

Diplomarbeit

Einfluss der Behandlung von polymerbasierten Reagenzien auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von rezyklierter Gesteinskörnung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Influence of polymer immersion on the mechanical properties of recycled concrete aggregate

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Azra Kuloglija, BSc.

Matr.Nr.: 12044802

Betreuung: Prof. doc. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Ildiko Merta**
Dipl.-Ing. **Bayram Tutkun**
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Bauphysik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2024





Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

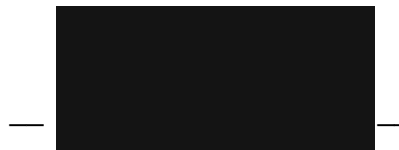
Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im November 2024





Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

*Das Projekt UP!crete wird von der Österreichischen
Forschungsförderungsgesellschaft im Instrument „Collective Research“ des FFG
Basisprogramms gefördert.*



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Frau Prof. Ilidiko für ihre Unterstützung und ihre wertvollen Anregungen bei der Erstellung dieser Diplomarbeit bedanken. Ihre fachliche Expertise und ihr konstruktives Feedback haben wesentlich zur Qualität dieser Arbeit beigetragen. Mein Dank gilt auch Bayram und Farshad für ihre Unterstützung während des experimentellen Teils. Ein großes Dankeschön geht auch an Daniella, die mir während des Verfassens, insbesondere in den chemischen Teilen dieser Diplomarbeit, wertvolle Hilfe geleistet hat.

Ganz besonders danke ich meinen Eltern, meinen Tanten und Suada für ihre Liebe, ihr Verständnis und all die Lektionen, die mich gelehrt haben, durchzuhalten und an mich selbst zu glauben. Ihre Unterstützung war in jeder Phase meiner akademischen Laufbahn von unschätzbarem Wert.

Mein besonderer Dank gilt meinen besten Freundinnen, die mir immer zur Seite standen, mich an den Wert der Freundschaft erinnerten, mich in schwierigen Zeiten unterstützten und die Freude über jeden Erfolg mit mir teilten.

Und zu guter Letzt - aber nicht weniger wichtig - bin ich meinem Freund Amer unendlich dankbar. Vom ersten Tag meines Studiums an der TU Wien an war er meine größte Unterstützung. Seine Liebe, sein Verständnis und seine grenzenlose Geduld waren in den schwierigsten Momenten unentbehrlich und dafür werde ich ihm immer dankbar sein.

Kurzfassung

Die zunehmenden Mengen an Bau- und Abbruchabfällen, die beim Sanieren und Rückbau bestehender Konstruktionen entstehen, belasten sowohl die Wirtschaft als auch das Klima erheblich. Obwohl das Interesse an einer nachhaltigen Bauindustrie wächst und durch die Förderung der Kreislaufwirtschaft sowie nationale Vorschriften unterstützt wird, ist die Ressourcennutzung derzeit nicht optimal. Rezyklierte Gesteinskörnungen werden oft nicht im geschlossenen Kreislauf gehalten, sondern für andere, minderwertige Zwecke eingesetzt, was das Potenzial zur Wiederverwendung im Hochbau einschränkt.

Diese Diplomarbeit untersucht den Einfluss der Behandlung von polymerbasierten Reagenzien auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von rezyklierter Gesteinskörnung, die aus Bau- und Abbruchabfällen gewonnen wurde. Im Fokus stehen die Auswirkungen dieser Behandlungen auf wesentliche Eigenschaften, die die Langlebigkeit und Qualität der Gesteinskörnung bei der Weiterverwendung bestimmen.

Im Rahmen der experimentellen Arbeiten wurden verschiedene Reagenzien, darunter Polyvinylalkohol, Silane und Siloxane, für die Behandlung von rezyklierter Gesteinskörnung verwendet. Es wurde analysiert, wie die Art der verwendeten Reagenzien und die Dauer der Behandlung die Wasseraufnahme sowie die Festigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung beeinflussen.

Die Untersuchung von der Festigkeit wurde durchgeführt, um die Widerstandsfähigkeit der Gesteinskörnung gegen Zerkleinerung unter allmählich aufgebrachten Druckbelastungen zu bestimmen. Um die Porosität und Permeabilität zu messen, wurden die Wasseraufnahmetests durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigten signifikante Veränderungen der untersuchten Parameter. Die Festigkeit wurde bis zum 20% erhöht. Bei der Untersuchung der Wasseraufnahme war die Behandlung auch sehr wirksam, wobei eine Reduktion bis zum 36% erreicht wurde.

Diese Studie hebt das Potenzial polymerbasierter Behandlungen zur Verbesserung der Qualität von rezyklierter Gesteinskörnung hervor und fördert deren weiteren Einsatz.

Abstract

The increasing volume of construction and demolition waste generated during the renovation and deconstruction of existing structures poses significant challenges to both the economy and the climate. Although interest in a sustainable construction industry is growing, supported by the promotion of a circular economy and national regulations, resource utilization remains suboptimal. Recycled aggregates are often not retained within a closed-loop system but are instead used for other, lower-value purposes, limiting their potential for reuse in high-quality construction.

This thesis investigates the impact of polymer-based reagent treatments on the mechanical and physical properties of recycled aggregates derived from construction and demolition waste. The focus is on how these treatments influence key properties that determine the durability and quality of aggregates for reuse.

Experimental work involved treating recycled aggregates with various reagents, including polyvinyl alcohol, silanes and siloxanes. This study investigated the effect of reagent type and treatment duration on the water absorption and strength of recycled aggregates.

The strength tests aimed to determine the resistance of the aggregates to crushing under gradually applied compressive loads. Water absorption tests were carried out to measure porosity and permeability.

The results showed significant changes in the parameters examined. Strength was improved by up to 20%, while water absorption was effectively reduced by up to 36%.

This study highlights the potential of polymer-based treatments to enhance the quality of recycled aggregates, promoting their broader application in construction.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemein zum Thema „Recyclingbeton“	1
1.1.1	Bau- und Abbruchabfälle.....	1
1.2	EU und Nicht- EU Best Practices: Anwendungsbeispiele.....	6
1.3	Motivation zur Verwendung des Recyclingbetons	9
1.4	Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung	10
1.5	Einfluss der Behandlung von rezyklierter Gesteinskörnung auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Recyclingbeton	12
2	Polymerreagenzien	15
2.1	Verwendung von polymerbasierten Reagenzien zur Verbesserung der Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnung.....	15
2.2	Wirkungsmechanismus von Polymerbeschichtung.....	15
2.2.1	Polyvinylalkohol (PVA).....	17
2.2.2	Siliziumbasierte Polymere.....	18
2.3	Stand der Wissenschaft.....	19
3	Ziel der Arbeit.....	22
4	Experimentelle Untersuchung	23
4.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung	23
4.2	Materialien	24
4.2.1	Prüfkörper	24
4.2.2	Verwendete Polymerreagenzien	24
4.3	Die Behandlung der rezyklierten Gesteinskörnung mit Polymeremulsion ...	25
4.4	Ermittlung der Festigkeit.....	27
4.4.1	Probepvorbereitung und Versuchsdurchführung.....	27
4.5	Ermittlung der Wasseraufnahme	30
4.5.1	Probepvorbereitung und Versuchsdurchführung.....	31
5	Ergebnisse und Diskussion.....	34
5.1	Wasseraufnahme	34
5.2	Festigkeit	37
6	Schlussfolgerung.....	40
7	Anhang.....	43

7.1	Referenzwerte	43
7.1.1	Rohdichte und Wasseraufnahme	43
7.1.2	Crushing Value	43
7.2	Polyvinylalcohol	43
7.2.1	Rohdichte und Wasseraufnahme	43
7.2.2	Crushing Value	43
7.3	Silane	44
7.3.1	Rohdichte und Wasseraufnahme	44
7.3.2	Crushing Value	44
7.4	Siloxane	44
7.4.1	Rohdichte und Wasseraufnahme	44
7.4.2	Crushing Value	44
8	Literaturverzeichnis	46
9	Abbildungsverzeichnis	50
10	Formelverzeichnis	52
11	Tabellenverzeichnis	53

Abkürzungsverzeichnis

CDW	Construction and Demolition Waste
RG	Rezyklierte Gesteinskörnung
NG	Natürliche Gesteinskörnung
RB	Recyclingbeton
ITZ	Interfacial Transition Zone
TSMA	Two-Stage Mixing Approach
h	Stunde
PVA	Polyvinylalkohol
C-S-H	Calciumsilikathydrate

1 Einleitung

1.1 Allgemein zum Thema „Recyclingbeton“

1.1.1 Bau- und Abbruchabfälle

Mit dem kontinuierlichen Anstieg der Bevölkerung steigt gleichzeitig der Bedarf an Bau und Entwicklung in der Bauindustrie. Bei der Planung künftiger Bauprojekte steht die Langlebigkeit der Konstruktion im Vordergrund, was bedeutet, dass ihre Nutzbarkeit und Funktionalität über einen längeren Zeitraum gewährleistet sein sollten. Allerdings lässt sich dies leider nicht immer sicherstellen. Zu einem bestimmten Zeitpunkt, wird es aus verschiedenen konstruktiven oder funktionalen Gründen notwendig, Sanierungsmaßnahmen am Objekt durchzuführen, um seine strukturelle Integrität und Funktionalität zu erhalten. In einigen Fällen, wenn die Sanierung nicht machbar oder wirtschaftlich vertretbar ist, wird die Entscheidung getroffen, das Objekt abzureißen. Durch diese Bau- und Abbruchtätigkeiten der bestehenden Hoch- oder Tiefbaubjekten entsteht eine enorme Menge an Abfall, die zwar unvermeidbar sind, doch weiter behandelt und wiederverwendet werden kann.

Die zunehmende Intensivierung der Bautätigkeiten führt gleichzeitig zu einem Anstieg der Menge an anfallenden Bauabfällen, was die Notwendigkeit unterstreicht, nachhaltige Strategien zur Wiederverwertung und Kreislaufwirtschaft zu entwickeln, um die Deponierung zu minimieren oder idealerweise vollständig zu vermeiden. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind Maßnahmen erforderlich, die sowohl die Abfallmenge verringern als auch die effiziente Nutzung von Ressourcen durch Kreislaufwirtschaft fördern. In der Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) der Europäischen Kommission werden die Grundsätze der Abfallwirtschaft in einer Hierarchie nach der Priorität angeordnet [1]. Hier steht die Abfallvermeidung an erster Stelle der Abfallhierarchie. Durch die Prioritätensetzung in der Handhabung von Abfällen, wie in Abb. 1 zu sehen ist, soll in erster Linie die Menge des erzeugten Abfalls reduziert werden, was wiederum den Einsatz natürlicher Ressourcen verringert. Dadurch wird die Kreislaufwirtschaft gefördert, indem die Kreislaufführung und Wiederverwendbarkeit von Abfallprodukten erhöht wird.

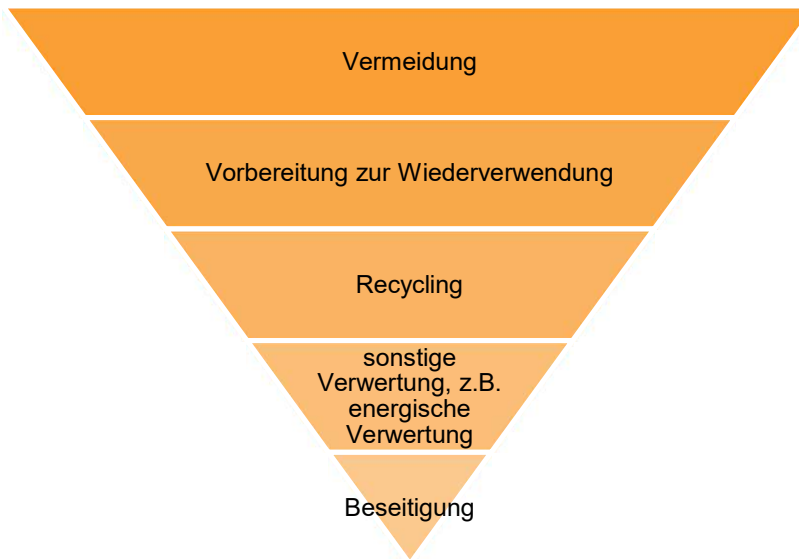


Abb. 1 Die Abfallhierarchie gemäß der Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) – Prioritätenreihenfolge von Abfallvermeidung bis zur Entsorgung [1]

Weltweit machen die Mengen an Abfall aus Bau- und Abbrucharbeiten einen bedeutenden Anteil am Gesamtabfall aus, wobei in der Europäischen Union im Jahr 2020 der Anteil des Bau- und Abbruchabfalls sogar beachtliche 37,5% des Gesamtabfalls ausmachte [2]. Die Abb. 2 zeigt deutlich, dass in der Europäischen Union sowie in Österreich Bau- und Abbruchabfälle im Vergleich zu anderen Abfallarten überwiegen.

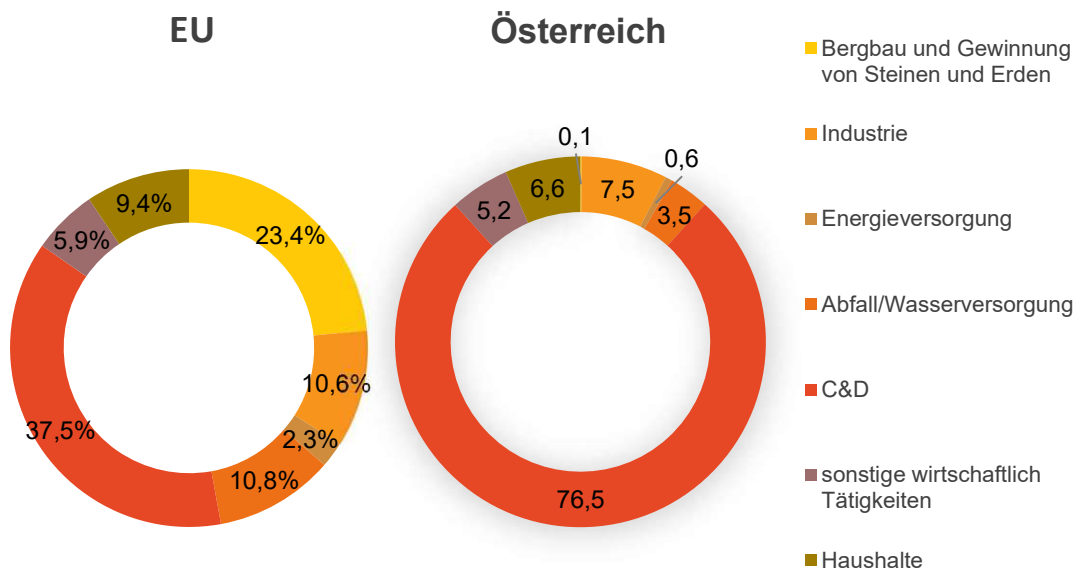


Abb. 2 Übersicht der verschiedenen Abfallarten in EU und Österreich im Jahr 2020 (%) [2]

Der anfallende Bau- und Abbruchabfall wird entsprechend seiner Zusammensetzung, Herkunft und Kontaminationen in bestimmte Gruppen kategorisiert werden.

Grundsätzlich erfolgt die Aufteilung der gesammelten Bau- und Abbruchabfälle in Österreich in die folgenden Hauptkategorien:

- Aushubmaterialien,
- mineralische Abfälle,
- sonstige nicht gefährliche
- und gefährliche Abfälle.

In der folgenden Abb. 4 kann ein detaillierterer Eindruck von der Aufteilung dieses Abfalls sowie seiner Zugehörigkeit zu bestimmten Kategorien gewonnen werden.

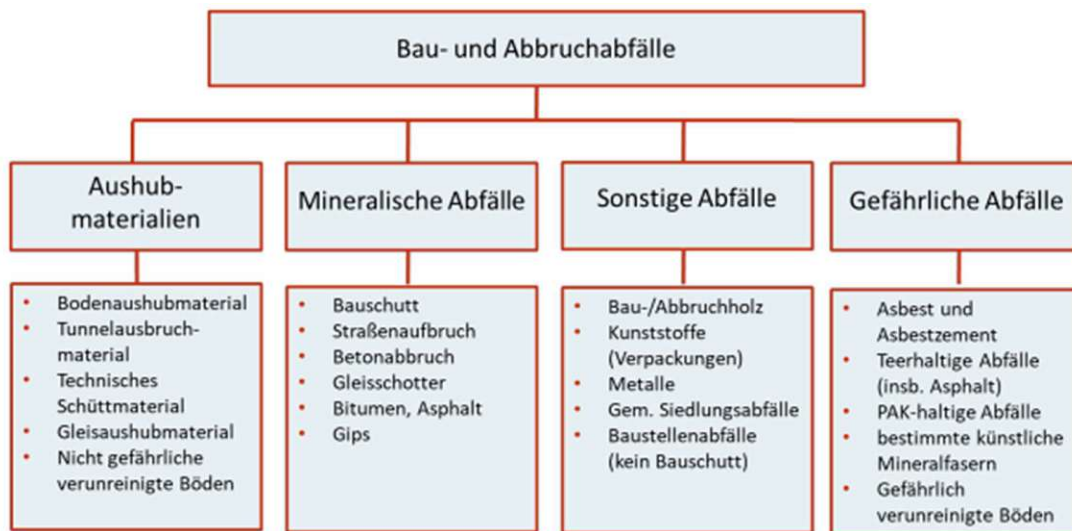


Abb. 3 Zusammensetzung der Bau- und Abbruchabfällen [3]

Die Abb. 3 veranschaulicht die Vielfalt und Komplexität von Bau- und Abbruchabfällen, indem sie diese in verschiedene Kategorien einteilt und ihre spezifischen Bestandteile auflistet. Sie zeigt, dass diese Abfälle nicht homogen sind, sondern dass sie in verschiedene Gruppen eingeteilt werden müssen, um eine mögliche Wiederverwertung zu gewährleisten. Einige Abfallarten, wie z.B. Aushubmaterialien oder mineralische Abfälle, sind relativ harmlos und können häufig problemlos behandelt und wiederverwendet werden. Andere hingegen, wie z.B. gefährliche Abfälle, erfordern eine spezielle Behandlung, um potenzielle Umweltschäden zu vermeiden. Diese Kategorisierung ist in der österreichischen Abfallwirtschaftsstatistik von großer Bedeutung, da sie hilft, die Abfallströme und die Menge des eingegangenen Bauabfalls genau zu dokumentieren.

