Diplom-Thesis

Untersuchung der Eignung von Betonrecycling für die Verwendung in lastabtragenden Schotterspeichern

vorgelegt am: <13.08.2025>

von: <Preißler Niklas>
<09619 Mulda>
<Helbigsdorf 58>

Studiengang: <Bauingenieurwesen>

Studienrichtung: <Hochbau>

Seminargruppe: <HB22-2>

Matrikelnummer: <4004972>

Praxispartner: <fellendorf GmbH - Architekten | Ingenieure>
<09112 Chemnitz>
<Falkeplatz 2>

Gutachter: <Dipl.-Ing. (FH) Architekt Mario Agsten (fellendorf GmbH)>
<Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Rosenzweig> (Staatliche Studien-akademie Glauchau)

Freigabeerklärung/Sperrvermerk

Hiermit erklären wir uns einverstanden, dass die ***Diplom-Thesis*** des Studenten

Name, Vorname: ***Preißler Niklas*** SG: ***HB22-2***

zur öffentlichen Einsichtnahme durch den Dokumentenserver der Bibliothek der Staatlichen Studienakademie Glauchau bereitgestellt wird.

Thema der Arbeit:

Untersuchung der Eignung von Betonrecycling für die Verwendung in lastabtragenden Schotterspeichern

Chemnitz 11.08.2025
Ort, Datum

fellendorf GmbH
architekten | ingenieure
Falkeplatz 2 | 09112 Chemnitz | 0371 8329950
architektur@fellendorf.gmbh | www.fellendorf.gmbh
Stempel, Unterschrift des Praxispartners

Arbeit zur Veröffentlichung freigegeben: ja ☒ nein ☐

Datum

Leiter/in des Studienganges

*) Nichtzutreffendes bitte streichen

Festsetzung des Themas der Thesis zur Diplomarbeit

Studierende(r):	Niklas Preißler
Seminargruppe:	4HB22-2
Matrikelnummer:	4004972
Dualer Praxispartner:	fellendorf GmbH

Thema der Diplomthesis:

Untersuchung der Eignung von Betonrecycling für die Verwendung in lastabtragenden Schotterspeichern

Gutachter/in Duale Hochschule: Prof. Dr.-Ing.habil. Tino Rosenzweig

Gutachter/in Dualer Praxispartner: Dipl.-Ing. (FH) Architekt Mario Agsten

Herr Preißler ist gemäß § 18 der Prüfungsordnung für den Studiengang Bauingenieurwesen vom 01.10.2022 zur Diplomarbeit zugelassen. Das o.g. Thema wurde am **21.05.2025** ausgegeben.

Abgabetermin der Thesis: **13.08.2025, 14:00:00 Uhr**

Prof. Ingolf Tiator
Vorsitzender
Prüfungsausschuss Technik

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis V
Tabellenverzeichnis VI
Formelverzeichnis VII
Abkürzungsverzeichnis VIII
1 Einleitung 1
1.1 Motivation und Problemstellung 1
1.2 Ziel der Arbeit und Forschungsfrage 3
1.3 Aufbau der Arbeit 4
2 Theoretische Grundlagen 5
2.1 Schotterspeicher 5
2.1.1 Funktionsweise 8
2.1.2 Dimensionierung 10
2.1.2.1 Überschlägige Vorbemessung 11
2.1.2.2 Rechnergestützte Simulation 11
2.1.2.3 Dimensionierungsrichtwerte 14
2.1.3 Anwendung in der Praxis 15
2.2 Beton 17
2.2.1 Was ist Beton? 17
2.2.2 Dauerhaftigkeit von Beton 18
2.2.2.1 Alkali-Kieselsäure-Reaktion 19
2.2.2.2 Carbonatisierung 20
2.2.2.3 Schädigende Ettringitbildung 21
2.2.3 Betonrecycling 23
3 Methodik 26
3.1 Vorgehen bei der Literaturrecherche 26
3.2 Durchführung der Laboruntersuchungen 27
3.2.1 Auswahl des Materials 27
3.2.2 Ziel der Untersuchungen 28
3.2.3 Versuchsaufbau und Prüfverfahren 28
3.2.4 Dokumentation 31
4 Bewertung der Eignung 32
4.1 Technische Eignung 32
4.1.1 DIN EN 13383 Wasserbausteine 32
4.1.2 Eigenschaften aus der Literatur 34
4.1.3 Eigenschaften aus Laborversuchen 36
4.1.4 Eigenschaften natürlicher Gesteinskörnung 39

4.2 Wärmetechnische Betrachtung 40
4.2.1 Wärmeleitfähigkeiten der Materialien 40
4.2.2 Wärmetechnische Simulation bei Parametervariation 41
4.3 Kostenbetrachtung 42
5 Diskussion 45
5.1 Technische Limitierung beim Einsatz von RC-Material in Schotterspeichern 45
5.2 Chancen und Herausforderungen 46
6 Fazit und Ausblick 49
Quellenverzeichnis 51
Anlagenverzeichnis 55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Zusammensetzung der weltweiten jährlichen CO_2-Emissionen 1
Abbildung 2 Abfallaufkommen 2022..... 2
Abbildung 3 Wärmeerzeugung und Speicherung im Gebäude 5
Abbildung 4 Schotterspeicher unterhalb der Bodenplatte 6
Abbildung 5 Konstruktionsquerschnitt luftdurchströmte Schotterschüttung..... 7
Abbildung 6 Prinzip eines Schotterspeichers 8
Abbildung 7 Lufteintritts- und Luftaustrittstemperaturen im Sommerfall 9
Abbildung 8 Lufteintritts- und Luftaustrittstemperaturen im Winterfall 10
Abbildung 9 Hauptmaske Simulationsprogramm 13
Abbildung 10 Maske Zeitverlauf..... 13
Abbildung 11 Zusammensetzung von Beton..... 17
Abbildung 12 Betonaufbruch beim Abbruch einer alten Fahrbahndecke (links) und Betonabbruch beim Rückbau eines Mehrfamilienhauses in Plattenbauweise (rechts)..... 23
Abbildung 13 Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 nach DIN 4226-101 24
Abbildung 14 Verteilung des in Recyclinganlagen gelieferten Betonabbruchs nach alten Festigkeitsklassen 25
Abbildung 15 Zwischenlagerung des Betonrecycling-Materials 27
Abbildung 16 Waage mit angehängtem Drahtkorb im wasserdichten Behälter..... 29
Abbildung 17 RC-Gesteinskörnung im Wasserbad..... 29
Abbildung 18 Anforderung an die Steinform 33
Abbildung 19 Anforderung an den Widerstand gegen Brechen 34
Abbildung 20 Streubreiten der Rohdichten (links) und Wasseraufnahme (rechts)..... 34
Abbildung 21 Rohdichte (links) und Wasseraufnahme (rechts) der untersuchten Gesteinskörnungen 35
Abbildung 22 Rohdichte der Laborproben in g/cm³..... 37
Abbildung 23 Wasseraufnahme der Laborproben in M.-%..... 38
Abbildung 24 Prinzip der Luft-Luft-Systemtrennung im Tiergarten Schönbrunn ... 47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Zuordnung der Druckfestigkeitsklassen 25
Tabelle 2 Anforderungen der DIN EN 13383-1:2002 33
Tabelle 3 Platten und Borde aus Naturstein – Biegefestigkeit/Wasseraufnahme 39
Tabelle 4 Vergleich der Temperaturausgänge 42
Tabelle 5 Angaben Schotterspeicher aus dem Praxisbeispiel 43
Tabelle 6 Kostenberechnung 43

Formelverzeichnis

Formel 1 Speichervolumen 14
Formel 2 Investitionskosten 14
Formel 3 Chemische Reaktion der Carbonatisierung 20
Formel 4 Berechnung Rohdichte 31
Formel 5 Berechnung Wasseraufnahme 31

Abkürzungsverzeichnis

AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
BA	Berufsakademie
CO_2	Kohlenstoffdioxid
DHSN	Duale Hochschule Sachsen
DIN EN	Deutsches Institut für Normung – Europäische Norm
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GOK	Geländeoberkante
RC	Recycling
w/z	Wasser/Zement

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Die Bauwirtschaft steht im Zentrum zahlreicher aktueller Umweltdebatten. Sie ist nicht nur für eine erhebliche Menge an CO_2-Emissionen verantwortlich, sondern auch für den größten Anteil am jährlichen Abfallaufkommen in Deutschland. Laut einem Bericht der Vereinten Nationen entfallen 38 % der gesamten Emissionen auf den Gebäude- und Bausektor[1]. Diese setzen sich zusammen aus 28 % für den Betrieb von Gebäuden sowie 10 % für die Bauprodukteherstellung und Bauausführung. Innerhalb dieser 10 % entfallen 9,6 % allein auf die Produktion und den Transport von Baustoffen wie Zement oder Stahl, während die eigentliche Bauausführung lediglich 0,4 % ausmacht.[2]

Die oft genannte Zahl von 38 % CO_2-Anteil der Bauwirtschaft ist daher differenziert zu betrachten. Sie bezieht auch den Gebäudebetrieb mit ein, für den nicht allein die Bauausführung verantwortlich ist. Dennoch verdeutlicht diese Zahl die erhebliche Verantwortung der Bau- und Gebäudebranche im Klimaschutz. Dieser Umstand spiegelt sich in den ambitionierten Zielen der EU-Gebäuderichtlinie zur Dekarbonisierung des Gebäudebestands bis 2050 wider[3].

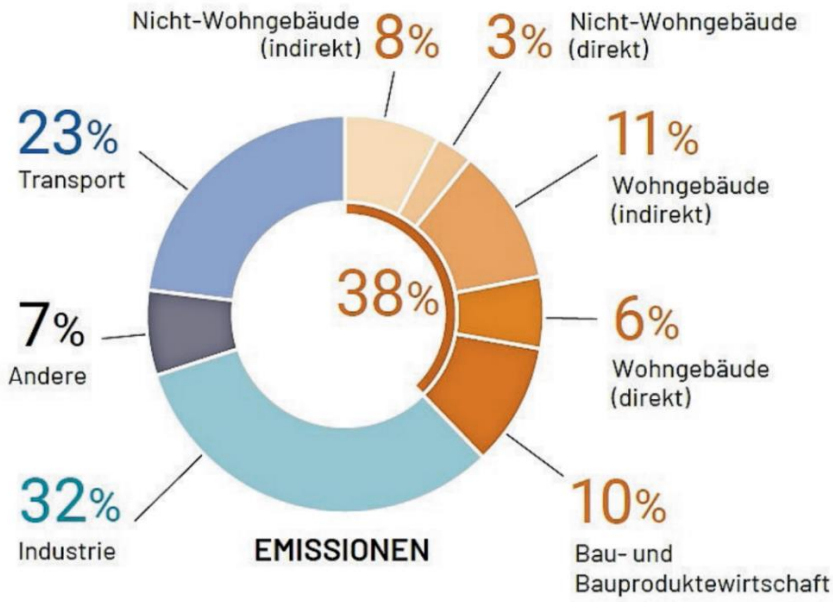


Abbildung 1 Zusammensetzung der weltweiten jährlichen CO_2-Emissionen (ROSENBERGER, 2024, S. 19)

[1] vgl. HAMILTON; u.a., 2020, S. 4
[2] vgl. online: ROSENBERGER, 2024 (30.06.2025)
[3] vgl. Europäische Union: Richtlinie (EU) 2024/1275 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden

Noch deutlicher zeigt sich die Belastung beim Thema Abfall: Laut dem Statistischen Bundesamt fielen im Jahr 2022 insgesamt 399 Millionen Tonnen Abfall in Deutschland an. Davon entfielen über 54% auf Bau- und Abbruchabfälle. Diese mehr als 215 Millionen Tonnen stellen nicht nur eine logistische, sondern auch eine ökologische Herausforderung dar. Gleichzeitig steckt in diesen mineralischen Bauabfällen ein enormes Potenzial zur Wiederverwendung.[4]

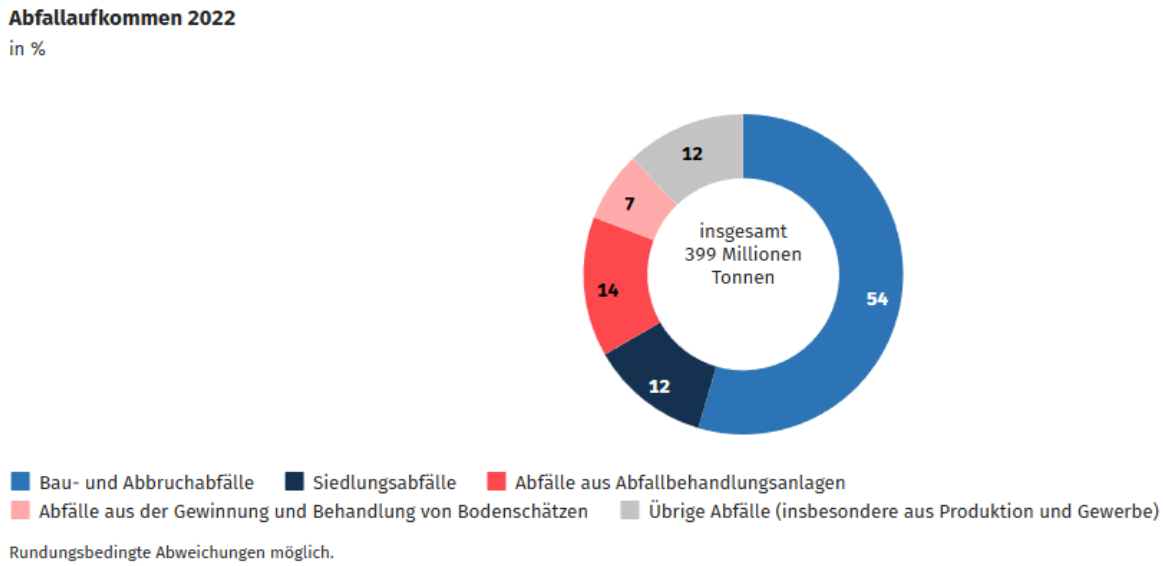


Abbildung 2 Abfallaufkommen 2022
(Statistisches Bundesamt, 2024)

In diesem Kontext rückt die Frage nach zukunftsfähigen Recyclinglösungen im Bauwesen in den Fokus. Vor allem das Recycling von Beton bietet eine Möglichkeit, natürliche Gesteinsressourcen zu schonen und gleichzeitig den CO_2-Fußabdruck durch eingesparte Transportwege, reduzierte Abfallmengen und geringere Zementproduktion zu senken. Doch trotz vieler Ansätze ist der Einsatz von Recyclingbeton bislang auf wenige Anwendungsfelder beschränkt.

Ein bisher wenig untersuchter Einsatzbereich ist die Nutzung von RC-Beton in sogenannten Schotterspeichern, welches ein System der Wärmespeicherung darstellt. Für solche Speicher müssen jedoch einige Anforderungen erfüllt werden. Dadurch stellt sich die zentrale Frage, ob RC-Beton diesen Ansprüchen gerecht werden kann.

[4] vgl. online: Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz, und nukleare Sicherheit, 2024 (30.06.2025)

1.2 Ziel der Arbeit und Forschungsfrage

Angesichts der zuvor beschriebenen Herausforderungen im Bauwesen besteht das Ziel dieser Arbeit darin, das technische und wirtschaftliche Potenzial von Betonrecyclingmaterial für eine neuartige und bislang wenig erforschte Anwendung in Schotterspeichern zu bewerten.

Dabei sollen sowohl die bauphysikalischen Eigenschaften als auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen betrachtet und mit denen herkömmlicher Materialien wie Natursteinschotter verglichen werden. Ein besonderer Fokus liegt auf der Frage, ob RC-Beton die Funktion der Wärmespeicherung technisch erfüllen kann. Gleichzeitig wird untersucht, ob der Einsatz von Recyclingmaterial auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten einen nachhaltigen Lösungsansatz für zukünftige Bauprojekte bietet.

Im Zentrum der Untersuchung steht daher folgende Forschungsfrage: Inwiefern eignet sich Recycling-Beton als Ersatz für konventionellen Natursteinschotter in lastabtragenden Schotterspeichern hinsichtlich mechanischer Eignung, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit?

Zur Beantwortung dieser übergeordneten Frage werden im Rahmen der Arbeit mehrere Teilfragen betrachtet:

- Welche bauphysikalischen Eigenschaften weisen recycelte Betonkörnungen im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen auf?
- Erfüllt RC-Beton die normativen Anforderungen der DIN 13383-1:2002 für Wasserbausteine?
- Welche wirtschaftlichen Vor- und Nachteile ergeben sich durch die Nutzung von Recyclingmaterial?

Die Arbeit ist somit anwendungsorientiert als auch grundlagenbezogen ausgerichtet und liefert einen Beitrag zur praktischen Bewertung eines alternativen Wärmespeichersystems im Hinblick auf nachhaltiges Bauen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in sechs aufeinander aufbauende Kapitel gegliedert.

Kapitel 2 behandelt die theoretischen Grundlagen der Arbeit. Zunächst wird der Schotterspeicher hinsichtlich seines Aufbaus, seiner Funktionsweise, der Dimensionierung sowie anhand ausgewählter Praxisanwendungen beschrieben. Anschließend erfolgt eine Auseinandersetzung mit dem Baustoff Beton. Dabei werden sowohl relevante schädigende Prozesse im Rahmen der Dauerhaftigkeit als auch die normativen und stofflichen Grundlagen von Recycling-Beton behandelt.

Kapitel 3 stellt die Methodik der Arbeit vor. Zunächst wird auf die Herangehensweise bei der Literaturrecherche eingegangen. Anschließend werden die durchgeführten Laboruntersuchungen detailliert erläutert. Dabei wird das verwendete Material vorgestellt, die Zielstellung der Untersuchungen definiert sowie der Versuchsaufbau inklusive der eingesetzten Prüfverfahren beschrieben. Abschließend erfolgt eine Darstellung der Dokumentation.

Kapitel 4 widmet sich der Bewertung der Eignung von Betonrecyclingmaterial als Füllmaterial für Schotterspeicher. In einem ersten Schritt erfolgt die technische Einordnung anhand normativer Vorgaben, Literaturangaben und eigener Laborergebnisse. Diese werden zusätzlich den Eigenschaften natürlicher Gesteinskörnungen gegenübergestellt. Daran anschließend wird das wärmetechnische Verhalten der Materialien analysiert, wobei die Wärmeleitfähigkeit und die Rohdichte im Rahmen einer Parametervariation in einer Simulation betrachtet werden. Abschließend erfolgt eine qualitative Betrachtung der Kosten, um auch wirtschaftliche Aspekte bei der Materialwahl zu berücksichtigen.

Kapitel 5 behandelt die Diskussion der Ergebnisse. Zunächst werden die technischen Limitierungen beim Einsatz von RC-Material in Schotterspeichern analysiert und kritisch bewertet. Anschließend werden die sich aus der Arbeit ergebenden Chancen und Herausforderungen herausgearbeitet. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem Potenzial der Systemtrennung zwischen Schotterspeicher und Lüftungseinheit, wodurch sich neue Einsatzmöglichkeiten für RC-Materialien ergeben könnten. Auch technologische Weiterentwicklungen wie die Anbindung an Wärmepumpen oder alternative Wärmetauschsysteme werden thematisiert.

Abschließend liefert Kapitel 6 ein Fazit mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse, einer Bewertung der Forschungsfrage sowie Handlungsempfehlungen für Forschung, Praxis und Normung. Zudem werden mögliche Fragestellungen für künftige Untersuchungen benannt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Schotterspeicher

In dem Gebiet der technischen Gebäudeausrüstung zählt das System der thermischen Speicherung zum jetzigen Stand der Technik, um konventionelle Wärmeerzeuger zu unterstützen. Besonders durch die Zunahme der Verwendung erneuerbarer Energien aufgrund des GEG sowie die steigenden Anforderungen an das Wärmemanagement haben Wärmespeichersysteme eine hohe Relevanz bei der Planung heutiger Gebäude. Aus Abbildung 3, welchen den Dreiklang zwischen Wärmeerzeugung, thermischen Speicher und dem Gebäude übersichtlich darstellt, wird ersichtlich, dass der Speicher sowohl Energie vom Wärmeerzeuger aufnimmt als auch dem Gebäude wieder zuführt. Er fungiert demnach unterschiedlich als Sender und Empfänger von Energie. Neben den klassischen Wärmeerzeugern gehört die Möglichkeit, durch eine Klimaanlage das Gebäude zu temperieren, heutzutage zum gängigen Stand der Technik. Auch bei Lüftungssystemen können durch Speichermöglichkeiten Effizienzgewinne durch die Senkung der installierten Wärmeerzeugerleistung ermöglicht werden. Hierbei stellt das System des Schotterspeichers eine Möglichkeit dar, die RLT-Anlage zu unterstützen.[5]

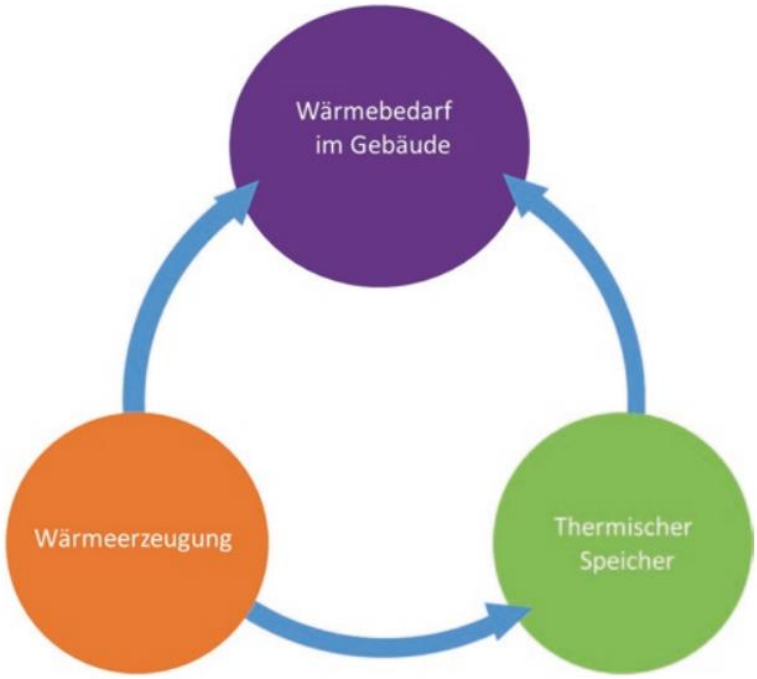


Abbildung 3 Wärmeerzeugung und Speicherung im Gebäude
(GOEKE, 2021, S.5)

[5] vgl. GOEKE, 2021, S. 5 f.

Abbildung 4 Schotterspeicher unterhalb der Bodenplatte
(https://www.ibfht.de/schotterspeicher, 02.07.2025)

Gemäß Patent handelt es sich um einen „luftdurchströmten Speicher zur Speicherung von regenerativer Umgebungsenergie der Außenluft mit dem Ziel, klassische Luftaufbereitungsanlagen in der zentralen Lüftungstechnik so zu unterstützen, dass konventionell bereitgestellte Heiz- und Kühlenergie teilweise bzw. vollständig durch die Umgebungsenergie der Außenluft substituiert wird“[6]. Diese luftdurchströmten Schotterschüttungen stellen vor allem bei mittleren bis großen Luftvolumenströmen einen geeigneten Kompromiss dar.

Zu den wesentlichen Vorteilen nach Herrn Reichel gehören:[7]

- Vorwärmung im Winterbetrieb (reduziertes Frostrisiko an WRG)
- Im Sommer Luftkühlung mit sporadischer Entfeuchtung

Weitere Vorteile bestehen in:[8]

- einem einfachen Aufbau und Integration in den Baukörper
- der Regel preisgünstigen Erstellung
- hohen Energiegewinnen und geringen energetischen Aufwendungen für Lufttransporte

[6] REICHEL; STIEBER, 2008
[7] vgl. TROGISCH; REICHEL, 2020, S.500
[8] vgl. REICHEL, 2011a

Der Schotterspeicher weist typischerweise eine Quaderform auf, wobei seine Dimensionierung maßgeblich durch den erforderlichen Luftvolumenstrom sowie die geplante Lade- und Entladezeit bestimmt wird. Er wird unterhalb der Geländeoberkante eingebaut, wobei darauf geachtet werden muss, dass der gesamte Speicherbereich über dem höchsten zu erwartenden Grundwasserspiegel liegt, um eine Beeinträchtigung durch aufsteigendes und eindringendes Grundwasser auszuschließen. Je nach Einsatzort kann der Speicher entweder unter Freiflächen oder unter Gebäuden installiert werden, wobei in letzterem Fall eine thermische Trennung zum Bauwerk mit Hilfe einer Überdeckungskonstruktion sicherzustellen ist, da es sonst zu einem thermischen Kurzschluss kommt. Seitlich wird der Speicher von Luftverteil- und Luftsammelsystemen eingefasst. Um ein Eindringen von Niederschlags- oder Sickerwasser zu verhindern, wird die obere Begrenzung des Speichers mit einer wasserdichten Abdeckung, beispielsweise mit einem Geotextil, versehen. Die Außenluft zur Gebäudebelüftung wird über eine Ansaugöffnung aufgenommen und anschließend durch die Hohlräume im Schotterbett geleitet. Am Austritt des Speichers wird die durch den thermischen Kontakt vorgewärmte oder gekühlte Luft gesammelt und dem Lüftungssystem des Gebäudes zugeführt. Der Ventilator der Lüftungsanlage gleicht dabei die Druckverluste aus, die durch den Luftdurchtritt entstehen. Zur Regeneration des Speichers wird ein separater Ventilator eingesetzt, der die Außenluft durch das Schotterbett leitet. Während dieses Vorgangs wird die Frischluftversorgung des Gebäudes über einen Bypass oder eine alternative Zuluftführung sichergestellt. Wasser, das sich im Bereich des Speichers ansammelt, beispielsweise durch Schichtenwasser, wird über ein Drainagesystem gezielt abgeführt.[9]

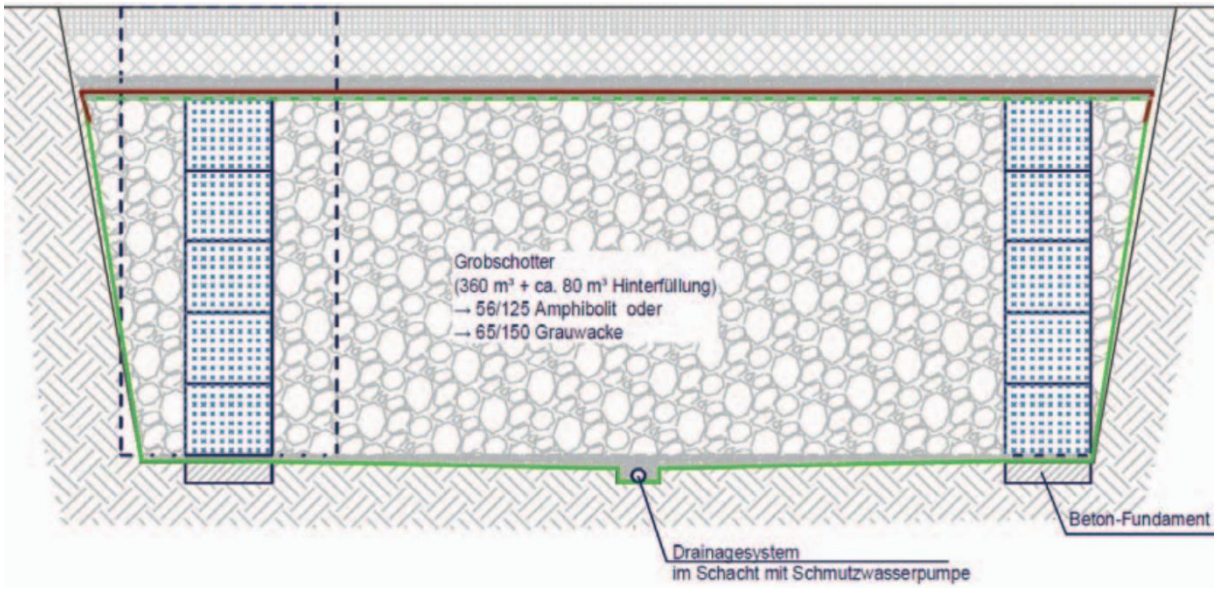


Abbildung 5 Konstruktionsquerschnitt luftdurchströmte Schotterschüttung (REICHEL, 2017, S.31)

[9] vgl. TROGISCH; REICHEL, 2020, S. 501 f.

