

Arbeitsgebiet Bauliches Recycling (Leiterin: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke)
Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg
Fakultät 2 Umwelt und Naturwissenschaften
Siemens-Halske-Ring 8
03046 Cottbus

Untersuchungen zu neuen Anwendungsfeldern für die feine Fraktion von Recycling-Baustoffen (Brechsande) am Beispiel der Herstellung von Spritzbeton in Kombination mit gebrauchten Bauteilen

Abschlussbericht
gefördert unter dem AZ: 34268/01
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Projektleitung und -bearbeitung

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke

unter Mitwirkung von

M.Sc. Jakob Fischer
M.Sc. Maria Golubeva

Cottbus, Oktober 2022

Kurzzusammenfassung

Für den nachhaltigen Einsatz von mineralischen Rohstoffen gilt es, alle Potenziale auszuschöpfen resp. Weichen für eine Kreislaufwirtschaft zu stellen. Bei der Aufbereitung von Betonbruch (Abfallschlüsselnummer der AVV 170101) fallen erhebliche Mengen der Körnungsgröße 0/8 an. Der in dieser rezyklierten Gesteinskörnung (RC-GK) enthaltene Brechsand < 2mm ist gemäß den Regelwerken zur Herstellung von RC-Beton ausgenommen.

In diesem Bericht wird analysiert und dokumentiert, dass Brechsande < 2mm anstelle natürlicher Sande zur Herstellung von Spritzbeton aus bau- und umwelttechnischer Sicht geeignet sind. Untersucht wurden die Korngrößen 0/4 für die Herstellung von Trockenspritzmörtel und 0/8 mm für die Herstellung von Trockenspritzbeton aus der erzeugten Körnung 0/8 aus aufbereitetem Betonabbruch Typ 1 in der stationären Recyclinganlage der Fa. HEIM Deponie und Recycling mit Sitz in Berlin. Der Brechsandanteil 0/2 beträgt 54% der RC-GK 0/8. Mit Substitutionsgraden der RC-GK von 0, 50, 75 und 100 % wurden Mörtelprismen im Labormaßstab und Spritzkörper im darauffolgenden Feldversuch hergestellt. So wurden bspw. mit einer Substitution von 50 % RC-GK sowohl bei der Mörtelrezeptur als auch bei der Betonrezeptur die höchsten Druckfestigkeitsklassen von C25/30 (Mörtel 50 % RC) und C16/20 (Beton 50 % RC) erzielt. Als Ergebnis der Wassereindringtiefe haben 8 von 9 Proben den Grenzwert der Wassereindringtiefe von 30 mm nach ZTV-W eingehalten. Der Grenzwert in Anlehnung an LOHMEYER von 50 mm wurde von allen Spritzbeton-/mörtelprüfkörpern unterschritten.

Die Versuchsdurchführung unter praktischen Bedingungen konnte mit der bereitgestellten Maschinenteknik der Fa. Build a Rock GmbH durchgeführt werden. Es wurden insgesamt 9 Prüfkörper (Spritzkästen) hergestellt mit den vier festgelegten Substitutionsgraden der Korngruppen 0/4 und 0/8. Als Referenzspritzbeton wurde der zur Verfügung gestellte Materialmix der Fa. Sakret verwendet. Bevor die untersuchten RC-Spritzmörtel und -betone in die Praxis eingeführt werden können, sind die hier im Rahmen des Projektes durchgeführten Prüfungen an den Frisch- und Festbetonen noch zu ergänzen.

Die Übertragung des Einsatzes von RC-Spritzmörtel und -betonen für den Bau eines Kletterfelsens unter Verwendung von gebrauchten Straßenbauplatten ist konzipiert worden. Diese Kombination ist erstmalig untersucht. Eine ökologische Einschätzung und erste Kostenschätzungen für die entwickelte Vorzugsvariante unterstreichen den Nachhaltigkeitsgedanken.

Inhalt

1	Einleitung.....	9
1.1	Ausgangssituation, Motivation	9
1.2	Projektbeschreibung, Zielsetzung	12
1.3	Methodisches Vorgehen zur Abarbeitung der Zielstellung	14
1.4	Zielgruppen und Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens	16
2	Grundsätzliches zur Charakterisierung und Anwendung von Brechsanden und RC-Beton	17
2.1	Normative Einordnung und Zulassungskriterien für RC-Brechsande bzw. RC-Gesteinskörnungen und für RC-Beton.....	17
2.2	Bisherige und potenzielle Einsatzbereiche von Brechsanden	21
3	Anwendung von Spritzbeton/-mörtel in der Praxis.....	23
3.1	Normative Vorgaben und Anforderungen zur Herstellung von Spritzbeton(-mörtel)	24
3.2	Erläuterung der Trocken- und Nassspritzverfahrenstechnik.....	26
3.3	Einsatzbereiche	29
4	Eignungsuntersuchung zum Einsatz von Recycling-Brechsanden zur Herstellung von Spritzbeton/-mörtel.....	31
4.1	Herkunft und Klassifizierung der untersuchten Brechsande	31
4.2	Untersuchung bautechnischer Eigenschaften von RC-Brechsand	34
4.2.1	Eingangskontrolle RC-Brechsand 0/8 nach DIN 4226-102	34
4.2.2	Prüfung der Umweltverträglichkeit der RC-GK 0/8 und 0/2	36
4.2.3	Bautechnische Prüfungen der RC-GK 0/8 und Brechsand 0/2	38
4.3	Alkali-Kieselsäure-Reaktions-Untersuchung	40
4.3.1	Versuchsvorbereitung und -durchführung	41
4.3.2	Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse	43
4.4	Untersuchung von RC-Mörtelrezepturen unter Laborbedingungen	45
4.4.1	Rezepturenentwicklung/-bestimmung durch Ausbreitmaß-Versuche	47
4.4.2	Frisch- und Festmörtelrohddichte	51
4.4.3	Biegezug- und Druckfestigkeit	52
4.4.4	Auswertung der Versuche unter Laborbedingungen	54
4.5	Versuchsplanung und –durchführung unter praktischen Bedingungen im Feldversuch...	58

4.5.1	Vorbereitende Maßnahmen	58
4.5.1	Ausführung der Spritzarbeiten	60
4.5.2	Zerstörungsfreie Prüfung der Betondruckfestigkeit mittels Rückprallhammer.....	63
4.5.3	Bohrkernentnahme nach DIN EN 12504-1	65
4.5.4	Druckfestigkeitsbewertung	66
4.5.5	Wassereindringtiefe	69
4.5.6	Auswertung der praktischen Untersuchung im Feldversuch.....	70
5	Übertragung der Untersuchungsergebnisse von RC-Spritzbeton/-mörtel auf ein Fallbeispiel	74
5.1	Ausführungsarten von Künstlichen Kletteranlagen.....	75
5.1.1	Kletteranlageninstallation an Bestandsgebäuden.....	75
5.1.2	Kletteranlagen aus Stahl und Holz.....	76
5.1.3	Monolithische Stahlbeton-Konstruktion aus Spritzbeton (Freiform)	76
5.1.4	Betonelemente-Stapel-Konstruktion aus gebrauchten Betonelementen (Y-Form).....	77
5.2	Verfügbares Betonelementesortiment auf dem BTU Campus	78
5.2.1	Bestandsaufnahme der Straßenbauplatten.....	79
5.2.2	Bautechnische Untersuchungen an gebrauchten Straßenbauplatten.....	81
5.2.3	Auswertung der Untersuchungsergebnisse zur Eignungsfeststellung	86
5.3	Entwurfsplanung einer künstlichen Kletteranlage.....	89
5.3.1	Stegreif-Entwürfe zum Bauvorhaben Kletterfelsen.....	90
5.3.2	Empfehlung und Erläuterung der Vorzugsvariante.....	91
5.4	Ökologische Betrachtungen zum Bauvorhaben	96
5.4.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens.....	98
5.4.2	Sachbilanz	100
5.4.3	Wirkungsabschätzung - KEA und CO ₂ e-Emissionen.....	104
5.4.4	Auswertung.....	110
5.4.5	Ökobilanzielle Betrachtung der Vorzugsvariante.....	114
5.5	Kostenschätzung des Bauvorhabens.....	121
6	Zusammenfassung und Ableitung von weiterführenden Untersuchungen	124

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Stoffliche Zusammensetzung der RC-GK	19
Tabelle 2.2: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm bei der Zusammensetzung von Beton	19
Tabelle 2.3: Empfohlener Massenanteil rezyklierter Gesteinskörnungen bei der Zusammensetzung von Beton	20
Tabelle 3.1: Anforderungen an Ausgangsstoffe nach DIN EN 14487-1:2006	25
Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile des Trocken- und Nassspritzverfahrens	28
Tabelle 3.3: Anwendungsbereiche für Spritzbeton mit entsprechender Expositions- und Druckfestigkeitsklasse	29
Tabelle 4.1: Zuordnung des untersuchten RC-Brechsandes gemäß Tabelle A.1 DIN 4226- 101:2017-08 (Auszug)	34
Tabelle 4.2: Eingangskontrolle für RC-GK 0/8 nach DIN 4226-102	35
Tabelle 4.3: Untersuchungsergebnis der stofflichen Kennzeichnung der RC-GK 8/16	35
Tabelle 4.4: Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung RC-GK 0/8.....	36
Tabelle 4.5: Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung RC-GK 0/2.....	38
Tabelle 4.6: Ergebnisse und Bewertung des Fließkoeffizienten RC-GK 0/2	39
Tabelle 4.7: Grenzwerte für die Alkaliempfindlichkeitsklasse weiterer Gesteinskörnungen nach Anhang B.2 gemäß Alkali-Richtlinie DAfStB	41
Tabelle 4.8: Ergebnisse der Dehnungsberechnung der Prismensätze 1 und 2	43
Tabelle 4.9: Zuordnung Konsistenz und Ausbreitmaß von Frischmörtel.....	48
Tabelle 4.10: Mörtelrezepturen für Versuchsreihe 1 und 2	50
Tabelle 4.11: Erzielte Festigkeitsklassen nach DIN EN 206-1	56
Tabelle 4.12: Rezepturbezeichnung und Substituierungsgrad der Spritzkörper	59
Tabelle 4.13: Rückprallwertetabelle	62
Tabelle 4.14: Zuordnung Rezepturbezeichnung und Beschriftung der Spritzkörper	63
Tabelle 4.15: Zuordnung der Rückprallwerte (Median + Korrekturwert) einer Druckfestigkeitsklasse	65
Tabelle 5.1: Charakteristische Maße der Straßenbauplatten aus der Bestandsaufnahme.....	80
Tabelle 5.2: Auswertung der Rückprallwerte zur Festigkeitszuordnung.....	84
Tabelle 5.3: Druckfestigkeit entnommener Bohrkerne	86
Tabelle 5.4: Abweichung der Festigkeitsklassen zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Untersuchung.....	87
Tabelle 5.5: Übersicht Mengenermittlung Vorzugsvariante (überschlägig)	95
Tabelle 5.6: Materialmengen für die Vorzugsvariante	100
Tabelle 5.7: Energieaufwand und Treibhauspotenzial der Bereitstellung ausgewählter Baustoffe	105
Tabelle 5.8: CO ₂ e-Transportemissionen pro t und m ³	113

Tabelle 5.9: CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Baustoffe durch Herstellung und Verbrauch für die Vorzugsvariante.....	116
Tabelle 5.10: CO ₂ -Äquivalent-Emissionen der Transportaufwendungen für die Baustoffe der Vorzugsvariante für den Kletterfelsen.....	118
Tabelle 5.11: Übersicht der CO ₂ e-Gesamtemissionen [t]	120
Tabelle 5.12: Stufen einer Kostenermittlung entsprechend DIN 276 und HOAI.....	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Zusammenstellung unterschiedlicher Sieblinien von aufbereiteten Betonbruch zur Verwendung als Frostschutz- oder Schottertragschichtmaterial	10
Abbildung 1.2: Methodik, Herangehensweise und Bearbeitung der Arbeitspakete	15
Abbildung 2.1: Geltende Normen und Regelungen für die Verwendung von Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton	17
Abbildung 2.2: Druckfestigkeitsentwicklungen von Versuchsbetonen mit Altbetonbrechsand	22
Abbildung 3.1: Darstellung Trockenspritzverfahren	26
Abbildung 3.2: Darstellung Nassspritzverfahren	27
Abbildung 4.1: Stoffstrom der Aufbereitung im Trockenverfahren der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH	32
Abbildung 4.2: Aufteilung der Regelsieblinie B8	33
Abbildung 4.3: Stoffliche Zusammensetzung des Ausgangsmaterials (grafische Darstellung)	36
Abbildung 4.4: Dehnungsdiagramm der Prismensätze 1 und 2	45
Abbildung 4.5: Prinzipieller Ablauf der RC-Mörteluntersuchungen	46
Abbildung 4.6: Rezepturbezeichnung	50
Abbildung 4.7: Frischmörtelrohrichten Versuchsreihe 1 und 2 am Tag der Herstellung	51
Abbildung 4.8: Festmörtelrohrichten Versuchsreihe 1 und 2 am Tag 28	52
Abbildung 4.9: Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung Versuchsreihe 1 und 2 nach 1, 2, 7 und 28 Tagen	53
Abbildung 4.10: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung Versuchsreihe 1 und 2 nach 1, 2, 7 und 28 Tagen	53
Abbildung 4.11: Gegenüberstellung Druckfestigkeitswerte der Mörtelrezepturen mit CEM II/A-LL 32,5 R	57
Abbildung 4.12: Mögliche charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeiten nach DIN EN 13791:2020, Abschnitt 8.1(7) und nach DIN EN 13791/A20:2017, mod. Ansatz B (A20) für Deckenplatte LU	67
Abbildung 4.13: Festigkeitsklassen der geprüften Bohrkerne	68
Abbildung 4.14: Punktdiagramm mit Festigkeit, Dichte und RC-Substitutionsanteil	69
Abbildung 4.15: Mittlere Wassereindringtiefe an Prüfkörpern	70
Abbildung 5.1: Betondübel (oben) und Bohrhaken (unten)	75
Abbildung 5.2: Vorgang zur Bestimmung der Festigkeitsklasse anhand von Rückprallzahlen	84
Abbildung 5.3: Schematische Grundrissdarstellung und 3D-Darstellung (Nordansicht) der Vorzugsvariante	92
Abbildung 5.4: Phasen einer Ökobilanzierung	96
Abbildung 5.5: Betrachtungsrahmen und Systemgrenzen ausgewählter Baumaterialien BV Kletterfelsen	99
Abbildung 5.6: Ausgewählte Produktionsstandorte der Ausgangsstoffe;	102
Abbildung 5.7: Stoffstromanalyse der Sand-Kies-Gewinnung	107
Abbildung 5.8: Umfang einer Well-to-Wheels-Analyse für Kraftstoff-/ Fahrzeugsysteme	109

Abbildung 5.9: CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro m ³ der Gesteinskörnung	111
Abbildung 5.10: Zusammensetzung Gesamt-CO ₂ -Äquivalent-Emissionen pro m ³ Trockenmischung Beton/Mörtel	112
Abbildung 5.11: CO ₂ e-Gesamtemissionen für die Bereitstellung der Baustoffe der Vorzugsvariante	120

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation, Motivation

Bei der Aufbereitung von Altbeton/Betonbruch, fällt - in Abhängigkeit vom Brechertyp und der Qualität des Ausgangsmaterials – ein erheblicher Anteil als Brechsand bzw. rezyklierter Brechsand < 4 mm Korndurchmesser an. Im Sonderforschungsbereich 385 „Bauliches Recycling“¹ ist schon Mitte der 1990-er Jahre dokumentiert, dass der Anteil der Korngröße 2 mm im aufzubereitenden Bauschutt einer hohen Schwankungsbreite von 20 bis 40 M.-% unterliegt. Der Anteil der Korngröße 4 mm liegt zwischen 30 bis 60 M.-%.

2002 wurde im Rahmen einer Forschungsarbeit² untersetzt, dass je nach Festigkeit des Ausgangsmaterials bis zu 50% als Brechsand < 4mm anfällt. MÜLLER³ belegt anhand ausgewerteter Prüfprotokolle von aufbereitetem Betonbruch (hergestellt für Frostschutz- und Schottertragschichten), dass der Anteil der Fraktion < 4 mm 20 bis 40 M.-% beträgt (vgl. Abbildung 1.1, rote Pfeile).

Eigene Auswertungen von Untersuchungen an aufbereitetem Altbetonbruch⁴ mit einem Anteil an Rc + Ru \geq 95 % (Rcu₉₅ gemäß DIN EN 12620, Kap. 5.8; Probe bestehend aus aufbereitetem Betonbruch; setzt sich aus der Gesteinskörnung des Betons und ungebundenen Natursteinen zusammen) bestätigen diese Größenordnung mit ~ 50% (Näheres s. Kapitel 4 dieses Berichts). Die Untersuchungen an Betonbruch, die z.B. zur Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen zur Betonherstellung für die Umweltstation in Würzburg eingesetzt wurden, wiesen einen Brechsandanteil über 30% auf⁵.

Auf der Grundlage der Datenbasis des Bundesverbands Baustoffe-Steine und Erden e.V.⁶ leiten DITTRICH et al. ab, dass sich die Menge der Fraktion < 2 mm bei der Aufbereitung von Bauschutt pro Jahr auf etwa 5 Mio. t summieren.⁷ Diese Annahme basiert auf Daten aus dem Jahr 2012.

Werden die aktuellen Daten des 12. Monitoringberichts⁸ für das Aufkommen an Bauschutt (59,8 Mio. t) und der geschätzte Anteil der Korngruppe < 2 mm von i. M. 25 M.-% bei der Bauschutttaufbereitung

¹ Deutsche Forschungsgemeinschaft: *Sonderforschungsbereich 385 "Baustoffrecycling"* (DFG - SFB 385). Magdeburg 1995-1997. Siehe auch Dora, Bernd: *Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand – Phasenveränderungen durch Temperaturbehandlung und Einsatzmöglichkeit*, Braunschweig 2001, S.1 URL: https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00057765

² Behler, K.; Meyer, A.: Untersuchungen zum Einsatz von Betonbrechsanden in sandreichen Betonen, Schlussbericht AiF-FO-Nr. 12349, MPA Bremen, Februar 2002, S. 1

³ Müller, Anette: Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau, i.A. des BBSR und BBR, Aktenzeichen 10.08.17.7 – 14.27, Abschlussbericht 2016, S.23 und vgl. Müller, Anette (Hrsg.): *Baustoffrecycling, Entstehung-Aufbereitung-Verwertung*, Springer Vieweg Verlag, 2018, S. 81

⁴ Mettke, Angelika; Dell, Maria: Untersuchungsergebnisse Brechsandproben, BTU C-S, AG Bauliches Recycling, 02.10.2018 (unveröffentlicht)

⁵ Mettke, Angelika; Jacob, Steffen; et.al.: Einsatz von Recycling-Beton, in: Mehraufwand für innovative Ansätze zum Klima- und ressourcenschonendem Beton bei der Umweltstation der Stadt Würzburg, AZ: 33520/02-35/0 DBU, 2021

⁶ Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V. (Hrsg.): *Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2012*, Berlin 2015

⁷ Dittrich, Sebastian / Dörmann, Joseph / Gruna, Robin / Nühlen, Jochen / Thome, Volker: *Das Verbundprojekt BauCycle*, in: Thome-Kozmiensky, Karl J. (Hrsg.): *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3*, Neuruppin 2016, S. 456

⁸ Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V. (Hrsg.): *Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2018*, Berlin 2021

(vgl. Abbildung 1.1, roter Kreis) zu Grunde gelegt, so ergibt dies eine Gesamtmenge von rund 15 Mio. t pro Jahr für diese feine Fraktion.

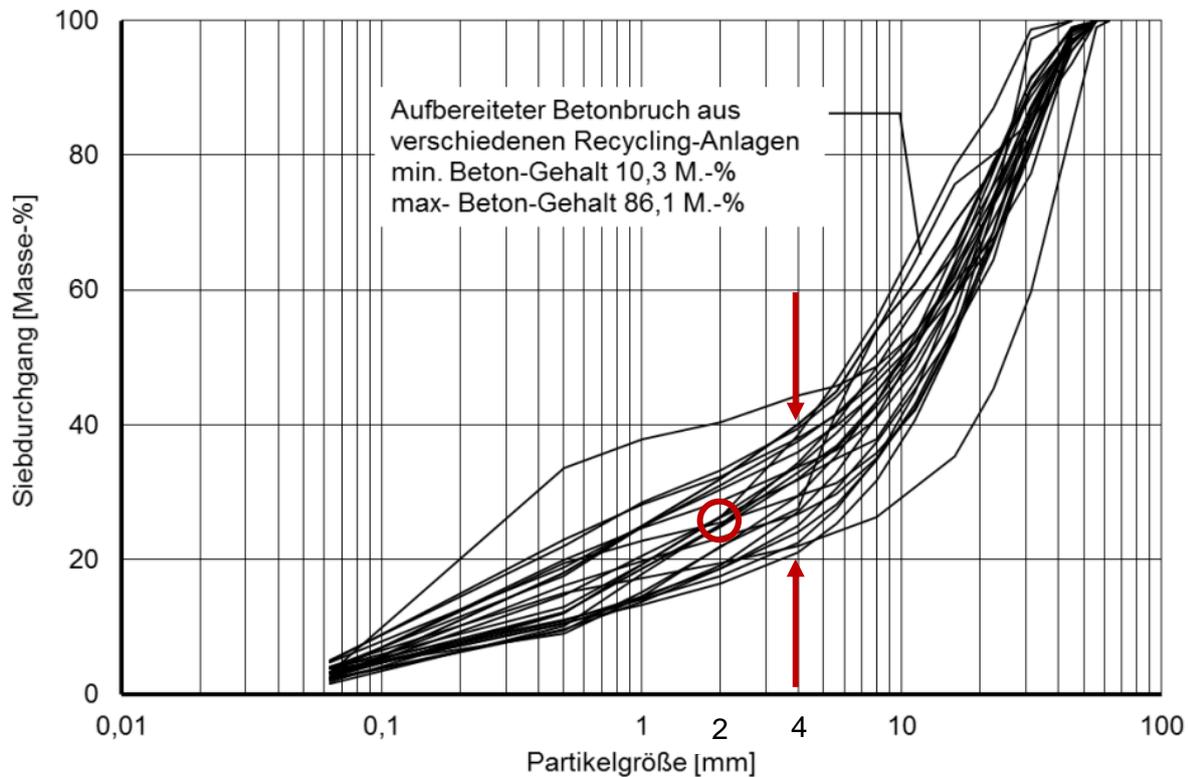


Abbildung 1.1: Zusammenstellung unterschiedlicher Sieblinien von aufbereitetem Betonbruch zur Verwendung als Frostschutz- oder Schottertragschichtmaterial⁹

Hinsichtlich der Verwertung von Brechsand, der bei der Aufbereitung von Bauschutt erzeugt wird (kurz: RC-Brechsand), gibt es seit Jahren Defizite. Das betrifft den reglementierten Einsatz in ungebundener als auch insbesondere den Ausschluss in gebundener Form zur Herstellung von Konstruktionsbeton bzw. nach DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe 09.2010, ist die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung < 2mm nicht vorgesehen. Zum einen wird die mögliche Schadstoffanreicherung in den bei der Aufbereitung von Betonbruch hergestellten RC-Brechsanden angenommen, zum anderen verminderte bautechnische und -technologische Eigenschaften, die mit den Eigenschaften des Zementsteins in Verbindung gebracht werden. Versuchsergebnisse an Recycling-Betonen, d.h. an Betonem unter Verwendung von Betonbrechsand bzw. RC-Brechsand, weisen im Vergleich zu einem Referenzbeton (herkömmlich hergestellter Beton mit natürlichem Sand) u.a. aufgrund des höheren Wasseraufnahmevermögens / Saugverhaltens ggf.

⁹ Müller, Anette: Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau, i.A. des BBSR und BBR, Aktenzeichen 10.08.17.7 – 14.27, Abschlussbericht 2016, S.23 und vgl. Müller, Anette (Hrsg.): Baustoffrecycling, Entstehung-Aufbereitung-Verwertung, Springer Vieweg Verlag, 2018, S.24, Abbildung 8

Verarbeitungsschwierigkeiten auf. Zurückzuführen ist dies auf den im RC-Brechsand enthaltenen Zementsteingehalt. Wird der Wasser/Zement-Wert erhöht und damit die Verarbeitbarkeit des RC-Betons mit RC-Brechsand verbessert, so hat das i.d.R. Einfluss auf die Festbetonqualität. Einen weiteren Einfluss auf die Verarbeitbarkeit hat die Kornform. Bei Brechsanden und allgemein rezyklierter Gesteinskörnung ist diese als eher kantig einzustufen, wohingegen der natürliche Zuschlag der Gesteinskörnung im Beton eine runde Kornform aufweist. Bekannt ist, je runder das Korn desto besser die Fließigenschaften. Daneben ist die Sieblinie bzw. der Körnungsanteil je Körnungsgröße entscheidend, je feiner der Anteil, desto höher ist der Wasseranspruch.

Soll von der DAfStb-Rili abgewichen werden, weil die Herstellung mit bis zu 100% rezyklierter Gesteinskörnung möglich ist, wie auch eigene Versuche zeigen, müssen die Produkteigenschaften durch Gutachten nachgewiesen werden. Beton, der nicht die DIN EN 206-1 erfüllen muss – also nicht als Konstruktionsbeton verbaut wird - kann ohne Berücksichtigung der DAfStb-Rili verbaut werden. Dazu zählen bspw. Ausgleichsschichten unter Estrichen oder Verfüllbetone.¹⁰

In der Schweiz hingegen wird der RC-Brechsand zur Herstellung von Beton eingesetzt. Gemäß dem SIA-Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“ sind auch die feinen Gesteinskörnungen der Korngruppe 0/4 für die Herstellung von Konstruktionsbeton möglich.

Wie bereits oben erwähnt, ist der Einsatz von Brechsanden ≤ 2 mm zur Herstellung von Konstruktionsbeton in Deutschland gemäß DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ (Ausgabe 09.2010) ausgeschlossen bzw. nicht erlaubt. Auch in der Trockenbeton-Richtlinie¹¹ wird die Verwendung von rezyklierten GK für Trockenbeton und Trockenmörtel ausgeschlossen.

In der jüngsten Vergangenheit haben sich mehrere Wissenschaftler und Fachexperten mit der effizienten und sinnvollen Verwertung von RC-Brechsanden, dieser massenhaft bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Fraktion, auseinandergesetzt. Geforscht wurde u.a., RC-Brechsand zur Zementherstellung für sogenannte R-Zemente einzusetzen (s. bspw. EU-Projekt „SeRaMCo“ - Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products; vgl. DAfStb Heft 584 "Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton"). Im BMBF-Verbundforschungsvorhaben R-Beton (11/2014 bis 04/2018) ist die DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ auf den Prüfstand gestellt worden. U.a. wurde die feine RC-Gesteinskörnung vom Typ A ≤ 2 mm zur Herstellung von Beton untersucht. Die erzielten Untersuchungsergebnisse sollen in die zuvor zitierte DAfStb-Richtlinie einfließen. Die DAfStB wird überarbeitet.¹² Im Jahr 2018 wurde der

¹⁰ Zement-Merkblatt Betontechnik B30, 11.2021 Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung – R-Beton, S.4

¹¹ siehe DAfStb Trockenbeton-Richtlinie 2005, Kapitel 5.1.3 Gesteinskörnung

¹² Wiens, Udo; Breit, Wolfgang: Beton ressourcenschonend – wie wird das neue Regelwerk für den R-Beton aussehen?, Vortrag auf dem Fachsymposium am 19.02.2020 in Stuttgart „Kreisläufe schließen – Ressourcen und Klimaschutz auf dem Bau“

Gelbdruckentwurf der DAfStb Richtlinie „Anforderungen an die Ausgangsstoffe zur Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2“ von der DAfStb-Geschäftsstelle bekannt gemacht. Auf dem Fachdialog „Zirkuläres Bauen am Beispiel ressourcenschonender Beton“ am 25.08.2022 in Berlin wurde angekündigt, dass die DAfStb-Rili im November erscheinen wird. U.a. ist geregelt, dass vom Typ 1 (Betonspalt) Brechsand < 2 mm bei WO und WF¹³ eingesetzt werden kann, wenn dieser aus der gleichen Produktion stammt wie die eingesetzte RC-Gesteinskörnung > 2 mm. (Die Verwendung von Brechsanden des Typs 2 -- welcher bei der Aufbereitung von Mauerwerksmischabbruch anfällt -- ist weiterhin zur Herstellung von Beton ausgenommen.)

1.2 Projektbeschreibung, Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes ist es, zu prüfen, ob der unter praktischen Bedingungen auf Bauschutt-Recyclinganlagen (kurz: RC-Anlagen) erzeugte Brechsand, hergestellt aus Betonbruch, **zur Herstellung von Spritzbeton und Spritzmörtel** prinzipiell geeignet ist. D.h., es soll untersucht werden, ob RC-Brechsand auch ohne Vorbehandlung - wie bspw. mittels Abrasionsbehandlung¹⁴ oder Aufschlusszerkleinerung mit Leistungsschallimpulsen¹⁵ (um die Zementsteinmatrix von der Gesteinskörnung abzutrennen) verwertbar ist.

Das übergeordnete Ziel ist, die in Größenordnungen vorhandenen Potenziale für den Einsatz von RC-Baustoffen auszuschöpfen und damit umweltentlastende Ziele zu erreichen. Zu untersuchen sind, ressourceneffiziente Anwendungen, um Primärrohstoffe (Sande¹⁶) substituieren zu können und damit Eingriffe in das Landschaftsbild und Ökosystem zu reduzieren sowie die knappen Deponiekapazitäten zu schonen. Die bau- und umwelttechnischen Analysen zum Brechsand sowie Versuche zur Herstellung von Spritzbeton und –mörtel im Trockenverfahren unter praktischen Bedingungen sind dabei wesentlicher Bestandteil.

Eine realbezogene, multiplizierbare Anwendung soll durch den Bau eines Sportkletterfelsen erfolgen. Dieser künstliche Kletterfelsen soll als Kommunikator für den Einsatz von schon einmal in Nutzung gewesenen Betonelementen und Spritzbeton sowie –mörtel unter Verwendung von RC-Brechsanden verschiedener Festigkeitsklassen dienen. Geplant ist, den Kletterfelsen auf dem

¹³ WO und WF sind Klassenbezeichnungen der zu erwartenden Umgebungsbedingungen für den Beton. WO: Beton, der während der Nutzung weitgehend trocken bleibt, z.B. Innenbauteile des Hochbaus. WF: Beton, der während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht ist wie z.B. ungeschützte Außenbauteile. [vgl. 6.2.1 Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen | Betontechnische Daten von HeidelbergCement (www.betontechnische-daten.de)]

¹⁴ Weimann, Karin (Dissertation): Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik, BAM-Dissertationsreihe, Band 51, Berlin, 2009

¹⁵ Zange, Rainer M.: Anwendungsbezogenes Prozeßmodell der Wandlung elektrischer Energie in Energie des Leistungsschallimpulses, Dissertation, 2000

¹⁶ Die Redewendung „Wie Sand am Meer“ hat ihre Gültigkeit verloren, denn der nicht nachwachsende Rohstoff wird in etlichen Ländern (z.B. in Schweden, Frankreich), und in mehreren Regionen Deutschlands knapp.

Zentralcampus der BTU Cottbus-Senftenberg zu errichten, sportliche Aktivitäten (Klettern) mit sozialer Nutzung zu koppeln.