Das Aufkommen der mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in Österreich stieg zwischen 2015 (ca. 10 Mio. Tonnen) und 2021 (ca. 12,5 Mio. Tonnen), um 25% an. Dieser Anstieg wäre vermutlich noch höher ausgefallen, wenn die Bauaktivitäten im Jahr 2020 nicht durch die COVID-19-Pandemie eingeschränkt worden wären, was zu einem vorübergehenden Rückgang der Bau- und Abbruchabfälle führte [3].

Insgesamt zeigt sich jedoch ein klarer Trend eines kontinuierlichen Anstiegs über den Zeitraum von 2017 bis 2021.

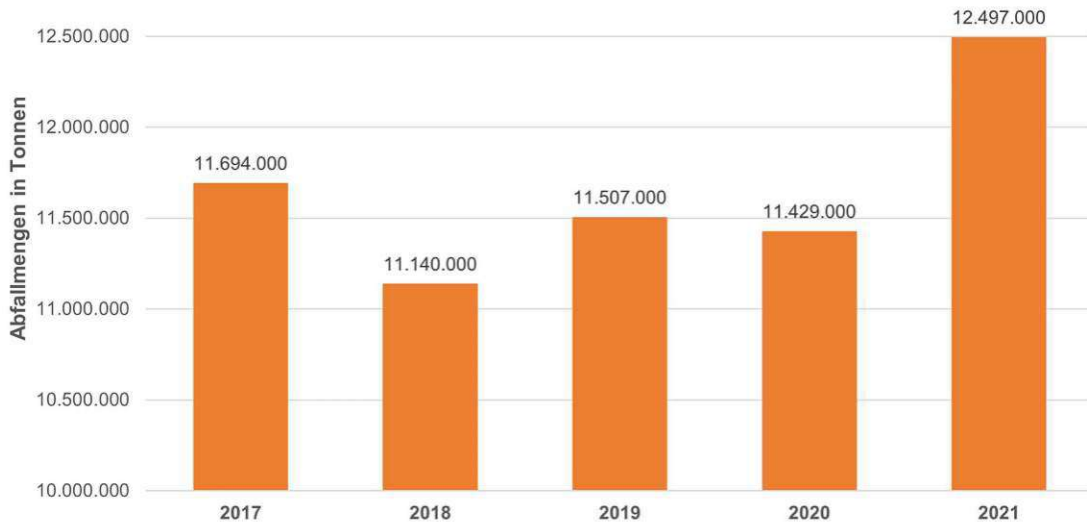


Abb. 4 Trends im Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen in den Jahren 2017 bis 2021 [3]

Im Jahr 2021 entfielen 4,2 Millionen Tonnen, der größte Teil, auf „Betonabbruch“ von insgesamt 12,5 Millionen Tonnen mineralischen Bau- und Abbruchabfällen.

Darunter zählen armierte, nicht armierte, hydraulisch gebundene und feste mineralische Stoffe. Die Übersicht der eingegangenen Abfallmengen der einzelnen Kategorien und deren Vergleich kann der Abb. 5 entnommen werden. Wie die Abb. 5 zeigt, dominiert Beton als meist verwendetes Baumaterial, daher sind auch die Unterschiede in der Menge dieses Abfalls im Vergleich zu anderen Kategorien enorm [4].

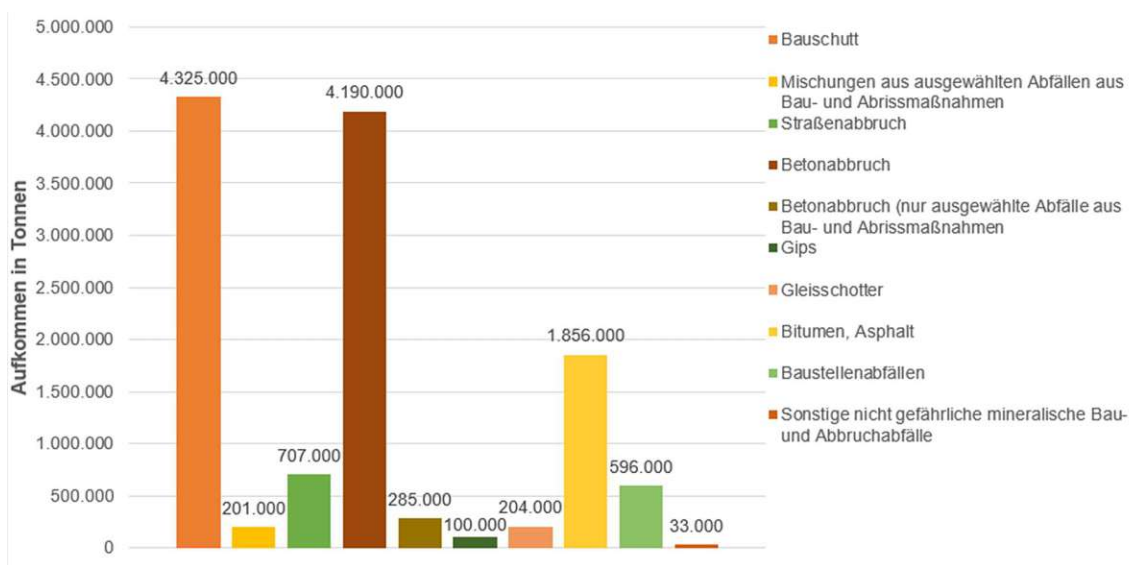


Abb. 5 Aufkommen der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle In Österreich in Jahr 2019 [3]

Von den eingegangenen Betonabbruch wurden 79 % dieses Abfalls, bzw. 3,3 Mio. Tonnen, in Behandlungsanlagen gebracht, was auf das große Potenzial dieses Abfalls für das Recycling hinweist [5]. In diesen großen Mengen an Betonabbruch, die ansonsten auf Deponien landen würden, befinden sich potenzielle rezyklierte Gesteinskörnung (RG), die eine geringere Qualität aufweisen als natürliche Gesteinskörnung (NG). Die Wiederverwendbarkeit dieser RG und ihre Anwendung hängen stark von ihren mechanischen und physikalischen Eigenschaften ab. Die aus einem Betonabbruch gewonnenen rezyklierten Gesteinskörnungen können je nach den geforderten Eigenschaften und normativen Vorgaben in folgenden Formen wiederverwendet werden [5]:

- Zuschlagstoffe für die Betonherstellung,
- Tragschichten im Straßenbau,
- landwirtschaftlicher Wegebau,
- Unterbau von Hallenböden im Hochbau, Untergrundverbesserung,
- Schüttmaterial,
- Künettenfüllmaterial,
- Drainageschichten.

Die Recycling-Regelungen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle waren in Österreich früher weniger entwickelt als heute. In den vergangenen Jahren haben sich jedoch mehrere normative und legislative Entwicklungen ergeben, die die Rezyklierung dieser Abfälle fördern. Dazu zählt unter anderem die Einführung der Abfallrahmenrichtlinie der EU, welche Anforderungen an die Wiederverwendung und das Recycling von Bauabfällen festlegt, sowie nationale Regelungen, die spezifische Standards für die Qualität und Verwendung von RG definieren. Darüber hinaus wurden Maßnahmen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Reduzierung von Deponiemengen ergriffen. Insbesondere nach Inkrafttreten der Recycling-Baustoffverordnung wurden große Fortschritte in diesem Bereich erzielt, und in den letzten Jahren konnten hohe Recyclingquoten für mineralische Bau- und Abbruchabfälle erreicht werden [5]. Dieser Erfolg basiert auf einem gut ausgebauten Infrastrukturnetz mit mobilen und stationären Anlagen zur Aufbereitung und Behandlung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen in ganz Österreich. Diese dichte Infrastruktur umfasst insgesamt 165 stationäre und 776 mobile Betriebe. Die stationären Anlagen befinden sich an genau festgelegten Standorten, während sich die mobilen Anlagen an einem Ort weniger als sechs Monate aufhalten. Mobile Anlagen stellen temporäre Lösungen direkt vor Ort auf Baustellen dar und ermöglichen die Durchführung der erforderlichen Behandlungs- und Aufbereitungsarbeiten [5].

1.2 EU und Nicht- EU Best Practices: Anwendungsbeispiele

Obwohl die Wiederverwertung von Baumaterialien in Bauprojekten bereits seit mindestens 1940 in Verwendung ist, basierte diese Praxis in der Vergangenheit oftmals nicht auf einer bewussten Entscheidung für mehr Nachhaltigkeit, sondern war vielmehr eine Folge der Notwendigkeiten des Krieges [6]. Erst gegen Ende des 20. Jahrhunderts, zu Beginn der verstärkten Fokussierung auf Umwelt- und Ressourcenschutz in der Industrie, entwickelte sich ein echtes Interesse an einem systematischen Recycling von Bauabfällen. In den 1980er Jahren begannen die Industrieländer Initiativen zur Minimierung und Wiederverwertung von Bau- und Abbruchabfällen, wobei Deutschland 1984 die Bundesgütegemeinschaft Recycling-Baustoffe gründete, die 2006 zur Europäischen Qualitätsgemeinschaft Recycling wurde und die großen Recyclingunternehmen in der EU vereint [7].

Danach wuchs das Interesse an einem besseren Management von Bau- und Abbruchabfällen, was zu Investitionen in Forschungsvorhaben und der Entwicklung normativer Vorschriften führte, die das Recycling fördern sollten. Diese Initiativen beinhalten die Entwicklung neuer Technologien, die Optimierung bestehender Abfallbehandlungsverfahren und die Förderung der Zusammenarbeit zwischen Regierung, Industrie und Wissenschaft, um nachhaltige Lösungen für das Abfallmanagement zu schaffen.

Die Möglichkeit der Verwendung von rezykliertem Baumaterial in der Bauindustrie variiert stark von Land zu Land, abhängig von der Menge an Abfall, die dort produziert wird, und des Potenzials zum Recycling und zur Wiederverwendung. Neben der Marktnachfrage spielen die gesetzlichen Vorschriften für das Recycling und die Deponierung von Bau- und Abbruchabfällen auf nationaler Ebene eine wichtige Rolle. Beispielsweise hat die Europäische Kommission durch die Abfallrichtlinie das Ziel festgelegt, bis zum Jahr 2020 einen Recyclinganteil von mindestens 70% zu erreichen, was in bestimmten Ländern bereits erfüllt wurde, während es in anderen noch ein weit entferntes Ziel war [8]. Ein Einblick in die im Jahr 2020 in europäischen Ländern hergestellten RG-Mengen ist in Abb. 7 ersichtlich. Die größten Mengen an RG in Europa wurden im Jahr 2019 in Deutschland, Frankreich und Großbritannien produziert [9]. Diese drei Länder stellen den Großteil der RG-Produktion in Europa her und gelten als führend in der Förderung von Recyclingtechnologien sowie der Integration von rezyklierten Gesteinskörnungen in die Bauindustrie. Länder wie Österreich, Spanien und die Schweiz haben dagegen deutlich geringere Produktionsmengen, was möglicherweise auf begrenzte Recyclingkapazitäten, eine geringere Nachfrage nach Recyclingmaterialien oder weniger Anreize zur Verwendung von recyceltem Baumaterial zurückzuführen ist.

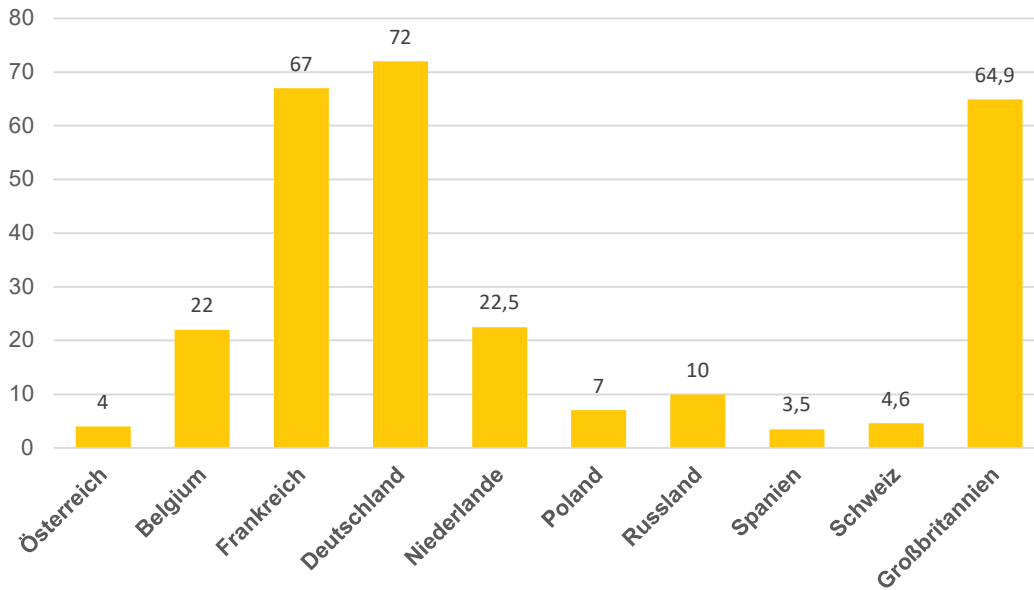


Abb. 6 Produktion von RG in europäischen Ländern im Jahr 2019 (in Millionen Tonnen) [9]

Eine realistischere Einschätzung der Entwicklung eines Landes in diesem Bereich bietet Abb. 8, die das Verhältnis von rezyklierter zu natürlicher Gesteinskörnung zeigt. In diesem Zusammenhang haben Belgien und die Niederlande im Vergleich zu anderen europäischen Ländern eine außergewöhnlich hohe Produktion von RG. In den Niederlanden liegt dies daran, dass die Deponierung von recycelbaren Bau- und Abbruchabfällen verboten ist. Darüber hinaus sind die natürlichen Ressourcen an Gesteinskörnung in den Niederlanden, sowie im benachbarten Belgien und Luxemburg, sehr knapp [10].

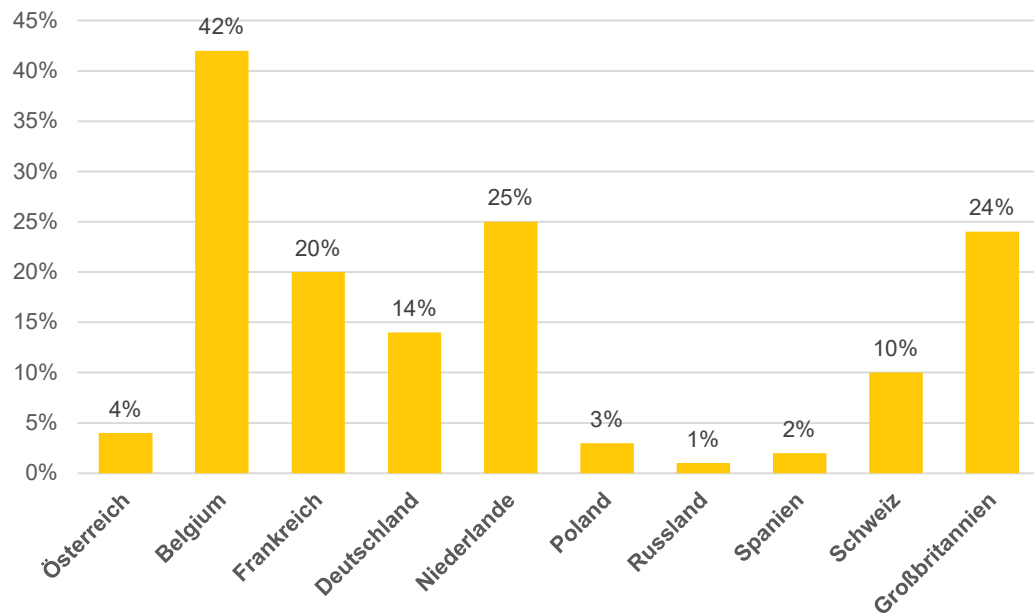


Abb. 7 Anteil der Produktion von RG im Vergleich zu NA [9]

Abgesehen von der herkömmlichen Verwendung von rezyklierten Betonabbruch für Straßenbau oder das Auffüllen von Gruben gibt es bereits global verschiedene Beispiele, bei denen RB in Hochbauprojekten Verwendung findet. Die Kombination von Technologie und Wissenschaft, zusammen mit Vorschriften, ermöglicht den Bau von Hochbauobjekten unter Verwendung von recyceltem Beton mit den erforderlichen hohen Qualitätsklassen.