2.1.1 Funktionsweise

Mario Reichel beschreibt die Funktionsweise eines Schotterspeichers in seinem Artikel „Aufbau, Funktion und Betriebserfahrungen mit luftdurchströmten Schotterschüttungen (Schotterspeichern)“ differenziert anhand verschiedener Jahreszeiten und Betriebszustände. Je nach thermischer Auslegung und äußeren Bedingungen unterscheidet er zwischen einem Sommer-, Winter- und Übergangsbetrieb.[10]

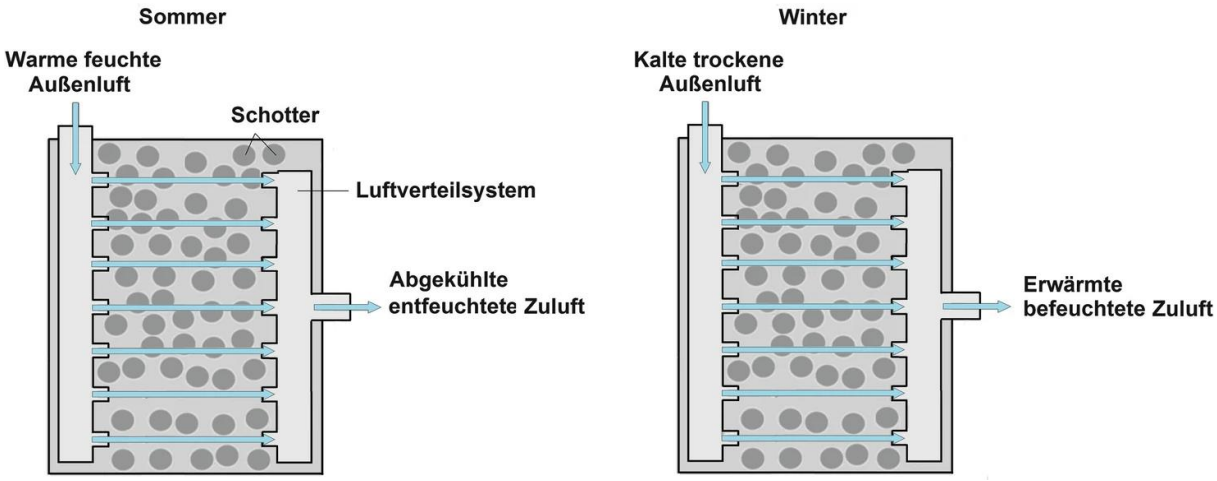


Abbildung 6 Prinzip eines Schotterspeichers
(DEHLI, 2020, S.263)

Im Sommerbetrieb wird die tagsüber einströmende, warme Außenluft durch das Schotterbett geleitet. Der im Speicher eingelagerte Gesteinskörper absorbiert einen Teil der thermischen Energie der Luft. Infolge dieses Prozesses sinkt die Temperatur der Luft spürbar ab, sodass sie unmittelbar also ohne zusätzliche Kühlung im RLT-Gerät für die Raumluftversorgung genutzt werden kann. In den Nachtstunden erfolgt die sogenannte Regeneration des Speichers: Hierbei wird kühlere Nachtluft durch das Schotterbett geführt, wodurch die gespeicherte Wärme aus dem System wieder abgeführt wird.

Der Winterbetrieb funktioniert umgekehrt: Kalte Außenluft wird zunächst in der Nacht durch das Schottermaterial geleitet, wobei sie sich auf das gespeicherte Temperaturniveau des vorherigen Tages erwärmt. Die so temperierte Luft kann anschließend im Lüftungsgerät auf die benötigte Zulufttemperatur gebracht und den Räumen zugeführt werden. Während der Tagesstunden dient der Außenluftstrom zusätzlich der Regeneration des Speichers, indem frische Außenluft das Gestein auf das Tagestemperaturniveau anpasst und so den Speicher wieder etwas erwärmt.[11]

[10] vgl. REICHEL, 2017, S. 31 f.
[11] vgl. DEHLI, 2020, S. 263 f.

In der sogenannten Übergangsperiode, typischerweise im Frühjahr oder Herbst, kann das System flexibel reagieren. Abhängig vom jeweiligen Außenklima sind sowohl Betriebsarten zur Kühlung als auch zur Vorwärmung möglich. Es können somit bis zu vier unterschiedliche Betriebsmodi im Tagesverlauf durchlaufen werden.

Diese Betriebsstrategie erlaubt eine weitgehend passive und energieeffiziente Luftkonditionierung, wodurch nicht nur Primärenergie eingespart, sondern auch nachgeschaltete Klimatisierungseinheiten kleiner dimensioniert werden können.[12]

Wie in Abbildung 7 dargestellt, zeigt ein real gemessener Temperaturverlauf im Sommerbetrieb deutlich die Wirkung des Schotterspeichers. Während die einströmende Außenluft über den Tag bis zu 31 °C erreicht, kann die Austrittstemperatur durch die thermische Aufbereitung um bis zu 10 k gesenkt werden. Dies verdeutlicht das Potenzial der Kühlung im Sommerbetrieb.

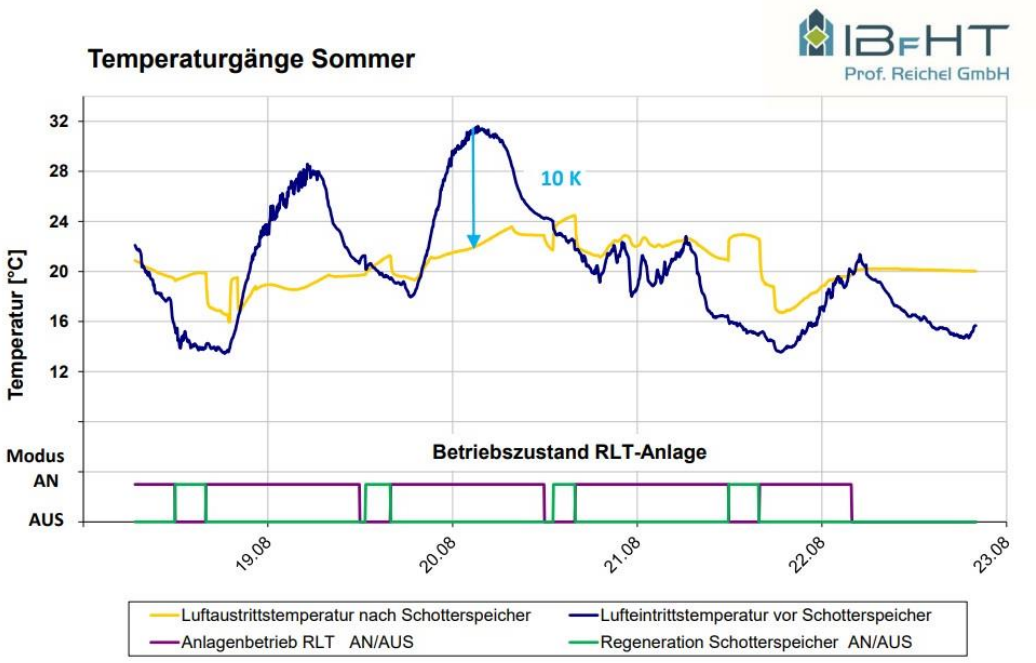


Abbildung 7 Lufteintritts- und Luftaustrittstemperaturen im Sommerfall
(online: https://www.ibfht.de/upload/0-sommer-schotterspeicher.pdf, 25.07.2025)

Auch im Winterbetrieb lässt sich anhand gemessener Temperaturverläufe erkennen, dass die Luft beim Durchströmen des Schotterspeichers effektiv vorgewärmt wird. In einem dokumentierten Praxisbeispiel lag die einströmende Außenlufttemperatur bei bis zu -15 °C, während die Luftaustrittstemperatur nach Passieren des Speichers um

[12] vgl. REICHEL, 2011a

bis zu 10 k höher war. Das folgende Diagramm verdeutlicht die Lufttemperaturverläufe sowie den Anlagenbetrieb über einen Zeitraum von sechs Tagen:

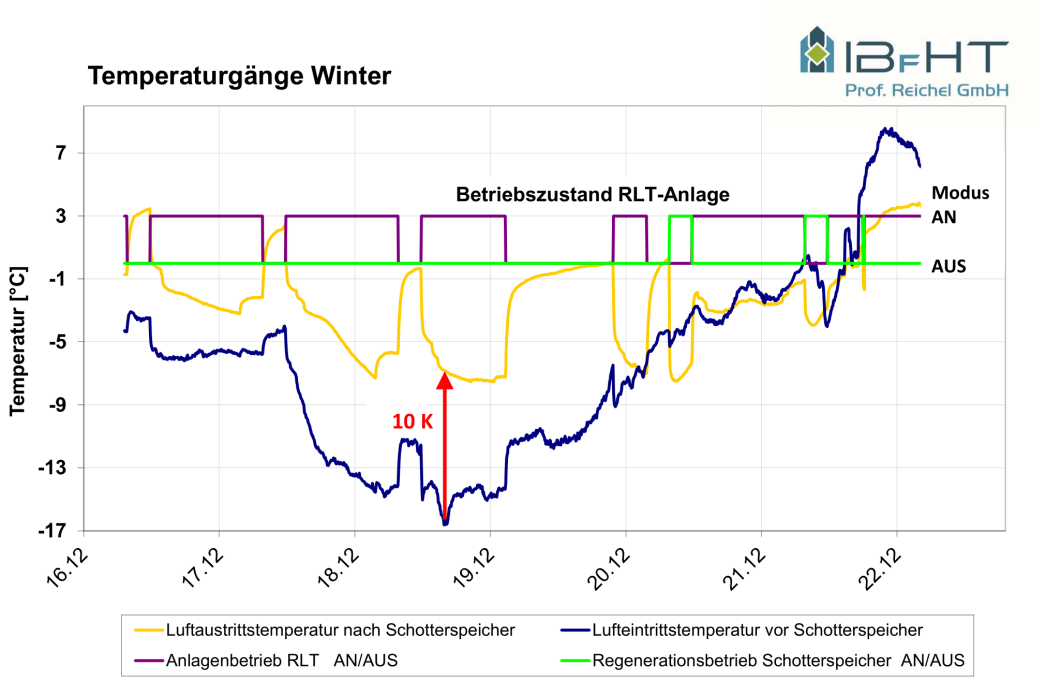


Abbildung 8 Lufteintritts- und Luftaustrittstemperaturen im Winterfall
(online: https://www.ibfht.de/upload/0-winter-schotterspeicher.pdf, 25.07.2025)

2.1.2 Dimensionierung

Die Dimensionierung luftdurchströmter Schotterspeicher erfordert eine detaillierte Planung, um den energetischen Anforderungen des jeweiligen Einsatzfalls gerecht zu werden. Wie Mario Reichel in seinem Forschungsbeitrag „Luftdurchströmte Schotterschüttungen – Effizienzerhöhung in RLT-Anlagen“ in DIE KÄLTE + Klimatechnik erläutert, basiert die Auslegung in der Praxis auf einem zweistufigen Verfahren: einem überschlägigen Vorbemessungsverfahren zur ersten Abschätzung und einer darauf aufbauenden numerischen Simulation zur Feinabstimmung und energetischen Optimierung.[13]

[13] vgl. REICHEL, 2011a

2.1.2.1 Überschlägige Vorbemessung

Im ersten Schritt wird eine Grobauslegung anhand eines festgelegten Auslegungsszenarios vorgenommen. Dabei wird ein typischer heißer Sommertag mit stark schwankendem Temperaturverlauf als Grundlage herangezogen. Der Fokus liegt auf dem Kühllastfall, um die Fähigkeit des Systems zur Luftkonditionierung zu überprüfen. In dieser Phase werden verschieden Schottervolumina simulativ mit definierten Luftvolumenströmen kombiniert und die resultierenden Austrittstemperaturgänge analysiert. Ziel ist es, die optimale Kubatur des Schotterbetts zu bestimmen, die ein Maximum an Kältebedarfsdeckungsgrad liefert.

Für diese Abschätzung gelten standardisierte Randbedingungen:

- festgelegter Tagesgang der Außentemperatur gemäß DIN 4710:2003-01[14]
- Soll-Austrittstemperatur aus dem Schotterspeicher
- Ausgangstemperatur des Schottermaterials
- Gesteinsart und Kornverteilung

Herr Reichel betont, dass der Einfluss der Gesteinsart auf die Leistung des Systems im Verhältnis zu anderen Faktoren gering ist, solange die Luftvolumenströme identisch bleiben. Daher lassen sich die Ergebnisse des vereinfachten Auslegungsverfahrens in der Regel auf verschiedene Gesteinssorten übertragen.[15]

2.1.2.2 Rechnergestützte Simulation

Die detaillierte Auslegung erfolgt auf Basis einer numerischen Simulation, die das thermische Verhalten des Speichers über mehrere Tage hinweg abbildet. Dabei wird ein instationärer Temperaturverlauf über mindestens vier Tage simuliert, um Einflüsse durch Einschwingprozesse zu minimieren. Die Auswertung erfolgt ab dem dritten Tag (Betriebsstunde 72 bis 96), da hier ein quasistationärer Zustand erreicht ist.

Die Simulation berücksichtigt unter anderem:

- die dynamische Kopplung von Tag und Nachttemperaturen
- die Luftaustrittstemperaturen zu jeder vollen Stunde
- die Enthalpiedifferenz als Maß für den Kältegewinn
- die Betriebszeit der Anlage

[14] vgl. Norm DIN 4710, S. 52 ff.
[15] vgl. REICHEL, 2011a

Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Phasenverschiebung zwischen maximaler Außentemperatur und minimaler Austrittstemperatur. Daran ist die höchste mögliche Kälteleistung erkennbar.[16]

Als Basis für die dazu verwendete Software steht das wärmetechnische Simulationsmodell nach Bernd Glück frei im Internet zur Verfügung. In diesem ist es möglich, aus verschiedenen Eingabedaten die Temperatur- und Feuchteverläufe für bestimmte Entwurfstage zu simulieren und auf dessen Grundlage energetische Gewinne zu berechnen. Die Hauptanwendungsgebiete des Modells bestehen in der Trenduntersuchung mithilfe der Parametervariation sowie in der Untersuchung zur Betriebsoptimierung. Die Eingabedaten bestehen aus den Werten des Speichermaterials, den Speicherabmessungen, den Daten zum Simulationsablauf, Eingaben für die spezielle Untersuchung zum Zustand längs des Speichers sowie der Eingabe der Tagestemperatur- und Feuchteverläufe für einen vordefinierten Entwurfstag. Im Bericht „Luftdurchströmter Schotterspeicher – Wärmetechnisches Simulationsmodell“ von Bernd Glück aus dem Jahr 2007 ist das Modell samt deren Aufbau und Funktionalität detailliert erklärt und die Anwendung an einem realen Beispiel nachvollzogen. Die detaillierte Beschreibung des Modells und deren Hintergrundmodellierung würde aufgrund der Komplexität den Rahmen der Arbeit sprengen und wird deshalb nicht weiter betrachtet.[17]

Nach Angaben von Mario Reichel, übermittelt im Rahmen eines telefonischen Fachgesprächs, liegt bei der IBFHT Prof. Reichel GmbH derzeit eine jahreszeitlich vollständige Simulation des Schotterspeichersystems vor. Eine Veröffentlichung dieser Daten steht bislang jedoch aus.[18]

Auf der folgenden Seite sind die Hauptmaske für die Dateneingabe sowie die Maske für die Eingabe der Zeitverläufe des Modells nach Bernd Glück dargestellt. Diese wurden im Rahmen der Arbeit zur Parametervariation der Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit herangezogen.

[16] vgl. REICHEL, 2011a
[17] vgl. GLÜCK, 2007
[18] vgl. REICHEL 2025

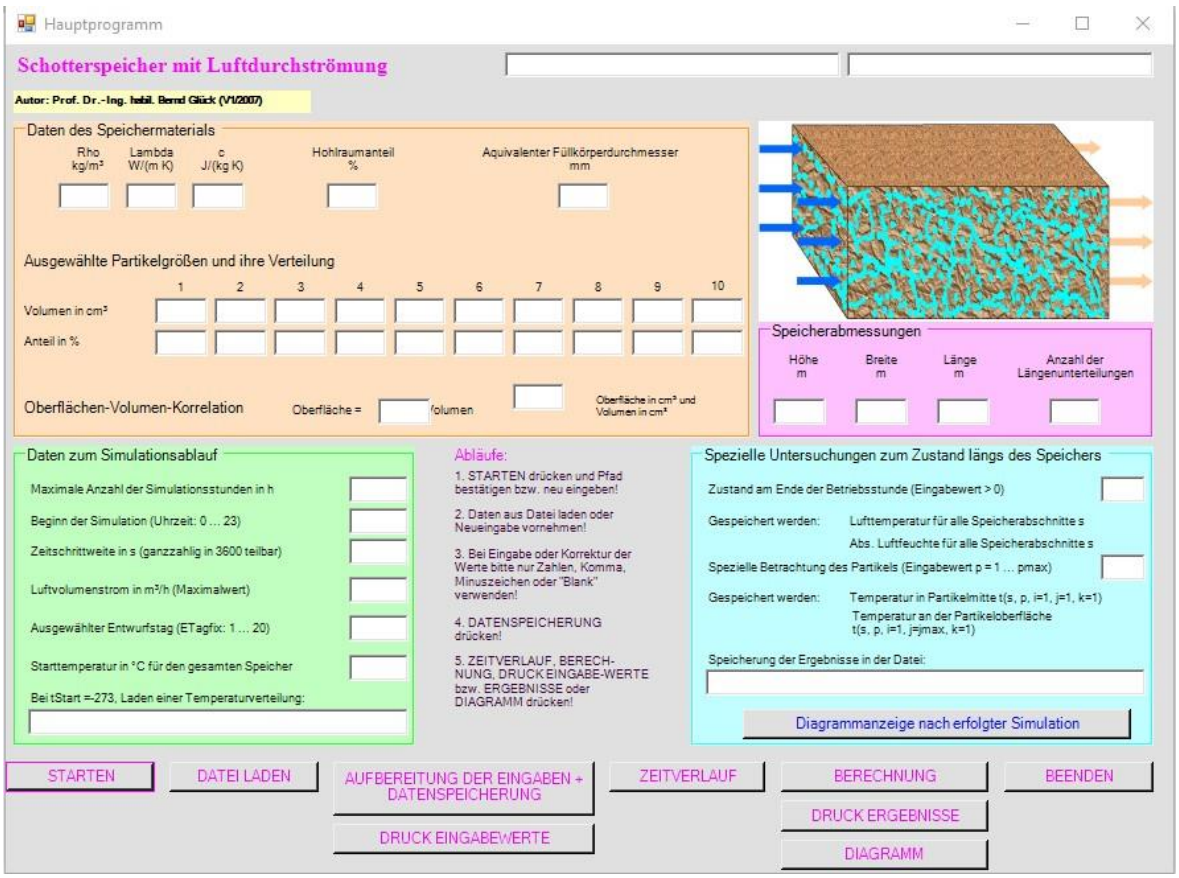


Abbildung 9 Hauptmaske Simulationsprogramm
(Programm aus Internetquelle, https://berndglueck.de/schotterspeicher.php, 23.07.2025)

Abbildung 10 Maske Zeitverlauf
(Programm aus Internetquelle, https://berndglueck.de/schotterspeicher.php, 23.07.2025)

2.1.2.3 Dimensionierungsrichtwerte

Zur Orientierung können folgende Richtwerte für die Vorplanung verwendet werden:

$$Vs = Vl/120$$

Formel 1 Speichervolumen

Legende

Vs	Speichervolumen [m³]
Vl	Luftvolumenstrom [m³/h]

- Höhe des Speichers zwischen 1,5 m und 4 m
- Breite des Speichers zwischen 1 bis 3 mal die Speicherlänge
- Länge des Speichers (in Strömungsrichtung) 4 m bis 7 m

Die entsprechenden Investitionskosten werden wie folgt berechnet:

$$Investitionskosten\ netto\ [€] = Vs * 300\ [€/m^3]$$

Formel 2 Investitionskosten

Legende

Vs	Speichervolumen [m³]

Diese Zahlen dienen der wirtschaftlichen Abschätzung und müssen projektspezifisch angepasst werden.[19]

Luftdurchströmte Schotterspeicher zeichnen sich durch eine hohe energetische Effizienz aus. Im Kühlbetrieb kann die Temperatur der Außenluft um bis zu 10 Kelvin gesenkt werden, während im Winter eine Vorwärmung um bis zu 5 Kelvin erzielt werden kann. Die dabei erreichte Leistungszahl (COP) liegt typischerweise bei über 10, was auf einen sehr geringen Energieeinsatz bezüglich des erzielten Effektes hinweist.

In Bezug auf die Einsparpotenziale zeigen Simulationen und Messergebnisse, dass bis zu 80 bis 90 % des Jahreskälteenergiebedarfs durch den Speicher gedeckt werden können. Auch beim Heizenergiebedarf lassen sich durch die Vorwärmung der Zuluft 5 bis 15 % einsparen. Neben den ökonomischen Vorteilen sind auch ökologische Aspekte beachtlich: Pro Kubikmeter Schottervolumen lassen sich jährlich bis zu 150 Kilogramm CO_2 einsparen. Diese Werte verdeutlichen den Beitrag, den Schotterspeicher zur Reduktion von Betriebskosten und Emissionen leisten können.[20]

[19] vgl. REICHEL, 2017
[20] vgl. REICHEL, 2017

2.1.3 Anwendung in der Praxis

Ein besonders gut dokumentiertes Anwendungsbeispiel luftdurchströmter Schotterspeicher findet sich im Rahmen eines Pilotprojektes zur Klimatisierung einer Produktionshalle in Mittelsachsen. Ziel des Projektes war es, die Wirksamkeit eines erdgekoppelten Schotterspeichersystems zur thermischen Vorkonditionierung der Zuluft im realen Betrieb zu evaluieren und mit den theoretischen Erkenntnissen abzugleichen. Dabei standen vor allem energetische Effizienz, technische Umsetzbarkeit und lufthygienische Aspekte im Fokus.

Der Schotterspeicher wurde platzsparend unterhalb der Bodenplatte der neu zu errichtenden Halle integriert. Mit einem Luftvolumenstrom von 30000 m³/h ist die Anlage für größere industrielle Anwendungen ausgelegt. Der Speicher selbst besitzt eine quaderförmige Geometrie mit den Abmessungen 2,5 m (Höhe) x 14,0 m (Breite) x 6,5 m (Länge), was einem Gesamtvolumen von etwa 227,5 m³ entspricht. Als Speichermedium wurde Metagrauwacke in einer Korngrößenverteilung von 45/150 mm eingesetzt. Der Gesteinskörper wurde nicht hermetisch vom umgebenden Erdreich getrennt, jedoch durch ein Geotextil stofflich abgeschirmt. Die Anbindung an das Luftleitungssystem erfolgte über monolithisch ausgeführte Zuluftschächte.[21]

Die Anlage wurde über einen Zeitraum von anderthalb Jahren kontinuierlich überwacht. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Zulufttemperatur regelmäßig deutlich unter der Außenlufttemperatur lag und somit der Speicher im Sommerbetrieb signifikant zur Luftkühlung beiträgt.

