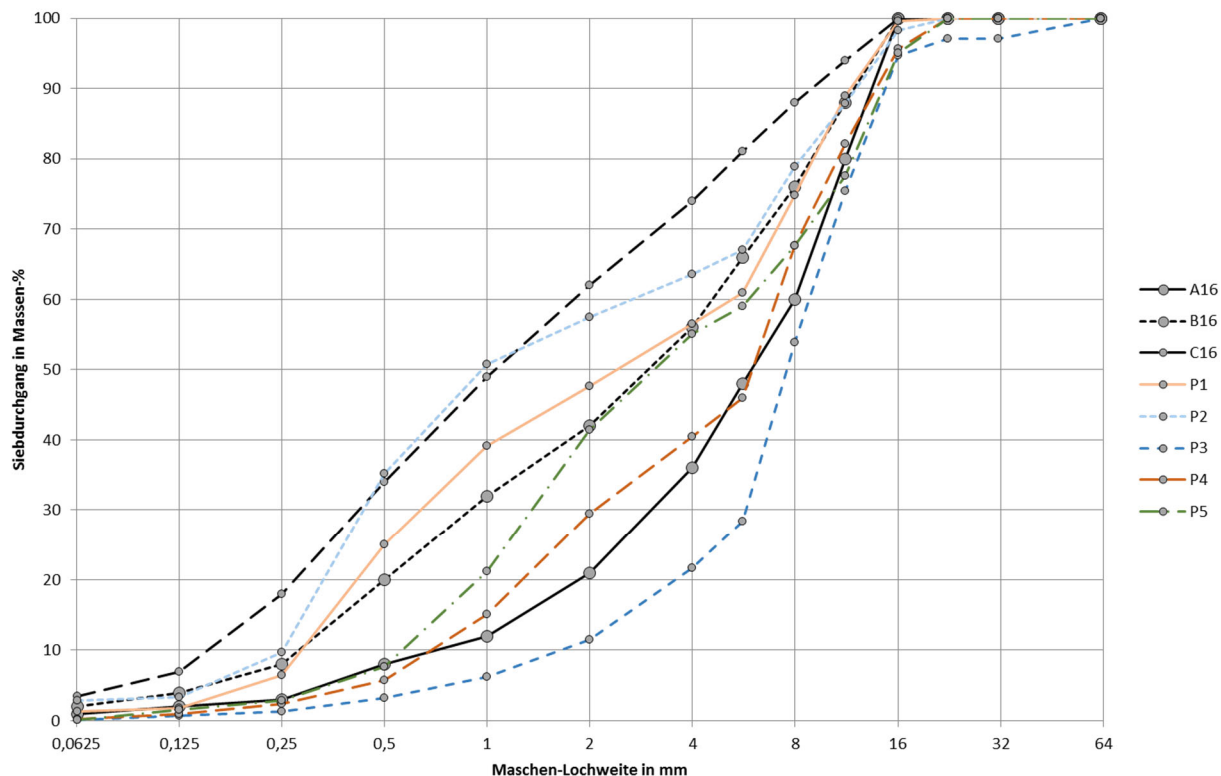


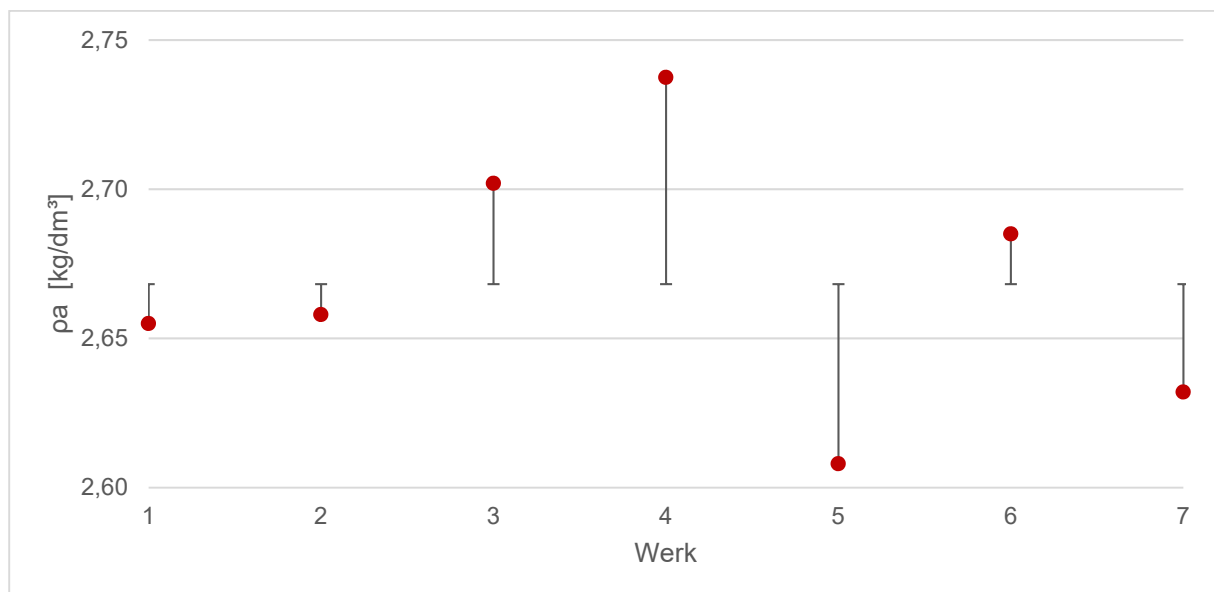
Abbildung 3.18: Korngrößenverteilung Werk 7

Die Bestimmung der Feianteile gestaltete sich schwieriger als bei normaler Gesteinskörnung üblich. Auch wenn die Gesteinskörnung beim Frischbetonrecycling sorgfältig ausgewaschen wird und eigentlich keine festen Bestandteile kleiner 0,25 mm enthalten sein sollten, haften doch immer wieder noch sehr feine Reste an der gröberen Gesteinskörnung. Hierbei handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um Zementreste, da bei langem Lagern der Gesteinskörnung oftmals eine leichte Verfestigung bzw. Verklumpung des Materials beobachtet werden kann. Diese feinen Anteile führen bei einer Nasssiegung jedoch dazu, dass sich die Maschen in den Sieben zusetzen, was sich nur schwer wieder beheben lässt (zum Teil war der Einsatz von Säure nötig). Die Siebung wird zusätzlich dadurch extrem zeitintensiv, da das Abfließen des Waschwassers durch das Sieb erschwert wird. Trotzdem wurden einige Proben mittels Nasssiegung untersucht, um den tatsächlichen Feianteil zu bestimmen. Bei den restlichen Proben erfolgte lediglich eine Trockensiegung. Die Ergebnisse der Siebungen zur Bestimmung der Feianteile sind in Tabelle 3.4 dargestellt. Die durch Nasssiegung ermittelten Feianteile sind, wie nicht anders zu erwarten, deutlich höher als die durch Trockensiegung bestimmten. Beim trockenen Material haften die feinen Anteile an der gröberen Gesteinskörnung an und werden so nicht abgesiebt. Im Folgenden werden daher nur die Feianteile betrachtet, die durch Nasssiegung ermittelt wurden. Diese liegen im Schnitt bei etwa 1,6 M.-%. Erlaubt wären für den Einsatz von Gesteinskörnungsgemischen im Beton 3 M.-% Feianteil. Dementsprechend liegen die untersuchten Gesteinskörnungen noch im geforderten Bereich. Lediglich eine Probe liegt mit 3,34 M.-% oberhalb des erlaubten Grenzwertes. Höhere Feianteile können zustande kommen, wenn der Trennschnitt im Frischbetonrecycling nicht sauber gesetzt ist oder das Auswaschwasser einen zu hohen Feststoffanteil aufweist und der Auswaschvorgang dadurch nicht mehr einwandfrei ablaufen kann. Durch eine gute Prozesskontrolle sollte dies jedoch beherrschbar sein.

Tabelle 3.4: Feinanteile der untersuchten Proben in M.-% (blau: Nach Nasssiebung, weiß: Nach Trockensiebung)

Werk	Probe				
	1	2	3	4	5
1	0,24	0,18	0,22	0,38	
2	0,29	1,09	1,62	0,10	0,12
3	2,05	3,34	1,35	1,88	1,96
4	2,93	1,00	0,97	0,10	
5	0,26	0,71	1,29	0,12	0,10
6	0,54	2,01	1,06	0,35	0,41
7	1,37	2,99	0,15	0,29	0,22

Neben der Korngrößenverteilung wurden auch Rohdichten und Wasseraufnahmen der wiedergewonnenen Gesteinskörnung untersucht. Für die mittlere Rohdichte ρ_a ergibt sich eine Dichte von etwa 2,66 kg/dm³ und für die Rohdichte im wassergesättigten oberflächentrockenen Zustand ρ_{ssd} ein Mittelwert von 2,57 kg/dm³. Die Ergebnisse der Werke schwanken mehr oder weniger stark um diese Mittelwerte. Alle ermittelten Rohdichten liegen jedoch erwartungsgemäß im Bereich normaler Gesteinskörnung. Gleiches zeigt sich auch für die Wasseraufnahme nach 24 Stunden. Sie liegt im Mittel bei 1,4 M.-%. Dies entspricht ebenfalls der üblichen Wasseraufnahme von natürlichen Gesteinskörnungen. Die Schwankungen zwischen den einzelnen Werken liegen im Rahmen der normalen Schwankungsbreite und sind zum Teil verfahrensbedingt.

Abbildung 3.19: Mittlere Rohdichte ρ_a der Werke und ihre Abweichung von der mittleren Rohdichte über alle Werke gemittelt

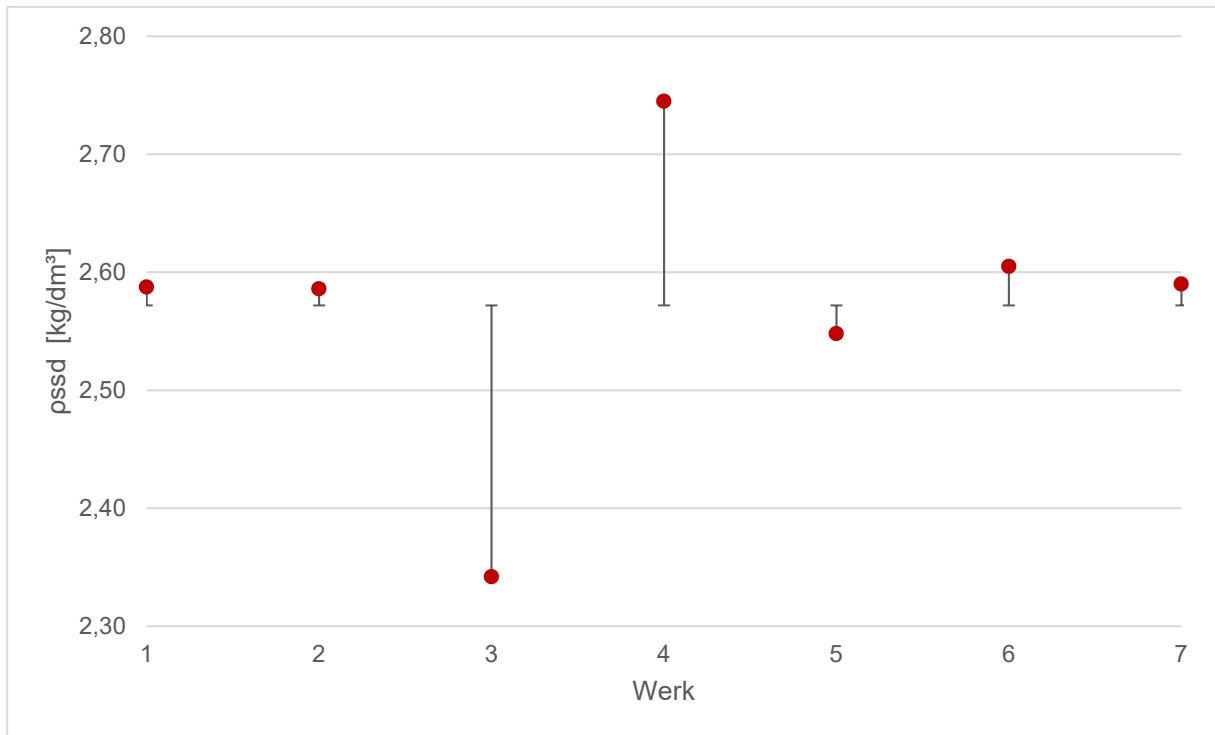


Abbildung 3.20: Mittlere Rohdichte ρ_{ssd} der Werke und ihre Abweichung von der mittleren Rohdichte über alle Werke gemittelt

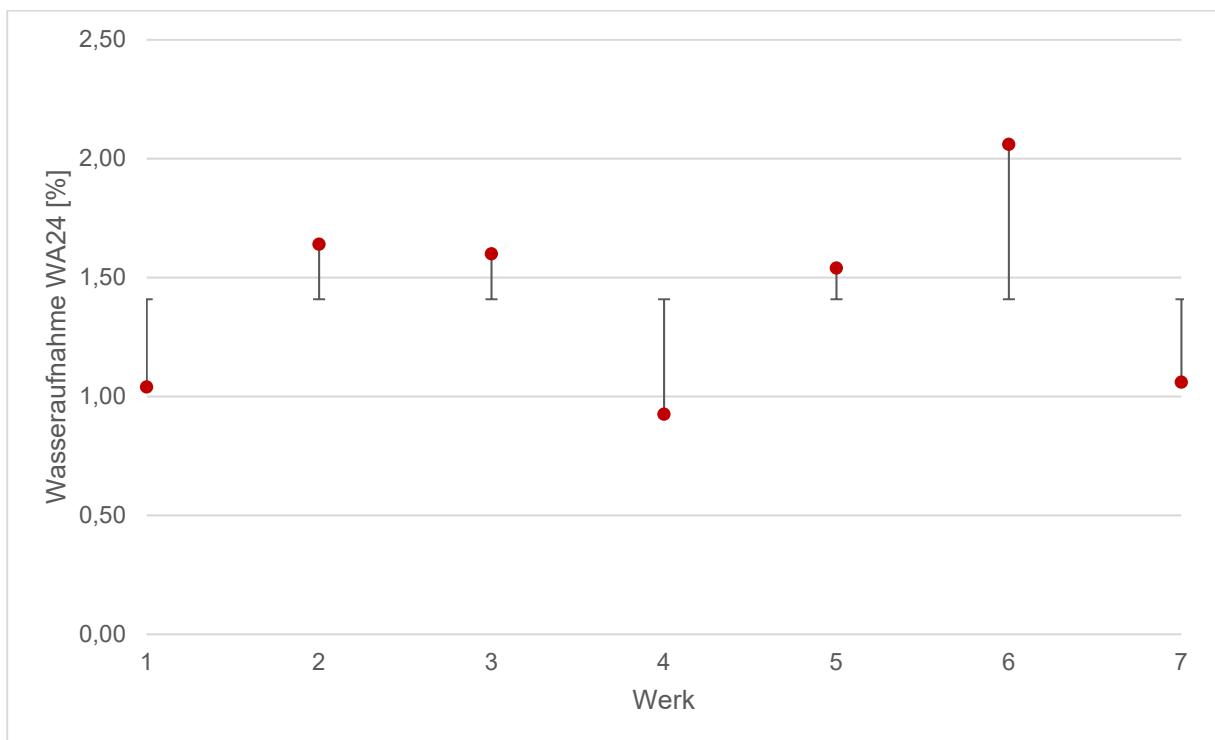


Abbildung 3.21: Mittlere Wasseraufnahme nach 24 h

Insgesamt hat sich gezeigt, dass sich die wiedergewonnenen Gesteinskörnungen nur unwesentlich von der natürlichen Gesteinskörnung unterscheiden. Rohdichte und Wasseraufnahmen weichen kaum von den Ursprungswerten ab und liegen in einem Bereich, der auch für natürliche Gesteinskörnungen vorkommen kann. Auch der zeitliche Verlauf der

Wasseraufnahme zeigt keine Besonderheiten. Die größten Unterschiede zeigen sich in der Korngrößenverteilung. Das Material ist nicht mehr in Fraktionen aufgeteilt, sondern vielmehr ein Korngemisch. Der gesamte Sieblinienbereich ist vertreten. Dabei können sich die Ergebnisse von Werk zu Werk stark unterscheiden und hängen von der Ausgangssieblinie ab. Werden im Werk viele unterschiedliche Sieblinien zur Herstellung der Betone verwendet, können auch die resultierenden Korngemische stärker variieren. Der Feinanteil sollte dagegen unproblematisch sein, da durch den Prozess ein Großteil des feinen Materials ausgewaschen wird. In den Untersuchungen hat sich der Feinanteil bis auf einen Fall als unproblematisch dargestellt. Probleme können hier nur entstehen, wenn der Auswaschprozess nicht einwandfrei abläuft.

3.3 Arbeitspaket 3

Ablauf:

In Arbeitspaket 3 sollte eine theoretische Auswertung und Berechnung der Systemgrenzen bei Einsatz wiedergewonnener Gesteinskörnung durchgeführt werden. Ziel war es, anhand der Berechnungen die maximal mögliche Zugabemenge wiedergewonnener Gesteinskörnung zu bestimmen, die direkt im Prozess wieder eingesetzt werden kann, ohne die Betoneigenschaften zu stark zu verändern. Da die Sieblinie dabei einen großen Einfluss hat, wurde hier in erster Linie die Änderung der Sieblinie untersucht. Auf diese Weise sollte geklärt werden, ob sich bereits bei einer rein theoretischen Betrachtung Hemmnisse für die Wiederverwendung der Gesteinskörnung bezüglich Menge oder hinsichtlich Expositionsklasse oder Festigkeitsklasse des damit hergestellten Betons ergeben.

Um eine fundierte theoretische Betrachtung durchführen zu können, müssen jedoch erst einige Vorüberlegungen gemacht und Annahmen getroffen werden.

Die Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton sind in der DIN EN 12620 definiert und umfassen Anforderungen an geometrische, physikalische und chemische Eigenschaften der Gesteinskörnung. In Arbeitspaket 2 hat sich bereits gezeigt, dass die physikalischen Eigenschaften der natürlichen Gesteinskörnung im Wesentlichen erhalten bleiben. Ebenso wenig sollten sich in den chemikalischen Eigenschaften Änderungen ergeben. Dementsprechend sollten diese Anforderungen nach DIN EN 12620 weiterhin erfüllt sein. Hinsichtlich der geometrischen Eigenschaften ergeben sich jedoch Änderungen. Da die Gesteinskörnung im Beton nach dem Auswaschen in der Regel nicht weiter aufbereitet wird, ergibt sich ein Korngemisch, das je nach Ausgangsbeton variiert. Die Gesteinskörnung liegt also nicht mehr in den sonst üblichen Kornfraktionen vor. Des Weiteren könnten Körner durch die Beanspruchung beim Mischvorgang in ihrer geometrischen Form beeinflusst werden. Beispielsweise könnten Kanten abgerundet, bzw. abgeschliffen oder Körner gebrochen werden. Da es sich bei der Ausgangsgesteinskörnung um natürliche Gesteinskörnung handelt, sollte dieser Faktor vernachlässigbar sein. Da normalerweise beim Auswaschen der Trennschnitt bei 0,25 mm liegt, sollte das zurückbleibende Korngemisch eher feinstoffarm sein. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass sich in der Regel doch ein gewisser Feinanteil in der Gesteinskörnung wiederfindet. Trotzdem war der Gehalt in den durchgeführten Untersuchungen im erlaubten Bereich, so dass dieser Faktor zunächst ebenfalls vernachlässigt wird.

Somit sind die größten Änderungen durch die variable Sieblinie zu erwarten.

Als weiterer Faktor ist die Art der Zugabe zur natürlichen Gesteinskörnung einzubeziehen. Hier bestehen theoretisch verschiedene Möglichkeiten. Zum einen kann die Gesteinskörnung als eigene Fraktion zugegeben werden und zum anderen anteilig unter eine der verwendeten Fraktionen gemischt werden. Für die hier angestellten Betrachtungen wurde neben der Zugabe als eigene Fraktion die Variante gewählt, bei der die wiedergewonnene Gesteinskörnung anteilig zur jeweils größten Kornfraktion gegeben wird. Das ist gleichzeitig die in der Praxis aktuell übliche Verfahrensweise.

Als Beurteilungskriterien wurden die Körnungsziffer (k-Wert) und der Wasseranspruch gewählt. Der Wasseranspruch ist ein wichtiger Faktor in der Betontechnologie und wird maßgeblich von der eingesetzten Gesteinskörnung beeinflusst. Besonderen Einfluss haben die Kornzusammensetzung und das verwendete Größtkorn, sodass sich aus diesen Faktoren der Wasseranspruch grob abschätzen lässt.

Die Abschätzung erfolgt über die untenstehende Formel. Um die drei unterschiedlichen Konsistenzklassen abzudecken, wurde ein Konsistenzparameter in der Formel aufgenommen.

$$w = \frac{c}{k+3} \text{ Formel 1 nach [36]} \quad (1)$$

Mit:

w: Wasseranspruch des Betons in kg/m³

c: Konsistenzparameter nach Tabelle 3.5

k: Körnungsziffer

Tabelle 3.5: Werte für den Konsistenzparameter nach [36]

Konsistenz	Parameter c
K1 (steif)	1.100
K2 (plastisch)	1.200
K3 (weich)	1.300

In den hier angestellten Betrachtungen erfolgte die Berechnung unter der Annahme, dass die einzelnen Korngruppen kein Über- bzw. Unterkorn haben. Weiterhin wurde angenommen, dass alle natürlichen Kornfraktionen und die wiedergewonnene Gesteinskörnung eine annähernd gleiche Rohdichte aufweisen. Die Austauschquote α ist dabei als Massenanteil der wiedergewonnenen Gesteinskörnung bezogen auf die Gesamtmasse an Gesteinskörnung definiert. Die beiden Varianten der Zugabe werden gesondert betrachtet und die Berechnung der jeweiligen Körnungsziffer im Folgenden getrennt dargestellt.

Berechnung der Körnungsziffer der neuen Sieblinie bei Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung als eigene Fraktion:

Hierbei wird die Gesteinskörnung entsprechend dem Mischungsverhältnis der natürlichen Korngruppen auf alle Korngruppen aufgeteilt, sodass das Verhältnis der natürlichen Korngruppen

zueinander unverändert bleibt. Dadurch gestaltet sich die Berechnung der resultierenden Körnungsziffer relativ einfach, nach der folgenden Gleichung:

$$k' = (1 - \alpha) \cdot k_N + \alpha \cdot k_R \quad (4)$$

Mit:

k' : Körnungsziffer des Korngemisches aus natürlicher und wiedergewonnener Gesteinskörnung

k_N : Körnungsziffer der natürlichen Gesteinskörnung

k_R : Körnungsziffer der wiedergewonnenen Gesteinskörnung

α : Austauschquote in M.-%

Berechnung der Körnungsziffer der neuen Sieblinie bei Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung zur größten Kornfraktion:

Bei dieser Variante der Zugabe wird die wiedergewonnene Gesteinskörnung der größten Kornfraktion zugemischt, sodass sich deren Anteil verringert. Die Berechnung der resultierenden Sieblinie gestaltet sich dabei etwas aufwendiger und wird im Folgenden anhand der Berechnung für ein Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm und einem Austausch der Gruppe 4/8 mm beispielhaft aufgezeigt (vgl. Tabelle 3.6).

Tabelle 3.6: Resultierender Siebdurchgang bei einem Größtkorn von 8 mm und Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung auf die Korngruppe 4/8 mm

Siebweite	natürliche GK	Wiedergewonnene GK	natürliche + wiedergewonnene GK
[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
0,25	$N_{0,25}$	$R_{0,25}$	$N_{0,25} + \alpha \cdot R_{0,25}$
0,5	$N_{0,5}$	$R_{0,5}$	$N_{0,5} + \alpha \cdot R_{0,5}$
1	N_1	R_1	$N_1 + \alpha \cdot R_1$
2	N_2	R_2	$N_2 + \alpha \cdot R_2$
4	N_4	R_4	$N_4 + \alpha \cdot R_4$
8	100	R_8	$(100 \% - N_4) \cdot \left(1 - \frac{100 \cdot \alpha}{100 \% - N_4}\right) + N_4 + \alpha \cdot R_8$
16	100	R_{16}	$(100 \% - N_4) \cdot \left(1 - \frac{100 \cdot \alpha}{100 \% - N_4}\right) + N_4 + \alpha \cdot R_{16}$
32	100	R_{32}	$(100 \% - N_4) \cdot \left(1 - \frac{100 \cdot \alpha}{100 \% - N_4}\right) + N_4 + \alpha \cdot R_{32}$
63	100	R_{63}	$(100 \% - N_4) \cdot \left(1 - \frac{100 \cdot \alpha}{100 \% - N_4}\right) + N_4 + \alpha \cdot R_{63}$

Die Durchgangssumme D ist definiert als Summe der prozentualen Durchgänge durch die neun Siebe des Grundsiebsets. Damit ergibt sich für die Durchgangssumme D_N der natürlichen Gesteinskörnung, die Durchgangssumme D_R der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und die Durchgangssumme D' des Gemisches aus natürlicher und wiedergewonnener Gesteinskörnung, wobei die Siebdurchgänge in Prozent und die Austauschquote als Dezimalzahl einzusetzen sind:

$$D_N = N_{0,25} + N_{0,5} + N_1 + N_2 + N_4 + 400 \quad (5)$$

Mit:

D_N : Durchgangssumme der natürlichen Gesteinskörnung

N_i : Siebdurchgang der natürlichen Gesteinskörnung durch das Sieb der Siebweite i mm in M.-%

$$D_R = R_{0,25} + R_{0,5} + R_1 + R_2 + R_4 + R_8 + R_{16} + R_{32} + R_{63} \quad (6)$$

Mit:

D_R : Durchgangssumme der wiedergewonnenen Gesteinskörnung

R_i : Siebdurchgang der wiedergewonnenen Gesteinskörnung durch das Sieb der Siebweite i mm in M.-%

$$D' = N_{0,25} + N_{0,5} + N_1 + N_2 + N_4 * 5 + (100 \% - N_4) * \left(1 - \frac{100 \% * \alpha}{100 \% - N_4}\right) * 4 + \alpha * (R_{0,25} + R_{0,5} + R_1 + R_2 + R_4 + R_8 + R_{16} + R_{32} + R_{63}) \quad (7)$$

Mit:

D' : Durchgangssumme des Gemisches aus natürlicher und wiedergewonnener Gesteinskörnung

N_i : Siebdurchgang der natürlichen Gesteinskörnung durch das Sieb der Siebweite i mm in M.-%

R_i : Siebdurchgang der wiedergewonnenen Gesteinskörnung durch das Sieb der Siebweite i mm in M.-%

α : Austauschquote als Dezimalzahl

Gleichung (7) lässt sich durch Einsetzen von Gleichung (5) und Gleichung (6) ausdrücken als:

$$D' = D_N + \alpha * D_R - 400 * \alpha \quad (8)$$

Damit gilt für die Körnungsziffer k' des Korngemisches aus natürlicher und wiedergewonnener Gesteinskörnung:

$$k' = \frac{900 - D_N - \alpha \cdot D_R + 400 \cdot \alpha}{100} \quad (9)$$

Auf gleiche Weise lässt sich auch die Körnungsziffer k' bei Austausch der Korngruppen 8/16 mm, 16/32 mm oder 32/63 mm berechnen, dabei variiert lediglich der letzte Summand im Zähler. Dieser wird daher als Parameter ω definiert, sodass gilt

$$k' = \frac{900 - D_N - \alpha \cdot D_R + \omega \cdot \alpha}{100} \quad (10)$$

Mit:

ω : Parameter für die größte Korngruppe nach Tabelle 3.7

Die Werte für den Parameter ω können der folgenden Tabelle 3.7 entnommen werden.

Tabelle 3.7: Parameter ω

Austausch der Korngruppe	Parameter ω
4/8 mm	400
8/16 mm	300
16/32 mm	200
32/63 mm	100

Bei Austausch der Korngruppe 2/8 mm sind die obigen Formeln nicht anwendbar. Ebenfalls unter der Annahme, dass die einzelnen Korngruppen kein Über- bzw. Unterkorn haben und die Rohdichten gleich sind, wurden die im Folgenden in den wesentlichen Schritten dargestellten Berechnungen durchgeführt.

Tabelle 3.8: Resultierender Siebdurchgang bei einem Größtkorn von 8 mm und Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung auf die Korngruppe 2/8 mm

Siebweite	natürliche GK	wiedergewonnene GK	natürliche + wiedergewonnene GK
[mm]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
0,25	N _{0,25}	R _{0,25}	N _{0,25} + α * R _{0,25}
0,5	N _{0,5}	R _{0,5}	N _{0,5} + α * R _{0,5}
1	N ₁	R ₁	N ₁ + α * R ₁
2	N ₂	R ₂	N ₂ + α * R ₂
4	N ₄	R ₄	(N ₄ - N ₂) * (1 - $\frac{100 * \alpha}{100 \% - N_2}$) + N ₂ + α * R ₄
8	100	R ₈	(100 % - N ₂) * (1 - $\frac{100 * \alpha}{100 \% - N_2}$) + N ₂ + α * R ₈
16	100	R ₁₆	(100 % - N ₂) * (1 - $\frac{100 * \alpha}{100 \% - N_2}$) + N ₂ + α * R ₁₆
32	100	R ₃₂	(100 % - N ₂) * (1 - $\frac{100 * \alpha}{100 \% - N_2}$) + N ₂ + α * R ₃₂
63	100	R ₆₃	(100 % - N ₂) * (1 - $\frac{100 * \alpha}{100 \% - N_4}$) + N ₂ + α * R ₆₃

Damit gilt für die Körnungsziffer k' des Gemisches aus natürlicher und wiedergewonnener Gesteinskörnung

$$k' = \frac{900 - D_N - \alpha * D_R + (-5N_2 + N_4 + 400 \%) * \frac{100 * \alpha}{100 \% - N_2}}{100} \quad (11)$$

Berechnung der Wasseranspruchsänderung:

Mit diesem Ansatz ist es möglich, die Änderung des Wasseranspruchs in Folge von Verwendung wiedergewonnener Gesteinskörnung, die eine andere Körnungsziffer als die natürliche Gesteinskörnung aufweist oder nur eine Korngruppe der natürlichen Gesteinskörnung ersetzt, zu berechnen. Diese ergibt sich folgendermaßen:

$$\Delta w = w' - w_N = \frac{c}{k'+3} - \frac{c}{k_N+3} \quad (12)$$

Mit

Δw: Änderung des Wasseranspruchs in kg/m³

w': Wasseranspruch der kombinierten Gesteinskörnung in kg/m³

w_N: Wasseranspruch der natürlichen Gesteinskörnung in kg/m³

k': Körnungsziffer der kombinierten Gesteinskörnung

k_N: Körnungsziffer der natürlichen Gesteinskörnung

c: Konsistenzparameter nach Tabelle 3.7

Berechnung der Austauschquote:

Damit die Änderung der Betonkonsistenz in einem verträglichen Maß bleibt, wurde festgelegt, dass sich der Wasseranspruch um maximal Δw ändern darf. Mathematisch muss also folgende Bedingung erfüllt sein:

$$w' = w \pm \Delta w \quad (13)$$

Durch Einsetzen der vorherigen Formeln ergeben sich damit die folgende obere und untere Grenze für die Körnungsziffer k' des Betons mit wiedergewonnener Gesteinskörnung:

$$k' = \frac{c}{\frac{c}{k_N+3} \pm \Delta w} - 3 \quad (14)$$

Setzt man diese Formel mit dem zuvor ermittelten Zusammenhang für die Körnungsziffer k' gleich und löst die Gleichung nach der Austauschquote α auf, erhält man für den gleichmäßigen Austausch über alle Fraktionen:

$$\alpha = \left(\frac{c}{\frac{c}{k_N+3} \pm \Delta w} - 3 - k_N \right) * \frac{1}{k_R - k_N} \quad (15)$$

Mit:

c: Konsistenzparameter nach Tabelle 3.5

Δw : Zulässige Änderung des Wasseranspruchs in kg/m^3

Für den anteiligen Austausch der größten Kornfraktion gilt:

$$\alpha = \frac{\frac{c}{\frac{c}{k_N+3} \pm \Delta w} * 100 - 1200 + D_N}{\omega - D_R} \quad (16)$$

Für den Sonderfall beim Austausch der Kornfraktion 2/8 mm ergibt sich folgende Gleichung zur Bestimmung der Austauschquote:

$$\alpha = \frac{\frac{100 * c}{\frac{c}{k_N+3} \pm \Delta w} - 1200 + D_N}{(-5N_2 + N_4 + 400 \%) * \frac{100}{100\% - N_2} - D_R} \quad (17)$$

Die Formeln zur Bestimmung der Austauschquote liefern aufgrund des plus/minus-Zeichens im Term $\frac{c}{k_N+3} \pm \Delta w$ zwei Ergebnisse, wobei das größere der beiden maßgebend ist.

Es sind folglich zwei Fälle zu betrachten; Im ersten Fall lautet der Nenner des ersten Bruchs $\frac{c}{k_N+3} + \Delta w$ und im zweiten Fall $\frac{c}{k_N+3} - \Delta w$. Maßgebend ist der größere der beiden errechneten Werte α .

Ergebnisse und Diskussion:

Im dargestellten Arbeitspaket wurde eine theoretische Betrachtung der Systemgrenzen für den Einsatz wiedergewonnener Gesteinskörnung durchgeführt. Betrachtet wurden die theoretischen Sieblinien unter Einbeziehung der in Arbeitspaket 2 gesammelten Daten.

Da Betone mit Ausfallkörnungen, also einer Regelsieblinie U, hinsichtlich Verarbeitbarkeit, Druckfestigkeit und Frost-Tau-Widerstand als deutlich schlechter zu bewerten sind als Betone mit stetigen Sieblinien und zudem ein spröderes Materialverhalten aufweisen [37], werden für die meisten Betone stetige Sieblinien verwendet. Daher ist im Folgenden für die stetigen Sieblinien mit einem Größtkorn von 8, 16 und 32 mm die zulässige Austauschquote bei Zugabe auf die gesamte Gesteinskörnung mit der Austauschquote bei Zugabe auf die größte Korngruppe verglichen. Eine Betrachtung der Sieblinien mit einem Größtkorn von 63 mm erscheint wenig sinnvoll, da üblicherweise kein größeres Größtkorn als 32 mm eingesetzt wird. Weil sich in Arbeitspaket 2 gezeigt hat, dass die Sieblinien der wiedergewonnenen Gesteinskörnung im Wesentlichen zwischen den Regelsieblinien C8 und A16 liegen, wurden die Regelsieblinien für ein Größtkorn von 63 mm auch bei der Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung nicht weiter betrachtet.

Berechnet wurden Austauschquoten für die einzelnen Sieblinienkombinationen in Abhängigkeit der Zugabearten. Da die Austauschquote auch von der tolerierbaren Änderung des Wasseranspruchs abhängt, musste hier zunächst ein Wert festgelegt werden. Auf Grundlage der produktionstechnischen Bedingungen und jeweiligen Gegebenheiten ist für Standardbetone eine Änderung des Wasseranspruchs um 10 kg/m^3 tolerierbar, sodass Δw zunächst auf 10 kg/m^3 festgelegt wurde. Um den Einfluss dieses Parameters abschätzen zu können, wurde jedoch auch eine Berechnung mit $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ durchgeführt. Im folgenden Abschnitt sollen einige der Daten beispielhaft zur Erläuterung der Ergebnisse aufgegriffen werden. Eine Übersicht aller Ergebnisse findet sich im Anhang Abschnitt 11.3.

Die theoretische Betrachtung hat gezeigt, dass die möglichen Austauschquoten sehr unterschiedlich ausfallen können. Die Austauschquoten beim Ersatz als eigene Kornfraktion sind dabei in der Regel höher als beim Ersatz über die größte Fraktion. Besonders deutlich zeigt sich dies in Abbildung 3.22. Hier sind die möglichen Austauschquoten für verschiedene Sieblinien der Restbetongesteinskörnung bei einer Ausgangssieblinie B32 dargestellt. Beim Ersatz als eigene Kornfraktion über die gesamte Sieblinie sind jeweils höhere Austauschquoten möglich, als wenn die Gesteinskörnung der Fraktion 16/32 mm zugegeben wird, was in diesem Fall der größten Kornfraktion entsprechen würde.

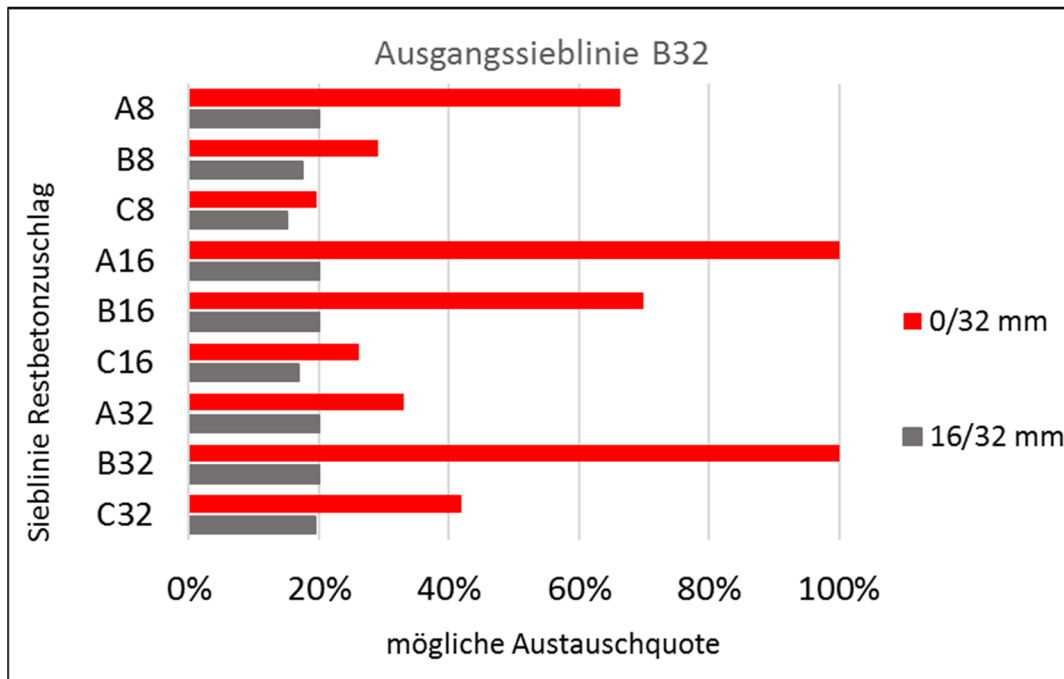


Abbildung 3.22: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie B32 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 16/32 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

Betrachtet man die erhaltenen Daten im Detail, zeigt sich, dass sowohl die Korngrößenverteilung als auch das Größtkorn einen wesentlichen Einfluss haben. Geht man von einer mittleren Sieblinie wie beispielsweise der Sieblinie B16 aus, sind die Austauschquoten umso höher, je näher die Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung an der Ausgangssieblinie liegt. Dies gilt sowohl bei gleichbleibendem Größtkorn und wechselnder Grundsieblinie, als auch bei gleichbleibender Grundsieblinie aber wechselndem Größtkorn (vgl Abb. 3.23 und 3.24).