Bisher wurden bereits viele Gebäude mit solchem Beton errichtet, aber diese Objekte können immer noch als Pilotprojekte bezeichnet werden, da Recyclingbeton und die daraus hergestellten Konstruktionen im Wesentlichen weiterhin erforscht werden. Unternehmen und Investoren, die sich bereits dafür entschieden haben, auf diese Weise zur Kreislaufwirtschaft beizutragen und die Abfallerzeugung zu reduzieren, können als "Know-how"-Beispiele für andere Unternehmen dienen. In Tabelle 1 sind Hochbauprojekte mit einem hohen Anteil an Recyclingbeton aufgeführt:

Tabelle 1 Anwendungsbeispiele von RB

Ort	Objekt	Anwendung	Quelle
Zürich, Switzerland	Kunsthaus Zürich	Gebaut mit 98% RB	[11]
Paris, Frankreich	Housing complex von Holcim	Weltweit erstes Gebäude, das vollständig aus RB gebaut wurde	[12]
Copenhagen, Denmark	Upcycle Studios	wurden 1400 Tonnen des RBs verwendet	[13]
Oslo, Norway	New Munch Museum		[14]
Mainz, Deutschland	Umweltbildung s-zentrum Mainz	650m ³ RB der Güte C25/30 eingebaut	[15]
Wien, Österreich	Personal- unterkunft	ca. 1.500m ³ RB	[16]

Die Technologie der Verwendung von RB hat in bestimmten Ländern erhebliche Fortschritte gemacht, in denen bereits beeindruckende Bauwerke in Kombination mit Nachhaltigkeit und Architektur entstanden sind. Auf der anderen Seite wird in Ländern, in denen RA nicht in Hochbauobjekten verwendet wird, wird dieser in erheblichem Umfang für andere Zwecke eingesetzt.

1.3 Motivation zur Verwendung des Recyclingbetons

Aus den großen Mengen an Betonabbruch können durch einen festgelegten Aufbereitungsprozess erhebliche Mengen an RG gewonnen werden. Diese RG kann dann anstelle eines Teils des gesamten NG im Beton wiederverwendet werden. Durch diese Wiederverwendung wird nicht nur der Einsatz von Primärressourcen reduziert, sondern auch die Nachhaltigkeit im Bauwesen gefördert [17].

Mit dem rapiden Wachstum der Bauindustrie sind auch unerwünschte Auswirkungen auf die Umwelt und das Klima aufgetreten. Diesem können hohe CO₂-Emissionen zugeschrieben werden, die ein Drittel der Gesamtemissionen weltweit ausmacht [18]. Durch die Herstellung und Verwendung der RG anstelle von NG im Beton, kann eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 23% bis 28% verringert werden [19]. Die Emission dieser schädlichen Stoffe wird hauptsächlich durch den Transport von NG verursacht, da die Entfernungen von den Orten, an denen die NG gewonnen werden, groß sind. Zusätzlich trägt die Substitution von NG durch RG zur Schonung wertvoller, nicht erneuerbarer Rohstoffe bei, die sonst für die Betonherstellung verwendet würden. Da diese natürlichen Ressourcen begrenzt sind, ist ihre effiziente Nutzung entscheidend für den langfristigen Umweltschutz und eine nachhaltige Bauweise.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Entsorgung von Bau- und Abbruchabfällen. Wenn dieser Abfall nicht rezykliert wird, landen sie in großen Mengen auf Deponien. Dies verschärft das Problem der begrenzten Deponiekapazitäten und erfordert zunehmend neue Flächen für die Entsorgung dieses Abfalls, was zusätzliche Umweltbelastungen mit sich bringt [20].

Darüber hinaus stellt die Nutzung von RG eine der bedeutenderen Lösungen für diese Probleme dar und trägt zur Nachhaltigkeit der Bauindustrie bei. Durch die Verwendung von RG bei der Herstellung von Recyclingbeton (RB) wird das Konzept der Kreislaufwirtschaft gestärkt, indem gebrauchte Materialien wiederverwendet und in neue Bauprojekte integriert werden.

1.4 Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung

Es existiert eine deutliche Differenz zwischen rezyklierten Gesteinskörnungen und natürlichen, sowohl in ihrer Zusammensetzung als auch in ihren mechanischen Eigenschaften. Die natürliche Gesteinskörnung ist in der Betonmatrix gänzlich von Zementstein umgeben, welcher später während des Aufbereitungsprozesses nicht restlos entfernt werden kann. Die RG besteht aus drei Hauptkomponenten: den ursprünglichen natürlichen Gesteinskörnungen, dem anhaftenden Zementstein und der Interfacial Transition Zone (ITZ). Diese ITZ gilt als die schwächste Zone in der RG und kann deren Eigenschaften erheblich beeinflussen [21]. Der Grund dafür ist die verminderte Steifigkeit und Festigkeit der ITZ aufgrund des Vorhandenseins von Poren, Hohlräumen und Mikrorissen [22]. In der RG gibt es zahlreiche ITZs, wobei die ursprüngliche ITZ zwischen der NG und dem anhaftenden Zementstein liegt. Aufgrund der erneuten Ummantelung der RG mit Zementstein entstehen für jede Gesteinskörnung in RB mindestens noch eine ITZ [23]. Der anhaftende Zementstein führt zu der erhöhten Porosität der RG, was sich sowohl auf die höheren Wasseraufnahme als auch auf die Rohdichte auswirkt [24].

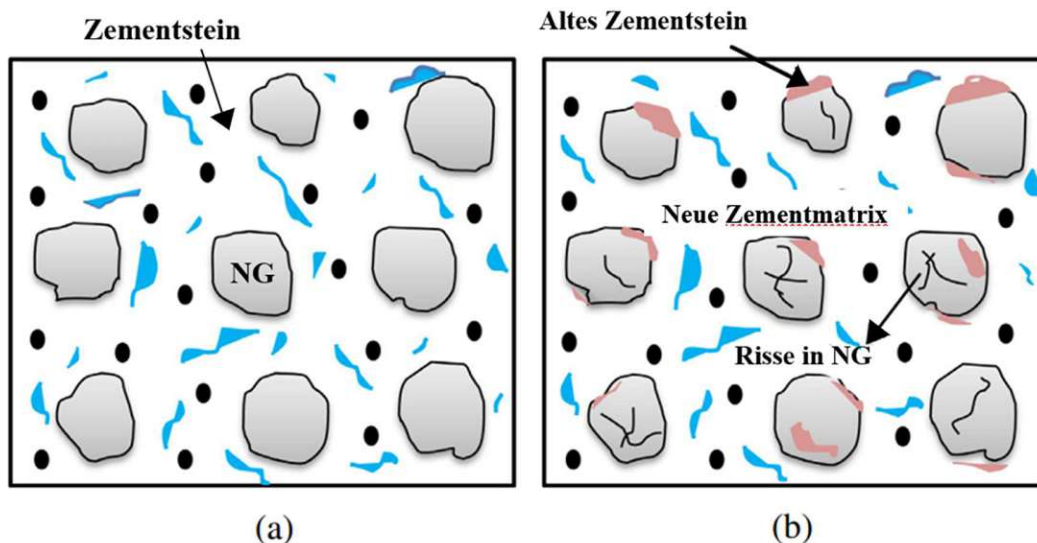


Abb. 8 Unterschied zwischen den Matrizen von (a) Beton mit natürlicher Gesteinskörnung und (b) Beton mit rezyklierten Gesteinskörnung [25]

Aufgrund der hohen Wasseraufnahme der RG steht weniger Wasser für die Hydratation der Zementpartikel bei der Herstellung der neuen Betonmischung zur Verfügung [20]. Die Eigenschaften der ITZ werden durch die Qualität des anhaftenden Zementsteins, wobei Xiao et al. (2018) eine Korrelation zwischen der Festigkeit des ursprünglichen Betons und der Porosität der ITZ festgestellt haben – bei höheren Betonfestigkeiten ist die ITZ weniger porös [15]. Ein weiterer Faktor, der vom anhaftenden Mörtel beeinflusst wird, ist die Festigkeit von RG, die höher ist als bei NA [19]. Der Grund dafür liegt in der Porosität des anhaftenden Zementsteins, die zu

inneren Spannungen führen und die Struktur der RG schwächen kann, was eine leichtere Zerkleinerung begünstigt [26].

Aus dem geht hervor, dass der anhaftende Zementstein und die Eigenschaften der ITZ einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von RG haben. Schließlich spiegelt sich dies in schlechteren Eigenschaften von RG wieder, der sich durch geringere Druckfestigkeit und Steifigkeit auszeichnet [27]. Rezyklierte Gesteinskörnung, die tatsächlich eine minderwertige Qualität aufweist, kann die Druckfestigkeit von ausgehärtetem Beton um 10-25% reduzieren [28].

Die Dauerhaftigkeit von RG wird durch die Sulfatbeständigkeit und den Chloridgehalt beeinflusst. Der Chloridgehalt liegt in den meisten Fällen innerhalb der zulässigen Grenzen, jedoch wird im Gegenteil empfohlen, den Gehalt an übermäßigen Chloriden auf bestimmte Weise zu regulieren, um Korrosion der Bewehrung zu vermeiden [29].

Aufgrund signifikanter Unterschiede in den Eigenschaften der RG im Vergleich zu NG ist bei seiner Wiederverwendung erforderlich, dass je nach Anwendungsbereich bestimmte Anforderungen erfüllt werden. Die Verwendung von RG, bzw. RB ist in der Regel durch nationale Normen geregelt, die festlegen, unter welchen Bedingungen und in welchem Umfang sie verwendet werden dürfen. Auf EU- Ebene sind diese durch die EN 206:2017 „Beton- Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“ normativ geregelt, bzw. in Österreich durch die nationale Ausgabe ÖNORM B 4710-1:2018, Anhang E und ÖNORM B 3140:2020 [30], [31], [32]. Zudem regelt die BRV-Richtlinie die Anforderungen und Eigenschaften von Produkten, die aus Baurestmassen für die Wiederverwendung oder Verwertung gewonnen werden. Durch Güte- und Qualitätsbestimmungen wird die Art und der Umfang der Prüfungen für rezyklierte Baustoffe festgelegt [33].

In der ÖNORM B 3140:2020 werden 4 Kategorien von RG je nach ihrer Zusammensetzung unterschieden:

- RB-A1 - sortenreiner Betonbruch
- RB-A2 - Betonbruch
- RG-A3 - wiederaufbereitete, natürliche Gesteinskörnungen
- RH-B - aufbereiteter Hochbausplitt (mindestens 50 % Betonanteile)
- RMH-C - aufbereitete mineralische Hochbaurestmasse.

Die Kategorien RB-A1, RB-A2 und RG-A3 dürfen nicht in Betonmischungen für vorgespannte oder ermüdungsgefährdete Bauteile oder für Beton mit Festigkeitsklassen höher als C40/45 verwendet werden. Zusätzlich darf die Kategorie RH-B nur für Betonmischungen in trockener Umgebung, mit Festigkeitsklassen unterhalb von C30/37 und für Bauteile, die hauptsächlich Druckbelastungen ausgesetzt sind, verwendet werden [34].

1.5 Einfluss der Behandlung von rezyklierter Gesteinskörnung auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Recyclingbeton

Um die Qualität von RG zu verbessern, können die Materialeigenschaften durch physikalische und chemische Behandlungsmethoden verbessert werden, die die ungünstigen mechanischen Eigenschaften der Gesteinskörnung optimieren, die Leistungsfähigkeit in RB beeinflussen und somit die Anwendungsbereiche erweitern. Daran besteht derzeit ein großes Interesse, was zu zahlreichen Studien und experimentellen Untersuchungen geeigneter Methoden führt [23]. Die physikalischen und chemischen Methoden, die sich bisher als wirksam erwiesen haben, um den anhaftenden Zementstein zu entfernen oder zu verbessern, sind in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 2 Methoden zur Verbesserung der Eigenschaften von RG [23]

	Physikalische Methoden	Chemische Methoden
Entfernung des anhaftenden Zementsteins	Mechanische Behandlung	Einweichen in Säure
	Einweichen in Wasser	
Verdichtung des anhaftenden Zementsteins	Polymeremulsion	Behandlung mit puzzolanischen Reagenzien
	Kalksteinpulver oder biogene Ablagerung von Calciumcarbonat	Behandlung mit Natriumsilikaten Karbonatisierung

Die bisher erprobten physikalischen Methoden zur Entfernung des schwach anhaftenden Zementsteins haben sich als effektiv erwiesen, um hochwertiges RG zu erhalten. Zu den bewährten Methoden zählen mechanische Schleifverfahren, selektives Hitze-Schleifen, gewöhnliches Hitze-Schleifen sowie das Einweichen in Wasser. Durch die mechanische Behandlung kann neben der Entfernung des Zementsteins auch eine optimierte Form der RG erreicht werden, indem der Peeling-Off-Effekt das Aspektverhältnis verringert und eine gleichmäßigere Kornform erzielt. Ein Nachteil des mechanischen Schleifens ist jedoch, dass dabei Mikrorisse verursacht werden können, was sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von RG auswirken kann [35].

Beim Einweichen von RG in Säure werden hauptsächlich Salzsäure (HCl), Schwefelsäure (H₂SO₄), Essigsäure (C₂H₄O₂) und Salpetersäure (HNO₃) verwendet, die mit verschiedenen chemischen Bestandteilen im anhaftenden Zementstein chemische Reaktionen eingehen, wodurch die Hydratationsprodukte des Zements zerlegt werden können. Diese Methode wird als effektiv zur Entfernung des anhaftenden Mörtels angesehen, da die Säuren durch die Reaktion die Grenzfläche zwischen Mörtel und Gesteinskörnung schwächen.

Ein negativer Aspekt bei der Anwendung dieser Methode ist jedoch, dass der pH-Wert der Gesteinskörnung negativ beeinflusst wird, was zu einer Abnahme des pH-Wertes führen kann. Dies ist problematisch, da ein niedriger pH-Wert die Alkalität des Betons und damit die Passivierung der Stahlbewehrung verringert. Dadurch steigt die Korrosionsgefahr der Bewehrung, was die Dauerhaftigkeit des Betons verringert. Ein unerwünschter Effekt des Eintauchens in Salzsäure und Schwefelsäure kann die Erhöhung des Chlorid- und Sulfatgehalts im RG sein [12], [23]. Die erhöhte Chlorid- und Sulfatkonzentration im RG kann auch zu schädlichen Reaktionen im Beton führen, wie z. B. Korrosion der Bewehrung oder Sulfatangriff, der zu Rissbildung und Volumenänderungen führt [23], [35].

Die Behandlung von RG mit Polymeremulsionen, darunter Polyvinylalkohol und silikonbasierte Polymere, bewirkt eine gezielte Veränderung der Oberflächenstruktur der RG. Der Wirkungsmechanismus dieser Behandlung basiert auf zwei wesentlichen Prinzipien: Einerseits erfolgt eine Beschichtung der Oberflächen, andererseits eine Verdichtung der oberflächlichen Poren. Die Polymere dringen in die Mikrorisse und Hohlräume des anhaftenden Zementsteins ein und verschließen dabei offene Kapillaren. Dadurch bildet sich eine dünne, schützende Filmschicht auf der Oberfläche der RG. Die Polymere dringen in die Mikrorisse und Hohlräume des anhaftenden Zementsteins ein, verschließen offene Kapillaren und bilden eine dünne, schützende Filmschicht auf der Oberfläche der RG. Dadurch wird die Wasseraufnahme reduziert und gleichzeitig die Porosität der RG verringert. Darüber hinaus wird auch ein positiver Effekt auf den RB erzielt, indem dessen Verarbeitbarkeit und Haltbarkeit verbessert werden [23], [36], [37].

Puzzolanische Materialien wie Silikastaub, Flugasche und Nanosilika haben sich als wirksam bei der Verbesserung der Mikrostruktur der ITZ erwiesen. Bei der Behandlung werden diese Materialien in der Regel mit Wasser gemischt und dann mit dieser Mischung die RG eingetaucht oder besprüht. Die feinen Partikel dieser Materialien dringen in die Poren und Hohlräume des anhaftenden Zementsteins ein, wobei sie diese füllen und so die Mikrostruktur verbessern und verdichten [38]. Um die Wirkung der puzzolanischen Behandlung weiter zu verstärken, wird das Two-Stage Mixing Approach (TSMA) vorgeschlagen. Das TSMA-Verfahren zur Behandlung von RG besteht in der Vorvermischung von RG, Zement mit Puzzolanen und der Hälfte der

erforderlichen Wassermenge. Dieses Verfahren erzeugt eine dünne Zementleimschicht auf der Oberfläche des RG, verbessert die Qualität des anhaftenden Zementsteins und verstärkt die Grenzflächen zwischen RG und neuem Zementstein erheblich. Darüber hinaus zeigen modifizierte TSMA eine Verbesserung der Festigkeits- und Langlebigkeit von RB [39].

Neben der Mikrostruktur der ITZ führte das Auftragen von Puzzolan-Suspension zu einer um 21% geringeren Wasseraufnahme, während die Dichte des RG kaum zunahm [40]. Demnach hängt die Effizienz der Schlämmbehandlung von der Art, der Partikelgröße und der Reaktivität des verwendeten Puzzolans sowie dem Gehalt an Calciumhydroxid im anhaftenden Mörtel für die Puzzolanreaktion ab [38].