Die Jahresauswertung zeigte ein hohes Maß an Energieeffizienz. Bei einer eingesparten thermischen Energie von rund 18,9 MWh musste lediglich ein elektrischer Mehraufwand von 1,415 kWh für den Betrieb der Ventilatoren aufgebracht werden. Daraus resultiert eine Jahresarbeitszahl von 13,3. Dieser Wert liegt deutlich über dem Durchschnitt klassischer Kälteanlagen. Die Einbindung des Speichers ermöglichte demnach eine weitgehende Deckung des sommerlichen Kältebedarfs sowie eine Reduktion des Heizenergiebedarfs im Winter.[22]

Das Praxisbeispiel belegt die technische und energetische Machbarkeit des Einsatzes luftdurchströmter Schotterspeicher in industriellen Anwendungen. Die systematische messtechnische Begleitung des Projekts lieferte wertvolle Erkenntnisse zur Dimensionierung, Betriebsstrategie und Leistungsfähigkeit. Es zeigt sich, dass solche Systeme bei sachgerechter Planung einen wirkungsvollen Beitrag zur nachhaltigen Gebäudekonditionierung leisten können.

[21] vgl. REICHEL, 2011
[22] vgl. REICHEL, 2011

Darüber hinaus findet das System luftdurchströmter Schotterspeicher in weiteren praxisnahen Anwendungen Einsatz. So wurde im Zeitungsartikel „Einsatz von luftdurchströmten Schotterspeichern“ von Andreas Herrmann in der Zeitschrift KLIMZUG über das Projekt REGKLAM berichtet, dass bei der W & S Feinmechanik GmbH in Altgehringswalde ein luftdurchströmter Grauwacke-Schotterspeicher mit einem Volumen von 180 m³ zur Klimatisierung einer Produktionshalle eingesetzt wird.[23]

Ein weiteres Anwendungsfeld luftdurchströmter Schotterspeicher findet sich im Bereich der Tierhaltung. So berichtet Andrea Tölle im Newsletter LAND & FORST, dass Schotterspeicher in Schweineställen erfolgreich zur Abpufferung starker Temperaturschwankungen beitragen und sich positiv auf Tierwohl und Stallhygiene auswirken.[24]

Auch im Wintergarten des Tiergartens Schönbrunn wird für das Giraffenhaus ein Schotterspeicher erfolgreich als Tagesspeicher eingesetzt. Durch diesen können in den Übergangszeiten rund 30% des Energiebedarfs gedeckt werden. Der unter der Bodenplatte verbaute Speicher mit einem Volumen von 62 m³ und einer Füllung aus 122 t Marmorbruch mit einer Korngröße von 63/150 mm zeigt eindrucksvoll das Potenzial solcher Systeme auch im nicht-industriellen Kontext.[25]

Aufgrund begrenzter öffentlich zugänglicher Detailinformationen können die in den Artikeln aufgezeigten Systeme in der vorliegenden Arbeit nur exemplarisch genannt, jedoch nicht technisch bewertet werden.

Es lässt sich feststellen, dass bereits ein breites Spektrum praktischer Anwendungen luftdurchströmter Schotterspeicher existiert. Allerdings sind bislang nur wenige dieser Projekte systematisch wissenschaftlich untersucht und dokumentiert worden. Zudem ist zu beachten, dass in den bisher bekannten Anlagen durchweg konventionelle Gesteinskörnungen verwendet wurden und ein Einsatz von Recycling-Beton bislang nicht realisiert wurde.

[23] vgl. HERRMANN, 2012
[24] vgl. online: TÖLLE, 2021 (04.07.2025)
[25] vgl. WELLER; SCHEURING, 2018, S. 41 f.

2.2 Beton

Beton ist weltweit einer der am häufigsten eingesetzten Baustoffe und spielt eine Rolle im Hoch-, Tief- und Infrastrukturbau. Seine hohe Druckfestigkeit, gute Verfügbarkeit und vergleichsweise einfache Verarbeitung machen ihn zu einem vielseitigen Werkstoff mit breitem Anwendungsspektrum. Für die vorliegende Arbeit ist Beton insbesondere deshalb von Interesse, weil seine Aufbereitung und Wiederverwendung als Recyclingbeton neue Möglichkeiten für nachhaltige Baustoffkreisläufe eröffnet und in Schotterspeichern Anwendung finden könnte.

2.2.1 Was ist Beton?

Beton ist ein vielseitig, künstlich hergestellter Kompositbaustoff, der aus der Mischung von Zement, Gesteinskörnung, Wasser und gegebenenfalls Betonzusatzmitteln sowie Zusatzstoffen besteht. Die Eigenschaften von Beton im Festzustand ergeben sich maßgeblich aus der Art und Dosierung dieser Ausgangsstoffe, aus dem w/z-Verhältnis, der Verdichtung beim Einbau sowie weiteren Einflussfaktoren.

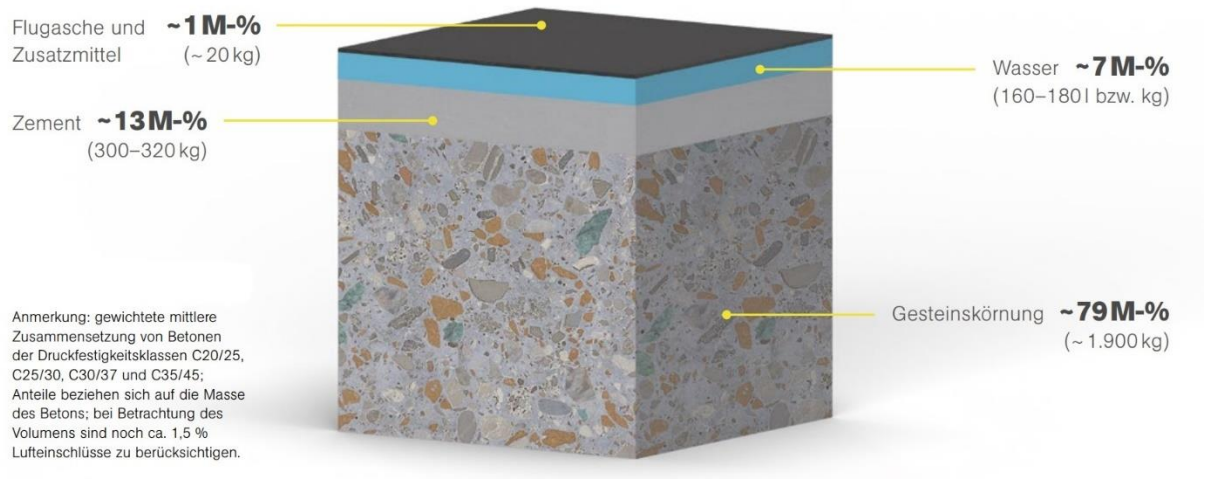


Abbildung 11 Zusammensetzung von Beton
(VDZ und Umweltproduktdeklaration (EPDs) für Beton)

Zement ist das hydraulische Bindemittel im Beton, um die Gesteinskörnungen miteinander zu verkitten. Durch die Reaktion mit Wasser, der sogenannten Hydratation, entsteht ein festes Gefüge, das die Gesteinskörper miteinander verklebt. In Deutschland ist die Verwendung von Zement durch die DIN EN 197-1 geregelt, in der verschie-

dene Zementarten wie z.B. der Portlandzement, der Hochofenzement usw. auf Grundlage deren Hauptbestandteile definiert sind.[26] Die Einteilung erfolgt hierbei von CEM I bis CEM V. Zusätzlich erfolgt gemäß DIN EN 197-1[27] und DIN EN 14216[28] eine Einteilung der Zemente nach Festigkeitsklassen.

Die Gesteinskörnung stellt wie in Abbildung 11 ersichtlich den volumenmäßig größten Bestandteil des Betons dar. Sie beeinflusst neben dem Zementstein die Festigkeit, Rohdichte, Verformungs- und Temperaturverhalten sowie die Wasseraufnahme des Betons. Gesteinskörnungen können dabei natürlichen Ursprungs sein, industriell hergestellt werden oder aus zuvor im Bauwesen eingesetzten Materialien stammen, die nach dem Rückbau wieder aufbereitet wurden, sogenannte rezyklierte Gesteinskörnungen.[29] Vor allem die Sieblinie spielt bei der Einteilung von Gesteinskörnungen eine entscheidende Rolle.

Betonzusatzmittel sind flüssige oder pulverförmige Substanzen, die dem Beton in kleinen Mengen zugegeben werden, um bestimmte Eigenschaften im Frisch- oder Festzustand gezielt zu beeinflussen.[30] Nach der DIN EN 934 zählen hierzu z.B. Betonverflüssiger BV, Fließmittel FM, Luftporenbildner LP und andere.[31]

Zusatzstoffe sind feinkörnige mineralische Bestandteile, die dem Beton zugegeben werden, um bestimmte Eigenschaften zu beeinflussen wie z.B. die Verarbeitbarkeit oder die Dichtigkeit. Unterschieden wird zwischen nahezu inaktiven/inerten Betonzusatzstoffen wie Gesteinsmehl sowie puzzolanischen oder latenthydraulischen Betonzusatzstoffen wie Flugasche oder Silikastaub.[32]

2.2.2 Dauerhaftigkeit von Beton

Die Dauerhaftigkeit von Beton beschreibt seine Fähigkeit, über die geplante Nutzungsdauer hinweg unter spezifischen Umwelteinflüssen form- und funktionsstabil zu bleiben. Dabei wirken sowohl innere Materialeigenschaften als auch äußere Beanspruchungen zusammen. Für luftdurchströmte Schotterspeicher ist die Dauerhaftigkeit besonders relevant, da hier wechselnde Feuchte- und Temperaturbedingungen auf das

[26] vgl. Norm DIN EN 197-1, S. 16
[27] vgl. Norm DIN EN 197-1, S. 18
[28] vgl. Norm DIN EN 14216, S. 8
[29] vgl. SCHNEIDER 2022, S. 5.3
[30] vgl. SCHNEIDER 2022, S. 5.4
[31] vgl. Norm DIN EN 934-2, S. 7
[32] vgl. SCHNEIDER 2022, S. 5.5

Material im Betrieb herrschen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass das Recyclingmaterial bereits einem Alterungsprozess unterlag, was sich auf das Gefüge und die Reaktionspotentiale des Betons auswirken kann.

Zu den wesentlichen Einflussgrößen zählen die Qualität und Zusammensetzung des Zementes sowie der Gesteinskörnung als innere Faktoren als auch die Einwirkungen durch Feuchtigkeit, Temperatur, Verunreinigungen von Luft, Wasser und Boden sowie der chemische, mechanische und biologische Angriff als äußere Einwirkungen der Umgebung.[33]

Bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit ist es notwendig, typische Betonschäden zu berücksichtigen, die sich durch chemische und physikalische Prozesse im Materialgefüge entwickeln können. Insbesondere drei Schadensmechanismen sind im Zusammenhang mit Recyclingmaterialien aus Beton unter speziellen Umweltbedingungen kritisch zu betrachten:

- Alkali-Kieselsäure-Reaktion
- Carbonatisierung
- Ettringit- und Thaumasitbildung

2.2.2.1 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion zählt zu den chemischen Schädigungsmechanismen, die die Dauerhaftigkeit von Beton erheblich beeinträchtigen können. Es handelt sich dabei um eine verzögerte Reaktion zwischen den unterschiedlichen Formen der Kieselsäure aus den Gesteinskörnungen und den Alkalihydroxiden der Porenlösung des erhärteten Betons bzw. von außen eindringenden Alkalien. Im Rahmen dieser Reaktion entsteht ein alkalisches Silikatgel, das hygroskopisch ist und in Gegenwart von Wasser stark aufquillt. Dieser Volumenzuwachs führt zu inneren Zwängungen im Betongefüge, die wiederum feine Risse auslösen können. Mit zunehmender Ausbreitung verschlechtern sich die mechanischen Eigenschaften des Betons, wodurch es zu einer Gefügeschädigung bis hin zum Versagen des Bauteils kommen kann.[34]

Um das Risiko alkaliinduzierter Schädigungen, umgangssprachlich auch als Betonkrebs bezeichnet, zu minimieren, werden Gesteinskörnungen gemäß der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton“ in sogenannte Alkaliempfindlichkeitsklassen unterteilt. Auf Basis der erwarteten Feuchtebeanspruchung des Bauteils sowie unter Berücksichtigung des verwendeten

[33] vgl. STARK; WICHT, 2013, S. 2 - 4
[34] vgl. STARK; WICHT, 2013, S. 300 ff.

Zementgehaltes lässt sich beurteilen, ob die jeweilige Gesteinskörnung uneingeschränkt einsetzbar ist, ausgetauscht werden sollte oder ob der Einsatz eines Zementes mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt zur Schadensvermeidung erforderlich ist.[35]

Bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen ist das AKR-Risiko kritisch zu bewerten, da häufig keine gesicherten Informationen über die ursprüngliche Zusammensetzung und Reaktivität der im RC-Beton enthaltenen Zuschläge vorliegen, falls das Material auf der Baustelle als Betonbruch angefallen ist. Wenn reaktive Altgesteine im Recyclingmaterial enthalten sind, kann es bei Feuchteeinwirkung zu einer erneuten AKR kommen. Dies kann auch bei der Anwendung in luftdurchströmten Schotterspeichern der Fall sein, da temperatur- und feuchtewechselnde Bedingungen vorherrschen.

Allerdings bestehen Möglichkeiten, dieses Risiko gezielt zu minimieren. In modernen Recyclinganlagen wird das Material in der Regel chemisch geprüft, sodass potentiell reaktive Zuschläge frühzeitig erkannt werden können. Auch bei auf der Baustelle anfallendem Betonbruch kann durch die Entnahme und Laboruntersuchungen von Einzelproben eine AKR-Gefährdung minimiert werden. Werden diese Prüfmaßnahmen konsequent umgesetzt, lässt sich das Risiko einer erneuten AKR auch im Einsatzbereich von Schotterspeichern deutlich reduzieren.

2.2.2.2 Carbonatisierung

Die Carbonatisierung zählt zu den häufigsten Schädigungsmechanismen bei Beton und ist ein natürlicher chemischer Prozess, bei dem das im Beton enthaltene Calciumhydroxid mit dem Kohlenstoffdioxid aus der Luft im Beisein von Feuchte zu Calciumcarbonat reagiert.

$$Ca(OH)_2 + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O$$

Formel 3 Chemische Reaktion der Carbonatisierung

Dieser Prozess führt zu einer Veränderung des Zementsteingefüges und einer Abnahme des pH-Wertes der Porenlösung. Die größte Herausforderung bei der Carbonatisierung liegt nicht in der chemischen Umwandlung selbst, sondern in deren Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung. Durch die allmähliche Absen-

[35] vgl. online: BauNetz (17.07.2025)

kung des pH-Wertes im Beton wird die natürliche Passivierungsschicht auf der Stahlbewehrung angegriffen. In der Folge kann es bei Anwesenheit von Feuchtigkeit und Sauerstoff zur Stahlkorrosion kommen.[36]

Obwohl die Carbonatisierung eine irreversible und potenziell schädigende Reaktion für bewehrte Betonkonstruktionen darstellt, hat sie im Zusammenhang mit der Anwendung in luftdurchströmten Schotterspeichern nur eine untergeordnete Bedeutung. Da es sich hierbei um eine unbewehrte Anwendung handelt, entfällt das zentrale Risiko der Bewehrungskorrosion infolge einer pH-Wert-Absenkung. Somit ist die Carbonatisierung zwar ein nachweisbarer Vorgang innerhalb des RC-Materials, beeinflusst aber nicht direkt die funktionale Eignung im Kontext der untersuchten Anwendung.

2.2.2.3 Schädigende Ettringitbildung

Die chemische Stabilität des Zementsteins ist eine wesentliche Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen. Eine schädigende Reaktion, die zum Abbau der Festigkeit und zu strukturellen Schäden führen könnte, ist die sogenannte verspätete Ettringitbildung.

Ettringit ist eine vielfach auftretende Hydratationsphase im Zementstein, die eine zentrale Rolle im Verlauf der Zementerhärtung spielt. Besonders in der Frühphase der Reaktion trägt seine Bildung entscheidend zum ordnungsgemäßen Erstarren des Betons bei. Auch spezielle Zementtypen wie schwindungsarme oder quellfähige Zemente sowie Sulfathüttenzemente beruhen maßgeblich auf der gezielten Ausbildung von Ettringit. Selbst in gewöhnlichem Beton und Mörtel ist Ettringit als Reaktionsprodukt weit verbreitet, wenn auch meist in sehr kleinen Mengen.

Problematisch wird seine Entstehung jedoch, wenn sie zeitlich verzögert, also erst nach der vollständigen Erhärtung des Betons, erfolgt. In solchen Fällen kann die nachträgliche Ettringitbildung zu Volumenvergrößerungen führen, die erhebliche Spannungen im Gefüge erzeugen und im ungünstigsten Fall zu Rissbildung und strukturellen Schäden führen. Eine späte Ettringitausbildung ist daher in bestimmten Fällen als potenziell schädigend einzustufen, auch wenn sie nicht zwangsläufig zu Schäden führen muss.[37]

[36] vgl. MÜLLER, 2018, S. 103 f.
[37] vgl. STARK; WICHT, 2013, S. 209 f.

Eine schädigende Ettringitbildung tritt vor allem infolge unsachgemäßer Wärmebehandlung zum Großteil bei der Fertigteilproduktion auf. Doch auch bei nicht wärmebehandelten Betonen ist mit verspäteten Prozessen zu rechnen. Zu den möglichen Ursachen zählen hierbei:[38]

- sommerliche Witterungsverhältnisse und damit Gesteinskörnungstemperaturen von weit über 30 °C
- hohe Temperaturen des verwendeten Zements (z. B. > 60 °C)
- Eigenwärmeentwicklung infolge Zementhydratation

Im Anwendungsfall des Schotterspeichers ist eine schädigende Ettringitbildung eher unwahrscheinlich, da die dargestellten Ursachen nicht auftreten sollten. Anders als bei der Fertigteilherstellung oder massiven Betonbauteilen wird das RC-Material hier nicht unter hohen Temperaturen verarbeitet oder eingesetzt. Die nur geringe Wärmeentwicklung im Speicher im Betrieb bei herkömmlicher Nutzung sprechen gegen das Auftreten verspäteter Ettringitreaktionen. Zwar können unter bestimmten Umständen, wie etwa die Nutzung von Abwärme zur Zwischenspeicherung im Schotterspeicher, potenziell kritische Bedingungen entstehen, diese sind im üblichen Betrieb jedoch kaum zu erwarten. Sollte es dennoch zur Ausbildung verspäteter Ettringitphasen kommen, wären mögliche Rissbildungen im offenliegenden Schotterkörper funktional vermutlich von untergeordneter Bedeutung, da sie weder statisch relevante Strukturen betreffen noch die Funktion als thermischer Speicher wesentlich beeinträchtigen dürften.

[38] vgl. STARK; WICHT, 2013, S. 230

2.2.3 Betonrecycling

Anette Müller unterscheidet in ihrem Buch „Baustoffrecycling: Entstehung – Aufbereitung - Verwertung“ von 2018 Betonbruch nach der Herkunft dessen in:

- Betonaufbruch, d. h. Material, das beim Aufbruch von Straßen- und Verkehrsflächen aus Beton anfällt, und
- Betonabbruch, d. h. Material, das bei Abbruch- und Umbauarbeiten von Hochbauten, Ingenieur- oder Industriebauwerke oder beim Aufnehmen von Betonwaren anfällt[39]

Abbildung 12 Betonaufbruch beim Abbruch einer alten Fahrbahndecke (links) und Betonabbruch beim Rückbau eines Mehrfamilienhauses in Plattenbauweise (rechts)
(MÜLLER, 2018, S. 178)

Der großflächige Einsatz von recyceltem Betonmaterial begann zunächst im Straßenbau. Bereits in den 1970er Jahren wurde in den USA Beton aus zurückgebauten Fahrbahnplatten als Ausgangsstoff für neue Tragschichten genutzt. Erst in einem späteren Schritt fand dieses Material auch Anwendung in den Betondeckschichten. Die Verwendung von aufbereitetem Betonsplitt zur Herstellung von Konstruktionsbeton ist hingegen bislang nur in Einzelfällen realisiert worden.[40]

Durch gezielte Aufbereitung kann aus Betonabbruch ein wiederverwendbarer Baustoff gewonnen werden. Dabei entstehen in erster Linie Gesteinskörnungsgemische, die überwiegend im Straßenbau, insbesondere für ungebundene Tragschichten, Verwendung finden. Werden die Körnungen in einzelne Fraktionen getrennt, können diese

[39] vgl. MÜLLER, 2018, S. 178
[40] vgl. MÜLLER, 2018, S. 178

auch gezielt zur Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen eingesetzt werden.[41]

Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen im Betonbau ist durch die DAfStb-Richtlinie in Verbindung mit der DIN EN 206-1 und der DIN 1045-2 geregelt. Gemäß dieser Vorschriften dürfen RC-Körnungen nur unter bestimmten Voraussetzungen eingesetzt werden. Dazu gehören eine maximale Festigkeitsklasse von C30/37 und eine Beschränkung auf definierte Expositionsklassen.

Die Richtlinie unterscheidet zwischen zwei Typen von RC-Gesteinskörnungen. Typ 1 besteht zu mindestens 90% der Masse aus Betonbruch und wird bevorzugt für tragende Bauteile verwendet. Typ 2 hingegen darf bis zu 30% anderer mineralischer Bestandteile wie Mauerziegel oder Kalksandstein enthalten, wobei der Anteil an Beton bei mindestens 70% liegen muss. Der zulässige Anteil der Recyclingkörnung an der Gesamtkörnung des rezyklierten Betons richtet sich nach ihrer Typisierung, dem Anwendungsbereich und liegt bei maximal 45 Vol.-% bzw. 35% Vol.-%.[42]

Bestandteile [M.-%]	Kategorie der Gesteinskörnung	
	Typ 1	Typ 2
Rc (Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton) **Ru** (ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch geb. Gesteinskörnung)	Rcu_{90}	Rcu_{70}
Rb (Mauersteine und Ziegel (nicht porosiert), Klinker, Steinzeug, Kalksandsteine, Mauer- und Dachziegel, Bimsbeton, nicht schwimmender Porenbeton)	Rb_{10-}	Rb_{30-}
Ra (bitumenhaltige Materialien)	Ra_{1-}	Ra_{1-}
Rg (Glas) **X** (sonstige Materialien, z. B. Ton und Boden, Metalle, Kunststoff, Gummi, Gips)	XRg_{1-}	XRg_{2-}
FL (schwimmendes Material im Volumen)	FL_{2-}	FL_{2-}

Abbildung 13 Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen Typ 1 und Typ 2 nach DIN 4226-101
(https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/recyclingbeton-930267/gallery-1/5, 14.07.2025)

Die in Recyclinganlagen angelieferten Betonabbruchmaterialien stammen nach Roßberg überwiegend aus Bauwerken mit geringen bis mittleren Festigkeitsklassen. Wie in Abbildung 14 dargestellt, zeigt sich eine klare Häufung bei den Klassen B 15 mit

[41] vgl. MÜLLER, 2018, S. 178
[42] vgl. online: BauNetz (14.07.2025)

25 % und B25 mit 22,5 %. Diese beiden Gruppen bilden fast die Hälfte des gesamten Eingangsmaterials. Auch schwächere Betone mit einer Druckfestigkeit unter B 10 machen mit 19 % einen relevanten Anteil aus, gefolgt von B 10 mit 11 %. Höherfeste Betone wie B 35, B 45 oder sogar B 55 sind hingegen deutlich seltener im Abbruchaufkommen vertreten. Sie erreichen lediglich Anteile von 12 %, 7,5 % bzw. 3 %. Dies lässt darauf schließen, dass ein Großteil der wiederverwerteten Betone aus älteren Bauwerken mit damals üblichen niedrigeren Festigkeitsklassen stammt.[43]

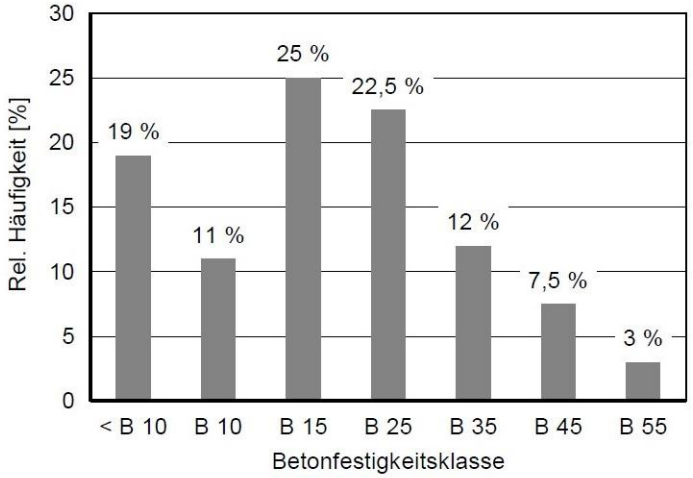


Abbildung 14 Verteilung des in Recyclinganlagen gelieferten Betonabbruchs nach alten Festigkeitsklassen
(ROßBERG, 1997)

Hierbei sei zu erwähnen, dass die alten Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045 von 1988 durch die neuen Festigkeitsklassen nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 ersetzt wurden. Diese neuen Klassen werden mit „C“ gefolgt von zwei Zahlen, z.B. C12/15 oder C20/25, bezeichnet. Dabei steht die erste Zahl für die Zylinderdruckfestigkeit und die zweite für die Würfeldruckfestigkeit in N/mm².

Im Folgenden eine Tabelle, die die alten und neuen Bezeichnungen gegenüberstellt:

Festigkeitsklasse (alt)	Festigkeitsklasse (neu)
B10	C8/10
B15	C12/15
B25	C20/25
B35	C30/37
B45	C35/45
B55	C45/55

Tabelle 1 Zuordnung der Druckfestigkeitsklassen
(SCHOLZ; HIESE; Möhring, 2016)

[43] vgl. ROßBERG, 1997

3 Methodik

3.1 Vorgehen bei der Literaturrecherche

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um die technischen Grundlagen für die Bewertung der Eignung von Recyclingbeton in Schotterspeichern fundiert darzustellen. Ziel war es, sowohl aktuell wissenschaftliche Erkenntnisse als auch normative Anforderungen zu erfassen und daraus eine belastbare Bewertungsgrundlage für die späteren Laborversuche abzuleiten.