Die in diesem Projekt zu planende Ausführungsvariante: Kombination von Produktrecycling mit Material-Recycling, also Bauen mit gebrauchten Betonelementen und RC-Spritzbeton zur Oberflächengestaltung und RC-Beton zur Lagerfugenausbildung ist erstmalig in dieser Konstellation. Der Kletterfelsen soll als weit sichtbares Monument für ressourcenschonendes Bauen beispiel- und impulsgebend sein. Die geplante Nutzung dient nicht nur sportlichen, sondern auch – wie oben erwähnt - pädagogischen, inklusiven, medizinischen und gesellschaftlichen Ansprüchen. Daher sind die unterschiedlich zu beteiligenden Akteure und Bedarfsträger aktiv einzubinden. Somit erhält der kommunikative Aspekt von Anfang an die erforderliche Relevanz eines solchen Bauvorhabens. Durch die so erzielbare interdisziplinäre fach- und branchenübergreifende Zusammenarbeit resp. ihre Transdisziplinarität können Chancen und Synergieeffekte, klar herausgestellt, ingenieur-wissenschaftlich entwickelt und effektiv genutzt werden, aber auch Grenzen zur Anwendung ermittelt werden. Der interdisziplinäre Ansatz des Bauvorhabens ist durch die Einbindung von Experten unterschiedlichster Fachgebiete Bestandteil des Vorhabens ebenso wie der Grundsatz der Ressourcenschonung und -effizienz und die grundsätzliche Eignungsfeststellung von Brechsanden zur Herstellung von Spritzbeton.

Mit der Entwicklung von Kombinationsmöglichkeiten des untersuchten RC-Spritzmörtels bzw. – betons mit ehemals in Nutzung gewesenen Straßenbauplatten (die als Lagergut auf dem BTU-Campus für die Umsetzungsmaßnahme vorgehalten wurden), sowie demontierten Betonelementen aus einem Rückbauvorhaben eines mehrgeschossigen Betonfertigteilegebäudes auf dem Zentralcampus der BTU, werden neue, sekundäre Anwendungsfelder untersucht und wissenschaftlich verifiziert.

Dieser Forschungsbericht soll einen Beitrag dazu leisten, die feine Fraktion der rezyklierten Gesteinskörnung, welche durch den Aufbereitungsprozess in Größenordnungen erzeugt werden, als legitimierten RC-Baustoff am Markt zu etablieren und die normativen Regelungen zu einer Novellierung anregen.

Der hier vorliegende Forschungsbericht wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) über eine Laufzeit von 15 Monaten zuzüglich einer kostenneutralen Verlängerung gefördert.

1.3 Methodisches Vorgehen zur Abarbeitung der Zielstellung

Die methodische Herangehensweise zur Abarbeitung der Zielstellung orientiert sich an den inhaltlichen Schwerpunkten bzw. den Arbeitspaketen gemäß Forschungsantrag. Die inhaltlichen Schwerpunkte sind aufeinander abgestimmt; sie sind in 6 Arbeitspakete (AP) gegliedert.

Die Untersuchungsschwerpunkte gliedern sich wie folgt:

- Analyse der Eigenschaften des RC-Brechsandes im Rahmen der Eignungsuntersuchung (AP 2)
- Entwicklung und Prüfung der Rezepturen für den Spritzbeton mit anteiliger Verwendung des RC-Brechsandes unter Laborbedingungen (AP 2)
- Test der entwickelten Rezepturen unter praktischen Bedingungen (AP 2) im Rahmen der Hauptprüfung
- Auswertung der Experimente hinsichtlich bautechnischer- und -technologischer Parameter (AP 2)
- Akquise gebrauchter Betonelemente (AP 1)
- Erarbeitung von konzeptionellen Lösungen für das Bauvorhaben Kletterfelsen inkl. Ermittlung einer Vorzugsvariante (AP 3, AP 4)
- Kostenschätzung und Finanzierungsplanung für das Bauvorhaben Kletterfelsen (AP 5)
- Bewertung der ökologischen Relevanz des Bauvorhabens (AP 2, AP 3)
- Zusammenführung der bautechnischen Untersuchungsergebnisse mit den verfahrenstechnischen Prozessen inkl. der Bewertung der geplanten Baumaßnahme unter Nachhaltigkeitsprämissen (AP 6)

Die Arbeitsschritte bzw. Bearbeitungsprozesse sind in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 1.2) als Fließschema aufgeführt. In nahezu allen Prozessen wurden Studierende der BTU Cottbus-Senftenberg aus verschiedenen Fachrichtungen (Bauingenieurwesen, Stadt- und Regionalplanung, Architektur und Umweltingenieurwesen) involviert bzw. aktiv eingebunden, um interdisziplinär die neuen Herausforderungen bewältigen zu können als auch selbstständig Lösungen oder zumindest Lösungsansätze zu erarbeiten. Insgesamt entstanden während der Bearbeitungszeit 3 Masterarbeiten, 6 Studienarbeiten und 5 Stegreif-Entwürfe für den Bau des Kletterfelsens. Darüber hinaus wurden Fachexperten aus der Wirtschaft und Forschung beratend hinzugezogen.

Bei der Projektbearbeitung wurde stets die Einordnung der (Zwischen-)Ergebnisse im wissenschaftlichen Kontext unter ökologischen/ressourceneffizienten, wirtschaftlichen und sozialen Aspekten berücksichtigt.

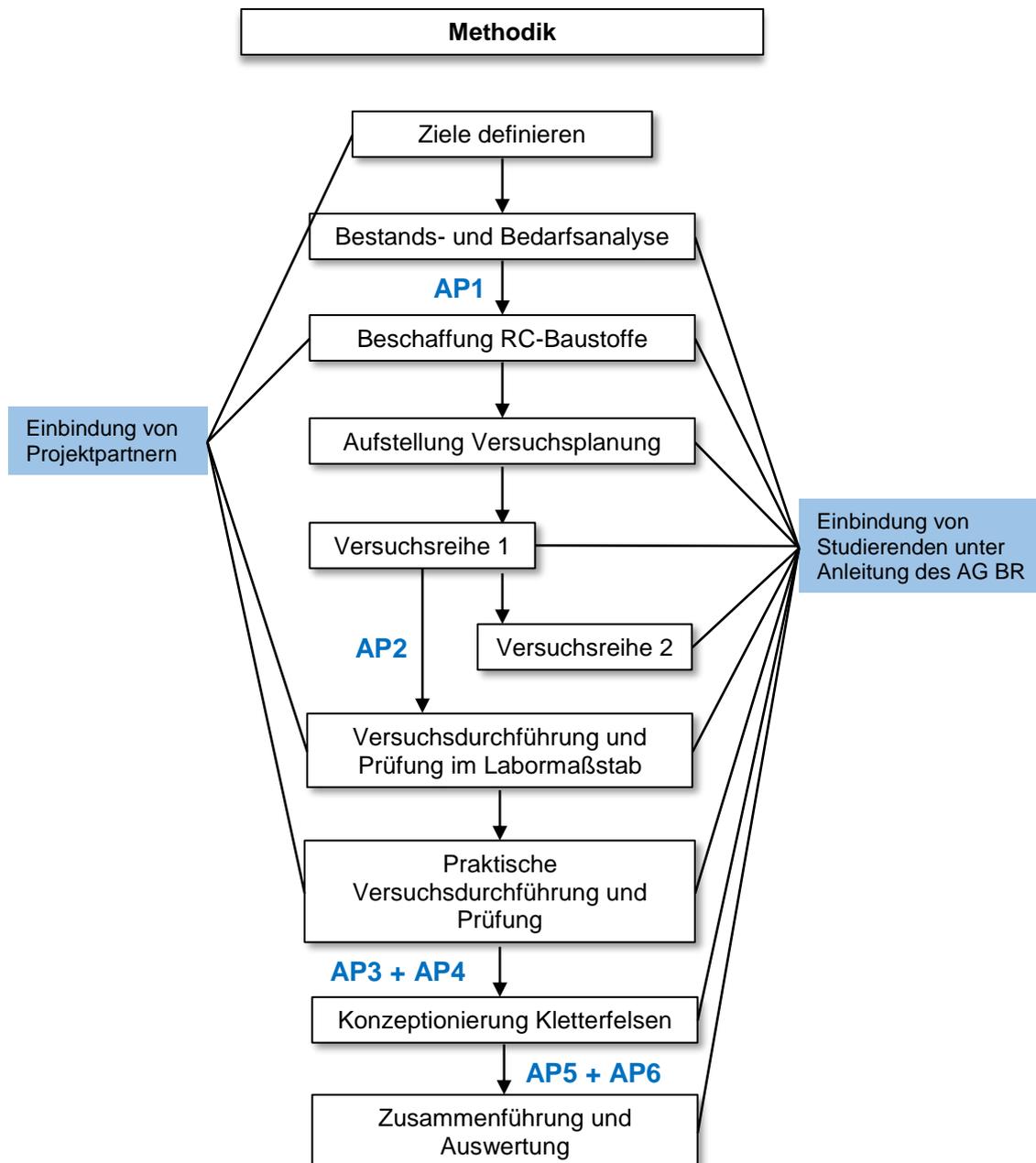


Abbildung 1.2: Methodik, Herangehensweise und Bearbeitung der Arbeitspakete

Die im Kapitel 1.2 **definierten Ziele**, wurden zum Projektbeginn aufgestellt, um die **Beschaffung der RC-Brechsande** zu veranlassen **und** die **labortechnischen Untersuchungen der RC-Brechsande** (vgl. Kapitel 4) vorbereiten zu können. Parallel dazu wurden die auf dem Campus der Brandenburgischen Technischen Universität in Cottbus zwischengelagerten Straßenbauplatten quantitativ aufgenommen und hinsichtlich ihrer qualitativen Eigenschaften untersucht. Dies wird im Kapiteln 5.2 erörtert.

Bei der **Aufstellung der Versuchsplanung** zur Spritzbetonherstellung wurden **zwei Versuchsreihen im Labormaßstab** kalkuliert und umgesetzt, ergänzt um eine **Versuchsdurchführung im Feld**, die nach der ersten Versuchsreihe im Labor durchgeführt wurde. Ungeachtet der Labor- und Praxisergebnisse zum RC-Brechsand wurden bereits zu Beginn des Forschungsprojektes erste **Entwürfe und Konzepte zur Errichtung eines Kletterfelsens** unter Verwendung von gebrauchten Straßenbauplatten sowie Spritzbeton/-mörtel konzipiert. Im Rahmen eines Stegreifs mit Studierenden der BTU, Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen, Stadt- und Regionalplanung, Fachgebiet Bildende Kunst unter Leitung von Prof. Jo Achermann wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit dem Arbeitsgebiet Bauliches Recycling mehrere Varianten (Kapitel 5.3) entwickelt. Ein weiterer Entwurf wurde von Mitarbeitern des Arbeitsgebietes Bauliches Recycling (schlussendlich als Vorzugsvariante deklariert) erarbeitet (Kapitel 5.3.2).

1.4 Zielgruppen und Verwertung der Ergebnisse des Vorhabens

Zielgruppen der Ergebnisverwertung der Forschungsarbeit sind:

1. Bauherren, Planer, Behördenvertreter, Vertreter von Banken, Fördermittelgeber
2. Baustofflieferanten (wie Baustoffrecycler, Betonhersteller) und Bauausführende
3. Studierende und Auszubildende als zukünftig verantwortliche Akteure
4. Lehrende und Ausbilder als Knowhow-Vermittler.

Die Auswahl und enge Zusammenarbeit mit regionalen Partnern ist Grundsatz für dieses Vorhaben, bündelt Kompetenzen und schafft gute Voraussetzungen für einen lokalen und regionalen Wissens- und Technologietransfer.

Hinweise zur Verwertung der Projektergebnisse:

Um den hohen energetischen, logistischen und finanziellen Aufwand der Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen zu minimieren und die Wiederverwendung von gebrauchten Betonbauteilen zu ermöglichen, bedarf es bereits in den Leistungsphasen 1 bis 3 der HOAI (LP1: Grundlagenermittlung, LP2: Vorplanung, LP3: Entwurfsplanung) eines jeden Bauprojektes einer frühzeitigen Integration von Vermeidungs- und Wiederverwendungsstrategien, die von Anfang bis Ende des Lebenszyklus eines Bauwerks greifen. Nur so und in Absprache mit den beteiligten Akteuren ist eine zukünftige und nachhaltige Strategie des Kreislaufwirtschaftens im Sinne des KrWG, der Ressourcenschonung, des zirkulären Bauens als auch im Sinne der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen sichergestellt. Bis es zu einem vollständigen Umdenken zu diesem sogenannten „cradle-to-cradle“-Prinzip kommt, bedarf es fachlich fundierte bautechnische und -rechtliche Lösungen, um unsere Umwelt von den hohen, vermeidbaren Mengen an Bauabfällen zu entlasten.

2 Grundsätzliches zur Charakterisierung und Anwendung von Brechsanden und RC-Beton

2.1 Normative Einordnung und Zulassungskriterien für RC-Brechsande bzw. RC-Gesteinskörnungen und für RC-Beton

Grundsätzlich sind RC-Baustoffe (z.B. RC-Gesteinskörnung; kurz: RC-GK) in gleicher Weise wie Primärbaustoffe hinsichtlich ihrer Qualität zu bewerten. Eine Übersicht der zurzeit geltenden Regelwerke auf europäischer Ebene und den mitgeltenden Normen und Regelwerke auf nationaler Ebene gibt nachstehende Abbildung 2.1:

Europäische Produktnorm / Deutsche Fassung	Mitgeltende Deutsche Normen und Regelwerke
Gesteinskörnungen für Beton	Gesteinskörnungen für Beton
EN 12620:2002 + A1:2008 / DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton Inhalt: → Eigenschaften für GK, die durch Aufbereitung natürlicher, industriell hergestellter oder rezyklierter Materialien als Betonzuschlag gewonnen werden → QS-System zur WKP und für Konformitätsnachweis → Gilt für alle Betonsorten einschließlich Beton nach EN 206-1, Straßenbeton und Betonfertigteile	DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Ausgabe 2013-10 DIN 4226-101:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen DIN 4226-102:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle
Beton	Beton
DIN EN 206-1:2001-07 + A1:2004-10 + A2:2005-09 Teil 1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität	DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe 2010-09

Abbildung 2.1: Geltende Normen und Regelungen für die Verwendung von Gesteinskörnungen zur Herstellung von Beton¹⁷

Die **Verwendung von RC- Brechsanden** im Kornbereich 0 – 2 mm ist derzeit – wie oben erläutert - zur Herstellung von Beton in den Regelwerken ausgenommen und bedarf deshalb einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE).

¹⁷ nach Mettke, Angelika, et al.: Brandenburger Leitfaden „Ausschreibungen“ Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) (Hrsg.), 2017

– Eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBg) gilt für ein einzelnes Bauvorhaben wie in unserem Falle für den Bau des Kletterfelsens. Es ist ein Verwendungsnachweis für die RC-Brechsande sowie für die schon einmal in Nutzung gewesenen Betonplatten erforderlich, weil es für diese Baustoffe und Bauelemente keine technischen Baubestimmungen und keine allgemein anerkannten Regeln der Technik gibt (bekannt gemacht werden diese in der „Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen – VwV TB“).

Der Antrag auf ZiE ist bei der obersten Bauaufsichtsbehörde einzureichen. Im Land Brandenburg, dem geplanten Standort für den Bau des Kletterfelsens, ist die Zuständigkeit zur Erteilung einer ZiE dem Landesamt für Bauen und Verkehr, dem Bautechnischen Prüfamts, übertragen worden.¹⁸ –

In Anbetracht des Ziels, RC-Brechsande für eine allgemeingültige Anwendung im Trockenspritzverfahren qualifizieren zu können, wird angeregt, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ - gilt i.d.R. 5 Jahre) beim DIBT zu erwirken bis diese bautechnische Regelungslücke geschlossen ist.

Um ein Produkt auf EU-Ebene zuzulassen, bedarf es der sogenannten „European Technical Assessment“ (ETA); zu Deutsch: Europäische Technische Bewertung. Diese Bewertung ist ein Produktleistungsnachweis, der zur CE-Kennzeichnung führt und somit im europäischen Binnenmarkt den (RC-)Baustoff als Produkt handelbar macht.

Die bautechnischen Anforderungen für die RC-GK und den RC-Beton sind maßgeblich in den europäisch harmonisierten Normen DIN EN 12620 und die DIN EN 206-1 aufgeführt ergänzt um die Anwendungsregeln der nationalen Norm DIN 1045-2. Alle Gesteinskörnungen – sowohl natürliche als auch rezyklierte Gesteinskörnungen –, die entsprechend der DIN EN 12620 verwendet werden, müssen gemäß DAfStb Alkali-Richtlinie¹⁹ hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität beurteilt bzw. in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse eingestuft werden. Des Weiteren ist – wie o.a. - die DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen (> 2mm) nach DIN EN 12620²⁰ zugrunde zu legen.

Im Rahmen unserer hier durchgeführten Untersuchungen stand die RC-GK-Körnung 0-8 mm zur Verfügung. Zur Herstellung von Konstruktionsbeton unterscheidet die DAfStb-Rili zwei (Liefer-)typen, die sich hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung unterscheiden. Der zulässige Substitutionsanteil an RC-GK im RC-Beton wird vorgegeben (vgl. Tabelle 2.1 und Tabelle 2.2).

¹⁸ LBV, Bautechnisches Prüfamts (Hrsg.): Vorhabenbezogene Bauartgenehmigung und Zustimmung im Einzelfall, allgemeines Merkblatt – Fassung 19.04.2021, S. 3; die Gebühr beläuft sich zwischen 250€ und 10.000€

¹⁹ Technische Regel: DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Ausgabedatum 2013-10. Die vorbeugenden Maßnahmen gelten für die Feuchtigkeitsklassen WO, WF und WA gemäß DIN 1045-2.

²⁰ DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620*) Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe September 2010

Tabelle 2.1: Stoffliche Zusammensetzung der RC-GK²¹ (zu bestimmen nach DIN EN 933-11:2011-05²²)

Bestandteile		Gesteinskörnung Typ 1 [M.-%]	Gesteinskörnung Typ 2 [M.-%]
Beton, Betonprodukte, Mörtel aus Beton + Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene GK	Rc + Ru	≥ 90	≥ 70
Mauerziegel (d.h. Mauerstein und Ziegel), Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton	Rb	≤ 10	≤ 30
Bitumenhaltige Materialien	Ra	≤ 1	≤ 1
Sonstige Materialien: Bindige Materialien (d.h. Ton und Boden), verschiedene sonstige Materialien: Metalle (eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips + Glas	X + Rg	≤ 1	≤ 2
Schwimmendes Material in Volumen	FL	≤ 2	≤ 2

Tabelle 2.2: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm bei der Zusammensetzung von Beton, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%)²³

Spalte	1	2	3	4
Zeile	Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
	Alkalirichtlinie	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Typ 1	Typ 2
1	WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	≤ 45	≤ 35
2	WF ^{a)} (feucht)	Kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4		
3		Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF1 ^{a)} und XF3 ^{a)} und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35	≤ 25
4		Chemischer Angriff (XA1)	≤ 25	≤ 25

a) Zusätzliche Anforderungen s. Abschnitt (1), (3) und (4) gemäß DAfStb-Richtlinie

Hinweis: Die DIN EN 206:2021-06 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021 wird nach Auskünften des DIBT etwa Ende 2023 oder Anfang 2024 in die Bautechnischen Bestimmungen eingeführt werden. Entsprechend der Tabelle E.2 werden folgende Höchstwerte für den Austausch grober Gesteinskörnungen (Massenanteil in %) **empfohlen** (vgl. Tabelle 2.3):

²¹ Nach DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620*), Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe September 2010, S. 4

²² DIN EN 933-11:2011-05, EN 933-11:2009 + AC 2009 (D), unter Pkt. 6 Identifizierung der einzelnen Bestandteile an Körnern > 4mm

²³ Nach DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620*), Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe September 2010, S. 7;

Tabelle 2.3: Empfohlener Massenanteil rezyklierter Gesteinskörnungen bei der Zusammensetzung von Beton nach Tabelle E.2 aus DIN EN 206:2021-06

Typ der rezyklierten Gesteinskörnung	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	Alle anderen Expositionsclassen ^a
Typ A: (R _{C90} , R _{cu95} , R _{b10-} , R _{a1-} , F _{l2-} , X _{Rg1-})	50 %	30 %		0 %
Typ B ^b : (R _{C50} , R _{cu70} , R _{b30-} , R _{a5-} , F _{l2-} , X _{Rg2-})	50 %	20 %	0 %	
^a Der Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen vom Typ A mit bekannter Herkunft darf bei Expositionsclassen, für die der ursprüngliche Beton entworfen war, bis zu 30% der Gesamtmenge der Gesteinskörnung betragen				
^b Rezyklierte Gesteinskörnungen vom Typ B sollten nicht im Beton > C30/37 verwendet werden				

Die Norm DIN 4226-101²⁴ unterscheidet in zwei weitere Kategorien (Typ 3 und Typ 4), welche für Beton außerhalb der DIN 1045-2:2008-08 Anwendung finden. Die einzuhaltenden Höchstwerte der Eluat- und Feststoffparameter sind der DIN 4226-101 Tabelle 2 entnehmbar. Die DIN 4226-102²⁵ regelt die für die Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit nötigen Schritte. Diese Schritte sind zum einen die Typprüfung, welche „die erstmalige Überprüfung und Beurteilung [der rezyklierten Gesteinskörnung] zu Beginn der Herstellung“ festlegt und zum anderen die Werkseigene Produktionskontrolle (WPK), welche als „die vom Hersteller vorzunehmende kontinuierliche Überwachung der Produktion“ definiert wird.

Wie aus den aktuellen normativen Vorgaben hervorgeht, sind – wie o.a. - rezyklierte Gesteinskörnungen mit einer Korngröße < 2 mm nicht für die Herstellung von Konstruktionsbeton einsetzbar. Wie bereits eingangs erwähnt, wird diese Korngröße zumeist für ungebundene Anwendungen im Erd- und Straßenbau (z.B. als Kabelsand) oder zur Herstellung von Asphalt eingesetzt oder deponiert. Interessant sind aber auch die aktuellen Forschungen zum Brechsandeinsatz bei der Zementherstellung anstelle von Kalkstein (Referat von Arne Stecher zum Thema „Zementwende“ auf dem 16. Holcim-Bauforum 2022).

An dieser Stelle wird angemerkt, dass bereits im ersten Regelwerk „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) aus dem Jahre 1998, der Höchstanteil rezyklierter Zuschläge im Gesamtzuschlag für Innenbauteile bis zur Betonfestigkeitsklasse B25 auf 35 Vol.-% größer 2 mm beschränkt war und **außerdem 7 Vol.-% ≤ 2 mm eingesetzt werden konnten.**²⁶

²⁴ DIN 4226-101:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen

²⁵ DIN 4226-102:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle

²⁶ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, 1998

Eine normative (Re-)Integration für den Einsatz von Brechsanden in gebundener Form zur Betonherstellung ist angesichts der hohen Abfallmengen und der nachgewiesenen bautechnischen Qualitäten von mehreren Fachleuten und Wissenschaftlern, erforderlich.

2.2 Bisherige und potenzielle Einsatzbereiche von Brechsanden

In der derzeit gültigen DIN EN 12620 aus dem Jahr 2008 gelten noch gewisse Vorbehalte in der Verwendung der rezyklierten feinen Gesteinskörnung, dort heißt es:

„[...] Mit den Normungsarbeiten für Sekundärrohstoffe, zu denen nur wenige Erfahrungen vorliegen, wurde jedoch erst vor kurzer Zeit begonnen. Mehr Zeit wird benötigt, um die Herkunft und die Eigenschaften dieser Rohstoffe eindeutig festzulegen. In der Zwischenzeit müssen solche Rohstoffe, zu denen nur wenige Erfahrungen vorliegen, sämtlichen Anforderungen dieser Norm entsprechen sowie abhängig vom vorgesehenen Verwendungszweck den entsprechenden nationalen Vorschriften über gefährliche Substanzen (siehe Anhang ZA dieser Norm) genügen, wenn sie als Gesteinskörnungen in Verkehr gebracht werden. [...]“²⁷

An der Tatsache, dass die feine Fraktion der rezyklierten Gesteinskörnungen noch nicht explizit geregelt ist, hat sich bis dato nichts geändert. Jedoch wurden in den letzten Jahren etliche Forschungsvorhaben durchgeführt und aussagekräftige Ergebnisse erzielt hinsichtlich der Verwendung von Brechsanden für unterschiedliche Anwendungen. Im Nachfolgenden werden ausgewählte Ergebnisse skizziert.

Untersuchungen zeigen, dass Brechsande, hergestellt aus verschiedenen Ausgangsstoffen wie bspw. Bahnschwellen, Gleisschotter, Betonbruch, Mauerwerksbruch, Dachziegelbruch auch als Sekundärrohstoff in der Zementklinkerherstellung eingesetzt werden kann (vgl. Heft 584 DAfStB²⁸, Vortrag am 01.12.2020 „Runder Tisch Ressourceneffizienz im Bauwesen“²⁹).

So wurden bspw. im Verbundforschungsvorhaben des Vereins Deutscher Zementwerke „R-Beton“ die aus unterschiedlichen Abbruchmaterialien gewonnenen RC-Brechsande 0/4 für die Zementherstellung untersucht und ausgewertet.³⁰ Als Ergebnis konnte hierbei festgestellt werden, dass der Einsatz von Zementen mit bis zu 30 M.-% Brechsand bei der Herstellung von

²⁷ DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton, S.5

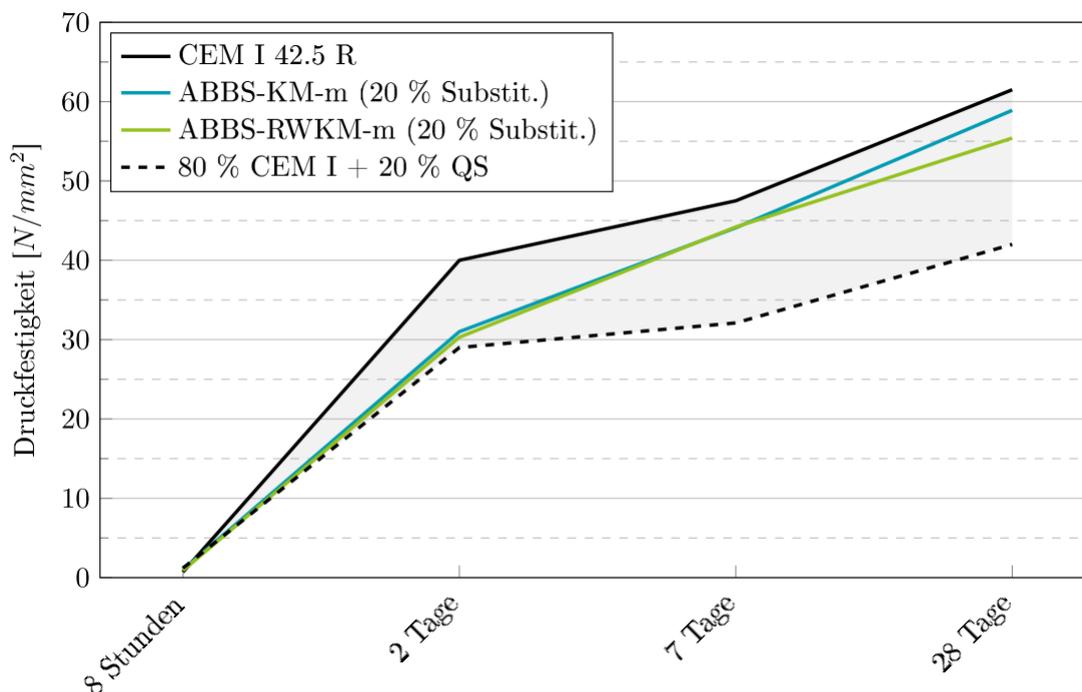
²⁸ Hauer, Bruno; Pierkes, Roland; Schäfer, Stefan; Seidel, Maik; Herbst, Tristan; Rübner, Katrin; Meng, Birgit; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Heft 584 – Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ – Teilprojekt B „Potenziale des Sekundärrohstoffeinsatzes im Betonbau, Beuth-Verlag, Berlin 2011

²⁹ Severins, Katrin; Behrouzi, Dennis, Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Recyclingbrechsande – Möglichkeiten und Grenzen künftiger Anwendung im Zement, Vortrag am 01.12.2020 „Runder Tisch Ressourceneffizienz im Bauwesen“, 14. Sitzung

³⁰ vgl. HeidelbergCement AG: BMBF HighTechMatBau Vorhaben „R-Beton“ – erste Ergebnisse und erste praktische Umsetzung im Großdemonstrator (2017), URL: https://www.heidelbergcement.de/system/files_force/assets/document/hightechmatbau-ressourcenschonender-beton-rezykliertes-gesteinskoernung-rc-gesteinskoernung-forschungsprojekt-r-beton-mlt29-2017.pdf?download=1 (24.11.2020)

Innenbauteilen nachweislich möglich ist und auch Außenbauteile des Hochbaus scheinen denkbar zu sein.³¹

Nach REFORMAT³² konnte anhand von Untersuchungen zur Mahlung von Altbetonbrechsand und Wiederverwertung als Substitut im Zement (Kompositzement mit 20 M.-% Altbetonbrechsand) zur Herstellung von Beton, eine signifikant erhöhte Druckfestigkeit nach 28 Tagen erreicht werden im Vergleich zu Betonrezepturen mit Kompositzement mit 20 M.-% inerten Quarzsandmehl (vgl. Abbildung 2.2). Die Rezepturen mit substituierten Brechsand im Zementgehalt erreichten sogar annähernd die Druckfestigkeit eines Referenzbetons mit 100 % CEM I 42,5 R.



Abkürzungen: ABBS - Altbetonbrechsand, KM - Kugelmühle, RWKM - Rührwerkskugelmühle, m - Mahlung auf mittlere Feinheit, QS-Quarzsand

Abbildung 2.2: Druckfestigkeitsentwicklungen von Versuchsbetonen mit Altbetonbrechsand [aus REFORMAT³³]

³¹ VDZ. Verein Deutscher Zementwerke e.V.: *Brechsand als Zementhauptbestandteil-Leitlinien künftiger Anwendung im Zement und Beton*, in: VDZ-Information Betontechnik, 2019, S. 9

³² Reformat, Martin (Dissertation): *Zementmahlung – Untersuchungen zum Zusammenhang von Mahlaggregat und Materialeigenschaften*, Bauhaus-Universität Weimar, 2020

³³ Reformat, Martin (Dissertation): *Zementmahlung – Untersuchungen zum Zusammenhang von Mahlaggregat und Materialeigenschaften*, Bauhaus-Universität Weimar, 2020, Abbildung 6.22, S. 167

3 Anwendung von Spritzbeton/-mörtel in der Praxis

Spritzbeton ist ein Hochleistungsprodukt, der mit hoher Geschwindigkeit (Beschleunigung durch Druckluft) direkt auf die vorgesehene Fläche aufgespritzt und durch den Aufprall verdichtet wird.³⁴ Spritzbeton ist also durch seine besondere Art der Betonverarbeitung resp. durch das Betonverfahren gekennzeichnet. Wesentlich ist, dass u.a. konstruktive Stabilisierungen und Sicherungen von Bauteilen ohne Schalungen realisiert werden können. Weitere Vorteile sind:

- die Spritzbetonapplikation ist in allen Richtungen (horizontal, vertikal) infolge des sofortigen Haftverbundes möglich und durch das Eigengewicht selbsttragend
- der hohe Haftverbund am Untergrund (eben oder uneben) aufgrund der hohen Aufprallgeschwindigkeit und Verdichtung
- die Ausführungen in flexibler Schichtstärke je nach bautechnischen oder gestalterischen Bedingungen
- eine schnelle Schalentragswirkung; erreichbar durch die schnelle Abbindezeit
- Beimischungen von Stahl- oder Kunststofffasersätze sind möglich.