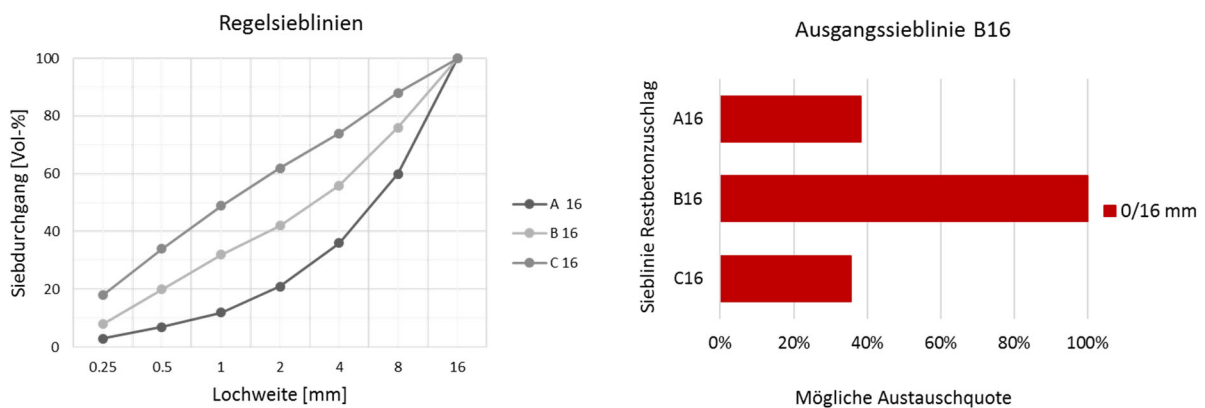


Abbildung 3.23: Mögliche Austauschquoten in Abhängigkeit von der Sieblinie bei nah beieinander liegenden Sieblinien mit wechselnder Grundsieblinie am Beispiel für die Ausgangssieblinie B16

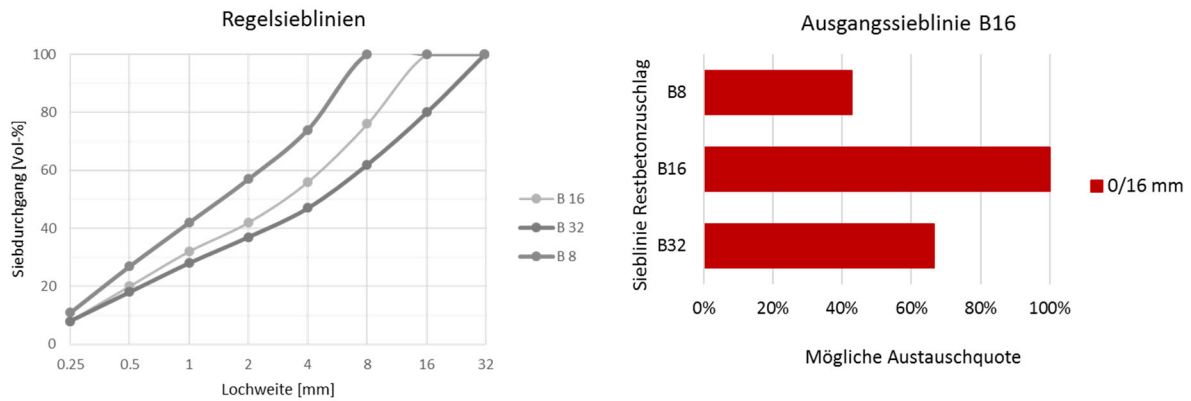


Abbildung 3.24: Mögliche Austauschquoten in Abhängigkeit von der Sieblinie bei nah beieinander liegenden Sieblinien mit wechselndem Größtkorn am Beispiel für die Ausgangssieblinie B16

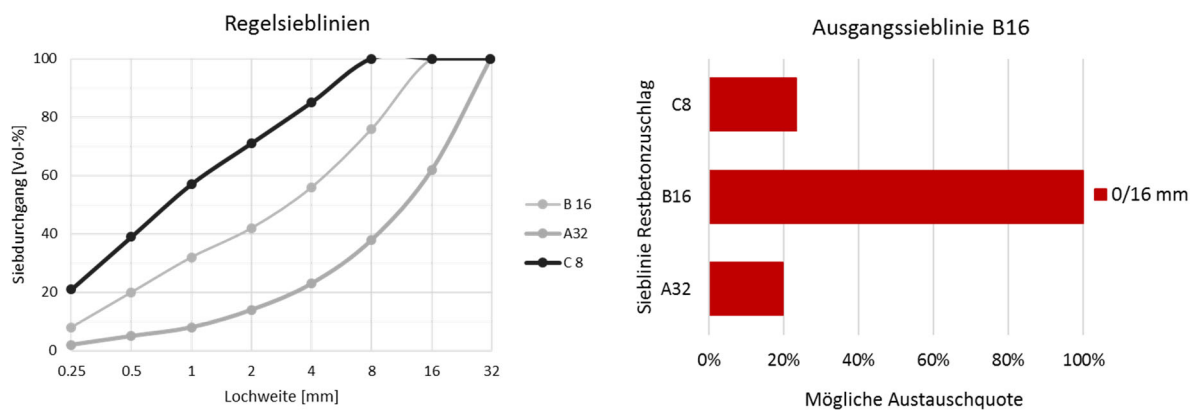


Abbildung 3.25: Mögliche Austauschquoten, bei weiter voneinander entfernten Sieblinien am Beispiel der Grundsieblinie B16

Es lässt sich also festhalten, je näher die beiden Sieblinien beieinanderliegen, desto höher sind die möglichen Austauschquoten. Diese können beim Einsatz der wiedergewonnenen Gesteinskörnung als eigene Fraktion bei (nahezu) 100 % liegen. Liegen die Sieblinien dagegen weiter auseinander, nehmen die Austauschquoten ab, wobei auch hier teilweise noch hohe Austauschquoten möglich sind (vgl. Abb. 3.25). Beim anteiligen Ersatz einer C8 Sieblinie mit wiedergewonnener Gesteinskörnung der Sieblinie A32 liegt die Austauschquote bei maximal 6,9 %, was die insgesamt geringste Quote darstellt. Weiterhin zeigt sich, dass die feinen C-Sieblinien nur geringe Mengen an grober Gesteinskörnung kompensieren können, was zu entsprechend geringeren Austauschquoten führt, während die gröberen A-Sieblinien durchaus höhere Anteile feiner Gesteinskörnung kompensieren können und auch größere Austauschmengen für feine Sieblinien zulassen.

Beim Austausch der Gesteinskörnung über die grobe Fraktion zeigt sich ein weiterer Limitierungsfaktor. Auch wenn theoretisch größere Austauschquoten möglich wären, ist die Menge hier oftmals durch den Anteil der groben Fraktion an der Gesamtmenge der Gesteinskörnung limitiert. Besonders deutlich wird dies in Abb. 3.26.

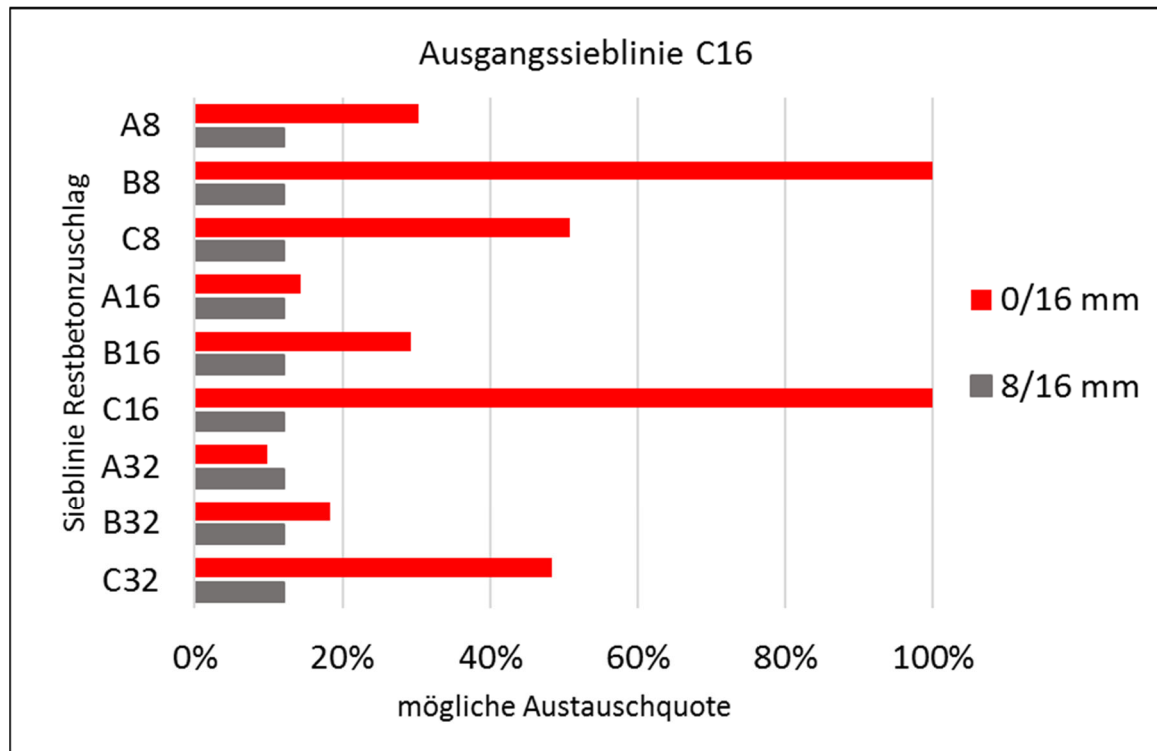


Abbildung 3.26: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie C16 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 8/16 mm für die Zugabe über die grösste Fraktion.

Eine Erhöhung von Δw auf 20 kg/m^3 führt wie zu erwarten zu einer deutlichen Zunahme der möglichen Austauschquoten. Beim Einsatz der wiedergewonnenen Gesteinskörnung als eigene Fraktion kann in vielen Fällen die gesamte Gesteinskörnung ersetzt werden, während bei der Zugabe der Gesteinskörnung zur groben Fraktion der Ausgangsgesteinskörnung die Limitierung durch den Anteil der Fraktion an der Gesamtmenge deutlicher hervortritt. In diesem Fall wird er zum limitierenden Faktor.

Es lässt sich zusammenfassen, dass ein Austausch aller Korngruppen bei den meisten Sieblinienkombinationen deutlich höhere Austauschquoten bei gleicher Änderung des Wasseranspruchs ermöglicht. Bei Betrachtung der Ausgangssieblinien mit einem Größtkorn von 8 mm zeigt sich, dass ein Austausch der Korngruppe 2/8 mm günstiger ist als ein Austausch der Korngruppe 4/8 mm. Auffallend ist, dass eine Ausgangssieblinie C8 signifikant geringere Austauschquoten ermöglicht als andere Ausgangssieblinien.

Sehr deutliche Unterschiede zwischen den beiden Varianten der Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung fallen auf, wenn die Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung gleich der Sieblinie der natürlichen Gesteinskörnung ist. Bei Zugabe auf alle Korngruppen dürfte dann die gesamte natürliche Gesteinskörnung ersetzt werden, bei Zugabe auf die grösste Korngruppe wären nur deutlich geringere Austauschquoten möglich.

3.4 Arbeitspaket 4

Im Arbeitspaket 4 sollten anhand von Laborversuchen die theoretischen Abschätzungen aus Arbeitspaket 3 überprüft werden. Als Ersatzmenge für die wiedergewonnene Gesteinskörnung wurden 20 % gewählt. Diese Menge wurde zu Beginn des Projekts als Marke angepeilt und hat

sich in den theoretischen Betrachtungen für einen großen Teil der Sieblinienkombinationen als realistisch erwiesen. Ob sich aus der Ersatzmenge für die Betone bei Mischungen, die theoretisch nur einen geringen Austausch zulassen, Probleme ergeben, sollte hier abgeprüft werden. Um das Prüfprogramm überschaubar zu halten, wurden dazu die Extremfälle zur Untersuchung des Einflusses ausgewählt. Es wurden insgesamt zwei unterschiedliche Standardbetone mit jeweils den zwei extremsten Beimengungen von ausgewaschener Gesteinskörnung hergestellt und untersucht. In Abbildung 3.27 ist eine Übersicht dargestellt.

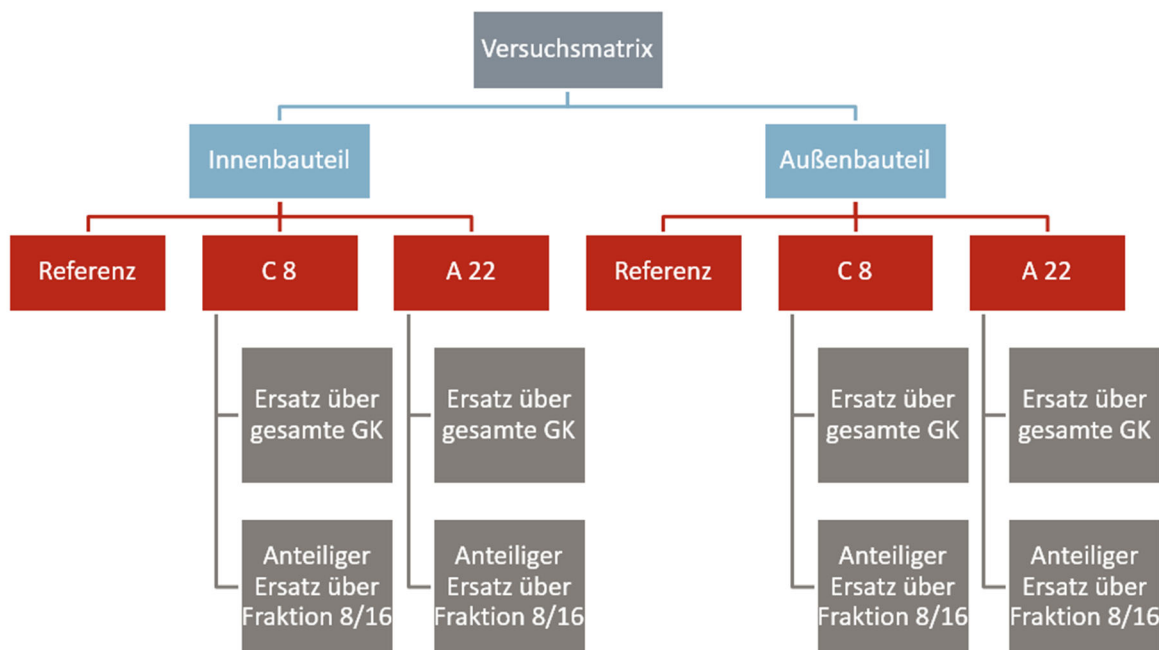


Abbildung 3.27: Versuchsmatrix der durchgeführten Laborversuche

Als Beton für ein übliches Innenbauteil wurde in Absprache mit dem Projektbegeleitenden Ausschuss eine Betongüte C 20/25 und die Expositionsklasse XC1 in Hinblick auf Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung und die Feuchtigkeitsklasse W0 bezüglich einer möglichen Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion festgelegt. Die Zusammensetzung des Betons ergab sich aus den Grenzwerten der Zusammensetzung für die Expositionsklasse XC1 nach DIN 1045-2 [7], wobei auf Grund der üblichen statischen Anforderungen die Druckfestigkeitsklasse auf C 20/25 erhöht und der Wasserzementwert von 0,75 auf 0,70 reduziert wurde.

Für ein übliches Außenbauteil wurden die Expositionsklassen XC4 für Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, XA1 für Betonkorrosion durch chemischen Angriff, XF1 für Betonkorrosion für Frostangriff ohne Taumittel und die Feuchtigkeitsklasse WF für Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion festgelegt. Die Grenzwerte für die Betonzusammensetzung nach DIN 1045-2 [7] sind für diese Expositionsklassen identisch, sodass die minimal erforderliche Festigkeitsklasse C 25/30, der minimale Zementgehalt von 280 kg/m³ und der maximal zulässige Wasserzementwert von 0,60 gewählt wurde.

Die Beschränkung der Versuche auf diese Betone resultiert dabei aus der Tatsache, dass die Betone bis zu einer Druckfestigkeitsklasse von einschließlich C 25/30 einen Marktanteil von über 60 % haben [3].

Als Sieblinie der Referenzbetone wurde eine Regelsieblinie A/B 16 ausgewählt (vgl. Abb. 3.28). Um unterschiedliche Wasserzementwerte bei den Betonen durch unterschiedliche Feuchtezustände der Gesteinskörnung ausschließen zu können, wurden sämtliche Gesteinskörnungen inklusive der wiedergewonnenen Gesteinskörnung im Vorfeld bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet.

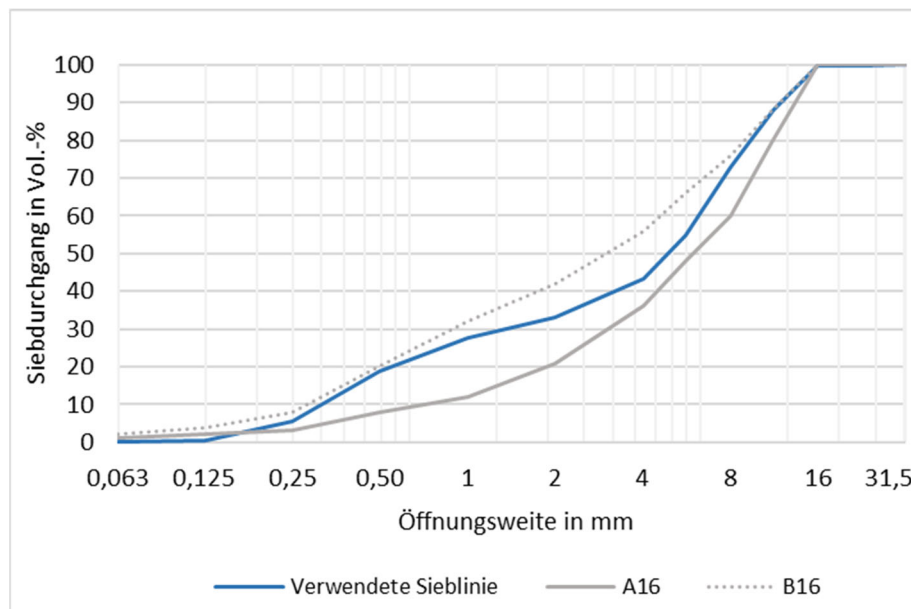


Abbildung 3.28: Korngrößenverteilung der Referenzmischung

Die vorhergegangenen Charakterisierungen von Proben wiedergewonnener Gesteinskörnung in Arbeitspaket 3 zeigten, dass annähernd alle Sieblinien der wiedergewonnenen Gesteinskörnung zwischen den Regelsieblinien C8 und A32 liegen. Daher wurde entschieden, um den Extremfall einer feinkörnigen und den anderen Extremfall einer grobkörnigen Sieblinie darstellen zu können, mit den Sieblinien C8 und A32 für die Restbetongesteinskörnungen in die zu untersuchenden Betonagen zu gehen. Die verwendeten Materialien sind in Tabelle 3.9 aufgelistet. Um der Versuchsplanung entsprechend eine Sieblinie mit grober und eine mit feiner Gesteinskörnung zu erhalten, wurde die wiedergewonnene Gesteinskörnung in Fraktionen aufgesiebt und entsprechend wieder zusammengesetzt. Da die wiedergewonnene Gesteinskörnung sehr arm an feiner Gesteinskörnung war, wurde für die C8-Sieblinie Quarzmehl zugegeben.

Tabelle 3.9: Verwendete Materialien

Material	Bezeichnung
Zement	CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N
Natürliche Gesteinskörnung	Sand-Kiesgemisch in den Fraktionen 0/2 mm, 2/8 mm und 8/16 mm
Wiedergewonnene Gesteinskörnung	Gesteinskörnung aus einer Frischbetonrecyclinganlage
Fließmittel	Master-Glenium ACE 430

Entsprechend dem Schema aus Abb. 3.27 wurden zehn Betone mit unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt. Die jeweiligen Zusammensetzungen finden sich im Anhang Abschnitt 10.4.

Alle Betone wurden nach einem festen Ablaufschema hergestellt, um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Zur anschließenden Bewertung der Performance, wurden verschiedene Frisch- und Festbetonprüfungen durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Prüfungen findet sich in Tabelle 3.10.

Tabelle 3.10: Durchgeführte Untersuchungen mit zugehöriger Prüfnorm

	Prüfung	Prüfnorm
Frischbeton	Verdichtungsmaß (vor Zugabe von Fließmittel)	DIN EN 12350-4
	Ausbreitmaß (nach Fließmittelzugabe)	DIN EN 12350-5
	Rohdichte des Frischbetons	DIN EN 12350-6
	Luftgehalt	DIN EN 12350-7
Festbeton	Druckfestigkeit nach 7, 28 und 56 Tagen am Würfel	DIN EN 12390-3
	Elastizitätsmodul am Zylinder	DIN EN 12390-13
	Spaltzugfestigkeit	DIN EN 12390-6
	Rohdichte des Festbetons	DIN EN 12390-7

Ergebnisse und Diskussion:

Die durchgeführten Untersuchungen sollten zeigen, wie sich die Zugabe von höheren Mengen an wiedergewonnener Gesteinskörnung auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirken. In Abbildung 3.29 sind die Ergebnisse der Messungen des Verdichtungsmaßes dargestellt. Vergleicht man die Betone mit wiedergewonnener Gesteinskörnung mit den jeweiligen Referenzbetonen, lässt sich erkennen, dass die Zugabe von wiedergewonnenem Material einen Einfluss auf die Konsistenz des resultierenden Betons hat. Durch die Zugabe auf die größte Fraktion verändert sich die Konsistenz stärker als bei der gleichmäßigen Zugabe über die gesamte Sieblinie. Darüber hinaus zeigt sich, dass durch die Zugabe des C8-Materials die Konsistenz stärker verändert wird als durch die Zugabe des A32-Materials. Die Konsistenz wird deutlich steifer. Die Zugabe des A32-Materials auf die gesamte Gesteinskörnung hatte dagegen sogar eine Abnahme des Verdichtungsmaßes zur Folge. Der Beton war also fließfähiger. Insgesamt sollten sich die Unterschiede in der Konsistenz durch den Einsatz geeigneter Zusatzmittel wie Fließmittel ausgleichen lassen.

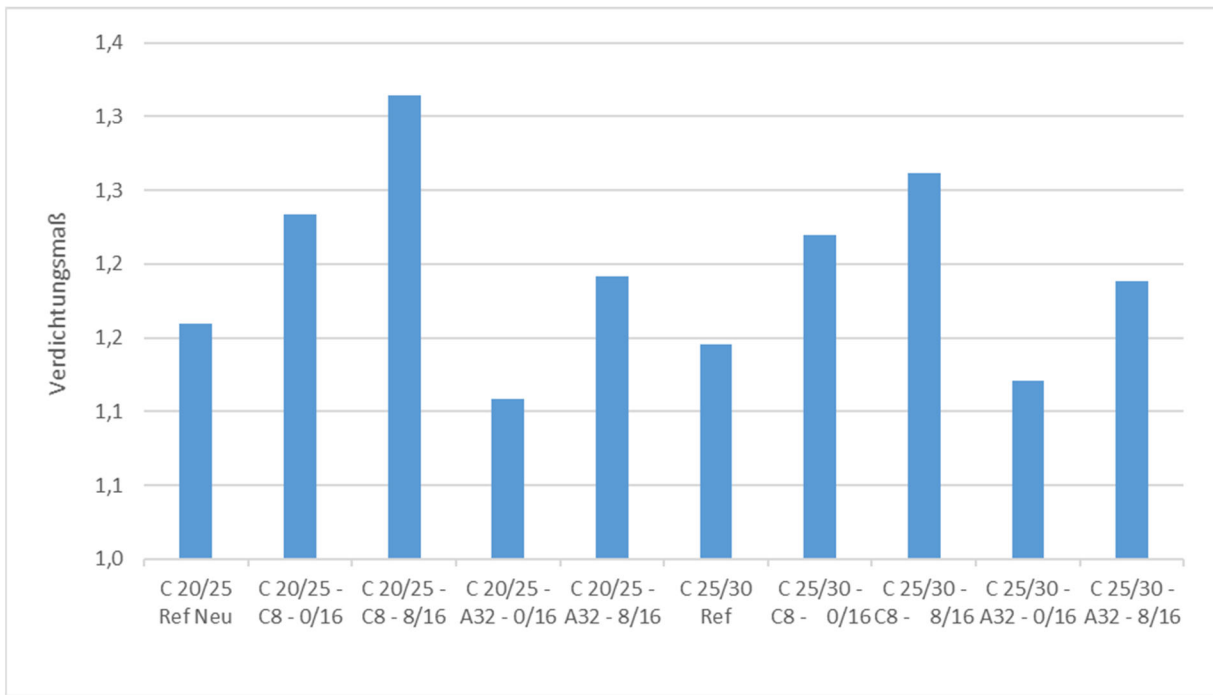


Abbildung 3.29: Verdichtungsmaß der hergestellten Betone

Neben der Konsistenz wurden am Frischbeton auch die Rohdichte und der Luftporengehalt bestimmt. Die Ergebnisse der Bestimmung der Rohdichte sind in den Abbildungen 3.30 (Innenbauteil) und 3.31 (Außenbauteil) dargestellt.

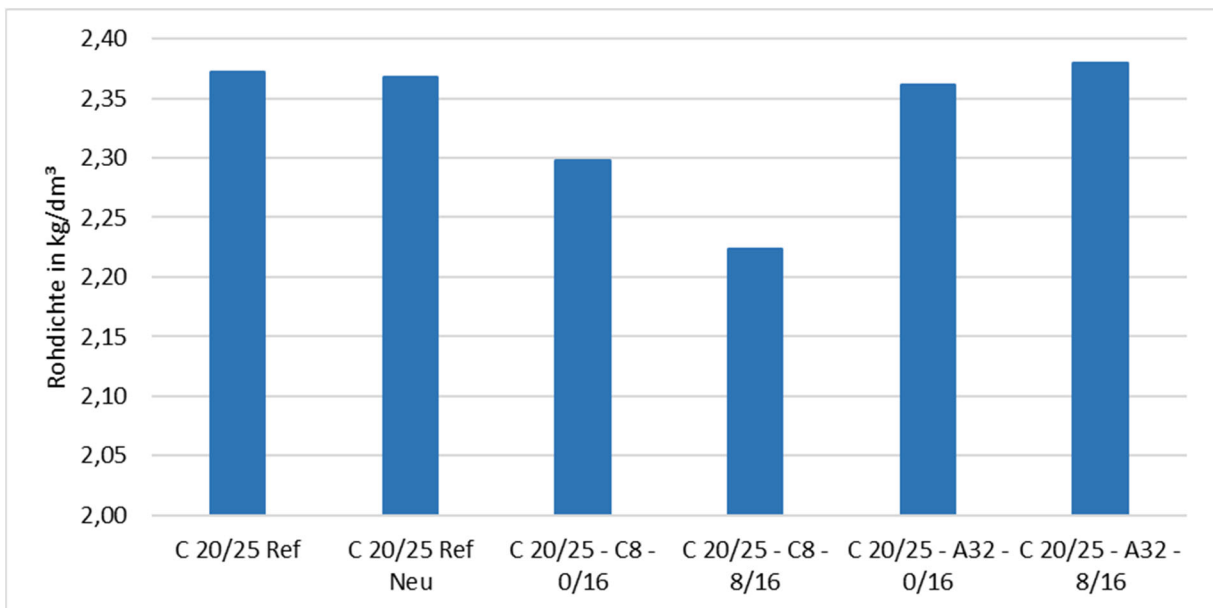


Abbildung 3.30: Rohdichte am Frischbeton bei den Betonen des Innenbauteils

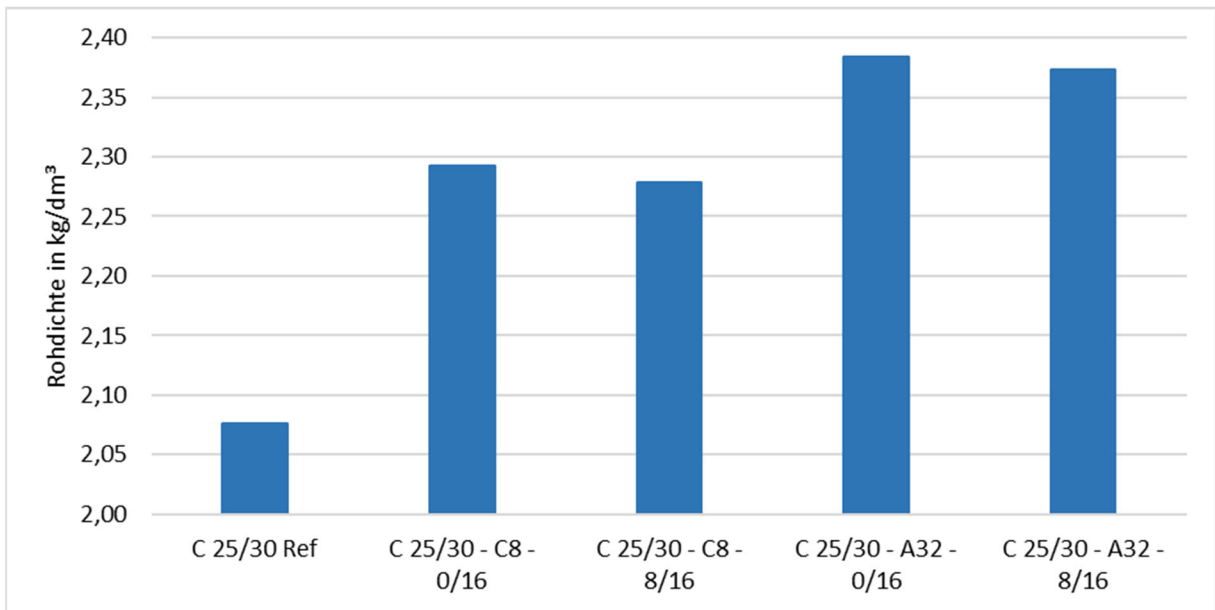


Abbildung 3.31: Rohdichte am Frischbeton bei den Betonen des Außenbauteils

Der Luftporengehalt wurde mittels Druckausgleichsverfahren ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.32 und 3.33 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Betone mit wiedergewonnener Gesteinskörnung der Sieblinie A32 ähnliche Luftporengehalte aufweisen wie die Referenzbetone. Die Betone mit wiedergewonnener Gesteinskörnung der Sieblinie C8 weisen größtenteils deutlich erhöhte Luftporengehalte auf. Dies ist mit der steiferen Konsistenz und ein dadurch bedingter geringerer Verdichtungsgrad zu erklären, da bei Beton ohne Luftporenbildner Luftporengehalte größer 2,0 Vol.-% als Indikator für eine unzureichende Verdichtung zu bewerten sind [13].

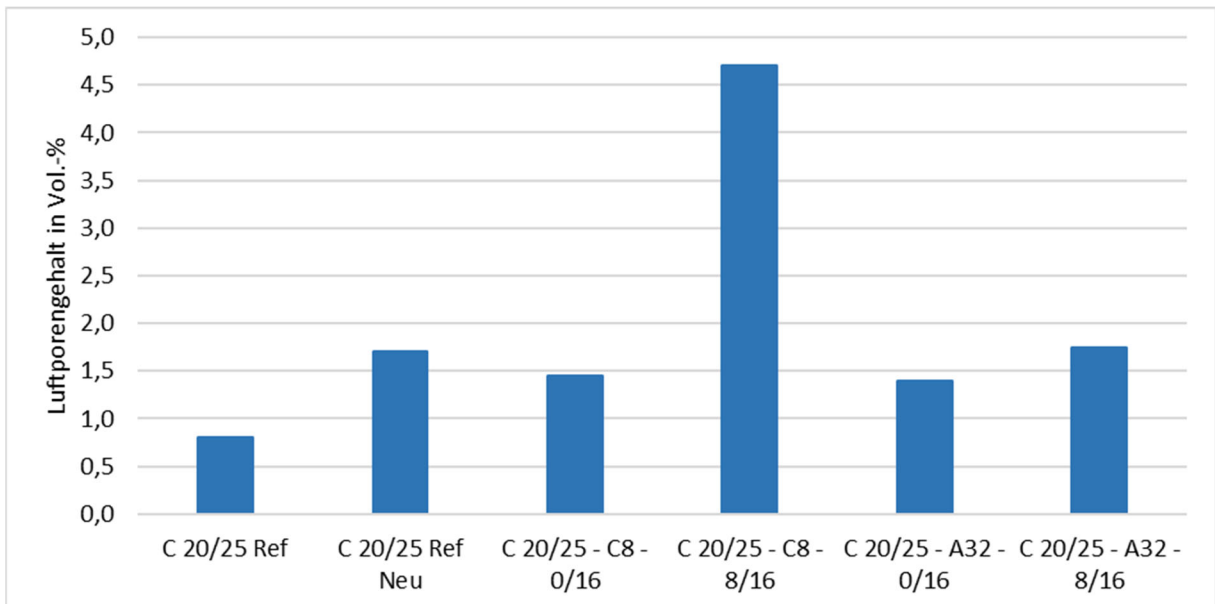


Abbildung 3.32: Luftporengehalt am Frischbeton bei den Betonen des Innenbauteils

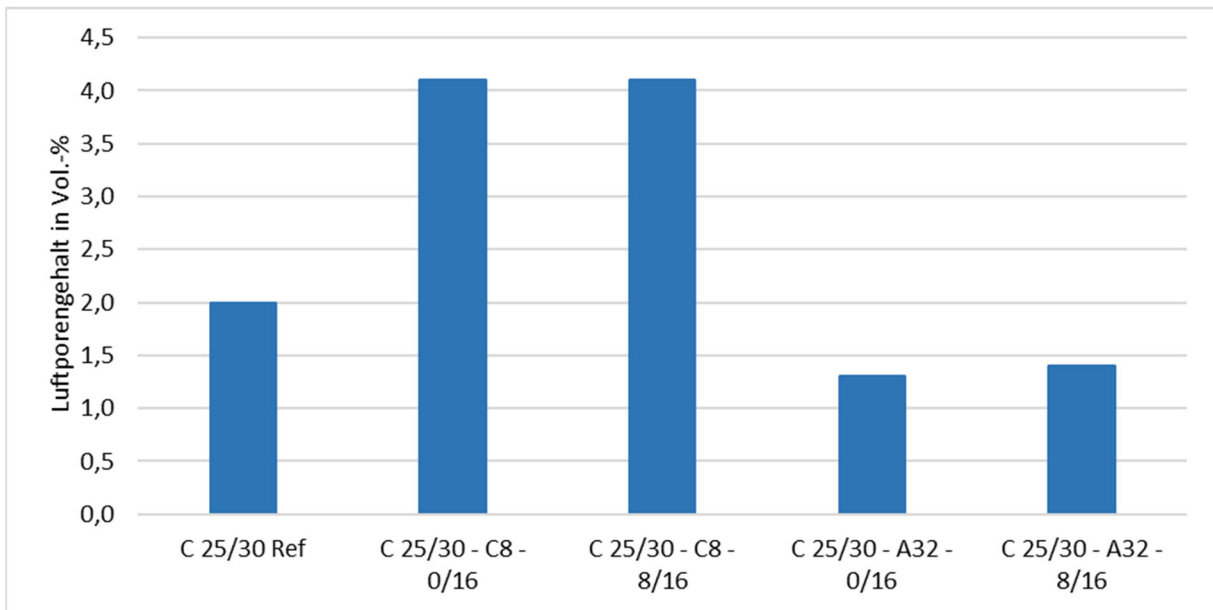


Abbildung 3.33: Luftporengehalt am Frischbeton bei den Betonen des Außenbauteils

Neben den Frischbetonkennwerten wurden auch Festbetonkennwerte ermittelt. Hier wurden in erster Linie Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und E-Modul betrachtet. Zusätzlich wurde jedoch auch die Festbetonrohddichte untersucht und mit den theoretisch berechneten Werten und der ermittelten Frischbetonrohddichte verglichen.