Die Recherche erfolgte systematisch in mehreren Schritten:

- Fachliteratur und wissenschaftliche Veröffentlichungen: Es wurden einschlägige Lehrbücher zum Thema Schotterspeicher, Beton und Recyclingwirtschaft verwendet, darunter insbesondere ALBERT: “Schneider Bautabellen für Ingenieure“, MÜLLER: „Baustoffrecycling“ und GROSSARTH: „Bioökonomie und Zirkulärwirtschaft im Bauwesen“. Darüber hinaus wurden relevante Dissertationen und wissenschaftliche Artikel gesichtet.
- Normen und technische Regeln: Für die technischen Anforderungen und Prüfverfahren wurden die gültigen Normen herangezogen, u.a. DIN EN 13383-1:2002 sowie die DIN EN 13383-2:2019 zum Thema Wasserbausteine. Dabei wurden sowohl Anforderungen und Prüfverfahren für rezyklierte Wasserbausteine berücksichtigt
- Praxisberichte und interne Absprachen: Ergänzend wurden Projektartikel und die Patentschrift berücksichtigt, darunter insbesondere Dokumente zum Schotterspeicher von Mario Reichel, welcher im direkten Austausch an der Arbeit mitgewirkt hat.

Die ausgewählten Quellen wurden im Hinblick auf ihre Relevanz für die technische Bewertung geprüft und in thematische Kategorien eingeordnet. Literaturwerte zu technischen und physikalischen Eigenschaften wurden dabei nicht unreflektiert übernommen, sondern auch im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf grobkörnige RC-Gesteinskörnung kritisch eingeordnet.

3.2 Durchführung der Laboruntersuchungen

3.2.1 Auswahl des Materials

Zur Überprüfung der Rohdichte und des Wasseraufnahmekoeffizienten der Gesteinskörnung aus Recyclingbeton wurde von REMEX Ost zwei Eimerproben aus einer Vorratshalde mit der Körnung 45/100 mm zur Verfügung gestellt. Die Lage der Entnahmestelle ist in Anlage 1 ersichtlich. REMEX Ost ist ein regionaler Anbieter für Recycling-Baustoffe und Entsorgungslösungen mit Sitz in Ostdeutschland. Das Unternehmen betreibt Aufbereitungsanlagen für mineralische Abfälle wie Bauschutt, Betonabbruch und Straßenaufbruch und stellt daraus qualitätsgesicherte Recyclingbaustoffe für den Hoch- und Tiefbau her. Die einzelnen Gesteinsbrocken wurden nach dem Zufallsprinzip, wie in Anlage 2 nach dem Probenahmeplan gemäß DIN EN 13383-2 beschrieben, aus der Halde entnommen und darauf geachtet, dass das Material aus Beton besteht, da auch andere Bestandteile wie Ziegelreste oder natürlicher Gesteine enthalten waren. Der Transport erfolgte per Abholung mittels eines Autos sowie einer darauffolgenden dreitägigen Lagerung im Büro der fellendorf GmbH. Gleichzeitig wurden beide Probeneimer eindeutig gekennzeichnet. Nach dem Weitertransport in das Baustofflabor der DHSN Glauchau konnten die Versuche durchgeführt werden.

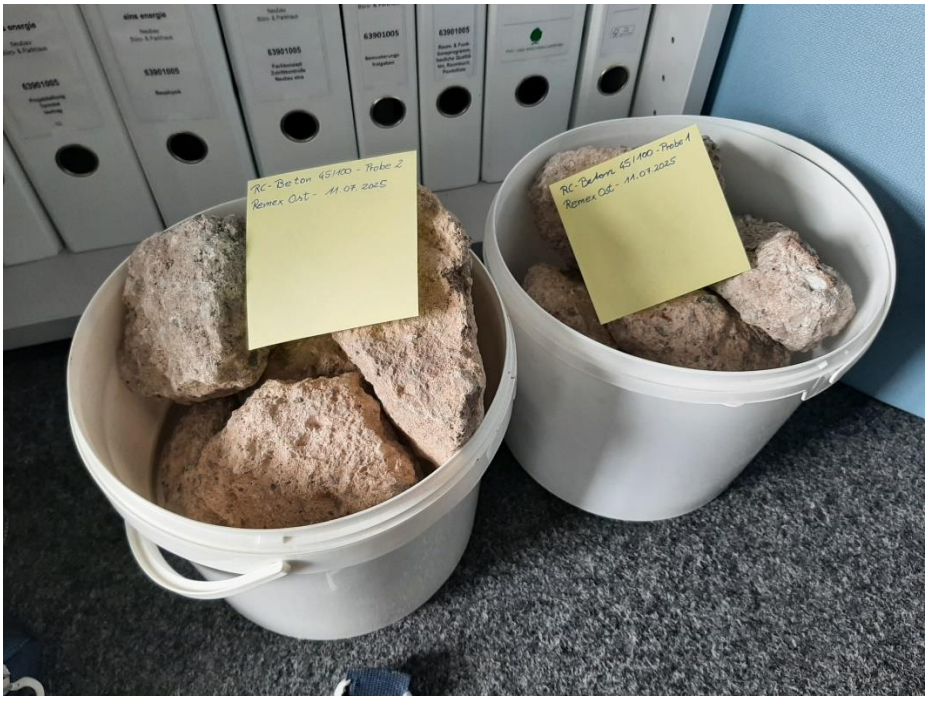


Abbildung 15 Zwischenlagerung des Betonrecycling-Materials
(eigene Aufnahme)

3.2.2 Ziel der Untersuchungen

Mit den Versuchen soll herausgefunden werden, wie sich die physikalischen Eigenschaften der Rohdichte und Wasseraufnahme bei einer grobkörnige RC-Gesteinkörnung verhalten und ob diese von den Versuchen aus der Literatur mit feinerer Körnung abweichen. Im Rahmen eines Fachgesprächs mit Herrn Mario Reichel wurde betont, dass das eingesetzte Gesteinsmaterial für den Schotterspeicher einigen Anforderungen der DIN EN 13383-1 für Wasserbausteine entsprechen sollte[44]. Eine der Anforderungen bezieht sich auf das Wasseraufnahmevermögen des eingesetzten Materials. Aus diesem Grund sind die Versuche an RC-Gesteinskörnung durchgeführt worden, um die technische Eignung besser bewerten zu können.

3.2.3 Versuchsaufbau und Prüfverfahren

Die Laborproben wurden in Anlehnung der DIN EN 13383-2:2019 Kapitel 8 „Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme“ durchgeführt. Zu den verwendeten Prüfeinrichtungen gehörten:

- ein Trockenofen mit Luftumwälzung und Thermostatreglung, damit eine Temperatur von ca. 110 °C aufrechterhalten werden kann
- eine Waage, welche dafür geeignet ist, einen Drahtkorb mit der Probe aufzuhängen und ihn in Wasser zu wiegen
- ein Drahtkorb, der an der Waage angehängt werden kann
- ein wasserdichter Behälter, in dem der Drahtkorb mit einem Mindestabstand von 50 mm zwischen Korb und Behälterwand eingehängt werden kann
- ein Wasserbad
- gekennzeichnete Petrischalen

[44] vgl. REICHEL 2025

Abbildung 16 Waage mit angehängtem Drahtkorb im wasserdichten Behälter
(eigene Aufnahme)

Abbildung 17 RC-Gesteinskörnung im Wasserbad
(eigene Aufnahme)

Zuallererst wurden lose Kleinstkornanteile entfernt und die Messprobe unter laufendem Wasser abgewaschen, um anhaftende Feinteile zu entfernen. Danach konnten die Proben für 24 Stunden vollständig in ein Wasserbad gelegt werden. Nach Erreichen der Massekonstanz wurden die Gesteinsstücke jeweils einzeln aus dem Wasserbad entnommen und in den herab hängenden Drahtkorb gelegt. Dabei wurde darauf

geachtet, dass die Messprobe sowie der Drahtkorb mindestens 50 mm unter der Wasseroberfläche eingetaucht ist. Die scheinbare Masse der Messprobe in Wasser wurde bestimmt. Darauffolgend wurde die Messprobe aus dem Wasser entfernt und abgetropft, bis nur noch wenig Oberflächenwasser vorhanden war. Die Masse der wassergesättigten Messprobe wurde gewogen. Gleichzeitig konnte das Volumen nach Taraausgleich bestimmt werden. Nachdem alle Körnungen gemessen wurden, konnten die Messproben für 24 Stunden im Trockenofen bei einer Temperatur von ca. 110 °C getrocknet und anschließend die Trockenmasse bestimmt werden. Dabei sei angemerkt, dass einzelne Proben über einer Masse von 450 g lagen, welche die Obergrenze der DIN EN 13383-2:2019 darstellt.

3.2.4 Dokumentation

Neben einigen Fotos wurde ein Probenahmeplan (siehe Anlage 2) und ein Prüfbericht mit zugehöriger EXCEL-Tabelle (siehe Anlage 3) erstellt. Zur Berechnung der Rohdichte wurde folgende Formel gemäß DIN EN 13383-2:2019 verwendet:

$$p = \frac{M_3 \times p_W}{M_1 - M_2}$$

Formel 4 Berechnung Rohdichte

Legende

M_1	Die Masse der wassergesättigten und oberflächentrockenen Messprobe [g]
M_2	Die scheinbare Masse der wassergesättigten Messprobe unter Wasser [g]
M_3	Die Masse der ofentrockenen Messprobe [g]
ρ_W	Die Dichte des Wassers bei der während der Bestimmung von M_2 aufgezeichneten Temperatur [Mg/m³]

Zur Berechnung der Wasseraufnahme wurde folgende Formel gemäß DIN EN 13383-2:2019 verwendet:

$$W_{as} = \frac{M_1 - M_3}{M_3} \times 100$$

Formel 5 Berechnung Wasseraufnahme

Legende

M_1	Die Masse der wassergesättigten und oberflächentrockenen Messprobe [g]
M_3	Masse der ofentrockenen Messprobe [g]

4 Bewertung der Eignung

4.1 Technische Eignung

Wie bereits im Kapitel 3 kurz erwähnt, wurde im Fachgespräch mit Mario Reichel auf die Relevanz der DIN EN 13383 als maßgebliche Norm für die Beurteilung technischer Anforderungen an Gesteinskörungen hingewiesen. Diese Norm legt Anforderungen für sogenannte Wasserbausteine fest, die auch auf die im Schotterspeicher eingesetzten groben Gesteinskörnungen anwendbar sind. Insbesondere beim Einsatz von Recyclingmaterial ist zu überprüfen, ob die relevanten Eigenschaften in Bezug auf Korngrößenverteilung, Kornform, Wasseraufnahme und Widerstand gegen Frost-Taumittel-Einwirkung eingehalten werden können.

4.1.1 DIN EN 13383 Wasserbausteine

Die DIN EN 13383 ist in zwei Teile gegliedert:

- DIN EN 13383-1:2002 regelt die Anforderungen an Wasserbausteine hinsichtlich ihrer physikalisch-mechanischen Eigenschaften sowie ihrer geometrischen Kennwerte[45]
- DIN EN 13383-2:2019 beschreibt die entsprechenden Prüfverfahren[46]

Ziel der Norm ist es, grobe Gesteinskörnungen für die Verwendung in Wasserbauwerken und sonstigen Ingenieurbauwerken zu klassifizieren. Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere relevant, ob Betonrecycling als normgerechter Ersatz zu Naturstein verwendet werden kann.

Nach Herrn Reichel gehören zu den wesentlichen Anforderungen der DIN EN 13383-1, die in diesem Zusammenhang zu beachten sind:

- die erforderliche Größenklasse
- die Steinform
- der Widerstand gegen Brechen
- die Wasseraufnahme
- die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit

[45] vgl. Norm DIN EN 13383-1:2002
[46] vgl. Norm DIN EN 13383-2:2019

Dabei sei erwähnt, dass vor allem die Wasseraufnahmefähigkeit des Materials eine maßgebliche Rolle einnimmt. Der Grund dafür ist, dass sich bei Auftreten von Porenwasser in den Partikeln des Schotterspeichers und nicht zu vermeidenden Feinstaub Mikroorganismen und Pilzspuren bilden können, die die Luftqualität erheblich verschlechtern. Dadurch können bei Hygieneuntersuchungen die Anforderungen der VDI 6022 nicht eingehalten werden. Ebenfalls kann es zu einem sogenannten Kellergeruch führen, der das Behaglichkeitsempfinden der Nutzer erheblich negativ beeinflussen kann.

Tabelle 2 zeigt die Auswahl technischer Kenngrößen aus der DIN EN 13383-1 und deren Anforderungen, die eingehalten werden sollten:

Eigenschaft	Kategorie	Erläuterung
Größenklasse	$CP_{45/125}$ $CP_{63/180}$ $CP_{45/180}$	Kleinstkorn 45 mm / Größtkorn 125 mm Kleinstkorn 63 mm / Größtkorn 180 mm Kleinstkorn 45 mm / Größtkorn 180 mm
Steinform	LT_A	Verhältnis von Länge zu Dicke siehe Abbildung 14
Widerstand gegen Brechen	CS_{80}	Mittlere Druckfestigkeit siehe Abbildung 15
Wasseraufnahme	$WA_{0,5}$	Durchschnittliche Aufnahme ≤ 0,5
Frost-Tau-Wechselbeständigkeit	FT_A	Maximal einer der anfänglich geprüften Steine und keiner der zusätzlich geprüften zeigt mehr als 0,5 % Massenverlust oder die Bildung offener Risse

Tabelle 2 Anforderungen der DIN EN 13383-1:2002
(eigene Darstellung)

Tabelle 6 — Kategorien für die Steinform

Verhältnis von Länge zu Dicke größer als 3			Kategorie LT
Massenanteil in Prozent		Prozentualer Anteil der Anzahl	
Größenklassen	Leichte Gewichtsklassen	Schwere Gewichtsklassen	
≤ 20 Anderer vom Hersteller angegebener Wert	≤ 20 Anderer vom Hersteller angegebener Wert	≤ 5 Anderer vom Hersteller angegebener Wert	LT_A $LT_{angegeben}$
Keine Anforderung	Keine Anforderung	Keine Anforderung	LT_{NR}

Abbildung 18 Anforderung an die Steinform
(DIN EN 13383-1:2002, S. 11)

Tabelle 9 — Kategorien für die Anforderungen an den Widerstand gegen Brechen

Mittlere Druckfestigkeit von 9 Messproben nach Aussonderung des niedrigsten Wertes von 10 Messproben MPa	Druckfestigkeit von nicht mehr als 2 von 10 Messproben MPa	Kategorie *CS*
≥ 80	< 60	CS_{80}
≥ 60	< 40	CS_{60}
Anderer vom Hersteller angegebener Wert	Anderer vom Hersteller angegebener Wert	$CS_{erklärt}$
Keine Anforderung	Keine Anforderung	CS_{NR}

Abbildung 19 Anforderung an den Widerstand gegen Brechen
(DIN EN 13383-1:2002, S. 12)

4.1.2 Eigenschaften aus der Literatur

Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen belegen, dass rezyklierte Gesteinskörnungen in physikalischer Hinsicht von natürlichen Gesteinskörnungen abweichen. Insbesondere die höheren Porositäten und die damit verbundenen Änderungen in Rohdichte und Wasseraufnahme stechen dabei hervor.

Literaturtechnisch wurden bereits Untersuchungen zum Betonrecycling im Zusammenhang der Wiederverwendung als rezyklierte Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton verwendet. Im Rahmen des Symposiums „Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen“ wurde auf die charakteristischen Unterschiede zwischen natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen eingegangen. Die Untersuchungen zeigen, dass RC-Gesteinskörnungen infolge des anhaftenden Zementsteins eine größere Porosität aufweisen. Dies wirkt sich negativ auf die Rohdichte aus, die im Vergleich zu Primärmaterial reduziert ist, während die Wasseraufnahme entsprechend zunimmt.[47]

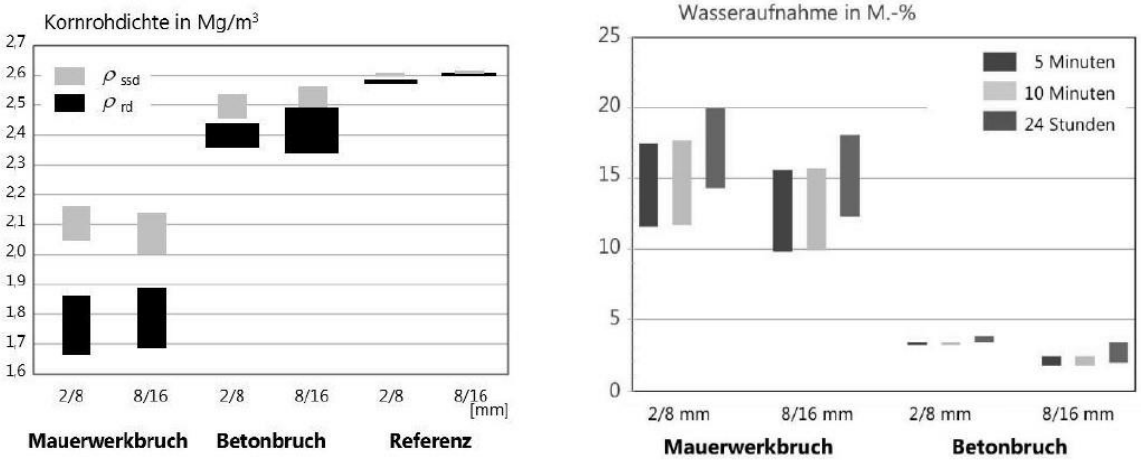


Abbildung 20 Streubreiten der Rohdichten (links) und Wasseraufnahme (rechts)
(BREIT; SCHEIDT; DORNISCH-BUND; ADAMS, 2018, S. 67)

[47] vgl. NOLTING; u.a., 2018, S. 67

In der Dissertation von Julia Scheidt wurden die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung analysiert. Hierbei wurde Recyclingmaterial des Typs 1 und 2 mit natürlichem Material verglichen. Die Rohdichten des Recyclingmaterials lagen unter denen der natürlichen Gesteinskörnungen, was insbesondere auf die höhere Porosität und den höheren Anteilen von Ziegelresten, Kalksandsteinresten usw. in der rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen ist. Dabei wurden Rohdichten bei Gesteinskörnung des Typ 1 und Typ 2 zwischen 2,01 kg/dm³ und 2,55 kg/dm³ festgestellt. Dahingegen wurden bei natürlichen Gesteinskörnungen höhere Werte zwischen 2,46 kg/dm³ und 2,90 kg/dm³ erreicht. Die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung ist signifikant erhöht gegenüber Naturgestein. So lag die geringste Wasseraufnahme innerhalb von 24 Stunden bei 1,52 M.-% und die höchste Wasseraufnahme bei 11,5 M.-%. Als Hauptursache wird der erhöhte Porenanteil genannt, der sich durch lange Kapillarporen und eine größere Anzahl feiner Porenstrukturen auszeichnet.[48]

Die Erkenntnisse werden in der Dissertation durch grafische Auswertungen untermauert, welche die Spannweite der experimentell bestimmten Werte veranschaulicht. Diese Diagramme werden nachfolgend dargestellt:

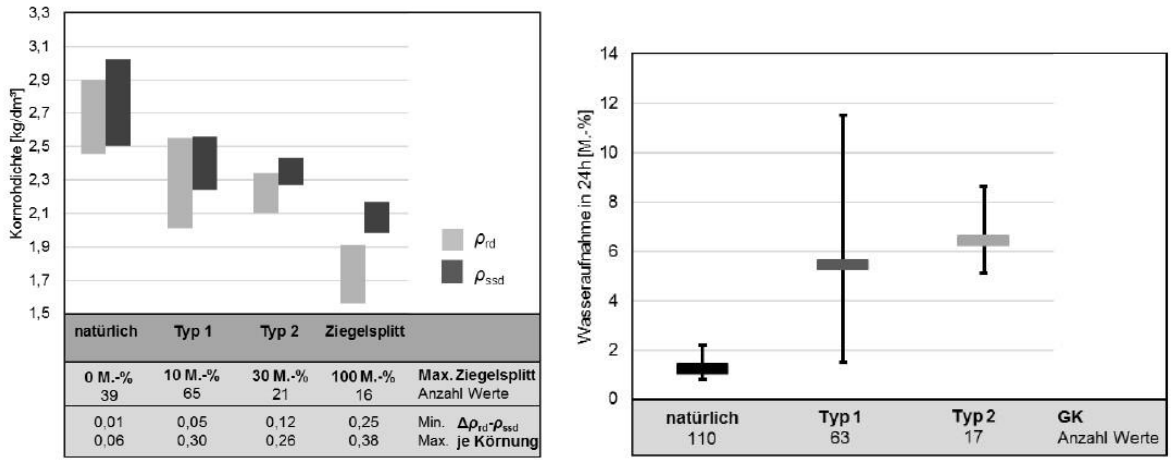


Abbildung 21 Rohdichte (links) und Wasseraufnahme (rechts) der untersuchten Gesteinskörnungen
(SCHEIDT, 2019, S.25 (links); S.35 (rechts))

Anette Müller behandelt in ihrem Werk „Baustoffrecycling“ von 2018 ebenfalls die Eigenschaften von Recyclingbeton. Sie wies darauf hin, dass die Rohdichte zwischen den Werten 1900 kg/m³ und 2700 kg/m³ begrenzt sei, da diese die Grenze von reinem Zementstein und die der natürlichen Gesteinskörnung darstellen.[49] Sie weist in ihrem Buch auf die Reaktionspotentiale hin, die der Zementstein mit sich bringt wie beispielsweise die Carbonatisierung und Ettringitbildung. Auf der Seite 201 des Werkes „Baustoffrecycling – Entstehung – Aufbereitung - Verwertung“ von Anette Müller wurden

[48] vgl. SCHEIDT, 2019, S. 24 ff.
[49] vgl. MÜLLER, 2018, S. S.182

Rein- und Rohdichten sortenreinen Betonen und Recycling-Baustoffen aus Betonbruch gegenübergestellt[50]. Bei sortenreinen Betonkörnungen mit einem Durchmesser von über 4 mm wurde dabei im Mittelwert eine Rohdichte von 2316 kg/m³ und eine Wasseraufnahme von 5,7 Masse-% festgestellt.[51]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Recyclingbeton eine deutlich größere Streuung in Bezug auf die physikalischen Materialeigenschaften zeigt. Vor allem im Vergleich zu Naturstein schneidet er hinsichtlich Rohdichte und Wasseraufnahme in der Regel ungünstiger ab. Im Hinblick auf die Anforderungen der DIN EN 13383-1 ist dies von besonderer Relevanz, da bestimmte Mindestanforderungen an das Materialverhalten für den Einsatz als Wasserbaustein erfüllt werden müssen.

4.1.3 Eigenschaften aus Laborversuchen

Die in der Fachliteratur ausgewerteten Untersuchungen basieren überwiegend auf feinkörnigem Gestein. Da für die Anwendung im Schotterspeicher jedoch grobkörniges Material wie z. B. 45/125 mm benötigt wird, war es notwendig, eigene Laboruntersuchungen durchzuführen, um zu prüfen, ob die Korngröße einen relevanten Einfluss auf die wesentlichen Eigenschaften, also die Wasseraufnahme und Rohdichte, hat und ob die in der Literatur recherchierten Werte bestätigt werden können.

Die Rohdichten der untersuchten Proben schwanken wie in Anlage 3 ersichtlich im Bereich von 1,96 g/cm³ bis 2,27 g/cm³, wobei sich ein Mittelwert von 2,13 g/cm³ ergibt. Die ermittelte Standardabweichung von 0,09 g/cm³ deutet auf eine vergleichsweise homogene Materialqualität hin, insbesondere vor dem Hintergrund des heterogenen Charakters von Betonrecycling. Die Messwerte liegen im unteren Bereich des Spektrums typischer RC-Gesteinskörnungen von Normalbeton und sind fast dem Leichtbeton zuzuordnen.

Bei der Probe 4 konnte keine Rohdichte bestimmt werden, da der vollständige Eintauchvorgang bei der Drahtkorbmessung aufgrund ungünstiger Geometrie nicht durchführbar war. Diese Einschränkung unterstreicht die Schwierigkeiten bei der normgerechten Prüfung von grober Gesteinskörnung und muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Zusätzlich wurde festgestellt, dass bei mehreren Proben das empfohlene Höchstgewicht von 450 g, wie es in der entsprechenden Prüfnorm der DIN EN 13383-2:2019 vorgesehen ist, überschritten wurde. Diese Überschreitung ist bewusst so gewählt

[50] vgl. MÜLLER, 2018, S. 201
[51] vgl. MÜLLER, 2018, S. 192 ff.

worden, da der Einfluss der Korngröße auf die jeweiligen Eigenschaften mit betrachtet werden sollte.

Die Wasseraufnahme der Proben nach 24 Stunden variiert zwischen 5,18 M.-% und 10,44 M.-% mit einem Durchschnitt von 7,73 M.-%. Diese Werte sind im Vergleich zu Naturstein deutlich erhöht, was mit der im Material enthaltenen Zementmatrix und einer generell höheren offenen Porosität zusammenhängt. Die Streuung der Wasseraufnahme ist mit einer Standardabweichung von 1,73 M.-% relativ groß, was für die Heterogenität des Materials spricht. Besonders auffällig war die Probe 14 mit dem höchsten Wasseraufnahmewert, bei der ein Ziegelrest identifiziert wurde. Dies bestätigt die Daten der Literatur, welche dem Ziegelmaterial aufgrund seiner erhöhten porösen Struktur eine deutlich erhöhte Wasseraufnahme zuweist und es damit die Gesamtbewertung der Probe negativ beeinflusst.