Der Beton kann entweder als Trocken- oder Nassgemisch mittels Pumpentechnik und Druckluft zur gewünschten Einbaustelle transportiert werden. Mit Hilfe von Spritzbetonbeschleunigern, also Zusatzmitteln, die zur üblichen Mischung aus Gesteinskörnung, Zement und Wasser hinzugefügt werden, kann eine schnelle Frühfestigkeit nach dem Aufprall erreicht werden. Die normativen Vorgaben, Verfahren und Einsatzgebiete werden in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert.

Trocken- und Nassspritzverfahren benötigen für das Betongemisch unterschiedliche Ausgangsformen. Beim Nassspritzverfahren kann frischer Transportbeton direkt zur Anwendung kommen oder eine Nassbetonmischung kann vor Ort aus Silozement oder unter Verwendung von Sackzement hergestellt werden; beim Trockenspritzverfahren wird hingegen ausschließlich Silozement oder Sackzement verwendet.

Im Jahr 2020 wurden insgesamt ~ 29,0 Mio. Tonnen Zement im Inland verbraucht.³⁵ Bei der Bereitstellung von Zement für das Jahr 2020 wird nach folgenden Verwendungsarten und Baubereichen unterschieden:

- Transportbetonhersteller (16,18 Mio. t; 55,8 %),
- Beton-Bauteilhersteller (6,35 Mio. t; 21,9 %),
- sonstigen Silozement (4,55 Mio. t; 15,7 %) und
- Sackzement (1,91 Mio. t; 6,6 %).

³⁴vgl. DIN EN 14487-1: 2006-03 Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen, Konformität; Deutsche Fassung EN 14487-1:2005, Pkt. 3.2.7

³⁵VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2021/2022, Berlin 2021, S. 32 ff.

Eine quantitative/zahlenmäßige Aussage/Angabe über den Markt- bzw. Verwendungsanteil von Spritzbeton - gemessen an der Gesamtmenge des Zement- bzw. Betonverbrauchs in Deutschland - ist statistisch nicht erfasst.

Anhand von groben Schätzungen und Aussagen aus verschiedenen Literaturquellen^{36,37}, sowie Einschätzungen des VDZ³⁸ könnte der Anteil von Trockenspritzbeton und -mörtel an der Gesamtbetonproduktion zwischen 0,5 %³⁹ und 1,8 %⁴⁰ liegen.

Der hier vorgelegte Forschungsbericht behandelt den Trockenspritzbeton und -mörtel. Hintergrund ist, dass die entwickelten Rezepturen in dem Unternehmen „build a rock GmbH“ aus Cottbus, das über eine solche technische Ausrüstung verfügt, unter praktischen Bedingungen erprobt werden konnten. Spritzbetonarbeiten zählen zum Portfolio des Leistungsangebots des genannten Unternehmens.

3.1 Normative Vorgaben und Anforderungen zur Herstellung von Spritzbeton(-mörtel)

Spritzbeton ist ein Beton, der nach den gängigen normativen Regelungen der DIN EN 206-1 klassifiziert wird (Konsistenz, Expositionsklassen, Druckfestigkeit). Dementsprechend gelten für die Eigenschaften, Herstellung, Anforderungen und Konformität von Spritzbeton alle im vorliegenden Bericht in Kapitel 2.1 aufgeführten Normen und Richtlinien.

Für Spritzmörtel (Zementmörtel mit Gesteinskörnung (GK) für Beton bis höchstens 4 mm⁴¹) gilt auch die Norm 18551, wenn dieser wie Spritzbeton nach DIN EN 14487-1 in Verbindung mit DIN 18551 hergestellt, überwacht und verarbeitet und zum Oberflächenausgleich oder zur Oberflächenglättung eingesetzt wird.⁴²

Die DIN EN 14487:2006-03 Teil 1 enthält weitere Anforderungen an den Spritzbeton⁴³. Beispielsweise ist zu beachten: „Die Zusammensetzung von Beton bezieht sich auf Beton nach dem

³⁶ Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 9 (2006), S. 728; „[...] Auf die Herstellung von Mörtel, Putz, Estrich und bauchemischen Produkten entfielen 1,5 Mio. Tonnen (5,6%). Die übrigen fast 7% kamen für diverse andere Zwecke zum Einsatz, wie Spritzbeton, Bodenverfestigung, Bergbauprodukte etc.“

³⁷ Verband der Europäischen Bauindustrie; Ein Verteilungsverhältnis bei der Anwendung von Nass- und Trocken-Spritzbeton wird gemäß den Angaben des Verbandes der Europäischen Bauindustrie mit 3 zu 1 angegeben (75 % Nassspritzen, 25 % Trockenspritzen) <https://straitresearch.com/report/europe-shotcretesprayed-cement-market/>

³⁸ Verein Deutscher Zementwerke e.V.; Auskunft von der Abteilung Statistik, Rohstoffe, Bauwirtschaft

³⁹ Laut Expertenschätzung des VDZs lag der Zementverbrauch für Spritzbeton bei knapp 0,6 Mio. t „vor einigen Jahren“; dies entspricht bei 29,0 Mio. t Zementherstellung ca. 2 %, wovon ca. 25 % für die Trockenspritzbeton angesetzt werden, d.h. 0,5 %

⁴⁰ Geschätzte obere Grenze aus Angaben gemäß Fußnoten 36 und 37; (7 % * 25 % = 1,8 %)

⁴¹ DIN 18551: 2014 - 08 Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen, Pkt. 3.2.10

⁴² DIN 18551: 2014 - 08 Spritzbeton - Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen, S. 4 bzw. Kap. 1

⁴³ Auf Teil 2 „Ausführung“ der DIN EN 14487, wird in Kapitel 4.5.1 des hier vorgelegten Berichtes eingegangen.

*Spritzen und muss den Einfluss von Wasserzugabe infolge des Spritzvorganges sowie den Einfluss des Rückpralls berücksichtigen.*⁴⁴

Die nachfolgend wiedergegebene Tabelle 3.1 aus *DIN EN 14487-1:2006* fasst die **Anforderungen an die Ausgangsstoffe** für Spritzbeton zusammen, die zu erfüllen sind.

Tabelle 3.1: Anforderungen an Ausgangsstoffe nach *DIN EN 14487-1:2006*⁴⁵

Ausgangsstoff	Anforderungen
Zement	Der Zement muss EN 197-1 entsprechen.
Gesteinskörnungen	Die Gesteinskörnung muss EN 12620 oder EN 13055-1 entsprechen.
Zugabewasser	Zugabewasser muss EN 1008 entsprechen.
Zusatzmittel	Zusatzmittel müssen EN 934-2 und/oder EN 934-5 und EN 934-6 entsprechen.
Zusatzstoffe (einschließlich mineralischer Füllstoffe und Pigmente)	Zusatzstoffe müssen den Anforderungen nach EN 206-1 entsprechen.
Polymermodifizierter Spritzbeton	Polymermodifizierter Spritzbeton für die Instandsetzung muss EN 1504-3 entsprechen.
Fasern	Fasern müssen prEN 14889-1 und prEN 14889-2 entsprechen.

Die DIN 18551 Spritzbeton enthält Festlegungen, die für die Anwendung der DIN EN 14487 – Reihe in Deutschland erforderlich sind. Die Anforderungen und Prüfverfahren an Spritzbeton sind in DIN EN 14471-1 aufgeführt. Die Normenreihe DIN EN 14488, welche auch für faser- bzw. polymermodifizierten Spritzbeton gilt, enthält Vorgaben zur Durchführung aller relevanten Prüfungen für Spritzbeton.

Für die Konformitätskontrollen von Spritzbeton werden in DIN EN 14487-1 im Pkt. 7.2 drei Überwachungskategorien festgelegt. Mit steigender numerischer Zahl nimmt das Anforderungsniveau bzw. die Anzahl der Eignungsprüfungen zu.

Je nach Art der Spritzbetonarbeiten

- Instandhaltung und Verstärkung,
- freistehende Konstruktionen oder
- zur Bodenverfestigung

und der festgelegten Überwachungskategorie (1 bis 3) müssen entsprechende Prüfungen im Zuge der Eignungsprüfung für den Spritzbeton durchgeführt werden. Eine sehr gute Übersicht gibt Tabelle 9 in DIN EN 144487-1:2006-03.

Für das im Zuge dieses Berichts gewählte Ausführungsbeispiel „Kletterfelsen“ trifft die Art

⁴⁴ DIN EN 14487-1: 2006 – 03 Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität, Pkt. 5.2.1

⁴⁵ Tabelle aus EN 14487-1:2006 - 03, Pkt. 5.1

„freistehende Konstruktionen“ der Überwachungskategorie 3⁴⁶ zu. Hiernach sind folgende Parameter zu prüfen: Konsistenz der Nassmischung, Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit. Die Mindesthäufigkeit der Prüfungsdurchführungen ist der Tabelle 12 aus DIN EN 14487-1 entnehmbar.

Hinsichtlich der Kontrolle der Festbetoneigenschaften sind zudem die Rohdichte des Festbetons, der Wassereindringwiderstand, der Frostwiderstand und die Haftfestigkeit zu prüfen (vgl. Tabelle 12 – Kontrolle der Spritzbetoneigenschaften in DIN EN 14487-1:2006-03).

3.2 Erläuterung der Trocken- und Nassspritzverfahrenstechnik

Die Spritzbetontechnik wird – wie o.a. - in zwei Verfahren unterteilt, welche jeweils abhängig von der Art der Ausgangsmischung – als Trockenspritzverfahren oder Nassspritzverfahren bezeichnet werden.

Das Trockenspritzverfahren ist charakterisiert durch das trockene Zuführen des aus Zement, Zuschlagstoff (Sand und/oder Kies) und ggf. pulverförmigen Zusätzen bestehenden Bereitstellungsgemisches zur Förderleitung. Dies erfolgt bspw. durch ventilgesteuerte Schleusenkammern, rotierende Behältertaschen oder Förderschnecken. Die Förderung durch die Schlauch- oder Rohrleitung zur Spritzdüse erfolgt dann pneumatisch im sog. Dünnstrom. Kurz vor Austritt des Trockengemisches wird das Zugabewasser ggf. in Verbindung mit flüssigen Betonzusatzmitteln dosiert beigemischt. Es entsteht die Benetzung des Trockengemisches durch das Zugabewasser (siehe Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Darstellung Trockenspritzverfahren⁴⁷

⁴⁶ „Konstruktionen mit hohem Schwierigkeitsgrad hinsichtlich der Tragwerksbemessung und mit hohem Versagensrisiko der Tragsicherheit oder der Gebrauchstauglichkeit sowie Konstruktionen mit hohen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und hohem Risiko für Nutzer und Einwohner wie [...] hohe Felsimitationen mit Publikumsverkehr; hohe Kletterwände.“ (aus DIN EN 14487-1:2006, Tabelle A.4, S. 34)

⁴⁷ nach Ruffert, Günther., et. al: Spritzbeton, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995, S. 25, Bild 1.11

Im Unterschied zum Trockenspritzverfahren ist das Zugabewasser beim Nassspritzverfahren bereits im Ausgangsgemisch des Spritzguts enthalten, d.h. Frischbeton wird direkt zugeführt. Der Beton wird entweder mittels Druckluft (Dünnstromförderung; s. Abbildung 3.2 oben) oder einer Betonpumpe (Dichtstromförderung; s. Abbildung 3.2 unten) über eine Rohr- oder Schlauchleitung zur Spritzdüse befördert.

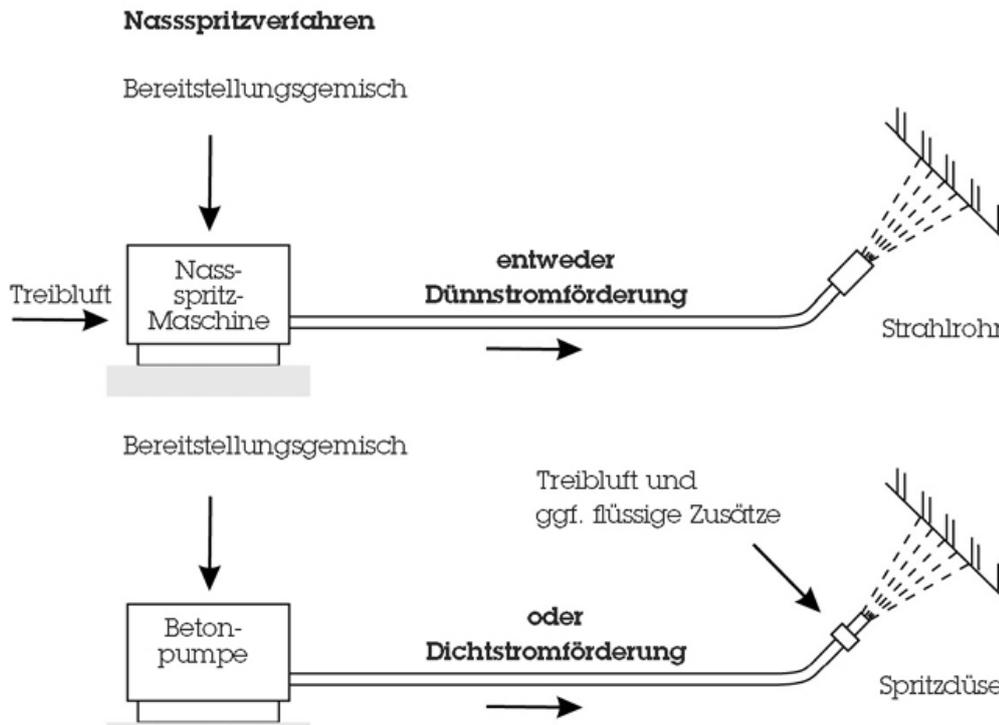


Abbildung 3.2: Darstellung Nassspritzverfahren⁴⁸

In der nachstehenden Tabelle 3.2 werden die wichtigsten Vor- und Nachteile der beiden Verfahren gegenübergestellt. Trotz des hohen Bereitstellungs- und Investitionsaufwandes, wird zu 75 % das Nassspritzverfahren und nur bei 25 % der Spritzbetonanwendungen das Trockenspritzverfahren angewandt.⁴⁹ Dies liegt vor allem an den Vorteilen des Nassspritzverfahrens bei großflächigen Anwendungen bzw. Bauvorhaben durch die vergleichsweise hohe Auftragsleistung. Die gleichbleibende Betonqualität und der geringe Rückprall sind in der Regel für die Anwendung des Nassspritzverfahrens ausschlaggebend.

⁴⁸ nach Ruffert, Günther., et. al: Spritzbeton, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995, S. 25, Bild 1.11

⁴⁹ „Europe Shotcrete/Sprayed Cement Market Study, Forecast & Opportunities“; abrufbar unter:
<https://straitresearch.com/report/europe-shotcretesprayed-cement-market/>

Tabelle 3.2: Vor- und Nachteile des Trocken- und Nassspritzverfahrens⁵⁰

Trockenspritzverfahren	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - flexible Einsatzmöglichkeit, z.B. für Betonfahrzeuge schwer/nicht zugängliche Einbauorte - große Reichweiten zwischen Trockenspritzmaschine und Spritzdüse (bis 1.400 m; z.B. bei Fellsicherung - sowohl horizontal als auch vertikal) möglich - weniger Reinigungsaufwand der Geräte und Schläuche/Rohre - günstige und geringe Baustelleneinrichtung - leichtere Schläuche und Handhabung für den/die Spritzbetonführer/-in - Arbeitsunterbrechungen und längere Verarbeitungszeit durch Vorhalten des Bereitstellungsgemisches möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - es kann zu störender Staubentwicklung beim Auftragen kommen - hohe Rückprallmenge des Spritzguts (20 bis 25 M.-%); Rückprall kann für den Spritzvorgang nicht wiederverwendet werden - stärkere Abnutzungserscheinungen bzw. Verschleiß der Schläuche und Geräte - Überwachung des maximalen Feuchtegehalts der Gesteinskörnung nötig; Gefahr der Klumpenbildung
Nassspritzverfahren	
Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> - verminderte Staubentwicklung beim Auftragen - hohe Auftragsleistung, bis zu 25 m³/h - konstanter Wassergehalt durch definierten w/z-Wert; konstante Betonqualität - geringe Rückprallmengen (10 bis 20 M.-%) 	<ul style="list-style-type: none"> - keine längeren Arbeitsunterbrechungen - hoher Investitions- und Baustelleneinrichtungsaufwand - hohes Gewicht der Schläuche; Einsatz von Maschinen/-Robotertechnik - erhöhter Reinigungsaufwand - Notwendigkeit einer exakten Bestimmung der Verbrauchsmenge, um Abfall bzw. Überproduktion zu vermeiden - geringe Flexibilität durch kurze Verarbeitungszeiten der fertigen Mischung

Auftragsleistung, Verdichtung und Rückprallmengen werden bei manueller Auftragung durch die Fachkompetenz des Düsenführers⁵¹ maßgeblich beeinflusst. Besonders beim Trockenspritzverfahren ist die Betonqualität und somit die Dauerhaftigkeit abhängig vom ausgebildeten Spritzdüsenführer, da dieser die Wassermenge, welche erst separat an der Spritzdüse dosiert wird (vgl. Abbildung 3.1). Eine Anpassung der Wassermenge kann z.B.

⁵⁰ Maidl, Bernhard.: Handbuch für Spritzbeton, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1992, S. 55-62

⁵¹ mit Befähigungsnachweis SPCC - Düsenführerschein nach ZTV-SIB 90 Trocken- und Nassspritzverfahren

notwendig werden, sobald der Spritzbeton „über Kopf“ aufgetragen werden muss oder sich die Witterungsverhältnisse bei Außenbaustellen maßgeblich verändern.

3.3 Einsatzbereiche

Spritzbeton findet überall dort Anwendung, wo es technisch nicht möglich oder kompliziert und wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, herkömmliche Verfahren des Betonverbaus anzuwenden. Meist sind dies Bereiche im Tunnel- und Tiefbau, zur Gelände- und Felskonsolidierung (in Hanglagen), bei Instandsetzungsmaßnahmen zur Reparatur und Verstärkung von Betonbauteilen als auch im Bereich des gestalterischen Freizeit-, Garten- und Landschaftsbaus sowie Sportkletteranlagen. Die nachfolgende Aufstellung beruht auf den Angaben der Firma Sika Schweiz AG⁵² und zeigt die unterschiedlichen weit verbreiteten Anwendungs- und Einsatzbereiche von Spritzbeton noch detaillierter auf:

- Tunnelbau und Kavernenbau (u.a. Ausbruchssicherung)
- Sicherung im Minen- und Stollenbau
- Betoninstandsetzung (Betonersatz und Betonverstärkung)
- Hangsicherung
- Abdichtungsarbeiten
- Baugrubensicherung
- Restaurierung historischer Bauwerke (Blocksteinkonstruktionen)
- Schutzverkleidung
- gestalterische Anwendungen (Kletter- und Boulderfelsen, Landschaftsbauegebilde)
- tragende leichte Spezialkonstruktionen
- Verschleisschichten
- Swimmingpool-Bau

Tabelle 3.3: Anwendungsbereiche für Spritzbeton mit entsprechender Expositions- und Druckfestigkeitsklasse⁵³

Empfohlene Anwendungsbereiche	Expositionsklasse	Druckfestigkeitsklasse
Füllen von Rissen und Hohlräumen	X0	C16/20
Sofortige Unterstützung	X0	C25/30
Weitere Schichten des temporären Auftrags, bzw. erste Schicht, wenn keine besonderen Anforderungen gestellt sind	XA1, XD1	C25/30
Temporäre Unterstützung für Einzelschalenausbau, verstärkt	XA1, XD1	C30/37
	XA2, XD1	C30/37
Ausbau für Einzelschalenausbau, verstärkt oder unverstärkt	XA1, XD1, XC3, XF3	C30/37
	XA1, XD3, XC3, XF4	C35/45

⁵² Sika Spritzbeton Handbuch, Sika Schweiz AG, 4. Ausgabe 02/2012, S.10

⁵³ Ebd. S.37



Foto 3.1: Spritzbetonapplikation im Zuge eines Grubenbaus [Bildnachweis: © Raimond Spekking / CC BY-SA 4.0 (via Wikimedia Commons)]



Foto 3.2: Maschinelle Spritzbetontechnik im Tunnelbau [Bildnachweis: <https://azichem.network/universo-azichem/fluid-spritz-il-nostro-accelerante-liquido-per-spritz-beton/>]

Die Fotos Foto 3.1 sowie Foto 3.2 zeigen die zwei gängigsten Anwendungsfelder der Spritzbetonapplikation. Auf dem oberen Foto ist die Verstärkung bzw. die Ausbildung einer Grubenwand im Trockenspritzverfahren zu sehen. Aufgrund der Staubbildung und der in Tabelle 3.2 genannten Vorteile wird im Tunnelbau mit maschineller Technik das Nassspritzverfahren angewandt.

4 Eignungsuntersuchung zum Einsatz von Recycling-Brechsanden zur Herstellung von Spritzbeton/-mörtel

Wie eingangs erwähnt, ist die feine Fraktion der rezyklierten Gesteinskörnung (Körnung 0/2; kurz: RC-Brechsande) für die derzeitige Betonherstellung ausgenommen. Dies gilt gleichfalls für die Spritzbeton-/mörtelherstellung. Um zu überprüfen und aufzuzeigen, ob RC-Brechsande die Mindestanforderungen der bautechnischen sowie umweltverträglichen Eigenschaften für rezyklierte GK erfüllen, wurden die uns zur Verfügung gestellten RC-GK-Proben vom Typ 1 analysiert.

4.1 Herkunft und Klassifizierung der untersuchten Brechsande

Die für dieses Forschungsprojekt verwendete rezyklierte Gesteinskörnungen der Korngrößen 0/4 und 0/8 und der darin enthaltenen relevanten Fraktion der Brechsande < 2 mm, hergestellt aus Betonbruch, wurden von der Firma HEIM Deponie und Recycling GmbH, Berlin, zur Verfügung gestellt. Eine Menge von ca. 4 m³ wurde für die Untersuchungen bereitgestellt und zum Zwischenlager (Foto 4.1) auf das Gelände der Mattig & Lindner GmbH bei Forst (Lausitz) geliefert.⁵⁴ Aus dem Gesamtaufwerk des Liefertyps 1⁵⁵, mit teils Überkorngrößen bis 16 mm wurde zunächst in einer mobilen Siebanlage⁵⁶ (Foto 4.2), die für die Laborprüfungen und praktischen Spritzversuche benötigten rezyklierten Gesteinskörnungen der Kornungsgröße 0/4 sowie 0/8 hergestellt.



Foto 4.1: Haufwerk RC-GK 0/16; Zwischenlager in Forst



Foto 4.2: Siebvorgang der RC-GK zu Körnung 0/8

⁵⁴ Die Fa. Mattig & Lindner hat den Transport der rezyklierten Gesteinskörnung von Berlin nach Forst übernommen

⁵⁵ Gemäß DIN 4226-101:2017-08: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620-Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Tabelle 1 – Stoffliche Zusammensetzung der Typen rezyklierter Gesteinskörnungen

⁵⁶ Verwendet wurde eine Doppeltrommelsiebanlage der Firma Zemmler, Typ MULTI SCREEN MS 1600, mit einer Siebleistung von 30m³/h

Im Zuge unserer wissenschaftlichen Begleitung zur erstmaligen Anwendung von Recycling-Beton beim Bau des Forschungs- und Laborgebäudes der Humboldt Universität zu Berlin⁵⁷ wurde der Stoffstrom der erzeugten Körnungen aus Betonbruch auf der Recycling-Anlage der Fa. HEIM analysiert. Der Stofffluss ist vereinfacht schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt. Die feine Fraktion wird aus dem vorzerkleinerten Betonbruch abgesiebt, um den Verschleiß der Brecher auf ein Minimum zu reduzieren. Gebrochen wird der Betonbruch zweistufig (im Schlagwalzenbrecher und in der Prallmühle). Gesiebt wurde in die Fraktionen 0/8, 8/16, 16/32 und 32/45. **Aus diesem Stoffstrom geht hervor, dass bei 2 t Input Betonbruch ca. 1 t RC-Gesteinskörnung 0/8 anfallen** (vgl. Abbildung 4.1).

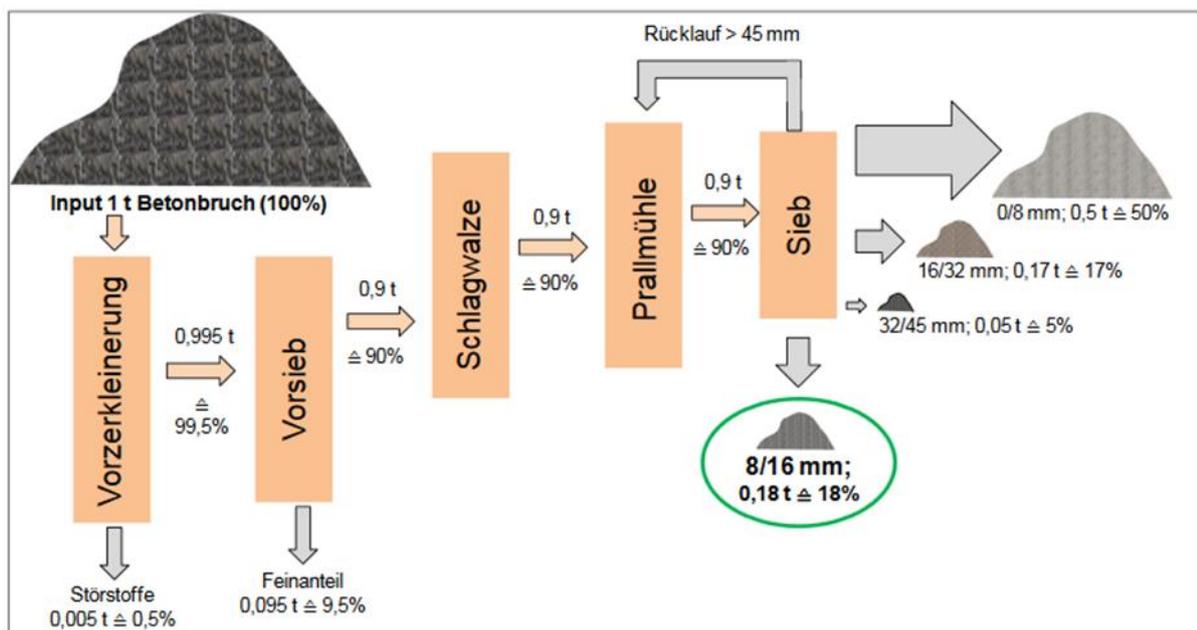


Abbildung 4.1: Stoffstrom der Aufbereitung im Trockenverfahren der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH⁵⁸

Um festzustellen, welche Korngrößenverteilung die abgesiebte Fraktion 0/8 des Gesamthaufwerkes aufweist, erfolgte die Probenahme nach LAGA PN 98⁵⁹. Gemäß DIN EN 933-1⁶⁰ wurde eine Trockensiebung durchgeführt.

Das Verhältnis von GK 0/2 zu GK 2/8 belief sich nach ersten eigenen Laboruntersuchungen auf 54 M.-% zu 46 M.-%. Dieses Ergebnis entspricht in etwa der Aufteilung der Regelsieblinie B8 mit dem Größtkorn von 8 mm laut DIN 1045-2 (siehe Abbildung 4.2, grüne Umrandung).

⁵⁷ METTKE, A. et al., Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin, in Berlin-Mitte, Hrsg. Senatverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Referat Abfallwirtschaft, Berlin, 2015

⁵⁸ Ebd., S. 40

⁵⁹ LAGA PN 98 Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; Hrsg.), 2001

⁶⁰ DIN EN 933-1:2012-03 - Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren

Um ermitteln zu können, wie hoch der Anteil bzw. die Menge der Fraktion 0/4 an der Gesamt-Outputmenge der Größe 0/8 ist, wurde anhand der Regelsieblinie 0/8 nach Abzug der Korngruppen 4/8 abgelesen, dass dieser bei ca. 75 M.-% (vgl. Abbildung 4.2, rote Umrandung) und die Körnung 0/2 57 M.-% beträgt.

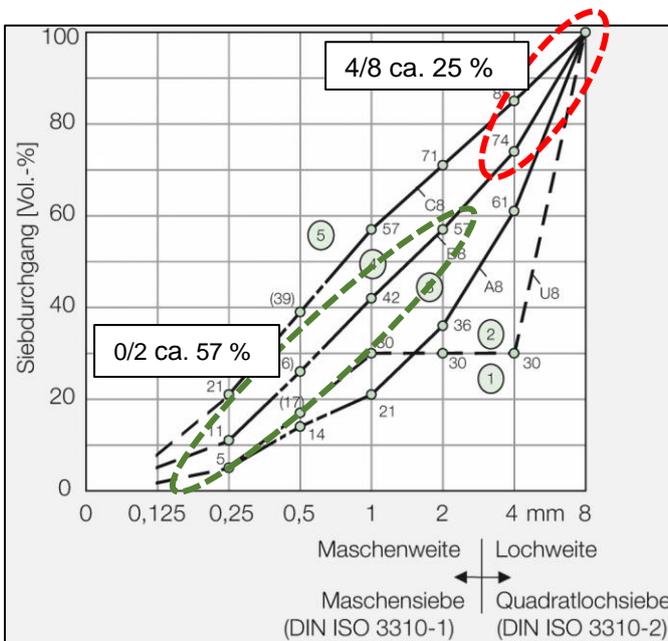


Abbildung 4.2: Aufteilung der Regelsieblinie B8

Wird von einer annähernd gleichen gravimetrischen und volumetrischen Sieblinienkurve ausgegangen, so entsteht bei einem Input von 2 t Betonbruch ein Output von 750 kg der Körnung 0/4. Folglich steht dem Output einer Tonne RC-GK 0/4 ein Betonbruch-Input von 2,67 t gegenüber:

$$\frac{2 \text{ t Input Betonbruch}}{0,75 \text{ t Output RC-GK 0/4}} = 2,67 \frac{\text{t Input Betonbruch}}{\text{t RC GK 0/4 Output}}$$

Analog entstehen schlussendlich bei der Herstellung von verwertbaren RC-Baustoffen ca. 30 M.-%⁶¹ Material der Korngröße 0/2 bei 1 t Betonbruch-Input.

Auf Basis der nachfolgenden Untersuchungen und Ergebnisse soll gezeigt werden, dass dieser hohe Anteil an Brechsanden < 2 mm für die Betonherstellung mit den RC-Gesteinskörnungen 0/4 sowie 0/8 insbesondere in der Spritzbeton/-mörteltechnik in Betracht gezogen werden kann.

⁶¹ Berechnung: 57 M.-% [Anteil Körnung 0/2 an Sieblinie 0/8] * 50 M.-% [Output Körnung 0/8 bei 1 t Input Betonbruch] = ca. 29 M.-%

4.2 Untersuchung bautechnischer Eigenschaften von RC-Brechsand

Gesteinskörnungen für den praktischen Einsatz im Beton bzw. Mörtel müssen grundlegende Anforderungen vorweisen können. Sowohl natürliche als auch rezyklierte Gesteinskörnungen werden dabei unter anderem auf geometrische, physikalische sowie chemische Eigenschaften geprüft. Je sortenreiner die RC-GK beim Input, desto höher ist die Qualität der Output-GK.