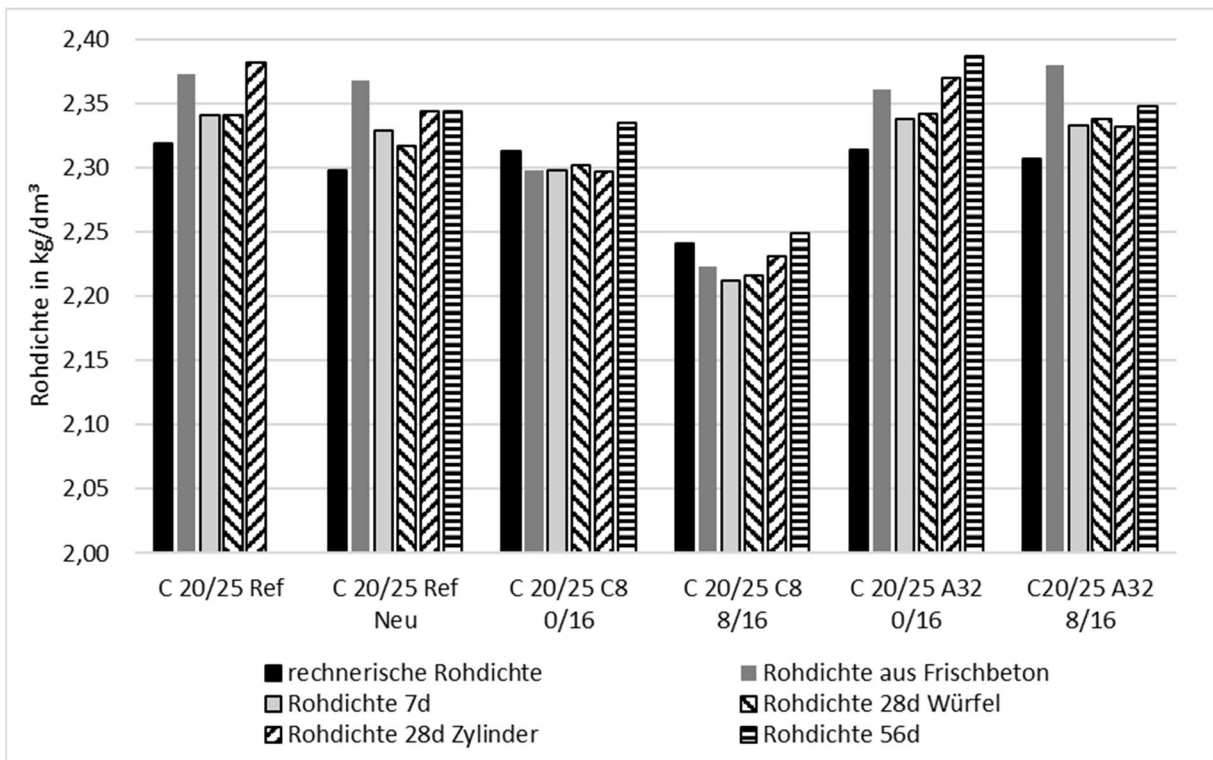


Abbildung 3.34: Vergleich der Rohdichten der Betone des Innenbauteils

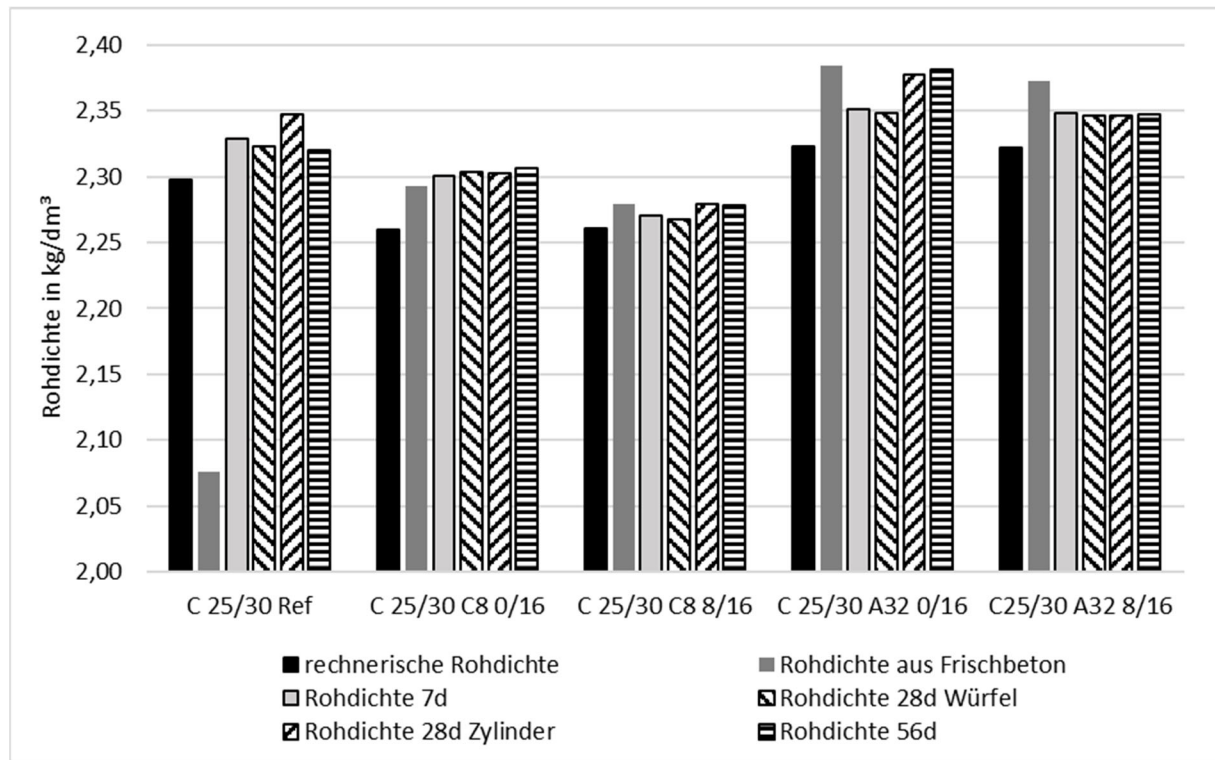


Abbildung 3.35: Vergleich der Rohdichten der Betone des Außenbauteils

Zunächst fällt auf, dass bei der Bestimmung der Frischbetonrohddichte bei dem Beton C 25/30 Ref offenbar ein Fehler aufgetreten ist, da dieser Wert stark von den Rohdichten am Festbeton und der rechnerischen Rohddichte abweicht. Weiter fällt auf, dass die Rohddichte am Frischbeton bei etwa der Hälfte der geprüften Betone größer ist als die Rohddichte am Festbeton. Die Rohddichte, ermittelt am Zylinder (300/150) nach 28 Tagen, ist bei einigen Betonen etwas größer als die am Würfel (150) ermittelte Rohddichte im gleichen Alter. Eine mögliche Ursache liegt hier in Messfehlern, so ist bei den Zylindern durch die eben geschliffenen Stirnflächen eine recht exakte Volumenbestimmung möglich. Das Volumen der Würfel hingegen wird durch einzelne hervorstehende Körner auf der Einfüllseite etwas überschätzt. Da die Rohddichte als Quotient aus Masse und Volumen definiert ist, wird bei einem überschätzten Volumen die Rohddichte etwas kleiner. Beim Vergleich der Rohdichten, die am Würfel im Rahmen der Druckfestigkeitsprüfungen ermittelt wurden, treten nur geringe Streuungen auf, die im Rahmen der üblichen Messungenauigkeit liegen. Insgesamt sind die Abweichungen der bestimmten Rohdichten allerdings nur gering.

Die für die Statik wesentliche Eigenschaft eines Betons ist dessen Druckfestigkeit. Diese wird in Deutschland üblicherweise an Würfeln mit einer Nennkantenlänge von 150 mm nach DIN EN 12390-3 [38] ermittelt.

Für die Betone des Innenbauteils war eine Druckfestigkeitsklasse C 20/25 angestrebt, also eine Würfeldruckfestigkeit f_{ck} von mindestens 25 N/mm². Zur Konformitätsprüfung definiert DIN EN 206-1 [6] zwei Kriterien: Für die mittlere Druckfestigkeit muss $f_{c,cube,m} \geq f_{ck} + 4$ N/mm² gelten und für jeden Einzelwert muss die Bedingung $f_{c,cube,i} \geq f_{ck} - 4$ N/mm² erfüllt sein. Wie aus Abbildung 3.36 ersichtlich ist, erfüllen sämtliche Betone das Kriterium $f_{c,cube,m} \geq 29$ N/mm² nach 28 Tagen, wenn auch teilweise nur knapp. Zwischen den beiden Referenzmischungen und den vier Betonen mit wiedergewonnener Gesteinskörnung zeigen sich nur geringe Unterschiede. Die

etwas geringere Festigkeit der Mischung C 20/25 Ref im Vergleich zur Mischung C 20/25 Ref Neu im Prüfalalter von 28 Tagen lässt sich mit dem Bluten der ersten Referenzmischung und damit verbundenem Entmischen des Betons erklären. Die geringere Festigkeit des Betons C 20/25 C8 8/16 lässt sich auf den hohen Luftporengehalt zurückführen. Sollte der Luftporengehalt größer 1,5 Vol.-% sein, ist die Differenz betontechnologisch gleichbedeutend wie ein „Mehr“ an Wasser. Ein „Mehr“ an Luftporen von 1,0 Vol.-% entspricht dabei etwa 10 kg/m³ zusätzlichem Wasser [39]. Die weiteren Unterschiede sind mit der üblichen Prüfstreuung zu erklären. Das zweite Konformitätskriterium, dass jeder Einzelwert der Druckfestigkeit größer gleich $f_{ck} - 4 \text{ N/mm}^2$, also 21 N/mm² sein muss, wird, wie in Abbildung 3.37 zu sehen ist, mit ausreichender Sicherheit eingehalten. Damit sind die Konformitätskriterien für die Festigkeitsklasse C 20/25 für alle geprüften Betone erfüllt. Es zeigen sich auch keine größeren Prüfstreuungen bei den Betonen mit wiedergewonnener Gesteinskörnung im Vergleich zu den Referenzmischungen.

Bei den Druckfestigkeiten nach sieben und 56 Tagen zeigen sich keine wesentlich abweichenden Verhältnisse zu den untersuchten Betonen im Vergleich zu den Festigkeiten nach 28 Tagen.

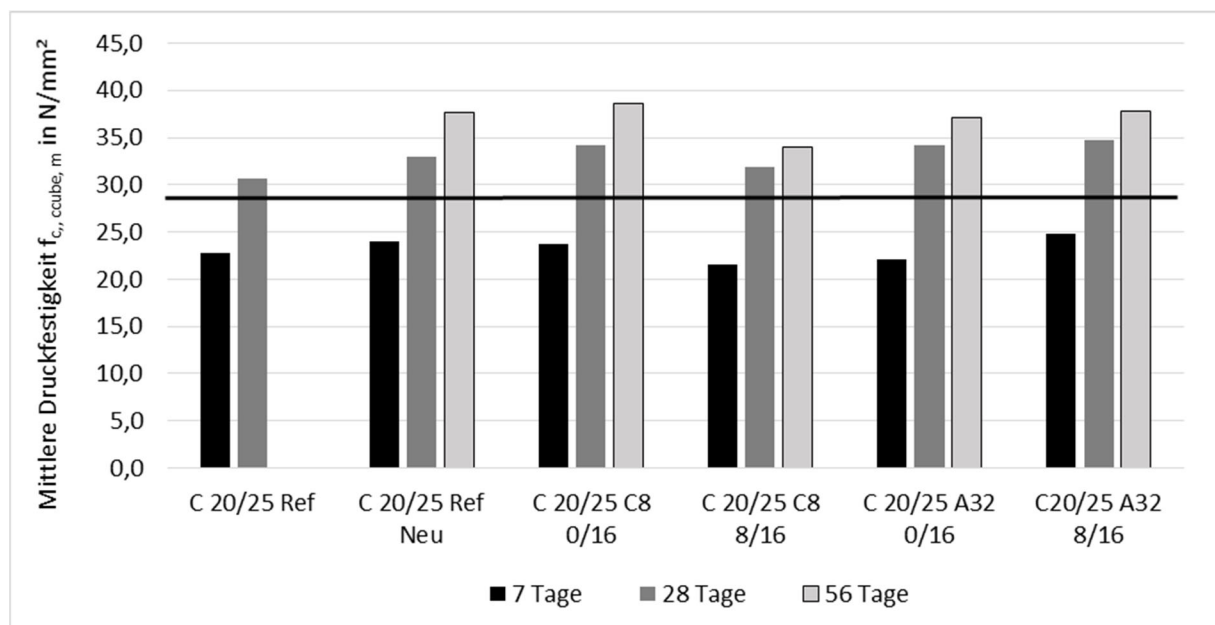


Abbildung 3.36: Mittlere Würfeldruckfestigkeit der Betone des Innenbauteils

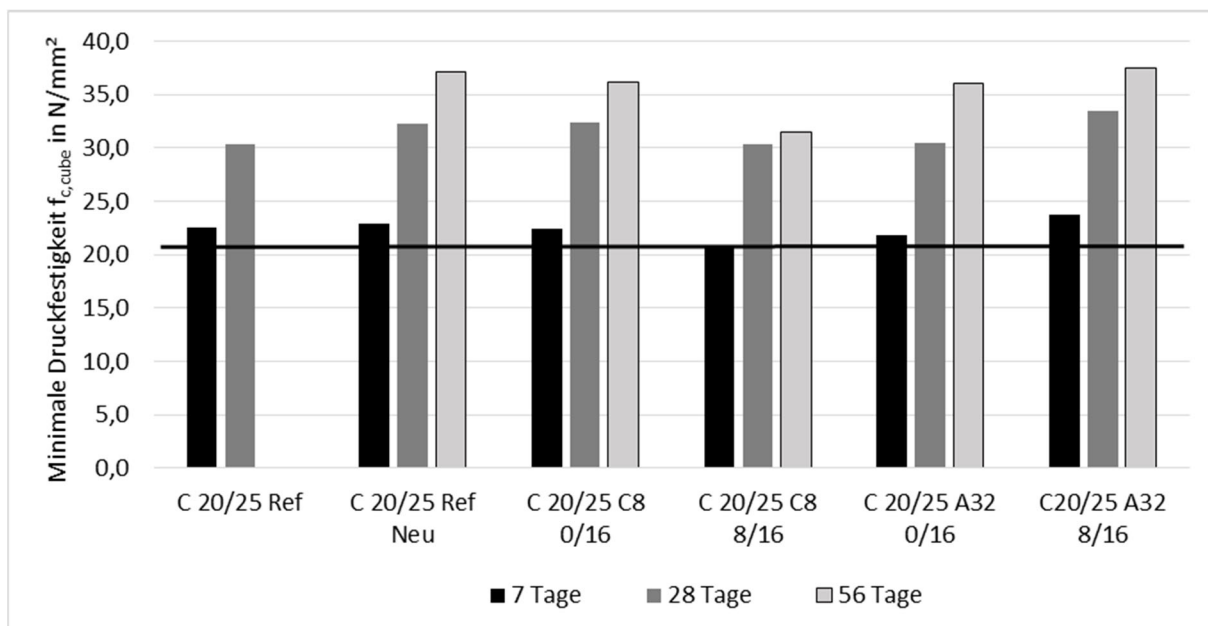


Abbildung 3.37: Minimale Würfel­druckfestigkeit der Betone des Innenbauteils

Für die Betone des Außenbauteils war eine Festigkeitsklasse C 25/30 angestrebt. Dies bedeutet für die Konformitätskriterien, dass nach 28 Tagen eine mittlere Druckfestigkeit von 34 N/mm² erreicht sein muss und kein Einzelwert der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen kleiner als 26 N/mm² sein darf. Wie in Abbildung 3.38 und Abbildung 3.39 zu sehen ist, erfüllen alle fünf Betone beide Kriterien, somit sind sie alle der Festigkeitsklasse C 25/30 zuzuordnen. Wie auch bei den Betonen des Innenbauteils zeigt sich auch für die Betone des Außenbauteils, dass die Druckfestigkeiten im Rahmen der üblichen Prüfstreuung gleich sind. Lediglich der Beton mit einer Regelsieblinie C8 der wiedergewonnenen Gesteinskörnung, die auf die größte Korngruppe zugegeben wurde, weist eine geringere Festigkeit nach 28 Tagen auf.

Bei den Druckfestigkeiten nach sieben und 56 Tagen zeigen sich keine großen Auffälligkeiten.

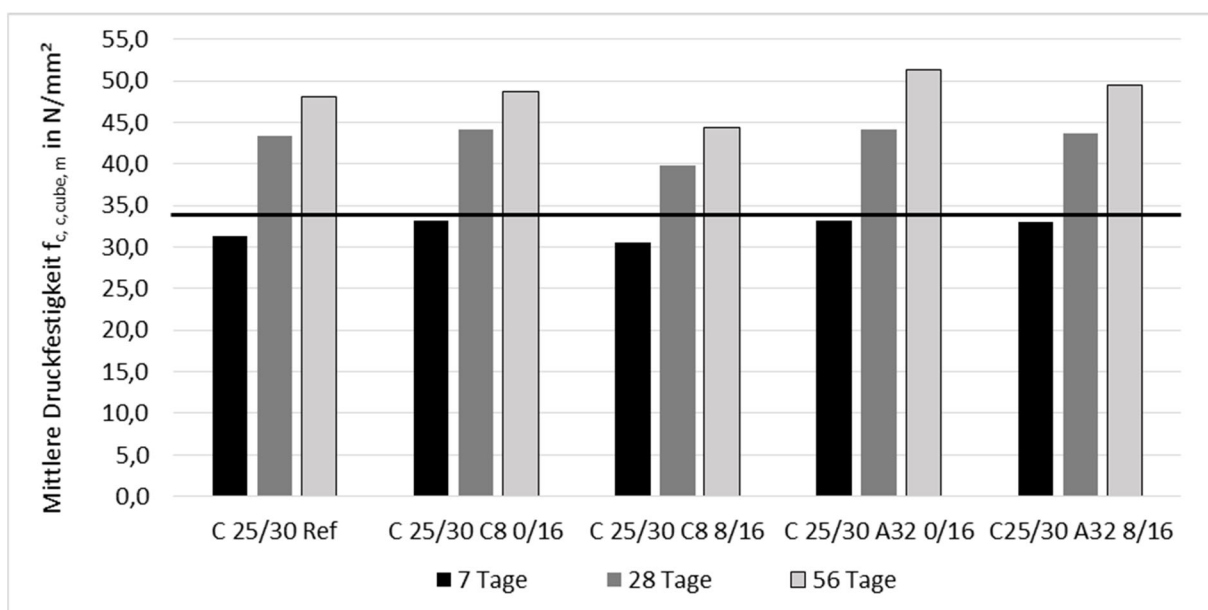


Abbildung 3.38: Mittlere Würfel­druckfestigkeit der Betone des Außenbauteils

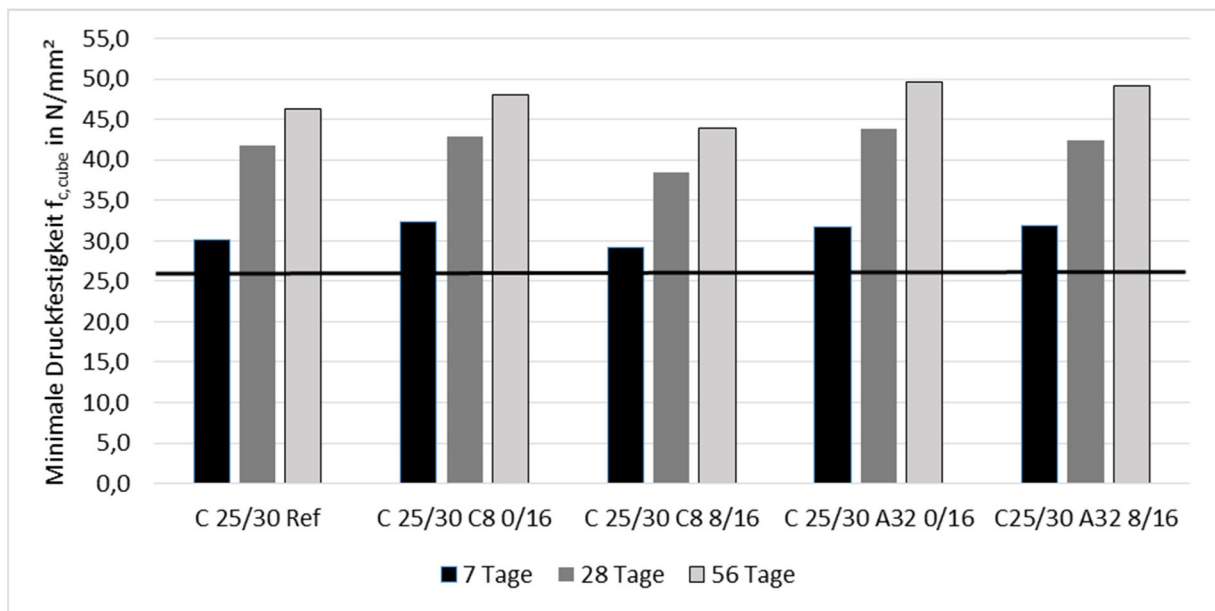


Abbildung 3.39: Minimale Würfeldruckfestigkeit der Betone des Außenbauteils

Neben der Druckfestigkeit ist für die Statik eines Bauwerks der Elastizitätsmodul eines Betons eine maßgebende Eigenschaft. Daher wurde an jeweils mindestens drei wassergelagerten Zylindern der Nennmaße 150 mm/ 300 mm im Alter von 28 Tagen der Elastizitätsmodul nach DIN EN 12390-13 [40] nach Verfahren B bestimmt. Die Ergebnisse sind Abbildung 3.40 und Abbildung 3.41 zu entnehmen.

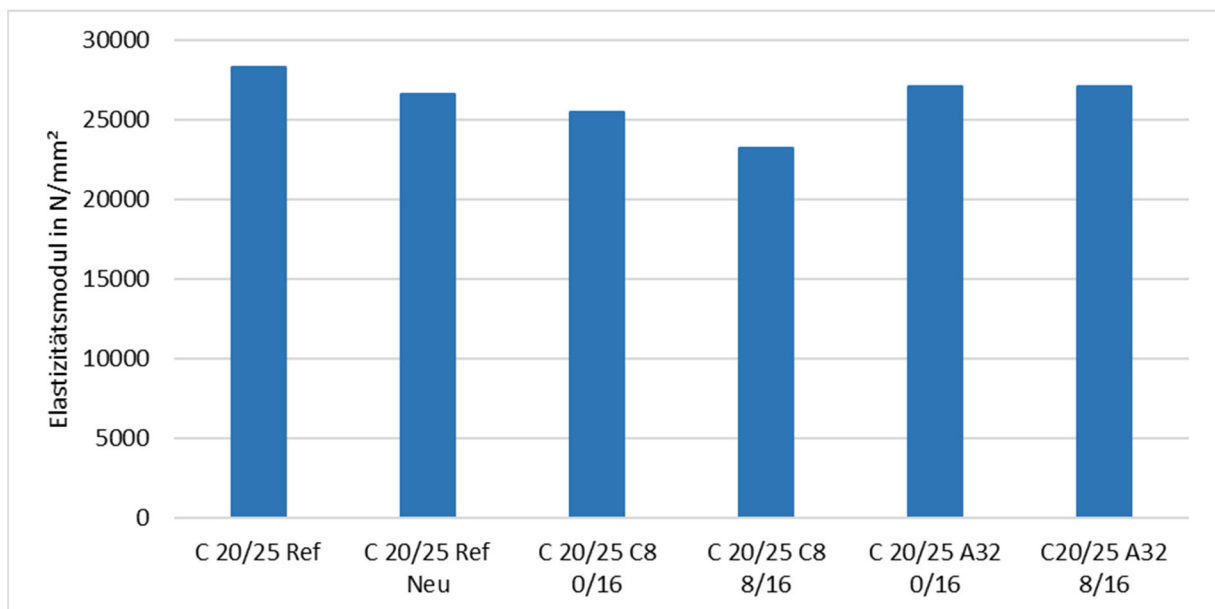


Abbildung 3.40: Elastizitätsmodul der Betone des Innenbauteils

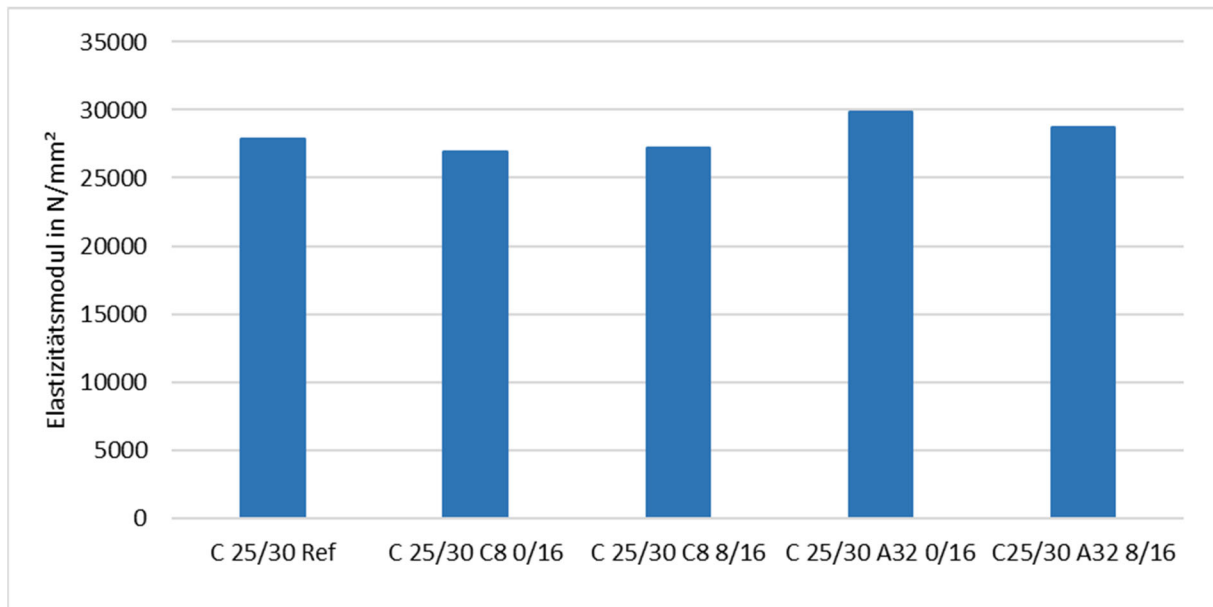


Abbildung 3.41: Elastizitätsmodul der Betone des Außenbauteils

Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) [41] gibt Rechenwerte für den Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Betonfestigkeitsklasse an. Für eine Betongüte C 20/25 soll demnach der Elastizitätsmodul E_{cm} 30.000 N/mm² betragen und bei einer Betongüte C 25/30 soll E_{cm} 31.000 N/mm² sein. Diese Werte erreicht keiner der geprüften Betone, auch nicht die Referenzbetone. Allerdings besagt EC 2 [41] in 3.1.3 (2), dass der Elastizitätsmodul in starkem Maße von der verwendeten Gesteinskörnung abhängt. Bei Betonen aus Basalt oder dichtem Kalkstein ist so mit einem um 20 % vergrößertem Elastizitätsmodul zu rechnen, bei Betonen aus Kalkstein ist der Elastizitätsmodul um 10 % zu reduzieren und bei Betonen aus Sandstein wird eine Reduzierung um 30 % vorgeschlagen.

Bei den Betonen des Innenbauteils (Abbildung 3.40) zeigen sich Unterschiede zwischen den beiden Referenzmischungen. Auffallend ist, dass die Mischung, bei der sich der Beton augenscheinlich entmischt und stark geblutet hat, einen höheren Elastizitätsmodul aufweist. Die Betone mit wiedergewonnener Gesteinskörnung der Sieblinie C8 weisen geringere Elastizitätsmodule auf, wobei insbesondere der Wert des Betons C 20/25 C8 8/16 auffallend gering ist. Dies lässt sich vermutlich mit dem hohen Luftporengehalt bei dieser Mischung erklären, da der Elastizitätsmodul von der Porosität eines Betons abhängig ist [42]. Die Betone C 20/25 C8 0/16, C 20/25 A32 0/16 und C 20/25 A32 8/16 sind im Rahmen der üblichen Prüfstreuung mit den Referenzbetonen vergleichbar.

Bei den Betonen des Außenbauteils (Abbildung 3.41) zeigen sich insgesamt deutlich kleinere Unterschiede zwischen den Betonen. So ist der Elastizitätsmodul der Betone C 25/30 C8 0/16 und C 25/30 C8 8/16 trotz sehr hoher Luftporengehalte von 4,1 Vol.-% nicht deutlich kleiner als bei der Referenzmischung, obwohl hier der Luftporengehalt nur etwa halb so groß war. Die etwas größeren Elastizitätsmoduln bei den Betonen mit wiedergewonnener Gesteinskörnung der Sieblinie A32 lassen sich eventuell mit dem größeren Größtkorn dieser Betone erklären. Insbesondere wenn der Austausch der Gesteinskörnung über alle Korngruppen erfolgt, liegt ein grobkörnigeres Korngemisch vor. Da Rheinkies üblicherweise aus etwa 60 % Quarz, 25 % Sandstein und 15 % Kalkstein besteht [43] und Quarz ein Elastizitätsmodul von 25.000 N/mm² bis 65.000 N/mm², Sandstein von 2.000 N/mm² bis 20.000 N/mm² und Kalkstein von bis zu

80.000 N/mm² aufweist [13], ist die Gesteinskörnung deutlich steifer als der Zementstein mit einem Elastizitätsmodul von 5.000 N/mm² bis 20.000 N/mm² [13]. Da der Beton bestrebt ist, die Spannungen entsprechend der Steifigkeitsverhältnisse auf Gesteinskörnung und Zementstein umzulagern, muss eine Spannungsumlagerung auf die Gesteinskörnung stattfinden. Diese ist bei grobkörniger Gesteinskörnung aufgrund der großen Verbundoberfläche zwischen Zementleim und Gesteinskörnung leichter möglich, sodass höhere Elastizitätsmoduln (-moduln?) zu beobachten sind [42]. Mit der gleichen Begründung lassen sich zusätzlich zum geringeren Verdichtungsgrad des Betons auch die kleineren Elastizitätsmoduln der Betone mit einer Sieblinie C8 der wiedergewonnenen Gesteinskörnung erklären.

In Abbildung 3.42 ist der Zusammenhang zwischen der Würfeldruckfestigkeit und dem am Festbeton ermitteltem Elastizitätsmodul dargestellt. Grundsätzlich besteht nach DIN EN 1992-1-1 [41] folgender Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul und der Zylinderdruckfestigkeit

$$E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad [41] \quad (18)$$

Mit:

E_{cm} : Mittlerer Elastizitätsmodul als Sekante in N/mm²

f_{cm} : Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen in N/mm²

Der Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit ist dabei als Summe aus der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen und einem Vorhaltemaß von 8 N/mm² definiert. Da hier die Druckfestigkeit nur an Würfeln geprüft wurde, musste aus den Würfeldruckfestigkeiten $f_{c,cube}$ die Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} berechnet werden, die 82 % der Würfeldruckfestigkeit beträgt [44]. Auf die Addition des Vorhaltemaßes auf die so ermittelten Zylinderfestigkeiten wurde verzichtet, da die Würfeldruckfestigkeiten bereits Mittelwerte darstellen. Mit diesen fiktiven mittleren Zylinderdruckfestigkeiten wurde dann der theoretische Elastizitätsmodul nach Gleichung (18) berechnet.

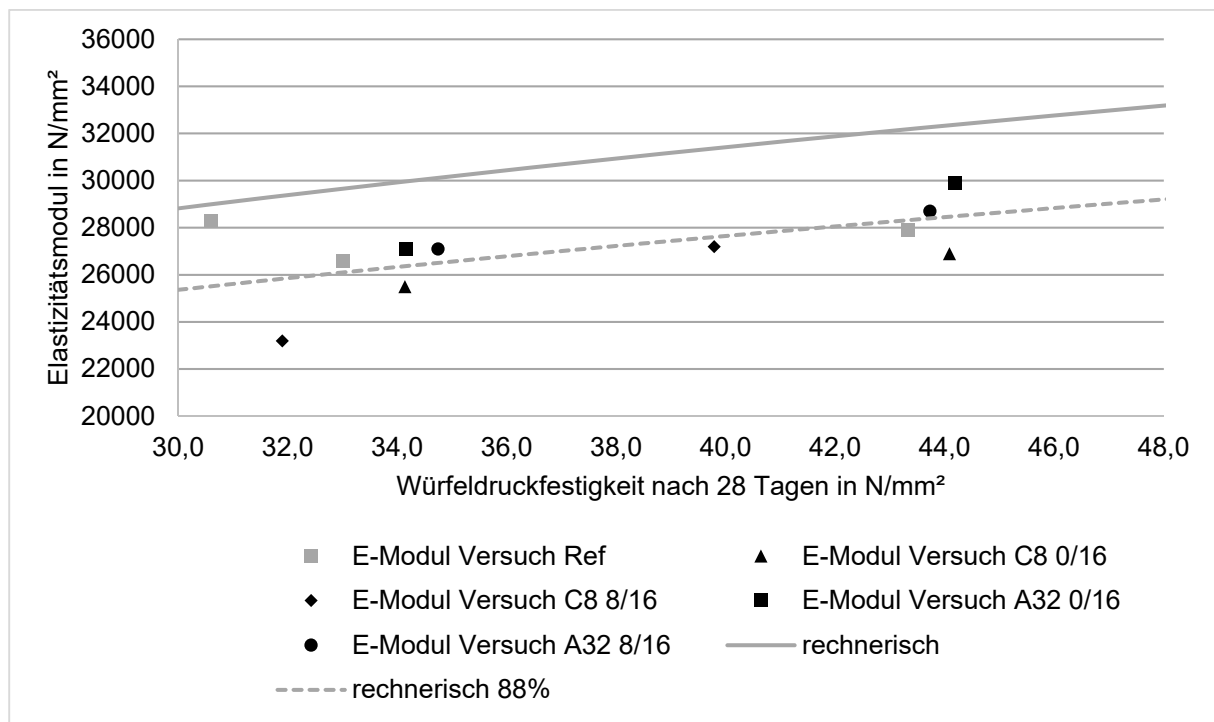


Abbildung 3.42: Korrelation zwischen Würfeldruckfestigkeit und Elastizitätsmodul

Wie schon zuvor beschrieben, zeigt sich, dass der Rechenansatz nach DIN EN 1992-1-1 [41] für die verwendete Gesteinskörnung scheinbar nicht gilt, da er zu große Elastizitätsmoduln erwarten lässt. Reduziert man den rechnerischen Elastizitätsmodul jedoch auf 88 %, ein Korrekturfaktor je nach verwendeter Gesteinskörnung ist nach DIN EN 1992-1-1 [41] zulässig, zeigt sich eine gute Korrelation zwischen dem nun abgeminderten Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit. Einzig der Wert des entmischten Betons C 20/25 Ref und der Beton C 20/25 C8 8/16 weichen von diesem Zusammenhang etwas stärker ab. Ein nennenswerter negativer Einfluss der wiedergewonnenen Gesteinskörnung konnte somit nicht festgestellt werden.

Eine weitere statisch relevante Werkstoffeigenschaft ist die Zugfestigkeit des Betons. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde die Spaltzugfestigkeit im Alter von 28 Tagen geprüft. Als Probekörper wurden die Zylinder verwendet, an denen zuvor bereits der Elastizitätsmodul geprüft wurde. Die erreichten Spaltzugfestigkeiten sind in Abbildung 3.43 und Abbildung 3.44 dargestellt, wobei diese abweichend zur Prüfnorm mit den Istmaßen berechnet wurden.

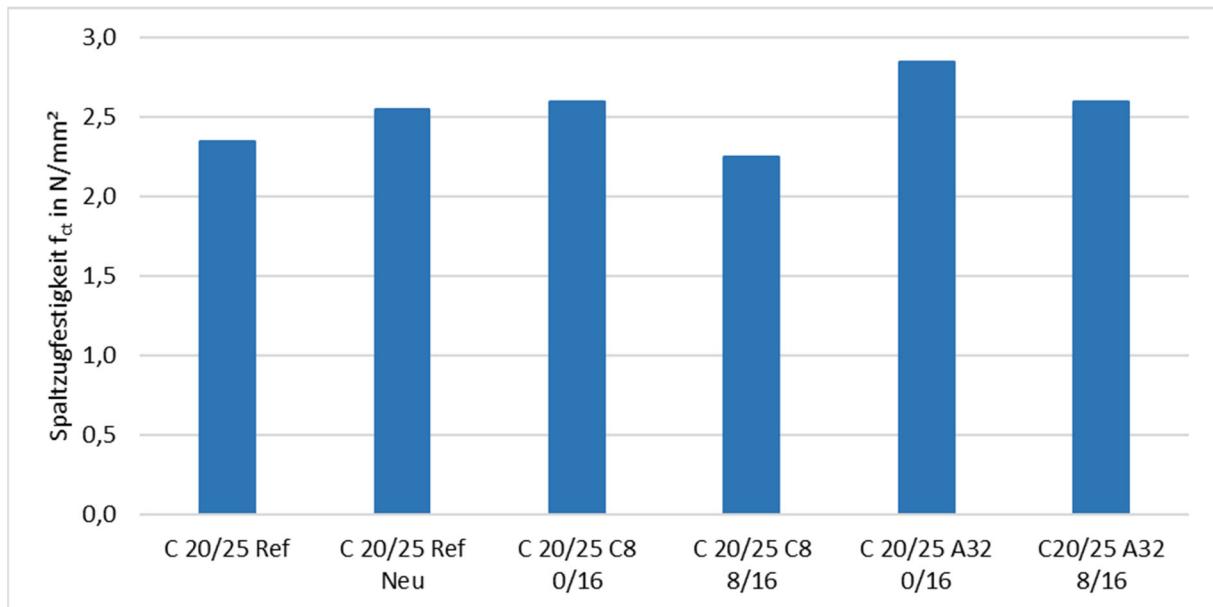


Abbildung 3.43: Spaltzugfestigkeit der Betone des Innenbauteils

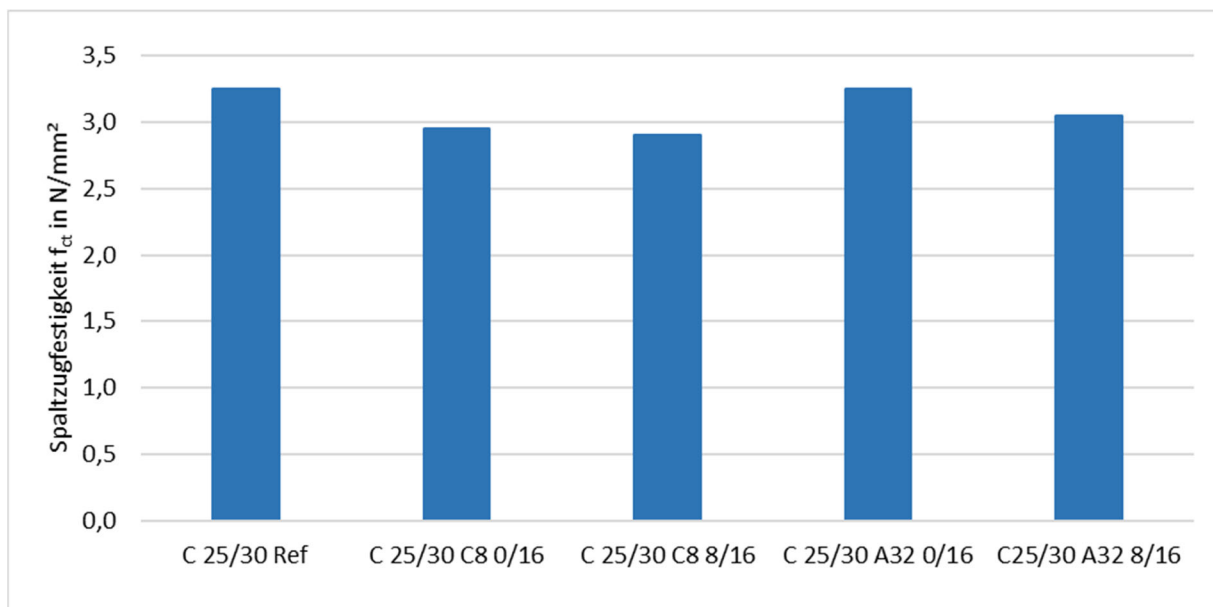


Abbildung 3.44: Spaltzugfestigkeit der Betone des Außenbauteils

Bei den Betonen des Innenbauteils wurden mittlere Spaltzugfestigkeiten zwischen $2,25 N/mm^2$ und $2,85 N/mm^2$ erreicht. Die Festigkeiten der Betone C 20/25 Ref Neu, C 20/25 C8 0/16 und C 20/25 A32 8/16 waren annähernd identisch. Der Beton C 20/25 Ref wies etwas geringere Festigkeiten auf, was in Anbetracht von nur halb so großen Luftporengehalten wie bei C 20/25 Ref Neu unlogisch erscheint, da grundsätzlich die Spaltzugfestigkeit ähnlich wie die Druckfestigkeit mit zunehmendem wirksamen Wasserzementwert kleiner wird [45]. Eventuell traten jedoch durch die unzureichende Mischungsstabilität der Mischung C 20/25 Ref lokale Schwachstellen auf, die zu einem vorzeitigen Versagen führten. Die geringere Festigkeit des Betons C 20/25 C8 8/16 kann auf den deutlich erhöhten Luftporengehalt und damit größeren wirksamen Wasserzementwert zurückgeführt werden. Die Mischungen mit wiedergewonnener Gesteinskörnung der Sieblinie A32 enthielten mehr gebrochene Gesteinskörnung. Da eine raue Gesteinskörnungsoberfläche einen besseren Verbund bedeutet, werden damit höhere

Spaltzugfestigkeiten erreicht. Die Beobachtung von Bonzel [45], dass Mischungen mit einem kleineren Größtkorn bzw. einer feineren Sieblinie tendenziell höhere Festigkeiten ergeben, konnte beim Vergleich der Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung auf alle Korngruppen im Vergleich zur Zugabe auf die größte Korngruppe nicht beobachtet werden. So wurden bei der Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung auf alle Korngruppen bei allen Betonen geringfügig höhere Spaltzugfestigkeiten erreicht.

Bei den Betonen des Außenbauteils wurden Spaltzugfestigkeiten von 2,90 N/mm² bis 3,25 N/mm² erzielt. Hier war nur der Beton C 25/30 A32 0/16 gleichwertig zur Referenzmischung, die übrigen drei Betone wiesen etwas geringere Festigkeiten auf. Ein möglicher Grund für die geringere Festigkeit der Betone C 25/30 C8 0/16 und C 25/30 C8 8/16 ist der deutlich erhöhte Luftporengehalt beider Mischungen. Ein Effekt durch die gebrochene Gesteinskörnung bei den Mischungen mit der Sieblinie A32 der wiedergewonnenen Gesteinskörnung konnte anders als beim Innenbauteil nicht beobachtet werden. Das Ergebnis der Innenbauteilbetone, dass die Zugabe auf alle Korngruppen etwas höhere Festigkeiten ergibt, konnte auch hier festgestellt werden.