Darüber hinaus ist auf eine zur Norm abweichende Herangehensweise hinzuweisen. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde auf die in der Norm empfohlene Verwendung eines Tuches zum Abtrocknen des Oberflächenwassers verzichtet. Stattdessen wurde das Gestein lediglich abgetropft. Diese Vorgehensweise kann zu einer nicht einheitlichen Restfeuchte an der Oberfläche führen und somit die Genauigkeit der Wasseraufnahmebestimmung beeinträchtigen. Auch dies kann zur beobachteten Streuungsbreite beigetragen haben.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der Rohdichte- und Wasseraufnahmewerte über alle untersuchten Proben hinweg:

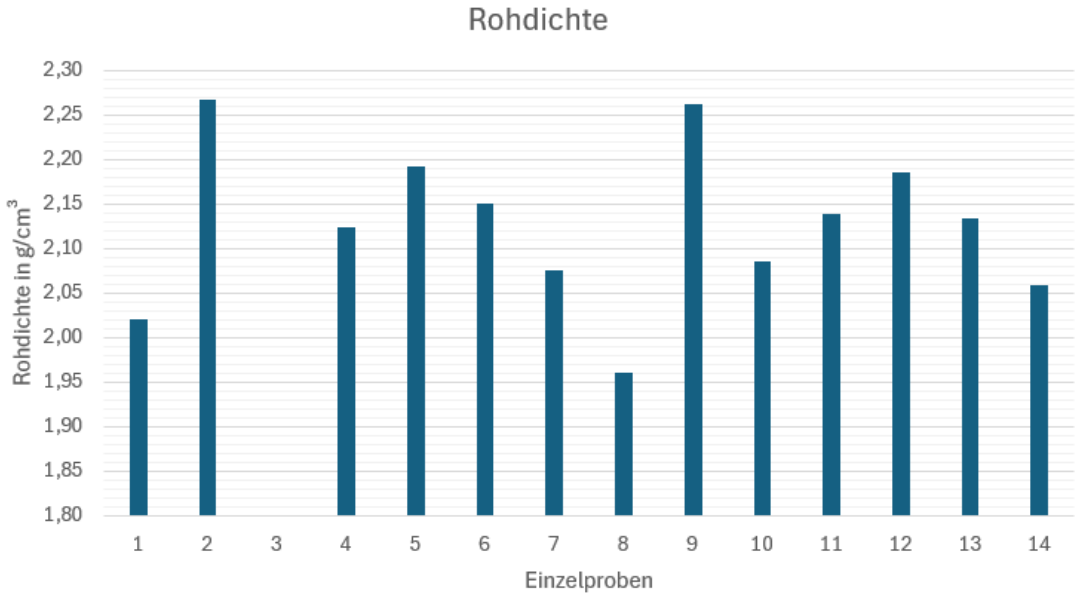


Abbildung 22 Rohdichte der Laborproben in g/cm³
(eigene Darstellung)

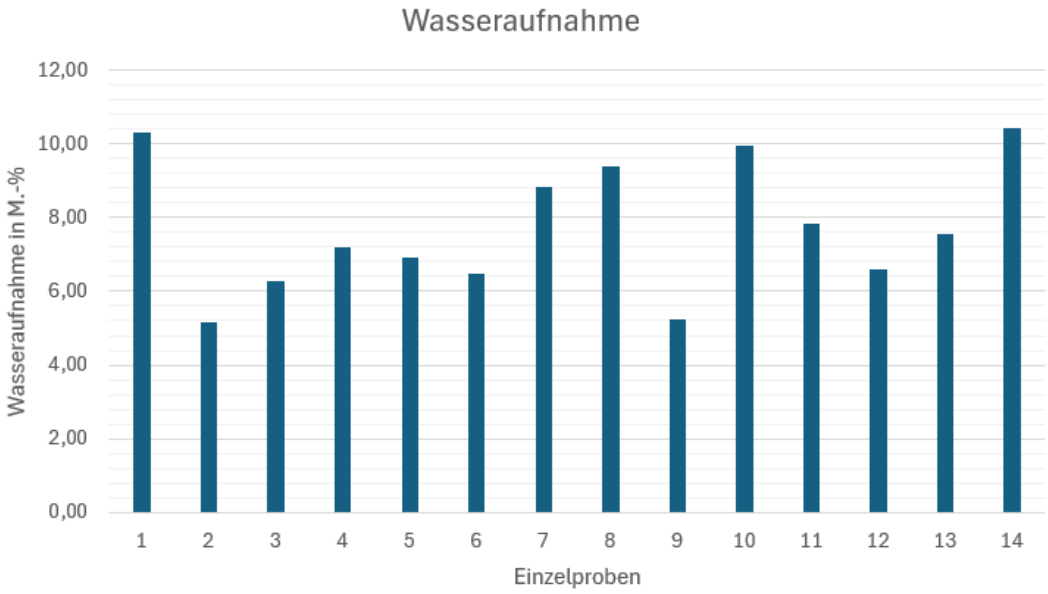


Abbildung 23 Wasseraufnahme der Laborproben in M.-%
(eigene Darstellung)

Auch die Laborergebnisse zeigen, dass die Wasseraufnahme von grober Gesteinskörnung nicht von denen feinerer Gesteinskörnung abweichen. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Korngröße keine maßgebliche Veränderung der Wasseraufnahme bewirkt. Dies liegt daran, dass die Wasseraufnahme grundsätzlich von der Dichte und Porosität des Ausgangsstoffes abhängt.

Für den geplanten Einsatz in einem luftdurchströmten Schotterspeicher ist diese Eigenschaft als kritisch zu bewerten. Eine erhöhte Wasseraufnahme kann dazu führen, dass vermehrt Feuchtigkeit im Speichermaterial in Form von Porenwasser gehalten wird. In Verbindung mit organischen Bestandteilen wie beispielsweise Holzreste aber auch Feinstaub, die im Recyclingmaterial kaum zu vermeiden sind, bietet dies einen idealen Nährboden für Mikroorganismen und Pilze, welche über die Luftzirkulation in die Raumluft eingebracht werden könnten. Dies würde die Lufthygiene im zu versorgenden Gebäude erheblich beeinträchtigen und stellt somit ein gesundheitlich relevantes Risiko dar.

Zudem ist bei Materialien mit erhöhter Porosität eine verminderte Frost-Tau-Wechselbeständigkeit zu erwarten. Eingedrungenes Wasser kann bei Temperaturen unter 0°C gefrieren, sich ausdehnen und dadurch zu Rissbildung und Materialzerfall führen. In einem System, das zyklisch Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen bis unter die Taupunktgrenze ausgesetzt ist, wie es bei Schotterspeichern der Fall ist, stellt dies ein potenzielles Funktionsrisiko dar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die erhöhte Wasseraufnahme durchaus ein Ausschlusskriterium für den Einsatz von Betonrecyclingmaterial in luftdurchströmten Schotterspeichersystemen darstellen kann.

4.1.4 Eigenschaften natürlicher Gesteinskörnung

Gemäß einem Artikel des Berliner Steincontor wurden Orientierungswerte für die Wasseraufnahme natürlicher Gesteinsgruppen für Platten und Borde ermittelt. Hierbei lagen die ermittelten Werte größtenteils unter 1 M.-%. Nur bei Basaltlava lagen die Werte deutlich über diesem Wert. Bei Granit gelb/gelb-grau und einigen Sandsteinen kamen vereinzelt Werte über 1 M.-% heraus.[52] Im Folgenden die Tabelle der ermittelten Werte:

	Gesteinsgruppe	Biegefestigkeit: Mindestwerte für den unteren Erwartungswert MPa (Platten, Borde)	Orientierungswerte für die Wasseraufnahme M.-%
1	Granit, Syenit, Granodiorit	10	0,2 – 0,8
2	Granit, gelb/gelb-grau	7	0,6 – 1,4
3	Gabbro, Diorit	12	0,2 – 0,5
4	Basalt, Melaphyr	12	0,1 – 0,4
5	Quarzporphyr, Porphyrit, Andesit, Diabas	12	0,2 – 0,7
6	Gneis, Quarzit	12	0,1 – 0,7
7	Grauwacke, Quarzitische Sandsteine	9	0,4 – 2,0
8	sonstige Sandsteine	5	0,4 – 4,0
9	Kalksteine und Dolomite mit einer Wasseraufnahme bis 0,8 M.-%	6	0,4 – 0,8
10	Kalksteine und Dolomite mit einer Wasseraufnahme über 0,8 M.-%	5	> 0,8
11	Basaltlava	8	4 – 10

Tabelle 3 Platten und Borde aus Naturstein – Biegefestigkeit/Wasseraufnahme (https://besco-gmbh.de/bestimmung-der-wasseraufnahme/, 22.07.2025)

Für die Verwendung in Schotterspeichern muss durch die Steinbrüche vorher festgestellt werden, ob das bestellte Gesteinsmaterial den erforderlichen Anforderungen genügt. Dies wird in Datenblätter der Leistungerklärung dokumentiert. Einige Beispiele sind in Anlage 4,5 und 6 abgebildet. In diesen wird erkenntlich, dass das jeweilige natürliche Gesteinsmaterial den Anforderungen der DIN EN 13383-1:2002 entspricht und im Schotterspeicher eingesetzt werden kann.

[52] vgl. online: BESCO: Berliner Steincontor (13.07.2025)

4.2 Wärmetechnische Betrachtung

4.2.1 Wärmeleitfähigkeiten der Materialien

Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine physikalische Materialeigenschaft, die angibt, wie gut oder schlecht ein Stoff Wärme leitet. Sie wird in der Einheit Watt pro Meter mal Kelvin [W/m*k] angegeben. Konkret beschreibt dieser Wert, welche Wärmemenge durch eine 1 m dicke Materialschicht fließt, wenn zwischen den beiden Seiten ein Temperaturunterschied von einem Kelvin besteht.[53]

Für die Bewertung von Materialien in wärmetechnischen Anwendungen wie beispielsweise dem Schotterspeicher ist die Wärmeleitfähigkeit eine einflussnehmende Materialgröße. Je höher der λ-Wert, desto leitfähiger ist der Stoff gegenüber thermischer Energie.

Die Wärmeleitfähigkeit eines Materials wird nicht nur durch seine chemische Zusammensetzung bestimmt, sondern auch durch physikalische Eigenschaften wie die Rohdichte und den Feuchtegehalt. Besonders bei porösen Baustoffen führt ein höherer Porenanteil in der Regel zu einer geringeren Wärmeleitfähigkeit, da Luft ein schlechter Wärmeleiter ist. Umgekehrt nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Rohdichte zu, da dichter gepackte Materialien weniger Lufteinschlüsse aufweisen.[54] Aus diesem Grund könnte Beton-Recycling eine kleinere Wärmeleitfähigkeit aufweisen als natürliche Gesteinskörnung.

Allerdings ist auch der Feuchtegehalt ein entscheidender Faktor. Mit zunehmender Feuchtigkeit erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit, da Wasser im Vergleich zu Luft eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit besitzt.[55] Da Recyclingbeton infolge seiner offenporigen Struktur in der Regel mehr Wasser aufnimmt als natürliches Gestein, ist bei feuchtem Zustand mit einer stärkeren Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit gegenüber Naturgestein zu rechnen.

In der Literatur finden sich zahlreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit von natürlichen Gesteinskörnungen und Beton. Die DIN 4108-4:2020 sowie die DIN EN ISO 10456:2010 fassen die wärme- und feuchteschutztechnischen Bemessungswerte verschiedener Baustoffe zusammen. So beschreibt die DIN 4108:2020 die Wärmeleitfähigkeiten von Leichtbetonen mit einer Rohdichte von unter 2000 kg/m³. Die Wärmeleitfähigkeit streut hierbei zwischen

[53] vgl. online: BauNetz (22.07.2025)
[54] vgl. online: BauNetz (22.07.2025)
[55] vgl. online: BauNetz (22.07.2025)

0,11 und 1,35 W/m*k je nach Zusammensetzung und Rohdichte.[56] Aus der DIN EN ISO 10456:2010 kann die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton sowie von einigen Natursteinen entnommen werden. So wird deutlich, dass bei Betonen über 2000 kg/m³ die Wärmeleitfähigkeit einen Wert von 2,0 W/m*k erreichen kann. Bei Natursteinen wie Granit oder Gneis liegt dieser deutlich höher bei etwa 2,8 bzw. 3,5 W/m*k.[57] Wenn man die Wärmeleitfähigkeiten mit den Rohdichten der Stoffe abgleicht, wird deutlich, dass mit einer höheren Dichte die Wärmeleitfähigkeit λ ansteigt. Gleichzeitig sei noch angemerkt, dass die spezifische Wärmespeicherkapazität c_p des Betons und der Natursteine exakt bei 1000 J/kg*k liegt und damit im Vergleich der beiden Stoffe keine Relevanz aufweist.

4.2.2 Wärmetechnische Simulation bei Parametervariation

Mit Hilfe des wärmetechnischen Simulationsmodells nach Glück wurden die Auswirkungen variierender Rohdichten und Wärmeleitfähigkeiten analysiert. Das Ziel ist es herauszufinden, inwiefern sich die Temperaturverläufe und damit die Energiegewinne mit steigender Rohdichte oder steigender Wärmeleitfähigkeit verändern. Als Vorlage wurde ein extremer Sommertag in Anlehnung an DIN 4710 angenommen.[58] Für das Beispiel wurden Speicherabmessungen von 2,5 m Höhe, 10,0 m Breite und 6,5 m Länge für einen Luftvolumenstrom von 30000 m³/h gewählt. Die Eingabewerte sind in Anlage 7 sowie Anlage 8 ersichtlich und wurden gemäß dem Beispiel wie in dem Bericht von Bernd Glück übernommen und auf Plausibilität geprüft.[59]

Zur Bewertung des Einflusses materialbezogener Eigenschaften auf die thermische Leistung des Schotterspeichers wurden im ersten Schritt die Simulationsergebnisse des Ausgangsszenarios erstellt (siehe Anlage 9). Anschließend erfolgte eine Variation der Wärmeleitfähigkeit von ursprünglich 2,3 W/m*K auf 0,11 W/m*K. Die daraus resultierenden Simulationsergebnisse sind in Anlage 10 dokumentiert und verdeutlichen die Auswirkungen auf die Temperaturverläufe über 3 Entwurfstage hinweg. Analog dazu wurde auch die Rohdichte des Gesteinsmaterials von 2754 kg/m³ auf 2000 kg/m³ reduziert und die entsprechenden Ergebnisse in Anlage 11 dargestellt.

Da die temperaturbezogenen Differenzen in den erzeugten Diagrammen des Simulationsmodells nur begrenzt erkennbar waren, wurden repräsentative Werte für die Mittagsstunden zwischen 10 und 12 Uhr des dritten Entwurfstages stichprobenhaft erfasst

[56] vgl. Norm DIN 4108-4, S. 13 - 15
[57] vgl. Norm DIN EN ISO 10456, S. 15 ff.
[58] vgl. Norm DIN 4710
[59] vgl. GLÜCK, 2007

und in Tabelle 4 gegenübergestellt. In diesem Zeitraum ist mitunter der größte Kühleffekt im Schotterspeicher zu erwarten.

Ergebnisse Parametervariation

Tagesstunde	Lufteintrittstemperatur [°C]	Luftaustrittstemperatur [°C]		
		Ausgangsbeispiel	vermindertes Lambda	vermindertes Rho
64/10	29,0	20,6	22,3	20,9
65/11	31,0	20,8	22,4	22,1
66/12	32,0	21,6	23,2	23,8

Tabelle 4 Vergleich der Temperaturausgänge
(eigene Darstellung)

Aus den Simulationsergebnissen wird ersichtlich, dass bei gleichbleibender Lufteintrittstemperatur die Luftaustrittstemperaturen bei unterschiedlichen Eigenschaften des Gesteinsmaterials variieren. So kann die Luft im Schotterspeicher im Ausgangsbeispiel um 12 Uhr um 10,4 K abgekühlt werden. Bei verminderter Wärmeleitfähigkeit oder verminderter Rohdichte ist dieser Kühleffekt geringer und liegt bei 8,8 K bzw. 8,2 K. Die energetischen Gewinne gestalten sich demnach umso größer, je größer die Wärmeleitfähigkeit und je größer die Rohdichte des eingesetzten Schottermaterials ist. Die Unterschiede bleiben jedoch in einem moderaten Bereich, sodass anzunehmen ist, dass andere Einflussgrößen eine vergleichbare oder sogar größere Bedeutung für die Gesamteffizienz des Systems besitzen.

4.3 Kostenbetrachtung

Für die wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von Recycling-Betonkörnungen in Schotterspeichern lassen sich zwei grundsätzliche Ausgangssituationen unterscheiden. Fällt beim Rückbau oder Umbau von Gebäuden Betonbruch direkt auf der Baustelle an, kann dieser durch mobile Brech- und Siebanlagen vor Ort auf die geforderte Kornverteilung gemäß DIN 13383-1 aufbereitet werden. In diesem Zusammenhang entfallen nicht nur die Kosten für den Abtransport und die Entsorgung des Materials, sondern auch ein wesentlicher Teil der Transportkosten für die Anlieferung von Natursteine. Im Vergleich zur Beschaffung von Wasserbausteinen aus nahegelegenen Steinbrüchen können dadurch deutliche Kostenvorteile entstehen, insbesondere bei größeren Entfernungen zum Steinbruch. Eine exakte monetäre Gegenüberstellung war für dieses Szenario im Rahmen der Arbeit nicht möglich, da die Kosten für mobile Brech- und Siebanlagen stark von den jeweiligen Rahmenbedingungen auf der Baustelle abhängen, wie etwa dem Anteil an Bewehrungsstahl, der Materialart (Beton- oder Stahlbetonbruch) sowie der Einsatzdauer des Brechers.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anlieferung grobkörnigen Betonrecyclingmaterials aus stationären Recyclinganlagen. Hier liegen die Materialpreise pro Tonne in der Regel unter denen von Naturstein, wobei die Höhe der Transportkosten von der regionalen Verfügbarkeit geeigneter Materialien abhängt. Die Wahl des Materials wird somit maßgeblich durch die Kombination aus Materialpreis, Transportdistanz und Qualität bestimmt.

Für dieses Szenario konnten aktuelle Preislisten regionaler Anbieter ausgewertet und eine quantitative Kostenbetrachtung durchgeführt werden, basierend auf den Volumenangaben des im Kapitel 4.2.2 beschriebenen Praxisbeispiels. In Tabelle 5 sind die Abmessungen des Schotterspeichers sowie der im Praxisbeispiel angenommene Luftvolumenanteil aufgeführt. Auf dieser Grundlage wurde das Gesamtvolumen des Speichers und daraus das erforderliche Gesteinsvolumen berechnet.

Angaben Schotterspeicher	
Höhe	2,50 m
Breite	10,00 m
Länge	6,50 m
Luftvolumenanteil	44 %
Volumen	162,50 m^3
Gesteinsvolumen	91,00 m^3

Tabelle 5 Angaben Schotterspeicher aus dem Praxisbeispiel
(eigene Darstellung)

Die Materialpreise wurden in Tabelle 6 gegenübergestellt. Der Preis für kleine Wasserbausteine in Höhe von 22,50 €/t wurde der in Anlage 12 abgedruckten Preisliste der Mitteldeutsche Baustoffe GmbH, Steinbruch Petersberg, entnommen. Der Preis für die RC-Gesteinskörnung von 6,50 €/t stammt aus der Anlage 13 enthaltenen Preisliste der Firma Remex und entspricht den Kosten für das in dieser Arbeit beprobte Material. Ergänzend wurde der Preis für Andesit im Steinbruch Dönstedt durch ein Telefongespräch mit Frau Manuela Trost, Verkaufsleiterin der Norddeutschen Naturstein GmbH, ermittelt[60].

Materialdaten			**Kostenberechnung**	
Material	Preis [€/t]	Dichte [g/cm^3]	erforderliche Masse [t]	Kosten [€]
Wasserbaustein	22,50	2,60	236,60	5.323,50
Andesit	26,50	2,60	236,60	6.269,90
RC-Gesteinkörnung	6,50	2,10	191,10	1.242,15

Tabelle 6 Kostenberechnung
(eigene Darstellung)

[60] vgl. Manuela Trost 2025

Die Gegenüberstellung zeigt, dass RC-Material im Vergleich zu Andesit oder konventionellen Wasserbausteinen für das betrachtete Praxisbeispiel eine Kostendifferenz von etwa 4.000 € bis 5.000 € aufweist. Transportkosten sowie mögliche Mengenrabatte wurden in dieser Berechnung nicht berücksichtigt, sodass die tatsächliche Differenz je nach Projektrahmenbedingungen abweichen kann. Dennoch verdeutlichen die Ergebnisse das signifikante wirtschaftliche Einsparpotenzial beim Einsatz von Recyclingbeton als Speichermaterial im Schotterspeicher

Darüber hinaus kann die Entscheidung für eine Systemtrennung zwischen Schotterspeicher und Lüftungssystem, welche in den späteren Kapiteln beschrieben wird, zusätzliche Einsparpotenziale erschließen. Da die konditionierte Luft nicht direkt in den Raum gelangt, entfällt der Bedarf an kostenintensiver Filtertechnik. Gleichzeitig trägt der Einsatz von Recyclingmaterial und die damit verbundene Einsparung natürlicher Ressourcen zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen bei. Angesichts einer steigenden CO_2-Bepreisung kann dies zu einer langfristigen Senkung der Betriebskosten des Gesamtsystems führen.

Abschließend ist festzuhalten, dass für jedes Bauvorhaben eine individuelle, quantitative Kostenberechnung notwendig ist, da Faktoren wie Transportentfernung, Materialverfügbarkeit und projektspezifische Anforderungen stark variieren können. Die Tendenz deutet jedoch darauf hin, dass der Einsatz von RC-Körnungen in vielen Fällen die wirtschaftlichere Variante darstellen dürfte.

5 Diskussion

5.1 Technische Limitierung beim Einsatz von RC-Material in Schotterspeichern

Aus den Laboruntersuchungen und den literarischen Daten geht hervor, dass Beton-Recyclingmaterial den Anforderungen an die technischen Eigenschaften für Wasserbausteine nicht vollständig einhalten kann. So ist es zwar möglich, das Betonbruchmaterial mittels Brech- und Siebverfahren auf die geforderte Sieblinie und Kornform der DIN 13383-1 aufzubereiten. Jedoch führt die stark höhere Porosität und Wasseraufnahme des Materials gegenüber natürlichen Gesteinen zu einer Problematik bei der Lufthygiene. Auch in Bezug auf die Rohdichte und daraus folgend die Wärmeleitfähigkeit schneidet der Recyclingbeton gegenüber Naturstein in Bezug auf die energetischen Gewinne im Schotterspeicher schlechter ab. Des Weiteren können betonschädigende Prozesse auch im Nachhinein bei Betonrecycling auftreten und deren Struktur zerstören. Aus diesen Gründen ist der Einsatz in lastabtragenden Schotterspeichern in herkömmlicher Bauweise und Funktionalität technisch ungeeignet.

Gleichwohl zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass die energetischen Verluste im Vergleich zu Naturstein nur moderat ausfallen und der wesentliche Kühleffekt des Schotterspeichers erhalten bleibt. Auch die in den theoretischen Grundlagen beschriebenen betonschädigenden Prozesse sind für diese Anwendung nicht als grundsätzliches Ausschlusskriterium zu werten, da mögliche Gefügeschäden durch Volumenvergrößerung die Funktionsweise des Schotterspeichers nur geringfügig beeinflussen würden. Das Risiko einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion kann durch die in modernen Recyclinganlagen übliche chemische Materialprüfung weitgehend ausgeschlossen werden. Bei auf der Baustelle anfallendem Betonbruch ist eine entsprechende Laboranalyse von Einzelproben ebenfalls möglich. Die Carbonatisierung des Materials hat keine relevanten Auswirkungen auf die Funktionsweise des Schotterspeichers und eine verspätete Ettringitbildung ist aufgrund der im Betrieb zu erwartenden Maximaltemperaturen von unter 35 °C unwahrscheinlich.

Es sei darauf hingewiesen, dass die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Laboruntersuchungen als Stichprobenmessungen zu verstehen sind, bei denen die genaue Zusammensetzung der untersuchten Recyclingkörnung nicht vollständig bekannt war. Aufgrund dieser Unsicherheit ist die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt. Sie liefern jedoch erste Anhaltspunkte für typische Spannbreiten bei Rohdichte und Wasseraufnahme und bestätigen die in der Literatur gegebenen Werte. Für eine fundiertere

Bewertung der Bandbreite der Eigenschaften des Betons wäre es erforderlich, systematisch verschiedene Betone anhand deren Festigkeitsklassen und Zusammensetzung zu untersuchen.

Durch weitere Aufbereitungstechniken des Betonrecycling Materials ist es heutzutage möglich, durch verschiedene Zerkleinerungsverfahren zementsteinarme Rezyklate zu erzeugen. So kann beispielweise durch thermische Verfahren der Zementstein bei 800 °C dehydratisiert werden und es werden nahezu zementsteinfreie Körnungen erzielt.[61] Auch die Methode der elektrodynamischen Fragmentierung ermöglicht es den Altbeton sauber in seine Ausgangsbestandteile aufzutrennen[62]. Jedoch würden durch diese Aufbereitungsprozesse Gesteinskörnungen entstehen, die den Korngrößenanforderungen im Schotterspeicher nicht mehr genügen. Zusätzlich wären diese Aufbereitungsmethoden sehr aufwendig und kostenintensiv, weshalb deren Anwendung für Schotterspeicher ungeeignet ist.

5.2 Chancen und Herausforderungen

Die Anwendung von luftdurchströmten Schotterspeichern in Verbindung mit Recycling-Betonkörnungen eröffnet neue Möglichkeiten für ressourcenschonende Gebäudekonditionierung. Allerdings konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass beim Einsatz von RC-Materialien als Gesteinskörnung aufgrund der erhöhten Wasseraufnahme hygienische Risiken entstehen können.