Die Karbonatisierung ist eine äußerst effektive Methode, die auf der chemischen Reaktion von Kohlendioxid basiert, das in die Poren des anhaftenden Zementsteins eindringt und mit den Hydratationsprodukten des Zements, Calciumhydroxid und Calciumsilikat-Hydraten (C-S-H), reagiert. Auf diese Weise kann der anhaftende Mörtel verdichtet werden, wodurch die ITZ gestärkt wird. Diese chemische Methode reduziert die Wasseraufnahme um 19% bis 25% und die Porosität um 18% bis 21% im Vergleich zur unbehandelten Gesteinskörnung. Die Karbonatisierung kann die anhaftenden Mörtel sowie die ursprünglichen und neuen ITZs um die RG verbessern. Daher ist die Karbonatisierungsbehandlung von RG eine effektive und praktikable Methode zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit von RB [23].

2 Polymerreagenzien

2.1 Verwendung von polymerbasierten Reagenzien zur Verbesserung der Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnung

Polymere sind langkettige Moleküle, die durch die Verbindung aus Monomeren entstehen. Polymere haben ein äußerst breites Anwendungsspektrum, sowohl als synthetische Polymere in Kunststoffen als auch als klassische natürliche Polymere wie Cellulose in Textilien. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil unseres täglichen Lebens und erleichtern viele Aspekte der modernen Zivilisation. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts haben Polymere zunehmend an Bedeutung in der Bauindustrie gewonnen. Sie haben Anwendung im polymermodifizierten Beton sowie als Zusatzmittel für Verputzarbeiten oder Unterwasserbetonierungsarbeiten gefunden [41]. Zum Beispiel hat die Zugabe selbst kleiner Mengen Polyvinylalkohol in die wässrige Zementsuspension einen positiven Effekt auf die Verstärkung der Verbindung zwischen Zement und Gesteinskörnung [42]. Polymere wie Polydiorganosiloxane und Alkylalkoxysilane haben Anwendung in der Imprägnierung von Beton und Ziegeln als wasserabweisende Nachbehandlung gefunden. Diese Behandlung ermöglicht die Reduktion der Wasseraufnahme von zementbasierten bzw. porösen Materialien [43]. Weiterhin finden Polymeremulsionen Anwendung bei der Verbesserung der mechanischen und physikalischen Eigenschaften von RG. Das Einweichen von rezyklierten Gesteinskörnungen in Polymeremulsionen stellt eine physikalische Methode dar, die sich in früheren Studien als wirksam zur Verbesserung der Eigenschaften des auf RG anhaftenden Mörtels erwiesen hat [23], [43].

2.2 Wirkungsmechanismus von Polymerbeschichtung

Die Reaktion von Polymeren mit RG und die erzielten Effekte der Polymerimprägnierung hängen entscheidend von den Eigenschaften der Polymere ab, da diese den Wirkungsmechanismus und somit den Erfolg der RG-Behandlung maßgeblich beeinflussen. Eine dieser wichtigen Eigenschaften ist die Struktur des Polymers, wie zum Beispiel der Hydrolysegrad im Fall von PVA, der die Wasserlöslichkeit des Polymers beeinflusst. Diese Wasserlöslichkeit bestimmt, wie gut das Polymer mit den Gesteinskörnungen interagiert, wie stark es sich an deren Oberflächen anlagert und welche Auswirkungen dies auf die behandelten RG hat. Somit haben Merkmale wie die molekulare Struktur, der Hydrolysegrad, das Molekulargewicht und die chemische Zusammensetzung des Polymers einen direkten Einfluss auf dessen Wirksamkeit in bautechnischen Anwendungen [41], [42], [43].

Polyvinylalkohol und Silikon basierte Polymere wie Silane und Siloxane haben sich als effektive Optionen zur Verbesserung von der Wasseraufnahme, Festigkeit und Rohdichte von RG erwiesen. Die RG wird mit unter Verwendung von Polymeremulsionen mit Polymeren behandelt. Polymeremulsionen sind kolloidale Lösungen, in denen kleine Polymerpartikel in Wasser oder einem anderen flüssigen Medium dispergiert sind [44]. Diese Lösungen haben sich als effektiv bei der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von RG erwiesen, da die flüssige Form der Emulsion die Anwendung und das Eindringen der Polymeren in die poröse Struktur erleichtert. Zudem lassen sich Emulsionen in verschiedenen Konzentrationen herstellen, was eine gezielte Optimierung der Behandlung ermöglicht [23], [40], [43].

Der grundlegende Wirkungsmechanismus bei der Behandlung von RG mit Polymeren basiert darauf, dass die Polymere in das poröse Netzwerk der RG eindringen. Dabei bildet sich ein polymerer Film, der entweder die Oberfläche der Gesteinskörnung bedeckt und/oder die Porenwände auskleidet [40], [43]. Polymere, die viele Hydroxylgruppen (-OH) enthalten, weisen klebrige Eigenschaften auf [45]. Diese ermöglichen es den Polymeremulsionen, sich schnell zu einer stabilen Substanz zu verbinden, die eine wirksame und dauerhafte Beschichtung des RG gewährleistet. [23]. Der Wirkungsmechanismus eines Hydrophobierungsmittels auf eine Gesteinskörnung ist in Abb. 9 dargestellt. Hierbei wird das Eindringen des Polymers in die Porenstruktur sowie die abschließende hydrophobe Auskleidung der Porenwände gezeigt [46].

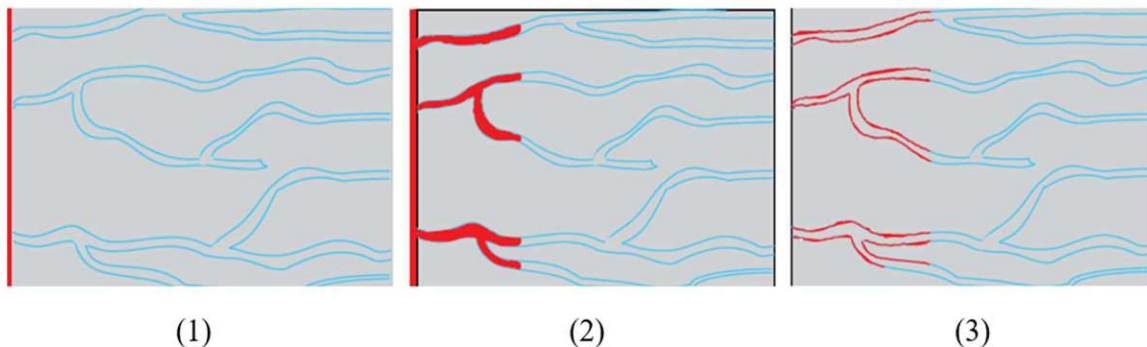


Abb. 9 Aufbringen des Hydrophobierungsmittels auf die Baustoffoberfläche (1), Eindringen Hydrophobierungsmittels in die Poren (2) und hydrophobe Auskleidung der Porenwände durch das Polymer (3) [46]

Trotz der sehr ähnlichen Wirkungsmechanismen dieser Polymere besitzen sie unterschiedliche Strukturen sowie charakteristische chemische und physikalische Eigenschaften, weshalb eine separate Betrachtung und Beschreibung als zweckmäßig erscheint. Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden diese Aspekte von Polyvinylalkohol, Silanen und Siloxanen im Folgenden ausführlich und getrennt dargestellt.

2.2.1 Polyvinylalkohol

Polyvinylalkohol (PVA) ist ein wasserlöslicher, synthetischer Polymer mit der chemischen Formel $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{OH})]_n$ [47], [48]. PVA zeichnet sich durch seine Fähigkeit zur Filmbildung, seine hohe Beständigkeit gegen Korrosion durch Lösungsmittel und Schmieröle sowie seine ausgezeichnete Haftkraft aus [49]. Die Haftkraft eines Polymers wird durch das Vorhandensein polarer Hydroxy-Gruppen (-OH) verstärkt, da eine höhere Anzahl dieser Gruppen die Fähigkeit zur Bindung mit anderen Oberflächen erhöht und somit die Klebrigkeit des Materials verbessert [45].

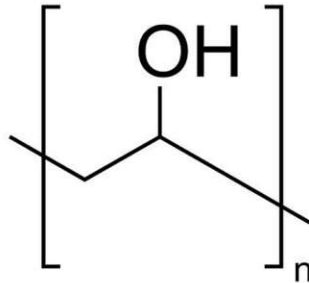


Abb. 10 Strukturformel von Polyvinylalkohol (PVA) [47]

Der Hydrolysegrad ist ein wichtiger Parameter für Polyvinylalkohol (PVA), da er die Löslichkeit, Verarbeitbarkeit und die Eigenschaften des Endprodukts maßgeblich beeinflusst. Mit steigendem Hydrolysegrad nimmt die Anzahl der Hydroxy-Gruppen im PVA zu, was die Wasserlöslichkeit und die spezifischen Anwendungsmöglichkeiten des Materials verbessert. Ein mittlerer bis hoher Hydrolysegrad (85-90%) bei PVA kann eine gute Benetzung und Verteilung auf RG fördern, da stärkere Wasserstoffbrückenbindungen die Haftung verbessern. Vollhydrolysiertes PVA (98-99%) bildet besonders starke Filme, die vorteilhaft für die Beschichtung sind, jedoch die Verarbeitung durch geringere Löslichkeit erschweren. Teilhydrolysiertes PVA (87-89%) stellt daher oft einen guten Kompromiss zwischen Löslichkeit und Filmbildungseigenschaften dar [45], [50].

Dieses Polymer wird in verschiedenen Studien hauptsächlich in Konzentrationsbereichen von 6-12% verwendet. Dabei sind hohe Wassertemperaturen (90-95°C) erforderlich, um das Polymer aufzulösen und eine homogene Mischung zu erzeugen. Durch die durchgeführten Behandlungen der RG mit PVA zeigte sich, dass die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der RG verbessert wurden. Durch das Auffüllen der Poren und Mikrorissen mit PVA wird die Porosität der RG verringert, wodurch die Dichte der RG erhöht wird. Die Bildung eines hydrophoben Films auf der Oberfläche der RG verhindert das Eindringen von Wassermolekülen, wodurch die Wasseraufnahme erheblich reduziert wird [51]. Neben der Reduktion der Wasseraufnahme führte die Verwendung von PVA auch zu einer stärkeren Verbindung zwischen Zementstein und die Gesteinskörnung [23].

Die mit Polyvinylalkohol behandelte RG hat sich als ausreichend gut für die Herstellung von RB erwiesen, der eine ähnliche Dauerhaftigkeit aufweist wie Beton, der mit herkömmlichen Gesteinskörnung hergestellt wurde [52]. Ein Nachteil der Verwendung von PVA könnte darin bestehen, dass es im Herstellungsprozess von neuem Beton die Wasseraufnahme während der Hydratation verhindert und das Wachstum der C-S-H-Produkte hemmt [37]. Die geringsten Reduktionen der Wasseraufnahme wurden bei Polymeren beobachtet, die nicht wasserbeständig sind und lediglich die Poren ohne jeglichen hydrophoben Effekt füllt [42].

2.2.2 Siliziumbasierte Polymere

Durch zahlreiche vorangegangene experimentelle Untersuchungen des Einflusses hydrophober Materialien, darunter auch siliziumbasierte Polymere, auf Beton und ähnliche poröse Materialien konnten wesentliche Verbesserungen der Materialeigenschaften (z.B. Wasseraufnahme) erzielt werden. Siliziumbasierte Polymere wurden ursprünglich weit verbreitet zur wasserabweisenden Vorbehandlung von Beton und Ziegel eingesetzt und finden zunehmend Anwendung für die Behandlung von RG [53]. Silane und Siloxane enthalten beide Siliciumatome als Basis, unterscheiden sich jedoch darin, dass Silane (R_nSiX_{4-n}) nur ein Siliciumatom haben, während Siloxane ($R_3Si-[O-SiR_2]_n-O-SiR_3$) die Ketten mit mehreren Siliciumatomen sind [48].

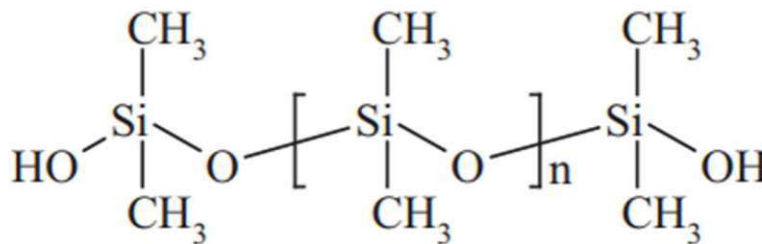


Abb. 11 Strukturformel von Polydimethylsiloxane- Siloxane [43]

Wie aus Abb. 11 ersichtlich wird, enthält das Siloxan Methylgruppen ($-CH_3O$), an Siliziumatome gebunden sind. Für die wasserabweisende Wirkung sind die übrigen Alkylgruppen verantwortlich, die fettähnliche Eigenschaften aufweisen [54], [55]. Dieses Wirkungsmechanismus ermöglicht die Bildung eines polymeren, wasserabweisenden Films an den Porenoberflächen. Bei der Behandlung der RG mit Silan in einer Forschungsarbeit wurde festgestellt, dass das Vorhandensein dieser Alkylgruppen in den Poren und Rissen effektiv zur Verbesserung der geschwächten RG beiträgt [51]. Unter Berücksichtigung der oben genannten Struktur dieser beiden Arten von Polymeren, die Partikelgröße des Siloxan-Polymers, die etwa doppelt so groß ist wie die des Silan-Polymers, dringen Silane leichter in die Porenstruktur des Zementsteins als Siloxane [36].

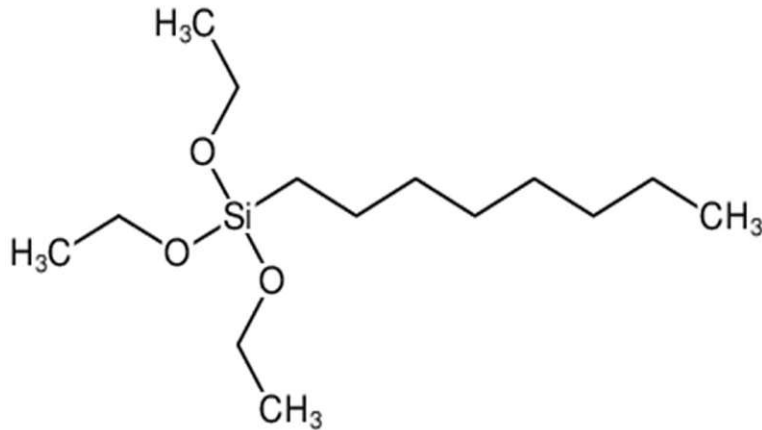


Abb. 12 Strukturformel von Triethoxy(octyl)silan- Silane [56]

2.3 Stand der Wissenschaft

Die Behandlung von rezyklierten Gesteinskörnungen mit Polymeremulsionen hat sich in mehreren Forschungsarbeiten als sehr geeignet und effektiv erwiesen, um bessere mechanische und physikalische Eigenschaften zu erzielen, wie z. B. eine erhöhte Druckfestigkeit, reduzierte Wasseraufnahme und Porosität sowie eine gesteigerte Rohdichte.

Kou und Poon (2010) [52] haben die Eigenschaften von RG untersucht, die mit Polyvinylalkohol behandelt wurde. Das verwendete PVA (Hydrolysegrad von 88%) bei Konzentrationen von 6, 8, 10 und 12%, wobei RG mit einer Korngröße von 10 mm und 20 mm behandelt wurden. Nach der Behandlung konnten bei einer PVA-Konzentration von 10%, eine Verbesserung der Wasseraufnahme, Dichte, Schwinden und Chloridwiderstand festgestellt werden. In der Tabelle 3 zeigt sich, dass die luftgetrockneten RG im Vergleich zu den ofengetrockneten RG eine stärkere relative Reduktion der Wasseraufnahme aufweisen (bis zu -74 %), jedoch eine geringere relative Veränderung der Rohdichte (0,24-0,29 %).

Tabelle 3 Übersicht über die Ergebnisse nach der Behandlung von RG mit 10% Polyvinylalkohol [52]

	Kerngröße (mm)	Relative Veränderung der Wasseraufnahme (%)	Relative Veränderung der Rohdichte (%)
Ofengetrocknete RG	10	-44,33	0,93
	20	-61,64	1,77
luftgetrocknete RG	10	-69,33	0,29
	20	-74	0,24

Der Unterschied zwischen Luft- und Ofentrocknung beeinflusst die Ergebnisse dahingehend, dass die bei der Lufttrocknung verbleibende Restfeuchte die Interaktion mit Polyvinylalkohol (PVA) verbessert und eine stärkere Versiegelung der Poren bewirkt, was die Wasseraufnahme stärker reduziert. Bei der Ofentrocknung hingegen wird die Rohdichte stärker erhöht, da das Verfahren eine Verdichtung der Porenstruktur verursacht.

Um bessere Eigenschaften zu erzielen, haben Spaeth und Tegguer (2014) [43] sowie Zhong et al. (2022) [51] bisher die synergistische Wirkung mehrerer Kombinationen von Polymeren, wie z. B. Silanen und Polyvinylalkohol, untersucht. Neben anderen Polymeren, wie Silanen, Polyvinylalkohol und Siloxanen, wurde auch die Wirkung der Kombination von Natriumsilikat mit Polymeren, insbesondere mit Silanlösungen und PVA-Lösungen, untersucht.