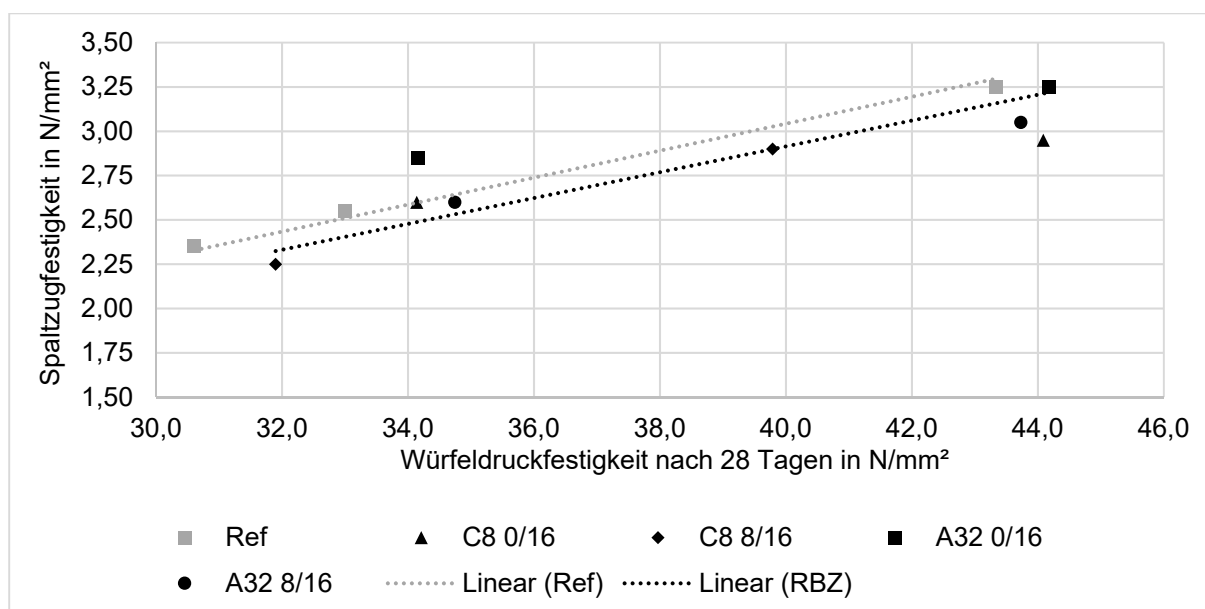


Abbildung 3.45: Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit

Zwischen der Druckfestigkeit und der Spaltzugfestigkeit besteht ein nahezu linearer Zusammenhang [46]. Eine lineare Trendkurve für den in Abbildung 3.45 dargestellten Zusammenhang zwischen Würfeldruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit ergab annähernd gleiche Steigungen. Bei den Referenzbetonen ist die Druckfestigkeit ca. 14-mal größer als die Spaltzugfestigkeit und es wird bei drei Messwerten ein Bestimmtheitsmaß von 99 % erreicht. Bei den Betonen mit wiedergewonnener Gesteinskörnung ist die Druckfestigkeit etwa 13-mal größer als die Spaltzugfestigkeit und es wird bei acht Werten ein Bestimmtheitsmaß von 65 % erreicht. Es kann also kein nennenswerter Einfluss der wiedergewonnenen Gesteinskörnung festgestellt werden. Das geringere Bestimmtheitsmaß resultiert vermutlich aus dem höheren Anteil an Messwerten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Zugabe von wiedergewonnener Gesteinskörnung keine negativen Auswirkungen gezeigt hat. In den Festbetonkennwerten zeigen sich zwar geringe Schwankungen, diese liegen jedoch im Bereich der natürlichen

Schwankungsbreite, die auch durch die Variation in den natürlichen Ausgangsstoffen vorhanden sind. Ein deutlicherer Einfluss zeigt sich nur bei der Konsistenz des Frischbetons. Diese Schwankungen lassen sich jedoch durch Zusatzmittel ausgleichen.

3.5 Arbeitspaket 5

Arbeitspaket 5 hatte die Übertragung der Laboruntersuchungen in die Praxis zum Ziel. In praxisnahen Versuchen im Transportbetonwerk sollten die Laborergebnisse nochmals überprüft und die Praxistauglichkeit der erarbeiteten Vorgehensweise getestet werden. Dazu wurden aus der Gruppe der teilnehmenden Werke zwei Werke ausgewählt, in denen dann Betonagen durchgeführt wurden. Eine schematische Übersicht findet sich in Abbildung 3.46. In Werk 1 wurden die zwei bereits im Labor untersuchten Zugabemethoden an einer Betonzusammensetzung untersucht. Dies sollte zeigen, wie stark sich die Zugabeart in der Praxis auswirkt. In den Laborversuchen hatten sich dabei nur geringfügige Unterschiede in der Verarbeitbarkeit gezeigt. Als Betonzusammensetzung wurde eine Standardrezeptur des Betonwerks gewählt, mit einer Festigkeitsklasse von C 25/30. Als Zugabeart wurden einmal die im Werk aktuell übliche Zugabe der Gesteinskörnung zur Fraktion 8/16 und einmal die Zugabe des ausgewaschenen Materials als eigene Fraktion untersucht. Die Zugabe als eigene Fraktion hatte sich in der theoretischen Betrachtung und während der Laborversuche als die robustere Variante gezeigt.

Im zweiten Werk wurde hingegen nur mit der im Labor erarbeiteten Zugabevariante gearbeitet. Es wurden jedoch zwei Betonzusammensetzungen hergestellt. Es wurde zum einen ein Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 und zum anderen ein Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 hergestellt. Bei den Betonagen wurden sowohl die Frischbeton- als auch die Festbetoneigenschaften untersucht. Bei der Betonage in Werk 2 wurden zusätzlich Gemosteine (Betonlegosteine) als Großbauteil hergestellt. Diese wurden gesondert markiert und werden in einer Trennwand im Werk eingebaut, sodass sie auch weiterhin zugänglich sind. Auf diese Weise lassen sich langfristige Veränderungen im Vergleich zu den anderen Steinen überwachen.

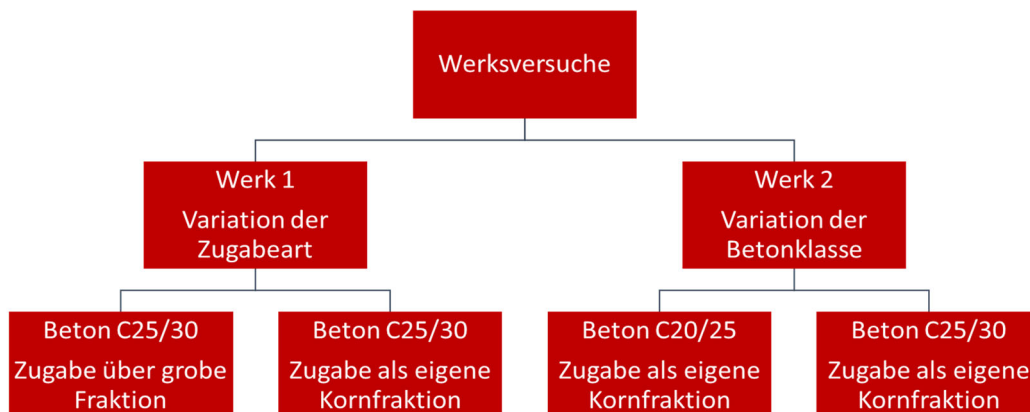


Abbildung 3.46: Übersicht der Werksversuche

Tabelle 3.11 zeigt das Prüfprogramm für die durchgeführten Betonagen. Im Wesentlichen wurden dieselben Parameter abgeprüft wie schon im vorausgegangenen Arbeitspaket.

Tabelle 3.11: Prüfprogramm für die Werksversuche

	Prüfungen
Frischbeton	Ausbreitmaß bis 60 Minuten
	Rohdichte
	Luftporengehalt
Festbeton	Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen
	Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen
	E-Modul nach 28 Tagen
	CIF-Prüfung (nur Betone der Klasse C 25/30)

Ergebnisse und Diskussion:

Ergebnisse Werk 1:

Bei den Betonagen in Werk 1 wurden zwei unterschiedliche Zugabevarianten für die wiedergewonnene Gesteinskörnung miteinander verglichen. Aus technischen Gründen variieren hierbei die Zugabemengen der wiedergewonnenen Gesteinskörnung etwas. Angestrebt waren 20 - 25 % Austausch bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung. Beim Ersatz der Fraktion 8/16 mm konnten 50 % des Materials ausgetauscht werden, was etwa 15 % bezogen auf die Gesamtmasse der Gesteinskörnung entspricht. Die Austauschmenge liegt also etwas unterhalb des angestrebten Wertes. Bei der Variante 2 hingegen liegt die Austauschmenge bei 26 % bezogen auf die Gesamtmasse der Gesteinskörnung. Der Wasserzementwert liegt bei der zweiten Mischung mit 0,59 ebenfalls etwas höher als bei der ersten Mischung mit 0,55. Zunächst wurden die Frischbetonkennwerte beider Betone erfasst. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 3.12 dargestellt. Angestrebt war eine Konsistenzklasse F3, was einem Ausbreitmaß von 420 mm bis 480 mm entspricht. Beton 1-1 erfüllt mit einem Ausbreitmaß von 470 mm das Kriterium, während Beton 2 mit 530 mm bereits in Konsistenzklasse F4 liegt. Diese Abweichung kann durch den leicht erhöhten Wasserzementwert begründet sein. Auch geringe Unterschiede in der Fließmittelmenge könnten zu den Unterschieden führen. Hinsichtlich der Konsistenzhaltung sind beide Betone auch nach 60 Minuten noch als F3 einzuordnen. Abweichungen zeigen sich auch im Luftgehalt, der bei Beton 1-2 nur bei 0,5 Vol.-% liegt. Dies könnte darin begründet liegen, dass der Beton aufgrund der besseren Fließfähigkeit besser verdichtet wurde. Das würde auch die geringfügig höhere Frischbetonrohichte erklären.

Tabelle 3.12: Übersicht über die Frischbetonkennwerte der Betonagen aus Werk1

	Beton 1-1	Beton 1-2
Zugabevariante	50% Ersatz der Fraktion 8/16	Gleichmäßiger Ersatz über gesamte Sieblinie
Anteil RC-Gesteinskörnung	15 M.-%	26 M.-%
w/z-Wert	0,55	0,59
Zielkonsistenz	F3 (420 – 480 mm)	F3 (420 – 480 mm)
Ausbreitmaß	470 mm	530 mm
Ausbreitmaß nach 60 Minuten	430 mm	435 mm
Luftgehalt	1,0 Vol.-%	0,5 Vol.-%
Frischbetonrohichte	2,35 kg/m ³	2,38 kg/m ³
Frischbetontemperatur	20 °C	20 °C

Weiterhin wurden verschiedene Festbetonkennwerte, wie die Druckfestigkeit und der E-Modul, bestimmt. In Abbildung 3.47 sind die Druckfestigkeiten der beiden untersuchten Betone in Abhängigkeit vom Probenalter dargestellt. Für beide Betone zeigt sich eine normale Festigkeitsentwicklung, wobei die ermittelten Werte für Beton 1-2 für alle Zeitpunkte geringfügig höher liegen als die Werte für Beton 1-1. Trotzdem erreichen beide Betone die geforderte Zieldruckfestigkeit von mehr als 30 MPa. Die geringfügig höheren Werte für Beton 1-2 könnten darin begründet sein, dass beim gleichmäßigen Ersatz der wiedergewonnenen Gesteinskörnung über die gesamte Sieblinie, die Sieblinie weniger stark verändert wird als beim Ersatz über die größte Fraktion. Die Korngrößenverteilung ist insgesamt gleichmäßiger, als wenn die grobe Fraktion teilweise durch ein gesamtes Korngemisch ersetzt wird. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass eine Variation im Wasserzementwert vorliegt. Bei E-Modul und Spaltzugfestigkeit zeigen sich ebenfalls nur geringe Unterschiede, die innerhalb der normalen Schwankungsbreite eines normalen Betons liegen. Auch hier liegen die Werte von Beton 1-2 tendenziell etwas höher (vgl. Tabelle 3.13). Zusätzlich wurde die Frostbeständigkeit der Betone mit dem CIF-Verfahren untersucht. Beide Betone erfüllen die entsprechenden Anforderungen an die Frostbeständigkeit. Die Ergebnisse der CIF-Prüfung finden sich im Anhang Abschnitt 11.5.

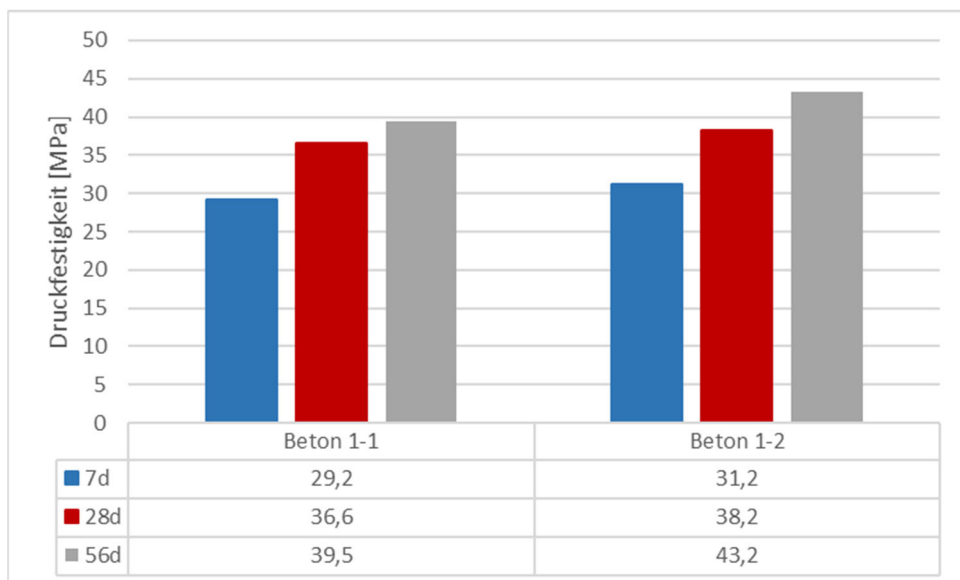


Abbildung 3.47: Druckfestigkeiten der Betone aus Werk 1 zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Tabelle 3.13: Festbetonkennwerte der Betone aus Werk 1

	Probenalter	Beton 1-1 – C 25/30 (RC-GK unter 8/16)		Beton 1-2 – C 25/30 (RC-GK als eigene Kornfraktion)	
		Einzelwerte	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert
Druckfestigkeit [MPa]	7 Tage	28,6	29,2	29,7	31,2
		29,9		32,9	
		29,1		31,0	
	28 Tage	36,2	36,6	36,0	38,2
		36,7		39,0	
		36,8		39,6	
	56 Tage	38,4	39,5	44,3	43,2
		40,0		41,6	
		40,2		43,6	
Spaltzugfestig- keit [MPa]	28 Tage	3,0	3,2	3,5	3,3
		3,2		3,3	
		3,2		3,1	
E-Modul [GPa]	28 Tage	30,6	30,8	30,4	31,2
		30,6		32,0	
		31,2		fehlerhaft	

Ergebnisse Werk 2:

Im zweiten Werk wurden zwei Betone unterschiedlicher Festigkeit hergestellt, während die Zugabeart in diesem Fall nicht variiert wurde. Bei beiden Betonen wurde die wiedergewonnene Gesteinskörnung als eigene Kornfraktion zugegeben und gleichmäßig über alle Fraktionen ersetzt. Als Festigkeitsklasse wurde zum einen ein C 20/25 (Innenbauteil) und zum anderen ein C 25/30 (Außenbauteil) gewählt und der Anteil wiedergewonnener Gesteinskörnung beträgt jeweils 25 %. Der Vergleich erfolgt mit entsprechenden Werten aus Betonagen der gleichen Zusammensetzung nur ohne wiedergewonnene Gesteinskörnung. Diese Betone wurden nicht direkt im Rahmen der Werksbetonage sondern vom Werk gesondert hergestellt. Aus diesem Grund liegen hier nicht alle Werte vor, sondern nur einige ausgewählte Festbetonkennwerte. In Tabelle 3.14 sind die Frischbetonkennwerte der beiden Betone mit wiedergewonnener Gesteinskörnung aufgezeigt. Als Zielkonsistenz wurde jeweils F3 angesetzt. Während der Beton C 20/25 genau in diesem Bereich liegt, liegt der Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 mit einem

Ausbreitmaß von 500 mm leicht darüber. Nach 60 Minuten ist bei beiden Betonen ein Rücksteifen zu erkennen. Bei Rohdichte und Luftporengehalt zeigen sich keine Auffälligkeiten.

Tabelle 3.14: Frischbetonkennwerte der Betonagen in Werk 2

	Beton 2-1	Beton 2-2
Festigkeitsklasse	C 20/25	C 25/30
Anteil RC-Gesteinskörnung	25 M.-%	25 M.-%
w/z-Wert	0,63	0,58
Zielkonsistenz	F3 (420 – 480 mm)	F3(420 – 480 mm)
Ausbreitmaß	470 mm	500 mm
Ausbreitmaß nach 60 Minuten	345 mm	420 mm
Luftgehalt	1,4 Vol.-%	1,6 Vol.-%
Frischbetonrohichte	2,36 kg/m ³	2,37 kg/m ³
Frischbetontemperatur	25 °C	25 °C

Zusätzlich wurden auch hier Festbetonkennwerte erfasst. Da die Proben für die Referenzbetone nachträglich durch das Werk zur Verfügung gestellt wurden, konnten im Gegensatz zu den Betonen mit wiedergewonnener Gesteinskörnung nur einige ausgewählte Festbetonkennwerte erfasst werden. Aus diesem Grund liegen für die Referenzbetone nur die Kennwerte für ein Probenalter von 28 Tagen vor. Trotzdem ist es möglich einige Vergleiche anzustellen. In Abbildung 3.48 ist die Druckfestigkeit aller untersuchten Betone in Abhängigkeit vom Probenalter dargestellt. Betrachtet man zunächst die Festigkeitsentwicklung der Betone mit wiedergewonnener Gesteinskörnung, wird deutlich, dass beide wie auch schon die Proben aus Werk 1 und die im Labor hergestellten Proben eine normale Festigkeitsentwicklung zeigen. Darüber hinaus erreichen beide Betone die jeweils erforderliche Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen. Die 28 Tage-Festigkeit des Betons der Festigkeitsklasse C 20/25 liegt mit 44 MPa sogar deutlich über der geforderten Festigkeit, während der Referenzwert bei etwa 33 MPa liegt. Dies scheint auf den ersten Blick eine Folge der wiedergewonnenen Gesteinskörnung zu sein, da dies der einzige variierte Parameter ist. Es gibt jedoch einiges, das dagegen spricht. So tritt diese Diskrepanz zwischen dem untersuchten Beton und Referenzwert nur beim Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 auf. Beim Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 liegen die Festigkeiten

des Betons mit wiedergewonnener Gesteinskörnung und dem Referenzbeton mit 43 MPa und 39 MPa deutlich näher beieinander. Die Abweichung liegt hier noch innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite. Wäre die wiedergewonnene Gesteinskörnung jedoch der ausschlaggebende Faktor für die überhöhte Festigkeit, müsste sich dies auch in diesem Beton niederschlagen, da beide mit den nahezu gleichen Ausgangsstoffen und vor allem mit der gleichen Sieblinie für die Gesteinskörnung hergestellt wurden. Im Wesentlichen unterscheiden sich nur die Wasserzementwerte. Das lässt darauf schließen, dass noch weitere Faktoren Einfluss genommen haben. Als Zement wurde ein Zement der Festigkeitsklasse 42,5 verwendet. Geht man von dem Zement aus und schätzt in Kombination mit dem Wasserzementwert von 0,63 über die sogenannte Walz-Kurve die mögliche Betondruckfestigkeit ab, zeigt sich, dass Festigkeiten oberhalb von 40 MPa durchaus möglich sind. Darüber hinaus fand die Betonage der Referenz nicht am gleichen Tag statt. Bei den verwendeten Ausgangsmaterialien handelt es sich um Stoffe, die natürlichen Schwankungen unterliegen. Auch dadurch kann es zu Abweichungen in der Druckfestigkeit kommen. Die ermittelten Werte für Spaltzugfestigkeit und E-Modul zeigen auch in dieser Versuchsserie keinerlei Auffälligkeiten und liegen innerhalb der natürlichen Schwankungsbreite (vgl. Tabelle 3.15 und 3.16).

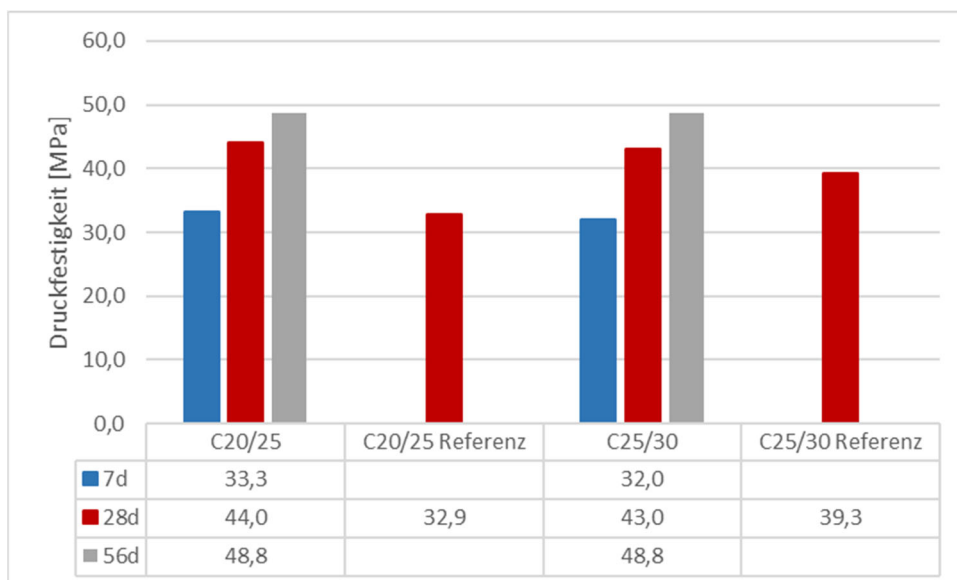


Abbildung 3.48: Druckfestigkeiten in Abhängigkeit vom Probenalter der Proben aus Werk 2

Tabelle 3.15: Festbetonkennwerte der Betone der Festigkeitsklasse C 20/25

	Probenalter	Beton 2-1 – C 20/25		C 20/25 Referenz	
		Einzelwerte	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert
Druckfestigkeit [MPa]	7 Tage	33,2	33,3		nicht geprüft
		31,8			
		34,8			
	28 Tage	44,5	44,0	32,3	32,9
		43,1		32,8	
		44,5		33,7	
	56 Tage	49,9	48,8		nicht geprüft
		49,2			
		47,5			
Spaltzugfestig- keit [MPa]	28 Tage	3,1	3,2	2,7	2,7
		3,3		2,6	
		3,2		2,9	
E-Modul [GPa]	28 Tage	30,7	30,4	27,6	28,1
		29,9		28,3	
		30,5		28,4	

Tabelle 3.16: Festbetonkennwerte der Betone der Festigkeitsklasse C 25/30

	Probenalter	Beton 2-2 – C 25/30		C 25/30 Referenz	
		Einzelwerte	Mittelwert	Einzelwerte	Mittelwert
Druckfestigkeit [MPa]	7 Tage	30,9	32,0		nicht geprüft
		33,1			
		32,2			
	28 Tage	43,7	43,0	38,5	39,3
		41,6		38,4	
		43,7		41,1	
	56 Tage	48,4	48,8		nicht geprüft
		49,9			
		48,2			
Spaltzugfestig- keit [MPa]	28 Tage	3,2	3,2	3,1	3,0
		3,4		3,1	
		3,1		3,0	
E-Modul [GPa]	28 Tage	30,4	31,1	28,6	28,4
		31,1		28,6	
		31,8		28,0	

Die Ergebnisse der Frostuntersuchungen des Betons C 25/30 finden sich im Anhang Abschnitt 11.5. Die untersuchte Betonzusammensetzung ist normalerweise für Expositionen entsprechend der Expositionsklasse XF1 ausgelegt. Erwartungsgemäß wurden deshalb die Anforderungen, die im Rahmen der Frostuntersuchungen mittels CIF-Verfahren abgeprüft wurden, nicht erfüllt.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel des hier dargestellten Forschungsprojekts war eine Untersuchung, inwieweit eine Steigerung des Einsatzes wiedergewonnener Gesteinskörnung aus dem werkseigenen Prozess von Transportbeton- und Fertigteilverwerken möglich und nötig ist. Auf diese Weise soll ein Beitrag zur Ressourcenschonung im Bauwesen und die Schaffung eines Rohstoffkreislaufs geleistet werden. Gerade die Umfrage im Arbeitspaket 1 hat gezeigt, dass hier ein deutlicher Bedarf besteht, da in den Werken durchaus größere Mengen an Restbeton und damit Gesteinskörnung anfallen, die aktuell nicht komplett in den Prozess zurückgeführt werden können. Ist dies nicht möglich, bleibt oft nur eine Entsorgung des Materials, obwohl die Bereitschaft, das Material bei entsprechenden

Regelungen im Beton wiederzuverwenden, durchaus vorhanden ist. Bisher sprechen dem jedoch vor allem die aktuellen normativen Regelungen entgegen. Im weiteren Verlauf haben die Untersuchungen gezeigt, dass die wiedergewonnene Gesteinskörnung der natürlichen Gesteinskörnung in ihren Eigenschaften im Wesentlichen gleichzusetzen ist. Unterschiede entstehen in erster Linie durch die unterschiedliche Sieblinienzusammensetzung, da man durch den Auswaschprozess ein Korngemisch erhält, das variieren kann. Je mehr unterschiedliche Betonsorten in einem Werk hergestellt werden, desto höher sind erwartungsgemäß die Schwankungen. Die Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass sich die Sieblinien der wiedergewonnenen Gesteinskörnungen häufig innerhalb eines relativ kleinen Schwankungsbereichs bewegen.

Um die maximale Austauschrate für den Einsatz wiedergewonnener Gesteinskörnung bestimmen zu können, wurden zunächst einige theoretische Betrachtungen durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die mögliche Austauschrate von verschiedenen Faktoren abhängt. So sind die Austauschraten, wenn die wiedergewonnene Gesteinskörnung als eigene Fraktion zugegeben und gleichmäßig auf alle Kornfraktionen angerechnet wird, prinzipiell höher als wenn die Gesteinskörnung anteilig zur groben Kornfraktion zugegeben wird. Da die Sieblinie einen Einfluss auf den Wasseranspruch des Betons hat, ist auch die tolerierte Änderung desselben ein Faktor der zu beachten ist. Aufgrund der technischen Gegebenheiten in Transportbetonwerken werden Änderungen des Wasseranspruchs um 10 kg/m^3 im Allgemeinen als tolerierbar angesehen. Auf dieser Basis wurden mögliche Austauschquoten in Abhängigkeit von der Sieblinienkombination errechnet. Je nach Sieblinienkombination unterscheiden sich die Austauschquoten zum Teil deutlich. Einen Einfluss hat hier sowohl das Größtkorn, als auch die Grundsieblinie. Geht man von einer mittleren Sieblinie beispielsweise B 16 aus und tauscht Anteile davon durch Gesteinskörnung mit einer ähnlichen Sieblinie aus, sind zumeist hohe Austauschquoten von über 25 % möglich. Liegen die kombinierten Sieblinien weiter auseinander, nehmen die Austauschquoten ab, wobei in der Regel jedoch mindestens 10 % Austausch möglich sein sollten. Im Anschluss wurden sowohl im Labor als auch in Transportbetonwerken Betonagen durchgeführt. Bei den Laborversuchen wurde mit Austauschquoten von 20 % und möglichst ungünstigen Sieblinienkombinationen gearbeitet. In den Versuchen zeigten sich nur geringfügige Abweichungen der Eigenschaften vom Referenzbeton. Lediglich in der Konsistenz waren Unterschiede zu beobachten, die sich durch Einsatz geeigneter Zusatzmittel ausgleichen lassen sollten. Weiterhin hat sich gezeigt, dass der Austausch über die gesamte Sieblinie robuster zu sein scheint. Insgesamt stellte sich eine Austauschquote von 20 % jedoch als unproblematisch heraus. Die anschließenden Werksbetonagen bestätigten die Ergebnisse der Laborversuche. Bei Austauschquoten von bis zu 25 % zeigten sich auch hier keine Probleme, wobei sich die Zugabe der wiedergewonnenen Gesteinskörnung als eigene Fraktion abermals als etwas robuster dargestellt hat und die höheren Austauschquoten ermöglicht. Auf Grundlage der erhaltenen Daten ist eine Steigerung der Verwendung von wiedergewonnener Gesteinskörnung im Beton ohne besondere Anforderungen an die Aufbereitung als positiv zu bewerten.

5 Empfehlungen für die Regelwerke

Ein wesentliches Ziel des Projekts bestand darin, wenn möglich eine Regelwerksempfehlung abzugeben. Auf Grundlage der erhaltenen Ergebnisse wurde deshalb ein Vorschlag für die Überarbeitung von DIN 1045-2 erarbeitet, der im Folgenden erläutert wird. Hierbei wird eine Erhöhung des zulässigen Anteils an wiedergewonnener Gesteinskörnung angestrebt.

Abbildung 5.1 zeigt zunächst einen Auszug der betreffenden Punkte aus der aktuellen Normfassung.

5.2.3.3 Wiedergewonnene Gesteinskörnung

(1) Wiedergewonnene Gesteinskörnung darf in Beton verwendet werden, vorausgesetzt, dass sie nur intern durch den Hersteller oder eine Gruppe von Herstellern eingesetzt wird.

(2) Nicht getrennt aufbereitete wiedergewonnene Gesteinskörnung darf mit höchstens 5 % der Gesamtmenge der Gesteinskörnung zugefügt werden.

(3) Wenn die Mengen an wiedergewonnener, gewaschener Gesteinskörnung mehr als 5 % der Gesamtgesteinskörnung betragen, sind sie in grobe und feine Gesteinskörnung zu trennen und müssen mit EN 12620 übereinstimmen.

(4) Wenn die Mengen an wiedergewonnener, gebrochener Gesteinskörnung mehr als 5 % der Gesamtgesteinskörnung betragen, sind sie wie rezyklierte Gesteinskörnungen zu verwenden.

Abbildung 5.1: Auszüge aus E DIN 1045-2:2008-08 [47]

Die Punkte (1) und (2) dieser Vorgaben sollen unverändert weiter bestehen bleiben. So können Betonhersteller, die die Regelung bereits anwenden, ihre etablierten Arbeitsabläufe beibehalten. In weiteren Punkten soll die Begrenzung des Einsatzes unter definierten Bedingungen auf max. 25 Vol.-% erweitert werden. Es ergibt sich der folgende Empfehlungsvorschlag:

- (1) Wiedergewonnene gewaschene und wiedergewonnene gebrochene Gesteinskörnung darf in Beton verwendet werden, vorausgesetzt dass sie nur intern durch den Hersteller oder eine Gruppe von Herstellern eingesetzt wird.
- (2) Nicht getrennt aufbereitete wiedergewonnene Gesteinskörnung darf ohne Einschränkungen mit höchstens 5 Vol.-% der Gesamtmenge der Gesteinskörnung zugefügt werden.
- (3) Nicht getrennt aufbereitete wiedergewonnene gewaschene oder gebrochene Gesteinskörnung darf bei Betonen bis zu einer Festigkeitsklasse C 25/30 (ohne LP) mit einer Zugabe von 5 Vol.-% und höchstens 25 Vol.-% der Gesamtmenge der Gesteinskörnung als separate Korngruppe zugeführt werden. Für die wiedergewonnene Gesteinskörnung ist dabei bzgl. der vorbeugenden Maßnahmen nach Alkali-Richtlinie die ungünstigste Alkaliempfindlichkeitsklasse der im Ausgangsbeton enthaltenen Gesteinskörnungen maßgebend.
Anmerkung 1: Das Größtkorn des herzustellenden Betons ist zu beachten.
- (4) Wenn die Mengen an wiedergewonnener, gewaschener Gesteinskörnung mehr als 25 Vol.-% der Gesteinskörnung betragen, sind sie in feine und grobe Gesteinskörnung zu trennen und müssen mit EN 12620 übereinstimmen.
- (5) Wenn die Mengen an wiedergewonnener, gebrochener Gesteinskörnung mehr als 25 Vol.-% der Gesamtgesteinskörnung betragen, sind sie wie rezyklierte Gesteinskörnung zu verwenden (Anhang E).

Weiterhin werden im Anhang E die in Abbildung 5.2 dargestellten Regelungen für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen vorgegeben. Diese beiden Punkte können entfallen, da sie bereits an anderer Stelle geregelt werden.

E.2.3 Regelungen für die Verwendung von groben rezyklierten Gesteinskörnungen

E.2.3.1 Allgemeines

(7) Bei rezyklierten Gesteinskörnungen, die von Beton aus der Produktion des Betonherstellers stammen, wobei der Beton ohne vorherigen Gebrauch wieder aufzubereiten ist, ist die ungünstigste Alkaliempfindlichkeitsklasse der im Ausgangsbeton verwendeten Gesteinskörnungen für die vorbeugenden Maßnahmen nach Alkali-Richtlinie maßgebend. Die Absätze 2 bis 6 dieser Norm sind nicht anzuwenden.

(8) Rezyklierte Gesteinskörnungen, die von Beton aus der Produktion des Betonherstellers stammen, wobei der Beton ohne vorherigen Gebrauch wiederaufbereitet worden ist, dürfen bis zu einem Anteil von 5 M.-%, bezogen auf die gesamte Menge an Gesteinskörnung, ohne Einschränkung verwendet werden. Die Abschnitte E.2.3.4 und E.2.3.5 dieser Norm sind in diesem Fall nicht anzuwenden.

Abbildung 5.2: Regelungen für die Verwendung grober rezyklierter Gesteinskörnungen nach Anhang E der DIN 1045-2 [47]

Der Änderungsvorschlag ist in die zuständigen Normungsgremien eingebracht worden und ist im aktuellen Entwurf der DIN 1045-2 berücksichtigt.

6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Bei Transportbetonherstellern fallen im Tagesgeschäft fortwährend Überschuss- und Restmengen von Frischbeton an. Im Rahmen der Abfallvermeidung wird dieser in vielen Werken aufbereitet. Die Untersuchungen im geförderten Forschungsprojekt haben gezeigt, dass ca. 80 % der Transportbetonwerke bereits über Frischbetonrecyclinganlagen verfügen, in denen die Restbetonmengen ausgewaschen und die Gesteinskörnung wiedergewonnen wird. Aufgrund der derzeitigen Bestimmungen darf die wiedergewonnene Gesteinskörnung jedoch nur bis zu einem Anteil von 5 M.-% ohne Einschränkungen in der Betonherstellung wieder eingesetzt werden. Der Einsatz von höheren Anteilen ist erst nach aufwendiger Aufbereitung des Materials und erneuter Überprüfung nach DIN EN 12620 erlaubt. Die Umfrage hat jedoch gezeigt, dass ein Anteil von 5 M.-% nicht immer ausreicht, um die wiedergewonnene Gesteinskörnung vollständig wieder einzusetzen. Sie muss entweder gelagert oder anderweitig verwendet werden, was dem Gedanken der Kreislaufwirtschaft entgegensteht. Darüber hinaus werden zusätzliche Lagerkapazitäten benötigt.

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts belegen jedoch, dass auch beim Einsatz von wiedergewonnener Gesteinskörnung mit Anteilen von bis zu 25 M.-% im Beton keine Verschlechterung der Betonqualität zu erwarten ist. Die Gesteinskörnung müsste dabei nach dem Auswaschen nicht zusätzlich aufwendig aufbereitet werden, sondern kann direkt in der Betonherstellung wiederverwendet werden. Mit der Einbringung eines Vorschlags zur Erweiterung der bestehenden Regelungen der DIN 1045-2 von 5 M.-% auf 25 M.-% ist bereits ein großer Schritt zur zeitnahen Umsetzung vollzogen.

Für kleine und mittelständische Unternehmen hat dies verschiedene Vorteile. Sie können eine Vorreiterrolle bei der vollständigen Vermeidung von Abfall durch geschlossene Produktionskreisläufe einnehmen, gleichzeitig zur Ressourcenschonung beitragen, sowie wirtschaftlicher produzieren. Durch die direkte Rückführung der wiedergewonnenen Gesteinskörnung in den Herstellungsprozess werden einerseits Abfälle vermieden und andererseits Ressourcen geschont, da weniger primäre Gesteinskörnung eingesetzt werden muss. Die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen steigt durch Substitution primärer Rohstoffe,

die eingekauft werden müssen, durch ohnehin vorhandenes, bereits bezahltes und bislang teilweise zu entsorgendes Material aus Restbeton. Zusätzlich wird durch die Erkenntnisse eine wirtschaftlichere und effizientere Nutzung von vorhandener Anlagentechnik ermöglicht. Die Amortisationszeit der Anschaffungskosten reduziert sich bei gleichzeitiger kompletter Wiederverwertung von Restwasser und ausgewaschener Gesteinskörnung für Frischbetonrecyclinganlagen deutlich und wird somit auch dort interessant, wo bisher keine Frischbetonrecyclinganlagen im Einsatz sind. Werke die bereits damit arbeiten haben darüber hinaus keine oder nur geringe Investitionskosten zu erwarten.

Neben der Rückführung in die Produktion der Normalbetone, könnten sich außerdem weitere Geschäftsfelder eröffnen:

- „Green Concrete“, als offensive Bewerbung von Beton mit rezyklierter Restbetonkörnung als ressourcenschonend und umweltfreundlich, um umweltbewusste Kunden anzusprechen und nachhaltige Bauprojekte zu generieren.
- Beton für Neubauprojekte, bei denen die Ökobilanz des Gesamtbauwerks eine Rolle spielt. Die Nachfrage von öffentlichen Bauherren nach ressourcenschonendem Beton, der bei einigen internationalen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen für Gebäude positive Bewertungspunkte verschafft (z. B. bei der LEED-Zertifizierung [2] für Bauwerke, im Auftrag der amerikanischen Streitkräfte in Deutschland), könnte befriedigt werden.
- Hydraulisch gebundene Tragschichten
- Bodenverfestigungen

7 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Art der Zuwendung	
Wissenschaftlich-technisches Personal	34,7 PM
Geräte	keine
Leistungen Dritter	keine

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten waren gemäß Arbeitsdiagramm und für die weitere Durchführung erforderlich und angemessen. Allerdings konnte das Projekt aufgrund einer schwierigen personellen Situation nicht wie geplant, sondern nur anteilig bearbeitet werden. Aus diesem Grund hat sich der ursprüngliche Zeitplan für die Arbeitspakete 2 bis 6 nach hinten verschoben.

Alle durchgeführten Arbeiten erfolgten zielgerichtet und waren zur Beantwortung der Fragestellung geeignet. Das eingesetzte wissenschaftlich-technische Personal war für die zielorientierten Arbeiten notwendig und vom Zeitumfang her angemessen.