Ein Lösungsansatz besteht in der Systemtrennung von Speicher und Lüftungssystem. Durch diese Entkopplung wird vermieden, dass die durch das RC-Material strömende Luft direkt dem Innenraum zugeführt wird. Stattdessen kann der Schotterspeicher mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe gekoppelt werden. In diesem Fall dient die thermisch aufbereitete Außenluft lediglich als Wärmequelle für die Wärmepumpe, ohne in direkten Kontakt mit der Raumluft zu treten. Dies reduziert die hygienischen Anforderungen an das eingesetzte Speichermaterial erheblich und ermöglicht somit den praktischen Einsatz von RC-Körnung, ohne gesundheitliche Risiken einzugehen.

Ein weiterer Vorteil dieser Kombination liegt in der Verbesserung der Betriebssicherheit der Wärmepumpe. Durch die Vorwärmung der angesaugten Luft im Winterbetrieb können Frostprobleme am Verdampfer vermieden und die Effizienz der Wärmepumpe gesteigert werden. Nichtsdestotrotz ist bei einer solchen Systemtrennung mit thermischen Verlusten von zwei bis drei Kelvin zu rechnen, die sich negativ auf die Effizienz

[61] vgl. MÜLLER, 2018, S. 301 ff.
[62] vgl. Norm DIN SPEC 18212

des Gesamtsystems auswirken können. Diese Einbußen sind in der Planung zu berücksichtigen und gegen die hygienischen und baustofflichen Vorteile abzuwägen.

Bisher wurde eine solche Kopplung in der praktischen Umsetzung in Deutschland jedoch nicht realisiert. Die Kombination aus RC-Material, Schotterspeicher und Wärmepumpe ist ein neuartiger Ansatz, dessen energetisches und betriebliches Potenzial erst durch weiterführende Untersuchungen und Pilotprojekte validiert werden muss.

Neben der Kopplung mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe kann die Systemtrennung auch über einen Luft-Luft-Wärmetauscher erfolgen. In diesem Fall wird die thermisch konditionierte Luft aus dem Schotterspeicher nicht direkt dem Raum zugeführt, sondern überträgt ihre Wärmeenergie auf einen separaten Luftstrom. Dadurch bleibt das Schotterspeichersystem komplett vom Aufenthaltsluftsystem entkoppelt, was hygienische Risiken durch den Einsatz von Recycling-Betonkörnung unbedenklich macht. Dieses Trennungskonzept wurde bereits erfolgreich im Tiergarten Schönbrunn im Giraffenhaus umgesetzt. Die eigentliche Zuluft wird hierbei über einen Wärmetauscher temperiert und in das Gebäude eingebracht. Dieses System zeigt, dass eine funktionale Trennung von Luftführung und Speichermaterial praktisch umsetzbar ist, ohne die thermische Wirkung des Speichers zu verlieren.

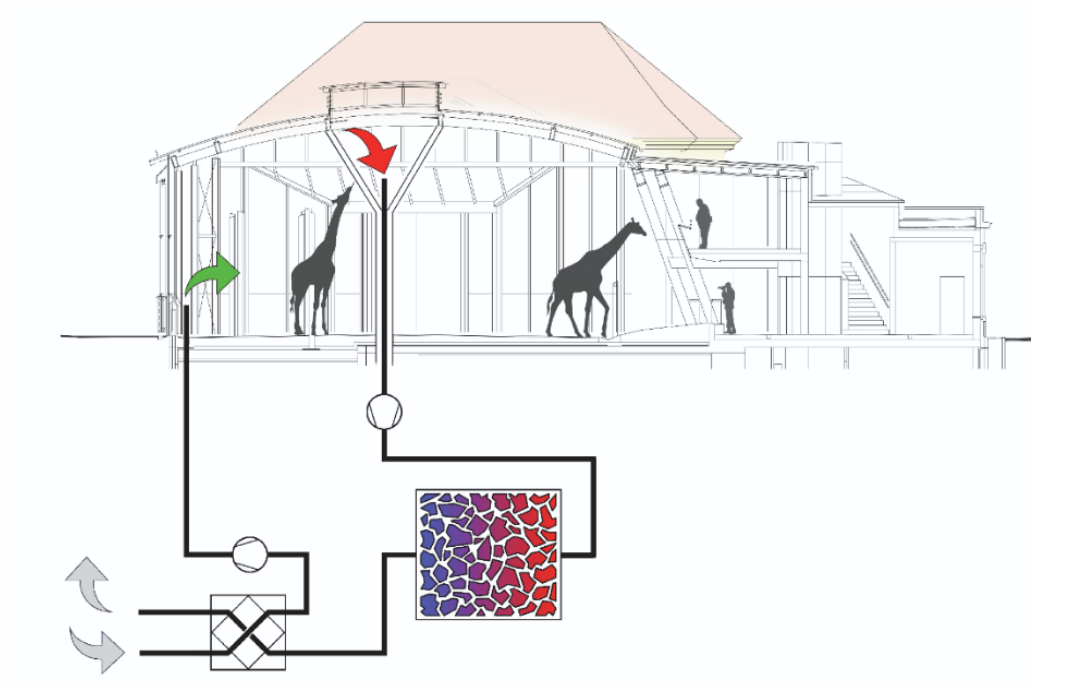


Abbildung 24 Prinzip der Luft-Luft-Systemtrennung im Tiergarten Schönbrunn (WELLER; SCHEURING, 2018, S.42)

Insgesamt zeigt sich, dass die Entkopplung von Wärmespeicher und Raumluft die Chance bietet, Recyclingbetonkörnung funktional in Schotterspeichern einzusetzen, wodurch sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile realisierbar werden ohne dabei die Lufthygiene im Gebäude zu gefährden.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz liegt in der Revitalisierung von Bestands- und Brachflächen. Insbesondere in stillgelegten Industriearealen oder bei der Umnutzung bestehender Gebäude könnten vorhandene unterirdische Strukturen, beispielsweise nicht mehr genutzte Keller, in Schotterspeicher umfunktioniert werden. Dadurch ließe sich der energie- und ressourcenintensive Abbruch vermeiden und zugleich würden Entsorgungs- und Transportkosten reduziert.

Gerade auf ehemaligen Industriegeländen fällt häufig Betonbruch an, beispielsweise aus großflächigen Fundamenten oder massiven Bodenplatten, die im Zuge von Rückbauarbeiten aus dem Boden entfernt werden müssen. Diese Materialmengen könnten nach entsprechender Aufbereitung nicht nur einer hochwertigen Verwertung als Recyclingbetonkörnung zugeführt, sondern auch unmittelbar zur Befüllung von Schotterspeichern eingesetzt werden. Auf diese Weise stünden gleichzeitig große Speichervolumina zur Verfügung, die wirtschaftlich und ressourcenschonend genutzt werden können.

Die Wiederverwendung vorhandener Fundament- oder Kellerräume als Speichervolumen leistet einen wichtigen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. In Kombination mit Recyclingbetonkörnungen entsteht so eine Lösung, die ökologische und ökonomische Vorteile vereint und das Potenzial hat, die Nachhaltigkeit von Bau- und Sanierungsprojekten signifikant zu erhöhen.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde untersucht, inwiefern sich Recyclingbeton als alternatives Gesteinskörnungsmaterial im luftdurchströmten Schotterspeicher eignet. Neben einem umfassenden Theorieteil, in dem grundlegende Wirkmechanismen, Anforderungen und Schadensmechanismen, wie Carbonatisierung, Ettringitbildung und Alkali-Kieselsäure-Reaktion beleuchtet wurden, erfolgte eine gezielte Gegenüberstellung von Literaturwerten und eigenen Laborergebnissen hinsichtlich Rohdichte und Wasseraufnahme.

Die Laboruntersuchungen zeigten, dass grobkörnige RC-Gesteinskörnungen ähnlich hohe Wasseraufnahmewerte aufweisen wie feinkörnige. Einzelne Abweichungen, etwa durch Ziegelreste oder ungenauer Messmethodik, führen zu einer Streuung der Ergebnisse, lassen jedoch den allgemeinen Trend erkennen. Die im Vergleich zu Naturstein signifikant erhöhte Wasseraufnahme könnte die Eignung des RC-Materials für Anwendungen mit direkter Luftzuführung einschränken. Lufthygienische Bedenken, wie etwa das Risko von Mikroorganismenbildung aufgrund erhöhter Feuchte, sind nicht von der Hand zu weisen. Die gemessenen Rohdichtewerte und die daraus resultierenden geringfügig niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten weisen zwar auf leichte wärmetechnische Verluste im Vergleich zu Naturstein hin, diese sind jedoch nicht so gravierend, dass sie die Funktionalität des Speichers ausschließen würden. Auch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit konnten potenziell kritische Prozesse wie AKR oder die verspätete Ettringitbildung unter den gegebenen Einsatzbedingungen als eher unwahrscheinlich eingestuft oder technisch beherrschbar bewertet werden.

Insgesamt lässt sich die Forschungsfrage dahingehend beantworten, dass Recyclingbeton konventionellen Natursteinschotter in lastabtragenden Schotterspeichern technisch ersetzen kann, sofern durch eine Systemtrennung hygienische Risiken vermieden werden. Die mechanische Eignung ist bei angepasster Ausführung gegeben, die Dauerhaftigkeit weist keine gravierenden Einschränkungen auf und die Wirtschaftlichkeit kann abhängig von Materialquelle und Projektrahmenbedingungen vorteilhaft sein.

Im Schotterspeicherkontext zeigt sich, dass hygienischen Risiken bei einer Systemtrennung von Speichermedium und Raumluft nicht mehr zum Tragen kommen müssen. Die Kopplung des Schotterspeichers mit einer Wärmepumpe oder einem Luft-Luft-Wärmetauscher stellt eine zukunftsweisende Alternative dar. Dabei wird die thermisch aufbereitete Außenluft zur Effizienzsteigerung weitergenutzt, ohne direkt in den Innenraum zu gelangen. Auch wenn diese Systemtrennung bislang noch nicht im Zusammenspiel mit Wärmepumpen in Deutschland erprobt wurden, bieten sich hier interessante Perspektiven für weitere Forschung und Demonstrationsprojekte.

Darüber hinaus verdeutlichen die wirtschaftlichen Analysen, dass insbesondere beim Bezug von RC-Material aus stationären Recyclinganlagen deutliche Investitionskostenvorteile gegenüber Naturstein bestehen. In Kombination mit der potenziellen CO_2-Einsparung durch vermiedenen Natursteinabbau, kürzere Transportwege und die Nutzung bestehender Betonbruchmengen ergibt sich ein zusätzliches ökologisches Argument für den Einsatz von Recyclingmaterial.

Für die Zukunft empfiehlt sich eine gezielte Weiterentwicklung und Erprobung von Systemtrennungsansätzen in der Praxis, um die hygienischen Bedenken vollständig auszuräumen und die Effizienzpotenziale im Zusammenspiel mit modernen Wärmepumpensystemen zu quantifizieren. Ebenso könnten Pilotprojekte zur Revitalisierung bestehender Bausubstanz, etwa durch die Umnutzung alter Keller oder Fundamente zu Schotterspeichern, einen zusätzlichen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten.

Quellenverzeichnis

BAUNETZ: Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR, Betonkrebs). In: https://www.baunetz-wissen.de/glossar/a/alkali-kieselsaeure-reaktion-akr-betonkrebs-7915528 (17.07.2025)

BAUNETZ: Recyclingbeton. In: https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/recyclingbeton-930267 (14.07.2025)

BAUNETZ: Wärmeleitfähigkeit – IM FOKUS DER BAUPHYSIK. In: https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/eigenschaften/waermeleitfaehigkeit-152162 (22.07.2025)

Norm DIN EN ISO 10456, 00.05.2010: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30038480 (23.07.2025)

BESCO: BERLINER STEINCONTOR: Bestimmung der Wasseraufnahme nach DIN EN 13755:2008-08. In: https://besco-gmbh.de/bestimmung-der-wasseraufnahme/ (13.07.2025)

Norm DIN SPEC 18212, 00.02.2022: Betonrecycling - Qualitätssicherung bei der elektrodynamischen Fragmentierung von Betonbruch. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30093249 (24.07.2025)

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, NATURSCHUTZ, UND NUKLEARE SICHERHEIT: Trennung befördert Recycling - Abfallbilanz 2022. o. O., 2024. In: https://www.bundesumweltministerium.de/meldung/trennung-befoerdert-recycling-abfallbilanz-2022 (30.06.2025)

DEHLI, Martin: Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe – Energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen. Wiesbaden, 2020

Europäische Union: Richtlinie (EU) 2024/1275 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, 24.04.2024

GLÜCK, Bernd: Luftdurchströmter Schotterspeicher – Wärmetechnisches Simulationsmodell. Bericht Westsächsische Hochschule Zwickau (FH). Zwickau, 2007

GOEKE, Johannes: Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik – Sensible Speicher, latente Speicher, Systemintegration. Wiesbaden, 2021

HAMILTON, Ian; u. a., (2020): 2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings

and construction sector United Nations Environment Programme. In: https://globalabc.org/sites/default/files/inline-files/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf (02.08.2025)

HERRMANN, Andreas: Einsatz von luftdurchströmten Schotterspeichern. In: KLIMZUG, 01.02.2012

MANUELA TROST, (2025): Preis für Wasserbausteine. Chemnitz, 11.08.2025. Telefonat an Niklas Preißler

MÜLLER, Anette: Baustoffrecycling – Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. Wiesbaden, 2018

NOLTING, Ulrich; u. a.: Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen : 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018. Karlsruhe, 2018

REICHEL, Mario: Luftdurchströmte Schotterschüttungen – Effizienzerhöhung in RLT-Anlagen. In: DIE KÄLTE + Klimatechnik, 18.05.2011a. In: https://www.dieka-elte.de/top-thema/effizienzerhoehung-rlt-anlagen-1-teil-das-forschungsprojekt-luftdurchstroemte#chapter-1

REICHEL, Mario: Luftdurchströmte Schotterschüttungen – Effizienzerhöhung in RLT-Anlagen. In: DIE KÄLTE + Klimatechnik, 16.06.2011b. In: https://www.dieka-elte.de/klimatechnik/effizienzerhoehung-rlt-anlagen-2-teil-anwendungsbeispiel-luftdurchstroemte

REICHEL, Mario: Aufbau, Funktion und Betriebserfahrungen mit luftdurchströmten Schotterschüttungen (Schotterspeicher). In: DIE KÄLTE + Klimatechnik, 01.02.2017. In: https://www.ki-portal.de/wp-content/uploads/2017/02/KI_2016_12_Wissenschaft_Reichel_6_Seiten.pdf

REICHEL, Mario, (2025): Anforderungen Schotterspeicher. Chemnitz, 16.07.2025. Telefonat an Niklas Preißler

REICHEL, Mario; STIEBER, Ronny, (2008): Luftdurchströmter Speicher zum Kühlen und Vorheizen und damit aufgebaute zentrale Lüftungsanlage. Angemeldet durch Reichel, Mario, 09244 Lichtenau, DE am 10.10.2008. Anmeldenr: DE102008051270B4. Veröffentlichungsnr: DE102008051270B4. F24F5/00. Prioriätsdaten: DE102008051270B42015.04.09

ROSENBERGER, Robert: Anteil der Bauwirtschaft an den globalen CO2-Emissionen, 2024. In: https://baufair.at/anteil-der-bauwirtschaft-an-den-globalen-co2-emissionen/ (30.06.2025)

ROßBERG, K. [Hrsg.], (1997): Baustoffrecycling - nicht nur ein technisches Problem. 5. Weimarer Fachtagung über Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft. Weimar

SCHEIDT, Julia C.: Ermittlung des erforderlichen Gesamtwassers zur Herstellung von R-Beton mit definiertem Wasserzementwert. Dissertation Technische Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern, 2019

SCHNEIDER, Klaus-Jürgen: Bautabellen für Ingenieure – Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. 25. Auflage. Köln, 2022

STARK, Jochen; WICHT, Bernd: Dauerhaftigkeit von Beton. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Berlin, 2013

Norm DIN 4710, 00.01.2003: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE45508762 (23.07.2025)

Norm DIN 4710, 01.01.2003: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE45508762 (03.07.2025)

TÖLLE, Andrea: So funktionieren Schotterspeicher-Lüftungssysteme im Schweinestall, 2021. In: https://www.landundforst.de/tier/schwein/so-funktionieren-schotterspeicher-lueftungssysteme-schweinestall-565901 (04.07.2025)

TROGISCH, Achim; REICHEL, Mario: Planungshilfen Lüftungstechnik. 7., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, 2020

Norm DIN 4108-4, 00.11.2020: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30087471 (23.07.2025)

Norm DIN EN 13383-1:2002, 00.08.2002: Wasserbausteine - Teil 1: Anforderungen. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30090172 (07.07.2025)

Norm DIN EN 13383-2:2019, 00.12.2019: Wasserbausteine - Teil 2: Prüfverfahren. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30090164 (07.07.2025)

WELLER, Bernhard; SCHEURING, Leonie: Denkmal und Energie 2019 – Energieeffizienz, Nachhaltigkeit und Nutzerkomfort. Wiesbaden, Germany, 2018

Norm DIN EN 197-1, 00.11.2011: Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30044356 (09.07.2025)

Norm DIN EN 14216, 00.09.2015: Zement - Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Sonderzement mit sehr niedriger Hydratationswärme. In:

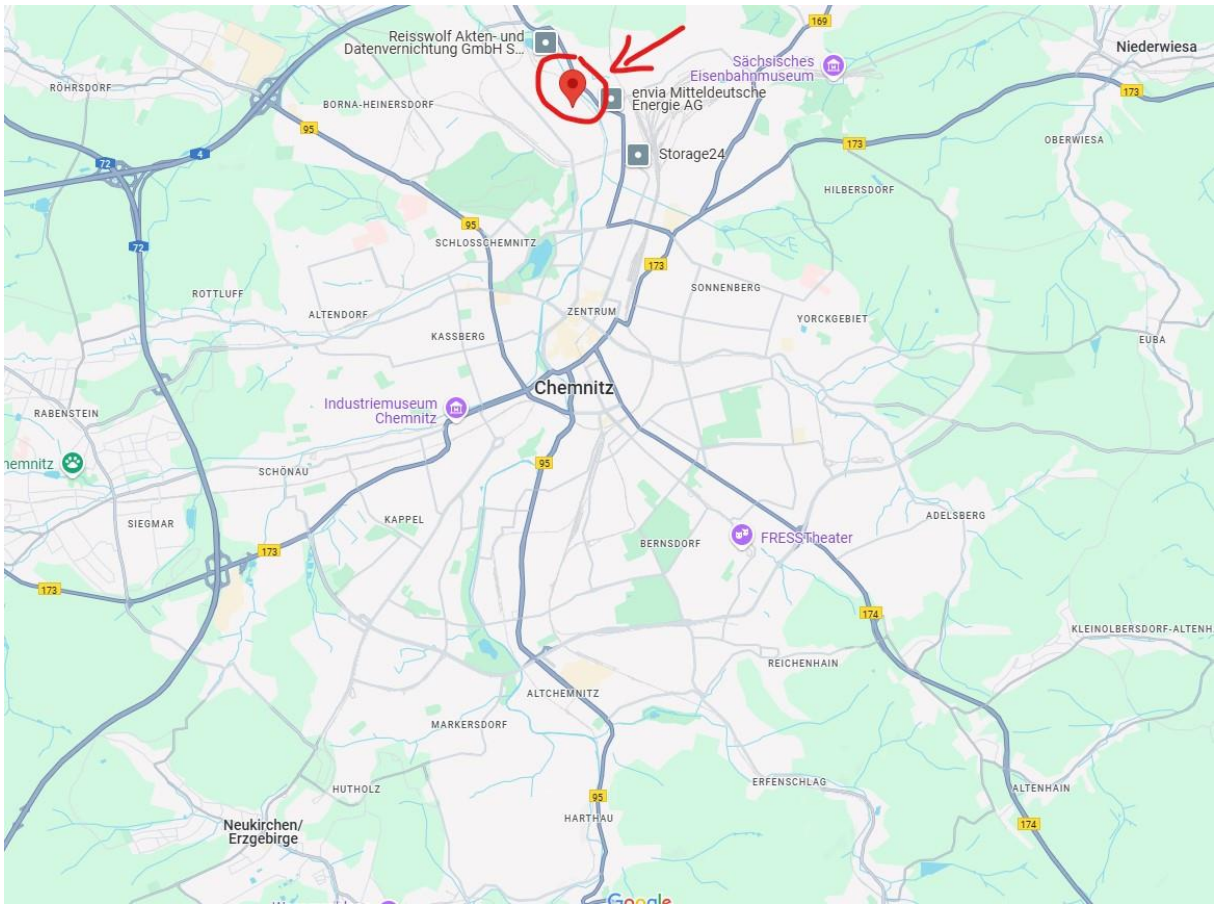
https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30063300 (09.07.2025)

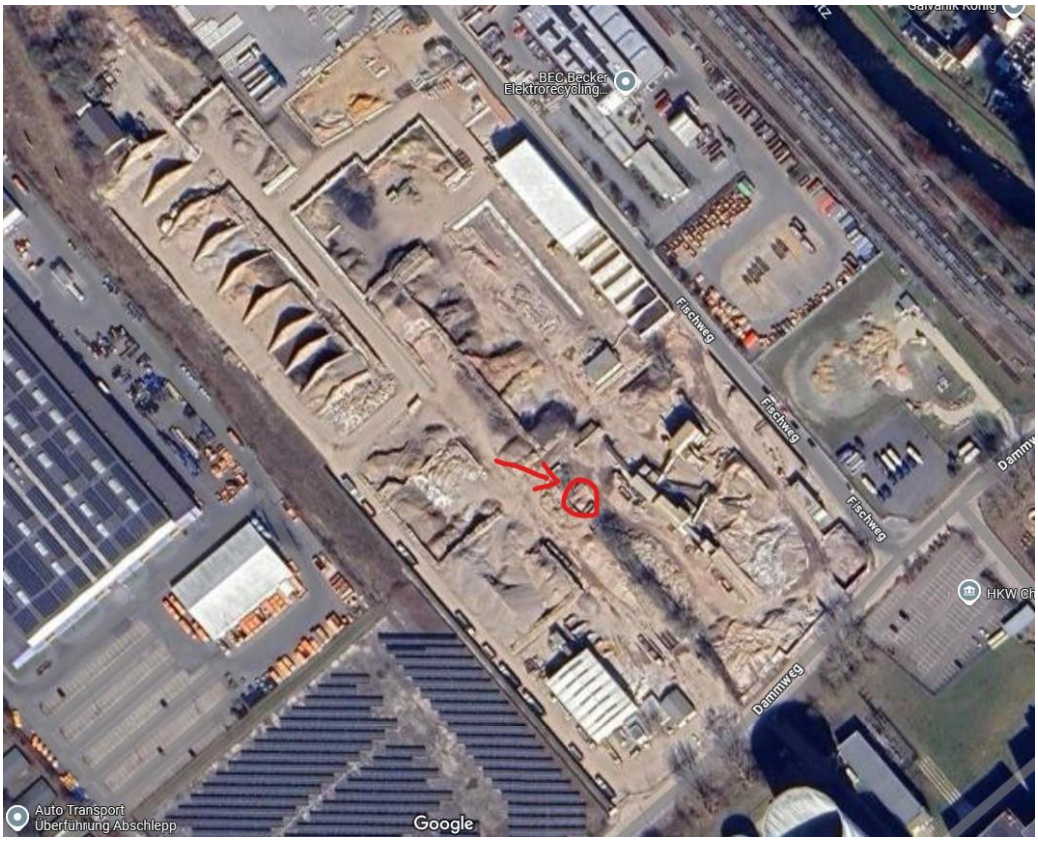
Norm DIN EN 934-2, 00.08.2012: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teil 2: Betonzusatzmittel - Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung. In: https://www-nautos-de.dssax.idm.oclc.org/TET/search/item-detail/DE30047741 (09.07.2025)

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Lage Entnahmestelle Betonrecycling Gesteinskörnung
Anlage 2	Probenahmeplan
Anlage 3	Prüfbericht mit zugehöriger Excel-Tabelle
Anlage 4	Leistungserklärung Granit
Anlage 5	Leistungserklärung Rhyolith
Anlage 6	Leistungserklärung Andesit
Anlage 7	Eingabedaten Wärmesimulation
Anlage 8	Zeitverlauf Wärmesimulation – Entwurfstag 4
Anlage 9	Simulationsergebnisse Ausgangsbeispiel
Anlage 10	Simulationsergebnisse mit geringerer Wärmeleitfähigkeit
Anlage 11	Simulationsergebnisse mit geringerer Rohdichte
Anlage 12	Preisliste Wasserbausteine - Mitteldeutsche Baustoffe GmbH
Anlage 13	Preisliste Betonrecycling - Remex

Lage Entnahmestelle Betonrecycling Gesteinskörnung





Probenahmeplan gemäß DIN EN 13383-2

a) Art der Wasserbausteine

RC-Gesteinskörnung aus Betonabbruchmaterial, Körnung 45/100 mm

b) Ziel der Probenahme

Untersuchung der Eignung von Recyclingbeton-Gesteinskörnung für die Verwendung in lastabtragenden, luftdurchströmten Schotterspeichern
Zu prüfende Eigenschaften:
- Rohdichte
- Wasseraufnahme

c) Bezeichnung der Probenahmestellen

REMEX Ost GmbH, Betriebsstätte Chemnitz Fischweg 1, 09114 Chemnitz, Deutschland
Entnahme direkt aus Halde

d) Masse / Anzahl der Einzelproben

Einzelprobe: ca. 10-15 kg Gesteinskörnung
Steinanzahl pro Einzelprobe: 14 Steine

e) Anzahl der Einzelproben

14 Steine

f) Verwendete Geräte zur Probenahme

Eimer als Transportbehälter

g) Verfahren zur Probenahme und Reduktion

Entnahme gemäß Abschnitt 4.5.3 der DIN EN 13383-2 b)

h) Kennzeichnung, Verpackung, Versand

Kennzeichnung: „RC-Beton 45/100 – Probe 1 – REMEX Ost – 11.07.2025“ und
„RC-Beton 45/100 – Probe 2 – REMEX Ost – 11.07.2025“
Verpackung: Eimer
Versand/Transport: Eigentransport ins Labor, lufttrocken, geschlossen gelagert zur Vermeidung von Wasseraufnahme