Das aus der Aufbereitung der *Heim Deponie GmbH Berlin* zur Verfügung gestellte Haufwerk 0/8 wurde bereits im Zuge der werkseigenen Qualitätskontrolle charakterisiert und diversen Laborprüfungen unterzogen. Eigens durchgeführte sowie durch externe Labore bestätigte Untersuchungen bzw. Prüfberichte werden in den folgenden Abschnitten behandelt und ausgewertet.

4.2.1 Eingangskontrolle RC-Brechsand 0/8 nach DIN 4226-102⁶²

Die stoffliche Zusammensetzung als auch die Höchstwerte von Eluat- und Feststoffparametern werden in DIN 4226-101⁶³ zusammengefasst, für die Kategorisierung der Bestandteile sowie die Klassifizierung des RC-Brechsandes dient die DIN EN 12620 (vgl. / siehe Tabelle 4.1). Die stoffliche Zusammensetzung muss nach DIN EN 933-11 bestimmt werden.

Tabelle 4.1: Zuordnung des untersuchten RC-Brechsandes gemäß Tabelle A.1 DIN 4226-101:2017-08 (Auszug)

Rohmaterialien	Abfallschlüssel nach AVV	Beschreibung nach AVV	Resultierender Bestandteil nach DIN EN 12620: 2008-07
Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	17 01 01	Beton	Rc
Ungebundene Gesteinskörnung, Natursteine, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung	17 05 04	Boden und Steine; mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 05 03 fallen	Ru

Die untersuchte und in späteren Feldversuchen verwendete RC-GK (siehe Foto 4.3) wurde der Eingangskontrolle gemäß DIN 4226-102 unterzogen (vgl. Tabelle 4.2). Aufgrund der ungeschützten bzw. freien Lagerung des Gesamtaufwerks, wurden minimale Verunreinigungen durch Blätter und anderem organischen Material festgestellt. Zudem ist aufgefallen, dass aufgrund der Lagerungsbedingungen und des noch reaktiven Vermögens der Zementsteinmatrix größere Verklumpungen Bestandteil waren (siehe Foto 4.4). Die stoffliche Zusammensetzung des

⁶² DIN 4226-102: 2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigenen Produktionskontrolle, Anhang A A.2 Eingangskontrolle

⁶³ DIN 4226-101: 2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte Substanzen Anhang A, Tabelle A.1 Zuordnung der Rohmaterialien für rezyklierte Gesteinskörnungen

Haufwerkes entspricht den Anforderungen nach DIN EN 12620:2008-07 für eine Kategorisierung in Liefertyp 1 (vgl. Untersuchungsergebnisse in Tabelle 4.3).



Foto 4.3: Probennahme des Gesamthaufwerks [Foto: Dell]



Foto 4.4: Teilhydratisierte RC-GK [Foto: Fischer]

Tabelle 4.2: Eingangskontrolle für RC-GK 0/8 nach DIN 4226-102

Kategorie	Beschreibung
Art des Materials	Rc+Ru \geq 93 % (Rcu90), Probe besteht überwiegend aus aufbereitetem Beton, der Gesteinskörnung des Betons und ungebundene Natursteine
Herkunft	Recyclingunternehmen Heim Deponie & Recycling GmbH in Berlin, Beton aus Berlin und Umgebung
Transporteure	Fa, Heim Deponie & Recycling GmbH
Verunreinigungen	Organisches Material: Blätter und Wurzeln, wahrscheinlich durch die ungeschützte Lagerung
Angaben zur vorherigen Nutzung	Hochbau

Tabelle 4.3: Untersuchungsergebnis der stofflichen Kennzeichnung der RC-GK 8/16 [Prüfbericht Bolab 2016]⁶⁴

Bestandteile	Soll	Ist	Ergebnis
	Gesteinskörnung Typ 1	Zusammensetzung RC-GK	
Rc+Ru	\geq 90 [M.-%]	93	✓
Rb	\leq 10 [M.-%]	6,2	✓
Ra	\leq 1 [M.-%]	0,8	✓
X + Rg	\leq 1 [M.-%]	0	✓
FL	\leq 2 [cm ³ /kg]	0	✓

Die Abbildung 4.3 veranschaulicht nochmals grafisch die aus Tabelle 4.3 entnommenen Ist-Werte.

⁶⁴ Vgl. Prüfbericht 1 im Anhang 1

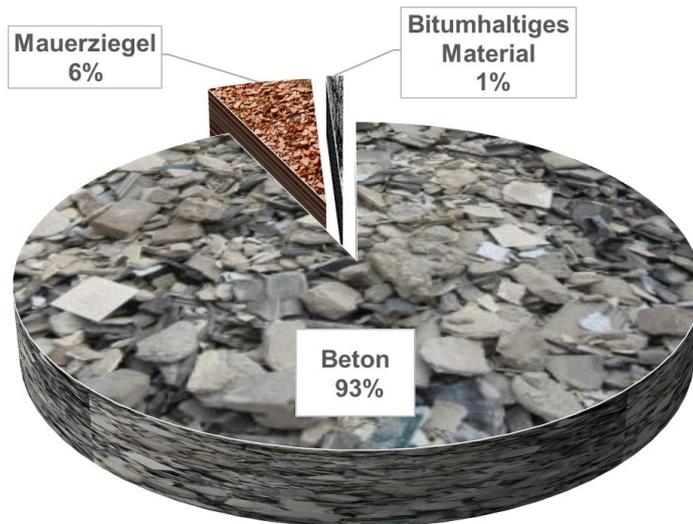


Abbildung 4.3: Stoffliche Zusammensetzung des Ausgangsmaterials (grafische Darstellung)

4.2.2 Prüfung der Umweltverträglichkeit der RC-GK 0/8 und 0/2

Für die Prüfung der Inhaltsstoffe rezyklierter Gesteinskörnungen (geregelt gefährliche Substanzen) ist die DIN 4226-101 zugrunde zu legen. Es gelten die in der Tabelle 2 der DIN 4226-101 angegebenen Höchstwerte für Eluat- und Feststoffparameter. In nachstehender Tabelle 4.4 sind die Analyseergebnisse der Körnung 0/8 den Höchstwerten nach DIN 4226-101 gegenübergestellt. Die letzte Spalte „Ergebnisse“ zeigt, dass alle vorgegebenen Werte der zu prüfenden Parameter eingehalten bzw. unterschritten werden. Die in der Tabelle 4.4 vom Labor zusätzlich geprüften Feststoffeigenschaften an Schwermetallen sind lediglich mit aufgeführt, haben jedoch keine Relevanz für den Einsatz von RC-GK im Beton.

Tabelle 4.4: Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung RC-GK 0/8 [Prüflabor BOLAB Analytik, Nov. 2017]⁶⁵

Parameter	Einheit	Höchstwert nach DIN 4226-101	Analyseverfahren	Ist-Wert	Ergebnisse
Eluat					
pH-Wert	-	12,5 ^a	DIN EN ISO 10523	12,1	✓
Elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	3000 ^a	DIN EN 27888	672 ⁶⁶	✓
Phenolindex	µg/l	100	DIN 38409-16 DIN EN ISO 14402	< 0,01	✓
Chlorid	mg/l	150	DIN EN ISO 10304-1	5,9	✓
Sulfat	mg/l	600		7,4	✓
Arsen	µg/l	50	DIN EN ISO 17294-2	< 10	✓
Blei	µg/l	100		< 10	✓

⁶⁵ Vgl. Prüfbericht 2 Anhang 2

⁶⁶ bezogen auf elektrische Leitfähigkeit nach CO₂-Begasung

Parameter	Einheit	Höchstwert nach DIN 4226-101	Analyseverfahren	Ist-Wert	Ergebnisse
Eluat					
Cadmium	µg/l	5	DIN ISO 22036	< 0,5	✓
Chrom, gesamt	µg/l	100		< 3,0	✓
Kupfer	µg/l	200		6,0	✓
Nickel	mg/l	100		< 2,0	✓
Quecksilber	µg/l	2	DIN EN 1483:2007-07, Abschnitte 4 und 5	< 0,2	✓
Zink	µg/l	400	DIN EN ISO 17294-2 DIN ISO 22036	6,0	✓
Feststoff					
EOX	mg/kg	10	DIN 38414-17	< 0,5	✓
Mineralöl-Kohlenwasserstoffe (C ₁₀ -C ₄₀)	mg/kg	1.000 ^b	DIN EN 14039 in Verbindung mit c)	< 7,0	✓
Σ PAK nach EPA	mg/kg	25	DIN EN 15527 DIN ISO 18287, Verfahren A	0,383	✓
PCB	mg/kg	1	DIN 38414-20 DIN EN 15308	-	✓
Feststoff (zusätzlich geprüfte Parameter nach LAGA M20)					
Arsen	mg/kg	20	DIN EN 13657 (Extraktion im Königswasser)	3,2	✓
Blei	mg/kg	100		13	✓
Cadmium	mg/kg	0,6		0,42	✓
Chrom ges.	mg/kg	50		17	✓
Kupfer	mg/kg	40		14	✓
Nickel	mg/kg	40		6,5	✓
Quecksilber	mg/kg	0,3		<0,03	✓
Zink	mg/kg	120		31	✓
a) kein Ausschlusskriterium b) Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar. c) LAGA-Mitteilung 35:2009-12 Bestimmung des Gehaltes an Kohlenwasserstoffen in Abfällen – Untersuchungs- und Analysenstrategie (DIN 4226-102)					

Die RC-GK der Fraktion 0/2 wurde im Labor der M&S Umweltprojekt GmbH, Spremberg, untersucht. Die Ergebnisse sind nachstehender Tabelle 4.5 zu entnehmen. Auch die feine Fraktion erfüllt alle Anforderungen. Daher ist ihr Einsatz aus umweltverträglicher Sicht zur Herstellung von Beton bedenkenlos.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung RC-GK 0/2 [M&S Umweltprojekt GmbH, Nov. 2018]⁶⁷

Parameter	Einheit	Höchstwert nach DIN 4226-101	Ist-Wert	Ergebnisse
pH-Wert	-	12,5	11,0	✓
Elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	3000	595 ^{a)}	✓
Phenolindex	µg/l	100	< 10	✓
Chloride	mg/l	150	5,67	✓
Sulfate	mg/l	600	76	✓
Arsen	µg/l	50	< 5	✓
Blei	µg/l	100	< 20	✓
Cadmium	µg/l	5	< 2	✓
Chrom, gesamt	µg/l	100	< 10	✓
Kupfer	µg/l	200	< 10	✓
Nickel	mg/l	100	< 10	✓
Quecksilber	µg/l	2	< 0,2	✓
Zink	µg/l	400	< 6,0	✓
EOX	mg/kg	10	< 0,2	✓
Mineralöl-Kohlenwasserstoffe (C ₁₀ -C ₄₀)	mg/kg	1.000	82,9	✓
Σ PAK nach EPA	mg/kg	25	0,56	✓
PCB	mg/kg	1	< 0,02	✓
a) kein Ausschlusskriterium b) Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar. c) LAGA-Mitteilung 35:2009-12 Bestimmung des Gehaltes an Kohlenwasserstoffen in Abfällen – Untersuchungs- und Analysenstrategie (DIN 4226-102)				

4.2.3 Bautechnische Prüfungen der RC-GK 0/8 und Brechsand 0/2

Laboruntersuchungen zur Probe RC-GK 0/8 im Labor der M&S Umweltprojekt GmbH, Spremberg⁶⁸

Folgende Parameter wurden analysiert:

- Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme gemäß DIN EN 1097-6,
- Zementsteingehalt in Anlehnung an DIN 51170
- organische Stoffe, die das Erstarrungsverhalten von Beton verändern.

Die untersuchte Probe entstammt dem Haufwerk auf dem Gelände der Mattig & Lindner GmbH bei Forst (Lausitz), welche bereits in Abschnitt 4.1 klassifiziert wurde.

⁶⁷ Vgl. Prüfbericht 3 Anhang 3

⁶⁸ Im Prüfbericht wurde die Probenbezeichnung fälschlicherweise als RC 0/16 angegeben, aufgrund des geringen Überkornanteils der Korngruppe 0/8

Die scheinbare **Rohdichte beträgt i. M. 2,42 Mg/m³**; der Mittelwert für die **Wasseraufnahme nach 24 h 11,09 M-%**.

Aus den Prüfergebnissen zum **Zementsteingehalt** geht hervor, dass die untersuchte Probe zu **14,7 M-%** aus **Bindemittel** und zu **81,9 M-%** aus Zuschlägen (**Sand + Kies**) besteht.

Die Überprüfung auf organische Bestandteile (z.B. Humus) ergab ein negatives Testergebnis.

Laboruntersuchungen zur Probe RC-GK 0/2

Für die abgeseibte Fraktion 0/2 aus dem Gesamtaufwerk bzw. der RC-GK 0/8 wurde die M&S Umweltprojekt GmbH beauftragt, den Fließkoeffizienten gemäß TL-Gestein-StB 04 (Fassung 2007) und DIN EN 13043 zu bewerten. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 933-6. Die Ergebnisse sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 4.6: Ergebnisse und Bewertung des Fließkoeffizienten RC-GK 0/2 [M&S Umweltprojekt GmbH, Dez. 2018]⁶⁹

Lieferkörnung [mm]	Rohdichte ρ_P [Mg/m ³]	Fließkoeffizient E_{cs} [s]	Kategorie TL Gestein-StB E_{cs}	Kategorie DIN EN 13043 E_{cs}
0/2	2,61	35	E_{cs} 35	E_{cs} 35

Die Einstufung in die höhere Kategorie E_{cs} 35 nach DIN EN 13043 lässt erkennen, dass es sich um eine kantige Gesteinskörnung (in diesem Fall RC-Brechsand) handelt.⁷⁰ Meist führt dies zu einem vergrößerten Hohlraumgehalt und daraus resultierend zu einem erhöhten Bindemittelbedarf. Durch die Scharfkantigkeit und Verzahnung der Körner kann sich eine höhere Druck- und Zugfestigkeit entwickeln gegenüber runden Korngruppen. Die Verarbeitbarkeit als Frischmörtel, als auch Frischbeton mit Größtkorn $D=8\text{mm}$, nimmt hingegen ab. Bei der Anwendung als Trockenspritzmörtel-/beton ist dies aufgrund der Aufprallgeschwindigkeit und der damit verbundenen Verdichtung vernachlässigbar.

Weiterführende Untersuchungen zur Bestimmung der Oberfläche nach BET und Blaine anhand der RC-GK-Probe 0/2 wurden an der TU Dresden in Auftrag gegeben. Dabei wurde eine spezifische Oberfläche nach der BET-Analyse von 4,31 m²/g ermittelt. Ein Orientierungswert für die Mahlfeinheit (sog. Blaine-Wert) wurde mittels Laser-Granulometrie und einer Abstraktion von den erhaltenen Partikelgrößen auf die Kugeloberflächen ermittelt. Dieser Wert wird mit 132 cm²/g angegeben. Als Vergleich kommt REFORMAT⁷¹ zu der Auswertung, dass bei der zusätzlichen Aufbereitung von Betonbrechsand der Fraktion 0/2 durch unterschiedliche Mahlmethode (Mörser-, Kugel-, Planeten-

⁶⁹ Vgl. Prüfbericht 3, Anhang 3

⁷⁰ Probemischungen mit runder Körnung haben eine glatte Oberfläche, eine höhere Fließfähigkeit und somit einen niedrigeren Fließkoeffizient nach DIN EN 933-6:2014-07 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften – Fließkoeffizienten von Gesteinskörnungen

⁷¹ Reformat, Martin (Dissertation), Zementmahlung – Untersuchungen zum Zusammenhang von Mahlaggregat und Materialeigenschaften, Bauhaus-Universität Weimar, 2020, Tabelle 6.6, S. 151

und Rührwerksmühle) Blaine-Werte von 2.100 bis 15.400 cm²/g, sowie BET-Werte zwischen 6,67 und 9,93 m²/g erreicht werden. Dies legt nahe, dass bei einer weiteren mechanischen Aufbereitung durch Mahlung der untersuchten RC-GK-Probe 0/2 durchaus mit einem höheren BET-Wert zu rechnen wäre.

Generell gilt, dass bei einer hohen spezifischen Oberfläche die Gesteinskörnung mehr Wasser oberflächenaktiv binden kann. Dadurch wird die Neigung zum Bluten des Betons verringert, jedoch der Gesamtwasseranspruch erhöht. Letzterem kann durch adäquate Fließmittelzugabe entgegengewirkt werden (vgl. auch Kapitel 4.4.1). Zusätzlich kann ein vergleichsweise hoher Wert der spezifischen Oberfläche der feinen Gesteinskörnung auf einen erhöhten Anteil an Zementstein hindeuten, welcher u.U. noch reaktive Eigenschaften aufweisen kann.

4.3 Alkali-Kieselsäure-Reaktions-Untersuchung

Gemäß der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1“⁷² (nachfolgend Alkali-Richtlinie) dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen für Bauteile in feuchter Umgebung, entsprechend der Klasse WF, z.B. für Betone der Expositionsclassen X0, XC1 bis CX4, XF1, XF3, XA1 und Beton mit hohem Wassereindringwiderstand nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.5.3 verwendet werden, wenn die Herkunft der RC-GK bekannt ist und sie einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse zugeordnet werden kann bzw. der Nachweis der Unbedenklichkeit erbracht wird.

Ist deren Herkunft nicht bekannt, ist die RC-GK in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S (bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion) einzustufen. Damit gelten die vorbeugenden Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie, es sei denn, durch ein Gutachten wird zweifelsfrei die Unbedenklichkeit festgestellt.

Ist der Beton mit RC-GK einer feuchten Umgebung mit Alkalizufuhr von außen ausgesetzt - entsprechend der Feuchtigkeitsklasse WA der Alkali-Richtlinie - muss ein Gutachten zur Unbedenklichkeit erstellt werden.

Um kurzfristig, die Alkaliempfindlichkeit beurteilen zu können, kann das Schnellprüfverfahren nach Anhang B.2 der Alkali-Richtlinie angewandt werden. Anhand der Dehnungsmessungen an Mörtelprismen kann bei Bestehen der Prüfung entsprechend Tabelle 4.7 die RC-GK in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion) eingestuft werden. Weitere Prüfungen sind dann nicht erforderlich. Sofern die Prüfung eine Überschreitung der

⁷² Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Hrsg.: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton, Berlin, 2013

festgelegten Grenzwerte (vgl. Tabelle 4.7) ergibt, kann ein Betonversuch mit Nebelkammerlagerung bei 40°C nach Anhang B.3 Alkali-Richtlinie angeschlossen werden.

Tabelle 4.7: Grenzwerte für die Alkaliempfindlichkeitsklasse weiterer Gesteinskörnungen nach Anhang B.2 gemäß Alkali-Richtlinie DAfStB

Kriterium	Grenzwert für die Alkaliempfindlichkeitsklasse	Keine Bewertung ^a
	E I-S	-
Grenzwerte für die Dehnung ϵ der Mörtelprismen nach 13 Tagen in mm/m	$\epsilon \leq 1,00$	> 1,00
^a Zur Bewertung kann ein Betonversuch nach Anhang B.3 angeschlossen werden ANMERKUNG: Eine Einstufung in eine andere Alkaliempfindlichkeitsklasse als E I-S ist durch das Schnellprüfverfahren nicht möglich, weil die bisherigen Untersuchungsergebnisse eine weitere Einteilung nicht zulassen		

4.3.1 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Die AKR-Untersuchung wurde an der FMPA (Forschungs-, Material- und Prüfanstalt) der BTU Cottbus-Senftenberg durchgeführt. Die Probe der natürlichen Gesteinskörnung 0/8 wurde entsprechend der Alkali-Richtlinie vorbereitet. **Aufgrund des besonderen Fokus auf die feine Fraktion 0/2 der Ausgangsmischung RC-GK 0/8 wurde beschlossen, die Kornanteile < 2 mm nicht vorab zu entfernen und somit von den Vorgaben der Alkali-Richtlinie abzuweichen.**

Für die AKR-Untersuchungen im Labor wurden zwei Rezepturen im Umfang mit je 3 Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm erstellt. Der erste Prismensatz hatte als Zuschlagstoff 100 M.-% rezyklierte GK (Mörtelrezeptur 1), der zweite Prismensatz wurde zu je 50 M.-% natürlicher und rezyklierter GK (Mörtelrezeptur 2) hergestellt. Es wurden Messzapfen des Typs 1 nach DIN 52450 verwendet bzw. einbetoniert. Die Zusammensetzungen der Korngruppen erfolgten nach Tabelle B.1 der Alkali-Richtlinie, wobei bei der Sieblinie für die Mörtelprismen mit 50 % RC-GK und 50 M.-% natürlicher GK auf die entsprechende prozentuale Aufteilung geachtet wurde. Für die Mörtelzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie entsprechend B.2.3 sind folgende Stoffparameter zur Anwendung gekommen:

- CEM I 32,5 R nach DIN 197-1 mit einem aufdotierten Na₂O-Äquivalent von 1,27 M.-%⁷³
- GK/Zement-Verhältnis 2,25:1
- Wasserzementwert 0,47

Daraus ergibt sich die Rezepturzusammenstellung für einen Prismensatz:

- Zement: 604,4 g
- Wasser: 284,1 g

⁷³ Das Na₂O-Äquivalent wurde mittels Zugabe von Kaliumsulfat (K₂SO₄) in das Zugabewasser erreicht.

- Gesteinskörnung: 1360 g
- Kaliumsulfat: 0,42 g
- Wasserzugabe zum Vornässen: 30 bzw. 60 g

Die weiteren Schritte zur Vorbereitung der Gesteinskörnungen erfolgten nach den Vorgaben der Alkali-Richtlinie (Lagerung im Trockenschrank, Absiebung GK > 4 mm, Zerkleinerung auf GK ≤ 4 mm, Sieblinienerstellung, Entfernung Kornanteile ≤ 125 µm durch Nasssiebung, erneute Lagerung im Trockenschrank für 24 h).

Die Herstellung der Mörtelmischung sowie der Probekörper erfolgte nach DIN EN 196-1⁷⁴ (siehe Foto 4.5).

Aufgrund der festgestellten steifen Konsistenz bei der Mörtelherstellung wurde der Mörtelrezeptur 1 mit 100% RC-Brechsand zusätzlich 60 g Wasser hinzugegeben. Für die Mörtelrezeptur 2 betrug die Menge des zugegebenen Wassers entsprechend 30 g.

Ein erhöhter Wasserbedarf der rezyklierten Gesteinskörnung geht zum einen aus den Untersuchungen zur Eingangskontrolle (vgl. Kapitel 4.2.3) hervor, als auch einer im Zuge dieser AKR-Untersuchung durchgeführten Wasseraufnahmeprüfung. Die Wasseraufnahme wurde in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung“⁷⁵ Anhang B durchgeführt.⁷⁶ **Die Ergebnisse der Wasseraufnahme betragen 0,6 M.-% für die natürliche Gesteinskörnung und 6,34 M.-% für die rezyklierte Gesteinskörnung.**

Gemäß Alkali-Richtlinie B.2.3 ist des Weiteren das **Ausbreitmaß** nach DIN EN 1015-3 zu ermitteln; es muss größer 120 mm sein. Die Ergebnisse des Ausbreitmaßversuche sind wie folgt:

- **Mörtelrezeptur 1 (100% RC-GK)** → **135 mm** > 120 mm
- **Mörtelrezeptur 2 (50% nat.-50% RC-GK)** → **162 mm** > 120 mm

Die weiteren Schritte sollen an dieser Stelle stichpunktartig erwähnt werden:

- Befüllen und Einrütteln der Mörtelmischung in vorbereitete Schalungskörper (Prismen 40 x 40 x 160 mm), anschließende Abdeckung mit leicht geölter Glasplatte
- Lagerung in Feuchtekammer (relative Feuchte > 90%) für 24 ±2 h bei (20±2) °C Raumtemperatur
- Ausschalen und Trockenschliff sowie Reinigung der Prismen; Lagerung in destilliertem Wasserbad für 24 ±2 h bei (80±2) °C im Trockenschrank
- Kennzeichnung der Prismen und Nullmessung; Lagerung der Prismen in Behälter mit 80 °C ± 2 °C heißer 1±0,01 molarer Natronlauge

⁷⁴ DIN EN 196-1:2016-11 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit

⁷⁵ DAfStb-Richtlinie - Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Berlin, Ausgabe September 2010

⁷⁶ Laut Alkali-Richtlinie ist die Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6, Anhang B zu ermitteln. Die zu untersuchende GK stimmt jedoch nicht mit den im Anhang B angegebenen Fraktionen überein.

- Messung der Länge bzw. Längenveränderung am 1., 5., 9. sowie am 13. Tag nach Nullmessung

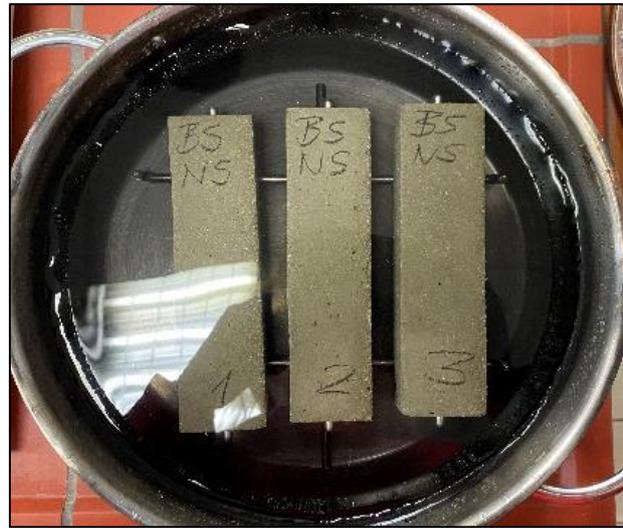


Foto 4.5: Prismen nach der Herstellung, abgedeckt mit leicht geölter Glasplatte (links) und Lagerung in NaOH-Lösung nach 48 h (rechts) [Foto: Golubeva]

4.3.2 Auswertung und Beurteilung der Versuchsergebnisse

Die gemessenen Längen (siehe beispielhaft Foto 4.6) wurden tabellarisch an den 5 Prüftagen erfasst, die jeweiligen Differenzen zu den Prüfvortagen als Längenänderung ermittelt und bezogen auf die Ausgangslänge eines jeden Probekörpers schlussendlich die Dehnung in mm/m berechnet (vgl. Tabelle 4.8).

Tabelle 4.8: Ergebnisse der Dehnungsberechnung der Prismensätze 1 und 2

Datum	Prüftag	Prismensatz 1 (100% RC-GK)			Prismensatz 2 (50% nat.-50% RC-GK)		
08.01.2020	0	0	0	0	0	0	0
09.01.2020	1	0,075	0,012	0,019	0,012	0,019	0,019
13.01.2020	5	0,306	0,287	0,268	0,362	0,331	0,343
17.01.2020	9	0,618	0,649	0,599	0,761	0,762	0,711
21.01.2020	13	1,031	1,030	1,035	1,242	1,242	1,179
Mittelwert Prüftag 13		1,032			1,221		
Ausgangslänge Prisma [mm]		160,1025	160,2675	160,3475	160,2375	160,1775	160,2375

Anmerkungen: Die Einzelwerte am 13. Prüftag zeigen keine Abweichung von mehr als 10% vom Mittelwert auf.

Prismensatz 1 (kurz Probe 1) enthält 100% RC-GK; Prismensatz 2 (kurz Probe 2) enthält 50 % natürliche Gesteinskörnung und 50% RC-GK

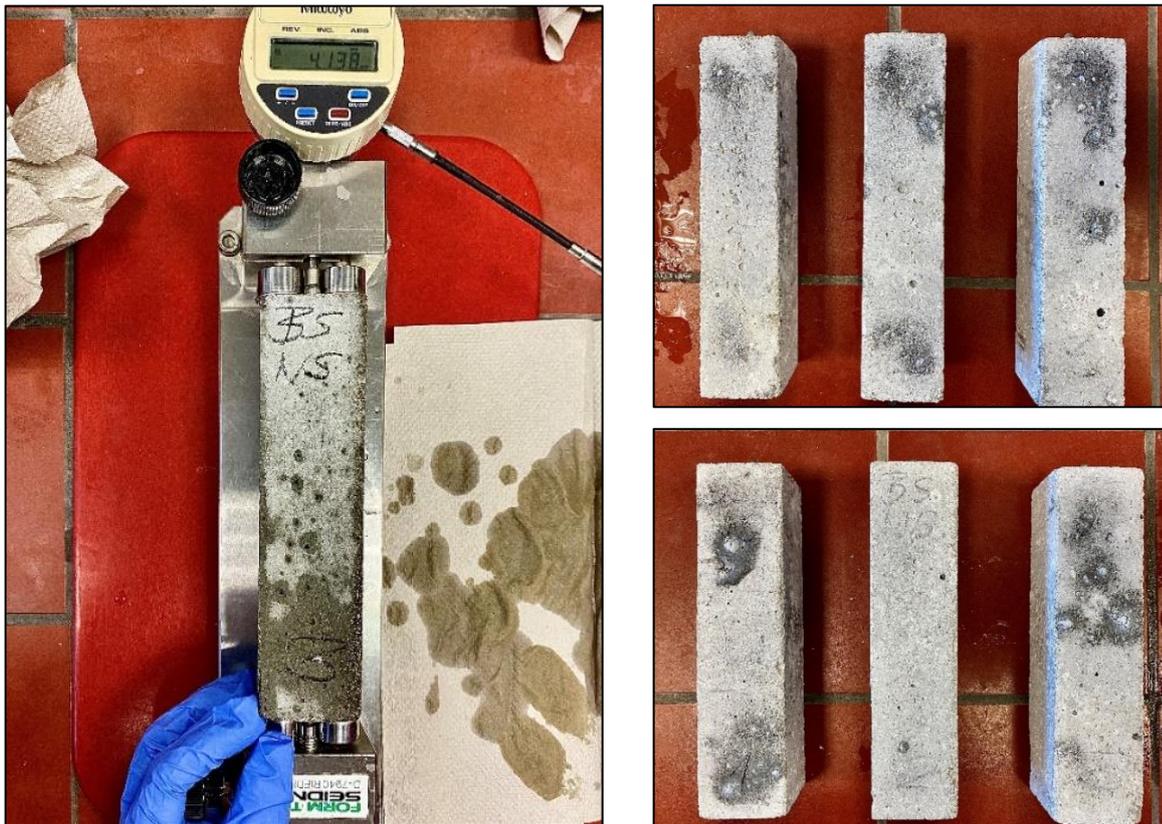


Foto 4.6: Längenmessung eines Probekörpers mit 50% RC-GK - 50% nat. GK (links); Probekörper am Ende der Prüfreihe (Prismensatz 1 oben rechts, Prismensatz 2 unten rechts) [Fotos: Golubeva]

Die Probekörper wiesen am 13., dem letzten, Prüftag keinerlei Risse oder Abplatzungen an der Oberfläche auf.