Spaeth und Tegguer (2014) [43] haben den Einfluss von Natriumsilikat und verschiedene Lösungen, die aus Silan, Siloxan oder aus einer Kombination von beiden bestehen, untersucht. Sie prüften die optimalen Konzentrationen verschiedener Polymerlösungen für die Behandlung von RG mit einfacher und doppelter Imprägnierung. Im Rahmen der doppelten Imprägnierung wurden die RG zunächst für 3 Minuten in eine Natriumsilikatlösung eingetaucht, gefolgt von einer zweiten Imprägnierung, bei der die Proben für 5 Minuten in verschiedenen Polymerlösungen behandelt wurden. In dieser Studie wurde das Silan Octyltriethoxysilan für die Behandlung mit einfacher Imprägnierung in Konzentrationen von 5 % und 40 % eingesetzt, um die hydrophoben Eigenschaften der RG zu verbessern. Bei einer Konzentration von 5 % wurde eine Reduktion der Wasseraufnahme um 60 % erzielt, während eine Konzentration von 40 % eine Reduktion um 89 % bewirkte. Im Fall der Verwendung dieser Polymerlösung höherer Konzentration betrug der Wert der Wasseraufnahme 0,5 %, was den Werten der natürlichen Gesteinskörnung sehr ähnlich ist. Es zeigte sich auch, dass bei den höchsten Konzentrationen der jeweiligen Behandlungsmittel deutlich höhere Reduktionen der Wasseraufnahme erzielt wurden als bei den niedrigsten Konzentrationen.

Unter Verwendung der Methode der doppelten Imprägnierung mit Natriumsilikat und einem kommerziellen Produkt, das eine Emulsion verschiedener Siloxane und Silane enthält, wurden deutlich niedrigere Werte der Wasseraufnahme erreicht als bei der einfachen Imprägnierung mit der Polymeremulsion. Durch diese Kombination konnte die Wasseraufnahme um etwa 85 % reduziert werden. Dieses Ergebnis deutet auf eine effektive synergistische Wirkung dieser beiden Materialien hin, was ihre Kompatibilität und das Potenzial für verbesserte Leistung bestätigt [43].

Zhong et al. (2022) [51] untersuchten den Einfluss einer Kombinationen verschiedener Behandlungsmittel, welche in Tabelle 4 ausgeführt werden, auf die Veränderung der Rohdichte von RG mit einer Korngröße von 5-31 mm.

Tabelle 4 Übersicht über die Ergebnisse nach der Behandlung von RG [51]

	Relative Veränderung der Rohdichte [%]	Relative Veränderung der Wasseraufnahme [%]	Relative Veränderung der Festigkeit [%]
Silane	4,98	35,44	31,47
PVA- Lösung	2,22	64,56	19,80
Natriumsilikat und Silane	7,45	58,23	35,53
Natriumsilikat und PVA	1,92	63,29	22,34
Silane und PVA	5,98	62,03	33,50

Ähnlich wie bei Kou und Poon (2010) [52] zeigte sich die Imprägnierung mit PVA als wirksame Methode zur Reduzierung der Wasseraufnahme, die um etwa 64,56 % verringert wurde. Bei der einfachen Imprägnierung mit Silanen kommt es zu einer Reduktion der Wasseraufnahme um 35,44 %. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Untersuchung von Spaeth und Tegger (2014) [43] fällt diese Verbesserung jedoch geringer aus. Allerdings verbesserte sich diese durch die Kombination mit Natriumsilikat, bzw. durch eine doppelte Imprägnierung, erheblich. Darüber hinaus hatte diese Kombination eine positive Wirkung auf Risse und Poren, führte zu einer Erhöhung der Rohdichte und erhöhte Festigkeit um 35,53 %.

Zusammenfassend wirken sich die Behandlungen mit Polymeremulsionen auf folgende Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung aus:

- Erhöhung der Rohdichte
- Reduktion der Wasseraufnahme
- Verbesserung der Oberflächenbeschaffenheit
- Erhöhung der chemischen Beständigkeit
- Verbesserung der Festigkeit
- Reduktion der Porosität
- Verbesserung der Frost-Tau-Beständigkeit [36], [43], [52].

3 Ziel der Arbeit

Diese Diplomarbeit stellt einen Beitrag zur aktuellen wissenschaftlichen Forschung im Bereich der Wiederverwendung von Bau- und Abbruchmaterialien dar. Die Arbeit hat das Ziel, die Wirksamkeit der Behandlungsmethode zu überprüfen, die Wirkungsmechanismen angewendeter Reagenzien zu beschreiben und die Auswirkung von Behandlungsparametern auf die Effizienz der Behandlungsmethode festzustellen. Im Zuge dessen wurde der Einfluss der Beschichtungsmethode mit Polymeren auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften, wie unter anderem Wasseraufnahme und Festigkeit, rezyklierter Gesteinskörnung untersucht. Die Untersuchung der Wasseraufnahme wurde gemäß ÖNORM EN 1097-6 durchgeführt, während die Untersuchung der Festigkeit der Gesteinskörnungen gemäß BS812: Teil 110:1990 durchgeführt wurde. Zur Untersuchung der Wasseraufnahme ist gemäß Norm die Korngrößenklasse 4/16mm notwendig, während zur Untersuchung der Festigkeit Korngrößenklasse 10/14mm anzuwenden ist. Unter Verwendung drei verschiedener kommerziell erhältlicher Polymeremulsion, wie Polyvinylalkohol, Silane und Siloxane, wurde auch der Einfluss der Immersionszeit auf die Auswirkung der Behandlungsmethode beobachtet.

Das endgültige Ziel besteht darin, eine Behandlungsmethode für rezyklierte Gesteinskörnungen zu implementieren, welche die Einsatzmöglichkeiten der rezyklierten Gesteinskörnung, durch Verbesserung ihrer Eigenschaften, erweitert und eine nachhaltige Lösung zur Bekämpfung steigender Nachfrage nach den Recyclingmaterialien anbietet.

4 Experimentelle Untersuchung

Im experimentellen Teil dieser Diplomarbeit wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von RG untersucht. Dabei wurden folgende Parameter berücksichtigt:

- das Material, also verschiedene polymerbasierte Reagenzien,
- die Einweichdauer in den genannten Polymeremulsionen.

4.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung

Um die Homogenität der gelieferten rezyklierten Gesteinskörnung festzustellen, war es notwendig, die Korngrößenverteilung durch eine Siebanalyse zu bestimmen. Das Sieben wurde mit einer Vibrationssiebmaschine durchgeführt, wobei Siebe mit einem Durchmesser von 0,0063 mm bis 32 mm verwendet wurden.

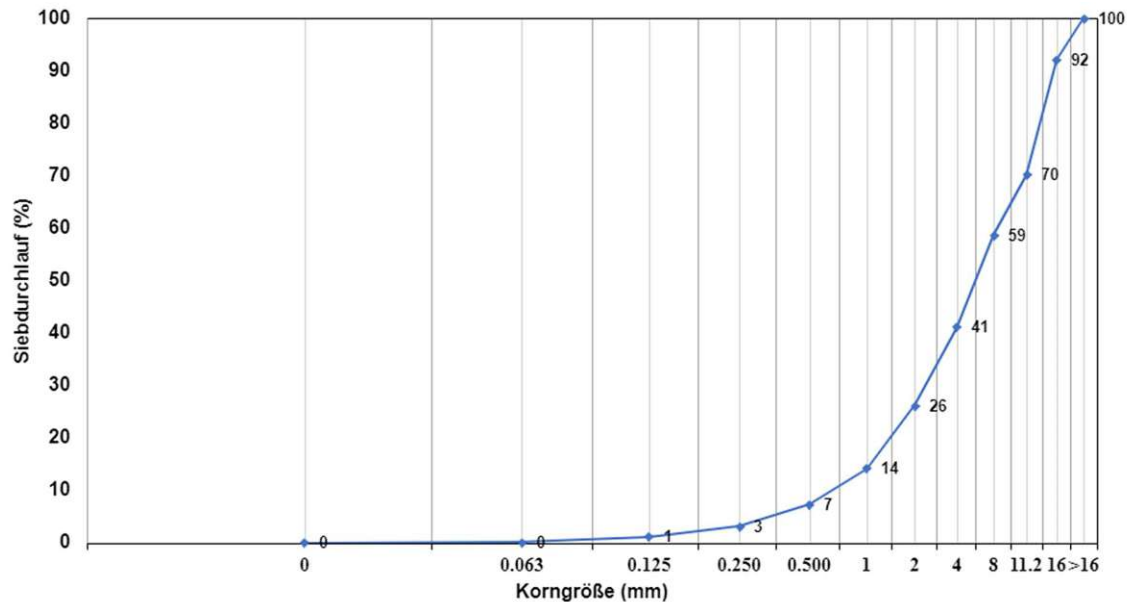


Abb. 13 Sieblinie der unbehandelten RG

Aus der Abb. 13 ist zu erkennen, dass der größte Teil des Materials im Bereich von 8 mm bis 16 mm liegt. Kleinere Partikel sind in deutlich geringerer Menge vorhanden.

Beim Sieben wurden unerwünschte Objekte wie Drähte und Teile von Fliesen bzw. Keramik gefunden und von der Gesteinskörnung entfernt, um zu verhindern, dass sie die Ergebnisse negativ beeinflussen und zu ungenauen Messwerten führen, die die Bewertung der Materialeigenschaften beeinträchtigt hätten.

4.2 Materialien

4.2.1 Prüfkörper

Die für diese Norm verwendete rezyklierte Gesteinskörnung ist unter der Bezeichnung RB 0-16 UB gemäß ÖNORM 3140 klassifiziert [31]. Die rezyklierte Gesteinskörnung wurde von Unternehmen bezogen, die sich mit der Vorbereitung von Betonabbruch beschäftigen.

Die Normen, die die Methoden zur Prüfung der Wasseraufnahme und der Festigkeit der RG regulieren, wie ÖNORM EN 1097-6 und BS 812: Teil 110:1990, bestimmen auch die Korngröße der Gesteinskörnung [34], [57]. Für die Bestimmung der Wasseraufnahme wurden Proben mit einer Korngröße von 10/14 verwendet, während für die Ermittlung der Festigkeit Proben mit einer Korngröße von 4/16 erforderlich sind. Diese RG-Parameter wurden aufgrund ihrer Relevanz für spezifische Anforderungen im Bauwesen analysiert.

4.2.2 Verwendete Polymerreagenzien

Im Experiment wurde der Einfluss von drei Polymeremulsionen auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von RG untersucht, nämlich der Einfluss von Polyvinylalkohol, Silan und Siloxan. Siloxane und Silan sind silikonbasierte Polymere. Die Spezifikationen dieser auf dem kommerziellen Markt erhältlichen Polymere sind in der untenstehenden Tabelle dargestellt:

Tabelle 5 Verwendete kommerzielle Polymeremulsionen

	Polyvinylalkohol	Silane	Siloxane
Produktname	PVA Pulver Typ 4-88 S	PCI SILICONAL W	Reines Universal Silikonöl
Typ	Organisches Polymer	/	/
IUPAC Name	Polyvinylalkohol	Triethoxyoctylsilan	Polydimethylsiloxane
Dichte [g/cm³]	1.3	1	0.968
Hydrolysegrad	87-89%	/	/

4.3 Die Behandlung der rezyklierten Gesteinskörnung mit Polymeremulsion

Der erste Teil der experimentellen Untersuchung beschäftigt sich mit der Behandlung von RG durch polymerbasierte Reagenzien, insbesondere durch deren Immersion in Polymeremulsionen. Dabei wurden rezyklierten Gesteinskörnungen mit drei verschiedenen Polymeremulsionen behandelt: PVA, Silane und Siloxane. Für jede Polymeremulsion wurden 4 Prüfkörper vorbereitet: zwei für eine Eintauchzeit von einer halben Stunde und zwei für eine Eintauchzeit von 2 Stunden. Das bedeutet, dass die zwei Prüfkörper mit der Fraktion 4/16 mm für die Parameter Dauer von $t=0,5h$ und $t=2h$ zur Ermittlung der Wasseraufnahme vorbereitet wurden. Des Weiteren wurden zwei Prüfkörper mit der Fraktion 10/14 mm für die Festigkeitsprüfung präpariert.

Die Polymeremulsionen Silane und Siloxane wurde vorbereitet und flüssig beschafft, und damit war es nicht erforderlich, sie selbst herzustellen. Polyvinylalkohol war in Pulverform und musste in einer bestimmten Konzentration mit Wasser gemischt werden. Für dieses Experiment war eine Konzentration von 6 % erforderlich, und dementsprechend wurden 60 Gramm PVA-Pulver mit 0,94 Litern Wasser für jede Probe gemischt. Zur Herstellung der PVA-Polymeremulsion musste Wasser auf ca. 90 Grad erhitzt und die erforderlichen Mengen Wasser und PVA-Pulver vermischt werden.



Abb. 14 Vorbereitung der PVA-Emulsion

Die Mischung wurde konstant bei niedriger Geschwindigkeit mit einem elektrischen Mixer gerührt, bis sich das Wasser und das Pulver vollständig verbunden hatten. Es war notwendig sicherzustellen, dass die Mischung homogen war und keine Agglomerationen verblieben. Schließlich wurde die Mischung auf Raumtemperatur abgekühlt. Die vorbereitete RG wurde in 4 verschiedenen Kübel gelegt, jeweils 4,5 kg

RG in jeden. Schließlich wurde RG in die Polymeremulsion gestreut und für 0,5 und 2 Stunden stehen gelassen, um die Reaktion zwischen Polymer und RG zu ermöglichen.



Abb. 15 Eintauchung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Polymeremulsion

Nach Abschluss der Behandlung mit Polymeren wird die Polymeremulsion abgelassen und die RG abgesiebt. Um die erforderlichen Eigenschaften des RG zu prüfen, war es notwendig, die rezyklierte Gesteinskörnungen angemessen zu trocknen. Es wurde in Schalen in sehr dünnen Schichten bei Raumtemperatur (ca. 20°C) für mindestens 3 Tage ausgelegt. Nachdem die RG getrocknet war, wurden die Tests zur Ermittlung der Wasseraufnahme und der Festigkeit durchgeführt.



Abb. 16 Trockenlegung von behandelten RG wurde bei Raumtemperatur zum Trocknen stehen gelassen

4.4 Ermittlung der Festigkeit

Um die Festigkeit der RG zu bewerten, wurde der sogenannte „Crushing Index“ der RG ermittelt. Die entsprechende Methode zur Bestimmung von „Crushing Value“ werden gemäß der britischen Norm BS 812: Teil 110:1990 durchgeführt.

„Crushing Value“ der Gesteinskörnung gibt ein relatives Maß für deren Widerstandsfähigkeit gegen Zerkleinerung unter einer allmählich ansteigenden Druckbelastung an und wird nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$ACV = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

Wobei

M₁ Masse der Probe [1]

M₂ Masse des Materials, das durch das 2,36-mm-Sieb gegangen ist [1] [59].

Der Crushing Value wird als Prozentsatz angegeben.

Ein niedriger Crushing Value deutet darauf hin, dass die Gesteinskörnung eine hohe Festigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber Druckbelastungen aufweist. Andererseits weist ein hoher Wert dieses Parameters auf eine geringere Festigkeit hin. Durch die Bestimmung dieses Parameters wird die Eignung des Materials für den Einsatz in Konstruktionen bewertet. Wie bereits erwähnt, deutet ein höherer Wert auf weniger günstige Eigenschaften hin, weshalb solche Gesteinskörnung eher in Konstruktionen eingesetzt wird, bei denen keine außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften erforderlich sind.

Zum Beispiel sind für den Straßenbau Gesteinskörnungen genügen, die einen niedrigen Crushing Value aufweisen, weil sie ausreichend widerstandsfähig sind, um den Druckbelastungen durch Verkehr und Baugeräte standzuhalten [58].

4.4.1 Probevorbereitung und Versuchsdurchführung

Nachdem die RG mit Polymeremulsionen behandelt und danach bei Raumtemperatur getrocknet wurde, erfolgte weiter die Prüfungen zur Ermittlung des Parameters Crushing Value bzw. der Festigkeit. Für die Bestimmung dieses Parameters wird behandelte RG mit einer Korngröße von 10/14 mm benötigt. Die für die Durchführung dieses Versuchs benötigte Ausrüstung besteht aus einem Zylinder, der mit Gesteinskörnung gefüllt wird, einem Verdichtungsstab und einer Druckversuchsmaschine.

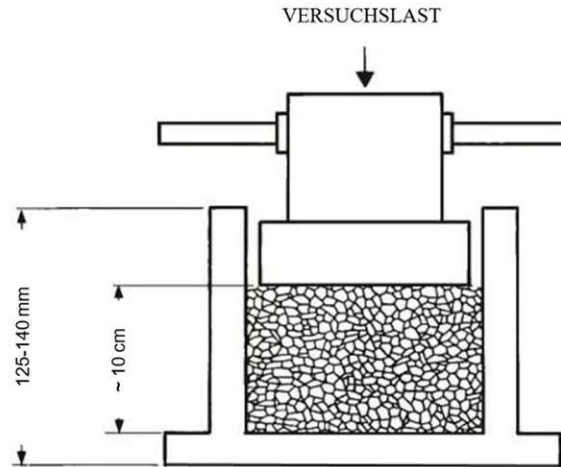


Abb. 17 Ausrüstung für die Durchführung des Versuchs „Crushing Value“

Bei diesem Versuch wurden pro Materialtyp 2 Proben von jeweils ca. 3 kg getestet. Der auf dem untenstehenden Bild gezeigte Zylinder wird zunächst bis zu einem Drittel seiner Höhe mit dem getrockneten RG gefüllt. Mit einem Verdichtungsstab wird die RG aus einer Höhe von etwa 5 cm 25 Mal gestampft.