9 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen:

Datum	Rahmen	Maßnahme
07.09.2017	Transportbeton-Tage 2017, Augsburg	Vorstellung des Projekts und Hinweis auf die Umfrage
20./21.09.2017	DAfStb Jahrestagung; Kaiserslautern	Hinweise auf das Projekt und die Umfrage
29.09.2017	1. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse
10. und 24.10.2017	Seminar „Experten Forum Beton“; Bayerische BauAkademie; Feuchtwangen	Vorstellung des Projekts und Hinweis auf die Umfrage
September 2017	BTB Monatsbrief	Hinweis zum Projektstart, Aufforderung zur Teilnahme an der Onlineumfrage
2017	Jahresbericht TUK	Bericht zum Projekt, Hinweis auf die Onlineumfrage
2017	FTB Jahreszusammenfassung 2017, veröffentlicht in der beton 09/2017	Bericht zum Projekt
28.02.2018	Neustadter WPK-Tage, Neustadt	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
16.05.2018	2. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse
08.06.2018	ERMCO 2018 Congress, Oslo	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
14.06.2018	VDB-Fachtagung Berlin/Brandenburg, Rüdersdorf	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
04.07.2018	8. Darmstädter Beton- und Schalungstag, Darmstadt	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
05.09.2018	Praxis Transportbeton, Essen	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
31.10.2018	2. Bauforum Hochschultag Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
07.11.2018	13. Bauforum Holcim, Hannover	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
14.11.2018	3. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse
10.12.2018	HeidelbergerCement Sustainability Days 2018, Heidelberg	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
2018	Jahresbericht TUK	Bericht zum Projekt
07.03.2019	Deutscher Bautechniktag 2019, Stuttgart	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
19.03.2019	Heidelberger Betontechnologentag 2019, Ettlingen	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
26.03.2019	Heidelberger Betontechnologentag 2019, Ostfildern	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
11.04.2019	VDB-Fachtagung NRW, Krefeld	Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse
13.06.2019	4. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse

07.11.2019	5. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse
18.02.2020	64. Betontage Ulm, Neu-Ulm	Vorstellung des Projekts und der bisherigen Ergebnisse
19.03.2020	6. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse
28.10.2020	7. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse
2020	Jahresbericht TUK	Bericht zum Projekt

- Geplante Transfermaßnahmen

An den im Antrag dargestellten Maßnahmen zum Ergebnistransfer hat sich nichts geändert, so dass die dort angefügten Tabellen weiterhin Bestand haben. In den untenstehenden Tabellen sind die geplanten Maßnahmen nochmals im Detail mit aktualisierten Angaben zu den Zeiträumen dargestellt.

Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit			
Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Vorstellung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse	Treffen zu Beginn und am Ende eines neuen Arbeitsschrittes	2 x jährlich
Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Präsentation und Diskussion der Ergebnisse bereits während der Laufzeit durch Experten im Rahmen von regelsetzenden Gremien	Sitzungen von Gremien und Normausschüssen	laufend
Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch FTB	Ergebnistransfer in die Industrie	BTB-Jahresbericht BTB-Homepage Erstellen von Anwendungshilfen und -empfehlungen	laufend
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende der Fachrichtung Bauingenieurwesen	Lehre an der TU Kaiserslautern Vorlesungen, Studien-, Bachelor-, Masterarbeiten Gastvorlesungen	laufend

Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projekts			
Maßnahme	Ziel	Rahmen	vorauss. Zeitraum
Veröffentlichungen	Ergebnistransfer in die Industrie und wissenschaftliche Publikation (zweisprachig deutsch/ englisch)	Abschlussbericht Fachzeitschriften: <i>Beton</i> , Verlag Bau+Technik <i>Bauingenieur</i> , Springer-VDI-Verlag <i>BFT International</i> <i>Betonwerk+Fertigteil-Technik</i> , Bauverlag	Juni 2021
Gremienarbeit, Einbeziehung von Multiplikatoren	Berücksichtigung der Ergebnisse bei der Überarbeitung von Normen und Richtlinien	Sitzungen von Gremien/ Normausschüssen	Dezember 2020
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Vermittlung der Ergebnisse an Studierende der Fachrichtung Bauingenieurwesen	Lehre an der TU Kaiserslautern Vorlesungen, Studien-, Bachelor-, Masterarbeiten Gastvorlesungen	
	Vermittlung der Ergebnisse im Rahmen der beruflichen Weiterbildung für Bauingenieure und Werkleiter	Vorträge auf Fachtagungen z.B. Weiterbildung für Tragwerksplaner an der TU Kaiserslautern in Zusammenarbeit mit der Ingenieurkammer Rheinland-Pfalz Weiterbildung für Prüfstellen- und Werkleiter des BÜV Hessen – Rheinland-Pfalz	
Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch FTB		BTB-Jahresbericht BTB-Homepage	

10 Literatur

- [1] *VDZ Verein Deutscher Zementwerke* (Hg.): Analyse von Restwasserinhaltsstoffen.
- [2] *Richard Sonnenberg*: Recycling von Restbeton. Neue Entwicklungen und Einsatzbereiche. *Beton* (2001), S. 304–308.
- [3] BTB Jahresbericht 2019 – Auf den Punkt. Berlin August 2019.
- [4] *Ferrari, G., Miyamoto, M., Ferrari, A.*: New sustainable technology for recycling returned concrete. *Construction and Building Materials* 67 (2014), S. 353–359.
- [5] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008. Berlin: Beuth Verlag, 21.04.2019 (Juli 2008).

- [6] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016. Berlin: Beuth Verlag, 26.01.2019 (Januar 2017).
- [7] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Berlin: Beuth Verlag. <https://perinorm.com/document.aspx>, 26.01.2019 (August 2008).
- [8] Fachbericht Sand und Kies. Rohstoffsicherungskonzept Hessen November 2006.
- [9] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*: DAfStb-Richtlinie für Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1. Berlin: Beuth Verlag (September 2010).
- [10] *Dipl.-Ing. Johannes Haufe, Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht*: Abschlussbericht F1020. R-Beton - Teilvorhaben 6: Frischbetonrecycling und Entwicklung von Verfahren zum Umgang mit umweltrelevanten Merkmalen. Aachen November 2018.
- [11] *Dipl.-Ing. Oliver Ressel*: Entscheidungshilfen für die Planung von Anlagen zum naßmechanischen Recycling von Betonrestmassen. Dissertation. Weimar März 2004.
- [12] Die Industrie der Steine + Erden, Ausgabe 5/98: Recycling von Restbeton. Steine und Erden (1998).
- [13] *Verband Deutscher Betoningenieure e.V.*: Zement. Taschenbuch 2002. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH 2002.
- [14] *Betonblock/ Legoblock BV*: Vom Restbeton zum fertigen Legoblockstein. BFT International Betonwerk+Fertigteiltechnik (2015).
- [15] *hoelschertechnik-gorator@GmbH & Co.KG*: Prozesswasseraufbereitung in der Betonindustrie. Führend in der Umwelttechnik. https://www.himmelinfo.de/wp-includes/images/content/download/en/klaerfix/klaerfix_080410.pdf, 22.11.2019.
- [16] *Kou Shi-cong, Zhan Bao-jian, Poon Chi-sun*: Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials* 28 (2012), S. 549–556.
- [17] *DIBT Deutsches Institut für Bautechnik*: Z-3.210-2122. Recyclinghilfe "Re-Con Zero", abZ Neubescheid vom 14.07.2016. <https://publikationen.dibt.de/shop/de/Cart/Details/Z-3.210-2122>, 26.11.2019.
- [18] Re-Con Zero Produktdatenblatt.
- [19] *Christian Öttl*: Reuse of fresh concrete by adding a recycling aid. *Otto-Graf-Journal* (2000), S. 181–190.
- [20] *VDZ Verein Deutscher Zementwerke* (Hg.): Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation von Klinker und Zement 2004 - 2006.

- [21] *Jörg Rickert*: Zum Einfluss von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphonsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar. Dissertation. Weimar Januar 2014.
- [22] *Dipl.-Ing. Christina Nobis, Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht*: Forschungsbericht F 7099. Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion - Sachstand April 2015.
- [23] *Fraunhofer-Institut für Bauphysik*: Februar 2012 - Fraunhofer IBP elektrodynamische Fragmentierung Beton.
https://www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse_und_Medien/Forschung_im_Fokus_Uebersicht/Archiv/Blitz_im_Buero.html, 05.03.2019.
- [24] *Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann* (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Hochwertige Abfallverwertung durch verwertungsorientierte Identifikation und Lenkung von Stoffströmen. Nietwerder: TK-Verlag 2017.
- [25] *Dipl.-Ing. Julia Scheidt, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit, Dipl.-Ing. Aleksandar Pancic, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell*: Schlussbericht zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" Teilvorhaben 3. Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierter feiner und grober Gesteinskörnung. Kaiserslautern 2018.
- [26] Verfahren zum Verwerten von Rück-Restbeton von Transportbeton - Dokument DE3810934A1. Restbeton als Legosteine - Patent. <http://www.patent-de.com/19891012/DE3810934A1.html>, 06.03.2019.
- [27] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen. Berlin: Beuth Verlag (August 2017).
- [28] *Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit, Dipl.-Ing. Julia Scheidt, M. Eng. Anja Tusch*: Unveröffentlicht: RC-FRISCH. Steigerung des Restbetonrecyclings in der Betonindustrie. Leimen 29. September 2017.
- [29] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Zuschlag für Beton. Zuschlag mit dichtem Gefüge Begriffe, Bezeichnungen und Anforderungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH (April 1983).
- [30] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle. Berlin: Beuth Verlag (August 2017).
- [31] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung; Deutsche Fassung EN 933-11:2009 + AC:2009. Berlin: Beuth Verlag (Mai 2011).
- [32] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Festlegung für die Probenahme, Prüfung und Beurteilung der Eignung von Wasser, einschließlich bei der Betonherstellung anfallendem

Wasser, als Zugabewasser für Beton. Deutsche Fassung EN 1008:2002. Berlin: Beuth Verlag (Oktober 2002).

- [33] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*: DAfStb-Richtlinie für Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. Berlin: Beuth Verlag, 31.03.2019 (August 1995).
- [34] *Betontechnische Daten*. Ausgabe 2017. Leimen 2017.
- [35] *Jahresbericht 2016/2017*. Zusammen wirken! Erkrath August 2017.
- [36] *VDZ Verein Deutscher Zementwerke*: Zement-Merkblatt Betontechnik B20: Zusammensetzung von Normalbeton – Mischungsberechnung. <https://www.vdz-online.de/publikationen/zement-merkblaetter/>.
- [37] *VDZ Verein Deutscher Zementwerke* (Hg.): Zur Beurteilung der Eigenschaften des Betons mit Ausfallkörnungen. Düsseldorf 1978.
- [38] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2019. Berlin: Beuth (Oktober 2019).
- [39] *VDZ Verein Deutscher Zementwerke* (Hg.): Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit.
- [40] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013. Berlin: Beuth Verlag (Juni 2014).
- [41] *Wilhelm Ernst & Sohn, Bundesvereinigung der Prüfingenieure für Bautechnik, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, Verband Beratender Ingenieure*: Eurocode 2 für Deutschland. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken : Teil 1-1 : Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem : Anhang : Kommentierte und konsolidierte Fassung. Berlin, Wien, Zürich, Berlin: Beuth; Ernst & Sohn.
- [42] *VDZ Verein Deutscher Zementwerke* (Hg.): Elastizitätsmodul von Zementstein und Beton 1970.
- [43] *Robert Weber, Hans-Joachim Riechers, Karl-Heinz Lawatsch*: Kies und Sand für Beton. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik 2003.
- [44] *Prof. Dr. Ing. Schnell, Michael Weber*: Materialkennwerte für die Nachrechnung. VSVI-Seminar 16-2015/2015 „Nachrechnung und Ertüchtigung von Brücken“. Koblenz 15. September 2015.
- [45] *VDZ Verein Deutscher Zementwerke* (Hg.): Über die Spaltzugfestigkeit des Betons. Düsseldorf 1964.
- [46] *Dipl.-Ing. Viktória Malárics*: Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben. Dissertation. Karlsruhe Juli 2010.

[47] *DIN Deutsches Institut für Normung e.V.*: Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung: Beuth (Juli 1988).

11 Anhang

11.1 Frischbetonrecycling - Bestandsaufnahme

Sehr geehrte Damen und Herren,

der Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. und der Fachbereich Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern möchten die normativen und technischen Möglichkeiten zum Frischbetonrecycling steigern. Ziel ist es, mit vorhandener/ weitgehend vorhandener Anlagentechnik und Anlagenkapazität sowie einem minimalen Aufbereitungsaufwand ein wirtschaftliches und ressourcenschonendes Restbetonrecycling zu betreiben und in die Tagespraxis zu integrieren. Dabei sollen sämtliche Produktionsabfälle in Form von Gesteinskörnung aus Restbeton wieder im Kreislauf der Betonherstellung eingesetzt werden.

Aktuell dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen, die von Beton aus der Produktion des Betonherstellers stammen, wobei der Beton ohne vorherigen Gebrauch wieder aufbereitet worden ist, bis zu einem Anteil von 5 M.-%, bezogen auf die gesamte Menge der Gesteinskörnung, ohne Einschränkungen verwendet werden.

Hierzu erstellen wir im Rahmen des AiF-Forschungsprojektes "RC-FRISCH - Steigerung des Frischbetonrecyclings in der Transportbetonindustrie – Beitrag zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung bei Steigerung der Wirtschaftlichkeit" eine Analyse des Ist-Zustandes um möglichst praxisgerechte Ergebnisse zu erzielen.

Diese Umfrage soll zeigen welche Verfahren zum Restbetonrecycling in der Branche in welchem Umfang verbreitet sind, welche Anlagentechnik zur Aufbereitung vorhanden ist sowie welche Mengen der wiedergewonnenen Gesteinskörnung anfallen, die durch die aktuell begrenzte Wiederverwendung von maximal 5 M.-%, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung, nicht oder nur nach langer Zwischenlagerung wieder eingesetzt werden können.

Für diese Bestandsaufnahme sind wir auf Ihre Mithilfe angewiesen. Bitte nehmen Sie sich 10-15 Minuten Zeit und beantworten einige Fragen für uns.

Diese Umfrage enthält 40 Fragen.

Differenzierung

- Welcher dieser beiden Kategorien würden Sie ihr Werk zuordnen? *

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

Transportbetonwerk Betonfertigteilwerk

Sollte Ihr Werk sowohl Fertigteile als auch Transportbeton anbieten, bitten wir darum den Fragebogen für jeden Geschäftsbereich getrennt auszufüllen. Wenn Sie die Produktionsmengen nicht klar trennen können, rechnen Sie bitte alles dem Transportbetonwerk zu und wählen beim Betonfertigteilwerk, dass Sie ausschließlich Transportbeton verwenden.

Unter dem Begriff "Betonfertigteilwerk" sind Produktionsstätten für Betonfertigteile und Betonwaren zusammengefasst.

Fragebogen Transportbetonwerk

Transportbetonwerke Grundlagen

- In welchem Bundesland liegt Ihr Transportbetonwerk?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Baden-Württemberg Bayern Berlin
 Brandenburg Bremen Hamburg
 Hessen Mecklenburg-Vorpommern Niedersachsen
 Nordrhein-Westfalen Rheinland-Pfalz Saarland
 Sachsen Sachsen-Anhalt Schleswig-Holstein
 Thüringen

- Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2012?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 5.000m³ 5.000 bis 15.000m³ 15.000 bis 25.000m³
 25.000 bis 40.000m³ 40.000 bis 60.000m³ 60.000 bis 80.000m³
 80.000 bis 100.000m³ 100.000 bis 125.000m³ 125.000 bis 150.000m³
 mehr als 150.000m³

- Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2013?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 5.000m³ 5.000 bis 15.000m³ 15.000 bis 25.000m³
 25.000 bis 40.000m³ 40.000 bis 60.000m³ 60.000 bis 80.000m³
 80.000 bis 100.000m³ 100.000 bis 125.000m³ 125.000 bis 150.000m³
 mehr als 150.000m³

- Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2014?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 5.000m³ 5.000 bis 15.000m³ 15.000 bis 25.000m³
 25.000 bis 40.000m³ 40.000 bis 60.000m³ 60.000 bis 80.000m³
 80.000 bis 100.000m³ 100.000 bis 125.000m³ 125.000 bis 150.000m³
 mehr als 150.000m³

- Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2015?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 5.000m³ 5.000 bis 15.000m³ 15.000 bis 25.000m³
 25.000 bis 40.000m³ 40.000 bis 60.000m³ 60.000 bis 80.000m³
 80.000 bis 100.000m³ 100.000 bis 125.000m³ 125.000 bis 150.000m³
 mehr als 150.000m³

- Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2016?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 5.000m³ 5.000 bis 15.000m³ 15.000 bis 25.000m³
 25.000 bis 40.000m³ 40.000 bis 60.000m³ 60.000 bis 80.000m³
 80.000 bis 100.000m³ 100.000 bis 125.000m³ 125.000 bis 150.000m³
 mehr als 150.000m³

Alternativ die durchschnittliche Tagesproduktion bei der nächsten Frage angeben.

- Welche Produktionsmenge an Frischbeton hat Ihr Werk im Durchschnitt pro Tag?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 25m³ 25 bis 100m³ 100 bis 250m³
 250 bis 500m³ mehr als 500m³

Alternativ die Jahresproduktion bei der vorherigen Frage angeben.

- Welche Arten von Gesteinskörnung verwenden Sie standardmäßig zur Betonherstellung?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Kies Splitt rezyklierte Gesteinskörnung Sonstiges:

Restbetonrecycling Transportbetonwerke

- Welche Restbetonmengen haben Sie durchschnittlich pro Tag?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 2,5m³ 2,5 bis 5,0m³ 5,0 bis 10m³
 10 bis 20m³ mehr als 20m³

- Wie verfahren Sie mit diesen Frischbetonrestmengen?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Frischbetonrecycling
 Erhärten, Brechen und anschließende Verwendung als Gesteinskörnung für Betonproduktion

Zugabe eines Zusatzmittels, sodass aus dem Frischbeton ein Granulat entsteht, welches nach dem Erhärten ohne weiteres Brechen als wiedergewonnene Gesteinskörnung verwendet werden kann

Herstellung von Betonwaren

Befestigung von Werksflächen

Verzögern des Frischbetons und spätere Verwendung

Entsorgung

Sonstiges:

- Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll?

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Ja, weil...

Grundsätzlich ja, aber für mich von keiner Bedeutung, weil...

Nein, weil...

rezyklierte Gesteinskörnung Transportbetonwerke

- Welche Mengen an ausgewaschener Gesteinskörnung erhalten Sie durch Restbetonrecycling im Durchschnitt pro Tag?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

weniger als 2500kg 2500 bis 5000kg 5000 bis 10000kg

10000 bis 20000kg mehr als 20000kg

- Verwenden Sie die wiedergewonnene Gesteinskörnung zur Betonproduktion?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

Nein

Ja, bis zu einem Anteil von 5 M.% der Gesamtgesteinskörnung

Ja, mit einem Anteil >5 M.% der Gesteinskörnung mit vorheriger Siebung und Prüfung gemäß DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620"

- Wie verfahren Sie mit der Restbeton-Gesteinskörnung, die Sie in Ihrem Produktionskreislauf nicht weiterverwenden können?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

Verkauf als Gesteinskörnung für den Straßenbau bzw. als Verfüllmaterial

Verkauf an andere Betonwerke für die Betonproduktion

- Verwendung im eigenen Transportbetonwerk, z. B. zur Befestigung von Wegflächen
- Verwendung zum Verfüllen von Kies- und Sandgruben usw.
- kostenpflichtige Entsorgung
- Lagerung im eigenen Betrieb mit ungeklärter Weiterverwendung

- Welchen Anteil der rezyklierten Restbeton-Gesteinskörnung können Sie innerhalb Ihres Produktkreislaufes zur Betonproduktion verwenden?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- unter 10% 10 bis 20% 20 bis 30% 30 bis 40%
- 40 bis 50% 50 bis 60% 60 bis 70% 70 bis 80%
- 80 bis 90% 90 bis 100%

Die Angabe "90 bis 100%" bedeutet, dass Sie diesen Anteil der erhaltenen Restbeton-Gesteinskörnung zur Betonproduktion verwenden können und dass die Differenz zu 100% nicht zur Betonproduktion verwendet werden kann.

- Wie lange muss die wiedergewonnene Gesteinskörnung durchschnittlich bis zu einer Weiterverwendung zwischengelagert werden?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Wenige Tage 1 bis 2 Wochen Bis zu einem Monat
- Länger als ein Monat

Vorhandene Infrastruktur Transportbetonwerke

- Welche Infrastruktur zum Betonrecycling halten Sie in Ihrem Transportbetonwerk vor?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Frischbetonrecyclinganlage Brecher zum Zerkleinern von Festbeton
- Siebanlage Sonstiges:

- Welche Aufbereitungsschritte betreiben Sie mit rezyklierter Gesteinskörnung (ggf. auch durch externe Dienstleister)?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Sortieren Brechen
- Waschen Sieben in 2 Korngruppen
- Sieben in 3 Korngruppen Sieben in mehr als 3 Korngruppen
- Sonstiges:

- Wie lagern Sie die im Rahmen des Frischbetonrecyclings anfallende Gesteinskörnung?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Silos
- Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung auf Halden
- Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Big-Packs
- Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung in Silos
- Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung auf Halden
- Sonstiges:

Anregungen

- Sind Sie bereit uns weitere Fragen, die im Rahmen der Projektbearbeitung auftreten, zu beantworten? Wenn ja, hinterlassen Sie uns bitte Ihre Kontaktdaten.

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Name:

E-Mail-Adresse:

Telefonnummer:

Die erhobenen persönlichen Daten werden selbstverständlich - wie auch alle anderen Angaben - vertraulich behandelt und nur für dieses Projekt verwendet.

- Haben Sie weitere Anregungen zum Restbetonrecycling, die im Rahmen dieses Projektes aus Ihrer Sicht zu berücksichtigen wären?
Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Fragebogen Betonfertigteilwerke

Betonfertigteilwerke Grundlagen

- In welchem Bundesland liegt Ihr Betonfertigteilwerk?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Baden-Württemberg Bayern Berlin
- Brandenburg Bremen Hamburg
- Hessen Mecklenburg-Vorpommern Niedersachsen
- Nordrhein-Westfalen Rheinland-Pfalz Saarland
- Sachsen Sachsen-Anhalt Schleswig-Holstein
- Thüringen Ausland:

- Produzieren Sie Betonfertigteile oder Betonwaren?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

Betonfertigteile Betonwaren

Betonfertigteile und Betonwaren Sonstiges:

- Stellen Sie den für die Fertigteilproduktion benötigten Beton selber her? *

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

Ja Nein

Die Antwortmöglichkeit "Nein" bedeutet, dass Sie ausschließlich Transportbeton einkaufen.

- Welche Produktionsmengen an Frischbeton hat Ihr Werk im Durchschnitt pro Tag?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

weniger als 5m³ 5 bis 10m³ 10 bis 15m³

15 bis 20m³ 20 bis 30m³ 30 bis 40m³

40 bis 50m³ 50 bis 75m³ 75 bis 100m³

über 100m³

- Welche Arten von Gesteinskörnung verwenden Sie standardmäßig zur Betonherstellung?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

Kies Splitt

rezyklierte Gesteinskörnung (Beton Splitt, Mauerwerkssplitt) Sand

Sonstiges:

Restbeton-/ Ausschuss-/ Überproduktionsmengen Betonfertigteilerwerke

- Welche Restbetonmengen haben Sie durchschnittlich täglich?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

weniger als 0,125m³ 0,125 bis 0,500m³ 0,500 bis 1,000m³

1,000 bis 2,500m³ 2,500 bis 5,000m³ mehr als 5,000m³

Unter Restbeton ist jene Frischbetonmenge zu verstehen, die nicht in die Schalung gegossen wurde. Die Restbetonmenge setzt sich aus Betonresten im Mischer und an Werkzeugen sowie aus der Betonmenge, die nicht mehr in die Schalung passt, zusammen.

- Welche Ausschussmengen haben Sie durchschnittlich (bezogen auf Frischbetonproduktion)?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

weniger als 0,5% 0,5 bis 1,0% 1,0 bis 2,0%

2,0 bis 3,0% 3,0 bis 4,0% 4,0 bis 5,0%

5,0 bis 6,0% 6,0 bis 7,0% 7,0 bis 8,0%

- 8,0 bis 9,0% 9,0 bis 10,0% 10,0 bis 12,5%
 12,5 bis 15,0% mehr als 15,0%

Verfahren Restbeton/ Ausschuss Betonfertigteilewerke

- Wie verfahren Sie mit den Frischbetonrestmengen?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Frischbetonrecycling
- Erhärten, Brechen und anschließende Verwendung als Gesteinskörnung für Betonproduktion
- Zugabe eines Zusatzmittels, sodass aus dem Frischbeton ein Granulat entsteht, welches nach dem Erhärten ohne weiteres Brechen als wiedergewonnene Gesteinskörnung verwendet werden kann
- Herstellung von kleineren Betonwaren
- Befestigung von Werksflächen
- Verzögern des Frischbetons und spätere Verwendung
- Entsorgung
- Sonstiges:

- Wie verfahren Sie mit den Ausschussmengen?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Brechen und anschließende Weiterverwendung als rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonproduktion
- Brechen und anschließender Verkauf als rezyklierte Gesteinskörnung bzw. als Füllmaterial
- kostenpflichtige Entsorgung
- Sonstiges:

- Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M., bis zu der rezyklierte Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll?

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Ja, weil...

Nein, weil...

Grundsätzlich ja, aber für mich von keiner Bedeutung, weil...

Rezyklierte Gesteinskörnung Betonfertigteilewerke

- Welche Mengen an rezyklierter bzw. wiedergewonnener Gesteinskörnung erhalten Sie durch Restbetonrecycling?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weniger als 250kg 250 bis 500kg 500 bis 1000kg
 1000 bis 2000kg 2000 bis 3500kg 3500 bis 5000kg
 5000 bis 7500kg 7500 bis 10000kg mehr als 10000kg

- Verwenden Sie die erhaltene rezyklierte bzw. wiedergewonnene Gesteinskörnung zur Fertigteilproduktion?

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Nein, weil...

Ja, bis zu einem Anteil von 5 M.% der Gesamtgesteinskörnung, weil...

Ja, mit einem Anteil >5 M.% der Gesamtgesteinskörnung mit vorheriger Siebung und Prüfung gemäß DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620" ...

- Welchen Anteil an Restbeton-Gesteinskörnung können Sie innerhalb Ihres Produktionskreislaufes zur Betonproduktion verwenden?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- unter 10% 10 bis 20% 20 bis 30%
 30 bis 40% 40 bis 50% 50 bis 60%
 60 bis 70% 70 bis 80% 80 bis 90%
 über 90%

- Wie lange muss die rezyklierte bzw. wiedergewonnene Gesteinskörnung durchschnittlich zwischengelagert werden bis sie wiederverwendet werden kann?

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Wenige Tage 1 bis 2 Wochen
 bis zu einem Monat länger als 1 Monat

- Wie verfahren Sie mit der Restbeton-Gesteinskörnungsmenge, die Sie in Ihrem Produktionskreislauf nicht verwenden können?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Verkauf als Gesteinskörnung für den Straßenbau/ als Verfüllmaterial
 Verkauf an andere Transportbetonwerke für die Betonproduktion
 Verwendung im eigenen Werk zur Befestigung von Lager-/ Verkehrsflächen
 kostenpflichtige Entsorgung
 Deponierung im eigenen Werk mit ungeklärter Weiterverwendung
 Sonstiges:

Vorhandene Infrastruktur Betonfertigteilewerke

- Welche Infrastruktur zum Betonrecycling halten Sie in Ihrem Werk vor?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

Frischbetonrecyclinganlage Brecher zum Zerkleinern von Festbeton

Siebanlage Sonstiges:

- Welche Aufbereitungsschritte betreiben Sie mit rezyklierter Gesteinskörnung (ggf. auch durch externe Dienstleister)?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

Sortieren Brechen

Waschen Sieben in 2 Korngruppen

Sieben in 3 Korngruppen Sieben in mehr als 3 Korngruppen

Sonstiges:

- Wie lagern Sie die im Rahmen des Frischbetonrecyclings anfallende Gesteinskörnung?

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Silos

Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung auf Halden

Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Big-Packs

Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung in Silos

Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung auf Halden

Sonstiges:

Anregungen

- Sind Sie bereit uns weitere Fragen, die im Rahmen der Projektbearbeitung auftreten, zu beantworten? Wenn ja, hinterlassen Sie uns bitte Ihre Kontaktdaten.

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Name:

E-Mail-Adresse:

Telefonnummer:

Die erhobenen persönlichen Daten werden selbstverständlich - wie auch alle anderen Angaben - vertraulich behandelt und nur für dieses Projekt verwendet.

- Haben Sie weitere Anregungen zum Restbetonrecycling, die im Rahmen dieses Projektes aus Ihrer Sicht zu berücksichtigen wären?

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Vielen Dank für Ihre Mithilfe.

Mit Ergebnissen dieser Umfrage können Sie Anfang 2018 rechnen. Diese werden über den Bundesverband Transportbeton (<http://www.transportbeton.org/>) sowie das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern (<http://www.bauing.uni-kl.de/fwb/home/>) veröffentlicht.

Bei weiteren Rückfragen oder Anregungen wenden Sie sich bitte an rc-frisch@bauing.uni-kl.de

11.2 Ergebnisse der Umfrage

Anzahl der Umfrageergebnisse:

Anzahl der Datensätze in dieser Abfrage: 87

Gesamtzahl der Datensätze dieser Umfrage: 87

Frage 1: Welcher dieser beiden Kategorien würden Sie ihr Werk zuordnen?

Antwort	Anzahl	Prozent
Transportbetonwerk	73	83,91%
Betonfertigteilwerk	14	16,09%
keine Antwort	0	0,00%
Nicht gezeigt	0	0,00%

Transportbetonwerke:

Frage 2: In welchem Bundesland liegt Ihr Transportbetonwerk?

Antwort	Anzahl	Prozent
Baden-Württemberg (A1)	12	13,79%
Bayern (A2)	19	21,84%
Berlin (A3)	6	6,90%
Brandenburg (A4)	3	3,45%
Bremen (A5)	0	0,00%
Hamburg (A6)	0	0,00%
Hessen (A7)	2	2,30%
Mecklenburg-Vorpommern (A8)	1	1,15%
Niedersachsen (A9)	3	3,45%
Nordrhein-Westfalen (A10)	7	8,05%
Rheinland-Pfalz (A11)	5	5,75%
Saarland (A12)	1	1,15%
Sachsen (A13)	1	1,15%
Sachsen-Anhalt (A14)	2	2,30%
Schleswig-Holstein (A15)	2	2,30%
Thüringen (A16)	8	9,20%
keine Antwort	1	1,15%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 3: Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2012?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 5.000m ³ (A1)	0	0,00%
5.000 bis 15.000m ³ (A2)	4	4,60%
15.000 bis 25.000m ³ (A3)	10	11,49%
25.000 bis 40.000m ³ (A4)	15	17,24%
40.000 bis 60.000m ³ (A5)	13	14,94%
60.000 bis 80.000m ³ (A6)	4	4,60%
80.000 bis 100.000m ³ (A7)	1	1,15%
100.000 bis 125.000m ³ (A8)	2	2,30%
125.000 bis 150.000m ³ (A9)	4	4,60%
mehr als 150.000m ³ (A10)	13	14,94%
keine Antwort	7	8,05%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 4: Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2013?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 5.000m ³ (A1)	0	0,00%
5.000 bis 15.000m ³ (A2)	3	3,45%
15.000 bis 25.000m ³ (A3)	10	11,49%
25.000 bis 40.000m ³ (A4)	15	17,24%
40.000 bis 60.000m ³ (A5)	11	12,64%
60.000 bis 80.000m ³ (A6)	6	6,90%
80.000 bis 100.000m ³ (A7)	2	2,30%
100.000 bis 125.000m ³ (A8)	1	1,15%
125.000 bis 150.000m ³ (A9)	4	4,60%
mehr als 150.000m ³ (A10)	12	13,79%
keine Antwort	9	10,34%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 5: Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2014?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 5.000m ³ (A1)	0	0,00%
5.000 bis 15.000m ³ (A2)	2	2,30%
15.000 bis 25.000m ³ (A3)	11	12,64%
25.000 bis 40.000m ³ (A4)	18	20,69%
40.000 bis 60.000m ³ (A5)	9	10,34%
60.000 bis 80.000m ³ (A6)	6	6,90%
80.000 bis 100.000m ³ (A7)	3	3,45%
100.000 bis 125.000m ³ (A8)	0	0,00%
125.000 bis 150.000m ³ (A9)	5	5,75%
mehr als 150.000m ³ (A10)	13	14,94%
keine Antwort	6	6,90%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 6: Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2015?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 5.000m ³ (A1)	0	0,00%
5.000 bis 15.000m ³ (A2)	3	3,45%
15.000 bis 25.000m ³ (A3)	8	9,20%
25.000 bis 40.000m ³ (A4)	18	20,69%
40.000 bis 60.000m ³ (A5)	11	12,64%
60.000 bis 80.000m ³ (A6)	7	8,05%
80.000 bis 100.000m ³ (A7)	2	2,30%
100.000 bis 125.000m ³ (A8)	0	0,00%
125.000 bis 150.000m ³ (A9)	5	5,75%
mehr als 150.000m ³ (A10)	13	14,94%
keine Antwort	6	6,90%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 7: Wie hoch war die Produktionsmenge an Frischbeton in Ihrem Werk im Jahr 2016?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 5.000m ³ (A1)	0	0,00%
5.000 bis 15.000m ³ (A2)	3	3,45%
15.000 bis 25.000m ³ (A3)	10	11,49%
25.000 bis 40.000m ³ (A4)	17	19,54%
40.000 bis 60.000m ³ (A5)	8	9,20%
60.000 bis 80.000m ³ (A6)	8	9,20%
80.000 bis 100.000m ³ (A7)	3	3,45%
100.000 bis 125.000m ³ (A8)	0	0,00%
125.000 bis 150.000m ³ (A9)	5	5,75%
mehr als 150.000m ³ (A10)	13	14,94%
keine Antwort	6	6,90%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 8: Welche Produktionsmenge an Frischbeton hat Ihr Werk im Durchschnitt pro Tag?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 25m ³ (A1)	1	1,15%
25 bis 100m ³ (A2)	12	13,79%
100 bis 250m ³ (A3)	30	34,48%
250 bis 500m ³ (A4)	11	12,64%
mehr als 500m ³ (A5)	12	13,79%
keine Antwort	7	8,05%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 9: Welche Arten von Gesteinskörnung verwenden Sie standardmäßig zur Betonherstellung?

Antwort	Anzahl	Prozent
Kies (SQ001)	66	75,86%
Splitt (SQ002)	27	31,03%
rezyklierte Gesteinskörnung (SQ003)	4	4,60%
Sonstiges	1	1,15%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Sonstiges:

- Schwerzuschläge

Frage 10: Welche Restbetonmengen haben Sie durchschnittlich pro Tag?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 2,5m ³ (A1)	23	26,44%
2,5 bis 5,0m ³ (A11)	22	25,29%
5,0 bis 10m ³ (A12)	13	14,94%
10 bis 20m ³ (A13)	6	6,90%
mehr als 20m ³ (A14)	4	4,60%
keine Antwort	5	5,75%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 11: Wie verfahren Sie mit diesen Frischbetonrestmengen?

Antwort	Anzahl	Prozent
Frischbetonrecycling (SQ001)	61	70,11%
Erhärten, Brechen und anschließende Verwendung als Gesteinskörnung für Betonproduktion (SQ002)	7	8,05%
Zugabe eines Zusatzmittels, sodass aus dem Frischbeton ein Granulat entsteht, welches nach dem Erhärten ohne weiteres Brechen als wiedergewonnene Gesteinskörnung verwendet werden kann (SQ003)	2	2,30%
Herstellung von Betonwaren (SQ004)	30	34,48%
Befestigung von Werksflächen (SQ005)	8	9,20%
Verzögern des Frischbetons und spätere Verwendung (SQ006)	8	9,20%
Entsorgung (SQ007)	39	44,83%
Sonstiges	3	3,45%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Sonstiges:

- Erhärten, Brechen, Verwendung Tragschichten
- Erhärten, Brechen, Verkauf als RC-Material
- Weiterverwendung als minderwertigerer Beton

Frage 12: Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll? Ja, weil...

Antwort	39	44,83%
keine Antwort	34	39,08%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Antworten:

- Das ausgewaschene Material ansonsten trotz Auswaschung nacherhärtet, und man das Material vor Zugabe wieder "zerkleinern" muß
- weniger Entsorgung
- wirtschaftlich sinnvoll

- wir normativ zugelassene und hochwertige Gesteinskörnungen verwenden. Des Weiteren haben wir in jedem TB Werk eine Frischbetonrecyclinganlage und dadurch die Möglichkeit wiedergewonnene Gesteinskörnungen zu verwenden. Eine Erhöhung ist auf jeden Fall sinnvoll, da es immer schwieriger wird ausreichenden Gesteinskörnungen zu bekommen. Bei einer Erhöhung bis zu 20 M.% muss der TB Hersteller aber vorab einige Betoneckversuche durchführen
- es aus betontechnologischer und ökologischer Sicht problemlos und vernünftig ist.
- Es mittlerweile mehrere Berichte über Betonrecycling mit höheren % gibt, die technisch gut funktioniert haben, aber Sonderzulassungen brauchen, nur weil die Norm es vorschreibt.
- sinnvoller Stoffkreislauf von bekannten Materialien
- es wirtschaftlich sinnvoll ist
- man Ressourcen spart.
- Weil sich Recyclingmaterial nicht immer direkt zugeben läßt. Es bilden sich Halden, die erst nach und nach dem 16-22 zugegeben werden können.
- 5% für die meisten Waagen nicht zu dosieren sind.
- allgemeine Rohstoffknappheit im Bereich der Gesteinskörnung
- XXX
- weniger Abfall
- wenig Einfluß auf Frischbeton
- betontechnologisch unproblematisch
- Handling vereinfacht werden würde
- ökologisch wie ökonomisch sinnvoll
- wir diesen Beton auch stärker Überwachen würden.
- Schonung von Ressourcen
- Rückbetonmengen nehmen zu
- ressourcen- und umweltschonend, kostengünstig
- eben
- es jedem Unternehmen selbst überlassen sein sollte, wie man Beton nach Eigenschaften herstellen
- Bessere Zuführung des gewonnenen RC-Materials zurück in den Wirtschaftskreislauf.
- Verwendung unkritisch
- Verwendung unkritisch
- Verwendung unkritisch
- Verwendung unkritisch
- Das gewonnene Material stammt aus eigener Produktion und ist hinsichtlich seiner Eignung unbedenklich.
- Das gewonnene Material stammt aus eigener Produktion und ist hinsichtlich seiner Eignung unbedenklich.
- Das gewonnene Material stammt aus eigener Produktion und ist hinsichtlich seiner Eignung unbedenklich.
- Das gewonnene Material stammt aus eigener Produktion und ist hinsichtlich seiner Eignung unbedenklich.
- Verwendung unkritisch
- Verwendung unkritisch
- Verwendung unkritisch
- Verwendung unkritisch
- robuster Beton mehr RC-Material aufnehmen kann.

Frage 13: Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll? Grundsätzlich ja, aber für mich von keiner Bedeutung, weil...