Die Übertragung der Ergebnisse in ein Dehnungsdiagramm (vgl. Abbildung 4.4) zeigt, dass die Mörtelrezeptur mit 50 M.-% Brechsand und 50 M.-% natürlicher GK eine um 20 % größere Ausdehnung am 13. Prüftag aufwies im Vergleich zu den Probekörpern mit 100 M.-% Brechsand. Bei einer Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-1}$ erfüllt das Ergebnis von 1,0 mm/m für die Mörtelrezeptur 1 das Kriterium der Alkali-Richtlinie. Somit könnte die RC-GK der Alkaliempfindlichkeitsstufe E I-S zugeordnet werden. Die Mörtelrezeptur mit je 50%-iger Mischung aus natürlicher und rezyklierter GK, überschreitet dieses Kriterium; ermittelt wurde eine Dehnung von 1,2 mm/m. Deshalb wird eine Zuordnung in die Alkaliempfindlichkeitsstufe E III-S erforderlich. Eine Verwendung dieser RC-GK zur Herstellung von Beton ist unter Einhaltung der vorbeugenden Maßnahmen zur AKR dennoch möglich. Bei einer Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-2}$ wird empfohlen, beide Korngruppenszusammensetzungen (Probe 1 und Probe 2) der Alkaliempfindlichkeitsstufe E III-S zuzuordnen.

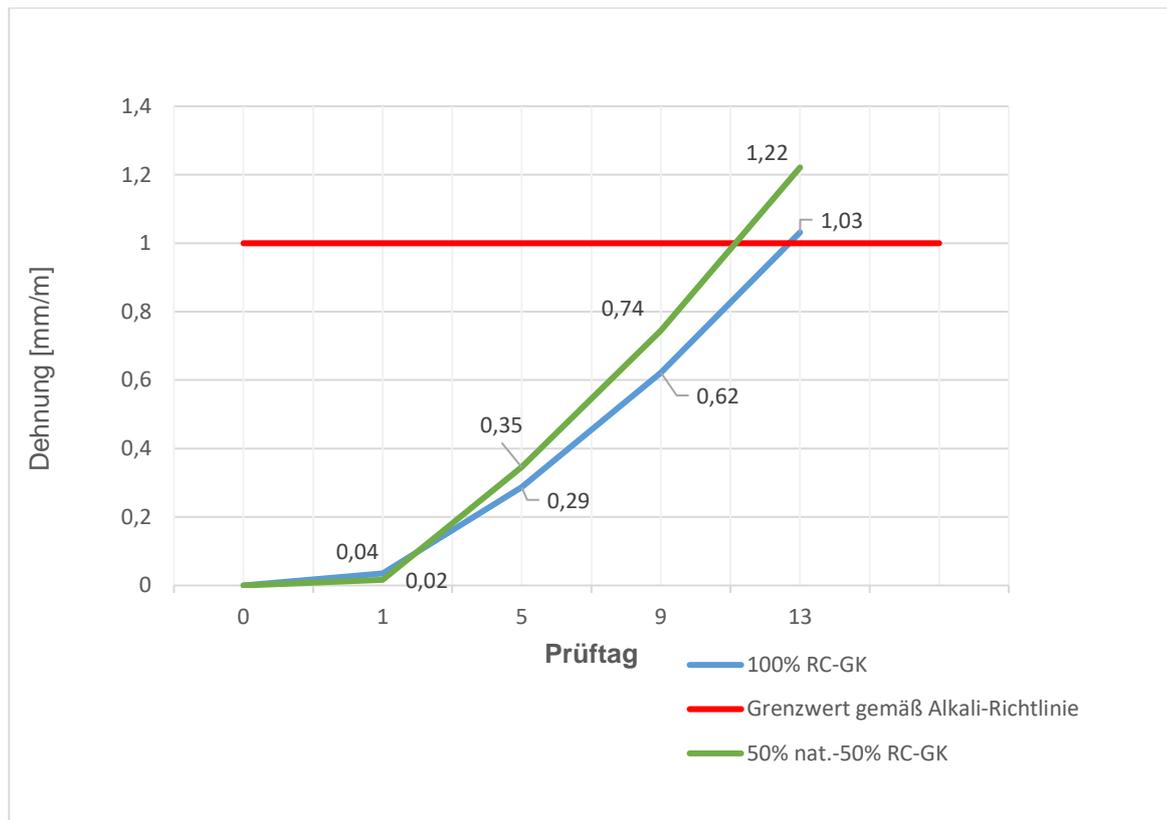


Abbildung 4.4: Dehnungsdiagramm der Prismensätze 1 und 2

Aufgrund des zwar nur knapp überschrittenen Grenzwertes von 1,00 mm/m um 0,03 mm/m sind bei der Rezepturentwicklung (s. Kapitel 4.4.1) vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton zu berücksichtigen.

Ein Betonversuch mit Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie – wie o.a. - wurde allerdings im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit nicht durchgeführt.

4.4 Untersuchung von RC-Mörtelrezepturen unter Laborbedingungen

Die im folgenden Kapitel vorgestellte Versuchsplanung und -durchführung zu RC-Mörtelrezepturen (vgl. Abbildung 4.5), wurden zunächst unabhängig der Verwendung als Trockenspritzmörtel betrachtet. Die Untersuchungen im Labor wurden veranlasst, um die Verwendbarkeit von Brechsanden für eine praktische Anwendung im sich anschließenden Feldversuch bestätigen zu können. Wie bereits in Kapitel 3.1 erläutert, wird Spritzbeton(/-mörtel) im Trockenspritzverfahren erst nach Austritt und Verdichtung als Beton nach DIN EN 206-1 betrachtet. Zum Beispiel kann der tatsächliche Wassermenge-Wert (w/z -Wert) daher vor der Spritzbeton-Anwendung nicht festgelegt werden und stellt eine geschätzte Größe dar.⁷⁷ Die Trockenmischung wird daher über den

⁷⁷ Laut DIN 18551, S. 10: „Verfahrensbedingt ist der w/z -Wert beim Trockenspritzverfahren nicht messbar; er liegt in der Regel beim Herstellen von annähernd lotrechten oder über Kopf gespritzten Flächen im Trockenspritzverfahren unter 0,50.“

„klassischen“ Weg der Frisch- und Festmörtelprüfungen im Labor nach untenstehenden DIN-Normen geprüft.

Die Laboruntersuchungen wurden in zwei Versuchsreihen zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Projektlaufzeit durchgeführt. Nach der Versuchsreihe 1 im Labor erfolgte bereits die praktische Anwendung im Feldversuch (Spritzmörtel/-beton-Versuch) auf dem Gelände der Fa. Jens Brand Felsenbau. Im Zuge einer parallellaufenden Masterarbeit wurde die erste Versuchsreihe im Labormaßstab optimiert und mit weiteren Versuchsparametern bzw. -herangehensweisen ergänzt (Versuchsreihe 2).



Abbildung 4.5: Prinzipieller Ablauf der RC-Mörteluntersuchungen

Aus Praktikabilitätsgründen lag der Fokus auf der Herstellung und Prüfung von Mörtelprismen unter Verwendung der natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnung 0/4. Obwohl sich diese Korngruppe außerhalb des Anwendungsbereichs von Zementmörtel nach DIN EN 196 (oder auch Mauermörtel nach DIN EN 998-2), d.h. mit einem Größtkorn von maximal 2 mm befindet, wurde auf die für diese Anwendungsbereiche vorgesehenen Prüfmethoden zurückgegriffen. D.h. anstelle der Herstellung von Betonwürfeln mit der Kantenlänge von 150 mm wurden Mörtelprismen mit den Abmaßen 40x40x160 mm hergestellt.

Da im Zuge dieses Projektes Studierende des Umwelt- und Bauingenieurwesens von Anfang an einbezogen wurden, bildeten experimentelle Herangehensweisen die Basis. D.h. die Studierenden sollten anhand möglichst vieler verschiedener Rezepturen/Mischungen erfahren, welchen Einfluss die feine rezyklierte Fraktion, sowie die Wasserzugabe auf die Frischmörtelherstellung haben. Zum Einsatz kam im labortechnischen Maßstab ein Fließmittel. Ziel war es, zunächst eine Mischung von plastischer und verarbeitungsfähiger Konsistenz zu erhalten, um eine ungefähre Realitätsnähe zum jungen Spritzbeton herzustellen. Dies erfolgte mit Hilfe des Hägermann-Tisches (Ausbreitmaß-Versuch). Bei der Herstellung und der späteren Prüfung auf Biegezug- und Druckfestigkeit wurde unter Einweisung des Laborpersonals stets das gleiche Herstellungs- sowie Prüfverfahren nach DIN EN 196-1 zugrunde gelegt. Der Umfang der experimentellen Versuche beider Versuchsreihen bestand insgesamt aus der Bestimmung

- des Ausbreitmaßes mit Hilfe des Hägermann-Tisches nach DIN EN 1015-3
- der Frischmörtelrohddichte nach DIN EN 1015-6
- der Festmörtelrohddichte nach DIN EN 12390-7
- der Biegezugfestigkeit an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1
- der Druckfestigkeit an Mörtelprismen nach DIN EN 196-1

Die Erkenntnisse der Versuchsreihe 1, sowie weitere normative Anforderungen bzw. Vorgaben, sind in der Versuchsreihe 2 umgesetzt worden. In diesem Zuge wurde zusätzlich der Fokus auf die Dauerhaftigkeit⁷⁸ der Mörtelmischungen gelegt.

Der Einfluss rezyklierter Brechsande bei der Mörtelherstellung wurde mit unterschiedlichen Substitutionsgraden zur Gesamtgesteinskörnungsmenge untersucht. Es erfolgte eine gestaffelte Substitution der RC-GK von 0 bis 100 M-%. Unter Verwendung zwei verschiedener Zementsorten (CEM I 52,5 R und CEM II/A-LL 32,5 R), entstanden in den beiden Versuchsreihen insgesamt 7 Rezepturmischungen (s. Tabelle 4.10), welche auf die oben genannten bautechnischen Parameter untersucht wurden. Eine Zugabe von Fließmittel konnte dabei nicht vermieden werden.

4.4.1 Rezepturentwicklung/-bestimmung durch Ausbreitmaß-Versuche

Ein Ziel des Forschungsvorhabens bei der Anwendung von Brechsanden für die Mörtel-/Betonherstellung bestand darin, die Rezeptur möglichst ohne Zusatzmittel/-stoffe herzustellen. Es stellte sich jedoch heraus, dass eine Fließmittelzugabe unter bestimmten Randbedingungen erforderlich wurde.

Die Anforderungen an die Grundmischung für Spritzbeton/-mörtel sind in DIN EN 14487 Teil 1 Kapitel 5 aufgeführt, wobei DIN 18551 die Bedingungen für eine Trockenmischung ergänzt. Demnach muss eine werkseigene Trockenmischung der „DAfStb-Richtlinie Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel“ (Trockenbeton-Richtlinie) entsprechen. (Die Trockenbeton-Richtlinie ergänzt bestimmte Abschnitte der DIN EN 206-1:2001-07⁷⁹, DIN 1045-2:2001-07 sowie DIN 1045-3:2012-03.) Die Trockenbeton-Richtlinie⁸⁰ schließt jedoch die Verwendung von rezyklierten GK für Trockenbeton und Trockenmörtel aus.

Auf der Grundlage der genannten aktuell gültigen Normen und Richtlinien mit ihren jeweiligen Empfehlungen sowie den Ergebnissen der AKR-Untersuchungen (vgl. Kapitel 4.3) ergeben sich folgende Parameter für die Herstellung einer geeigneten Mörtelrezeptur:

- a) maximaler w/z-Wert von 0,6 (Expositionsklassen XC4 (wechselnd nass und trocken z.B. Außenbauteile mit direkter Beregnung) und XF1 (Frostangriff bei mäßiger Wassersättigung ohne Taumittel wie z.B. Außenbauteile))⁸¹

⁷⁸ Die Untersuchungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion aus Kapitel 4.3 waren Bestandteil der Versuchsreihe 2.

⁷⁹ Neueste Fassung: DIN EN 206:2021-06

⁸⁰ siehe DAfStb Trockenbeton-Richtlinie 2005, Kapitel 5.1.3 Gesteinskörnung

⁸¹ Basierend auf Grenzwerte bei Beachtung der Expositionsklassen nach DIN 1045-2:2008-08, Anhang F

- b) Zementgehalt mindestens 280 kg/m³ (Expositionsklassen XF1, XC4)⁸² bis maximal 350 kg/m³ (Feuchtigkeitsklasse WF)⁸³ ist einzuhalten
- c) Konsistenz im Bereich „(plastisch)“ bis „(weich)“⁸⁴

Zu a): Die Ergänzungen der DIN 18551:2014-08 Spritzbeton gibt ebenfalls einen w/z-Zielwert von 0,6 an - sofern zwischen Hersteller und Abnehmer keine abweichenden Festlegungen getroffen werden.

Zu b): Bei Anwendung des Spritzbetons/-mörtels mit einer Zementmenge von mehr als 350 kg/m³ in feuchter Umgebung (Feuchtigkeitsklasse WF) ist es gemäß Alkali-Richtlinie erforderlich, NA-Zemente einzusetzen. Diese zeichnen sich durch einen niedrig wirksamen Alkaligehalt aus. Alternativ ist eine gutachterliche Stellungnahme von einer besonders fachkundigen Person zu erstellen.

Zu c): Die Wahl der Konsistenz beruht auf den Vorgaben der DIN 18551:2014-08, S.10 sowie aus Gründen der Verarbeitbarkeit der Frischmörtelmasse zur Prismenherstellung. Die DIN EN 1015-2: 2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk gibt für Frischmörtel der zu Prüfzwecken oder zur Herstellung von Prüfkörpern verwendet wird, ein definiertes Ausbreitmaß von 175 ± 10 mm für Frischmörtelrohddichten > 1.200 kg/m³ an. Der angestrebte Konsistenzbereich „plastisch“ bis „weich“ entspricht diesem Ausbreitmaß (vgl. Tabelle 4.9).

Tabelle 4.9: Zuordnung Konsistenz und Ausbreitmaß von Frischmörtel⁸⁵

Konsistenzbereich	Ausbreitmaß in mm
steif	< 140
plastisch	140 ... 200
weich	> 200

Für das Erreichen einer plastischen Konsistenz wurde in den Laborversuchen einerseits mit einer sukzessiven Erhöhung der Wassermenge als auch mit der Zugabe von Fließmittel gearbeitet. Die Zugabe von Fließmitteln bewirkt eine Verminderung des Wasseranspruchs und führt zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit der Mörtel- bzw. Betonmischung. Je geringer der w/z-Wert gehalten werden kann, desto weniger Überschusswasser entsteht und desto höher ist die Dauerhaftigkeit und Festigkeit des Mörtels bzw. Betons.

⁸² Ebd.

⁸³ Gemäß vorbeugenden Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton nach Alkali-Richtlinie, Tabelle 6

⁸⁴ Nach DIN 18551: 2014-08 Spritzbeton – Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen, S.10

⁸⁵ Neroth, Günter., Vollenschaar, Dieter. (Hrsg.): Wendehorst Baustoffkunde, Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz, 27. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2011, S. 388

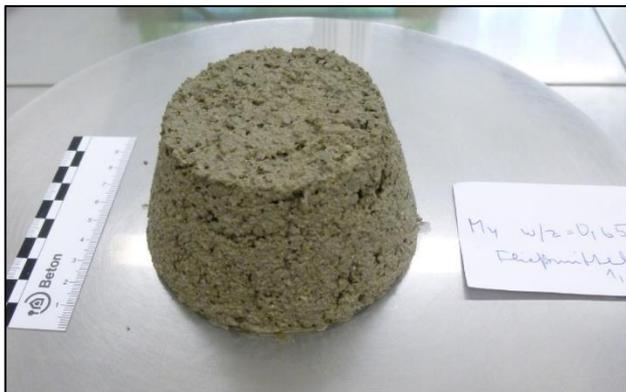
Anhand der oben aufgeführten Parameter a) bis c) (w/z-Wert, Zementgehalt, Konsistenz) wurden mittels Ausbreitmaß-Versuche die gewünschten Mörtelrezepturen eingestellt. Die ausführlichen Ergebnisse aus Versuchsreihe 1 sind dem Anhang 4 zu entnehmen.

Unterschiede in der Vorgehensweise zwischen Versuchsreihe 1 und 2

Für die vorbereitenden Maßnahmen der Versuchsreihe 1 und 2 wurde die rezyklierte sowie die natürliche Gesteinskörnung für 24 h im Trockenschrank bei 105°C gelagert. Es bestand ein wesentlicher Unterschied bei der Frischmörtelherstellung mit der Handhabung der rezyklierten Gesteinskörnung. So wurde zur Versuchsreihe 1 die RC-GK im ofentrockenen Zustand für die Mörtelherstellung verwendet, hingegen wurde die RC-GK im Zuge der Versuchsreihe 2 zuerst separat vorgemästet. Dabei wurde auf die Ergebnisse der Wasseraufnahme der Vorversuche (vgl. Kapitel 4.2.3) zurückgegriffen.

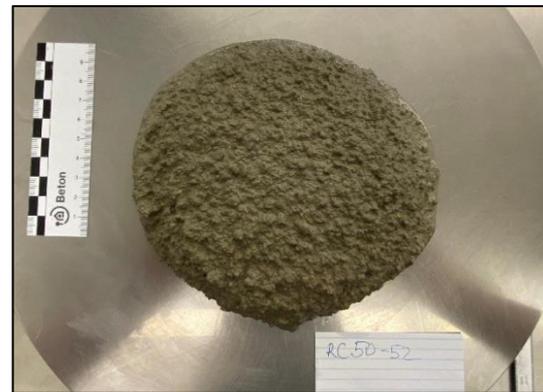
Der Unterschied lässt sich deutlich anhand einer Gegenüberstellung der Ausbreitmaß-Bilder (nach 15 Hüben) der Versuchsreihe 1 und 2 erkennen (s. Foto 4.7). Ausgewählt sind dabei Rezepturen mit dem gleichen RC-GK Substitutionsanteil und einem w/z-Wert zwischen 0,60 und 0,65.

Versuchsreihe 1 (ohne Vornässung)



Ausbreitmaß RC-50-52 (1,5) [Foto: M. Dell]

Versuchsreihe 2 (mit Vornässung)



Ausbreitmaß RC-50-52(1). [Foto: M. Golubeva]



Ausbreitmaß RC-100-52 [Foto: M. Dell]



Ausbreitmaß RC-100-52 (1) [Foto: M. Golubeva]

Foto 4.7: Vergleich der Ausbreitmaße der Versuchsreihen 1 und 2 nach 15 Hubstößen am Hägermann-Tisch (Auswahl)

Tabelle 4.10 zeigt die sieben ausgewählten Rezepturen aus den beiden Versuchsreihen 1 und 2, welche die zuvor aufgestellten Parameter (w/z-Wert, Zementgehalt, Konsistenz) weitestgehend erfüllen. Die minimale Abweichung von < 1 M.-% vom zulässigen Zementgehalt (350 kg/m³ nach Alkali-Richtlinie) der Versuchsreihe 1 kann vernachlässigt werden. Eine Überschreitung wurde allerdings in Versuchsreihe 2 vermieden. Bei der rechnerischen Ermittlung der Zusammensetzung des Frischbetonvolumens wurde bei jeder Rezeptur ein Luftporengehalt von 1,5 Vol.-% angesetzt.

Für eine eindeutige Zuordnung der Rezepturen wurde zunächst eine Rezepturbezeichnung nach folgendem Schema aufgestellt:

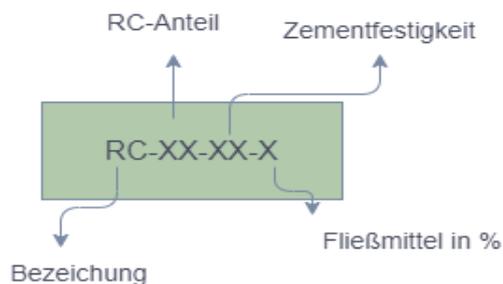


Abbildung 4.6: Rezepturbezeichnung

Tabelle 4.10: Mörtelrezepturen für Versuchsreihe 1 und 2

Rezeptur- bezeichnung	Wasser	Zement ^a	RC-GK 0/4	nat. GK 0/4	Fließ- mittel ^b	w/z- Wert	RC- Substitution	Ausbreit- maß
	kg/m ³				M.-% ^c	-	Vol.-%	mm
Versuchsreihe 1 (ohne Vornässung)								
Ref-0-32 (2,0)	217	309	-	1757	2,0	0,60	0	118
RC-50-52 (1,5)	193	350	873	900	1,5	0,55	50	101,5
RC-50-52 (2) ^d	233	350	873	900	2,0	0,66	50	110,5
Versuchsreihe 2 (mit Vornässung)								
RC-50-32 (1)	200	350	895	923	1,0	0,57	50	117,8
RC-50-52 (1)	200	350	895	923	1,0	0,57	50	160,8
RC-100-32 (1)	200	350	1792	-	1,0	0,57	100	115,2
RC-100-52 (1)	200	350	1792	-	1,0	0,57	100	123,8

a) verwendet wurden CEM II/A-LL 32,5 R oder CEM I 52,5 R, gemäß Rezepturbezeichnung

b) Fließmittel MasterGlenium ACE 430⁸⁶

c) bezogen auf die Zementmenge

d) Zusatz-Rezeptur für Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung nach 28 Tagen

Bei der Referenzrezeptur (Ref-0-32 (2,0)) ist zu beachten, dass es sich hierbei um eine verwendete Spritzmörtel-Trockenmischung des Herstellers Sakret⁸⁷ handelt. Die Bezeichnung des

⁸⁶ Spezielles Fließmittel für Betone mit niedrigen w/z-Werten

⁸⁷ SAKRET Trockenbaustoffe Europa GmbH & Co. KG

Trockengemisches lautet „SAKRET Spritzmörtel SM 4 P“ mit der Festigkeitsklasse C 25/30. Die exakte Zusammensetzung sowie deren Zusatzstoffe im Trockengemisch ist aus Gründen des Betriebsgeheimnisses nicht bekannt. Die Zementart wurde mit CEM II A-LL 32,5R angegeben.

Wie aus Tabelle 4.10 hervorgeht, konnte in Versuchsreihe 1 keine verarbeitungsfähige Mörtelrezeptur mit 100 % RC-GK hergestellt werden. Mit der Anpassung der Versuchsreihe 2 durch eine Vornässung der RC-GK konnten gleich 2 Rezepturen mit verringerten Fließmittelgehalt für die weiteren Prüfungen herangezogen werden.

Für die Beton- bzw. Mörtelherstellung ist die RC-Substitution nach der DAfStb-Richtlinie „Rezyklierte Gesteinskörnungen“ auf 45 Vol.-% für die Gesteinskategorie Typ 1 mit den Expositionsklassen von X0, XC1 bis XC4 in Kombination mit der Feuchtigkeitsklasse WO und WF begrenzt. Die Wahl einer höheren Substitution von 50 und 100 Vol.-% in diesem Projekt, soll einen Nachweis liefern, dass höhere Anteile an rezyklierter Gesteinskörnung zu keinen nennenswerten Einbußen beim Endprodukt führen. Dies soll in der Auswertung zu den Laborversuchen gezeigt werden.

4.4.2 Frisch- und Festmörtelrohddichte

Die Frischmörtelrohddichte wurde gemäß DIN EN 1015-6: 2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk, Teil 6 Bestimmung der Rohddichte von Frischmörtel an jeweils 3 Probekörpern je Rezepturmischung bestimmt. In der folgenden Abbildung 4.7 sind jeweils die Mittelwerte aus den 3 Einzelwerten jeder Mischung dargestellt.

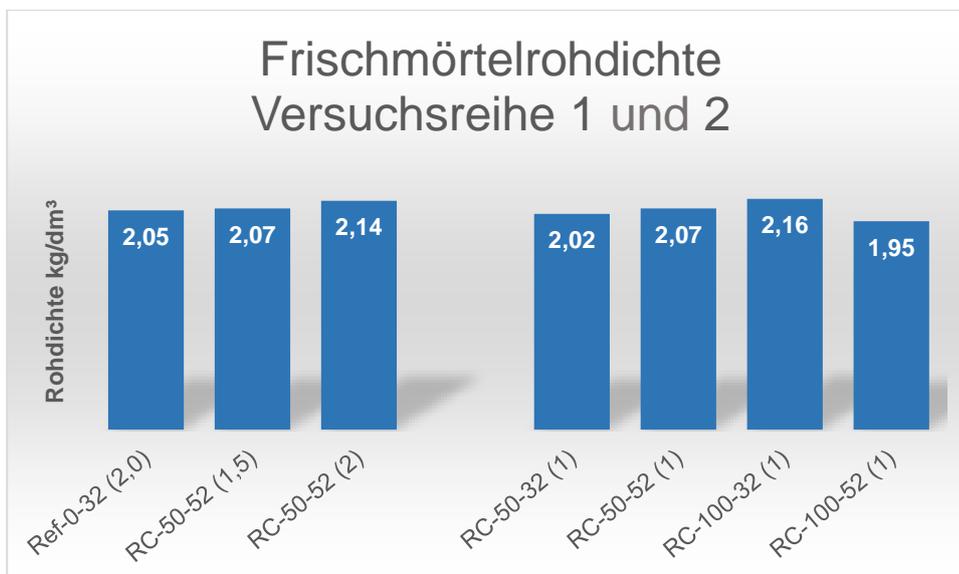


Abbildung 4.7: Frischmörtelrohddichten Versuchsreihe 1 und 2 am Tag der Herstellung

Die Ermittlung der Festmörtelrohddichte erfolgte nach den Vorgaben der DIN EN 12390-7:2019: Prüfung von Festbeton, Teil 7 Rohddichte von Festbeton. Abbildung 4.8 stellt das aus jeweils 3 Einzelwerten gemittelte Ergebnis für jede Mischung am 28. Tag dar.

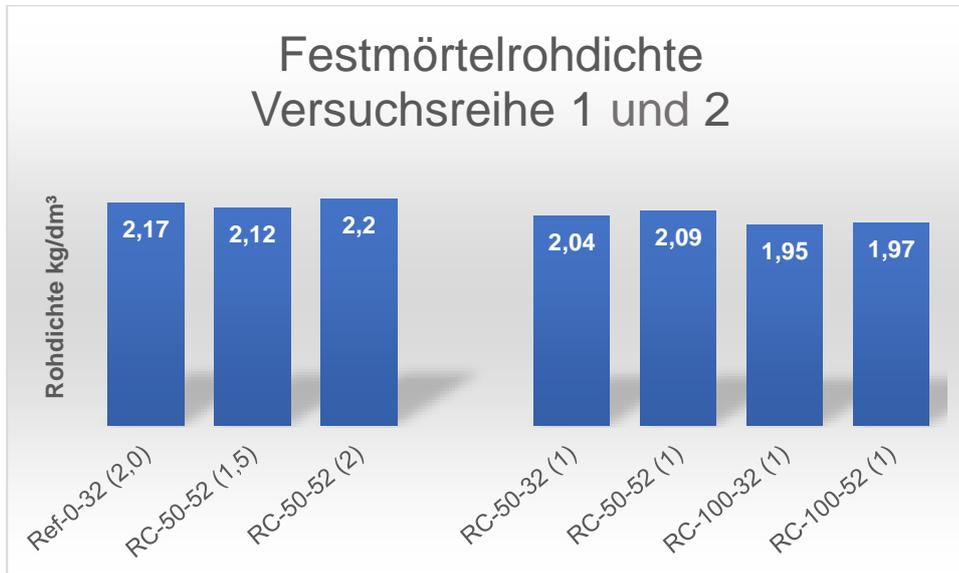


Abbildung 4.8: Festmörtelrohddichten Versuchsreihe 1 und 2 am Tag 28

4.4.3 Biegezug- und Druckfestigkeit

Die Prüfungen der Festmörteleigenschaften Biegezug- und Druckfestigkeit der **Versuchsreihe 1** wurden bei einem Probenalter von 1, 2, 7 und 28 Tagen an je drei Probekörpern aus zwei Rezepturen durchgeführt (vgl. Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10). Eine weitere Rezeptur wurde lediglich nach 28 Tagen geprüft.

Die **Versuchsreihe 2** mit insgesamt vier Rezepturen wurde für die Prüftage 2, 7 und 28 ausgelegt.

Die Durchführung der Prüfung für die Biegezug- als auch Druckfestigkeit erfolgte gemäß DIN EN 196-1:2016-11 Prüfverfahren für Zement, Teil 1 Bestimmung der Festigkeit. Die hier dargestellten Werte entsprechen dem Mittelwert aus je 3 Einzelwerten. Die vollständigen Messergebnisse sind dem Anhang 5 zu entnehmen.

Die Abbildung 4.9 sowie Abbildung 4.10 zeigen alle untersuchten Rezepturen aus beiden Versuchsreihen mit den entsprechenden RC-Substitutionen (gestrichelte Linie: 50 M.-%; durchgehende Linie: 100 M.-%), den Zementsorten (grünes Dreieck: CEM II/A-LL 32,5R; schwarz/oranges Dreieck: CEM I 52,5 R), sowie die Referenzrezeptur (graue Linie) aus Versuchsreihe 1. Die Versuchsreihe 1 umfasste die Prüftage 1, 2, 7 und 28, die Versuchsreihe 2 die

Prüftage 2, 7 und 28. Die Zusatz-Rezeptur „RC-50-52 (2)“ aus Versuchsreihe 1 wurde am Tag 28 auf Biege- und Druckfestigkeit geprüft (orangenes Dreieck).