Abb. 18 Erstes Drittel des Zylinders mit RG gefüllt

Dieser Vorgang wird für die nächsten zwei Drittel der Zylinderhöhe wiederholt. Nachdem der Zylinder mit der RG gefüllt wurde, wird den Zylinder in die Druckversuchmaschine eingesetzt. Der Test wird bei einer Belastungsrate von 40 kN/min (0,66 kN/s) durchgeführt.



Abb. 19 Zylinder gefüllt mit der RG und bereit für Druckversuch

Der Test dauert etwa 10 Minuten, danach wird das RG aus dem Zylinder entnommen und gewogen. Die Gesamtmasse der RG nach dem Test wird als M_1 bezeichnet. Anschließend muss die RG-Menge durch ein Sieb mit einem Durchmesser von 2,36 mm gesiebt werden. Die Masse, die durch das Sieb mit einem Durchmesser von 2,36 mm fällt, wird als M_2 bezeichnet. Mit diesen beiden gemessenen Massen, M_1 und M_2 , kann schließlich die Festigkeit bestimmt werden.



Abb. 20 Links Masse M_1 von RG nach dem Druckversuch und rechts Masse M_2 nach dem Sieben

4.5 Ermittlung der Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eigenschaften sowohl des Frischbetons als auch des erhärteten Betons. Bei der Betonherstellung muss dieser Faktor berücksichtigt werden, um den Wasserzementwert in der Rezeptur optimal anzupassen. Durch die richtige Anpassung des Wasserzementwerts wird die Konsistenz des Frischbetons, seine Verarbeitbarkeit und letztlich auch die Festigkeit des erhärteten Betons bestimmt. Wie bereits im Unterkapitel 1.2 erwähnt, zeigt sich ein erheblicher Unterschied in der Wasseraufnahme RG und NG. Die RG können aufgrund ihrer höheren Porosität eine bis zu mehreren Malen größere Wasseraufnahme aufweisen als NG.

Zur Bestimmung der Partikeldichte und Wasseraufnahme von recycelter Gesteinskörnung wurde die Norm „ÖNORM EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme“ verwendet. Laut der Norm wird die Wasseraufnahme als die Masse des aufgenommenen Wassers, angegeben als ein prozentualer Anteil der ofentrockneten Masse der Gesteinskörnungsprobe ermittelt [34].

Die Rohdichten $\rho_a, \rho_{rd}, \rho_{ssd}$ werden anhand der folgenden Gleichungen berechnet:

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}; \quad (2)$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}; \quad (3)$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}. \quad (4)$$

Nach dieser durchgeführten Messung werden die folgenden Massen erhalten:

- M_1 Masse des gesättigten, oberflächentrockenen (SSD) Gesteinskörnung
- M_2 Masse des Pyknometers zusammen mit Gesteinskörnung und Wasser
- M_3 Masse des Pyknometers und des Wassers
- M_4 Masse des im Ofen getrockneten Gesteinskörnung (ca. 24 Stunden)

Basierend auf den gemessenen Massen M_1, M_2, M_3 und M_4 können die folgenden Parameter berechnet werden:

- ρ_a scheinbare Rohdichte
- ρ_{rd} Rohdichte auf ofentrockener Basis
- ρ_{ssd} Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis
- WA_{24} Wasseraufnahme (%).

Die Berechnungen der Wasseraufnahme WA_{24} erfolgten anhand der folgenden Gleichungen:

$$WA_{24} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100. \quad (5)$$

4.5.1 Probevorbereitung und Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung die Parameter Wasseraufnahme und Rohdichte gemäß ÖNORM EN 1097-6 war es erforderlich, ein Pyknometer, eine Glasflasche mit einem Volumen von 1 bis 5 Litern, zu verwenden. Anhand dieses Pyknometers wird das Volumen des Materials bestimmt, indem die Masse des mit Gesteinskörnung und Wasser gefüllten Pyknometers und die Masse des nur mit Wasser gefüllten Pyknometers gemessen wird.

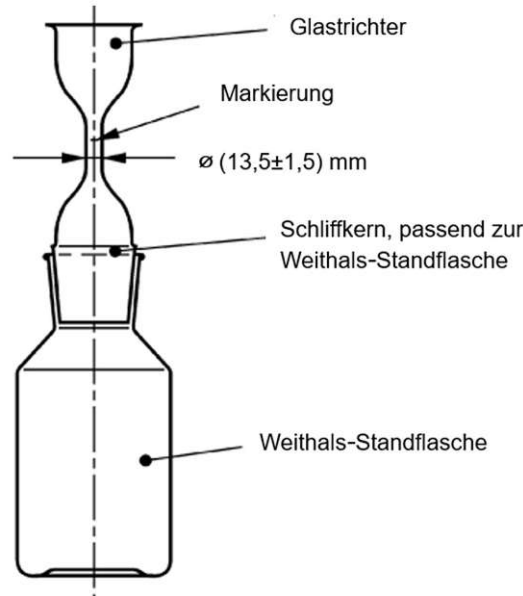


Abb. 21 Pyknometer [34]

Zur Bestimmung dieser Parameter war es notwendig, vorbehandelten, an der Luft getrockneten Gesteinskörnungen mit einer Korngröße von 4/16 mm vorzubereiten. Es wurden 6 Proben von ca. 1250 g vorbereitet, d. h. es wurden zwei Proben für jede Polymeremulsion getestet. Zunächst musste das Volumen bzw. die Masse des nur mit Wasser bis zur Markierung gefüllten Pyknometers bestimmt werden. Diese Masse wurde mit M_3 bezeichnet. Die Wassertemperatur, mit der dieser Versuch durchgeführt wurde, betrug etwa 22 Grad, und die Lufttemperatur betrug ebenfalls etwa 22 Grad. Nachdem die Masse des mit Wasser gefüllten Pyknometers bestimmt worden war, wurde es entleert und mit der RG gefüllt. Das Pyknometer wurde bis etwas über die Hälfte seiner Höhe mit der RG gefüllt und dann mit Wasser, jedoch nicht bis zum Rand, aufgefüllt. Das Pyknometer musste mehrmals um seine Achse gedreht werden, bis

alle Luftblasen entwichen waren. Danach wurde das so gefüllte Pyknometer 24 Stunden bei Raumtemperatur stehen gelassen.



Abb. 22 Das Sinken der RG im Wasser über einen Zeitraum von 24 Stunden

Nach 24 Stunden musste das Pyknometer nochmals mehrmals gedreht werden, um zu überprüfen, ob noch Luftblasen vorhanden waren. Danach wurde Wasser bis zur Markierung hinzugefügt und das Pyknometer mit einem Tuch abgetrocknet, um ideale Bedingungen für das Wiegen der Masse M_2 zu gewährleisten.



Abb. 23 Pyknometer mit RG bereit zum Wiegen

Der nächste Schritt bestand darin, die RG abzusieben und auf ein trockenes Tuch zu legen, dann wurde die Oberfläche vorsichtig abgetrocknet.

Damit war der Prüfkörper bereit, um die Masse M_1 , also die Masse des gesättigten, oberflächentrockenen RG, zu messen.



Abb. 24 Gesättigte, oberflächentrockene Gesteinskörnung

Um die Masse M_4 zu messen, musste der Prüfkörper im Ofen bei 115 Grad etwa 24 Stunden lang getrocknet werden.

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Auswertungen der durchgeführten Versuche sowie die daraus gewonnenen Ergebnisse präsentiert und interpretiert. Es wurde eine detaillierte Analyse des individuellen Einflusses der drei verwendeten Polymere durchgeführt, bei Eintauchzeiten von einer halben Stunde und zwei Stunden. Dies ermöglichte einen direkten Vergleich der Wirksamkeit der Materialien in Bezug auf die untersuchten physikalischen und mechanischen Eigenschaften der RG, die Wasseraufnahme (siehe Abb. 25) und die Festigkeit (siehe Abb. 26).

5.1 Wasseraufnahme

Durch die Behandlung mit Polymerreagenzien wird angestrebt, die Wasseraufnahme der RG zu reduzieren. In Tabelle 8 sind die erhaltenen Werte der unbehandelten rezyklierten Gesteinskörnung (Referenzwert) sowie die Werte der behandelten rezyklierten Gesteinskörnung dargestellt. Neben den erhaltenen Werten der Wasseraufnahme ist in der Tabelle 8 auch die prozentuelle Reduktion der Wasseraufnahme, im Vergleich zum Referenzwert, ersichtlich. Die in der Tabelle aufgeführten Werte wurden mithilfe der Formel 5 (siehe Seite 32) berechnet.

Tabelle 6 Ermittelte Wasseraufnahme und die prozentuelle Reduktion im Vergleich zum Referenzwert

Prüfkörper (-)		Messwerte der Wasseraufnahme (%)	Reduktion der Wasseraufnahme (%)
Referenzwert		5,12	0
PVA	t=0,5	5,26	2,62
	t=2h	5,62	9,74
Silane	t=0,5	3,27	-36,30
	t=2h	3,53	-31,10
Siloxane	t=0,5	4,75	-7,37
	t=2h	4,65	-9,30

In der Abb. 25 sind die Auswirkungen aller verwendeten Polymere auf die Wasseraufnahme für unterschiedliche Eintauchzeiten zusammengefasst. Die Abb. 25 zeigt, dass die Behandlung mit PVA die Wasseraufnahme der RG erhöht, was dem Ergebnis entgegenwirkt, dem angestrebt wird. Bei einer Eintauchzeit von einer halben Stunde kommt es zu einem Anstieg um 2,62%, während er nach 2 Stunden um 9,74% ansteigt. Daher lässt sich sagen, dass die Behandlung mit PVA negativen Einfluss hinsichtlich der Wasseraufnahme liefert. Die möglichen Gründe dieses Verhaltens werden im Folgenden näher erläutert.

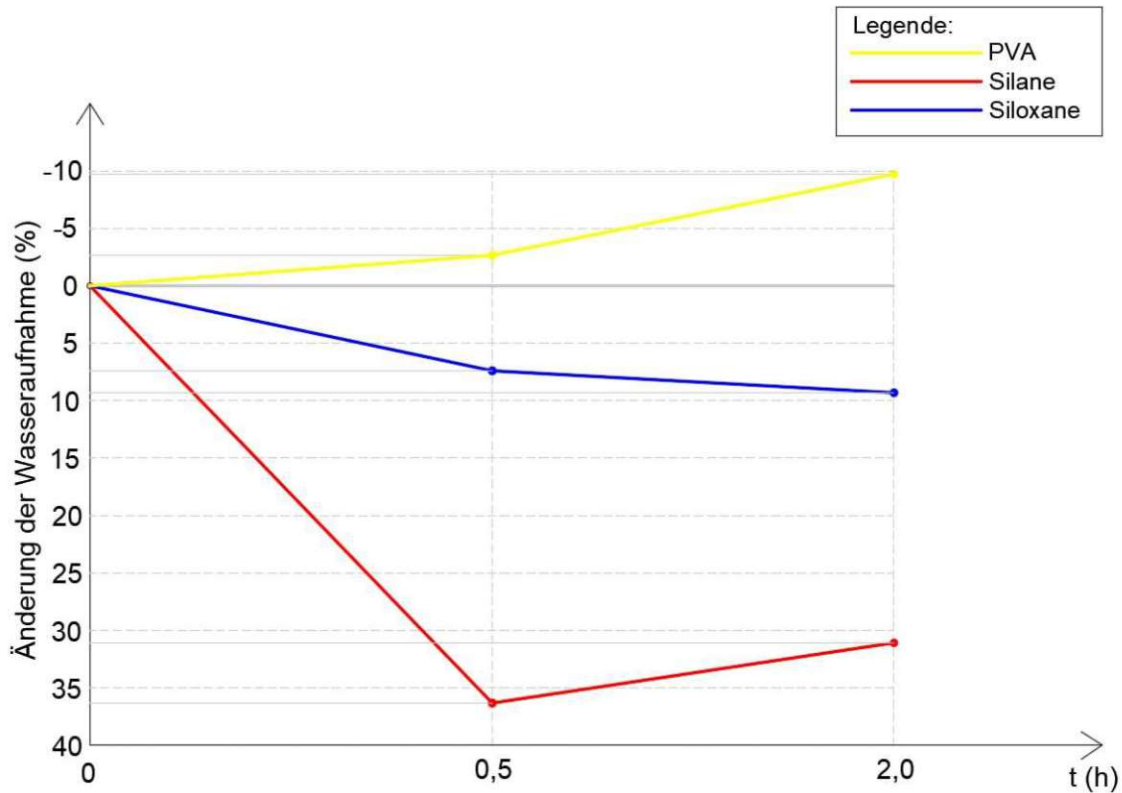


Abb. 25: Einfluss der Eintauchzeit auf die Wasseraufnahme, unter Verwendung von PVA, Silane und Siloxane

Einer der möglichen Gründe für die unerwarteten Ergebnisse, insbesondere im Vergleich zu anderen wissenschaftlichen Studien, könnte in der angewendeten Methode zur Bestimmung der Wasseraufnahme liegen. Da PVA in Wasser leicht löslich ist, besteht die Möglichkeit, dass es sich während des Eintauchens der Gesteinskörnung in Pyknometer teilweise aufgelöst hat. Die Löslichkeit von PVA hängt von dem Hydrolysegrad, der Konzentration und der Viskosität ab. Es wird vermutet, dass die spezifischen Eigenschaften des verwendeten PVA, sowie die angewandte Methode zur Bestimmung der Wasseraufnahme nicht optimal aufeinander abgestimmt waren. Es wird auch vermutet, dass die PVA-Lösung, die sehr empfindlich gegenüber der Art der Zubereitung ist, nicht vollständig homogen war und dass größere Moleküle entstanden sind, die nicht in der Lage waren, die Poren und Risse an der Oberfläche der Gesteinskörnung durchzudringen oder zu verschließen. Dieser Effekt scheint nicht von der Eintauchzeit abhängig zu sein, was wiederum auf die Aufbereitung der Lösung bzw. die angewendete Methode zurückführt.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Behandlung mit PVA hat sich Silane als sehr effektiv bei der Reduzierung der Wasseraufnahme erwiesen. Die Abb. 25 zeigt deutliche Reduktion der Wasseraufnahme unter Verwendung von Silane. Bereits nach

einer halben Stunde verringerte sich die Wasseraufnahme der RG um 36,30%. Bei der Eintauchzeit von zwei Stunden verbesserte sich dieser Wert um 31,10%, im Vergleich zum Referenzwert. Die erhebliche Verringerung der Wasseraufnahme bei der Behandlung mit Silane ist das Ergebnis einer Reihe von Umwandlungsreaktionen des Silanes. Die Silanolgruppen gehen Kondensationsreaktionen ein und bilden Siloxanbindungen (Si-O-Si) mit anderen Silanolgruppen auf den Silanmolekülen oder mit Hydroxylgruppen auf der Gesteinsoberfläche, was zur Bildung eines hochwertigen hydrophoben Films führt. Dieser Film ist mechanisch widerstandsfähig, was bei ähnlichen Eintauchzeiten zu ähnlichen Ergebnissen führen sollte.

Weiters veranschaulicht die Abb. 25 einen positiven Einfluss der Behandlung mit Siloxane auf die Wasseraufnahme der RG. Dabei ist eine Reduktion für beide verwendeten Eintauchzeiten ersichtlich. Nach einer Eintauchzeit von 30 Minuten wies die Gesteinskörnung eine Reduktion der Wasseraufnahme um 7,37% auf. Auch nach einem zweistündigen Eintauchen der RG in die Siloxane-Emulsion kann eine Reduktion der Wasseraufnahme um 9,30% festgestellt werden. Die erzielten Ergebnisse stellen jedoch eine geringere Reduktion der Wasseraufnahme dar, im Vergleich zu den vergleichbaren vorhandenen Studien. Es ist dementsprechend weiters zu untersuchen, ob ein kleinerer Unterschied der Eintauchzeit der Grund für die unwesentliche Reduktion der Wasseraufnahme ist. Auf der anderen Seite kann davon ausgegangen werden, dass die Wirkungsmechanismen der Siloxane-Emulsion eine viel längere Eintauchzeit brauchen, um eine größere Reduktion der Wasseraufnahme zu erzielen. Obwohl Siloxane eine hydrophobe Schicht auf der Oberfläche bildet, können sie möglicherweise nicht vollständig in alle Poren und Risse der RG eindringen und diese abdichten, sodass weiterhin das Wasser dadurch eindringen kann. Siloxane bildet Siloxanbindungen (Si-O-Si), die eine Schutzschicht auf der Gesteinsoberfläche bilden können. Wenn die Reaktion jedoch nicht vollständig abläuft oder die Gesteinsoberfläche nicht ausreichend aktiv ist (nicht genügend Hydroxylgruppen für die Reaktion vorhanden), kann die Schicht nicht ausreichend dicht oder homogen verteilt sein, was wiederum zu einer weniger effektiven Verringerung der Wasseraufnahme führen kann. Eine verlängerte Eintauchzeit der Gesteinskörnung in die Siloxane-Lösung kann eine Intensivierung des Eindringens der Siloxane in die Poren der Gesteinskörnung zur Folge haben. Dies könnte eine Verstärkung der Siloxaneschicht und eine optimierte Versiegelung der Poren zur Konsequenz haben.