Prüfbericht gemäß DIN EN 13383-2 Abschnitt 8.7

a) Verweisung auf das Dokument

DIN EN 13383-2:2019-12 – Wasserbausteine – Teil 2: Prüfverfahren

b) Bezeichnung des Laboratoriums

Labor für Baustoffprüfung – Duale Hochschule Glauchau, Bauingenieurwesen

c) Bezeichnung der Probe

RC-Beton 45/100 – Probe 1 (REMEX Ost – 26.07.2025)

RC-Beton 45/100 – Probe 2 (REMEX Ost – 26.07.2025)

d) Nominale Korngröße der Charge des Wasserbausteins

45/100 mm

e) Masse der geprüften Proben

siehe Excel-Tabelle

f) Prüfergebnisse

siehe Excel-Tabelle

g) Datum der Prüfung

15.07.2025

Laborproben zur Rohdichte und Wasseraufnahme

Kennzeichnung	Bemerkungen	Masse unter Wasser M1 [g]	Volumen Taraausgleich V1 [cm^3]	Masse über Wasser M2 [g]	Trockenmasse M3 [g]	ρ [g/cm^3]	W [M.-%]
1		548,70	447,90	995,30	902,20	2,02	10,32
2		646,70	468,80	1113,50	1058,70	2,27	5,18
3	zu groß für Drahtkorb			2375,30	2234,70		6,29
4		778,00	603,40	1387,50	1294,50	2,12	7,18
5		415,60	309,80	724,60	677,60	2,19	6,94
6		339,90	265,30	603,50	566,70	2,15	6,49
7		497,60	396,20	892,90	820,30	2,08	8,85
8		452,20	394,90	847,50	774,80	1,96	9,38
9		337,30	245,80	581,50	552,60	2,26	5,23
10		382,50	296,70	678,20	616,90	2,09	9,94
11		245,90	188,60	434,10	402,50	2,14	7,85
12		575,00	433,40	1007,60	945,40	2,19	6,58
13		701,70	543,90	1243,50	1156,20	2,13	7,55
14	mit Ziegel	339,00	266,60	605,00	547,80	2,06	10,44
					Durchschnitt	**2,13**	**7,73**

Anlage 3

Leistungserklärung Granit

Part of GROUP DE CLOEDT

DC Resources

Declaration of Performance / Leistungserklärung

Armourstone / Wasserbausteine

According to Commission Delegated Regulation (EU) No. 574/2014 amending Annex III to Regulation (EU) No. 305/2011 (EU - Construction Products Regulation) / Gemäß Delegierter Verordnung (EU) Nr. 574/2014 der Kommission zur Änderung von Anhang III der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 (EU - Bauproduktenverordnung)

Declaration of Performance No. / Leistungserklärung Nr.:
DCHA-63/180mm-CP-EN13383-22A-DE

Unique identification of the product-types / Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:
Halsvik Aggregates® 63/180 mm

Intended use / Verwendungszweck:
Armourstone / Wasserbausteine

Manufacturer / Hersteller:
DC Halsvik Aggregates AS, Sløvågen 1, N-5960 Dalsøyra
Lab@dcresources.no

System of AVCP / System zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit:
System 2+

Harmonized standard / Harmonisierte Norm:
EN 13383-1:2002

Notified body / Notifizierte Stelle
BÜV Nord Hamburg (1106)

Declared performances / Erklärte Leistungen
See annex / Siehe Anlage

The performance of the product identified above is in conformity with the set of declared performances. This declaration of performance is issued, in accordance with Regulation (EU) No. 305/2011, under the sole responsibility of the manufacturer identified above. / Die Leistungen des vorstehenden Produktes entsprechen den erklärten Leistungen. Für die Erstellung der Leistungserklärung im Einklang mit der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 ist allein der oben genannte Hersteller verantwortlich.

Signed for and on behalf of the manufacturer by / Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:

Jan-Øyvind Jørgensen

Jan-Øyvind Jørgensen, CEO
Sløvåg, 28.06.2022

Leistungserklärung Granit

Part of GROUP DE CLOEDT

DC Resources

Declaration of Performance No. / Leistungserklärung Nr.:
DCHA-63/180mm-CP-EN13383-22A-DE

Essential characteristics / Wesentliche Merkmale	Test method / Prüfnorm	Performance / Leistung	European technical specification / Harmonisierte Technische Spezifikation
Petrographic description / Petrographische Beschreibung	EN 932-3	Gneiss/Granit	EN 13383-1:2002
Particle size / Steinklassen	EN 13383-2:2002, clause 5	$CP_{63/180}$	
Particle shape / Steinform	EN 13383-2:2002, clause 7	LT_A	
Particle density / Gesteinsdichte Water absorption / Wasseraufnahme	EN 13383-2:2002, clause 8	2,71 Mg/m³ $WA_{0,5}$	
Resistance to fragmentation/crushing / Widerstand gegen Brechen	EN 1926:1999, annex A	CS_{80}	
Resistance to attrition / Widerstand gegen Abrieb	EN 1097-1	$M_{DE}NR$	
Release of dangerous substances / Gefährliche Substanzen	-	NDP	
Durability against freeze/thaw / Frost- Tau-Wechselbeständigkeit	EN 13383-2:2002, clause 9	FT_A	
Durability against salt crystallization / Widerstand gegen Salzkristallisation	EN 1367-6	MS_{NR}	
Durability against weathering / Sonenbrand	EN 13383-2:2002, clause 10	SB_{NR}	

NPD: No Performance Determined / Keine Leistung festgestellt

CE

1106

DC Halsvik Aggregates AS
Sløvågen 1
N-5960 Dalsøyra

17

DCHA-63/180mm-CP-EN13383-22A-DE
EN 13383-1:2002
Haslsvik Aggregates® 63/180 mm

The essential characteristics are given in this Declaration of Performance /
Die wesentlichen merkmale sind dieser Leistungerklärung zu entnehmen

Leistungserklärung Rhyolith

Leistungserklärung

gemäß delegierte Verordnung (EU) Nr. 574/2014 der Kommission zur Änderung von Anhang III der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 (Bauprodukteverordnung, BauPVO)

042-13383-2018.07

Eindeutiger Kenncode des Produkttyps:

Produkt/ Lieferkörnung	LMB 5/40	LMB 10/60	LMB 60/300	CP 45/125	CP 63/180	CP 90/250
eindeutiger Kenncode (Sorten-Nr.)	131	128	130	125	126	127
Produkt/ Lieferkörnung						
eindeutiger Kenncode (Sorten-Nr.)						

Verwendungszweck(e) und Harmonisierte Norm(en):
EN 13383:2002+AC:2004 Wasserbausteine

Hersteller:

Mitteldeutsche Baustoffe GmbH
OT Sennewitz
Köthener Straße 13
06193 Petersberg
Lieferwerk - Petersberger Quarzporphyr

System(e) zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit:

System 2+

Notifizierte Stelle(n):

- notifizierte Stelle BBN Nordharz GmbH -1510- Erstinspektion des Werkes
- Notifizierte Stelle bupZert GmbH -**2516**- führt seit 1.01.2014 die laufenden Inspektionen durch.

Erklärte Leistung:
Siehe vollständige Auflistung am Ende dieser Erklärung

Die Leistung des Produkts entspricht den erklärten Leistungen.
Verantwortlich für die Erstellung dieser Leistungserklärung ist allein der Hersteller.
Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers von:

Petersberg, 12.07.2018

Dipl.-Ing. Thomas Jung
Geschäftsführer

Leistungserklärung Rhyolith

Erklärte Leistungen

CE 2516 13

Gesteinskörnungen nach EN 13383:2002+AC:2004

Firma:	**Mitteldeutsche Baustoffe GmbH**	Datum: **12.07.2018**	Anlage zur LE: 042-13383-2018.07
Lieferwerk:	**Petersberger Quarzporphyr**		
Straße:	**Alte Hallesche Str. 1**	Natürliche Gesteinskörnung	
PLZ, Ort:	**06193 Petersberg**	Petrographischer Typ: **Rhyolith**	

WPK-Zertifikatsnummer		**2516-CPR-1017-002-13383**			
Leistungserklärung/Sortennummer / **Anforderung in dieser und/oder anderen Norm(en)**		042-13383-2018.07			
		131	128	130	
4.2 Steinklassen					
Steingrößenklasse	$CP_{d/D}$				
Gewichtsklasse	$LMB_{d/D}$	**LMB 5/40**	**LMB 10/60**	**LMB 60/300**	
4.3 Steinform	LT [M.%]	LT_A	LT_A	LT_A	
4.4 Anteil gerundeter Steine	RO [M:%]	RO_5	RO_5	RO_5	
5.2 Gesteinsdichte	[Mg/m³]	2,60 ± 0,05			
5.3 Widerstand gegen Brechen	CS [M.%]	CS_{80}	CS_{80}	CS_{80}	
5.4 Widerstand gegeb Abrieb	M_{DE} [M.%]	NPD	NPD	NPD	
Freisetzung gefährlicher Substanzen:		NPD	NPD	NPD	
Dauerhaftigkeit					
7.2.1 Dicalciumsicat-Zerfall von Hochofenstückschlacke					
7.2.2 Eisen-Zerfall von Hochofenstückschlacke		NPD	NPD	NPD	
7.2.3 Raumbeständigkeit von Stahlwerkschlacke					
7.4 Frost-Tau-Wechselbeständigkeit	FT [M.%]	FT_A	FT_A	FT_A	
7.5 Widerstand gegen Salzkristallisation	MS [M.%]	NPD	NPD	NPD	
7.6 Sonnenbrand	SB [M.%]	NPD	NPD	NPD	

Angaben zu weiteren Eigenschaften sind im aktuellen Prüfzeugnis aufgeführt.
www.mdb-gmbh.de

Leistungserklärung Rhyolith

Erklärte Leistungen

CE 2516 13	Gesteinskörnungen nach EN 13383:2002+AC:2004				
Firma:	Mitteldeutsche Baustoffe GmbH	Datum:		Anlage zur LE:	
Lieferwerk:	Petersberger Quarzporphyr		12.07.2018	042-13383-2018.07	
Straße:	Alte Hallesche Str. 1	Natürliche Gesteinskörnung			
PLZ, Ort:	06193 Petersberg	Petrographischer Typ: **Rhyolith**			
WPK-Zertifikatsnummer		**2516-CPR-1017-002-13383**			
Leistungserklärung/Sortennummer / Anforderung in dieser und/oder anderen Norm(en)		042-13383-2018.07			
		125	126	127	
4.2 Steinklassen					
Steingrößenklasse	$CP_{d/D}$	**CP 45/125**	**CP 63/180**	**CP 90/250**	
Gewichtsklasse	$LMB_{d/D}$				
4.3 Steinform	LT [M.%]	LT_A	LT_A	LT_A	
4.4 Anteil gerundeter Steine	RO [M:%]	RO_5	RO_5	RO_5	
5.2 Gesteinsdichte	[Mg/m³]	2,60 ± 0,05			
5.3 Widerstand gegen Brechen	CS [M.%]	CS_{80}	CS_{80}	CS_{80}	
5.4 Widerstand gegeb Abrieb	M_{DE} [M.%]	NPD	NPD	NPD	
Freisetzung gefährlicher Substanzen:		NPD	NPD	NPD	
Dauerhaftigkeit 7.2.1 Dicalciumsicat-Zerfall von Hochofenstückschlacke 7.2.2 Eisen-Zerfall von Hochofenstückschlacke 7.2.3 Raumbeständigkeit von Stahlwerkschlacke		NPD	NPD	NPD	
7.4 Frost-Tau-Wechselbeständigkeit	FT [M.%]	FT_A	FT_A	FT_A	
7.5 Widerstand gegen Salzkristallisation	MS [M.%]	NPD	NPD	NPD	
7.6 Sonnenbrand	SB [M.%]	NPD	NPD	NPD	

Angaben zu weiteren Eigenschaften sind im aktuellen Prüfzeugnis aufgeführt.
www.mdb-gmbh.de

Leistungserklärung Andesit

LEISTUNGSERKLÄRUNG

407779-07-01032021

gemäß Anhang III der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 (Bauprodukteverordnung) und der Delegierten Verordnung Nr. 574/2014 vom 21. Februar 2014 für die Produktgruppe „Gesteinskörnungen für Wasserbausteine"

S645 /Dönstedt/Wasserbausteine

CP 90/250

407779

Vom Hersteller vorgesehener Verwendungszweck oder vorgesehene Verwendungszwecke des Bauprodukts gemäß der anwendbaren harmonisierten technischen Spezifikation:

Gesteinskörnungen für Waserbausteine

Es handelt sich ausschließlich um die allgemeine Klassifizierung nach der EU-BauproduktenVO ohne Berücksichtigung der konkreten vertraglichen und örtlichen Gegebenheiten der Baumaßnahme.

Name, eingetragener Handelsname oder eingetragene Marke und Kontaktanschrift des Herstellers gemäß Artikel 11 Absatz 5:

Hersteller: **Norddeutsche Naturstein GmbH**

Altenhäuser Str.41, 39345 Flechtingen

Tel.: +49 39054/90-0

Fax: +49 39054/90-161

Werk: **Norddeutsche Naturstein GmbH**

Zur Zollstange, 39343 Bebertal

Gegebenenfalls Name und Kontaktanschrift des Bevollmächtigten, der mit den Aufgaben gemäß Artikel 12 Absatz 2 beauftragt ist:

entfällt

System oder Systeme zur Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit des Bauprodukts gemäß Anhang V: System 2+

Im Falle der Leistungserklärung, die ein Bauprodukt betrifft, das von einer harmonisierten Norm erfasst wird:

Die notifizierte Stelle bup Zert GmbH mit der Kennnummer Nr. 2516 hat nach dem System 2+ sowohl die Erstinspektion- und beurteilung des Werks und der werkseigenen Produktionskontrolle als auch die laufende Überwachung, Bewertung und Evaluierung der werkseigenen Produktionskontrolle durchgeführt und hat eine Konformitätsbescheinigung für die werkseigene Produktionskontrolle ausgestellt:
Bescheinigung der Konformität der Werkseigenen Produktionskontrolle

2516-CPR-1003-046-13383

Erklärte Leistung: siehe vollständige Auflistung in dieser erklärten Leistung
Wenn gemäß den Artikeln 37 oder 38 die Spezifische technische Dokumentation verwendet wurde, die das Produkt erfüllt: nicht zutreffend

Die Leistung des vorstehenden Produkts entspricht der erklärten Leistung/den erklärten Leistungen. Für die Erstellung der Leistungserklärung im Einklang mit der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 und der Delegierten Verordnung Nr. 574/2014 ist allein der oben genannte Hersteller verantwortlich.

Unterzeichnet für den Hersteller und im Namen des Herstellers:

Flechtingen 01.03.2021	Sebastian Meyer, LQS	i.V. S. Meyer
(Ort und Datum der Ausstellung)	(Name und Funktion)	(Unterschrift)

Leistungserklärung Andesit

Gesteinskörnungen nach:EN 13383-1: 2002/AC: 2004

Firma: Norddeutsche Naturstein GmbH
Werk: Dönstedt
Straße: Zur Zollstange
PLZ, Ort: 39343, Bebertal

Klassifizierungscode: P–natürliche Gesteinskörnung
Petrographischer Typ: Andesit
Notifizierungsnr. des CE -Zertifizierers: 2516

Erklärte Leistung der Leistungserklärung des Produktes/ der Produktgruppe

Wesentliche Merkmale	Leistung	Harmonisierte Technische Spezifikation
Steinklasse	CP 90/250	EN 13383:2002
Kenncode des Produktes (Artikelnummer)	407779	
Steinform Verhältnis Länge zu Breite >3	LT_A	
Anteil gerundete Steine	RO_5	
Rohdichte Mg/m³ EN 1097-6, Anhang A	> 2,68	
Widerstand gegen Brechen	CS_{80}	
Widerstand gegen Abrieb	NPD	
Widerstand gegen Salzkristallisation	NPD	
Frost-Tau-Wechselbeständigkeit	NPD	
"Sonnenbrand" von Basalt	NPD	
Dicalciumsilicat-Zerfall von HOS	NPD	
Eisenzerfall von HOS	NPD	
Raumbeständigkeit von SWS	NPD	
Wasseraufnahme	$WA_{0,5}$	
Freisetzung von Radioaktivität	NPD	
Freisetzung von Schwermetallen	NPD	
Freisetzung von PAK	NPD	
Freisetzung anderer gefährlicher Substanzen	NPD	

* Die Wasserbausteine sind nur für den Unterwassereinbau zugelassen.

Eingabedaten Wärmesimulation

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Speicherabmessungen und Luftvolumenstrom:

Höhe m	Breite m	Länge m	Luftvolumenstrom m³/h
2,500	10,000	6,500	30000,0

Daten des Speichermaterials:

Rho kg/m³	Lambda W/(m K)	c J/(kg K)	Hohlraumanteil %	Äquivalenter Durchmesser mm
2754,0	2,300	850,000	44,0	70,66

Schottervolumen m³	Schottermasse kg	Luftvolumen m³
91,00	250614,000	71,50

Partikeldaten:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Partikelvolumina in cm³									
18,00	87,00	110,00	154,00	221,00	322,00	449,00	606,00	1150,00	0,00
Partikelanteile in %									
4,10	6,50	11,10	13,80	25,80	21,20	9,90	5,60	2,00	0,00
Partikeloberflächen in cm²									
45,32	127,24	148,38	184,97	234,36	299,91	372,90	453,86	690,58	0,00
Approximierte Partikelquadratseite in cm									
3,53	3,30	3,59	6,93	7,76	5,27	5,94	10,62	12,95	0,00
Approximierte Partikellänge in cm									
1,45	7,99	8,54	3,21	3,67	11,58	12,72	5,37	6,86	0,00
Gesamtvolumen der approximierten Partikel in m³									
3,73	5,92	10,10	12,56	23,48	19,29	9,01	5,10	1,82	0,00
Anzahl der approximierten Partikel									
207278	67989	91827	81545	106235	59913	20065	8409	1583	0
Anteile der Partikeloberflächen an der Gesamtoberfläche in %									
9,21	8,48	13,36	14,79	24,41	17,61	7,33	3,74	1,07	0,00

Gitterdarstellung der Partikel und Ermittlung des maximalen Zeitschrittes:

Partikeltyp p									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unterteilung der halben Quadratseite: Dx(p) in cm									
Maximale Gitternummer: jmax(p) = kmax(p)									
1,76	1,65	1,79	1,16	1,29	1,32	1,49	1,06	1,08	0,00
1	1	1	3	3	2	2	5	6	0
Unterteilung der halben Quaderlänge: Dy(p) in cm									
Maximale Gitternummer: imax(p)									
0,72	1,33	1,07	1,60	1,84	1,16	1,06	1,34	1,14	0,00
1	3	4	1	1	5	6	2	3	0
Maximale Zeitschrittweite für die Partikelapproximation: DtauPartikel(p) in s									
19,90	39,19	33,96	26,96	34,09	26,83	28,32	21,87	20,50	0,00

Maximal wählbare Zeitschrittweite: 19 s

Vorgeschlagene Zeitschrittweite: 18 s (ganzzahlig in 3600 s enthalten)

Daten zum Simulationsablauf:

Simulationsstunden:	72 h
Tagesstartzeit:	18 Uhr
Gewählte Zeitschrittweite:	15 s
Betriebsablauf nach Entwurfstag:	3
Anzahl der Speicherunterteilungen:	100
Starttemperatur:	10,0 °C

Zeitverlauf Wärmesimulation – Entwurfstag 4

Zeitliche Temperaturverläufe (Randbedingungen) für Entwurfstag 4:

Tages-stunde	tL °C	xL g/kg	phiL %	VLanteil -	Richtung -
1	21,5	10,2	62,9	1,00	1
2	20,8	10,1	65,1	1,00	1
3	20,4	9,9	65,4	1,00	1
4	20,0	9,8	66,4	1,00	1
5	20,2	9,7	64,9	1,00	1
6	20,5	9,9	65,0	1,00	1
7	22,0	10,2	61,0	1,00	1
8	24,5	10,4	53,5	1,00	1
9	27,0	10,5	46,6	1,00	1
10	29,0	10,4	41,1	1,00	1
11	31,0	10,0	35,2	1,00	1
12	32,0	9,7	32,3	1,00	1
13	32,7	9,6	30,7	1,00	1
14	33,4	9,5	29,2	1,00	1
15	33,8	9,5	28,6	1,00	1
16	34,0	9,4	28,0	1,00	1
17	33,5	9,5	29,1	1,00	1
18	32,0	9,6	32,0	1,00	1
19	30,0	9,8	36,6	1,00	1
20	27,9	10,0	42,1	1,00	1
21	26,0	10,2	48,0	1,00	1
22	24,7	10,3	52,4	1,00	1
23	23,5	10,4	56,8	1,00	1
24	22,0	10,5	62,8	1,00	1

Legende:

tL Temperaturverlauf des Luftvolumenstromes

xL Verlauf der absoluten Feuchte des Luftvolumenstromes

phiL Verlauf der relativen Feuchte des Luftvolumenstromes

VLanteil Anteil des Luftvolumenstromes vom Maximalwert

Richtung Richtung des Luftstromes: Normalrichtung 1; Gegenrichtung -1, Stillstand 0

Simulationergebnisse Ausgangsbeispiel

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages-stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	32,0	-	9,6	-	32,0	-	-	-	-1301,9
1/19	30,0	10,4	9,8	7,9	36,5	100,0	-64,9	-247,6	-936,3
2/20	27,9	12,1	10,0	8,9	42,1	100,0	-52,3	-210,1	-602,0
3/21	26,0	13,7	10,2	9,9	48,0	100,0	-23,6	-154,3	-335,3
4/22	24,7	14,6	10,3	10,3	52,3	98,4	-3,7	-113,7	-144,5
5/23	23,5	17,1	10,4	10,4	56,8	84,1	0,0	-83,1	9,6
6/24	22,0	20,8	10,5	10,5	62,8	67,6	0,0	-37,6	135,8
7/ 1	21,5	23,8	10,2	10,2	62,9	54,8	0,0	6,7	159,0
8/ 2	20,8	25,2	10,1	10,1	65,1	49,8	0,0	34,9	165,5
9/ 3	20,4	25,2	9,9	9,9	65,4	48,8	0,0	47,2	142,1
10/ 4	20,0	24,5	9,8	9,8	66,4	50,5	0,0	47,0	118,8
11/ 5	20,2	23,5	9,7	9,7	64,9	53,2	0,0	38,8	68,3
12/ 6	20,5	22,5	9,9	9,9	65,0	57,6	0,0	26,1	24,5
13/ 7	22,0	21,7	10,2	10,2	61,1	62,3	0,0	8,1	-72,1
14/ 8	24,5	21,1	10,4	10,4	53,5	65,9	0,0	-18,8	-200,9
15/ 9	27,0	20,7	10,5	10,5	46,6	68,1	0,0	-48,2	-300,7
16/10	29,0	20,6	10,4	10,4	41,1	68,0	0,0	-72,3	-346,8
17/11	31,0	20,8	10,0	10,0	35,2	64,3	0,0	-90,5	-374,7
18/12	32,0	21,6	9,7	9,7	32,3	59,4	0,0	-99,4	-334,7
19/13	32,7	22,9	9,6	9,6	30,7	54,3	0,0	-97,2	-279,0
20/14	33,4	24,6	9,5	9,5	29,2	48,5	0,0	-89,1	-231,3
21/15	33,8	26,5	9,5	9,5	28,6	43,4	0,0	-76,8	-178,2
22/16	34,0	28,4	9,4	9,4	28,0	38,6	0,0	-61,7	-128,5
23/17	33,5	30,0	9,5	9,5	29,1	35,5	0,0	-43,8	-55,3
24/18	32,0	31,2	9,6	9,6	31,9	33,4	0,0	-20,4	53,6
25/19	30,0	32,2	9,8	9,8	36,5	32,2	0,0	7,3	164,5
26/20	27,9	32,9	10,0	10,0	42,1	31,6	0,0	35,4	253,3
27/21	26,0	33,2	10,2	10,2	48,0	31,6	0,0	60,3	305,5
28/22	24,7	33,1	10,3	10,3	52,3	32,2	0,0	77,6	305,0
29/23	23,5	32,5	10,4	10,4	56,8	33,7	0,0	86,4	289,6