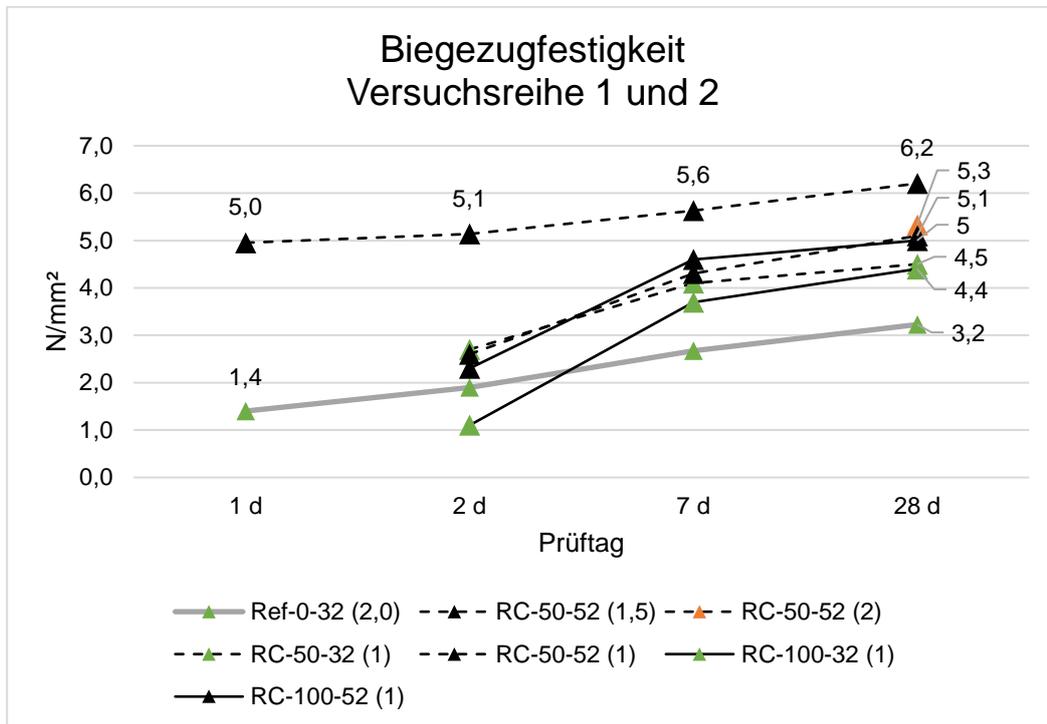


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfung Versuchsreihe 1 und 2 nach 1, 2, 7 und 28 Tagen

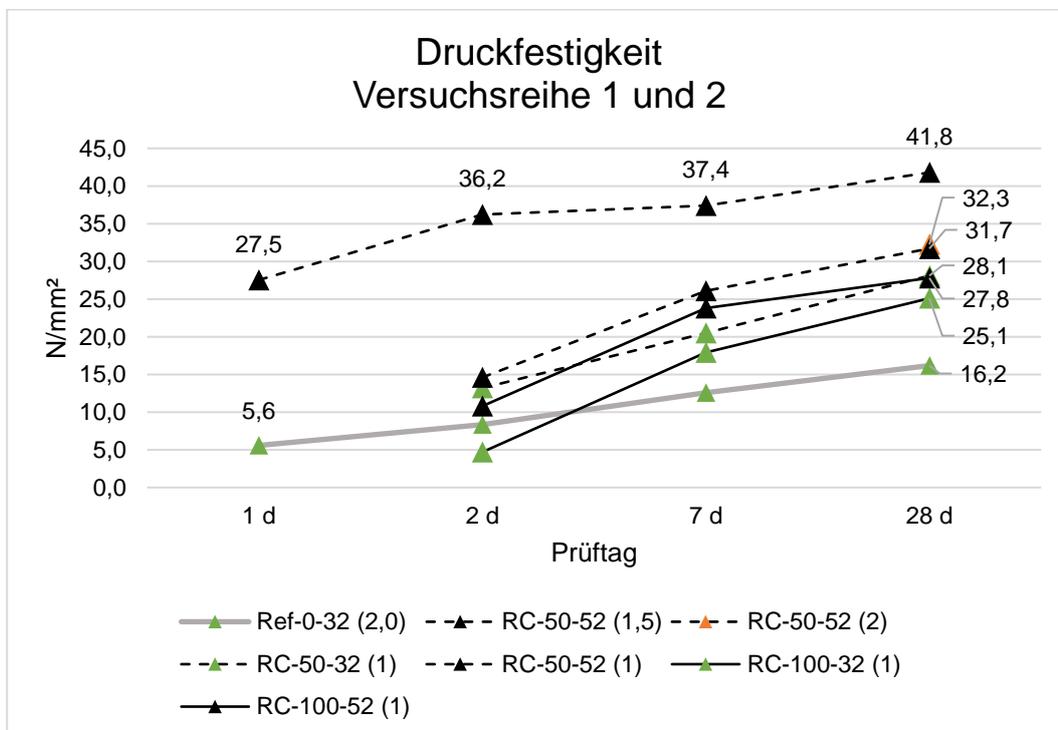


Abbildung 4.10: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung Versuchsreihe 1 und 2 nach 1, 2, 7 und 28 Tagen

Beispielhaft sind die Bruchbilder nach der Prüfung der Biegezugfestigkeit dem Foto 4.8 zu entnehmen. Es sind teils deutliche Unterschiede erkennbar hinsichtlich der Porenhäufung der unterschiedlichen Mörtelprismen. So weisen die Mörtelprismen mit 100 M.-% RC-Anteil und dem Zementtyp CEM I 52,5R weniger Luftporen bzw. Verdichtungsporen an der Oberfläche auf als beispielsweise die Mörtelprismen mit gleicher RC-Substitution aber mit dem Zementtyp CEM II/A-LL 32,5R. Dies lässt sich auf folgenden Zusammenhang zurückführen: je höher der RC-Anteil und somit die Feinfraktion ist und je höher die Mahlfeinheit des Zementes (Festigkeitsklasse 52,5 gegenüber 32,5) desto dichter ist das Gesamtgefüge. Die Mörtelprismen mit den geringsten Luft- und Verdichtungsporen besitzen zeitgleich die höchsten Ausbreitmaße.



Foto 4.8: Bruchbilder Mörtelprismen aus Versuchsreihe 2 nach Biegezugfestigkeitsprüfung [Fotos: M. Golubeva]

4.4.4 Auswertung der Versuche unter Laborbedingungen

In der Auswertung der Versuche im Labormaßstab zur Rezepturentwicklung, Verarbeitbarkeit sowie zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften, sollen im Folgenden erste Rückschlüsse zum Einfluss der rezyklierten Feinfraktion (Brechsande) bei der Mörtelherstellung gegeben werden. Ermittelte Kenntnisse werden für die praktische Spritzmörtelanwendung im Feldversuch übertragen.

Während der experimentellen Rezepturtests ist aufgefallen, dass trotz erhöhtem w/z-Wert (teilweise bis 0,9 in Versuchsreihe 1) die gewünschte Konsistenz nicht erreicht wurde. Dies könnte mit einer prozessbedingten erhöhten **Wasseraufnahme** der rezyklierten Gesteinskörnung zusammenhängen: Durch den Vorgang der Frischmörtelherstellung im Zwangsmischer werden rezyklierte Gesteinskörnungen mit Zementsteinanhaftungen weiter aufgebrochen, was zu einer frischen, vergrößerten und saugfähigen Oberfläche und somit zu einer erhöhten Wasseraufnahme führt. Das heißt, dass für den Zementleim benötigte Wasser wird von der aufgebrochenen RC-GK in größerem Umfang und in kürzester Zeit aufgenommen. Generell ist davon auszugehen, dass RC-GK eine höhere Porosität und geringere Rohdichte im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung aufweisen. Bei der Rezepturentwicklung wurde daher besonders in Versuchsreihe 2 das Anmach- bzw. Saugwasser berücksichtigt.

Im Allgemeinen, hat sich herausgestellt, dass eine **Vornässung** der rezyklierten Gesteinskörnung, vor der eigentlichen Frischmörtelzubereitung, essentiell ist (Versuchsreihe 2). Eine Vornässung bewirkt eine verbesserte Verarbeitbarkeit, der Frischmörtel weist eine plastische Konsistenz auf bei verringertem Luftporenanteil. Der Einsatz von Fließmittel war unerlässlich trotz Vornässung. Bei einem zu hohen w/z-Wert besteht die Gefahr des Bluten (Wasserabsonderung von Frischbeton) und der erhöhten Kapillarporenbildung (ca. 10nm; für die Hydratation überschüssiges Anmachwasser verbleibt im Beton und hinterlässt saugfähige Kapillarporen). In diese Poren können bekanntermaßen Wasser und Schadstoffe der Luft eindringen und den Karbonatisierungsvorgang im Beton beschleunigen. Die Betoneigenschaften werden dadurch negativ beeinflusst – bspw. erhöht sich die Wasseraufnahme und damit wird der Beton anfälliger für Frostschäden – also die Dauerhaftigkeit nimmt ab.

Da die Herkunft der rezyklierten Gesteinskörnung (Ursprung der Primärrohstoffe des Abbruchmaterials) unbekannt ist – wie o. erläutert –, wurde die **Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S** in Abhängigkeit der Feuchtigkeitsklassen WO und WF festgesetzt. Für die Rezepturentwicklung wurde daher die maximale Gesamtmenge des Zements auf 350 kg/m³ berücksichtigt.

Bei der Einstellung des **Ausbreitmaßes** konnte trotz Vornässens und Fließmittelzugabe nur eine Rezeptur (RC-50-52 (1)) den plastischen Bereich nach Tabelle 4.9 erreichen. Bei der Prismenherstellung sind daher die übrigen Mischungen auf einem Rütteltisch verdichtet worden.

Bei der **Frisch-/ und Festmörtelrohichte** konnten keine signifikanten Unterschiede durch den Einsatz von Brechsanden in unterschiedlichen Substitutionsgraden festgestellt werden.

Aus den Ergebnissen der **Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung** ist zu erkennen, dass die Kombination von einer RC-Substitution von 50 M.-% und der Zementsorte CEM I 52,5 R zu insgesamt höheren Endfestigkeitswerten führt (gestrichelte Linien mit schwarzen Dreiecken in

Abbildung 4.9 und Abbildung 4.10). Der Einfluss des erhöhten Fließmitteleinsatzes um 0,5 M.-% vom Zement (5 g/kg Zement), stellt dabei jedoch keine plausible Korrelation zu der um 10 N/mm² erhöhten Enddruckfestigkeit dar (Vergleich zwischen RC-50-52 (1,5) aus Versuchsreihe 1 mit RC-50-52 (1) aus Versuchsreihe 2). Wobei prinzipiell der Einfluss nicht ausgeschlossen wird. Weiterhin ist ein erkennbarer Unterschied zwischen den Ergebnissen der Versuchsreihe 1 (höchsten und niedrigsten Festigkeitsverlauf) und denen der Versuchsreihe 2 festzustellen. Für diese Unterschiede gibt es mehrere plausible bzw. potenzielle Gründe (Fehlerbetrachtung):

- unterschiedlich ausführende Personen/Studierende in beiden Versuchsreihen
- Lagerung und Beschaffenheit der Ausgangsstoffe zu Beginn der Laboruntersuchungen (Feuchtigkeit, Alter)
- potenzielle abweichende Prozessschritte zur Frischmörtelherstellung (Mischzeit, Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe, Vornässung)
- falsche Handhabung bei der Verwendung von Fließmittel.

Hinsichtlich der geringen Biegezug- und Druckfestigkeitsentwicklung der Referenzmischung [Ref-0-32 (2,0)] sei anzumerken, dass es sich hierbei um eine Fertigmischung handelt, welche bereits alle Ausgangsstoffe beinhaltet. Daher kann es sein, dass durch eine lagerungsbedingte Feuchtigkeitsaufnahme und/oder die zusätzliche Fließmittelzugabe während des Herstellungsprozesses zu niedrigeren Werten bei der Biegezug- und Druckfestigkeit geführt hat. Eine bereits fertige und vom Hersteller eingestellte Trockenmörtelmischung zur direkten Anwendung im Trockenspritzverfahren eignet sich daher eher weniger für eine labortechnische vergleichende Untersuchung für neu zu entwickelnde Rezepturen in der Erstprüfung. Eine separat zusammengestellte Trockenreferenzmischung aus Norm-Quarzsand, Zement und Betonzusatzmittel mit entsprechend bekannten Massenanteilen würde eine Vergleichbarkeit bieten und ist somit für weitergehende Untersuchungen zu empfehlen.

Folgende **Druckfestigkeitsklassen** nach DIN EN 206-1 wurden erzielt:

Tabelle 4.11: Erzielte Festigkeitsklassen nach DIN EN 206-1

Rezeptur- bezeichnung	Festigkeit nach 28 d	abzüglich	Festigkeitsklasse
		Vorhaltemaß von 5 N/mm ²	
N/mm ²			
Versuchsreihe 1			
Ref-0-32 (2,0)	16,2	11,2	C8/10
RC-50-52 (1,5)	41,8	36,8	C25/30
RC-50-52 (2)	32,3	27,3	C20/25

Rezeptur- bezeichnung	Festigkeit nach 28 d	abzüglich Vorhaltemaß von 5 N/mm ²	Festigkeitsklasse
	N/mm ²		
Versuchsreihe 2			
RC-50-32 (1)	28,1	23,1	C16/20
RC-50-52 (1)	31,7	26,7	C20/25
RC-100-32 (1)	25,1	20,1	C16/20
RC-100-52 (1)	27,8	22,8	C16/20

Unabhängig von der Aussagekraft der Ergebnisse der Referenzmischung, wie weiter oben beschrieben, lässt sich bei der Druckfestigkeit nach 28 Tagen bei einer Mischung mit 50 M.-% RC-GK gegenüber einer Mischung mit 100 M.-% RC-GK mit der gleichen Zementsorte die gleiche Festigkeitsklasse C16/20 nach Abzug des Vorhaltemaßes feststellen (siehe Abbildung 4.11). Dies zeigt, dass selbst eine 100 prozentige Substitution zu vergleichsweise hohen Druckfestigkeiten führt.

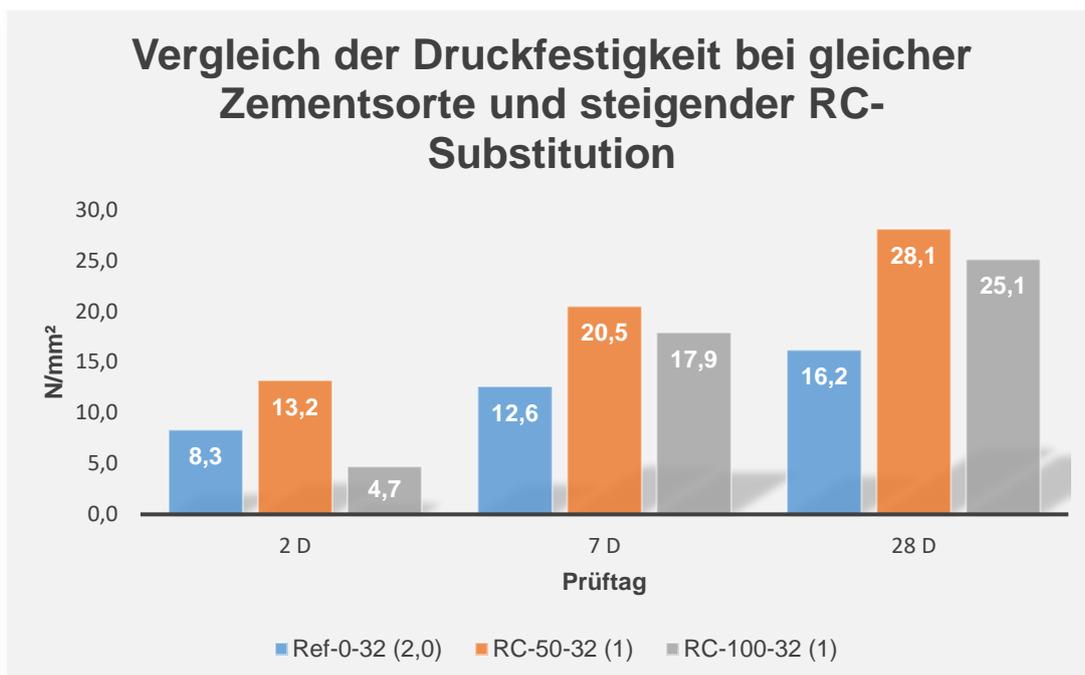


Abbildung 4.11: Gegenüberstellung Druckfestigkeitswerte der Mörtelrezepturen mit CEM II/A-LL 32,5 R

4.5 Versuchsplanung und –durchführung unter praktischen Bedingungen im Feldversuch

In diesem Kapitel werden neben der Übertragung der Laborergebnisse auf die praktische Anwendung im Feldversuch, auch die betontechnologischen Untersuchungen und deren Auswertung an den Spritzmörtel- und Spritzbetonkörpern erläutert. Die daraus abgeleitete Gebrauchstauglichkeit der feinen Fraktion aus aufbereitetem Betonbruch für das Trockenspritzverfahren wird aufgezeigt und belegt die Anwendung außerhalb der normativen Regelungen.

Während der Vorbereitungsphase wurde entschlossen, diverse Untersuchungen erst am erhärteten Spritzbeton bzw. -mörtel durchzuführen.

Alle Versuchsdurchführungen im Feldversuch wurden auf dem Betriebsgelände der Firma Build a Rock GmbH⁸⁸ getätigt. Geschäftsführer, Ansprechpartner und ingenieurtechnischer Berater ist Herr Dipl.-Ing. Jens Brand.

4.5.1 Vorbereitende Maßnahmen

Im Vorfeld der praktischen Feldversuche wurden vorbereitende Maßnahmen und logistische Absprachen mit dem Industriepartner Herrn Brand der Firma Build a Rock GmbH getroffen. Entsprechend den Anforderungen der DIN EN 14488-1:2005-11 „Prüfung von Spritzbeton“ wurden für die Spritzversuche insgesamt neun Prüfplatten hergestellt werden. Nach Abschnitt 4.3 der DIN EN 14448-1 können Stahlbleche (4 mm Stärke) oder Sperrholz (min. 18 mm Stärke) für die Prüfplatten verwendet werden. In der Praxis wird als Synonym auch die Bezeichnung „Spritzkasten“ verwendet; dieser Begriff wird im Weiteren benutzt. Für die Versuche im vorliegenden Bericht wurde ein Spritzkasten aus Holz in den Abmaßen 50 x 50 x 12 cm angefertigt. Die Dicke von 12 cm wurde gewählt, um eine ausreichende Höhe zur Entnahme eines 100 mm Betonkerns gewährleisten zu können. Nach DIN EN 14488-1, Abschnitt 5.4 müssen die Spritzkästen einen Winkel von 20° zur Senkrechten während des Spritzvorgangs aufweisen. Wie in Foto 4.9 ersichtlich ist, wurde auf die vierte (untere) Schalungswand verzichtet, damit sich kein Rückprall in dem Spritzkasten sammelt und später Teil des erhärteten Spritzkörpers werden könnte.

⁸⁸ build a rock GmbH, Heinrich-Albrecht-Straße 16, 03042 Cottbus; <https://buildarock.de/>



Foto 4.9: Aufgestellte Spritzkästen aus Sperrholzplatten für die Spritzversuche [Foto: Fischer]

In Anlehnung an die Rezepturen aus den Laboruntersuchungen wurden sowohl für die Fraktion 0/4 für die Spritzmörtelanwendung (Bezeichnung „M“), als auch die Fraktion 0/8 für die Spritzbetonanwendung (Bezeichnung „B“) verschiedene Mischungszusammensetzungen (vgl. Tabelle 4.12) aufgestellt. Eine Substitution mit der jeweiligen rezyklierten Kornfraktion erfolgte in den Schritten 50, 75 und 100 M.-%. Wie auch im Labor kam eine Referenzrezeptur zur Anwendung, welche von der Fa. Build a Rock GmbH zur Verfügung gestellt wurde. Diese wird bei Bauprojekten des Betriebes im Kunstfelsenbau verwendet. Am Tag der Versuchsdurchführung stand lediglich die Trockenmörtelsorte „SAKRET Spritzmörtel SM 2P“ mit dem Größtkorn von 2 mm zur Verfügung (hier: Ref-M Brand), welche eine Vergleichbarkeit bei der späteren Versuchsauswertung nur bedingt zulässt.

Tabelle 4.12: Rezepturbezeichnung und Substituierungsgrad der Spritzkörper

Rezepturbezeichnung	Ref-M Brand	RC-M 0	RC-M 50	RC-M 75	RC-M 100
GK-Verhältnis Verwendung RC-GK 0/4 (bzw. 0/2 bei Referenz)	100% nat. GK	100% nat. GK	50 % nat.- 50 % RC-GK	25 % nat.- 75 % RC-GK	100% RC-GK
Rezepturbezeichnung	-	RC-B 0	RC-B 50	RC-B 75	RC-B 100
GK-Verhältnis Verwendung RC-GK 0/8	-	100% nat. GK	50 % nat.- 50 % RC-GK	25 % nat.- 75 % RC-GK	100% RC-GK

Das Bindemittel Zement wurde im Labor abgewogen, in verschließbaren Eimern aufbewahrt und erst am Tag der Versuchsdurchführung vor Ort mit Hilfe eines Doppel-Rührwerks mit der jeweiligen Gesteinskörnung vermengt. Letztere wurde direkt aus den bereits auf dem Betriebsgelände angelieferten Big Bags vom Zwischenlager bei Forst (vgl. Kapitel 4.1) entnommen und nach der Wägung in Mörtelkübeln abgefüllt. Die Referenzmischung wurde einem auf demselben Betriebsgelände befindlichen Silo direkt entnommen (siehe Foto 4.10, linke obere Ecke).

Für die Mörteltrockenmischung wurde ein Zement der Festigkeitsklasse 52,5 R und für die Betontrockenmischung ein Zement mit der Festigkeitsklasse 42,5 R verwendet. Ursprünglich war die Verarbeitung ausschließlich eines CEM I 52,5 R vorgesehen, jedoch ist – aufgrund des höheren Mehrverbrauchs im Zuge der Versuchsdurchführungen mit der Trockenmörtelmischungen – auf den verfügbaren Zement der Sorte CEM I 42,5 R für die Trockenbetonmischung zurückgegriffen worden. Das verwendete Gesteinskörnungsgemisch in den angelieferten Big Bags hatte eine geringe lagerbedingte Feuchte aufgewiesen von < 4 M.-%; die Big Bags waren bis zum Tag des Feldversuchs stets vor Witterungseinflüssen geschützt.

Die Zusammensetzung der Trockenspritzmischungen (für Mörtel und Beton) für die Herstellung der Spritzkörper (inkl. einer veranschlagten Rückprallmenge von 25 M.-%) sind dem Anhang 6 zu entnehmen.



Foto 4.10: Einrichtung der Versuchsvorbereitung

4.5.1 Ausführung der Spritzarbeiten

Die Spritzarbeiten wurden durch Jens Brand, Geschäftsführer der Build a Rock GmbH und ausgebildeter Spritzdüsenführer, ausgeführt. Unter Einweisung konnte auch ein Studierender an einem Probe-Spritzkasten die Technik des Trockenspritzverfahrens kennenlernen (siehe Foto 4.11). Für die Arbeiten waren zwei Arbeitskräfte erforderlich, zum Befüllen der Spritzmaschine „WM 14“ der Fa. Werner Mader GmbH und zum anderen der Spritzdüsenführer selbst.

DIN EN 14487:2007-01 Teil 2 beschreibt die Ausführung von Spritzbetonarbeiten. So ist es wichtig, dass der Untergrund, frei von Staub ist und vorgenässt wird (Abschnitt 5 der zuvor genannten DIN EN). Weiter ist bei der Ausführung von Spritzarbeiten darauf zu achten, dass stets der gleiche Abstand zur Spritzfläche gehalten und auf kreisende Bewegungen geachtet wird. Bei einem Winkel von 90° senkrecht zur Spritzfläche ist mit dem geringsten Rückprall zu rechnen. Zur verbesserten Haftsicherheit am Untergrund sind in diesem Fall mit Spritzkästen aus Holz zuerst die Ecken zu füllen und dann von unten nach oben zu arbeiten.

Nach Abschluss der Spritzarbeiten an den insgesamt neun Spritzkästen, erfolgt die Nachbehandlung. Diese wird in DIN EN 14488-1: 2005 -11 Abschnitt 5.4 und DIN EN 14487:2007-1 Abschnitt 9.3 näher erläutert. So darf der Spritzkasten bzw. der Spritzkörper für eine Zeitdauer von 18 h nicht bewegt werden. In dieser Zeit ist auf übliche Verfahren der Nachbehandlung zurückzugreifen, um einen Feuchtigkeitsverlust und somit ggf. Schwindrisse zu verhindern. Da zur Zeit der Ausführung eine Außentemperatur von 24°C mit leichtem Wind vorherrschte, wurden die Spritzkästen mit feuchten Tüchern abgedeckt.

Eine Bearbeitung bzw. Glättung der Oberfläche nach dem Spritzvorgang kann sich negativ auf die Qualität und spätere Festigkeit des Spritzbetons auswirken. Eine spritzraue Oberfläche stellt daher keine Qualitätseinbußen dar.



Foto 4.11: Studierender bei der Ausführung eines Probespritzvorganges

Nach jedem Spritzvorgang wurde der Rückprall des Spritzmörtels/-betons aufgesammelt und gewogen. Anhand einer späteren Wägung der erhärteten Spritzkörper (nach 24 h) konnte der Rückprall prozentual zur Gesamtmenge berechnet werden (siehe Tabelle 4.13).

Tabelle 4.13: Rückprallwertetabelle

Rezepturbezeichnung	Ref-M Brand	RC-M 0	RC-M 100	RC-M 75	RC-M 50	RC-B 0	RC-B 100	RC-B 75	RC-B 50
Rückprall in kg	12,85	23,1	21,3	26,5	22,8	19,3	13,3	25,9	30,6
Rückprall prozentual	15 %	23 %	19 %	23 %	20 %	17 %	12 %	23 %	31 %

Die weitere Nachbehandlung bzw. Lagerung der Spritzkörper erfolgte bis zum Prüftag nach 28 Tagen in einem Wasserbecken sowie einem wassergefüllten Container auf dem Betriebsgelände. (vgl. Foto 4.12 rechts). Der gleichmäßige Wasserstand wurde regelmäßig kontrolliert. Am dritten Tag nach den Spritzarbeiten wurden die Spritzkörper ausgeschalt und erneut im Wasserbad gelagert. Die Wasserlagerung entspricht den Vorgaben des Anhangs der DIN EN 12390-2:2019-10 „Prüfung von Festbeton, Teil 2 Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen“.

Die einzelnen Schritte der Behandlung der Spritzkörper nach dem Spritzvorgang bis zur Lagerung sind in Foto 4.11 dokumentiert.

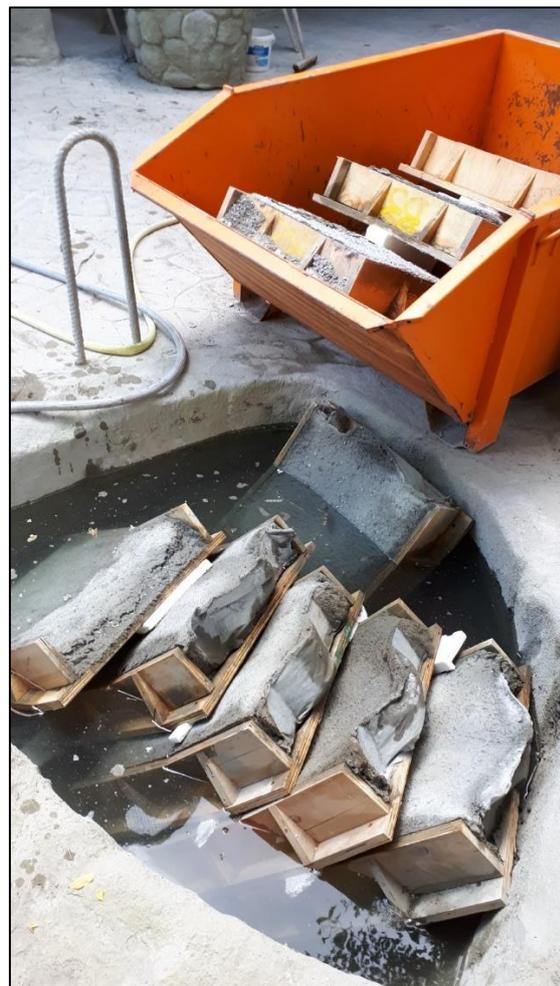


Foto 4.12: Nachbehandlung und Lagerung der Spritzkörper [Fischer]

An den erhärteten Spritzkörpern wurde eine Reihe von Festbetonprüfungen durchgeführt. Der nachfolgende Abschnitt beinhaltet die Durchführung und die Auswertung der

- Festigkeitsprüfung mittels Rückprallhammer (nach DIN EN 12504-2:2012-12⁸⁹),
- Druckfestigkeitsprüfung anhand von Bohrkernen (nach DIN EN 12390-3:2019-10⁹⁰),
- Prüfung auf die Wassereindringtiefe (nach DIN EN 12390-8:2019-10⁹¹ / Gottfried Lohmeyer).

Der Vollständigkeit halber soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass in den Prüfprotokollen im Anhang 7 und Anhang 8 sowie auf einigen Bildern divergierende Bezeichnungen der Spritz-/Probekörper auftauchen. Für eine eindeutige Zuordnung der Spritzkörper wurde im Zuge der Ausführung eine vereinfachte Kennzeichnung/Beschriftung vereinbart, um die Arbeitsprozesse im Feldversuch (Beschriftung der Spritzkästen), bei den späteren Probenahmen (Beschriftung der Bohrkern) sowie labortechnischer Untersuchungen (Kennzeichnung im Prüfprotokoll) zu optimieren. In Tabelle 4.14 ist die Gegenüberstellung der Rezepturbezeichnung und der Spritzkörperbeschriftung aufgeführt. Im Textteil sowie in den Tabellen und Diagrammen wird weiter die ursprüngliche Rezepturbezeichnung verwendet.

Tabelle 4.14: Zuordnung Rezepturbezeichnung und Beschriftung der Spritzkörper

Rezepturbezeichnung	Ref-M Brand	RC-M 0	RC-M 100	RC-M 75	RC-M 50
Beschriftung Spritzkörper	R(ef)	M1	M2	M3	M4
Rezepturbezeichnung	-	RC-B 0	RC-B 100	RC-B 75	RC-B 50
Beschriftung Spritzkörper	-	B1	B2	B3	B4

4.5.2 Zerstörungsfreie Prüfung der Betondruckfestigkeit mittels Rückprallhammer

Die Prüfung der Betondruckfestigkeit mittels Prüfhammer erfolgte nach DIN EN 12504-2:2021; kalibriert wurde der Rückprallhammer nach DIN EN 12504-2: 2012-12.

Das Prüfverfahren zur Bestimmung der Rückprallzahl mit Hilfe des Rückprallhammers (Schmidt-Hammer) dient dazu, das elastische Verhalten des Betons in oberflächennahen Schichten sowie die Gleichmäßigkeit von Ortbeton zu bestimmen. Durch die Messung der Oberflächenhärte kann die Druckfestigkeit von Beton näherungsweise ermittelt werden.

Die Prüfung erfolgte mit dem kalibrierten „Schmidt-Hammer“ Modell N/NR auf der Unterseite bzw. Schalungsseite der Spritzkörper nach 28 Tagen. Die DIN EN 12504-2:2021 erläutert die Anforderungen an die Prüfdurchführung, -protokollierung und -auswertung. Eine zu prüfende Messstelle sollte mindestens die Maße von 300 mm x 300 mm aufweisen. Da die Rückseiten durch

⁸⁹ Die DIN EN 12504-2:2012-12 wurde ersetzt durch DIN EN 12504-2:2021-10 Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung – Bestimmung der Rückprallzahl; Änderungen gegenüber der DIN EN 12504 Ausgabe 2012 bestehen darin, zur Kalibrierung der Geräte zwei verschiedene Referenzambosse zu verwenden und der zulässige Ergebnisbereich wurde verkleinert.

⁹⁰ DIN EN 12390-3:2019-10 Prüfung von Festbeton, Teil 3 Druckfestigkeit von Probekörpern

⁹¹ DIN EN 12390-8:2019-10 Prüfung von Festbeton, Teil 8 Wassereindringtiefe unter Druck; Druck: 500kPa

die Einschalung bereits glatt waren, mussten lediglich Staub bzw. lose Rückstände entfernt werden. Eine Messstelle hat mindestens neun Einzelmesswerte zu umfassen. Der Median dieser Werte ergibt den Rückprallwert R der jeweiligen Messstelle⁹². Anhand des vom Hersteller auf dem Prüfgerät aufgedruckten Diagrammes (Umwertungskurve) kann die Betondruckfestigkeit abgelesen werden. Mit diesem Wert kann nach Tabelle 12, S. 27 der DIN EN 206:2021-06 der Beton in die entsprechende Festigkeitsklasse eingeordnet werden. Alternativ kann die Druckfestigkeitsklasse auch direkt anhand der Tabelle B.1 aus DIN EN 13791:2020-02, S.43 für eine Messstelle ermittelt werden. Bei den hier ermittelten Festigkeitsklassen wurde auf die Empfehlung nach IKEN⁹³ zurückgegriffen, bei der, je nach Ausrichtung des Prüfhammers, ein Korrekturwert auf den ursprünglichen Rückprallwert addiert wird. Bei allen hier ermittelten Werten wurde der Prüfhammer vertikal im Winkel von 90° zum Boden gehalten.

Die Anordnung der Spritzkörper und die Durchführung der Messung sind in Foto 4.13 zu sehen.



Foto 4.13: Spritzkörper mit gekennzeichnetem Messstellenbereich (links) und Prüfung mit Rückprallhammer (rechts)

In der folgenden Tabelle 4.15 sind die gemessenen Mediane der Rückprallwerte, die Korrekturwerte nach IKEN, sowie die Zuordnung in eine entsprechende Druckfestigkeitsklasse dargestellt.