Antwort	19	21,84%
keine Antwort	54	62,07%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Antworten:

- Es sollte aber eine Eckprüfung gemacht werden aus Qualitätsgründen bei größeren Mengen.
- Keine weitere Aufbereitung möglich
- wir mit dem Restbeton Betonblöcke (Legosteine) herstellen und verkaufen.
- Der Sekundäre Absatzweg derzeit gewährleistet ist
- wir eine Recycling Anlage haben
- wir anlagentechnisch noch nicht dazu in der Lage sind
- wir die wiedergewonnene Gesteinskörnung auch mit der Grenze von 5 M.% entsorgt bekommen.
- die Lagerkapazitäten fehlen.
- nicht genügend Material anfällt.
- Material anderweitig verwendet werden kann
- wir den Recyclingkies an Bauunternehmen weiterverkaufen
- wir aktuell in unserem Markt das Betonrecycling im Straßenbau deutlich Erlösoptimaler einsetzen
- wir das recycelte Material wieder nass aufbereiten
- wird von unseren Kieslieferanten nicht angeboten
- keine großen Mengen anfallen
- Aufwand höher als Nutzen
- Aufwand höher als Nutzen
- Aufwand höher als Nutzen
- geringe Tagesmenge, Hauptmenge an Restbeton Verwendung in der Betonwarenherstellung da dies sehr effektiv ist

Frage 14: Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der wiedergewonnene Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll? Nein, weil...

Antwort	8	9,20%
keine Antwort	65	74,71%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Antworten:

- im Vergleich zu teuer und zu schwer zu verarbeiten
- zu viel Aufwand
- es nicht ausreichend sauberen Betonbruch gibt
- wir jetzt schon anders verwerten
- nahezu 100 % Wiederverwertung
- Ich der Meinung bin, dass sie Betonqualität leidet und die Schadensfälle zunehmen.
- Nein, weil ein solcher Anteil an Rückbeton nicht anfällt. Nein, weil in den meisten Werken nicht alles recycelt werden kann, da sonst der komplette Wasserhaushalt bei Recyclingwasser zusammenbricht.
- Qualität sich verschlechtern kann

Frage 15: Welche Mengen an ausgewaschener Gesteinskörnung erhalten Sie durch Restbetonrecycling im Durchschnitt pro Tag?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 2500kg (A1)	22	25,29%
2500 bis 5000kg (A2)	20	22,99%
5000 bis 10000kg (A3)	10	11,49%
10000 bis 20000kg (A4)	3	3,45%
mehr als 20000kg (A5)	3	3,45%
keine Antwort	4	4,60%
Nicht gezeigt	25	28,74%

Frage 16: Verwenden Sie die wiedergewonnene Gesteinskörnung zur Betonproduktion?

Antwort	Anzahl	Prozent
Nein (A1)	29	33,33%
Ja, bis zu einem Anteil von 5 M.% der Gesamtgesteinskörnung (A2)	30	34,48%
Ja, mit einem Anteil > 5 M.% der Gesteinskörnung mit vorheriger Siebung und Prüfung gemäß DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620" (A3)	0	0,00%
keine Antwort	3	3,45%
Nicht gezeigt	25	28,74%

Frage 17: Wie verfahren Sie mit der Restbeton-Gesteinskörnung, die Sie in Ihrem Produktionskreislauf nicht weiterverwenden können?

Antwort	Anzahl	Prozent
Verkauf als Gesteinskörnung für den Straßenbau bzw. als Verfüllmaterial (SQ001)	35	40,23%
Verkauf an andere Betonwerke für die Betonproduktion (SQ002)	0	0,00%
Verwendung im eigenen Transportbetonwerk, z. B. zur Befestigung von Wegflächen (SQ003)	12	13,79%
Verwendung zum Verfüllen von Kies- und Sandgruben usw. (SQ004)	12	13,79%
kostenpflichtige Entsorgung (SQ005)	38	43,68%
Lagerung im eigenen Betrieb mit ungeklärter Weiterverwendung (SQ006)	8	9,20%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Frage 18: Welchen Anteil der rezyklierten Restbeton-Gesteinskörnung können Sie innerhalb Ihres Produktkreislaufes zur Betonproduktion verwenden?

Antwort	Anzahl	Prozent
unter 10% (A1)	16	18,39%
10 bis 20% (A2)	4	4,60%
20 bis 30% (A3)	0	0,00%
30 bis 40% (A4)	8	9,20%
40 bis 50% (A5)	2	2,30%
50 bis 60% (A6)	3	3,45%
60 bis 70% (A7)	0	0,00%
70 bis 80% (A8)	0	0,00%
80 bis 90% (A9)	2	2,30%
90 bis 100% (A10)	6	6,90%
keine Antwort	21	24,14%
Nicht gezeigt	25	28,74%

Frage 19: Wie lange muss die wiedergewonnene Gesteinskörnung durchschnittlich bis zu einer Weiterverwendung zwischengelagert werden?

Antwort	Anzahl	Prozent
Wenige Tage (A1)	18	20,69%
1 bis 2 Wochen (A2)	13	14,94%
Bis zu einem Monat (A3)	15	17,24%
Länger als ein Monat (A4)	6	6,90%
keine Antwort	10	11,49%
Nicht gezeigt	25	28,74%

Frage 20: Welche Infrastruktur zum Betonrecycling halten Sie in Ihrem Transportbetonwerk vor?

Antwort	Anzahl	Prozent
Frischbetonrecyclinganlage (SQ001)	64	73,56%
Brecher zum Zerkleinern von Festbeton (SQ002)	6	6,90%
Siebanlage (SQ003)	4	4,60%
Sonstiges	13	14,94%
Nicht gezeigt	14	16,09%

Sonstiges:

- Boxen zum Abfahren
- Betonblockschalungen
- Filterpresse
- Betonblock
- Spülbecken
- Betonblocksteine
- Keine
- Keine
- Keine
- Restbetonwürfel
- Schalungen für Betonwaren
- Keine
- Keine

Frage 22: Wie lagern Sie die im Rahmen des Frischbetonrecyclings anfallende Gesteinskörnung?

Antwort	Anzahl	Prozent
Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Silos (SQ001)	5	5,75%
Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung auf Halden (SQ002)	55	63,22%
Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Big-Packs (SQ003)	0	0,00%
Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung in Silos (SQ004)	1	1,15%
Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung auf Halden (SQ005)	5	5,75%
Sonstiges	0	0,00%
Nicht gezeigt	25	28,74%

Betonfertigteilwerke:

Frage 23: In welchem Bundesland liegt Ihr Betonfertigteilwerk?

Antwort	Anzahl	Prozent
Baden-Württemberg (A1)	5	5,75%
Bayern (A2)	5	5,75%
Berlin (A3)	0	0,00%
Brandenburg (A4)	0	0,00%
Bremen (A5)	0	0,00%
Hamburg (A6)	0	0,00%
Hessen (A7)	0	0,00%
Mecklenburg-Vorpommern (A8)	0	0,00%
Niedersachsen (A9)	0	0,00%
Nordrhein-Westfalen (A10)	3	3,45%
Rheinland-Pfalz (A11)	1	1,15%
Saarland (A12)	0	0,00%
Sachsen (A13)	0	0,00%
Sachsen-Anhalt (A14)	0	0,00%
Schleswig-Holstein (A15)	0	0,00%
Thüringen (A16)	0	0,00%
Sonstiges	0	0,00%
keine Antwort	0	0,00%
Nicht gezeigt	73	83,91%

Frage 24: Produzieren Sie Betonfertigteile oder Betonwaren?

Antwort	Anzahl	Prozent
Betonfertigteile (SQ001)	7	8,05%
Betonwaren (SQ002)	4	4,60%
Betonfertigteile und Betonwaren (SQ003)	4	4,60%
Sonstiges	1	1,15%
Nicht gezeigt	73	83,91%

Sonstiges:

- Betonwerkstein

Frage 25: Stellen Sie den für die Fertigteilproduktion benötigten Beton selber her?

Antwort	Anzahl	Prozent
Ja (Y)	13	14,94%
Nein (N)	1	1,15%
keine Antwort	0	0,00%
Nicht gezeigt	73	83,91%

Frage 26: Welche Produktionsmengen an Frischbeton hat Ihr Werk im Durchschnitt pro Tag?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 5m ³ (A1)	0	0,00%
5 bis 10m ³ (A2)	1	1,15%
10 bis 15m ³ (A3)	0	0,00%
15 bis 20m ³ (A4)	0	0,00%
20 bis 30m ³ (A5)	3	3,45%
30 bis 40m ³ (A6)	0	0,00%
40 bis 50m ³ (A7)	0	0,00%
50 bis 75m ³ (A8)	1	1,15%
75 bis 100m ³ (A9)	2	2,30%
über 100m ³ (A10)	6	6,90%
keine Antwort	0	0,00%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Frage 27: Welche Arten von Gesteinskörnung verwenden Sie standardmäßig zur Betonherstellung?

Antwort	Anzahl	Prozent
Kies (SQ001)	9	10,34%
Splitt (SQ002)	10	11,49%
rezyklierte Gesteinskörnung (Betonsplitt, Mauerwerkssplitt) (SQ003)	4	4,60%
Sand (SQ004)	13	14,94%
Sonstiges	0	0,00%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Frage 28: Welche Restbetonmengen haben Sie durchschnittlich täglich?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 0,125m ³ (A1)	2	2,30%
0,125 bis 0,500m ³ (A2)	2	2,30%
0,500 bis 1,000m ³ (A5)	1	1,15%
1,000 bis 2,500m ³ (A6)	6	6,90%
2,500 bis 5,000m ³ (A8)	1	1,15%
mehr als 5,000m ³ (A7)	1	1,15%
keine Antwort	0	0,00%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Frage 29: Welche Ausschussmengen haben Sie durchschnittlich (bezogen auf Frischbetonproduktion)?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 0,5% (A1)	2	2,30%
0,5 bis 1,0% (A2)	2	2,30%
1,0 bis 2,0% (A3)	1	1,15%
2,0 bis 3,0% (A4)	4	4,60%
3,0 bis 4,0% (A5)	2	2,30%
4,0 bis 5,0% (A6)	2	2,30%
5,0 bis 6,0% (A7)	0	0,00%
6,0 bis 7,0% (A8)	0	0,00%
7,0 bis 8,0% (A9)	0	0,00%
8,0 bis 9,0% (A10)	0	0,00%
9,0 bis 10,0% (A11)	0	0,00%
10,0 bis 12,5% (A12)	0	0,00%
12,5 bis 15,0% (A13)	0	0,00%
Mehr als 15,0% (A14)	0	0,00%
keine Antwort	0	0,00%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Frage 30: Wie verfahren Sie mit den Frischbetonrestmengen?

Antwort	Anzahl	Prozent
Frischbetonrecycling (SQ001)	2	2,30%
Erhärten, Brechen und anschließende Verwendung als Gesteinskörnung für Betonproduktion (SQ002)	5	5,75%
Zugabe eines Zusatzmittels, sodass aus dem Frischbeton ein Granulat entsteht, welches nach dem Erhärten ohne weiteres Brechen als wiedergewonnene Gesteinskörnung verwendet werden kann (SQ003)	0	0,00%
Herstellung von kleineren Betonwaren (SQ004)	1	1,15%
Befestigung von Werksflächen (SQ005)	0	0,00%
Verzögern des Frischbetons und spätere Verwendung (SQ006)	0	0,00%
Entsorgung (SQ007)	6	6,90%
Sonstiges	2	2,30%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Sonstiges:

- Erhärten, Brechen und Verwendung als Straßenunterbau
- Recycling für Straßenunterbau

Frage 31: Wie verfahren Sie mit den Ausschussmengen?

Antwort	Anzahl	Prozent
Brechen und anschließende Weiterverwendung als rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonproduktion (SQ001)	5	5,75%
Brechen und anschließender Verkauf als rezyklierte Gesteinskörnung bzw. als Füllmaterial (SQ002)	5	5,75%
kostenpflichtige Entsorgung (SQ003)	4	4,60%
Sonstiges	0	0,00%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Frage 32: Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der rezyklierte Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll? Ja, weil...

Antwort	6	6,90%
keine Antwort	7	8,05%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Antwort:

- wir feststellen dass höhere Quoten bei unserer Art der Wiederverwertung ohne Qualitätsverlust möglich sind
- wir dann das gebrochene Material komplett für die Betonproduktion verwenden könnten.
- dann alle anfallenden Ausschußmengen wieder verarbeitet werden können.
- wir alle Rohstoffe über 150 km fahren müssen.
- hochwertiger Beton wieder eingesetzt wird. Die Zusammensetzung / Inhaltsstoffe der Ausschussmengen bekannt
- sich dann die entsprechenden Investitionen im Werk / Mischtechnik lohnen könnten

Frage 33: Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der rezyklierte Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll? Grundsätzlich ja, aber für mich von keiner Bedeutung, weil...

Antwort	5	5,75%
keine Antwort	8	9,20%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Antwort:

- Hürden überhaupt rezyklierte Gesteinskörnung einzusetzen sehr hoch sind.
- derzeit nicht durchführbar
- wir Betonwaren herstellen
- Schwesterfirma Restmaterial gerne verwendet (Recycling im Straßenbau)
- zur Zeit die Kosten der rezyklierten Gesteinskörnung teils noch über den Kosten von Kiesmaterial liegen.

Frage 34: Wäre aus Ihrer Sicht eine Erhöhung der Grenze von bisher 5 M.%, bis zu der rezyklierte Gesteinskörnung ohne Prüfung eingesetzt werden darf, sinnvoll? Nein, weil...

Antwort	0	0,00%
keine Antwort	13	14,94%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Frage 35: Welche Mengen an rezyklierter bzw. wiedergewonnener Gesteinskörnung erhalten Sie durch Restbetonrecycling?

Antwort	Anzahl	Prozent
weniger als 250kg (A1)	1	1,15%
250 bis 500kg (A2)	0	0,00%
500 bis 1000kg (A3)	0	0,00%
1000 bis 2000kg (A7)	0	0,00%
2000 bis 3500kg (A8)	0	0,00%
3500 bis 5000kg (A15)	1	1,15%
5000 bis 7500kg (A16)	1	1,15%
7500 bis 10000kg (A13)	0	0,00%
mehr als 10000kg (A14)	3	3,45%
keine Antwort	1	1,15%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Frage 36: Verwenden Sie die erhaltene rezyklierte bzw. wiedergewonnene Gesteinskörnung zur Fertigteilproduktion? Nein, weil...

Antwort	5	5,75%
keine Antwort	2	2,30%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Antwort:

- Menge zu gering
- Die gesamte Abnahmemenge insgesamt zu gering ist
- Es hier zu Farbunterschieden kommt
- 5 % der Aufwand zu groß ist um Material einzulagern (Silokapazität)
- Nur Herstellung von Betonwaren (Pflastersteine)

Frage 37: Verwenden Sie die erhaltene rezyklierte bzw. wiedergewonnene Gesteinskörnung zur Fertigteilproduktion? Ja, bis zu einem Anteil von 5 M.% der Gesamtgesteinskörnung, weil...

Antwort	0	0,00%
keine Antwort	7	8,05%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Frage 38: Verwenden Sie die erhaltene rezyklierte bzw. wiedergewonnene Gesteinskörnung zur Fertigteilproduktion? Ja, mit einem Anteil >5 M:% der Gesamtgesteinskörnung mit vorheriger Siebung und Prüfung gemäß DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620"...

Antwort	1	1,15%
keine Antwort	6	6,90%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Antwort:

- Ja, als aufbereiteter Zuschlagsstoff im Kernbeton von unbewehrten Betonwaren

Frage 39: Welchen Anteil an Restbeton-Gesteinskörnung können Sie innerhalb Ihres Produktionskreislaufes zur Betonproduktion verwenden?

Antwort	Anzahl	Prozent
unter 10% (A1)	0	0,00%
10 bis 20% (A2)	1	1,15%
20 bis 30% (A3)	0	0,00%
30 bis 40% (A4)	1	1,15%
40 bis 50% (A5)	1	1,15%
50 bis 60% (A6)	0	0,00%
60 bis 70% (A7)	0	0,00%
70 bis 80% (A8)	1	1,15%
80 bis 90% (A9)	1	1,15%
über 90% (A10)	1	1,15%
keine Antwort	1	1,15%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Frage 40: Wie lange muss die rezyklierte bzw. wiedergewonnene Gesteinskörnung durchschnittlich zwischengelagert werden bis sie wiederverwendet werden kann?

Antwort	Anzahl	Prozent
Wenige Tage (A1)	2	2,30%
1 bis 2 Wochen (A2)	1	1,15%
bis zu einem Monat (A3)	0	0,00%
Länger als 1 Monat (A4)	0	0,00%
keine Antwort	4	4,60%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Frage 41: Wie verfahren Sie mit der Restbeton-Gesteinskörnungsmenge, die Sie in Ihrem Produktionskreislauf nicht verwenden können?

Antwort	Anzahl	Prozent
Verkauf als Gesteinskörnung für den Straßenbau/ als Verfüllmaterial (SQ001)	5	5,75%
Verkauf an andere Transportbetonwerke für die Betonproduktion (SQ002)	0	0,00%
Verwendung im eigenen Werk zur Befestigung von Lager-/ Verkehrsflächen (SQ003)	1	1,15%
kostenpflichtige Entsorgung (SQ004)	1	1,15%
Deponierung im eigenen Werk mit ungeklärter Weiterverwendung (SQ005)	0	0,00%
Sonstiges	1	1,15%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Sonstiges:

- Verarbeitung in der Pflastersteinherstellung

Frage 42: Welche Infrastruktur zum Betonrecycling halten Sie in Ihrem Werk vor?

Antwort	Anzahl	Prozent
Frischbetonrecyclinganlage (SQ001)	2	2,30%
Brecher zum Zerkleinern von Festbeton (SQ002)	6	6,90%
Siebanlage (SQ003)	5	5,75%
Sonstiges	4	4,60%
Nicht gezeigt	74	85,06%

Sonstiges:

- Überdachte Lagerboxen, Zuschlagstoff-Silos
- Anmietung von Brecher und Siebanlage einmal jährlich

- Absetzbecken für Schlämme vom Waschen, Restbeton erhärtet und wird von verbundener Firma gebrochen
- In einem Werk

Frage 43: Welche Aufbereitungsschritte betreiben Sie mit rezyklierter Gesteinskörnung (ggf. auch durch externe Dienstleister)?

Antwort	Anzahl	Prozent
Sortieren (SQ001)	2	2,30%
Brechen (SQ002)	6	6,90%
Waschen (SQ003)	0	0,00%
Sieben in 2 Korngruppen (SQ004)	3	3,45%
Sieben in 3 Korngruppen (SQ005)	2	2,30%
Sieben in mehr als 3 Korngruppen (SQ006)	0	0,00%
Sonstiges	1	1,15%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Sonstiges:

- Sieben zur Verhinderung von Überkorn

Frage 44: Wie lagern Sie die im Rahmen des Frischbetonrecyclings anfallende Gesteinskörnung?

Antwort	Anzahl	Prozent
Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Silos (SQ001)	3	3,45%
Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung auf Halden (SQ002)	4	4,60%
Getrennte Lagerung von der primären Gesteinskörnung in Big-Packs (SQ003)	0	0,00%
Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung in Silos (SQ004)	0	0,00%
Gemeinsame Lagerung mit der primären Gesteinskörnung auf Halden (SQ005)	1	1,15%
Sonstiges	0	0,00%
Nicht gezeigt	80	91,95%

Frage 45: Haben Sie weitere Anregungen zum Restbetonrecycling, die im Rahmen dieses Projektes aus Ihrer Sicht zu berücksichtigen wären?

Antwort	6	6,90%
keine Antwort	81	93,10%
Nicht gezeigt	0	0,00%

Antwort:

- Eine Zugabe von 10% der recycelten Gesteinskörnung aus dem eigenen Werksbruch ohne besondere Überwachung wäre gut.
Eine Lösung, in der die Feinbestandteile 0/2mm ebenfalls in Kleinstmengen zugeführt werden wäre wünschenswert.
Über die Ergebnisse der Studie würde ich gerne unterrichtet werden.
- In der Befragung gehen die Begriffe recycelter Beton und Frischbetonrecycling durcheinander. Manche Fragen sind dadurch nicht eindeutig:
- Zusatzmittel wie ReconZero von Mapei sollten dringend in puncto Praxisgerechtigkeit weiterentwickelt werden, damit eine einfache Handhabung im Transportbetonwerk ohne Dritte möglich ist.
- Ich bitte das Thema "Recyclingwasserhaushalt" in die zukünftigen Gedanken mit einzubeziehen. Die hier aktuellen Probleme sind akuter als ein paar Tonnen Gesteinskörnungen. Je mehr Frischbeton ausgewaschen wird, je größer wird dieses Problem. Leider wurden diese Hinweise bei der Vorstellung des Projektes während der

BTB-Mitgliederversammlung einfach mit dem Hinweis, dass das nicht Bestandteil der Betrachtungen ist, abgebügelt. Ich halte das für falsch und kontraproduktiv. Viele Verbandsmitglieder denken ähnlich.

- grundsätzlich würde ich das Thema RC- Beton auf industriell hergestellte Gesteine (Schlacken) erweitern. Durch Einsatz von Stahlwerksschlacken oder Eisensilikatgestein würde man ein riesiges Potential ausschöpfen, da die Kraftwerke teilweise so voll liegen, dass sie das (gute) Material auf Deponien entsorgen. Außerdem wäre der Kosten/Nutzen Effekt um einiges höher als beim Beton- RC, das die Schlacken schon aufbereitet und gebrauchsfertig sind, aber keinen Absatz finden. Beton RC muss erst aufwändig gebrochen, gesiebt, gewaschen werden dadurch teuer, ist nicht ausreichend zur Verfügung und findet genügend Absatz im Straßenbau.
- Unbewehrter Beton wird von Baustoffrecyclingfirmen gerne angenommen, gebrochen und mit anderen Baustoffen gemischt, um diese zu "verbessern"/ aufzuwerten. Warum dann die Zuschläge im Werk damit "abwerten"? wir reinigen alle Betonkübel etc. zunächst mechanisch (in spezielle Formen, Kantenlänge <70 cm, also "brecheroptimiert"), das Reinigungswasser wird via Absetzbecken wieder zudosiert.

11.3 Diagramme zur theoretischen Austauschquote der Gesteinskörnung

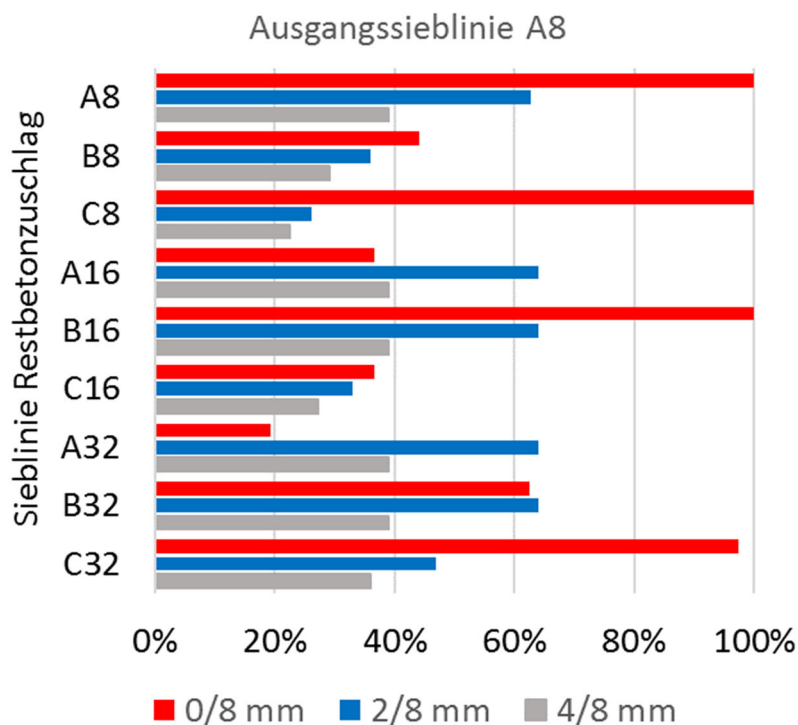


Abbildung 11.1: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie A8 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/8 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 2/8 mm und 4/8 mm für die Zugabe über die groben Fraktionen.

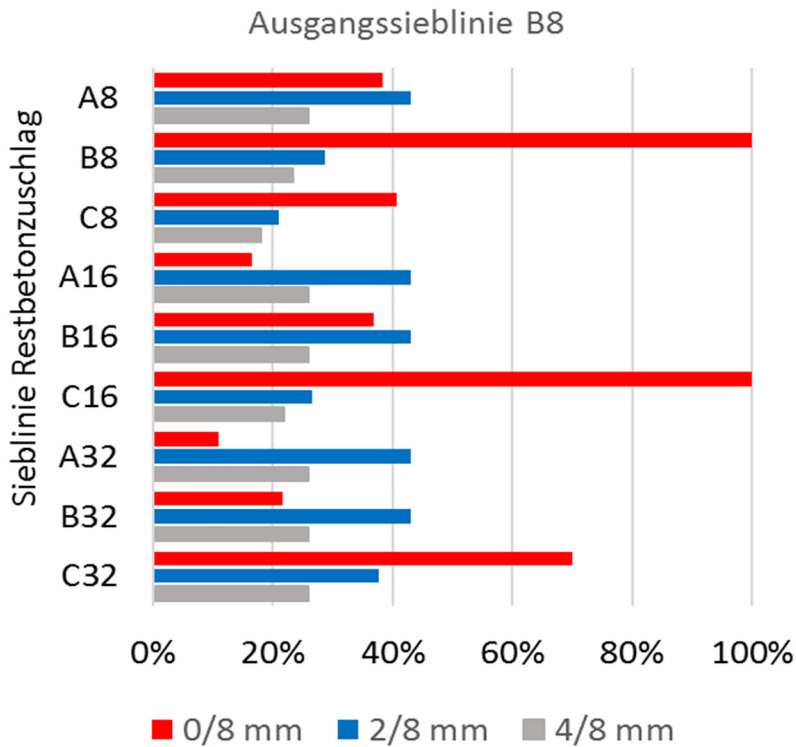


Abbildung 11.2: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie B8 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/8 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 2/8 mm und 4/8 mm für die Zugabe über die groben Fraktionen.

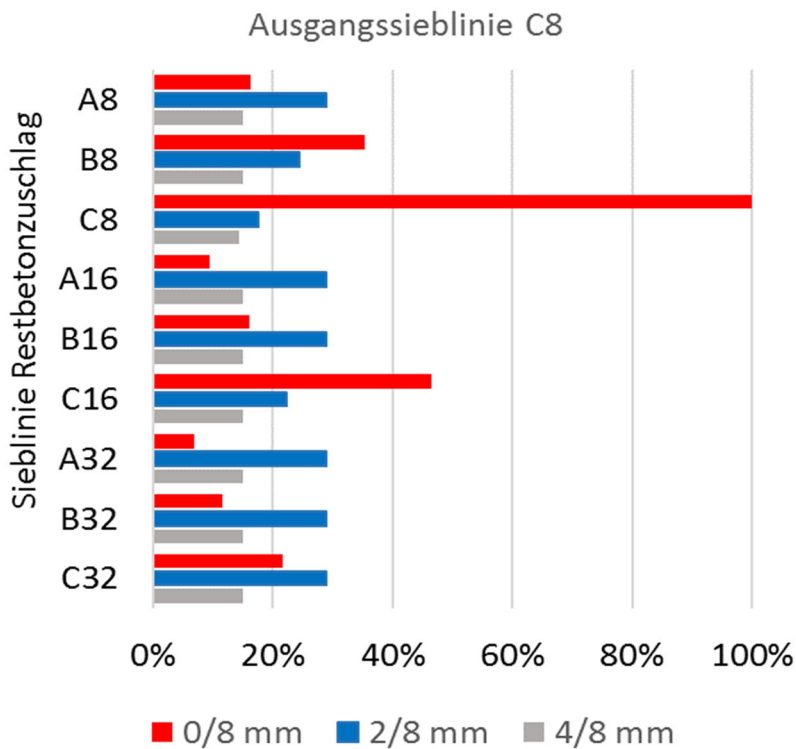


Abbildung 11.3: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie C8 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/8 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 2/8 mm für die Zugabe über die groben Fraktionen.

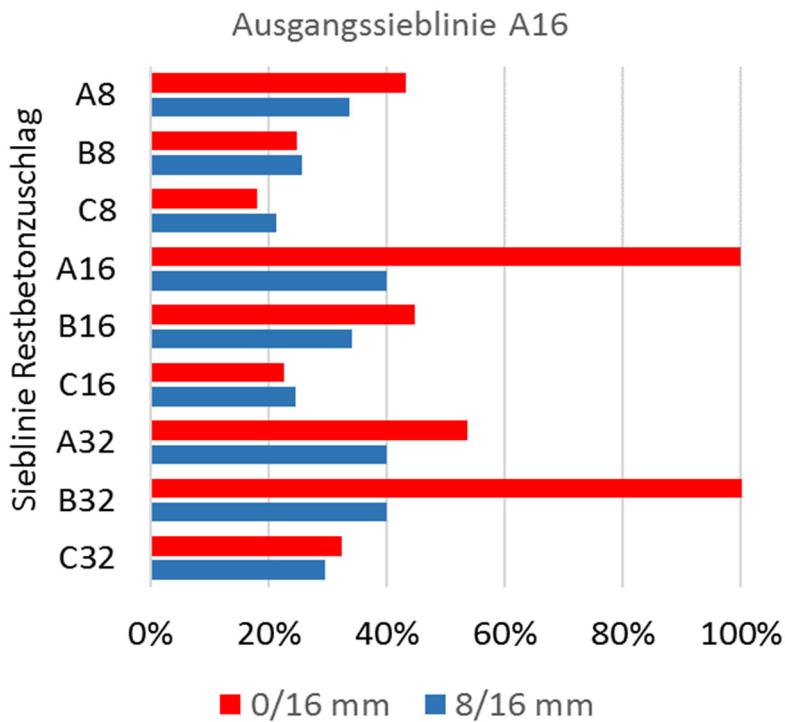


Abbildung 11.4: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie A16 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/16 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 8/16 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

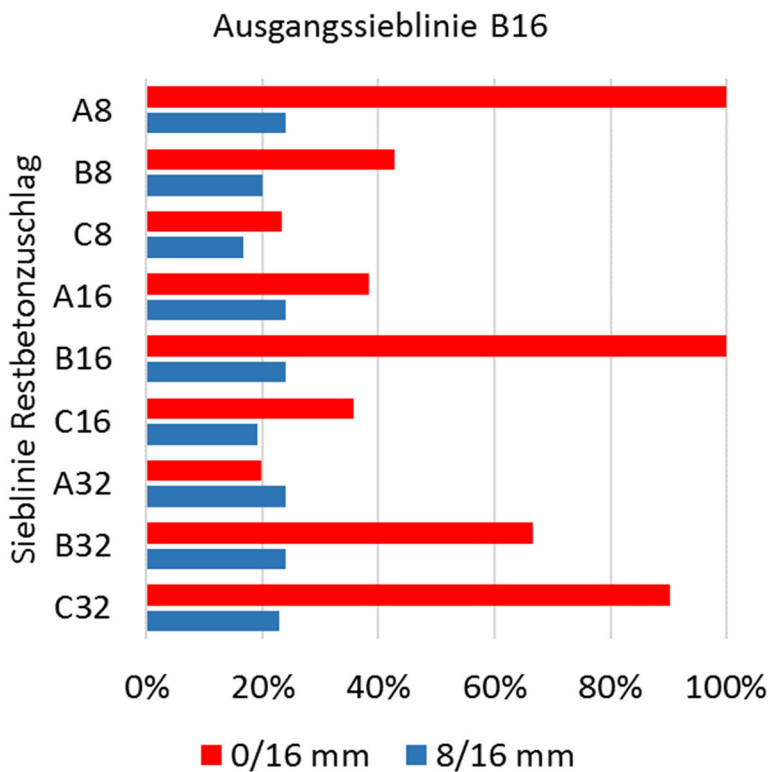


Abbildung 11.5: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie B16 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/16 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 8/16 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

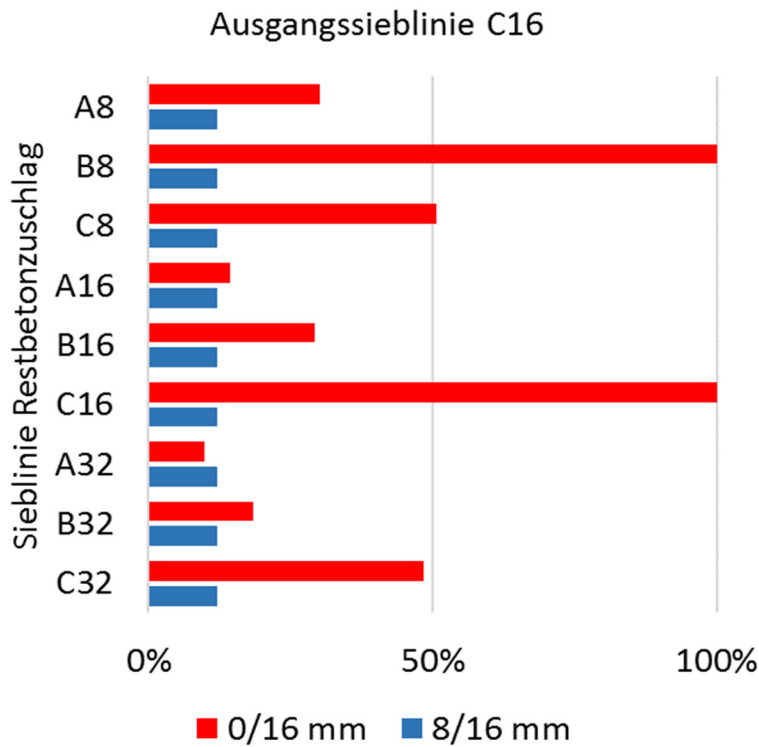


Abbildung 11.6: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie C16 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/16 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 8/16 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

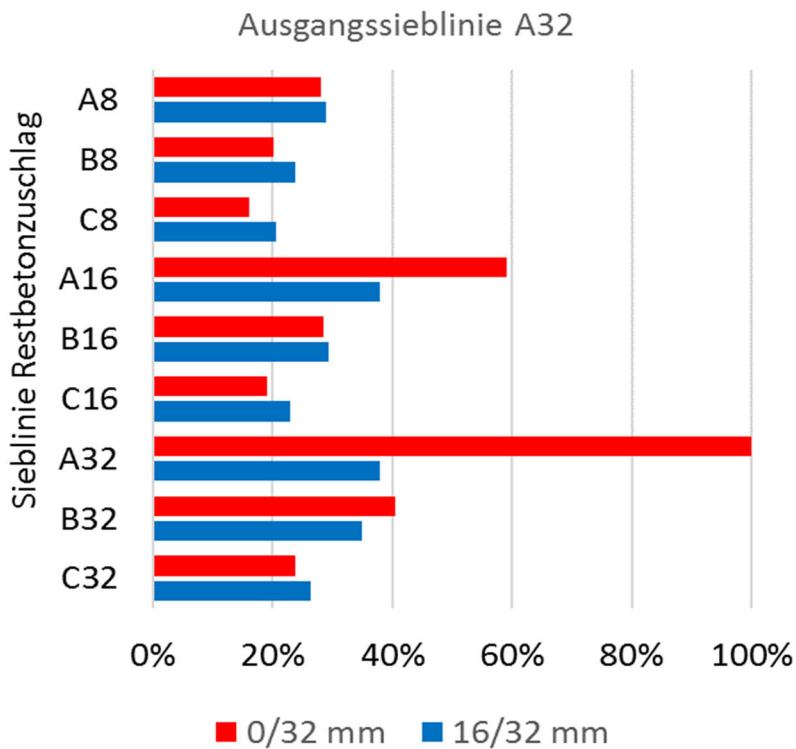


Abbildung 11.7: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie A32 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 16/32 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

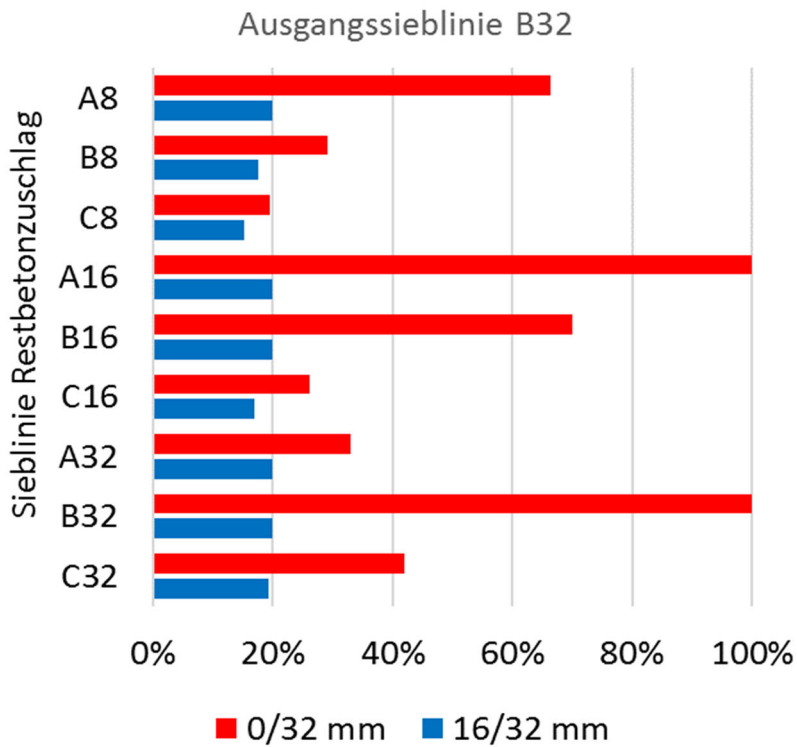


Abbildung 11.8: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie B32 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 16/32 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

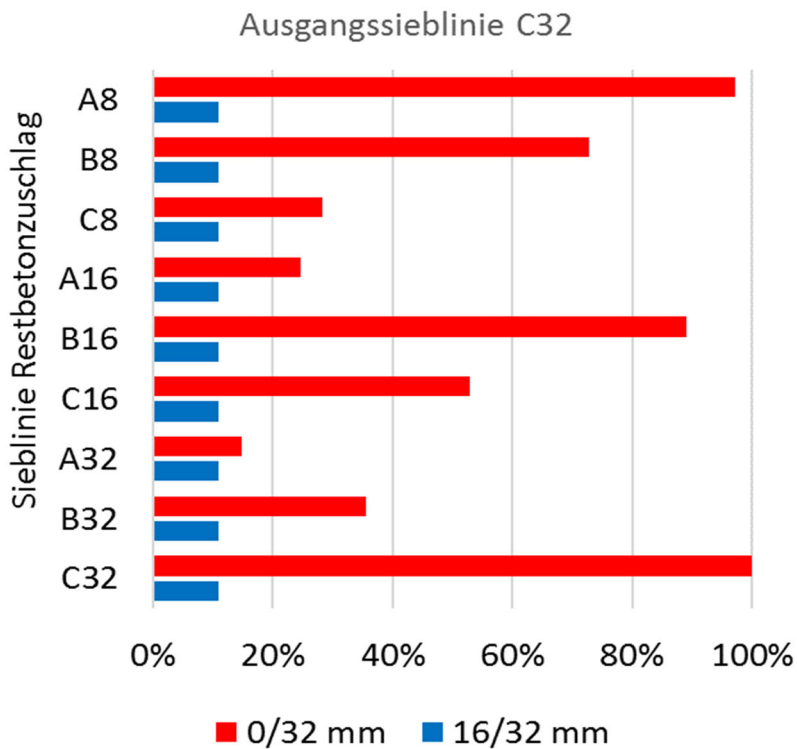


Abbildung 11.9: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie C32 und einem $\Delta w = 10 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 16/32 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

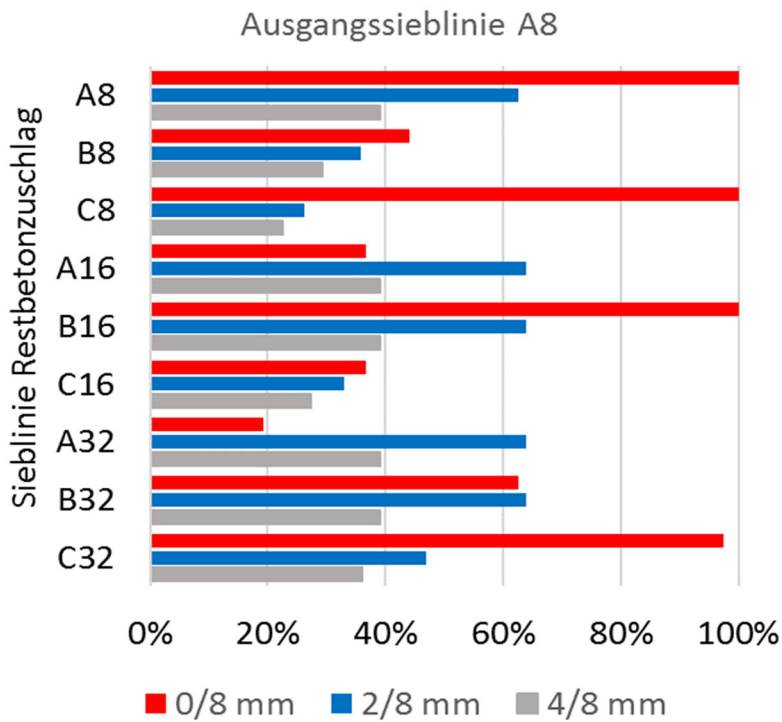


Abbildung 11.10: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie A8 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/8 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 2/8 mm und 4/8 mm für die Zugabe über die groben Fraktionen.