Wenn man den Einfluss der verwendeten Polymeren auf die Auswirkung der Behandlung betrachtet, kann man feststellen, dass die größte Reduktion der Wasseraufnahme nach der Behandlung der RG mit Silane, bei einer Eintauchzeit von einer halben Stunde, erreicht worden ist. Im Vergleich zu Silane hat Siloxane einen deutlich geringeren Einfluss auf die Wasseraufnahme. Dieser signifikante Effekt von Silane kann damit erklärt werden, dass Silane im Vergleich zu Siloxane sehr kleine

Moleküle besitzt. Dadurch kann es tief in das dichte, poröse Netzwerk der RG eindringen und dort einen wasserabweisenden Film an Porenwände bilden. Während Siloxane hauptsächlich einen hydrophoben Film auf der Oberfläche bildet, sind Silane-Moleküle widerstandsfähiger gegen mechanische Einflüsse, was ihnen eine bessere wasserabweisende Wirkung verleiht.

Was die Behandlung mit PVA betrifft, sind diese Ergebnisse schwer zu interpretieren und mit anderen Polymeren zu vergleichen, da diese Behandlung nicht die erwarteten Ergebnisse erzielt hat. Es ist daher notwendig, weitere Studien zur Untersuchung der Ausgangseigenschaften von PVA, sowie geeigneter Methoden zur Herstellung der PVA-Lösung durchzuführen. Es wird ebenfalls empfohlen, die geeignete Wassertemperatur für die Herstellung der PVA-Emulsion weiters zu untersuchen, um herauszufinden, ob sie die Abbaubarkeit von PVA in Wasser, sowie dessen Einfluss auf die RG beeinflusst.

5.2 Festigkeit

Durch die Behandlung mit Polymerreagenzien wird danach angestrebt, die Festigkeit der RG zu erhöhen. In der Tabelle 9 sind die erhaltenen Festigkeitswerte der unbehandelten rezyklierten Gesteinskörnung (Referenzwert) sowie der mit Polymeren behandelten Gesteinskörnung dargestellt. Neben den erhaltenen Festigkeitswerten ist in der Tabelle 9 auch die prozentuelle Erhöhung der Festigkeit, im Vergleich zum Referenzwert ersichtlich.

Tabelle 7 Ermittelte Festigkeiten und die prozentuelle Erhöhung im Vergleich zum Referenzwert

Prüfkörper (-)		Messwerte der Festigkeit (%)	Relative Änderung der Festigkeit (%)
Referenzwert		24,41	0
PVA	t=0,5	19,96	18,20
	t=2h	19,43	20,40
Silane	t=0,5	21,93	10,20
	t=2h	20,74	11,60
Siloxane	t=0,5	21,42	12,20
	t=2h	21,57	15,00

In der Abb. 26 sind die Ergebnisse der untersuchten Festigkeit, unter Verwendung von drei unterschiedlichen Polymeren und für beide verwendeten Eintauchzeiten zusammengefasst.

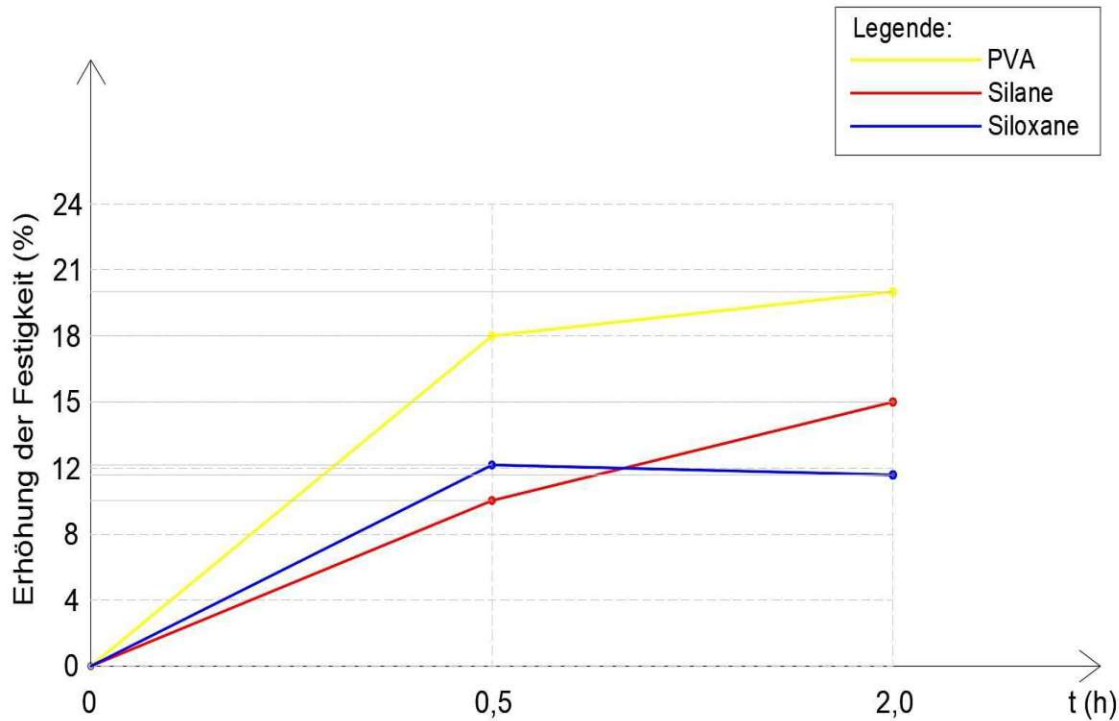


Abb. 26 Einfluss der Eintauchzeiten auf die Festigkeit, unter Verwendung von PVA, Silane und Siloxane

Die Abb. 26 zeigt, dass die Behandlung mit PVA einen positiven Einfluss auf die Festigkeit hat. Bei einer Eintauchzeit von halber Stunde kommt es zu einer Erhöhung der Festigkeit um 18%. Nach der Eintauchzeit von 2 Stunden ist die Festigkeit um 20% erhöht, im Vergleich zum Referenzwert. Dies deutet darauf hin, dass die Dauer der Eintauchzeit die Festigkeit in einem geringen Maß beeinflusst. Die Verbesserung ist vor allem darauf zurückzuführen, dass PVA in die Hohlräume des alten, porösen Zementsteins eindringt und diese versiegelt. Da der verbleibende Zementstein eine Schwachstelle in der RG darstellt, welche ihre Festigkeit verringern kann, wirkt PVA als ein effektives Bindemittel, um diese Schwachstellen zu verstärken. Um eine umfassende Schlussfolgerung herausziehen zu können, ist es erforderlich, eine weitere Parameterstudie zu machen, bei der die Behandlungen mit noch längeren oder unterschiedlichen Dauern durchgeführt werden.

Ebenfalls ist der positive Einfluss der Behandlung mit der Silane-Emulsion auf die mechanischen Eigenschaften der RG in der Abb. 26 erkennbar, wo eine Erhöhung der Festigkeit deutlich ist. Nach einer Behandlungsdauer von einer halben Stunde ist eine Erhöhung der Festigkeit um 10% feststellbar. Eine weitere signifikante Erhöhung wird nach zwei Stunden Behandlung beobachtet, wobei die Festigkeit um 15%, im Vergleich zum Referenzwert, erhöht wurde. Silane dringt in die inneren Porenstrukturen der Gesteinskörnung ein. Sein Wirkungsmechanismus beruht jedoch eher auf der Auskleidung der Porenwände mit einer hydrophoben Schicht. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wirkung von Silane nicht im „Füllen“ der Poren

oder in der Verstärkung der inneren Bindungen zwischen den Partikeln besteht. Aus dem Grund kann eine größere Verbesserung der Wasseraufnahmefähigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung, im Vergleich zur Verbesserung der Festigkeit festgestellt werden.

Die Abb. 26 zeigt ebenfalls eine Erhöhung der Festigkeit der behandelten RG, nach der Behandlung mit Siloxane. Bereits nach einer halben Stunde kann eine Erhöhung der Festigkeit um 12,2% festgestellt werden. Interessanterweise wurde nach einer längeren Behandlungszeit von zwei Stunden eine ähnliche prozentuelle Erhöhung der Festigkeit um fast denselben Prozentsatz festgestellt. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Länge der Behandlungsdauer nur einen minimalen oder möglicherweise keinen Einfluss auf diese Eigenschaft hat. Der Wirkmechanismus von Siloxane auf die RG basiert in erster Linie auf einer oberflächlichen Wirkung, wobei keine signifikante Penetration in die innere Struktur der Gesteinskörnung erfolgt. Dies führt dazu, dass die inneren Verbindungen zwischen den Partikeln durch Siloxane nur begrenzt beeinflusst werden. Folglich kann man davon ausgehen, dass eine Behandlung mit Siloxane in der Regel zu keiner wesentlichen Erhöhung der Festigkeit führt, da die innere Struktur der RG unverändert bleibt.

Bei der Betrachtung verschiedener Polymeremulsionen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die RG konnte festgestellt werden, dass Polyvinylalkohol die effektivste Behandlung zur Erhöhung der Festigkeit der RG darstellt. Die Überlegenheit von Polyvinylalkohol lässt sich durch seine Fähigkeit erklären, eine starke, elastische Schutzschicht, um die Partikel zu bilden, wodurch eine bessere Bindung der Gesteinskörnung und eine Verringerung der Neigung zum Zerschneiden erzielt wird. Polyvinylalkohol bildet stabile Wasserstoffbrückenbindungen mit der Oberfläche der Gesteinskörnung, wodurch eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (Erhöhung der Festigkeit) erzielt wird. Im Gegensatz dazu bietet Siloxane zwar erhebliche Hydrophobizität und einen gewissen Schutz an, hat jedoch nicht die gleiche Fähigkeit, starke Bindungen zu den Partikeln herzustellen, was zu weniger ausgeprägten Erhöhung der Festigkeit führt. Silane hingegen interagiert mit der Oberfläche der Gesteinskörnung und bildet eine dünnere Schicht, bietet jedoch nicht dieselbe Effizienz in der Bindung und dem Schutz an, wie z.B. Polyvinylalkohol.

6 Schlussfolgerung

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Behandlung der rezyklierten Gesteinskörnung mit PVA, Silane und Siloxane einen positiven Einfluss auf die Wasseraufnahme und Festigkeit hat, sprich bewirkt eine Reduktion der Wasseraufnahme und eine Erhöhung der Festigkeit der Gesteinskörnung. Eine Zusammenfassung bzw. Überblick der Ergebnisse der Behandlungen mit den verwendeten Polymeren sind in der Abb. 27 dargestellt.

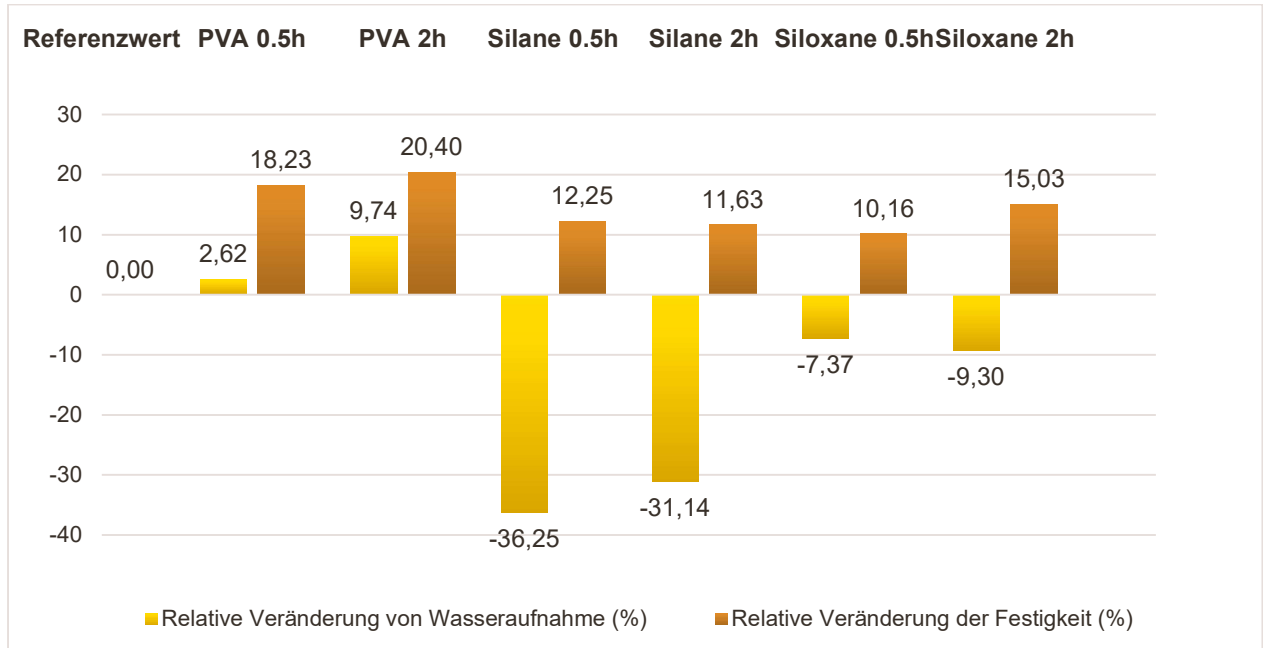


Abb. 27 Vergleich der prozentuellen Reduktion der Wasseraufnahme bzw. Erhöhung der Festigkeit nach der Behandlung rezyklierter Gesteinskörnung mit verschiedenen Polymeren

Obwohl die polymerbasierten Reagenzien insgesamt eine positive Wirkung auf die Verbesserung der untersuchten mechanischen und physikalischen Eigenschaften der RG zeigten, kann kein der verwendeten Polymeren sowohl für die Erhöhung der Festigkeit als auch für die Reduktion der Wasseraufnahme empfohlen werden. Die im vorherigen Kapitel dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass der Einfluss der einzelnen verwendeten Materialien einerseits in Bezug auf die Reduktion der Wasseraufnahme und andererseits in Bezug auf die Erhöhung der Festigkeit unterschiedlich ist. In diesem Zusammenhang hat sich Silane als besonders effektiv bei der Reduzierung der Wasseraufnahme erwiesen. Auf der anderen Seite wies die Behandlung mit Silane keinen wesentlichen Einfluss auf die Erhöhung der Festigkeit auf. Die größte prozentuelle Erhöhung der Festigkeit wurde durch die Behandlung mit PVA erzielt, jedoch hatte die Behandlung mit PVA einen negativen Einfluss auf die Wasseraufnahme der RG. Bei der Betrachtung des Behandlungsparameters „Eintauchzeit“ zeigte sich kein eindeutiger Trend in den Ergebnissen für alle drei verwendeten Polymere.

Angesichts dieser Ergebnisse wird empfohlen, die Wahl des Polymers entsprechend den spezifischen Anforderungen an die RG in zukünftigen Bauprojekten zu treffen. Wenn die Wasseraufnahme ein entscheidender Faktor ist, ist Silane die bevorzugte Wahl. Wenn jedoch die Festigkeit der RG im Vordergrund steht, stellt PVA eine besonders effektive Lösung dar. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die minderwertige Festigkeit der RG der entscheidende Faktor für ihre eingeschränkte Einsatzmöglichkeiten in tragenden Konstruktionen ist, lässt sich feststellen, dass als die maßgebende Eigenschaft die Festigkeit zu betrachten ist. Aus dem Grund bietet sich PVA als das beste Polymer für die Behandlung der rezyklierten Gesteinskörnungen.

Nach der Auswertung der Ergebnisse und ihrem Vergleich mit anderen Ergebnissen anderer Studien kann festgestellt werden, dass diese von bestimmten Parametern abhängig und empfindlich sind. Was die Behandlung mit PVA betrifft, folgende Parameter sind von einer großen Bedeutung:

- die Methode zur Herstellung von Polymeremulsionen,
- die Konzentration der Lösung,
- die Hydrolysegrad.

In Bezug auf die unerwarteten Ergebnisse von PVA-Prüfkörper, hinsichtlich der Wasseraufnahme, wird eine Anpassung der zukünftigen Tests empfohlen, sodass die Wasserlöslichkeit und Konzentration von PVA-Lösungen besser berücksichtigt werden. Dies könnte entweder durch eine Modifikation der Testmethoden oder durch die Auswahl von PVA mit spezifischen Eigenschaften erfolgen, um zuverlässigere und genauere Ergebnisse zu gewährleisten. In dieser Diplomarbeit wurde eine 6% PVA-Lösung verwendet. Es wäre daher sinnvoll, die RG auch unter Verwendung von höherprozentigen PVA-Lösungen zu untersuchen, wie z.B. Verwendung einer 10% PVA-Lösung.

Die Untersuchung der beiden betrachteten Behandlungsparameter ergab, dass der Einfluss von verwendetem Material bzw. Polymertyp einen vielfältigen und signifikanten Einfluss auf die Eigenschaften der RG hat. Im Gegensatz dazu zeigte die Eintauchzeit keine nennenswerten Verbesserungen, was darauf hinweist, dass dieser Faktor eine geringere Rolle bei der Beeinflussung der Eigenschaften der RG spielt. Der Einfluss der Eintauchzeit könnte genauer untersucht werden, indem die Zeitintervalle so gewählt werden, dass sie sich deutlich voneinander unterscheiden. Eine detaillierte Analyse unterschiedlicher, stark variierender Zeitintervalle könnte aufschlussreichere Ergebnisse liefern und den tatsächlichen Einfluss dieses Parameters auf die RG aussagekräftiger verdeutlichen.