⁹² Eine Messstelle umfasst eine begrenzte Fläche, im Gegensatz zu einem Prüfbereich. Letzterer umfasst mehrere Messstellen eines Bauwerkteils aus Beton gleicher Grundgesamtheit.

⁹³ Iken, Hans W. et al.: Handbuch der Betonprüfung, 6. Auflage, Verlag Bau+Technik, 2012, Tabelle 104.1, S.514

Tabelle 4.15: Zuordnung der Rückprallwerte (Median + Korrekturwert) einer Druckfestigkeitsklasse

Rezeptur- bezeichnung	Medianwert gemessen	Korrekturwert bei Abweichungen der Schlagrichtung nach IKEN	Medianwert neu gerundet	Zuordnung Druckfestigkeitsklasse nach EN 206 nach Tab. B.1 DIN EN 13791:2020-02 ⁹⁴
Ref-M Brand	42	2	44	C30/37
RC-M 0	41	2	43	C30/37
RC-M 50	39	2,1	42	C25/30
RC-M 75	34	2,6	37	C16/20
RC-M 100	33	2,7	36	C16/20
RC-B 0	39	2,1	42	C25/30
RC-B 50	34	2,6	37	C16/20
RC-B 75	36	2,4	39	C20/25
RC-B 100	28	3	31	C8/10

Anmerkung: Alle Messreihen halten die nach DIN EN 12504-2 vorgegebene Abweichung von maximal 25 % vom Medianwert ein.

4.5.3 Bohrkernentnahme nach DIN EN 12504-1

Die DIN EN 12504-1:2021-02 Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 1 Bohrkernproben – Herstellung, Untersuchung und Prüfung der Druckfestigkeit regelt das Verfahren der Bohrkernentnahme aus Festbeton und legt deren Maßnahmen zur Bestimmung der Druckfestigkeit fest.

Nach DIN 18551:2014-08 gilt: „Aus den nach DIN EN 14488-1 gesondert gespritzten, nachbehandelten und gelagerten Prüfplatten sind nach Erreichen einer ausreichenden Festigkeit jeweils mindestens 3 Bohrkern mit 100 mm Durchmesser zu entnehmen.[...]“.

Abweichend von dieser Vorgabe wurden je Spritzkörper 3 Bohrkern mit dem Durchmesser von jeweils ca. 50 mm für die Druckfestigkeitsprüfung gezogen. Ein Verhältnis von $h/d = 1,0$ ist eingehalten worden. Die Druckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3:2019-10 „Prüfung von Festbeton, Teil 3 Druckfestigkeit von Probekörpern“ geprüft. Aus jedem Spritzkörper wurde zusätzlich jeweils ein Bohrkern mit dem Durchmesser 150 mm für die Bestimmung der Wassereindringtiefe (vgl. Kapitel 4.5.5) gezogen. Insgesamt wurden 27 Bohrkern mit dem Durchmesser von ca. 50 mm und neun mit 150 mm Durchmesser entnommen. Alle Bohrkern wurden bis zur Abholung durch das Baustoffprüflabor Bautzen drei weitere Tage im Wasserbad gelagert.

Die Bohrkernentnahme wurde mit dem Trockenbohrverfahren von Fa. Zech Beton Bohr Service auf dem Betriebsgelände der Fa. Jens Brand Felsenbau GmbH in Cottbus durchgeführt.

⁹⁴ vergleichbare Druckfestigkeiten nach DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08 entsprechend DIN EN 13791/A20:2022-04, Tab. NA.6 Mindestmedian für jeden Prüfbereich



Foto 4.14: Bohrkernentnahme und beschriftete Bohrkernkerne

4.5.4 Druckfestigkeitsbewertung

Die Bewertung der Druckfestigkeit erfolgt in Anlehnung an DIN EN 13791/A20:2017-02 Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder Bauwerksteilen; Änderung A20.

Vorbemerkung:

Im Zuge des Forschungsvorhabens DBV 317⁹⁵ haben SEFRIN et al. einen Aufsatz verfasst, in dem die Bewertung und der Vergleich für die „Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit von Bestandstragwerken nach DIN EN 13791:2020 für geringe Stichprobenumfänge“ mit bisherigen normativen Ansätzen beschrieben wird.⁹⁶ Kritisiert wird, dass „die prozentuale Überschätzung bei einer Auswertung nach dem alten Verfahren nach Ansatz B von DIN 2008 und die bei einer Auswertung nach den neuen Verfahren nach Abschnitt 8.1(7) und Abschnitt 8.3 von DIN 2020 [...] für die im Forschungsvorhaben DBV 317 [15] betrachteten Bauteile nahezu identisch [sind].“ Notwendig erachtet wird eine Anpassung der Verfahren, z.B. u.a. durch die Einführung eines Mindeststreumaßes oder es ist „weiterhin die Anwendung des modifizierten Ansatzes B von DIN EN 13791/A20:2017 für kleine Stichprobenumfänge ($3 \leq n \leq 7$) [...]“ zu empfehlen.

Abbildung 4.12 illustriert den Vergleich zwischen den Ansätzen aus DIN EN 13791:2020, Abschnitt 8.1(7) und nach dem modifizierten Ansatz B aus DIN EN 13791/A20:2017 an einer Betondeckenplatte. SEFRIN et al. kommen zu der Aussage: „Die möglichen Überschreitungen beim

⁹⁵ Sefrin, Rabea.; Glock, Christian: Bewertung neuer Verfahren zur Ermittlung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei Bestandstragwerken mittels indirekter und direkter Prüfmethode nach E DIN EN 13791:2018, Endbericht zum Forschungsauftrag DBV 317, 2020, TU Kaiserslautern; vgl. auch Sefrin, Rabea Anna: Ermittlung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit zur Nachrechnung von Bestandstragwerken, Dissertation 2022, TU Kaiserslautern

⁹⁶ Sefrin, Rabea, Glock, Christian, Schwabach, Enrico: Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit von Bestandstragwerken nach DIN EN 13791:2020 für geringe Stichprobenumfänge. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 1, 2021, S. 35–44.
<https://doi.org/10.1002/best.202000041>

modifizierten Ansatz B von DIN A20:2017 sind in der Regel gering und können für eine baustatische Bewertung nach^{97, 98, 99} als unbedenklich eingeschätzt werden.“

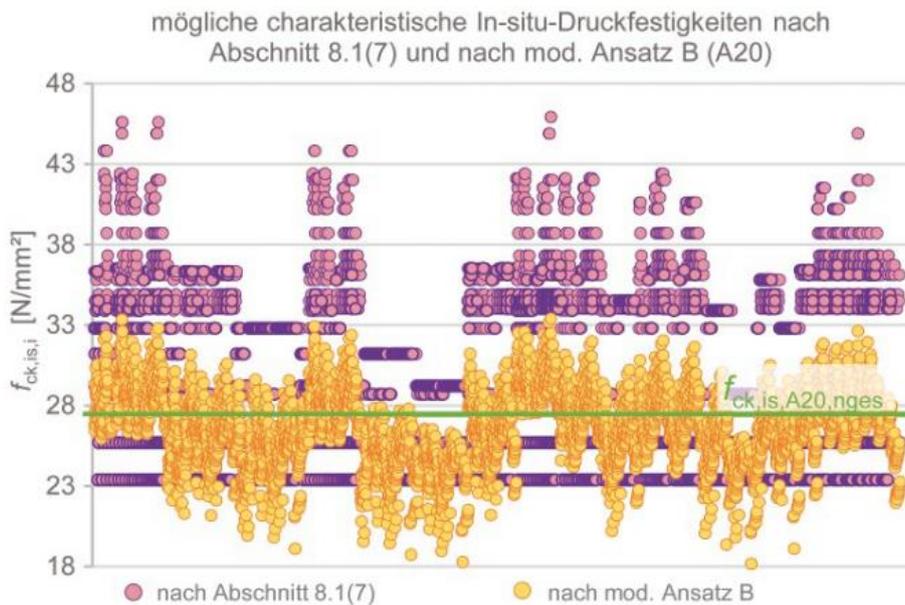


Abbildung 4.12: Mögliche charakteristische In-situ-Betondruckfestigkeiten nach DIN EN 13791:2020, Abschnitt 8.1(7) und nach DIN EN 13791/A20:2017, mod. Ansatz B (A20) für Deckenplatte LU¹⁰⁰

Aus dieser Erkenntnis resultierend wurde die Betondruckfestigkeit der Bohrkerne aus den Spritzkörpern nach dem modifizierten Ansatz aus der DIN EN 13791/A20:2017-02 berechnet. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die tatsächlichen In-situ-Druckfestigkeiten höher liegen können als nachfolgend berechnet und entsprechend ein bis zwei Festigkeitsklassen höher eingestuft werden könnten, da nach SEFRIN et al. die charakteristischen Betondruckfestigkeiten in der Regel unterschätzt werden (vgl. Abbildung 4.12).

Die Zuordnung der charakteristischen Druckfestigkeitswerte in eine Festigkeitsklasse zeigt Abbildung 4.13. Im Anhang befindet sich der „Prüfbericht Nr. BK 15/2019 zur Bestimmung der Gesteinsdruckfestigkeit“ des Baustoffprüflabors Bautzen (Anhang 7), sowie die Tabelle zur Auswertung und Zuordnung der Druckfestigkeitswerte in die entsprechende Festigkeitsklasse (Anhang 8).

⁹⁷ Weber, Michael, Schnell, Jürgen, Sefrin, Rabea: Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit im Bestand bei geringem Stichprobenumfang. Abschlussbericht zum AiF/IGF-Projekt Nummer 19346 N, Technische Universität Kaiserslautern, 2019

⁹⁸ Weber, Michael: Zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen. Dissertation 2019, TU Kaiserslautern.

⁹⁹ DAFStb-Heft 619 (2017) Sachstandbericht Bauen im Bestand – Teil II „Bestimmung charakteristischer Betondruckfestigkeiten und abgeleiteter Kenngrößen im Bestand“. Berlin, Beuth Verlag

¹⁰⁰ Abbildung aus: Sefrin, Rabea, Glock, Christian, Schwabach, Enrico: Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit von Bestandstragwerken nach DIN EN 13791:2020 für geringe Stichprobenumfänge. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 1, 2021, S. 35–44. <https://doi.org/10.1002/best.202000041>

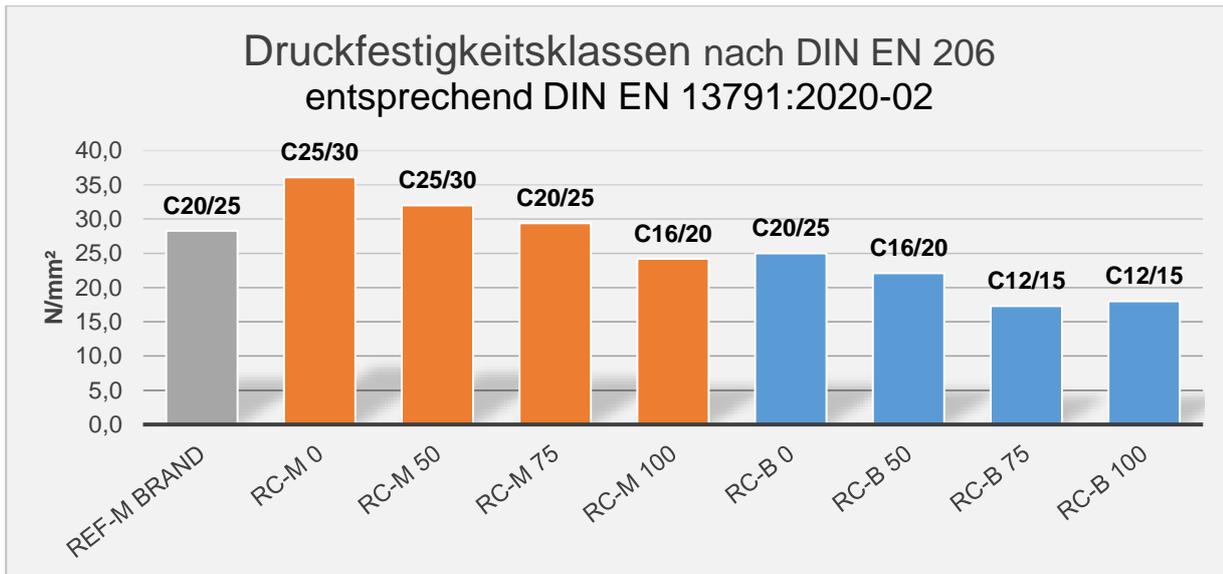


Abbildung 4.13: Festigkeitsklassen der geprüften Bohrkerne

Aus dem Prüfbericht zur Bestimmung der Gesteinsdruckfestigkeit des Baustoffprüflabors Bautzen gehen neben den Abmessungen der Prüfkörper, auch das Gewicht und die jeweilige Festbetondichte hervor (vgl. Anhang 7). In Abbildung 4.14 sind den Druckfestigkeitswerten die Ergebnisse aus der Dichtemessung in einem Punktdiagramm gegenübergestellt und in die Rezepturen (Mörtel, Beton) mit der jeweiligen RC-Substitution unterteilt.

Aufgrund des eingeschränkten Prüfumfanges lässt sich keine allgemeingültige Beziehung aufstellen, jedoch können Tendenzen festgestellt werden:

- bei steigender RC-Substitution von 0 M.-% bis 75 M.-% fällt die Gesamtdichte ab
- bei 100 %-iger RC-GK Substitution stellt sich eine höhere Dichte ein im Vergleich geringerer Substitutionsgrade

Die unterschiedlichen Festigkeiten zwischen Beton (rote Punkte) und Mörtel (blaue Punkte) sind auf die eingesetzten unterschiedlichen Zementarten (Beton CEM I 42,5 R und Mörtel CEM I 52,5 R) zurückzuführen. Ein eindeutiger und nachvollziehbarer Zusammenhang ist daher in dieser Hinsicht gegeben.

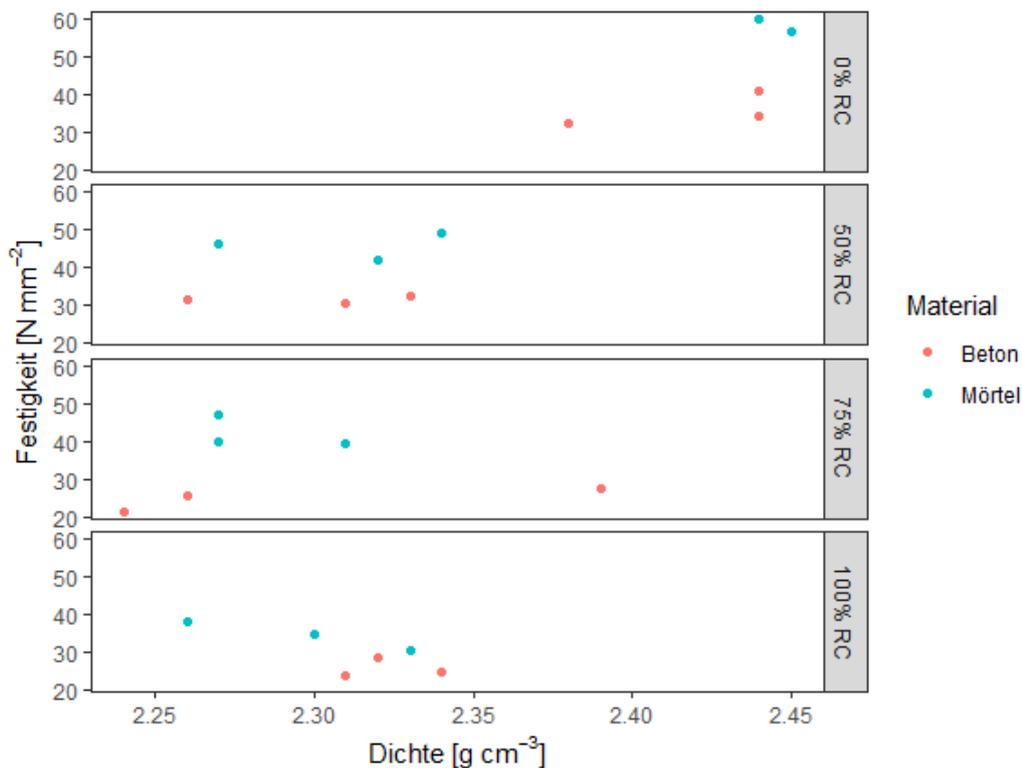


Abbildung 4.14: Punktdiagramm mit Festigkeit, Dichte und RC-Substitutionsanteil

4.5.5 Wassereindringtiefe

Die Wassereindringtiefe nach DIN EN 12390-8:2019-10 wurden ebenfalls vom Baustoffprüflabor Bautzen ermittelt. Dabei orientiert sich die Prüfung nach LOHMEYER.

Verwendet wurde jeweils der entnommene Bohrkern mit dem Durchmesser 150 mm aus den Spritzkörpern. Durch Einspannen in ein dafür vorgesehenes Prüfgerät, wurden die Oberfläche der Bohrkern 72 Stunden lang einem konstanten Wasserdruck ausgesetzt, es folgte eine 7 Tage Wasserlagerung und nochmals eine Phase von 72 h unter konstantem Wasserdruck. Im Anschluss wurde der Probekörper gespalten und die Wassereindringtiefe gemessen. In Millimeter gemessen ist sie ein Maß für den Wassereindringwiderstand eines Betons. Laut DIN EN 206-1 werden für den Festbeton hinsichtlich der Wassereindringtiefe keine spezifischen Vorgaben gegeben und die Prüfung wird auch nicht gefordert. Die nationale Anwendung der DIN 1045-2 (Abschnitt 5.5.3) gibt in Abhängigkeit der Bauteildicke Anforderungen vor. Beton mit einer hohen Wassereindringtiefe wird nach DIN 1045-2, Abschnitt 5.5.3, in seiner Zusammensetzung begrenzt. Folgende Kriterien werden festgeschrieben:

- bei Bauteildicken > 40 cm: w/z-Wert ≤ 0,70

- bei Bauteildicken ≤ 40 cm: w/z-Wert $\leq 0,60$, Zementgehalt ≥ 280 kg/m³ (270 kg/m³ bei Anrechnung von Zusatzstoffen); Mindestdruckfestigkeitsklasse C25/30

Der allgemeine Prüfablauf der Wassereindringtiefe ist in DIN EN 12390-8 geregelt. Eine Beurteilung der Ergebnisse ist dort nicht enthalten. D.h., der Auftraggeber gibt die max. Wassereindringtiefe vor bzw. sie wird durch die jeweilige Anwendung festgelegt. So ergänzt beispielsweise die ZTV-W¹⁰¹ den Abschnitt 5.5.3 der DIN EN 206-1 mit der Anforderung an den Wassereindringwiderstand für Wasserbauwerke. Für diese gilt ein Grenzwert von $e \leq 30$ mm für die Prüfung von Betonkörpern nach DIN EN 12390-8. Für WU-Beton im Bereich von z.B. Tiefgaragen oder Bauwerksgründungen kann in Abhängigkeit der hydrogeologischen Randbedingungen ein Grenzwert von 50 mm angesetzt werden.

Die Werte der gemessenen durchschnittlichen Wassereindringtiefen der Bohrkerne/Prüfkörper sind der Abbildung 4.15 zu entnehmen. In Orange ist der Grenzwert von 30 mm nach ZTV-W und in Rot der festgelegte Grenzwert von 50 mm eingetragen.

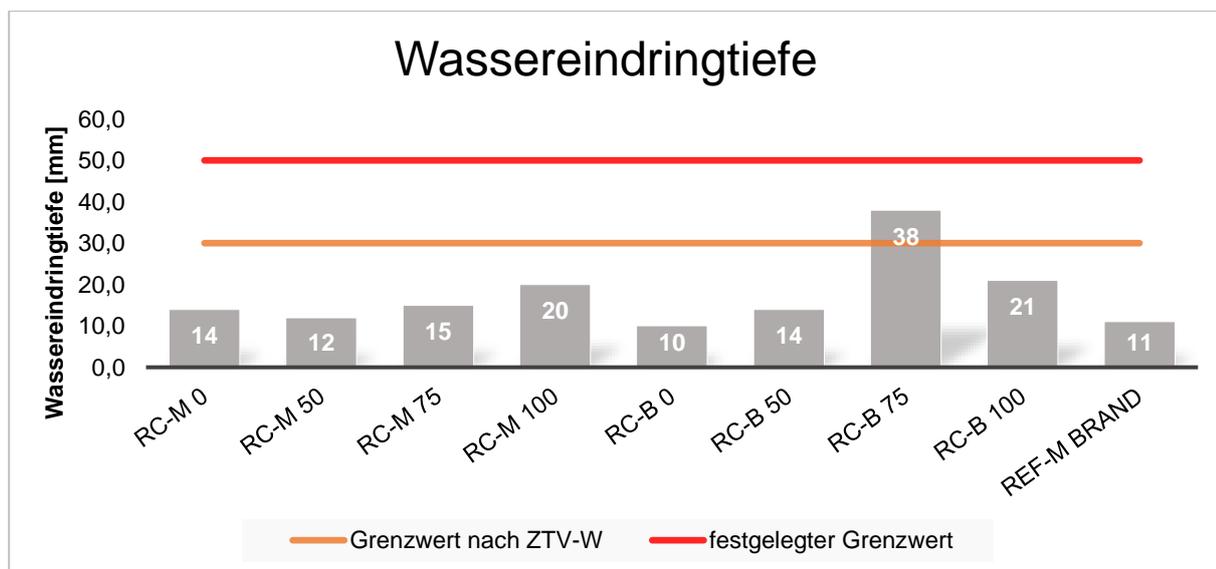


Abbildung 4.15: Mittlere Wassereindringtiefe an Prüfkörpern

4.5.6 Auswertung der praktischen Untersuchung im Feldversuch

In die Versuchsplanung, -vorbereitung als auch -durchführung wurden Studierende unter Anleitung aktiv eingebunden. Wichtige Erkenntnisse über die praktische Anwendung von Trockenmörtel- bzw. Trockenbetonmischungen mit der feinen Fraktion rezyklierter Gesteinskörnungen konnten gewonnen werden. Die Einbindung verschiedener Industriepartner hat reibungslos funktioniert.

¹⁰¹ Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2012, EU-Notifizierung Nr. 2012/491/D vom 17.08.2012, S. 13

Durch die Absprachen und Beratungen mit Herrn Jens Brand konnte ein logistisches Konzept inkl. der Nutzung von Geräten und Maschinen zur Durchführung der Trockenspritzarbeiten im Feld erarbeitet werden. Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit als auch aus Sicht der Ressourcenschonung, ergibt die **Auswertung des Rückpralls** beim Spritzmörtel/-beton unter Verwendung von 100 M.-% RC-GK einen positiven Effekt. Bei der Spritzmörtelrezeptur RC-M 100 wurde der geringste Rückprall von 19 M.-% erzielt. Noch geringer und damit der niedrigste Rückprallanteil insgesamt mit 12 M.-%, verzeichnete der Spritzversuch mit der Betonrezeptur RC-B 100. Den höchsten Wert erreichte mit 31 M.-% die Betonrezeptur mit 50 %-iger Substitution an RC-GK. Die Referenzmischung der Fa. Sakret erreichte einen Rückprallanteil von 15 M.-%.

Die Werte stellen jedoch keinen Anspruch auf eine Korrelation zwischen dem RC-GK-Anteil und dem Rückprallanteil dar. Dies müsste in weiteren Feldversuchen mit ergänzenden Versuchsparametern (Messung des Abstands zwischen Düsenkopf und Spritzkasten, Aufnahme des Aufprallwinkels, genauer Auffangmethodik etc.) unterlegt und aufgenommen werden. Die Höhe des potenziellen Einflusses der rezyklierten Gesteinskörnung auf den Rückprall-Anteil, die sich durch die feine Fraktion ergibt, ist zu ermitteln.

Eine Aussage bzw. Bewertung anhand der ermittelten Rückprallwerte über die Zuordnung in eine entsprechende Druckfestigkeitsklasse, durch die **zerstörungsfreie Prüfmethode**, lässt sich abgekoppelt von der Druckfestigkeitsermittlung an Bohrkernen nicht abschließend treffen. Jedoch lassen sich Aussagen über die Gleichmäßigkeit der Spritzmörtel- und Spritzbetonqualität des jeweiligen Spritzköpers treffen, bspw. durch eine Streumaßbetrachtung. Berechnet werden die Standardabweichung und der Variationskoeffizient der abgelesenen Rückprallwerte (siehe auch Anhang 8). Diese bewegen sich für alle Mörtel-Prüfreiheiten zwischen $\sigma_{\min} = 0,6$ und $\sigma_{\max} = 1,9$ ($v_{\min} = 1,8\%$; $v_{\max} = 4,6\%$) und für die Beton-Prüfreiheiten zwischen $\sigma_{\min} = 1,1$ und $\sigma_{\max} = 2,6$ ($v_{\min} = 3,1\%$; $v_{\max} = 6,9\%$). Der Referenzspritzmörtel weist eine Standardabweichung $\sigma = 1,5$ und einen Variationskoeffizienten $v_{\min} = 3,6\%$ auf. Die geringere Streuung der Rückprallwerte bei den Mörtelrezepturen spricht für eine gleichmäßigere Qualität der Beschaffenheit dieser Spritzkörper.

Anhand der an Bohrkernen ermittelten Druckfestigkeitsklassen, siehe Abbildung 4.13, lässt sich eine klare und bekannte Korrelation zwischen der **Druckfestigkeit** und dem Substitutionsgrad der rezyklierten Gesteinskörnung erkennen: je geringer der Anteil an RC-GK desto höher ist die Druckfestigkeit. Die höchste Einstufung mit der Betonfestigkeitsklasse C 25/30 erreicht dabei die Spritzmörtelrezeptur mit 100 M.-% natürlicher Gesteinskörnung. Wichtig ist jedoch darauf hinzuweisen, dass insgesamt drei verschiedene Zementarten (CEM II A-LL 32,5R, CEM I 52,5R und CEM I 42,5 R) zum Einsatz kamen und daher kein direkter Vergleich zwischen den Mörtel- und

Betonprüfreihen mit dem Zuschlag der Korngrößen 0/2 (Referenz), 0/4 (Mörtel) sowie 0/8 (Beton) gezogen werden kann. Jedoch ist erkennbar, dass die Referenzrezeptur der Firma Sakret im Verhältnis zur eingesetzten Zementart eine weitaus höhere Festigkeitsklasse erreicht. Nach Aussagen von Herrn Brand sei diese Rezeptur auf eine Festigkeitsklasse C30/37 projiziert. Die Divergenz kann unter Umständen an der Prüfmethode (Bohrkernprüfung mit $\varnothing \leq 50$ mm), der Anzahl geprüfter Bohrkerne, sowie der normativen Einordnung/Bestimmung der Druckfestigkeitsklasse (vgl. Kapitel 4.5.4) liegen. Daher wird empfohlen, bei der Bohrkernentnahme mindestens drei idealerweise fünf Bohrkerne mit einem Mindestdurchmesser von ≥ 75 mm auszuwerten, um eine höhere Genauigkeit und Aussagekraft sicherzustellen.

Für das Absinken der Druckfestigkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der RC-Substitution wird angenommen, dass der erhöhte Wasserbedarf aufgrund der erhöhten Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung insgesamt verantwortlich ist. Da bei den Rezepturen der Spritzmörtel/-betone im Feld keine Fließmittel verwendet wurden, empfiehlt es sich, ergänzende Versuche mit dessen Einsatz durchzuführen. In weiteren Untersuchungen wird angeraten, ein detailliertes Monitoring des jungen Spritzbetons durch Messung der Frühfestigkeitsentwicklung vorzusehen, Untersuchungen an Frischbeton(-mörtel)proben auf Wassergehalt zu absolvieren sowie unterschiedliche Herangehensweisen der Nachbehandlung zu testen.

Bei der Auswertung zur **Wassereindringtiefe** an jeweils einem Bohrkörper $\varnothing = 150$ mm lässt sich der positive Effekt der Spritzbetontechnik im Allgemeinen feststellen. Durch den erhöhten Aufpralldruck verdichtet sich das Beton-(Mörtel-)gefüge zu einem nahezu wasserundurchlässigen Baustoff. Abgesehen von der Spritzbeton-Rezeptur RC-B 75 unterschritten alle Spritzkörper den Grenzwert eines erhöhten Wassereindringwiderstand für Wasserbauwerke nach der ZTV-W von weniger als 30 mm. Damit eignet sich der Spritzmörtel/-beton für feuchtigkeitsbelastete Anwendungsbereiche.

Ansätze und Notwendigkeiten weiterer Untersuchungen zum Einsatz von Brechsanden in der Trockenspritzverfahrenstechnik

Neben den oben skizzierten Ergänzungen im Versuchsumfang und -art (Art und Anzahl der Bohrkerne, Monitoring der Frühfestigkeit sowie Nachbehandlungsstrategien), werden folgende weiterführenden Untersuchungen als wichtiger Bestandteil einer abschließenden Beurteilung zur Verwendung von Brechsanden im Trockenspritzverfahren gesehen:

- aufgrund der hohen Saugwirkung von rezyklierter Gesteinskörnung ist der **Frost-Tauwechsel-Effekt** zu prüfen
- für die Instandsetzung von Beton ist die Beurteilung des Haftverbundes zwischen Altbeton und Spritzbeton/-mörtelschicht unerlässlich. Mittels der Prüfung auf **Haftzugfestigkeit** ist dies

festzustellen. Diese Untersuchung ist bspw. notwendig bei der Modellierung der Oberflächen von Altbetonen.

- Da Befestigungsmittel in Bauten allgegenwärtig sind, hat der Spritzbeton als Untergrund bestimmte Anforderungen zu erfüllen. Je nach Zeitpunkt und Art der verschiedenen Befestigungssysteme werden die angreifenden Lasten auf unterschiedliche Weise in den Untergrund eingeleitet. Im Allgemeinen wird zwischen Formschluss, Reibschluss und Stoffschluss unterschieden. Beim Formschluss erfolgt die Lastübertragung zwischen Befestigungselement und Untergrund durch eine mechanische Verzahnung wie z.B. bei Kopfbolzen und Ankerschienen. Der Reibschluss entsteht bei der Lastübertragung beim Setzen von Spreizdübeln zwischen Dübel und Bohrwand. Beim Setzen von Verbunddübeln erfolgt der Antrag der einwirkenden ruhenden oder nicht ruhenden Last in den Untergrund über den Verbund.¹⁰² Die **Festigkeitsprüfung der Griffbefestigung** erfolgen nach DIN EN 12572-1 Anhang E.

Je nach Erwartungsziel kann die **Ausziehkraft** von bspw. Betondübel alternativ nach der DIN EN 12504-3:2005-07 geprüft werden.

¹⁰²Thiele, Catherina; Weber, Michael: Untersuchungen zur Korrelation von Druck- und Zugfestigkeit in alten, niederfesten Betonen als Grundlage für die Bestimmung der Tragfähigkeit von z.B. Befestigungsmitteln, 2016 Fraunhofer IRB Verlag

5 Übertragung der Untersuchungsergebnisse von RC-Spritzbeton-/mörtel auf ein Fallbeispiel

Das in diesem Kapitel vorgestellte Fallbeispiel behandelt die Anwendung von RC-Spritzbeton-/mörtel für einen künstlich zu errichtenden Kletterfelsen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der ressourcenschonenden Bauweise unter der Verwendung von gebrauchten Betonelementen.