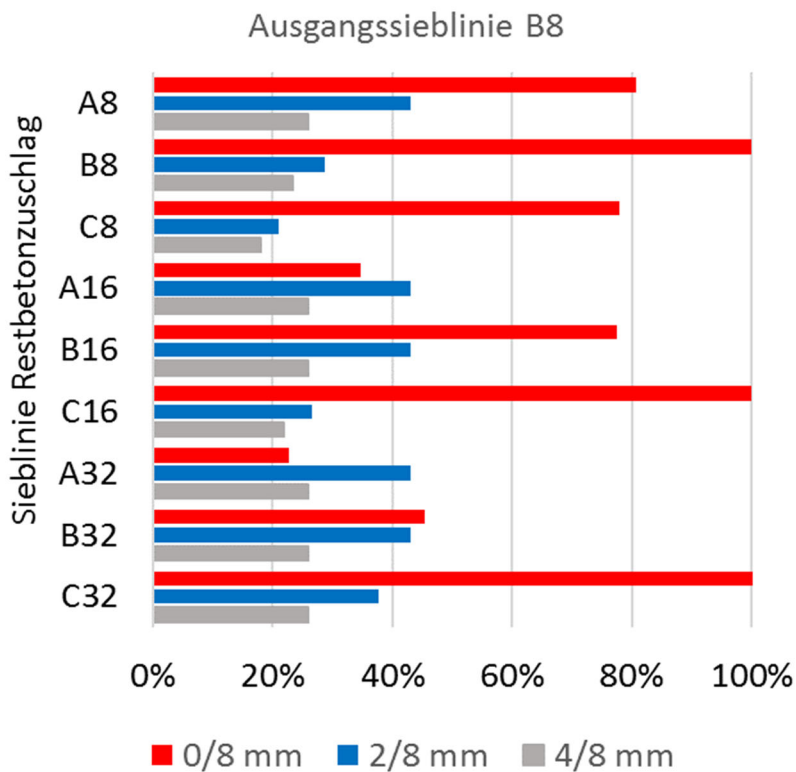


Abbildung 11.11: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie B8 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/8 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 2/8 mm und 4/8 mm für die Zugabe über die groben Fraktionen.

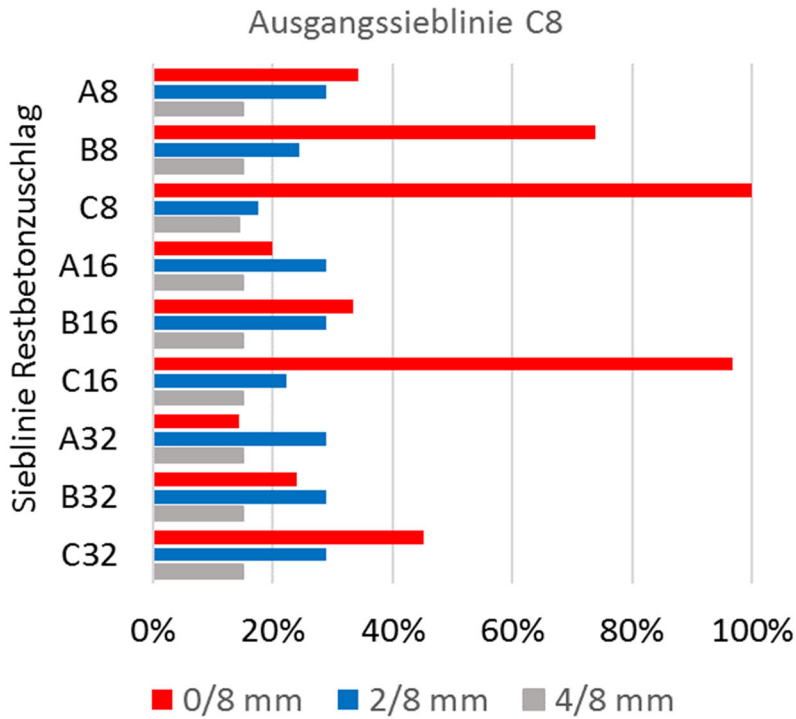


Abbildung 11.12: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie C8 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/8 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 2/8 mm und 4/8 mm für die Zugabe über die groben Fraktionen.

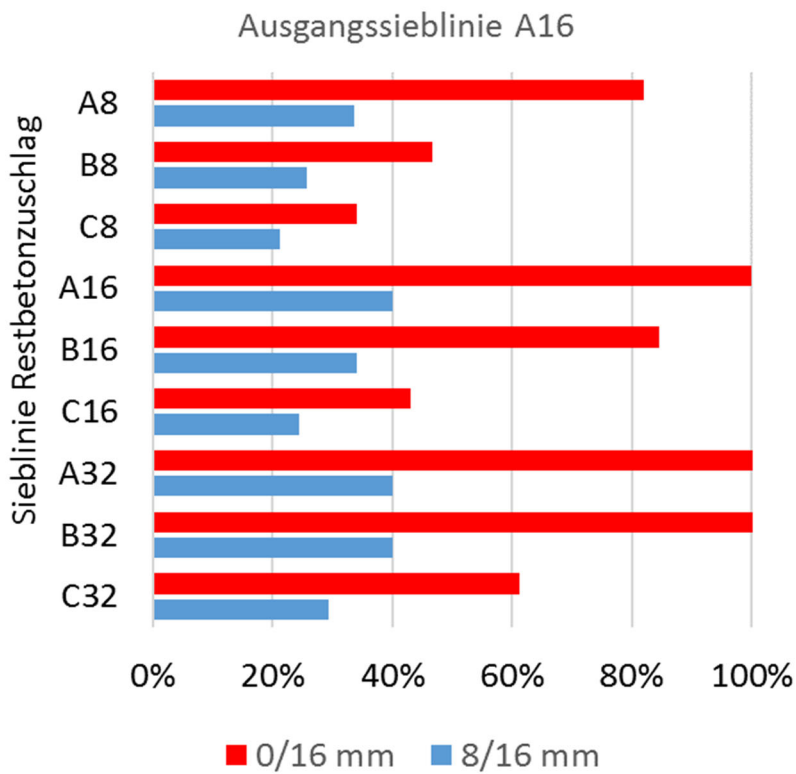


Abbildung 11.13: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie A16 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/16 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 8/16 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

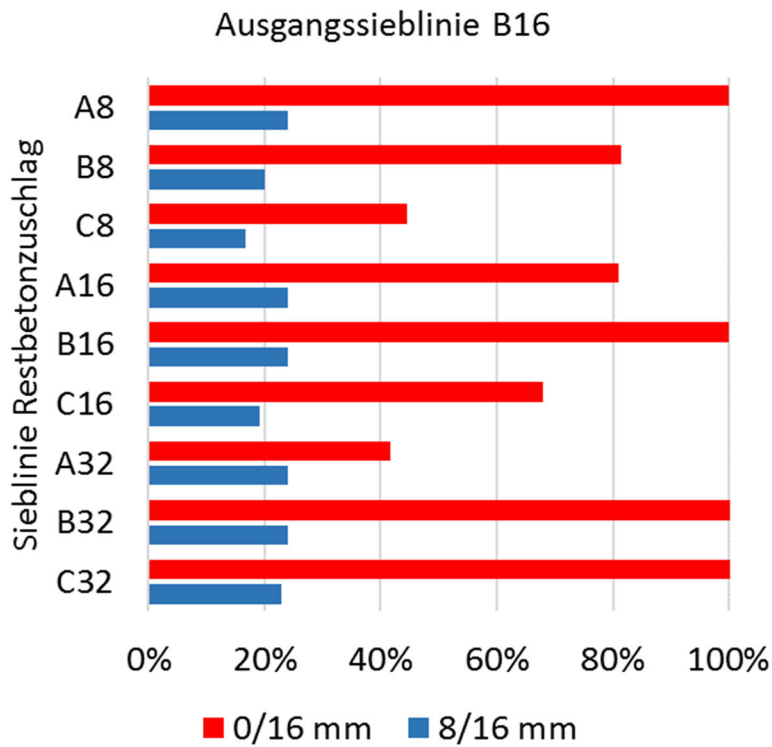


Abbildung 11.14: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie B16 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/16 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 8/16 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

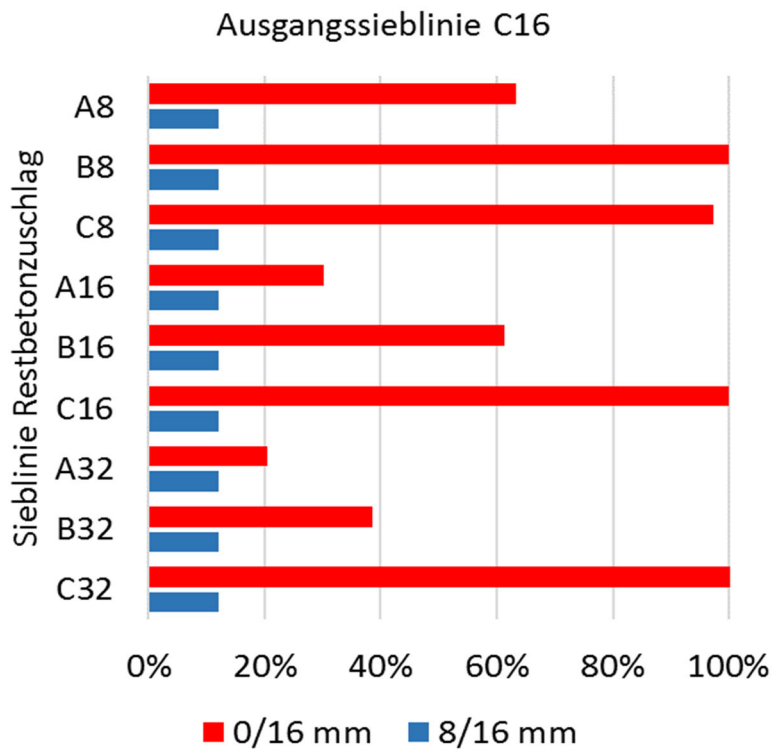


Abbildung 11.15: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie C16 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/16 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 8/16 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

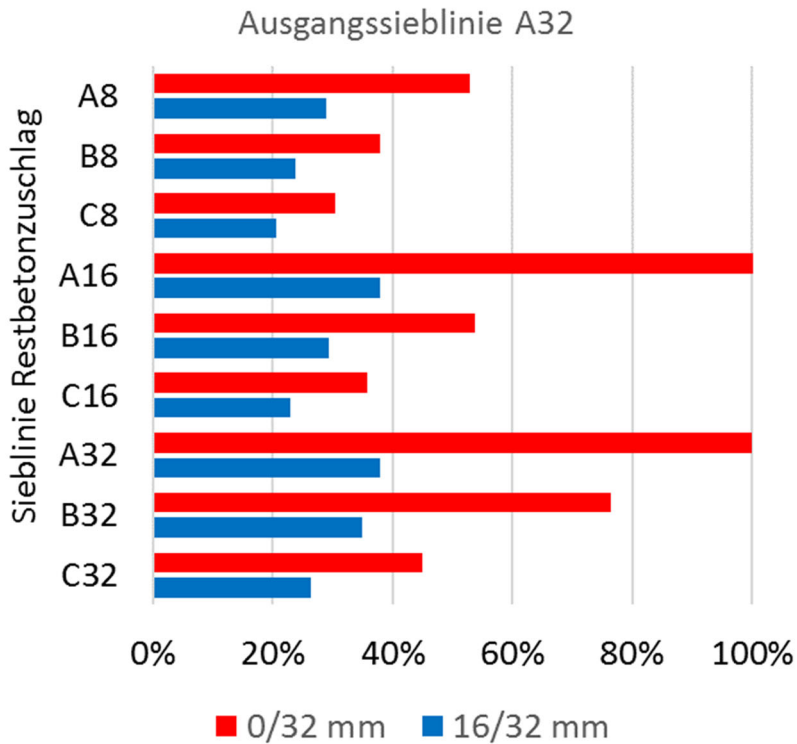


Abbildung 11.16: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie A32 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 16/32 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

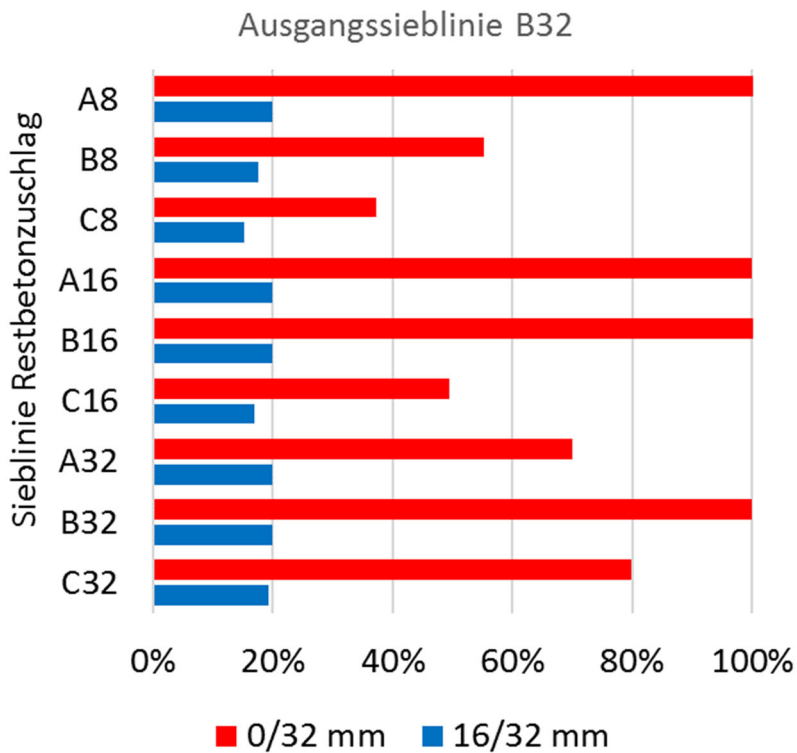


Abbildung 11.17: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie B32 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 16/32 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

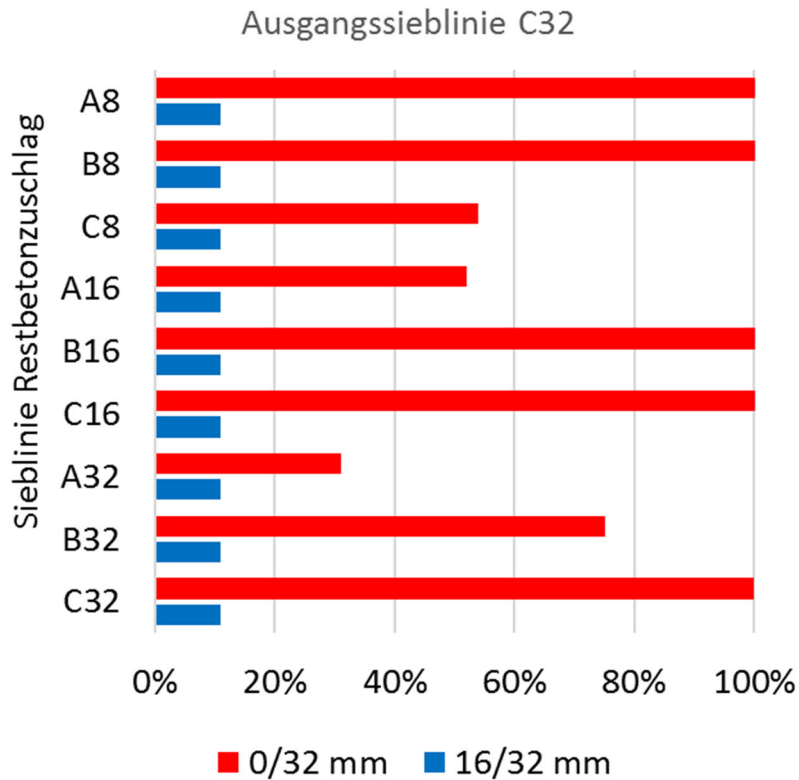


Abbildung 11.18: Mögliche Austauschquoten bei einer Ausgangssieblinie C32 und einem $\Delta w = 20 \text{ kg/m}^3$ in Abhängigkeit von Sieblinie der wiedergewonnenen Gesteinskörnung und der Zugabeart. Dabei steht das Kürzel 0/32 mm für die Zugabe über die gesamte Fraktion und 16/32 mm für die Zugabe über die größte Fraktion.

11.4 Betonzusammensetzungen AP 4

Tabelle 11.1: Stoffraumrechnung der Mischung C 20/25 Ref

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM III/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	78,689	240,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	239,598	632,540
Kies 2/8 mm	2,50	235,772	589,430
Kies 8/16 mm	2,56	262,941	673,130

Tabelle 11.2: Stoffraumrechnung der Mischung C 20/25 C8 0/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	78,689	240,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	192,604	508,475
Kies 2/8 mm	2,50	189,528	473,821
Kies 8/16 mm	2,56	211,369	541,104
Restbetonzuschlag	2,63	144,810	380,850

Tabelle 11.3: Stoffraumrechnung der Mischung C 20/25 C8 8/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	78,689	240,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	239,598	632,540
Kies 2/8 mm	2,50	235,772	589,430
Kies 8/16 mm	2,56	118,056	302,223
Restbetonzuschlag	2,63	144,885	381,048

Tabelle 11.4: Stoffraumrechnung der Mischung C 20/25 A32 0/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	78,689	240,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	192,604	508,475
Kies 2/8 mm	2,50	189,528	473,821
Kies 8/16 mm	2,56	211,369	541,104
Restbetonzuschlag	2,63	144,810	380,850

Tabelle 11.5: Stoffraumrechnung der Mischung C 20/25 A32 8/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	78,689	240,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	239,598	632,540
Kies 2/8 mm	2,50	235,772	589,430
Kies 8/16 mm	2,56	118,056	302,223
Restbetonzuschlag	2,63	144,885	381,048

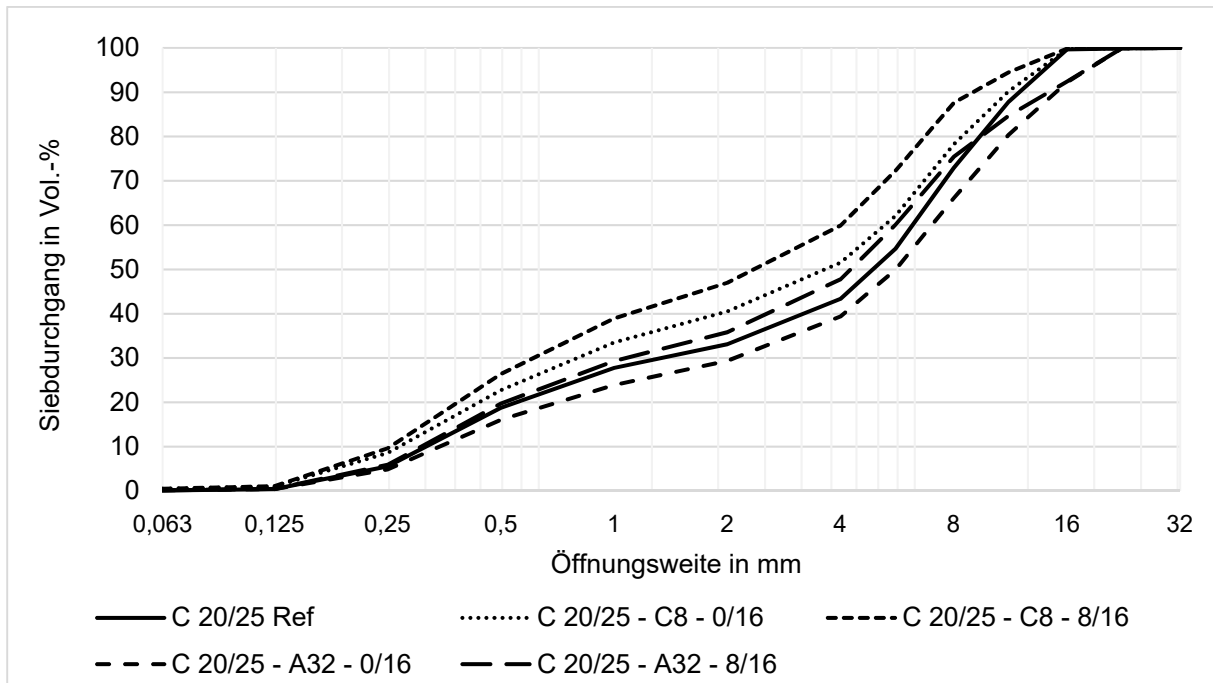


Abbildung 11.19: Sieblinien der Betone der Klasse C20/25 (Die Sieblinien gelten auch für die entsprechenden Betone der Klasse C25/30)

Tabelle 11.6: Stoffraumrechnung der Mischung C 25/30 Ref

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	91,803	280,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	235,345	621,310
Kies 2/8 mm	2,50	231,584	578,960
Kies 8/16 mm	2,56	258,270	661,170

Tabelle 11.7: Stoffraumrechnung der Mischung C 25/30 C8 0/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	91,803	280,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	189,185	499,447
Kies 2/8 mm	2,50	186,161	465,404
Kies 8/16 mm	2,56	207,613	531,489
Restbetonzuschlag	2,63	142,238	374,085

Tabelle 11.8: Stoffraumrechnung der Mischung C 25/30 C8 8/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	91,803	280,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	235,345	621,310
Kies 2/8 mm	2,50	231,584	578,960
Kies 8/16 mm	2,56	115,956	296,848
Restbetonzuschlag	2,63	142,312	374,280

Tabelle 11.9: Stoffraumrechnung der Mischung C 25/30 A32 0/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	91,803	280,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	189,185	499,447
Kies 2/8 mm	2,50	186,161	465,404
Kies 8/16 mm	2,56	207,613	531,489
Restbetonzuschlag	2,63	142,238	374,085

Tabelle 11.10: Stoffraumrechnung der Mischung C 25/30 A32 8/16

	Dichte	Stoffraum	Masse
	[kg/dm ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/m ³]
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	3,05	91,803	280,000
Wasser	1,00	168,000	168,000
Sand 0/2 mm	2,64	235,345	621,310
Kies 2/8 mm	2,50	231,584	578,960
Kies 8/16 mm	2,56	115,956	296,848
Restbetonzuschlag	2,63	142,312	374,280

11.5 Protokolle der Frostuntersuchungen aus AP 5

Protokoll Beton 1-1



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr.: 20/99/0802

Prüfung des Frostwiderstands bzw. Frost-Tausalzwidehrstands von Beton, Bestimmung der inneren Schädigung, CDF und CIF- Test

(Capillary suction of Deicing solution and Freeze thaw test /Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw test)

Prüfstelle: SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co KG
Ständige Betonprüfstelle
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg/Saale

Antragsteller: Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 60
67663 Kaiserslautern

Bauvorhaben/Bauteil: Projekt RC-Frisch

Antragssache/Prüfvorschrift: Es wurde entsprechend folgender Prüfvorschrift/Verfahren geprüft ^{[1][2][3][4][5][6]}.

CDF Verfahren ^{[1][4]}	<input type="checkbox"/>	(XF4)
CF-Verfahren ^{[1][4]}	<input checked="" type="checkbox"/>	(XF3)
CIF-Verfahren ^{[1][2]}	<input checked="" type="checkbox"/>	
BAW-Merkblatt ^[3]	<input type="checkbox"/>	
modifiziertes CDF-Verfahren ^{[5][6]}	<input type="checkbox"/>	(XF2)

Zweck:

Eignungs- bzw. Erstprüfung	<input checked="" type="checkbox"/>
Güteprüfung	<input type="checkbox"/>
Bauwerks- oder Kontrollprüfung	<input type="checkbox"/>

Beton-Nr.: 0
Festigkeit / Konsistenz: unbekannt
Expositionsklassen: XF3
Probenkennzeichnung: 1, 2, 3, 4, 5
Probenart: Platten (150x140x75)
Hersteller/ LS-Nr.: unbekannt
Herstellung am: 09.09.2020
Tag der Einlieferung: 02.10.2020
Prüfbeginn: 14.10.2020
Probenalter: 35 Tage

Der Prüfbericht umfasst 4 Seiten und 2 Anlagen. Jede Veröffentlichung- auch in Kürzung oder Auszug - bedarf der vorherigen Zustimmung des SCHWENK Technologiezentrums. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Proben und Prüfgegenstände sind verbraucht.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Auftrag:

Prüfbericht Nr. 20/99/0802

Dem Zentrallabor der SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co.KG wurden vom Antragsteller die oben erwähnten Proben übergeben. An den Proben war die Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes CF-Verfahren^{[1][4]} durchzuführen.

Die Erfassung des relativen dynamischen E-Moduls (inneren Schädigung) vor und während der Frost- Tau - Wechselbeanspruchung war nachzuweisen (CIF-Verfahren^{[1][2]} / BAW-Merkblatt^[3]).

Probenangaben:

Die Proben waren mit 1-5 gekennzeichnet. (Probenherstellung erfolgte mit Probekörpereinsatz aus PTFE-Platten). Laut Prüfvorschrift^[1] sollten wenigstens 5 Proben mit einer Prüffläche von 800 cm² geprüft werden.

Angaben zur Betonzusammensetzung:

Weitere Angaben zu Frisch- und Festbetondaten sowie Zusammensetzung sind den ÜK 2 Unterlagen bzw. Unterlagen der Erstprüfung des Auftraggebers zu entnehmen.

Probenlagerung und –vorbereitung, Prüfungsdurchführung

Nach der Probenanlieferung wurden die Proben vorbereitet und anschließend bis zum Beginn der Vorlagerung trockengelagert. Die Seitenfläche der Prüfkörper - senkrecht zur Beanspruchungsfläche - wurden max. 3 Tage vor Beginn des kapillaren Saugens mit einem Aluminiumband mit Butylklebung abgedichtet. Sie wurden 7 Tage vor dem Prüfbeginn mit der Beanspruchungsfläche nach unten in die Prüflösung 3%-ige NaCl-Lösung (CDF-Verfahren) bzw. entionisiertes Wasser (CF-Verfahren) zum kapillaren Saugen eingelagert.

Das Prüfalter sollte mindestens 28 Tage bei Beton mit CEM I und II und 56 Tage bei Beton mit CEM III betragen^[3]. Bei Betonen gemäß DIN EN 206/ DIN 1045-2 beginnt die Vorsättigung zum Zeitpunkt des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 28 Tagen, sofern der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 56 Tagen erfolgt, kann die Vorsättigung im Alter von 56 Tagen erfolgen^[6]. Vor der Frost - Tau - Wechsel - Beanspruchung bzw. zu jedem weiteren Prüftermin wurde die Abwitterungsmenge sowie die Flüssigkeitsaufnahme aufgezeichnet.

Zur Ermittlung der Inneren Schädigung wurde der Verlauf der Ultraschalllaufzeit bestimmt. (CIF-Verfahren^{[1][2][3][6]}).

Die Proben wurden entsprechend der Prüfvorschrift über 28 Frost-Tau-Wechsel bei einer Minimaltemperatur von -20°C geprüft und bewertet.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr. 20/99/0802

Prüfergebnisse und Kriterien

Frostwiderstand nach dem CIF Test ^{[1][2][3]}:

Innere Schädigung (maßgebendes Kriterium)		
Relativer Dyn. E-Modul $R_{u,n}$ nach 28 FTW	0,99	(99 %)
Relativer Dyn. E-Modul $R_{u,n}$ nach 24 FTW	0,98	(98 %)
Anzahl der FTW beim Schädigungskriterium $R_{u,n} = 0,75$	≥ 28 FTW	
Abnahmekriterium innere Schädigung CIF-Test		
Mittelwert der Prüferie für die Eignungsprüfung	≥ 28 FTW	
Mittelwert der Prüferie für die Güte- und Bauwerksprüfung	≥ 24 FTW	

Als Abnahmekriterium ist eine Zyklanzahl zu vereinbaren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf. Wenn keine andere schriftliche Vereinbarung getroffen wurde, gelten die o.g. Abnahmekriterien.

Abwitterung (zusätzliches Kriterium)		
	Prüffläche	1038 cm ²
Abwitterung nach 28 FTW Mittelwert der Prüferie	651	g/m ²
Abwitterung nach 28 FTW 5% Fraktile der Prüferie	831	g/m ²
Abnahmekriterium Abwitterung für die Eignungs-, Güte und Bauwerksprüfung		
Mittelwert der Prüferie	< 1000	g/m ²
5% Fraktile der Prüferie	< 1750	g/m ²
Flüssigkeitsaufnahme durch kapillares Saugen		
Mittelwert bis Ende der Vorlagerung	1,68	%
Mittelwert bei Beendigung der FTW-Beanspruchung	2,45	%

Die Einzelwerte der Abwitterungen, Standardabweichung und der Verlauf der Flüssigkeitsaufnahme (Kapillares Saugen) vor und während der FTW-Beanspruchung sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel in den Tabellen (Anlage 1 Seite 1) aufgeführt und im Diagramm dargestellt.

In Anlage 1 Seite 2 sind alle Mess- und Rechenwerte der Bestimmung des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls (Ultraschallmessung) zusammengefasst und der E-Modul Abfall bezogen auf den Ausgangswert dargestellt.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr. 20/99/0802

Charakterisierung der abgewitterten Oberfläche (S.a. Anlage 2 Fotodokumentation):

Probenbeschaffenheit	vor FTW	nach 14 FTW	nach 28 FTW
Abplatzungen+Pop Outs	keine	wenige	viele
Flächiges Erscheinungsbild Mörtel bzw. Betonmatrix	i.O.	geringe Abwitterung	mäßig starke Abwitterung
Schädigung an Gesteinskörnung	keine	keine	keine
Rissbildung	keine	keine	keine

Abweichungen von den Anforderungen der Prüfung:

Abweichend von der Prüfvorgabe wurden die Proben erst später als nach 28 Tagen geprüft.

Zusammenfassung

Unter Beachtung der Abnahmekriterien nach ^[1], ^[2] und ^[3] an einen Beton mit erhöhten Widerstand gegen Frost-Tau-Angriff bei Einwirkung von Wasser (Expositionsklasse XF3) wird die Anforderung erfüllt.

Die Beurteilung erfolgt durch den Auftraggeber.

SCHWENK Technologiezentrum
GmbH & Co. KG
Ständige Betonprüfstelle ZL Nord
Altenburger Chaussee 3

Th. Arndt / Laborleitung

Bernburg, 02.11.2020

Anlagen: Anlage 1 Seite 1 / Flüssigkeitsaufnahme, Abwitterungsverlauf
Anlage 1 Seite 2/ Messung des rel. dyn. E-Modul - Innere Schädigung
Anlage 2 Seite 1/ Fotodokumentation

^[1] RILEM TC 117-FDC: CDF, CF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton, Prüfung mit Taumittellösung (CDF) - RILEM Recommendation

^[2] Setzer, J.; Aueberg, R.: Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton Bestimmung der inneren Schädigung – CIF-Test

^[3] Bundesanstalt für Wasserbau BAW Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB) - Ausgabe September 2012

^[4] DIN CEN/TS 12390-9, Vomorm Prüfung von Festbeton- Teil 9: Frost und Frost-Tausalz-widerstand - Abwitterung; 5-2017

^[5] Setzer, J.; Keck; Palecky: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton der Expositions-kategorie XF2, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau Heft B 56 Juli 2007

^[6] C.Gehlen, D.Lowke, C.Milachowski: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau Heft B 84 Dezember 2011

SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

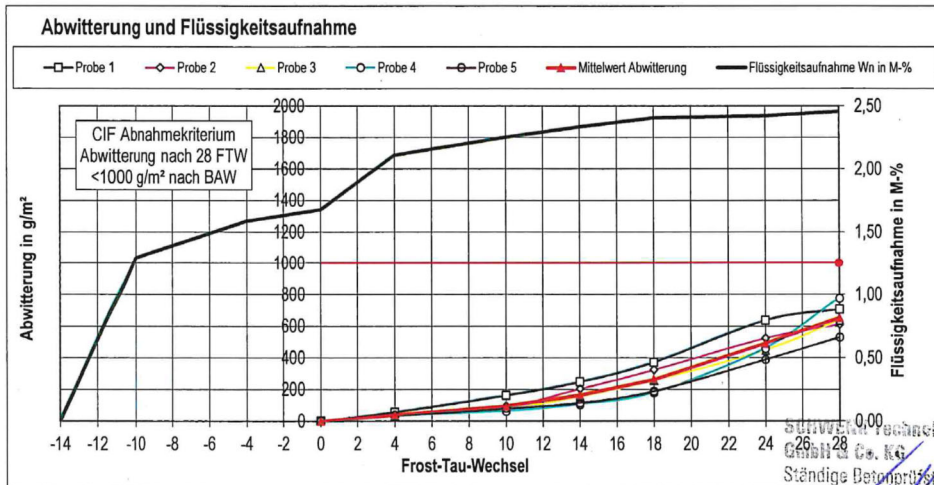
Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Flüssigkeitsaufnahme/Abwitterung/Innere Schädigung

1960/ TU Kaiserslautern B1		Betonnr:		Herst.		09.09.20	Prüfbericht-Nr:		20/99/0802		
Verfahren		CF/CIF	Prüflös.		entionisiertes Wasse	Probeneingang		02.09.20			
Vorlagerung ab		07.10.20	28 Tage								
FTW Prüfung ab		14.10.20	35 Tage								
Gesamtprüffläche		1038 cm ²									
Proben-Nr.	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
Länge(p) in mm	148,8	149,1	149,2	149,3	149,2						
Breite(s) in mm	139,8	139,0	138,5	139,0	139,5						
Höhe in mm	72,6	72,6	72,7	72,2	72,4						
Durchmesser in mm											
Masse Probe W ₀	3476,2	3471,2	3454,9	3439,4	3478,5						
Rohdichte in kg/dm ³	2,30	2,31	2,30	2,30	2,31	2,30 (MW)					
Prüffläche in mm ²	20.802	20.725	20.664	20.753	20.813						
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Flüssigkeitsaufnahme kapill. Saugen Wn in M-%									
		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5					
-7		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00					
-5		1,23	1,33	1,31	1,32	1,29	Abwitterung in g/m ²				
-2		1,54	1,60	1,61	1,63	1,55	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
0	0	1,62	1,68	1,73	1,73	1,62	0	0	0	0	0
2	4	2,06	2,10	2,16	2,17	2,05	56	40	31	34	37
5	10	2,23	2,23	2,31	2,32	2,17	162	94	77	62	80
7	14	2,31	2,31	2,38	2,41	2,26	247	204	154	105	116
9	18	2,39	2,37	2,45	2,49	2,33	372	324	256	179	189
12	24	2,41	2,38	2,48	2,49	2,36	636	524	446	457	389
14	28	2,49	2,41	2,52	2,48	2,37	707	611	634	775	529
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Flüssigkeitsaufnahme Wn in M-%									
		Mittelwert	Stand.abw.	5% Frakt.							
-7		0,00	0,000	0,000							
-5		1,29	0,037	1,354							
-2		1,59	0,034	1,642							
0	0	1,68	0,049	1,756							
2	4	2,11	0,048	2,188							
5	10	2,25	0,054	2,341							
7	14	2,33	0,054	2,421							
9	18	2,40	0,056	2,497							
12	24	2,42	0,053	2,508							
14	28	2,45	0,055	2,545							
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Abwitterung in g/m ²									
		Mittelwert	Stand.abw.	5% Frakt.							
0	0	0	0	0							
2	4	40	9	58							
5	10	95	35	170							
7	14	165	54	280							
9	18	264	75	424							
12	24	490	85	670							
14	28	651	84	831							



SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG
Ständige Datenprüfstelle ZL Nord
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg
Anlage 1 Prüfbericht 20-99-0802

SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

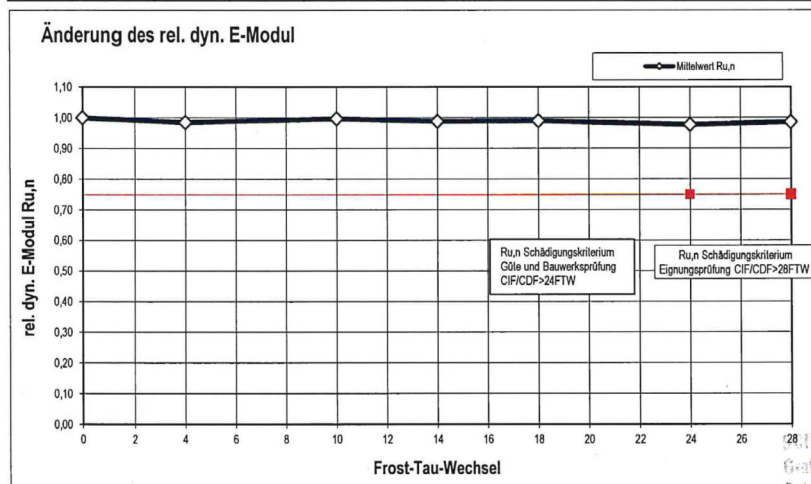


Flüssigkeitsaufnahme/Abwitterung/Innere Schädigung

1960/ TU Kaiserslautern B1	Betonnr:	0	Herst.	09.09.20	Prüfbericht-Nr:	20/99/0802				
Verfahren	CF/CIF	Prüfös.	entionisiertes Wasse							
Vorlagerung ab	07.10.20	28 Tage								
FTW Prüfung ab	14.10.20	35 Tage								
Gesamtprüffläche	1038 cm ²									
	Probe 1	Probe 1	Probe 2	Probe 2	Probe 3	Probe 3	Probe 4	Probe 4	Probe 5	Probe 5
	p	s	p	s	p	s	p	s	p	s
l_n in mm	148,8	139,8	149,1	139	149,2	138,5	149,3	139	149,2	139,5
l_c in mm	11,2	20,2	10,9	21	10,8	21,5	10,7	21	10,8	20,5
t_c in ms	7,5	13,6	7,3	14,1	7,2	14,4	7,2	14,1	7,2	13,8

Anzahl FTW	rel. Durchschallungsgeschwindigkeit t_n									
	Probe 1 p	Probe 1 s	Probe 2 p	Probe 2 s	Probe 3 p	Probe 3 s	Probe 4 p	Probe 4 s	Probe 5 p	Probe 5 s
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,98	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	1,00
10	0,99	1,01	0,98	1,01	0,99	1,01	0,99	1,01	0,99	1,00
14	0,98	1,00	0,98	1,01	0,98	1,00	0,98	1,00	0,99	1,00
18	0,98	1,01	0,98	1,01	0,98	1,02	0,99	1,00	0,98	0,99
24	0,97	1,01	0,98	1,00	0,97	1,01	0,98	1,00	0,97	0,99
28	0,95	1,02	0,98	1,00	0,98	1,01	0,98	1,01	0,99	1,00

Anzahl FTW	relativer dynamischer E-Modul $R_{u,n}$ nach n Frost-Tau-Wechsel										Mittelwert	Stand. abw.
	Probe 1 p	Probe 1 s	Probe 2 p	Probe 2 s	Probe 3 p	Probe 3 s	Probe 4 p	Probe 4 s	Probe 5 p	Probe 5 s		
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
4	0,97	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	0,99	0,98	1,00	0,98	0,01
10	0,98	1,02	0,97	1,03	0,98	1,03	0,97	1,02	0,98	1,00	1,00	0,02
14	0,97	1,01	0,97	1,02	0,97	1,01	0,97	1,01	0,97	1,00	0,99	0,02
18	0,95	1,03	0,97	1,03	0,97	1,04	0,98	1,01	0,95	0,98	0,99	0,03
24	0,94	1,02	0,96	1,01	0,94	1,02	0,97	0,99	0,95	0,98	0,98	0,03
28	0,90	1,03	0,96	1,01	0,96	1,03	0,97	1,02	0,98	1,00	0,99	0,04



SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG
 Sandige Betonprüfstelle ZL Nord
 Altenburger Chaussee 3
 06406 Bernburg
 Anlage 1 Prüfbericht 20-99-0802



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Fotodokumentation

1960/ TU Kaiserslautern B1	Betonnr:	0	Herst.	09.09.2020	Prüfbericht-Nr:	20/99/0802
----------------------------	----------	---	--------	------------	-----------------	------------



Probe 1	
Probe 2	Probe 3
Probe 4	Probe 5

SCHWENK Technologiezentrum
GmbH & Co. KG
Eindige Betonprüfstelle ZL Nor
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg

Beton 1-2:



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr.: 20/99/0821

Prüfung des Frostwiderstands bzw. Frost-Tausalzwidehrstands von Beton, Bestimmung der inneren Schädigung, CDF und CIF- Test

(Capillary suction of Deicing solution and Freeze thaw test /Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw test)

Prüfstelle: SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co KG
Ständige Betonprüfstelle
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg/Saale

Antragsteller: Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 60
67663 Kaiserslautern

Bauvorhaben/Bauteil: Projekt RC-Frisch

Antragssache/Prüfvorschrift: Es wurde entsprechend folgender Prüfvorschrift/Verfahren geprüft ^{[1][2][3][4][5][6]}:

CDF Verfahren ^{[1][4]}	<input type="checkbox"/>	(XF4)
CF-Verfahren ^{[1][4]}	<input checked="" type="checkbox"/>	(XF3)
CIF-Verfahren ^{[1][2]}	<input checked="" type="checkbox"/>	
BAW-Merkblatt ^[3]	<input type="checkbox"/>	
modifiziertes CDF-Verfahren ^{[5][6]}	<input type="checkbox"/>	(XF2)

Zweck:

Eignungs- bzw. Erstprüfung	<input checked="" type="checkbox"/>
Güteprüfung	<input type="checkbox"/>
Bauwerks- oder Kontrollprüfung	<input type="checkbox"/>

Beton-Nr.: 0
Festigkeit / Konsistenz: unbekannt
Expositionsklassen: XF3
Probenkennzeichnung: 1, 2, 3, 4, 5
Probenart: Platten (150x140x75)
Hersteller/ LS-Nr.: unbekannt
Herstellung am: 14.09.2020
Tag der Einlieferung: 02.10.2020
Prüfbeginn: 19.10.2020
Probenalter: 35 Tage

Der Prüfbericht umfasst 4 Seiten und 2 Anlagen. Jede Veröffentlichung- auch in Kürzung oder Auszug - bedarf der vorherigen Zustimmung des SCHWENK Technologiezentrums. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Proben und Prüfgegenstände sind verbraucht.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Auftrag:

Prüfbericht Nr. 20/99/0821

Dem Zentrallabor der SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co.KG wurden vom Antragsteller die oben erwähnten Proben übergeben. An den Proben war die Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes CF-Verfahren^{[1][4]}durchzuführen.