30/24	22,0	31,3	10,5	10,5	62,8	36,4	0,0	90,8	287,5
31/ 1	21,5	29,7	10,2	10,2	62,9	38,7	0,0	87,2	230,2
32/ 2	20,8	28,0	10,1	10,1	65,1	42,3	0,0	76,9	194,7
33/ 3	20,4	26,4	9,9	9,9	65,4	45,6	0,0	65,8	152,6
34/ 4	20,0	24,9	9,8	9,8	66,4	49,3	0,0	54,1	122,2
35/ 5	20,2	23,6	9,7	9,7	64,9	52,8	0,0	41,2	69,3
36/ 6	20,5	22,5	9,9	9,9	65,0	57,4	0,0	26,8	24,8
37/ 7	22,0	21,7	10,2	10,2	61,1	62,2	0,0	8,3	-72,0
38/ 8	24,5	21,1	10,4	10,4	53,5	65,9	0,0	-18,8	-200,9
39/ 9	27,0	20,7	10,5	10,5	46,6	68,1	0,0	-48,2	-300,7
40/10	29,0	20,6	10,4	10,4	41,1	68,0	0,0	-72,3	-346,8
41/11	31,0	20,8	10,0	10,0	35,2	64,3	0,0	-90,5	-374,7
42/12	32,0	21,6	9,7	9,7	32,3	59,4	0,0	-99,4	-334,7
43/13	32,7	22,9	9,6	9,6	30,7	54,3	0,0	-97,2	-279,0
44/14	33,4	24,6	9,5	9,5	29,2	48,5	0,0	-89,1	-231,3
45/15	33,8	26,5	9,5	9,5	28,6	43,4	0,0	-76,8	-178,2
46/16	34,0	28,4	9,4	9,4	28,0	38,6	0,0	-61,7	-128,5
47/17	33,5	30,0	9,5	9,5	29,1	35,5	0,0	-43,8	-55,3
48/18	32,0	31,2	9,6	9,6	31,9	33,4	0,0	-20,4	53,6
49/19	30,0	32,2	9,8	9,8	36,5	32,2	0,0	7,3	164,5
50/20	27,9	32,9	10,0	10,0	42,1	31,6	0,0	35,4	253,3
51/21	26,0	33,2	10,2	10,2	48,0	31,6	0,0	60,3	305,5
52/22	24,7	33,1	10,3	10,3	52,3	32,2	0,0	77,6	305,0
53/23	23,5	32,5	10,4	10,4	56,8	33,7	0,0	86,4	289,6
54/24	22,0	31,3	10,5	10,5	62,8	36,4	0,0	90,8	287,5
55/ 1	21,5	29,7	10,2	10,2	62,9	38,7	0,0	87,2	230,2
56/ 2	20,8	28,0	10,1	10,1	65,1	42,3	0,0	76,9	194,7
57/ 3	20,4	26,4	9,9	9,9	65,4	45,6	0,0	65,8	152,6
58/ 4	20,0	24,9	9,8	9,8	66,4	49,3	0,0	54,1	122,2
59/ 5	20,2	23,6	9,7	9,7	64,9	52,8	0,0	41,2	69,3
60/ 6	20,5	22,5	9,9	9,9	65,0	57,4	0,0	26,8	24,8
61/ 7	22,0	21,7	10,2	10,2	61,1	62,2	0,0	8,3	-72,0
62/ 8	24,5	21,1	10,4	10,4	53,5	65,9	0,0	-18,8	-200,9
63/ 9	27,0	20,7	10,5	10,5	46,6	68,1	0,0	-48,2	-300,7
64/10	29,0	20,6	10,4	10,4	41,1	68,0	0,0	-72,3	-346,8
65/11	31,0	20,8	10,0	10,0	35,2	64,3	0,0	-90,5	-374,7
66/12	32,0	21,6	9,7	9,7	32,3	59,4	0,0	-99,4	-334,7
67/13	32,7	22,9	9,6	9,6	30,7	54,3	0,0	-97,2	-279,0

68/14	33,4	24,6	9,5	9,5	29,2	48,5	0,0	-89,1	-231,3
69/15	33,8	26,5	9,5	9,5	28,6	43,4	0,0	-76,8	-178,2
70/16	34,0	28,4	9,4	9,4	28,0	38,6	0,0	-61,7	-128,5
71/17	33,5	30,0	9,5	9,5	29,1	35,5	0,0	-43,8	-55,3
72/18	32,0	31,2	9,6	9,6	31,9	33,4	0,0	-20,4	53,6

Legende: {Ende der Betriebsstunde = 1 Zeitschritt vor Erreichen der vollen Stunde!}

BS	Simulationsstunde
tLein	Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
tLaus	Luftaustrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
xLein	absolute Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
xLaus	absolute Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLein	relative Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLaus	relative Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
mKon	ausgefallener Kondensatmassestrom während der Betriebsstunde
QLuft	mittlerer Wärmestrom während der Betriebsstunde an die strömende Luft
QSpeicher	Speicherwärme im Schotter bezogen auf die Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde

Hinweis zu den Ergebnissen: - bedeutet Stillstand des Speichers

Simulationsergebnisse mit geringerer Wärmeleitfähigkeit

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages-stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	32,0	-	9,6	-	32,0	-	-	-	-1301,9
1/19	30,0	11,6	9,8	8,6	36,5	100,0	-52,6	-232,6	-951,3
2/20	27,9	13,1	10,0	9,5	42,1	100,0	-28,6	-181,8	-645,2
3/21	26,0	13,7	10,2	9,9	48,0	100,0	-8,2	-69,6	-463,1
4/22	24,7	14,3	10,3	10,3	52,3	100,0	-3,6	-81,3	-304,8
5/23	23,5	14,6	10,4	10,4	56,8	52,0	0,0	-59,8	-174,0
6/24	22,0	17,1	10,5	10,5	62,8	85,0	0,0	-40,2	-45,1
7/ 1	21,5	18,6	10,2	10,2	62,9	75,3	0,0	-22,0	6,7
8/ 2	20,8	19,8	10,1	10,1	65,1	69,1	0,0	-7,8	55,8
9/ 3	20,4	20,7	9,9	9,9	65,4	64,0	0,0	3,9	75,6
10/ 4	20,0	21,3	9,8	9,8	66,4	61,2	0,0	12,1	87,2
11/ 5	20,2	21,0	9,7	9,7	64,9	65,5	0,0	13,5	62,0
12/ 6	20,5	21,2	9,9	9,9	65,0	65,7	0,0	5,9	38,4
13/ 7	22,0	21,6	10,2	10,2	61,1	62,7	0,0	-0,5	-49,6
14/ 8	24,5	21,5	10,4	10,4	53,5	64,2	0,0	-19,2	-178,1
15/ 9	27,0	21,5	10,5	10,5	46,6	65,1	0,0	-42,8	-283,2
16/10	29,0	21,6	10,4	10,4	41,1	63,7	0,0	-63,3	-338,4
17/11	31,0	22,1	10,0	10,0	35,2	59,4	0,0	-79,0	-377,7
18/12	32,0	23,0	9,7	9,7	32,3	54,6	0,0	-86,3	-350,8
19/13	32,7	24,2	9,6	9,6	30,7	50,4	0,0	-84,4	-307,9
20/14	33,4	25,5	9,5	9,5	29,2	46,0	0,0	-78,8	-270,6
21/15	33,8	26,9	9,5	9,5	28,6	42,4	0,0	-70,6	-223,7
22/16	34,0	28,3	9,4	9,4	28,0	38,7	0,0	-60,1	-175,5
23/17	33,5	28,9	9,5	9,5	29,1	37,7	0,0	-27,6	-118,5
24/18	32,0	29,7	9,6	9,6	31,9	36,5	0,0	-18,6	-11,4
25/19	30,0	29,7	9,8	9,8	36,5	31,3	0,0	-0,7	107,5
26/20	27,9	30,4	10,0	10,0	42,1	32,8	0,0	22,9	208,8
27/21	26,0	30,9	10,2	10,2	48,0	34,4	0,0	44,0	277,3
28/22	24,7	31,3	10,3	10,3	52,3	35,6	0,0	59,8	294,6
29/23	23,5	30,8	10,4	10,4	56,8	37,0	0,0	69,3	296,3

30/24	22,0	29,9	10,5	10,5	62,8	39,3	0,0	76,0	308,9
31/ 1	21,5	28,8	10,2	10,2	62,9	40,7	0,0	76,1	262,6
32/ 2	20,8	27,5	10,1	10,1	65,1	43,4	0,0	70,2	233,8
33/ 3	20,4	26,3	9,9	9,9	65,4	45,9	0,0	63,1	194,4
34/ 4	20,0	25,1	9,8	9,8	66,4	48,8	0,0	54,7	163,4
35/ 5	20,2	24,9	9,7	9,7	64,9	65,8	0,0	38,3	113,4
36/ 6	20,5	24,3	9,9	9,9	65,0	65,9	0,0	19,2	76,5
37/ 7	22,0	23,7	10,2	10,2	61,1	66,0	0,0	10,3	-22,3
38/ 8	24,5	22,5	10,4	10,4	53,5	60,2	0,0	-10,5	-159,4
39/ 9	27,0	22,2	10,5	10,5	46,6	62,1	0,0	-36,5	-270,9
40/10	29,0	22,3	10,4	10,4	41,1	62,3	0,0	-58,5	-330,9
41/11	31,0	22,4	10,0	10,0	35,2	58,5	0,0	-75,7	-373,5
42/12	32,0	23,2	9,7	9,7	32,3	54,2	0,0	-84,5	-348,4
43/13	32,7	24,3	9,6	9,6	30,7	50,2	0,0	-83,4	-306,6
44/14	33,4	25,6	9,5	9,5	29,2	45,9	0,0	-78,2	-269,8
45/15	33,8	27,0	9,5	9,5	28,6	42,3	0,0	-70,3	-223,3
46/16	34,0	28,3	9,4	9,4	28,0	38,7	0,0	-59,9	-175,2
47/17	33,5	28,9	9,5	9,5	29,1	37,7	0,0	-27,6	-118,3
48/18	32,0	29,7	9,6	9,6	31,9	36,4	0,0	-18,5	-11,2
49/19	30,0	29,8	9,8	9,8	36,5	31,3	0,0	-0,6	107,6
50/20	27,9	30,4	10,0	10,0	42,1	32,8	0,0	23,0	208,9
51/21	26,0	31,0	10,2	10,2	48,0	34,4	0,0	44,0	277,3
52/22	24,7	31,3	10,3	10,3	52,3	35,6	0,0	59,8	294,6
53/23	23,5	30,8	10,4	10,4	56,8	37,0	0,0	69,3	296,3
54/24	22,0	29,9	10,5	10,5	62,8	39,3	0,0	76,0	308,9
55/ 1	21,5	28,8	10,2	10,2	62,9	40,7	0,0	76,1	262,6
56/ 2	20,8	27,5	10,1	10,1	65,1	43,4	0,0	70,2	233,8
57/ 3	20,4	26,3	9,9	9,9	65,4	45,9	0,0	63,1	194,4
58/ 4	20,0	25,1	9,8	9,8	66,4	48,8	0,0	54,7	163,4
59/ 5	20,2	24,9	9,7	9,7	64,9	65,8	0,0	38,3	113,4
60/ 6	20,5	24,3	9,9	9,9	65,0	65,9	0,0	19,2	76,5
61/ 7	22,0	23,7	10,2	10,2	61,1	66,0	0,0	10,3	-22,3
62/ 8	24,5	22,5	10,4	10,4	53,5	60,2	0,0	-10,5	-159,4
63/ 9	27,0	22,2	10,5	10,5	46,6	62,1	0,0	-36,5	-270,9
64/10	29,0	22,3	10,4	10,4	41,1	62,3	0,0	-58,5	-330,9
65/11	31,0	22,4	10,0	10,0	35,2	58,5	0,0	-75,7	-373,5
66/12	32,0	23,2	9,7	9,7	32,3	54,2	0,0	-84,5	-348,4
67/13	32,7	24,3	9,6	9,6	30,7	50,2	0,0	-83,4	-306,6

68/14	33,4	25,6	9,5	9,5	29,2	45,9	0,0	-78,2	-269,8
69/15	33,8	27,0	9,5	9,5	28,6	42,3	0,0	-70,3	-223,3
70/16	34,0	28,3	9,4	9,4	28,0	38,7	0,0	-59,9	-175,2
71/17	33,5	28,9	9,5	9,5	29,1	37,7	0,0	-27,6	-118,3
72/18	32,0	29,7	9,6	9,6	31,9	36,4	0,0	-18,5	-11,2

Legende: {Ende der Betriebsstunde = 1 Zeitschritt vor Erreichen der vollen Stunde!}

BS Simulationsstunde

tLein Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde

tLaus Luftaustrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde

xLein absolute Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde

xLaus absolute Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde

phiLein relative Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde

phiLaus relative Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde

mKon ausgefallener Kondensatmassestrom während der Betriebsstunde

QLuft mittlerer Wärmestrom während der Betriebsstunde an die strömende Luft

QSpeicher Speicherwärme im Schotter bezogen auf die Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde

Hinweis zu den Ergebnissen: - bedeutet Stillstand des Speichers

Simulationsergebnisse mit geringerer Rohdichte

Schotterspeicher mit Luftdurchströmung

Simulationsergebnisse als Stundenwerte:

BS/Tages-stunde	tLein °C	tLaus °C	xLein g/kg	xLaus g/kg	phiLein %	phiLaus %	mKon kg/h	QLuft kW	QSpeicher kWh
0/18	32,0	-	9,6	-	32,0	-	-	-	-945,4
1/19	30,0	10,9	9,8	8,2	36,5	100,0	-62,3	-244,4	-615,2
2/20	27,9	13,2	10,0	9,6	42,1	100,0	-33,5	-187,6	-337,3
3/21	26,0	14,7	10,2	10,2	48,0	96,7	-4,2	-131,3	-124,4
4/22	24,7	19,1	10,3	10,3	52,4	73,7	0,0	-85,7	17,1
5/23	23,5	24,1	10,4	10,4	56,8	54,9	0,0	-23,5	92,3
6/24	22,0	26,4	10,5	10,5	62,8	48,3	0,0	27,1	129,6
7/ 1	21,5	26,3	10,2	10,2	62,9	47,3	0,0	46,9	104,3
8/ 2	20,8	25,2	10,1	10,1	65,1	49,9	0,0	46,0	88,3
9/ 3	20,4	23,9	9,9	9,9	65,4	52,9	0,0	39,3	66,3
10/ 4	20,0	22,7	9,8	9,8	66,4	56,1	0,0	30,9	52,5
11/ 5	20,2	21,8	9,7	9,7	64,9	58,7	0,0	21,6	22,4
12/ 6	20,5	21,1	9,9	9,9	65,0	62,5	0,0	11,1	-1,6
13/ 7	22,0	20,6	10,2	10,2	61,0	66,4	0,0	-3,8	-62,1
14/ 8	24,5	20,4	10,4	10,4	53,5	68,8	0,0	-27,5	-142,0
15/ 9	27,0	20,4	10,5	10,5	46,6	69,3	0,0	-53,1	-196,3
16/10	29,0	20,9	10,4	10,4	41,1	66,5	0,0	-72,2	-210,1
17/11	31,0	22,1	10,0	10,0	35,2	59,6	0,0	-83,0	-213,0
18/12	32,0	23,8	9,7	9,7	32,3	52,0	0,0	-82,9	-173,1
19/13	32,7	25,9	9,6	9,6	30,7	45,6	0,0	-72,3	-130,9
20/14	33,4	27,9	9,5	9,5	29,2	40,0	0,0	-58,9	-102,1
21/15	33,8	29,7	9,5	9,5	28,6	36,0	0,0	-45,4	-73,8
22/16	34,0	31,1	9,4	9,4	28,0	32,9	0,0	-32,9	-49,6
23/17	33,5	32,2	9,5	9,5	29,1	31,3	0,0	-19,9	-8,3
24/18	32,0	32,9	9,6	9,6	32,0	30,4	0,0	-1,8	57,9
25/19	30,0	33,4	9,8	9,8	36,5	30,1	0,0	21,1	122,7
26/20	27,9	33,6	10,0	10,0	42,1	30,5	0,0	44,5	168,4
27/21	26,0	33,2	10,2	10,2	48,0	31,8	0,0	63,3	186,8
28/22	24,7	32,1	10,3	10,3	52,4	34,0	0,0	72,3	170,4
29/23	23,5	30,5	10,4	10,4	56,8	37,6	0,0	71,7	150,3

30/24	22,0	28,7	10,5	10,5	62,8	42,2	0,0	68,1	146,6
31/ 1	21,5	26,9	10,2	10,2	62,9	45,6	0,0	60,0	108,2
32/ 2	20,8	25,3	10,1	10,1	65,1	49,6	0,0	49,2	89,1
33/ 3	20,4	23,9	9,9	9,9	65,4	52,8	0,0	39,9	66,4
34/ 4	20,0	22,7	9,8	9,8	66,4	56,1	0,0	31,1	52,6
35/ 5	20,2	21,8	9,7	9,7	64,9	58,7	0,0	21,6	22,4
36/ 6	20,5	21,1	9,9	9,9	65,0	62,5	0,0	11,1	-1,6
37/ 7	22,0	20,6	10,2	10,2	61,0	66,4	0,0	-3,8	-62,1
38/ 8	24,5	20,4	10,4	10,4	53,5	68,8	0,0	-27,5	-142,0
39/ 9	27,0	20,4	10,5	10,5	46,6	69,3	0,0	-53,1	-196,3
40/10	29,0	20,9	10,4	10,4	41,1	66,5	0,0	-72,2	-210,1
41/11	31,0	22,1	10,0	10,0	35,2	59,6	0,0	-83,0	-213,0
42/12	32,0	23,8	9,7	9,7	32,3	52,0	0,0	-82,9	-173,1
43/13	32,7	25,9	9,6	9,6	30,7	45,6	0,0	-72,3	-130,9
44/14	33,4	27,9	9,5	9,5	29,2	40,0	0,0	-58,9	-102,1
45/15	33,8	29,7	9,5	9,5	28,6	36,0	0,0	-45,4	-73,8
46/16	34,0	31,1	9,4	9,4	28,0	32,9	0,0	-32,9	-49,6
47/17	33,5	32,2	9,5	9,5	29,1	31,3	0,0	-19,9	-8,3
48/18	32,0	32,9	9,6	9,6	32,0	30,4	0,0	-1,8	57,9
49/19	30,0	33,4	9,8	9,8	36,5	30,1	0,0	21,1	122,7
50/20	27,9	33,6	10,0	10,0	42,1	30,5	0,0	44,5	168,4
51/21	26,0	33,2	10,2	10,2	48,0	31,8	0,0	63,3	186,8
52/22	24,7	32,1	10,3	10,3	52,4	34,0	0,0	72,3	170,4
53/23	23,5	30,5	10,4	10,4	56,8	37,6	0,0	71,7	150,3
54/24	22,0	28,7	10,5	10,5	62,8	42,2	0,0	68,1	146,6
55/ 1	21,5	26,9	10,2	10,2	62,9	45,6	0,0	60,0	108,2
56/ 2	20,8	25,3	10,1	10,1	65,1	49,6	0,0	49,2	89,1
57/ 3	20,4	23,9	9,9	9,9	65,4	52,8	0,0	39,9	66,4
58/ 4	20,0	22,7	9,8	9,8	66,4	56,1	0,0	31,1	52,6
59/ 5	20,2	21,8	9,7	9,7	64,9	58,7	0,0	21,6	22,4
60/ 6	20,5	21,1	9,9	9,9	65,0	62,5	0,0	11,1	-1,6
61/ 7	22,0	20,6	10,2	10,2	61,0	66,4	0,0	-3,8	-62,1
62/ 8	24,5	20,4	10,4	10,4	53,5	68,8	0,0	-27,5	-142,0
63/ 9	27,0	20,4	10,5	10,5	46,6	69,3	0,0	-53,1	-196,3
64/10	29,0	20,9	10,4	10,4	41,1	66,5	0,0	-72,2	-210,1
65/11	31,0	22,1	10,0	10,0	35,2	59,6	0,0	-83,0	-213,0
66/12	32,0	23,8	9,7	9,7	32,3	52,0	0,0	-82,9	-173,1
67/13	32,7	25,9	9,6	9,6	30,7	45,6	0,0	-72,3	-130,9

68/14	33,4	27,9	9,5	9,5	29,2	40,0	0,0	-58,9	-102,1
69/15	33,8	29,7	9,5	9,5	28,6	36,0	0,0	-45,4	-73,8
70/16	34,0	31,1	9,4	9,4	28,0	32,9	0,0	-32,9	-49,6
71/17	33,5	32,2	9,5	9,5	29,1	31,3	0,0	-19,9	-8,3
72/18	32,0	32,9	9,6	9,6	32,0	30,4	0,0	-1,8	57,9

Legende: {Ende der Betriebsstunde = 1 Zeitschritt vor Erreichen der vollen Stunde!}

BS	Simulationsstunde
tLein	Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
tLaus	Luftaustrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde
xLein	absolute Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
xLaus	absolute Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLein	relative Lufteintrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
phiLaus	relative Luftaustrittsfeuchte am Ende der Betriebsstunde
mKon	ausgefallener Kondensatmassestrom während der Betriebsstunde
QLuft	mittlerer Wärmestrom während der Betriebsstunde an die strömende Luft
QSpeicher	Speicherwärme im Schotter bezogen auf die Lufteintrittstemperatur am Ende der Betriebsstunde

Hinweis zu den Ergebnissen: - bedeutet Stillstand des Speichers

Preisliste Wasserbausteine - Mitteldeutsche Baustoffe GmbH

Mitteldeutsche Baustoffe GmbH

www.mdb-gmbh.de

PREISLISTE für Splitte / Schotter gültig ab 01.04.2025 - 31.03.2026

Material:	Korngruppe	Preis €/t ab Werk
GESTEINSKÖRNUNGEN (zertifizierte Splitte und Sande für Beton- und Asphaltmischgut)		
Füller (Gesteinsmehl)	0/0,09	22,50
Feine Gesteinskörnung (Edelbrechsand)	0/2	21,50
Grobe Gesteinskörnungen (Edelsplitt)	2/5, 5/8, 8/11, 11/16, 16/22	24,50
Grobe Gesteinskörnung (Edelsplitt)	1/3*	35,50
STRASSENBAUMATERIALIEN (zertifizierte ungebundene Korngemische)		
Baustoffgemisch für Schottertragschicht B1	0/32, 0/45, 0/56	21,00
Baustoffgemisch für Frostschutzschicht B2	0/32, 0/45, 0/56	20,00
Baustoffgemisch für Frostschutzschicht	0/5, 0/8, 0/11, 0/16, 0/22*	21,50
Fugenmaterial	0/2	21,50
Bettungsmaterial	0/5	21,50
Pflasterbettungssplitt	2/5	24,50
Deckschicht ohne Bindemittel (DoB)	0/5, 0/8, 0/11, 0/16	23,00
SONSTIGE MATERIALIEN		
Gleisschotter	31,5/63*	25,50
Gabionensteine		30,50
Wasserbausteine (klein)	45/125, 63/180	22,50
Wasserbausteine (mittel)	90/250*	30,50

* nur auf Anfrage - nicht in allen Werken verfügbar!

Weitere Korngemische — auf Anfrage

Die Zuordnung zu den einzelnen Anforderungskategorien kann den gültigen Leistungserklärungen bzw. Sortenverzeichnis entnommen werden.
Die Preise verstehen sich frei LKW verladen und verwogen im Hartsteinwerk zu den bekannten Liefer- und Zahlungsbedingungen zuzüglich gesetzlicher Umsatzsteuer.
Detaillierte Informationen insbesondere der AGBs sind unter http://www.mdb-gmbh.de hinterlegt.
Unsere Produkte unterliegen einer zertifizierten werkseigenen Produktionskontrolle nach **DIN EN** bzw. einer freiwilligen regelmäßigen Güteüberwachung (Leistungserklärungen auf Anfrage).

Zusätzlich können Sie unsere Produkte auch in Big Bag's (70,00 €/Stck. netto + Materialkosten) erhalten.

Für Kleinkunden bei Selbstabholung mit PKW-Anhänger bzw. Eimer (sortenunabhängig)

Wir weisen darauf hin, dass für Selbstabholer nur eine begrenzte Sortenauswahl bereitgestellt werden kann.
Bitte informieren Sie sich vorab, ob das von Ihnen gewünschte Sortiment zur Verfügung steht.
Unsere Mitarbeiter/-innen werden Sie dazu gerne telefonisch beraten.
Im Werk fahren Sie bitte an die ausgewiesenen Beladeplätze!

Eimer (10 Ltr.)	3,00 € incl. 19% MwSt
PKW- Anhänger (einachsig < 1 t)	25,00 € incl. 19% MwSt
PKW-Anhänger (zweiachsig < 2 t)	45,00 € incl. 19% MwSt
PKW-Anhänger (zweiachsig > 2 t)	Verwiegung nach Preisliste

Harzer Grauwacke Rieder
(03 94 83) 53 35 -0

Petersberger Quarzporphyr
(03 46 06) 2 76 -0

Edelsplittwerk Schwerz
(03 46 04) 3 44 -0

Preisliste Betonrecycling - Remex

REMEX®
IM AUFTRAG DER ZUKUNFT

Preisliste Recyclinganlage Chemnitz Fischweg

gültig ab 01.03.2025
(bisherige Preislisten verlieren hiermit ihre Gültigkeit)

Verkauf (gilt nur bei Verfügbarkeit)		
Artikel-Nr.	Artikelbezeichnung	Preis netto [€/t]
191209.xx	REMEXIT FSS-Mineralgemisch 0/45 zertifiziert (Frostschutz-Tragschichtmaterial, güteüberwacht nach TL Gestein-StB 04 und Ersatzbaustoffverordnung EBV)	5,00
191209.xx	REMEXIT Mineralgemisch 45/100, überwacht nach Ersatzbaustoffverordnung EBV (Überkorn für Platzunterbau, Packlager)	6,50
191209.xx	REMEXIT Füllsand 0/5 – steinfrei, überwacht nach Ersatzbaustoffverordnung EBV (Pflastersand, Kabel- und Rohrabdeckung, Landschaftsbau)	1,00
87026.14	Splitt / Pflastersplitt 2/5 grau	21,00
87026.1	Natursand 0/2 gelb	12,50

Unsere Preise gelten angeliefert bzw. verladen frei Anlagen. Für weitere Sorten, Containerpreise oder die Abholung bzw. Lieferungen von/zu Ihren Baustellen frei Bau auf Tonnage-Basis wenden Sie sich bitte an den Vertrieb. Für alle Lieferungen und Leistungen gelten unsere Allgemeinen Geschäftsbedingungen als rechtsverbindlich vereinbart. Die Preise entsprechen den heutigen Gestehungskosten und sind grundsätzlich Nettopreise. Auf diese schlagen wir bei Rechnungsstellung die jeweils gültige Mehrwertsteuer auf.

Unsere Qualitätsbaustoffe sind zertifiziert nach DIN EN ISO 9002

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt,

dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zustimmung des/der beteiligten Unternehmen/s zur Verwendung betrieblicher Unterlagen habe ich eingeholt.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder veröffentlicht noch einer anderen Prüfungsbehörde/-stelle vorgelegt.

Preißler, Niklas
Name, Vorname (Verfassender)

Glauchau, 13.08.2025
Ort, Datum (Abgabetermin)

N. Preißler
Unterschrift (Verfassender)