Durch die Untersuchung verschiedener wissenschaftlicher Arbeiten konnte festgestellt werden, dass eine Kombination unterschiedlicher Polymere bei der Behandlung der

RG positive Effekte auf deren Eigenschaften haben kann. Aufgrund der verschiedenen Wirkungsmechanismen der Polymere auf bestimmte Eigenschaften der RG kann man davon ausgehen, dass eine gezielte Kombination der in dieser Arbeit verwendeten Polymerreagenzien signifikante Verbesserungen erzielen könnte. Leider lagen weiterführende Untersuchungen zu diesem Thema außerhalb des Rahmens dieser Diplomarbeit. Nichtsdestotrotz wird eine weitere Studie vorgeschlagen, in der unterschiedliche Kombinationen mehrerer Polymere herangezogen werden, um herauszufinden, wie sich die Wirkungsmechanismen unterschiedlicher Polymere auf die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung auswirken.

7 Anhang

7.1 Referenzwerte

7.1.1 Rohdichte und Wasseraufnahme

Tabelle 8 Ermittelte Massen der unbehandelten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes

	M₁ (g)	M₂ (g)	M₃ (g)	M₄ (g)
Probe 1	1326	2821	2025	1263
Probe 2	1336	2823	2028	1266
Probe 3	1251	2726	1993	1180
Mittelwert	1368	2825	2001	1300

7.1.2 Crushing Value

Tabelle 9 Ermittelte Massen der unbehandelten RG für Ermittlung des Crushing Values

	M₁ (g)	M₂ (g)	Crushing Value (%)
Mittelwert	3214	784.5	24.41

7.2 Polyvinylalcohol

7.2.1 Rohdichte und Wasseraufnahme

Tabelle 10 Ermittelte Massen der mit PVA behandelten, getrockneten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes

Eintauchzeit		M₁ (g)	M₂ (g)	M₃ (g)	M₄ (g)
t=0,5h	Probe 1	1326	2821	2025	1263
	Probe 2	1336	2823	2028	1266
t=2h	Probe 1	1251	2726	1993	1180
	Probe 2	1368	2825	2001	1300

7.2.2 Crushing Value

Tabelle 11 Ermittelte Massen der mit PVA behandelten RG für Ermittlung des Crushing Values

Eintauchzeit		M₁ (g)	M₂ (g)	Crushing Value (%)
t=0,5h	Probe 1	3049	630	20.66
	Probe 2	3190	614	19.25
	Mittelwert			19.96
t=2h	Probe 1	3114	622	19.97
	Probe 2	3342	631	18.88
	Mittelwert			19.43

7.3 Silane

7.3.1 Rohdichte und Wasseraufnahme

Tabelle 12 Ermittelte Massen der mit Silane behandelten, getrockneten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes

Eintauchzeit		M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	M ₄ (g)
t=0,5h	Probe 1	1412	2832	1991	1365
	Probe 2	1401	2842	2008	1359
t=2h	Probe 1	1366	2812	2000	1321
	Probe 2	1391	2824	2002	1342

7.3.2 Crushing Value

Tabelle 13 Ermittelte Massen der mit Silane behandelten RG für Ermittlung des Crushing Values

Eintauchzeit		M ₁ (g)	M ₂ (g)	Crushing Value (%)
t=0,5h	Probe 1	3078	700	22,74
	Probe 2	3155	666	21,11
	Mittelwert			21,93
t=2h	Probe 1	3065	611	21,57
	Probe 2	3178	633	19,92
	Mittelwert			20,74

7.4 Siloxane

7.4.1 Rohdichte und Wasseraufnahme

Tabelle 14 Ermittelte Massen der mit Siloxane behandelten, getrockneten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes

Eintauchzeit		M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	M ₄ (g)
t=0,5h	Probe 1	1298	2761	1991	1240
	Probe 2	1284	2766	2008	1225
t=2h	Probe 1	1337	2791	2000	1281
	Probe 2	1385	2825	2002	1320

7.4.2 Crushing Value

Tabelle 15 Ermittelte Massen der mit Siloxane behandelten RG für Ermittlung des Crushing Values

Eintauchzeit		M ₁ (g)	M ₂ (g)	Crushing Value (%)
t=0,5h	Probe 1	3437	712	20,72
	Probe 2	3172	702	22,13
	Mittelwert			21,42
	Probe 1	3204	699	21,82

t=2h	Probe 2	3301	704	21,33
	Mittelwert			21,57

8 Literaturverzeichnis

- [1] "Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien".
- [2] "EUROSTAT, 2020b".
- [3] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, "Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich, Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021." 2023.
- [4] C. R. Gagg, "Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis," *Engineering Failure Analysis*, vol. 40, pp. 114–140, May 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.
- [5] A. Bernhardt, F. Kleemann, C. Neubauer, M. Neubauer, and B. Walter, "Datenanalyse zur Behandlung von mineralischen bau- und Abbruchabfällen in Österreich".
- [6] K. McNeil and T. H.-K. Kang, "Recycled Concrete Aggregates: A Review".
- [7] V. W. Y. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 272–292, May 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240.
- [8] "RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES."
- [9] European Aggregates Association, "UEPG Annual review 2020- 2021."
- [10] European Commission. Joint Research Centre., *Use of recycled aggregates in concrete: opportunities for upscaling in Europe*. LU: Publications Office, 2023. Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/144802>
- [11] "How Zurich Blazed a Trail for Recycled Concrete," *Bloomberg.com*, Sep. 27, 2021. Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-27/using-recycled-concrete-for-sustainable-construction>
- [12] "Holcim and Seqens to build world's first fully recycled concrete building." Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.holcim.com/media/company-news/seqens-first-fully-recycled-concrete-building>
- [13] BauNetz, "Upcycle Studios in Kopenhagen | Nachhaltig Bauen | Wohnen | Baunetz_Wissen," Baunetz Wissen. Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/objekte/wohnen/upcycle-studios-in-kopenhagen-7674826>
- [14] "5 Benefits of Concrete Recycling + 5 Impressive Examples - Arch2O.com." Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.arch2o.com/5-benefits-of-concrete-recycling-5-impressive-examples/>
- [15] "Umweltbildungszentrum, Mainz | Heidelberg Materials Deutschland." Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: <https://www.heidelbergmaterials.de/de/media/referenzobjekte/umweltbildungszentrum-mainz>
- [16] APA, "48er als Vorreiter: Erstmals Einsatz von Recyclingbeton in öffentlichem Bauwerk der Stadt Wien." Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: <https://science.apa.at/power-search/17616701962149857631>
- [17] I. Marie and H. Quiasrawi, "Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates," *Journal of Cleaner Production*, vol. 37, pp. 243–248, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.07.020.

- [18] D. Ürge-Vorsatz and A. Novikova, "Potentials and costs of carbon dioxide mitigation in the world's buildings," *Energy Policy*, vol. 36, no. 2, pp. 642–661, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.enpol.2007.10.009.
- [19] Y. Pu *et al.*, "Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review," *Construction and Building Materials*, vol. 282, p. 122671, May 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122671.
- [20] A. Akhtar and A. K. Sarmah, "Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 262–281, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.085.
- [21] M. Nitka and J. Tejchman, "Meso-mechanical modelling of damage in concrete using discrete element method with porous ITZs of defined width around aggregates," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 231, p. 107029, May 2020, doi: 10.1016/j.engfracmech.2020.107029.
- [22] X. Xu *et al.*, "Potential use of recycled concrete aggregate (RCA) for sustainable asphalt pavements of the future: A state-of-the-art review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 344, p. 130893, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130893.
- [23] C. Shi, Y. Li, J. Zhang, W. Li, L. Chong, and Z. Xie, "Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 466–472, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.057.
- [24] R. Rakesh Kumar Reddy and S. C. Yaragal, "A novel approach for optimizing the processing of recycled coarse aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 368, p. 130480, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130480.
- [25] M. Behera, S. K. Bhattacharyya, A. K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 501–516, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003.
- [26] P. Savva, S. Ioannou, K. Oikonomopoulou, D. Nicolaidis, and M. F. Petrou, "A Mechanical Treatment Method for Recycled Aggregates and Its Effect on Recycled Aggregate-Based Concrete," 2021.
- [27] M. J. McGinnis, M. Davis, A. De La Rosa, B. D. Weldon, and Y. C. Kurama, "Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 154, pp. 258–269, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.015.
- [28] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 37, no. 5, pp. 735–742, May 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.002.
- [29] N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S. K. Panda, S. Nayak, and S. C. Dutta, "A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material," *Construction and Building Materials*, vol. 131, pp. 721–740, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029.
- [30] "ÖNORM B 4710-1:2018".
- [31] "ÖNORM B 3140:2020".
- [32] "EN 206:2017".
- [33] Österreichischer Baustoff-Recycling Verband and Österreichischer Güteschutzverband Recycling-Baustoffe, "Richtlinie für Recycling-Baustoffe".
- [34] "ÖNORM EN 1097-6."

- [35] Shuxia Han, Songbo Zhao, Dong Lu, and Daiyu Wang, "Performance Improvement of Recycled Concrete Aggregates and Their Potential Applications in Infrastructure: A Review," *Buildings*, 2023.
- [36] Y.-G. Zhu, S.-C. Kou, C.-S. Poon, J.-G. Dai, and Q.-Y. Li, "Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 35, no. 1, pp. 32–38, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008.
- [37] Y. S. Horpibulsuk T., A. Arulrajah, M. Mirzababaei, and A. S. Rashid, "Compressive and Flexural Strength of Polyvinyl Alcohol–Modified Pavement Concrete Using Recycled Concrete Aggregates." 2018.
- [38] L. P. Singh, S. R. Karade, S. K. Bhattacharyya, M. M. Yousuf, and S. Ahalawat, "Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1069–1077, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052.
- [39] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, and C. M. Tam, "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 6, pp. 1195–1203, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025.
- [40] C. Shi, Z. Wu, Z. Cao, T. C. Ling, and J. Zheng, "Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry," *Cement and Concrete Composites*, vol. 86, pp. 130–138, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013.
- [41] D. W. Fowler, "Polymers in concrete: a vision for the 21st century q," 1999.
- [42] D. A. S. Sciofani and L. Contrafatto, "Experimental Behaviour of Polyvinyl-Alcohol Modified Concrete," *AMR*, vol. 687, pp. 155–160, Apr. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.687.155.
- [43] A. D. Tegger and V. Spaeth, "Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments," *International Journal of Sustainable Built Environment*, Mar. 2014.
- [44] Shuncheng Xiang *et al.*, "Progress in process parameters and mechanism research of polymer emulsion preparation".
- [45] Ulrich Epple, Martin Geisberger, and Fritz Gartler, "United States Patent: Hydroxyl group-containing polymers, their preparation and use".
- [46] Otten Kathrin, "Untersuchung der Wassertransportmechanismen in hydrophobierten mineralischen Baustoffen".
- [47] "Poly(vinyl alcohol), MW 78000, 88% hydrolyzed (PVA 78K 88%)." Accessed: Nov. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.polysciences.com/german/polyvinyl-alcohol-88-mol-hydrolyzed>
- [48] Römpp, Hermann, A. Eckard, and Falbe, Jürgen, "Römpp-Lexikon Chemie," *Thieme*, 1999 1996.
- [49] T. Yaowarat, S. Horpibulsuk, A. Arulrajah, A. Mohammadinia, and A. Chinkulkijniwat, "Recycled Concrete Aggregate Modified with Polyvinyl Alcohol and Fly Ash for Concrete Pavement Applications," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, no. 7, p. 04019103, Jul. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002751.
- [50] T. Palmer, "Synthese von funktionellen Pfcopolymeren und Mikrogelen auf Polyvinylalkoholbasis durch eine Cer(IV)-initiierte Pfcopolymerisation".
- [51] C. Zhong, P. Tian, Y. Long, J. Zhou, K. Peng, and C. Yuan, "Effect of Composite Impregnation on Properties of Recycled Coarse Aggregate and Recycled Aggregate Concrete," *Buildings*, vol. 12, no. 7, p. 1035, Jul. 2022, doi: 10.3390/buildings12071035.

- [52] S.-C. Kou and C.-S. Poon, "Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 8, pp. 649–654, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.05.003.
- [53] Buttner, T. and Raupach, M., "Durability of Hydrophobic treatments on concrete – results from laboratory tests, Hydrophobe V. In: 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building."
- [54] C. Christodoulou, C. I. Goodier, S. A. Austin, J. Webb, and G. K. Glass, "Long-term performance of surface impregnation of reinforced concrete structures with silane," *Construction and Building Materials*, vol. 48, pp. 708–716, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.038.
- [55] Ing J de Vries and Dr R.B. Polder, "Hydrofobic treatment of concrete," 1997.
- [56] "SilQon OCTEO," Vesta Chemicals bv. Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: <https://vestachem.com/chemicals/octyltriethoxysilane/>
- [57] "BS 812-110:1990".
- [58] "Crushing Value," Virtual Labs.
- [59] "BS 812 Testing aggregates: Part 110: Methods for determination of aggregate crushing value (ACV) 1196."

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Die Abfallhierarchie gemäß der Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) – Prioritätenreihenfolge von Abfallvermeidung bis zur Entsorgung [1]	2
Abb. 2 Übersicht der verschiedenen Abfallarten in EU und Österreich im Jahr 2020 (%) [2].....	2
Abb. 3 Zusammensetzung der Bau- und Abbruchabfällen [3]	3
Abb. 4 Trends im Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen in den Jahren 2017 bis 2021 [3].....	4
Abb. 5 Aufkommen der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle In Österreich in Jahr 2019 [3].....	4
Abb. 6 Produktion von RG in europäischen Ländern im Jahr 2019 (in Millionen Tonnen) [9]	7
Abb. 7 Anteil der Produktion von RG im Vergleich zu NA [9].....	7
Abb. 8 Unterschied zwischen den Matrizen von (a) Beton mit natürlichen Gesteinskörnung und (b) Beton mit rezyklierten Gesteinskörnung [25].....	10
Abb. 9 Aufbringen des Hydrophobierungsmittels auf die Baustoffoberfläche (1), Eindringen Hydrophobierungsmittels in die Poren (2) und hydrophobe Auskleidung der Porenwände durch das Polymer (3) [46]	16
Abb. 10 Strukturformel von Polyvinylalkohol (PVA) [49]	17
Abb. 11 Strukturformel von Polydimethylsiloxane- Siloxane.....	18
Abb. 12 Strukturformel von Triethoxy(octyl)silan- Silane [55]	19
Abb. 13 Sieblinie der unbehandelten RG	23
Abb. 14 Eintauchung von P PVA- Polymeremulsion mit einem elektrischen Mixer ...	25
Abb. 15 Eintauchung von rezyklierter Gesteinskörnungen in Polymeremulsion	26
Abb. 16 Trockenlegung von behandelten RG wurde bei Raumtemperatur zum Trocknen stehen gelassen.....	26
Abb. 17 Ausrüstung für die Durchführung des Versuchs „Crushing Value“	28
Abb. 18 Erster Drittel des Zylinders mit RG gefüllt	28
Abb. 19 Zylinder gefüllt mit der RG und bereit für Druckversuch.....	29
Abb. 20 Links Masse M_1 von RG nach dem Druckversuch und rechts Masse M_2 nach dem Sieben	29
Abb. 21 Pyknometer [34]	31
Abb. 22 Das Sinken der RG im Wasser über einen Zeitraum von 24 Stunden.....	32
Abb. 23 Pyknometer mit RG bereit zum Wiegen	32
Abb. 24 Gesättigte, oberflächentrockene Gesteinskörnung	33
Abb. 25: Einfluss der Eintauchzeit auf die Wasseraufnahme, unter Verwendung von PVA, Silane und Siloxane.....	35
Abb. 26 Einfluss der Eintauchzeiten auf die Festigkeit, unter Verwendung von PVA, Silane und Siloxane.....	38

Abb. 27 Vergleich der prozentuellen Reduktion der Wasseraufnahme bzw. Erhöhung der Festigkeit nach der Behandlung rezyklierter Gesteinskörnung mit verschiedenen Polymeren40

10 Formelverzeichnis

$\rho a = \rho w M_4 M_4 - (M_2 - M_3);$	(1).....	30
$\rho r d = \rho w M_4 M_1 - (M_2 - M_3);$	(2).....	30
$\rho s s d = \rho w M_1 M_1 - (M_2 - M_3).$	(3).....	30
$WA_{24} = M_1 - M_4 M_4 \times 100.$	(4).....	31

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Anwendungsbeispiele von RB	8
Tabelle 2 Methoden zur Verbesserung der Eigenschaften von RG [23]	12
Tabelle 3 Übersicht über die Ergebnisse nach der Behandlung von RG mit 10% Polyvinylalkohol [52]	19
Tabelle 4 Übersicht über die Ergebnisse nach der Behandlung von RG [51]	21
Tabelle 5 Verwendete kommerzielle Polymeremulsionen	24
Tabelle 6 Ermittelte Wasseraufnahme und die prozentuelle Reduktion im Vergleich zum Referenzwert	34
Tabelle 7 Ermittelte Festigkeiten und die prozentuelle Erhöhung im Vergleich zum Referenzwert	37
Tabelle 8 Ermittelte Massen der unbehandelten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes	43
Tabelle 9 Ermittelte Massen der unbehandelten RG für Ermittlung des Crushing Values	43
Tabelle 10 Ermittelte Massen der mit PVA behandelten, getrockneten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes	43
Tabelle 11 Ermittelte Massen der mit PVA behandelten RG für Ermittlung des Crushing Values	43
Tabelle 12 Ermittelte Massen der mit Silane behandelten, getrockneten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes	44
Tabelle 13 Ermittelte Massen der mit Silane behandelten RG für Ermittlung des Crushing Values	44
Tabelle 14 Ermittelte Massen der mit Siloxane behandelten, getrockneten RG für Ermittlung des Wasseraufnahmewertes	44
Tabelle 15 Ermittelte Massen der mit Siloxane behandelten RG für Ermittlung des Crushing Values	44