Die Erfassung des relativen dynamischen E-Moduls (inneren Schädigung) vor und während der Frost- Tau - Wechsel-Beanspruchung war nachzuweisen (CIF-Verfahren^{[1][2]} / BAW-Merkblatt^[3]).

Probenangaben:

Die Proben waren mit 1-5 gekennzeichnet. (Probenherstellung erfolgte mit Probekörpereinsatz aus PTFE-Platten). Laut Prüfvorschrift^[1] sollten wenigstens 5 Proben mit einer Prüffläche von 800 cm² geprüft werden.

Angaben zur Betonzusammensetzung:

Weitere Angaben zu Frisch- und Festbetondaten sowie Zusammensetzung sind den ÜK 2 Unterlagen bzw. Unterlagen der Erstprüfung des Auftraggebers zu entnehmen.

Probenlagerung und –vorbereitung, Prüfungsdurchführung

Nach der Probenanlieferung wurden die Proben vorbereitet und anschließend bis zum Beginn der Vorlagerung trockengelagert. Die Seitenfläche der Prüfkörper - senkrecht zur Beanspruchungsfläche - wurden max. 3 Tage vor Beginn des kapillaren Saugens mit einem Aluminiumband mit Butylklebung abgedichtet. Sie wurden 7 Tage vor dem Prüfbeginn mit der Beanspruchungsfläche nach unten in die Prüflösung 3%-ige NaCl-Lösung (CDF-Verfahren) bzw. entionisiertes Wasser (CF-Verfahren) zum kapillaren Saugen eingelagert.

Das Prüfalter sollte mindestens 28 Tage bei Beton mit CEM I und II und 56 Tage bei Beton mit CEM III betragen^[3]. Bei Betonen gemäß DIN EN 206/ DIN 1045-2 beginnt die Vorsättigung zum Zeitpunkt des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 28 Tagen, sofern der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 56 Tagen erfolgt, kann die Vorsättigung im Alter von 56 Tagen erfolgen^[6]. Vor der Frost - Tau - Wechsel - Beanspruchung bzw. zu jedem weiteren Prüftermin wurde die Abwitterungsmenge sowie die Flüssigkeitsaufnahme aufgezeichnet.

Zur Ermittlung der Inneren Schädigung wurde der Verlauf der Ultraschalllaufzeit bestimmt. (CIF-Verfahren^{[1][2][3][6]}).

Die Proben wurden entsprechend der Prüfvorschrift über 28 Frost-Tau-Wechsel bei einer Minimaltemperatur von -20°C geprüft und bewertet.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr.

20/99/0821

Prüfergebnisse und Kriterien

Frostwiderstand nach dem CIF Test ^{[1][2][3]}:

Innere Schädigung (maßgebendes Kriterium)	
Relativer Dyn. E-Modul $R_{u,n}$ nach 28 FTW	0,78 (78 %)
Relativer Dyn. E-Modul $R_{u,n}$ nach 24 FTW	0,85 (85 %)
Anzahl der FTW beim Schädigungskriterium $R_{u,n} = 0,75$	≥ 28 FTW
Abnahmekriterium innere Schädigung CIF-Test	
Mittelwert der Prüfserie für die Eignungsprüfung	≥ 28 FTW
Mittelwert der Prüfserie für die Güte- und Bauwerksprüfung	≥ 24 FTW

Als Abnahmekriterium ist eine Zyklanzahl zu vereinbaren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf. Wenn keine andere schriftliche Vereinbarung getroffen wurde, gelten die o.g. Abnahmekriterien.

Abwitterung (zusätzliches Kriterium)	Prüffläche	1047	cm ²
Abwitterung nach 28 FTW Mittelwert der Prüfserie	636	g/m ²	
Abwitterung nach 28 FTW 5% Fraktile der Prüfserie	1474	g/m ²	
Abnahmekriterium Abwitterung für die Eignungs-, Güte und Bauwerksprüfung			
Mittelwert der Prüfserie	< 1000	g/m ²	
5% Fraktile der Prüfserie	< 1750	g/m ²	
Flüssigkeitsaufnahme durch kapillares Saugen			
Mittelwert bis Ende der Vorlagerung	1,81	%	
Mittelwert bei Beendigung der FTW-Beanspruchung	2,59	%	

Die Einzelwerte der Abwitterungen, Standardabweichung und der Verlauf der Flüssigkeitsaufnahme (Kapillares Saugen) vor und während der FTW-Beanspruchung sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel in den Tabellen (Anlage 1 Seite 1) aufgeführt und im Diagramm dargestellt.

In Anlage 1 Seite 2 sind alle Mess- und Rechenwerte der Bestimmung des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls (Ultraschallmessung) zusammengefasst und der E-Modul Abfall bezogen auf den Ausgangswert dargestellt.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr. 20/99/0821

Charakterisierung der abgewitterten Oberfläche (S.a. Anlage 2 Fotodokumentation):

Probenbeschaffenheit	vor FTW	nach 14 FTW	nach 28 FTW
Abplatzungen+Pop Outs	keine	mäßig viele	viele
Flächiges Erscheinungsbild Mörtel bzw. Betonmatrix	i.O.	geringe Abwitterung	mäßig starke Abwitterung
Schädigung an Gesteinskörnung	keine	keine	keine
Rissbildung	keine	keine	keine

Abweichungen von den Anforderungen der Prüfung:

Abweichend von der Prüfvorgabe wurden die Proben erst später als nach 28 Tagen geprüft.

Zusammenfassung

Unter Beachtung der Abnahmekriterien nach ^[1], ^[2] und ^[3] an einen Beton mit erhöhten Widerstand gegen Frost-Tau-Angriff bei Einwirkung von Wasser (Expositionsklasse XF3) wird die Anforderung erfüllt.

Die Beurteilung erfolgt durch den Auftraggeber.

SCHWENK Technologiezentrum
GmbH & Co. KG
Ständige Betonprüfstelle ZL Nord
Altenburger Chaussee 3

Th. Arndt / Laböfleitung

Bernburg, 09.11.2020

Anlagen: Anlage 1 Seite 1 / Flüssigkeitsaufnahme, Abwitterungsverlauf
Anlage 1 Seite 2/ Messung des rel. dyn. E-Modul - Innere Schädigung
Anlage 2 Seite 1/ Fotodokumentation

^[1] RILEM TC 117-FDC: CDF, CF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton, Prüfung mit Taumittellösung (CDF) - RILEM Recommendation

^[2] Setzer, J.; Aueberg, R.: Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton Bestimmung der inneren Schädigung – CIF-Test

^[3] Bundesanstalt für Wasserbau BAW Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB) - Ausgabe September 2012

^[4] DIN CEN/TS 12390-9, Vornorm Prüfung von Festbeton- Teil 9: Frost und Frost-Tausalzwiderstand - Abwitterung; 5-2017

^[5] Setzer, J.; Keck; Palecky: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton der Expositionsklasse XF2, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau Heft B 56 Juli 2007

^[6] C.Gehlen, D.Lowke, C.Milachowski: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau Heft B 84 Dezember 2011

SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

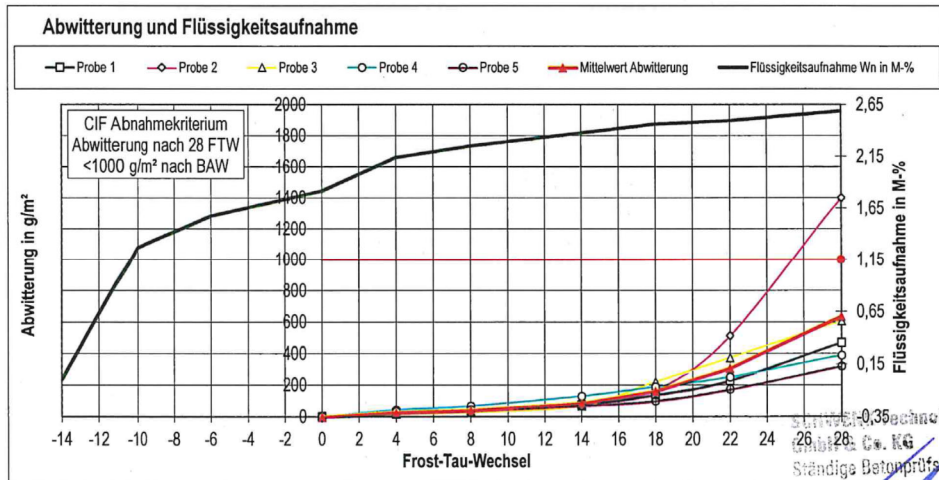
Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Flüssigkeitsaufnahme/Abwitterung/Innere Schädigung

1961/ TU Kaiserslautern B2		Betonnr.:		Herst.	14.09.20	Prüfbericht-Nr.:	20/99/0821					
Verfahren	CF/CIF	Prüflös.	entionisiertes Wasse			Probeneingang	02.09.20					
Vorlagerung ab	12.10.20	28 Tage										
FTW Prüfung ab	19.10.20	35 Tage										
Gesamtprüffläche		1047 cm ²										
Proben-Nr.	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5							
Länge(p) in mm	149,3	149,6	145,3	147,9	149,4							
Breite(s) in mm	137,7	138,8	148,7	140,8	140,0							
Höhe in mm	72,9	72,9	72,7	73,3	71,8							
Durchmesser in mm												
Masse Probe W₀	3471,7	3454,8	3413,0	3510,2	3501,5							
Rohdichte in kg/dm³	2,32	2,28	2,17	2,30	2,33	2,28 (MW)						
Prüffläche in mm²	20.559	20.764	21.606	20.824	20.916							
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Flüssigkeitsaufnahme kapill. Saugen Wn in M-%										
		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5						
-7		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
-5		1,26	1,32	1,24	1,24	1,26						
-3		1,56	1,66	1,54	1,53	1,58						
0	0	1,81	1,92	1,78	1,74	1,82	Abwitterung in g/m²	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
2	4	2,15	2,23	2,12	2,06	2,13	0	0	0	0	0	0
4	8	2,26	2,38	2,23	2,14	2,23	26	22	15	41	32	32
7	14	2,39	2,53	2,37	2,25	2,33	38	36	27	65	44	44
9	18	2,53	2,62	2,42	2,30	2,42	74	84	68	128	69	69
11	22	2,52	2,66	2,45	2,36	2,48	137	172	219	187	99	99
14	28	2,61	2,80	2,55	2,43	2,54	227	512	372	249	172	172
							469	1399	606	388	319	319
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Flüssigkeitsaufnahme Wn in M-%										
		Mittelwert	Stand.abw.	5% Frakt.								
-7		0,00	0,000	0,000								
-5		1,26	0,030	1,312								
-3		1,57	0,045	1,646								
0	0	1,81	0,059	1,910								
2	4	2,14	0,057	2,230								
4	8	2,25	0,075	2,373								
7	14	2,37	0,092	2,524								
9	18	2,46	0,110	2,640								
11	22	2,49	0,095	2,649								
14	28	2,59	0,120	2,784								
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Abwitterung in g/m²										
		Mittelwert	Stand.abw.	5% Frakt.								
0	0	0	0	0								
2	4	27	9	46								
4	8	42	13	70								
7	14	85	22	133								
9	18	163	41	251								
11	22	307	122	566								
14	28	636	393	1474								



SCHWENK Technologiezentrum
 Ständige Betonprüfstelle ZL Nord
 Altenburger Chaussee 3
 06406 Bernburg
 Anlage 1 Prüfbericht 20-99-0821

SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

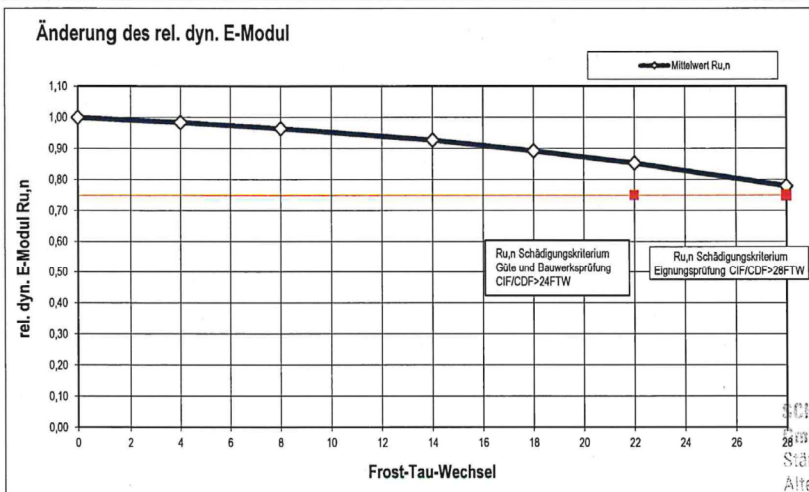


Flüssigkeitsaufnahme/Abwitterung/Innere Schädigung

1961/ TU Kaiserslautern BZ	Betonnr:	0	Herst.	14.09.20	Prüfbericht-Nr:	20/99/0821				
Verfahren	CF/CIF	Prüflös.	entionisiertes Wasse							
Vorlagerung ab	12.10.20	28 Tage								
FTW Prüfung ab	19.10.20	35 Tage								
Gesamtprüffläche	1047 cm ²									
	Probe 1	Probe 1	Probe 2	Probe 2	Probe 3	Probe 3	Probe 4	Probe 4	Probe 5	Probe 5
	p	s	p	s	p	s	p	s	p	s
h_n in mm	149,3	137,7	149,6	138,8	145,3	148,7	147,9	140,8	149,4	140
l_n in mm	10,7	22,3	10,4	21,2	14,7	11,3	12,1	19,2	10,6	20
t_n in ms	7,2	15,0	7,0	14,2	9,9	7,6	8,1	12,9	7,1	13,4

Anzahl FTW	rel. Durchschallungsgeschwindigkeit t_n									
	Probe 1 p	Probe 1 s	Probe 2 p	Probe 2 s	Probe 3 p	Probe 3 s	Probe 4 p	Probe 4 s	Probe 5 p	Probe 5 s
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	1,00	0,98
8	0,99	0,98	0,99	0,97	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,97
14	0,97	0,96	0,97	0,94	0,98	0,97	0,98	0,95	0,97	0,95
18	0,95	0,93	0,93	0,89	0,97	0,96	0,98	0,94	0,95	0,93
22	0,94	0,90	0,89	0,85	0,94	0,94	0,97	0,95	0,94	0,91
28	0,91	0,86	0,81	0,74	0,89	0,90	0,96	0,92	0,91	0,91

Anzahl FTW	relativer dynamischer E-Modul $R_{u,n}$ nach n Frost-Tau-Wechsel										Mittelwert	Stand. abw.
	Probe 1 p	Probe 1 s	Probe 2 p	Probe 2 s	Probe 3 p	Probe 3 s	Probe 4 p	Probe 4 s	Probe 5 p	Probe 5 s		
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
4	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,99	0,96	0,98	0,01
8	0,97	0,96	0,97	0,95	0,98	0,97	0,97	0,95	0,97	0,95	0,96	0,01
14	0,95	0,92	0,94	0,88	0,95	0,94	0,96	0,90	0,94	0,90	0,93	0,02
18	0,91	0,86	0,87	0,80	0,93	0,91	0,96	0,89	0,91	0,87	0,89	0,04
22	0,89	0,81	0,80	0,72	0,89	0,89	0,94	0,89	0,88	0,83	0,85	0,06
28	0,83	0,74	0,65	0,55	0,79	0,82	0,92	0,84	0,82	0,83	0,78	0,10



SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG
Ständige Betonprüfstelle ZL Nord
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Fotodokumentation

1961/ TU Kaiserslautern B2	Betonnr:	0	Herst.	14.09.2020	Prüfbericht-Nr:	20/99/0821
----------------------------	----------	---	--------	------------	-----------------	------------



Probe 1	
Probe 2	Probe 3
Probe 4	Probe 5

Beton 2-2:

SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.




Deutsche Akkreditierungsstelle
D-PL-18748-01-00

Prüfbericht Nr.: 20/99/0856

Prüfung des Frostwiderstands bzw. Frost-Tausalzwidehrstands von Beton, Bestimmung der inneren Schädigung, CDF und CIF- Test

(Capillary suction of Deicing solution and Freeze thaw test /Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw test)

Prüfstelle: SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co KG
Ständige Betonprüfstelle
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg/Saale

Antragsteller: Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Gottlieb-Daimler-Straße, Gebäude 60
67663 Kaiserslautern

Bauvorhaben/Bauteil: Projekt RC-Frisch

Antragssache/Prüfvorschrift: Es wurde entsprechend folgender Prüfvorschrift/Verfahren geprüft ^{[1][2][3][4][5][6]}:

CDF Verfahren ^{[1][4]}	<input type="checkbox"/>	(XF4)
CF-Verfahren ^{[1][4]}	<input checked="" type="checkbox"/>	(XF3)
CIF-Verfahren ^{[1][2]}	<input checked="" type="checkbox"/>	
BAW-Merkblatt ^[3]	<input type="checkbox"/>	
modifiziertes CDF-Verfahren ^{[5][6]}	<input type="checkbox"/>	(XF2)

Zweck:

Eignungs- bzw. Erstprüfung	<input checked="" type="checkbox"/>
Güteprüfung	<input type="checkbox"/>
Bauwerks- oder Kontrollprüfung	<input type="checkbox"/>

Beton-Nr.: 3
Festigkeit / Konsistenz: C 25/30 / unbekannt
Expositionsklassen: XF3
Probenkennzeichnung: 1, 2, 3, 4, 5
Probenart: Platten (150x140x75)
Hersteller/ LS-Nr.: unbekannt
Herstellung am: 24.09.2020
Tag der Einlieferung: 12.10.2020
Prüfbeginn: 02.11.2020
Probenalter: 39 Tage

Der Prüfbericht umfasst 4 Seiten und 2 Anlagen. Jede Veröffentlichung- auch in Kürzung oder Auszug - bedarf der vorherigen Zustimmung des SCHWENK Technologiezentrums. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Proben und Prüfgegenstände sind verbraucht.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Auftrag:

Prüfbericht Nr. 20/99/0856

Dem Zentrallabor der SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co.KG wurden vom Antragsteller die oben erwähnten Proben übergeben. An den Proben war die Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes CF-Verfahren^{[1][4]} durchzuführen.

Die Erfassung des relativen dynamischen E-Moduls (inneren Schädigung) vor und während der Frost- Tau - Wechsel-Beanspruchung war nachzuweisen (CIF-Verfahren^{[1][2]} / BAW-Merkblatt^[3]).

Probenangaben:

Die Proben waren mit 1-5 gekennzeichnet. (Probenherstellung erfolgte mit Probekörpereinsatz aus PTFE-Platten). Laut Prüfvorschrift^[1] sollten wenigstens 5 Proben mit einer Prüffläche von 800 cm² geprüft werden.

Angaben zur Betonzusammensetzung:

Weitere Angaben zu Frisch- und Festbetondaten sowie Zusammensetzung sind den ÜK 2 Unterlagen bzw. Unterlagen der Erstprüfung des Auftraggebers zu entnehmen.

Probenlagerung und –vorbereitung, Prüfungsdurchführung

Nach der Probenanlieferung wurden die Proben vorbereitet und anschließend bis zum Beginn der Vorlagerung trockengelagert. Die Seitenfläche der Prüfkörper - senkrecht zur Beanspruchungsfläche - wurden max. 3 Tage vor Beginn des kapillaren Saugens mit einem Aluminiumband mit Butylklebung abgedichtet. Sie wurden 7 Tage vor dem Prüfbeginn mit der Beanspruchungsfläche nach unten in die Prüflösung 3%-ige NaCl-Lösung (CDF-Verfahren) bzw. entionisiertes Wasser (CF-Verfahren) zum kapillaren Saugen eingelagert.

Das Prüfalter sollte mindestens 28 Tage bei Beton mit CEM I und II und 56 Tage bei Beton mit CEM III betragen^[3]. Bei Betonen gemäß DIN EN 206/ DIN 1045-2 beginnt die Vorsättigung zum Zeitpunkt des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 28 Tagen, sofern der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 56 Tagen erfolgt, kann die Vorsättigung im Alter von 56 Tagen erfolgen^[6]. Vor der Frost - Tau - Wechsel - Beanspruchung bzw. zu jedem weiteren Prüftermin wurde die Abwitterungsmenge sowie die Flüssigkeitsaufnahme aufgezeichnet.

Zur Ermittlung der Inneren Schädigung wurde der Verlauf der Ultraschalllaufzeit bestimmt. (CIF-Verfahren^{[1][2][3][6]}).

Die Proben wurden entsprechend der Prüfvorschrift über 28 Frost-Tau-Wechsel bei einer Minimaltemperatur von -20°C geprüft und bewertet.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr.

20/99/0856

Prüfergebnisse und Kriterien

Frostwiderstand nach dem CIF Test ^{[1][2][3]}.

Innere Schädigung (maßgebendes Kriterium)		
Relativer Dyn. E-Modul $R_{u,n}$ nach 28 FTW	0,69	(69 %)
Relativer Dyn. E-Modul $R_{u,n}$ nach 24 FTW	0,76	(76 %)
Anzahl der FTW beim Schädigungskriterium $R_{u,n} = 0,75$	22 FTW	
Abnahmekriterium innere Schädigung CIF-Test		
Mittelwert der Prüfserie für die Eignungsprüfung	≥ 28 FTW	
Mittelwert der Prüfserie für die Güte- und Bauwerksprüfung	≥ 24 FTW	

Als Abnahmekriterium ist eine Zyklanzahl zu vereinbaren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf. Wenn keine andere schriftliche Vereinbarung getroffen wurde, gelten die o.g. Abnahmekriterien.

Abwitterung (zusätzliches Kriterium)	Prüffläche	1009	cm ²
Abwitterung nach 28 FTW Mittelwert der Prüfserie	309		g/m ²
Abwitterung nach 28 FTW 5% Fraktile der Prüfserie	471		g/m ²
Abnahmekriterium Abwitterung für die Eignungs-, Güte und Bauwerksprüfung			
Mittelwert der Prüfserie	< 1000		g/m ²
5% Fraktile der Prüfserie	< 1750		g/m ²
Flüssigkeitsaufnahme durch kapillares Saugen			
Mittelwert bis Ende der Vorlagerung	1,28		%
Mittelwert bei Beendigung der FTW-Beanspruchung	2,36		%

Die Einzelwerte der Abwitterungen, Standardabweichung und der Verlauf der Flüssigkeitsaufnahme (Kapillares Saugen) vor und während der FTW-Beanspruchung sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel in den Tabellen (Anlage 1 Seite 1) aufgeführt und im Diagramm dargestellt.

In Anlage 1 Seite 2 sind alle Mess- und Rechenwerte der Bestimmung des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls (Ultraschallmessung) zusammengefasst und der E- Modul Abfall bezogen auf den Ausgangswert dargestellt.



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Prüfbericht Nr. 20/99/0856

Charakterisierung der abgewitterten Oberfläche (S.a. Anlage 2 Fotodokumentation):

Probenbeschaffenheit	vor FTW	nach 14 FTW	nach 28 FTW
Abplatzungen+Pop Outs	keine	wenige	mäßig viele
Flächiges Erscheinungsbild Mörtel bzw. Betonmatrix	i.O.	sehr geringe Abwitterung	geringe Abwitterung
Schädigung an Gesteinskörnung	keine	keine	keine
Rissbildung	keine	keine	keine

Abweichungen von den Anforderungen der Prüfung:

Abweichend von der Prüfvorgabe wurden die Proben erst später als nach 28 Tagen geprüft.

Zusammenfassung

Unter Beachtung der Abnahmekriterien nach ^[1], ^[2] und ^[3] an einen Beton mit erhöhten Widerstand gegen Frost-Tau-Angriff bei Einwirkung von Wasser (Expositionsklasse XF3) wird die Anforderung nicht erfüllt.

Die Beurteilung erfolgt durch den Auftraggeber.


 SCHWENK Technologiezentrum
 GmbH & Co. KG
 Ständige Betonprüfstelle ZL Nord
 Altenburger Chaussee 3
 06406 Bernburg

Th. Arndt / Laborleitung

Bernburg, 23.11.2020

Anlagen: Anlage 1 Seite 1 / Flüssigkeitsaufnahme, Abwitterungsverlauf
 Anlage 1 Seite 2/ Messung des rel. dyn. E-Modul - Innere Schädigung
 Anlage 2 Seite 1/ Fotodokumentation

^[1] RILEM TC 117-FDC: CDF, CF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton, Prüfung mit Taumittellösung (CDF) - RILEM Recommendation

^[2] Setzer, J.; Auberg, R.: Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton Bestimmung der inneren Schädigung – CIF-Test

^[3] Bundesanstalt für Wasserbau BAW Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB) - Ausgabe September 2012

^[4] DIN CEN/TS 12390-9, Vornorm Prüfung von Festbeton- Teil 9: Frost und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung; 5-2017

^[5] Setzer, J.; Keck; Palecky: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton der Expositionsklasse XF2, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau Heft B 56 Juli 2007

^[6] C.Gehlen, D.Lowke, C.Milachowski: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau Heft B 84 Dezember 2011

SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfstelle vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

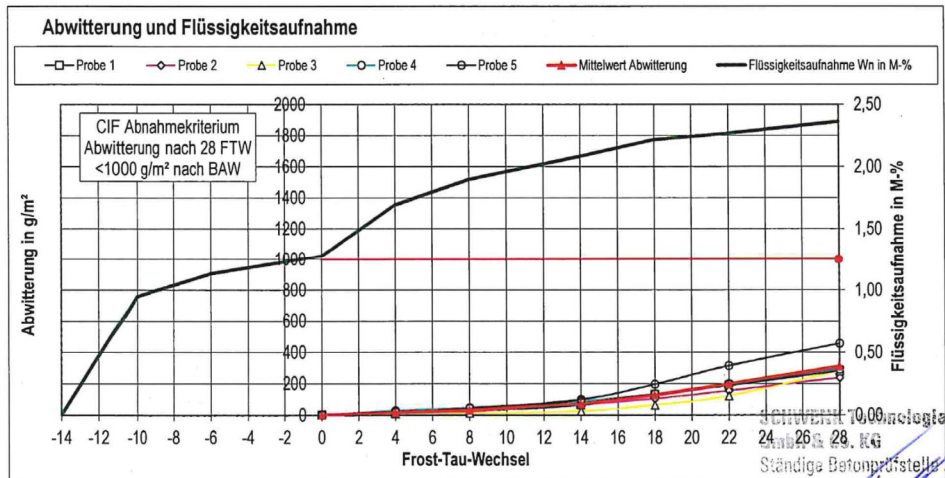
Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.




Deutsche Akkreditierungsstelle
D-PL-18748-01-00

Flüssigkeitsaufnahme/Abwitterung/Innere Schädigung

1963/ TU Kaiserslautern		Betonnr: 3		Herst. 24.09.20		Prüfbericht-Nr: 20/99/0856	
Verfahren CF/CIF		Prüflös. entionisiertes Wasser		Probeneingang		12.10.20	
Vorlagerung ab 26.10.20		32 Tage					
FTW Prüfung ab 02.11.20		39 Tage					
Gesamtprüffläche		1009 cm ²					
Proben-Nr.	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5		
Länge(p) in mm	145,3	148,6	147,4	145,6	146,1		
Breite(s) in mm	138,0	138,1	137,4	137,6	137,5		
Höhe in mm	71,3	72,8	71,5	72,8	72,9		
Durchmesser in mm							
Masse Probe W ₀	3286,5	3455,2	3378,8	3394,9	3380,1		
Rohdichte in kg/dm ³	2,30	2,31	2,33	2,33	2,31	2,32 (MW)	
Prüffläche in mm ²	20.051	20.522	20.253	20.035	20.089		
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Flüssigkeitsaufnahme kapill. Saugen Wn in M-%			Abwitterung in g/m ²		
		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	
-7		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
-5		0,96	0,93	1,00	0,88	0,96	
-3		1,17	1,13	1,19	1,05	1,13	
0	0	1,33	1,26	1,31	1,21	1,27	0 0 0 0 0
2	4	1,72	1,69	1,69	1,67	1,68	11 12 8 27 19
4	8	1,93	1,89	1,88	1,90	1,87	25 24 12 46 42
7	14	2,14	2,03	2,10	2,08	2,06	65 68 24 88 100
9	18	2,33	2,16	2,23	2,20	2,17	132 105 63 133 196
11	22	2,35	2,23	2,29	2,26	2,20	189 155 120 198 315
14	28	2,45	2,33	2,39	2,35	2,29	283 238 278 291 456
Prüfalter in Tagen	Anzahl FTW	Flüssigkeitsaufnahme Wn in M-%			Abwitterung in g/m ²		
		Mittelwert	Stand.abw.	5% Frakt.	Mittelwert	Stand.abw.	5% Frakt.
-7		0,00	0,000	0,000			
-5		0,95	0,042	1,015			
-3		1,13	0,048	1,212			
0	0	1,28	0,042	1,345			
2	4	1,69	0,018	1,720			
4	8	1,90	0,020	1,928			
7	14	2,08	0,037	2,143			
9	18	2,22	0,061	2,317			
11	22	2,27	0,053	2,353			
14	28	2,36	0,054	2,450			




SCHWENK Technologiezentrum
Ständige Betonprüfstelle z. Nord
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg
Anlage 1 Prüfbericht 20-99-0856

SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



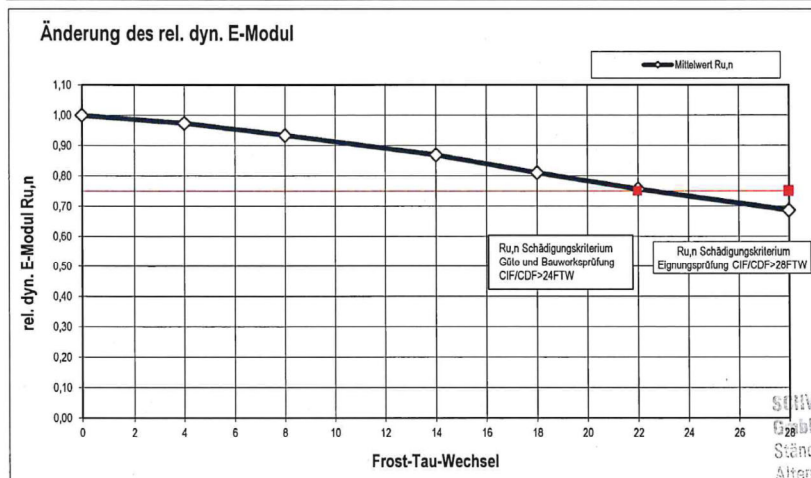

Deutsche Akkreditierungsstelle
D-PL-18746-01-00

Flüssigkeitsaufnahme/Abwitterung/Innere Schädigung

1963/ TU Kaiserslautern		Betonnr:	3		Herst.	24.09.20		Prüfbericht-Nr:	20/99/0856	
Verfahren	CF/CIF		Prüflös.	entionisiertes Wasser						
Vorlagerung ab	26.10.20		32 Tage							
FTW Prüfung ab	02.11.20		39 Tage							
Gesamtprüfffläche			1009 cm ²							
	Probe 1	Probe 1	Probe 2	Probe 2	Probe 3	Probe 3	Probe 4	Probe 4	Probe 5	Probe 5
	p	s	p	s	p	s	p	s	p	s
v_n in mm	145,3	138	148,6	138,1	147,4	137,4	145,6	137,6	146,1	137,5
v_c in mm	14,7	22	11,4	21,9	12,6	22,6	14,4	22,4	13,9	22,5
t_c in ms	9,9	14,8	7,7	14,7	8,5	15,2	9,7	15,0	9,3	15,1

Anzahl FTW	rel. Durchschallungsgeschwindigkeit t_n									
	Probe 1 p	Probe 1 s	Probe 2 p	Probe 2 s	Probe 3 p	Probe 3 s	Probe 4 p	Probe 4 s	Probe 5 p	Probe 5 s
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,98	0,99	1,00	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98
8	0,98	0,96	1,00	0,96	0,98	0,95	0,99	0,93	0,97	0,94
14	0,96	0,92	0,97	0,94	0,95	0,92	0,96	0,89	0,92	0,90
18	0,93	0,90	0,95	0,92	0,90	0,87	0,93	0,86	0,87	0,86
22	0,89	0,86	0,93	0,90	0,86	0,84	0,90	0,84	0,83	0,83
28	0,84	0,81	0,91	0,87	0,82	0,80	0,85	0,78	0,79	0,80

Anzahl FTW	relativer dynamischer E-Modul $R_{u,n}$ nach n Frost-Tau-Wechsel										Mittelwert	Stand. abw.	
	Probe 1 p	Probe 1 s	Probe 2 p	Probe 2 s	Probe 3 p	Probe 3 s	Probe 4 p	Probe 4 s	Probe 5 p	Probe 5 s			
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
4	0,97	0,98	1,00	0,96	0,99	0,98	0,97	0,96	0,97	0,96	0,97	0,96	0,01
8	0,95	0,93	0,99	0,92	0,96	0,91	0,97	0,87	0,95	0,88	0,93	0,88	0,04
14	0,92	0,85	0,94	0,87	0,89	0,84	0,93	0,80	0,84	0,80	0,87	0,80	0,05
18	0,87	0,80	0,91	0,85	0,81	0,76	0,87	0,74	0,76	0,74	0,81	0,76	0,06
22	0,80	0,75	0,87	0,82	0,74	0,70	0,80	0,71	0,70	0,68	0,76	0,68	0,06
28	0,70	0,66	0,83	0,76	0,67	0,64	0,72	0,61	0,63	0,64	0,69	0,64	0,07



SCHWENK Technologiezentrum
GmbH & Co. KG
Ständige Betonprüfstelle ZL Nord
Altenburger Chaussee 3
06406 Bernburg



SCHWENK TECHNOLOGIEZENTRUM

SCHWENK Technologiezentrum GmbH & Co. KG, Altenburger Chaussee 3, 06406 Bernburg, Tel.: (03 471) 358 542, E-Mail: info.technologiezentrum@schwenk.de

Jede Veröffentlichung – auch in Kürzung oder Auszug – bedarf der vorherigen Zustimmung der Schwenk Technologiezentrum GmbH & Co. KG. Die Ergebnisse in diesem Bericht beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Proben bzw. Prüfgegenstände. Die Daten zur Messunsicherheit liegen in der Prüfzettel vor. Die Proben bzw. Prüfgegenstände sind verbraucht.

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.



Fotodokumentation

1963/ TU Kaiserslautern	Betonnr:	3	Herst.	24.09.2020	Prüfbericht-Nr:	20/99/0856
-------------------------	----------	---	--------	------------	-----------------	------------



Probe 1	
Probe 2	Probe 3
Probe 4	Probe 5