Im Rahmen von Stegreifarbeiten wurden Studierende des Architekturstudienganges an der BTU unter Leitung von Prof. Jo Achermann, Fachgebiet Plastisches Gestalten, eingebunden (Aufruf und Skizzierung der Aufgabenstellung siehe Anhang 9 – Stegreif Kletterfelsen). Die entwickelten Entwürfe der Architekturstudenten/-innen eines solchen künstlichen Kletterfelsens sind in Kapitel 5.3.1 zusammengefasst und ausführlich im Anhang 10 aufgezeigt. Eine Vorzugsvariante mit integrierter Wettkampfwand, die am Arbeitsgebiet Bauliches Recycling erarbeitet wurde, wird ab Kapitel 5.3.2 dargestellt und einer ökologischen sowie ökonomischen Einschätzung unterzogen. Das Besondere des Bauvorhabens ist die Kombination von Re-use¹⁰³-Maßnahmen (Wiederverwendung von schon einmal in Nutzung gewesenen Betonplatten) und Recycling-Maßnahmen (Materialrecycling der feinen Fraktion von aufbereitetem Betonbruch).

Die auf dem BTU-Campus verfügbaren, abgelagerten Betonelemente sollen als Tragkonstruktion fungieren. Eine solche Konstruktion/Anwendung: waagerechte Stapelung der Betonplatten ist nicht neu, denn bundesweit wurden nach der Wiedervereinigung Deutschlands eine Vielzahl an künstlichen Kletterfelsen aus rückgebauten Betonplatten errichtet (siehe Kapitel 5.1). Neu ist aber, dass die Lagerfugen zwischen den Betonplatten wie auch die naturnahe Oberflächengestaltung der Kletterfelsenfassade ebenso aus RC-Spritzmörtel/-beton herstellbar sind.

Daneben ist es aber auch üblich, Spritzbeton auf einen Korb aus Bewehrungsseisen mit Putzträgermaterialien in Form des späteren Kletterfelsens aufzutragen; optisch und haptisch überzeugend (vgl. build a rock GmbH Katalog¹⁰⁴).

Obwohl das Bauvorhaben während der Projektlaufzeit der Forschungsarbeit aus finanziellen Gründen nicht umgesetzt werden konnte, wurden die wesentlichsten Vorarbeiten, bautechnologisch zu beachtenden Anforderungen, bautechnischen Untersuchungen als auch konzeptionellen Entwürfe für einen künstlichen Kletterfelsen erarbeitet. Diese grundlegenden Analysen sind auf solche Bauvorhaben übertragbar unter Berücksichtigung der jeweiligen Vorortsituation. Der erzielbare Mehrwert begründet sich in der effizienten und sinnvollen Kombination von Produkt- und Materialrecycling, insbesondere auch für den möglichen Einsatz von Brechsanden zur Spritzbeton-/mörtelherstellung.

¹⁰³ Re-use ist die Verlängerung der Nutzungs- und damit der Lebensdauer eines Produktes, um übliche Entsorgungsoptionen, wie bspw. das Recyceln (Zerkleinern im Sinne einer stofflichen Verwertung), zu vermeiden.

¹⁰⁴ www.buildarock.de

Im Folgenden werden die gängigsten Ausführungsarten einer „Künstlichen Kletteranlage“ (kurz: KKA) nach der Normenreihe DIN EN 12572, sowie die Bestandsaufnahme des verfügbaren Betonelementesortiments (Straßenbauplatten) auf dem Campus der BTU vorgestellt.

5.1 Ausführungsarten von Künstlichen Kletteranlagen

Im Folgenden sollen die gängigsten Formen von künstlichen Kletteranlagen kurz erläutert werden.

5.1.1 Kletteranlageninstallation an Bestandsgebäuden

Die Installation einer Klettervorrichtung an Bestandsgebäuden mit Betonoberfläche (siehe Foto 5.1), stellt die einfachste und kostengünstigste Variante einer KKA dar. Es besteht aber auch die Möglichkeit auf eine Mauerwerkswand Beton aufzuspritzen. In die herzustellenden Bohrlöcher in der Wand sind spezielle Betondübel (siehe Abbildung 5.1, oben) eingebracht und an diesen, Klettergriffe oder Bohrhakenlaschen (Abbildung 5.1, unten) eingeschraubt.

Die Machbarkeit zur Umsetzung dieser Kletterwand bedarf einer baustatischen und -technischen Untersuchung des Bestandsgebäudes. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die Bestimmung der Betondruckfestigkeit sowie der Ausziehungskraft von Sicherungshaken bzw. Griffbefestigungen wie in DIN EN 12572-1:2017 Anhang E normativ festgelegt ist. (vgl. Foto 5.2)



Foto 5.1: Kletterwand des Menschenrechtszentrum Cottbus , Foto: www.menschenrechtszentrum-cottbus.de



Abbildung 5.1: Betondübel (oben) und Bohrhaken (unten) , Foto: www.bergfreunde.de



Foto 5.2: Prüfung der Ausziehungskraft eines Sicherungshakens , Foto: <http://www.trainingsanlagen.info/kletteranlagen.htm>

5.1.2 Kletteranlagen aus Stahl und Holz

KKA können auch aus Holz oder Stahl bestehen. Im Außenbereich wird eher die Variante des Stahltragwerks, im Innenbereich hauptsächlich Holz verwendet. KKA aus Stahl sind kostenintensiv, aber widerstandsfähiger gegen Wind- und Schneelasten und können hohe Traglasten aufnehmen. Im Innenbereich wird fast ausschließlich mit Holz gearbeitet.

Auf die Unterkonstruktion werden, sowohl im Außen- als auch Innenbereich, Brettschichtholzplatten montiert, welche je nach Anforderung wetterfest beschichtet sind. Für einen hohen Reibungsfaktor werden diese Holzplatten mit Quarzsand beschichtet und auf Wunsch des Kunden farblich gestaltet. Das Foto 5.3 zeigt den Zustand des Rohbaus und der Fertigstellung einer KKA in Leichtbauweise (Holz).

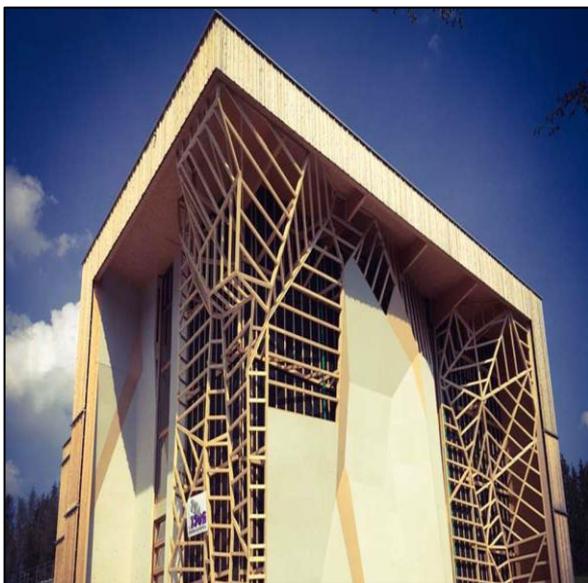


Foto 5.3: Phasen einer Künstlichen Kletteranlage in Leichtbauweise , Foto: © KletterZ (links), www.klee-gartenbau.de (rechts)

In der Sporthalle der BTU Cottbus-Senftenberg auf dem Hauptcampus befindet sich bereits eine Indoor-Kletterwand, welche allerdings den Kapazitätsanforderungen als auch dem sportlichen Niveau einer Vielzahl von Teilnehmenden nicht mehr genügt. Dies sind nur einige Gründe für den Entwurf eines neuen Kletterfelsens, welcher dem gesteigerten Leistungsniveau und dem Platzbedarf entsprechen und darüber hinaus mit herausstechenden ökologischen, bautechnischen und architektonischen Ansprüchen glänzen soll. In Kapitel 5.3 bis 5.5 wird dies weiter erörtert.

5.1.3 Monolithische Stahlbeton-Konstruktion aus Spritzbeton (Freiform)

Bei einer Stahlbeton-Konstruktion handelt es sich um eine klassische Außenanlage für KKA, welche eine naturähnliche Struktur wiedergibt. Der Beton wird hierbei durch ein Spritzverfahren auf die

Bewehrungskonstruktion aufgetragen. Die nachstehenden Fotos zeigen exemplarisch Kletterfelsenkonstruktionen, welche in Krauschwitz im Freistaat Sachsen (Foto 5.4) und in Berlin (Foto 5.5) zu finden sind.



Foto 5.4: Kletterfelsen „Eiszeitdorf“,
Foto: © Richter und Kaup



Foto 5.5: Kletterfelsen „Schwedter Nordwand“,
Foto: www.buildarock.de

5.1.4 Betonelemente-Stapel-Konstruktion aus gebrauchten Betonelementen (Y-Form)

Bei dieser Konstruktionsweise werden gebrauchte Balkon- bzw. Loggienelemente, Deckenelemente aus Plattenbauten, Straßenplatten oder adäquat großformatige Betonelemente übereinandergestapelt und dienen als Grundgerüst für den Kletterfelsen. Drei meist gleichlange Schenkel sind jeweils in einem Winkel von 120° zueinander angeordnet. Diese sog. Y-Form mit seinem monolithischen Kern als Kragstütze (siehe Anhang 11) besitzt eine hohe Aussteifung. Allerdings bietet diese Bauweise bisher nicht einen so großen Freiraum für die Gestaltung des Kletterfelsens wie es sonst möglich ist (z.B. für Überhänge, Aussparungen, Auskragungen, etc.). Ein von der Firma Brand & Schluttig GmbH im Jahr 1995 eingereichtes Gebrauchsmuster¹⁰⁵ beschreibt diese mittlerweile acht Mal in Deutschland errichtete Bauweise der Y-Anordnung der Plattenelemente zu einem Kletterfelsen. Auf den nachfolgenden Fotos sind der erste Kletterfelsen dieser Bauart in Kolkwitz sowie der Bauprozess und fertiggestellte Felsen in Guben zu sehen.

¹⁰⁵ DEPATISnet, Deutsches Patent- und Markenamt (Hrsg.): Gebrauchsmuster DE 295 05 633 U 1, Künstliches Felsengebilde, 1995



Foto 5.6: Kletterfelsen Y-Variante in Kolkwitz, Baujahr 1995, Foto: © FamilieKrueger



Foto 5.7: Kletterfelsen Y-Variante im Bau, Guben Baujahr 2004, Foto: DAV Guben



Foto 5.8: Fertiggestellter Felsen mit gefärbter Spritzbetonschale, „Reichenbacher Zinne“ in Guben, Foto: DAV-Guben

5.2 Verfügbares Betonelementesortiment auf dem BTU Campus

Straßenbauplatten aus Beton werden im Bereich des Verkehrswegebbaus, im Garten- und Landschaftsbau sowie in der Landwirtschaft verwendet; sie werden daher auch unter der Rubrik „Verkehrsflächenplatten“ zusammengefasst. Sie dienen dabei der temporären als auch dauerhaften Nutzung als befestigte Fläche für Radlasten bis 100 kN. Besonders nachgefragt werden sie, wenn die Gefahr der Überschwemmung bzw. Unterspülung durch Regen oder Bewässerung (Landwirtschaftsbau) droht. Sie besitzen eine im Gegensatz zu den flachen Fertigteilen aus Kunststoff oder Stahl, ausreichende Höhe gegen Schlamm und Unebenheiten und bieten auch auf weichem Untergrund eine hohe Standsicherheit. Die Berechnung und Spezifizierung wird in Anlehnung an die DIN EN 1991-2¹⁰⁶ geführt. Für die Erstellung von Kurven innerhalb einer Baustraße existieren Konusplatten (3000 x 400/600 x 200 mm), welche in Kombination mit den Standardplatten verlegt werden können.

Insgesamt werden solche Straßenbauplatten in der Praxis heutzutage eher seltener eingesetzt, da die Kosten der Herstellung, des Transports und des Versetzens sehr hoch sind. Je nach Umgang

¹⁰⁶ DIN EN 1991-2:2010-12 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken

und Beanspruchung weisen sie, v.a. nach mehrmaligem Verlegen, stärkere Abnutzungserscheinungen auf.

5.2.1 Bestandsaufnahme der Straßenbauplatten

Ein Stapel von etwa 400 gebrauchten Straßenbauplatten (siehe Foto 5.9), die während der Bauzeiten von Gebäuden auf dem Zentralcampus der BTU zwischen 2005 und 2015 mehrmals umverlegt wurden bzw. als diverse Baustraßen dienten, sind für das hier zu bearbeitende Projekt / für den Bau eines Kletterfelsens seitens des Präsidiums der BTU freigegeben worden.

Die Platten lagerten in zwei nacheinander gestapelten Reihen mit max. 10 Platten übereinander (ohne Zwischenhölzer) unweit des Sportplatzes der BTU auf dem Zentralcampus.

Im ersten Schritt erfolgte eine Bestandsaufnahme von den Straßenbauplatten. Neben der Erfassung der Anzahl und geometrischen Abmessungen wurde der Bauzustand nach organoleptischen Merkmalen bewertet und an ausgewählten Platten die Betondruckfestigkeit geprüft. Die Betondruckfestigkeit wurde unter Zuhilfenahme des Schmidt Rückprallhammers als auch anhand von Bohrkernen experimentell ermittelt.¹⁰⁷

Die Bohrkernentnahmen und -prüfungen erfolgten durch Mitarbeiter der Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMPA) an der BTU. Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse, ergänzt um Rechercheergebnisse, dargestellt.



Foto 5.9: Lagerplatz der Straßenbauplatten

¹⁰⁷Hobracht, Maik; Fischer, Jakob; Schötzgik, Paul: Aufnahmen der auf dem Zentralcampus der BTU zwischen- gelagerten Straßenbauplatten, Studienprojekt, BTU C-S, AG Bauliches Recycling, 2018.

Geometrie, Anzahl und Gewicht der Platten

In Tabelle 5.1 sind die vorhandenen Platten mit den entsprechenden Geometrien, der Anzahl sowie dem Gewicht aufgeführt (absteigend geordnet nach Anzahl der Platten).

Die Druckfestigkeitsprüfung an drei Bohrkernen ergab eine mittlere Festbetonrohddichte von 2,3 kg/dm³ (vgl. Anhang 12 Prüfbericht). Entsprechend der Recherchen (nach Aussagen eines Mitarbeiters der Firma Peitzer Betonwerk GmbH und dem Datenblatt von RAILBETON® (vgl. Anhang 13) ist mit eine Rohddichte von 2.500 kg/m³ zu rechnen. Aufgrund der Unsicherheit der Druckfestigkeitsermittlung anhand von nur drei Bohrkernen aus verschiedenen Elementen und für eine für den Bauantrag notwendige statische Berechnung des Fundamentkörpers, wird die höhere Rohddichte von 2.500 kg/m³ bei den Berechnungen verwendet. Das Gesamtgewicht der Straßenbauplatten ist somit um 43 Tonnen¹⁰⁸ schwerer angesetzt.

Tabelle 5.1: Charakteristische Maße der Straßenbauplatten aus der Bestandsaufnahme

Bezeichnung	Maße [mm]			Anzahl	Fläche [m ²]	Volumen [m ³]	Rohddichte ² [kg/m ³]	Einzelgewicht [kg]	Gesamtgewicht [kg]	
	Länge	Breite	Höhe							
SBP_1	3000	1000	200	168	3	0,6	2500	1500	252.000	
SBP_2	3000	400/600 ¹	200	132	1,5	0,3	2500	750	99.000	
SBP_3	3000	2000	200	34	6	1,2	2500	3000	102.000	
SBP_4	3000	600	200	14	1,8	0,36	2500	900	12.600	
SBP_5	3000	500	200	12	1,5	0,3	2500	750	9.000	
SBP_6	3000	1200	200	10	3,6	0,72	2500	1800	18.000	
SBP_7	3500	1000	200	5	3,5	0,7	2500	1750	8.750	
SBP_8	3000	1500	200	5	4,5	0,9	2500	2250	11.250	
SBP_9	3500	1200	200	4	4,2	0,84	2500	2100	8.400	
SBP_10	3000	400	200	4	1,2	0,24	2500	600	2.400	
SBP_11	3000	1100	200	3	3,3	0,66	2500	1650	4.950	
SBP_12	3000	1200	300	2	3,6	1,08	2500	2700	5.400	
SBP_13	2200	1900	200	2	4,18	0,836	2500	2090	4.180	
Gesamtanzahl				395	Gesamtgewicht				537.930	

1: Da die langen Seiten dieser Straßenbauplatten konusförmig verlaufen, bestehen unterschiedliche Maße der kurzen Seiten (Breite), d.h. 400 mm und 600 mm.

2: angenommen aus dem Datenblatt von RAILBETON®, vgl. Anlage 13

¹⁰⁸ 537.930 kg [bei 2,5 kg/dm³] – 494.896 kg [bei 2,3 kg/dm³] = 43.034 kg

Es sind entsprechend der Auflistung 395 Straßenbauplatten vorhanden (vgl. Anhang 9, Tab. 1, Seite 4) mit einem Gesamtgewicht von etwa 538 t. Der am häufigsten vorhandene Plattentyp ist der mit dem Standardmaß 3 x 1 m (insgesamt 168 Stk.) sowie die Konusplatte mit den Maßen 3 x 0,6/0,4 m (insgesamt 132 Stk.). Die Platte mit dem geringsten Gewicht beläuft sich auf 550 kg und die schwerste Platte hat ein Gewicht von 2.800 kg. Abgesehen von 11 Platten besitzen alle anderen eine Länge von 3 m. Die Dicke bzw. Höhe der Platten liegt bei 0,2 m, lediglich zwei Platten weisen eine Höhe von 0,3 m auf. Die Breiten liegen zwischen 0,4 m und 2,0 m.

5.2.2 Bautechnische Untersuchungen an gebrauchten Straßenbauplatten

Beurteilung des Bauzustandes

Für die Beurteilung des Bauzustandes wurde ein sich in der Praxis bewährtes Arbeitsmittel¹⁰⁹ zugrunde gelegt. Unterteilt wird in vier Bauzustandsstufen (BZS):

BZS 1: Funktionsfähigkeit entsprechend den projektierten Parametern vorhanden

- keine Mängel und Schäden
- geringe Qualitätsminderung an der Oberfläche der Bauwerkteile (BWT)
- sichtbare Haar- und Trockenrisse

BZS 2: Funktionsfähigkeit vorhanden

- Beschädigung örtlich begrenzte Abplatzungen an der Oberfläche
- äußere Sichtflächen teilweise verwittert
- gering markierte, örtlich begrenzte Rostbahnen
- sichtbare Verbindungsmittel aus Stahl oberflächlich leicht angerostet
- geringe örtlich begrenzte Durchfeuchtungen

BZS 3: Funktionsfähigkeit eingeschränkt

- großflächige Beschädigungen an der Oberfläche
- breite, teilweise durchgehende Längs- und Querrisse, aber örtlich begrenzt
- äußere Sichtflächen stark verwittert, mit Abblätterungen
- Bewehrung teilweise freiliegend, beginnende Unterrostung
- sichtbare Verbindungsmittel aus Stahl gelockert und angerostet
- starke örtliche Durchfeuchtungen oder -ölungen
- beginnende Ausblühungen an den Oberflächen

¹⁰⁹ Arbeitsmittel zur verbesserten Vorbereitung der Reproduktion baulicher Grundfonds in der Industrie, Teil 3, 1985, in: Mettke, Angelika: Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus – Umweltwissenschaften, Band 5, Taunusstein 1995, S. 228 f. bzw. Anlage 1

BZS 4: Funktionsfähigkeit nicht mehr gewährleistet

- umfangreiche Beschädigungen mit weitgehender Zerstörung der BWT
- tiefe, durchgehende Längs- und Querrisse über den gesamten Querschnitt
- Bewehrung vielfach freiliegend, stark verrostet, mit Querschnittsverringeringen
- Unterrostungen der Bewehrung mit Verlust der Bindung (Haftung) und Absprengungen des Betons
- sichtbare Abweichungen aus der Konstruktionsachse bzw. -ebene
- sichtbare Verbindungsmittel aus Stahl stark verrostet, teilweise zerstört
- großflächige Durchfeuchtung oder -ölung, Einfluss aggressiver Medien
- umfangreiche Ausblühungen an den Oberflächen

Ungeachtet der geplanten Nachnutzung der Betonelemente erfolgte eine Bauzustandseinschätzung nach diesen aufgeführten visuellen Merkmalen. Allerdings konnten aufgrund der Lagerung nur die oben aufliegenden Platten gründlich analysiert werden. Die Ergebnisse von 41 bewerteten Straßenbauplatten sind dem Anhang 14 entnehmbar. An einigen Platten sind Risse, Abplatzungen und freiliegende Bewehrungsseisen festgestellt worden. Die Bewehrungsseisen ließen sich an einigen offenen Stellen (Ausbrüche) eindeutig identifizieren. Es handelt sich dabei um Flachstahl mit dem rechteckigen Querschnitt 10 x 5 mm.

Von den 41 aufgenommenen Straßenbauplatten wurden 8 Platten der Bauzustandsstufe 4 (BZS 4: Funktionsfähigkeit nicht mehr gewährleistet) zugeordnet. D.h., diese Betonelemente wären im Normalfall auszusondern bzw. werden als nicht wiederverwendungsg geeignet eingestuft. Für die geplante sekundäre Anwendung der Straßenbauplatten zum Bau des Kletterfelsens jedoch wird empfohlen, auch diese Betonplatten einzusetzen, da sie in einem Mörtelbett verlegt werden. Auch für die Lagerfugen ist geplant, Spritzmörtel bzw. -beton zu verwenden. In diesem Zuge können beschädigte Betonelemente instandgesetzt, bspw. Risse oder Ausbrüche, geschlossen werden. Zu beachten ist hierbei die DIN EN 1504, in der der Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken geregelt ist.

Zerstörungsfreie Untersuchungen

Die zerstörungsfreien **Druckfestigkeitsmessungen** erfolgten an 17 Straßenbauplatten nach DIN EN 12504-2¹¹⁰ mit Hilfe des Rückprallhammers vom Typ „Schmidt-Hammer“ Modell N/NR (siehe Foto 5.10).

Der Median dieser Werte ergibt den Rückprallwert R der jeweiligen Messstelle. Anhand des vom Hersteller auf dem Prüfgerät aufgedruckten Diagrammes (Umwertungskurve) wird die anzusetzende Betondruckfestigkeit abgelesen. Mit diesem Wert kann nach Tabelle 7 aus DIN EN 206-1:2001-

¹¹⁰ DIN EN 12504-2:2012-12, Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung – Bestimmung der Rückprallzahl

07¹¹, S.21 der Beton in die entsprechende Festigkeitsklasse eingeordnet werden (hier: Methode 2; vgl. Abbildung 5.2). Alternativ kann die Druckfestigkeitsklasse auch direkt anhand der Tabelle NA.2 aus DIN EN 13791:2008-05¹², S.7 ermittelt werden (hier: Methode 1). Bei den ermittelten Festigkeitsklassen wurde auf die Empfehlung nach IKEN¹³ zurückgegriffen bei der, je nach Ausrichtung des Prüfhammers, ein Korrekturwert auf den ursprünglichen Rückprallwert addiert wird. Bei allen hier ermittelten Werten wurde der Prüfhammer vertikal im Winkel von 90° zum Boden gehalten.



Foto 5.10: Prüfung der Druckfestigkeit mittels Prüfhammer; rechts: Bewehrungsseisen (Flachstahl 1,0 x 0,5 mm)

¹¹ DIN EN 206-1:2001-07, Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

¹² DIN EN 13791:2008-05, Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen

¹³ Iken, Hans W. et al.: Handbuch der Betonprüfung, 6. Auflage, Verlag Bau+Technik, 2012, Tabelle 104.1, S.514

Die folgende Übersicht (Abbildung 5.2) erläutert die Vorgehensweisen der Methoden 1 und 2 für die Zuordnung in eine Festigkeitsklasse.

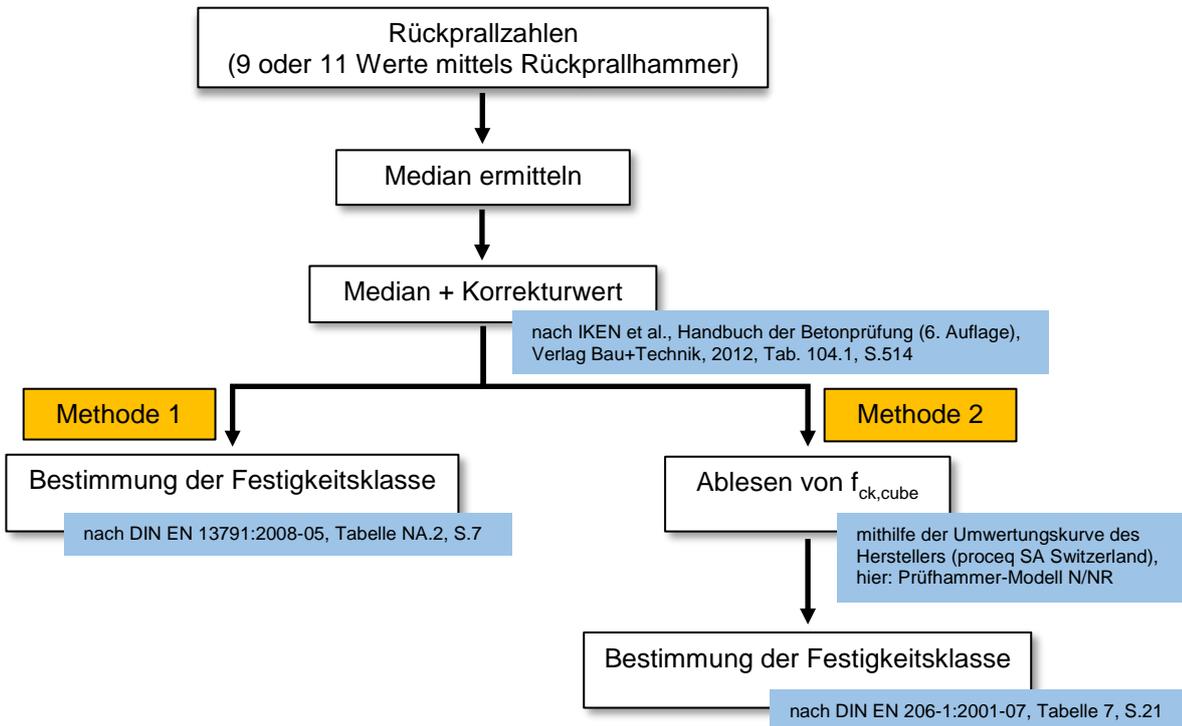


Abbildung 5.2: Vorgang zur Bestimmung der Festigkeitsklasse anhand von Rückprallzahlen

Aus den Straßenplatten Nr. 338, 87 und 189 (blau hinterlegt in Tabelle 5.2) wurden Bohrkerns gezogen, um die Druckfestigkeit im direkten Verfahren in der FMPA an der BTU zu prüfen.

In der folgenden Tabelle 5.2 ist der Median der Rückprallwerte aufgeführt, die ermittelt Druckfestigkeit im indirekten Verfahren sowie die Zuordnung in eine entsprechende Druckfestigkeitsklasse dargestellt.

Tabelle 5.2: Auswertung der Rückprallwerte zur Festigkeitszuordnung

Platten- nummer	Maße [mm]			Rückprallwert - Median	Rückprallwert - Median inkl. Korrektur ¹	Betondruck- festigkeit $f_{ck,cube}$ [N / mm ²] ²	Methode 1 Zuordnung der Festigkeits- klasse ³	Methode 2 Zuordnung der Festigkeits- klasse ⁴
	Länge	Breite	Höhe					
338	3000	1000	200	36	38	44	C25/30	C30/37
356				40	42	52	C30/37	C40/50
241				43	45	58	C35/45	C45/55
87				44	46	60	C40/50	C50/60
39				45	47	62	C40/50	C50/60
141				48	50	68	C50/60	C55/67
234				48	50	68	C50/60	C55/67
189				48	50	68	C50/60	C55/67

Platten- nummer	Maße [mm]			Rückprallwert - Median	Rückprallwert - Median inkl. Korrektur ¹	Betondruck- festigkeit $f_{ck,cube}$ [N / mm ²] ²	Methode 1 Zuordnung der Festigkeits- klasse ³	Methode 2 Zuordnung der Festigkeits- klasse ⁴
	Länge	Breite	Höhe					
169	3000	400/600	200	33	36	41	C20/25	C30/37
392				38	40	48	C30/37	C35/45
385				42	44	56	C35/45	C45/55
214				44	46	60	C40/50	C50/60
391				49	51	70	C50/60	C55/67
101	3000	2000	200	55	57	70	C50/60	C55/67
311	3000	600	200	40	42	52	C30/37	C40/50
1	3500	1200	200	41	43	54	C30/37	C40/50
198	3000	400	200	44	46	60	C40/50	C50/60
99	2200	1900	200	39	41	50	C30/37	C40/50

1: nach IKEN et al., Handbuch der Betonprüfung (6. Auflage), Verlag Bau+Technik, 2012, Tab. 104.1, S.514
2: laut Angaben des Herstellers (proceq SA Switzerland) entspricht dies dem wahrscheinlichsten Wert einer mittleren Würfeldruckfestigkeit eines Würfels 150x150x150 mm; abgelesen aus der Umwertungskurve für Betonprüfhammer Modell N/NR
3: nach Tabelle NA.2 aus DIN EN 13791:2008-05, S.7
4: nach Tabelle 7 aus DIN EN 206-1:2001-07, S.21

Die Ergebnisse der indirekten Methode zur Druckfestigkeitsbestimmung mittels Rückprallhammer weisen deutliche Schwankungen der Festigkeitsklassen auf. Selbst innerhalb des gleichen Plattentyps mit gleichen Abmaßen bestehen mitunter hohe Schwankungen in den Prüfergebnissen, z.B. die Konusplatten mit den Plattennummern 169 und 391: $f_{ck,min} = 41 \text{ N/mm}^2$ und $f_{ck,max} = 70 \text{ N/mm}^2$

Die Einordnung in eine mittlere Festigkeitsklasse der Gesamtheit der Straßenbauplatten, kann nicht erfolgen, da diese mitunter 5 bzw. 6 Festigkeitsklassen auseinander liegen (siehe Tabelle 5.2, Methode 1: C20/25 <-> C50/60 und Methode 2: C30/37 <-> C55/67).

Zerstörende Untersuchungen

Wie bereits o.a. wurden an drei Straßenbauplatten Bohrkernproben gezogen (siehe Foto 5.11), welche hinsichtlich ihrer **Druckfestigkeit**¹¹⁴ als auch ihres Chloridgehaltes¹¹⁵ untersucht wurden. Da angenommen wurde, dass die Straßenbauplatten Tausalzen ausgesetzt waren, ist auch dieses Kriterium untersucht worden, um Chlorid induzierte Korrosionsschäden ausschließen zu können. Die Ergebnisse sind dem Prüfbericht in Anhang 12 zu entnehmen. Bei der Betondruckfestigkeit wurde anhand der Bohrkernprüfungen ein Unterschied von bis zu 30 N/mm² festgestellt ($f_{c,is,Bohrkern100,min} = 48 \text{ N/mm}^2$ und $f_{c,is,Bohrkern100,max} = 79,6 \text{ N/mm}^2$).

¹¹⁴ nach DIN EN 12504-1:2009-07, Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 1: Bohrkernproben – Herstellung, Untersuchung und Prüfung der Druckfestigkeit; Anmerkung: Mittlerweile existiert eine überarbeitete Norm mit gleichnamigem Titel (DIN EN 12504-1:2019-09)

¹¹⁵ nach DIN EN 1744-5:2006, Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 5: Bestimmung der säurelöslichen Chloride



Tabelle 5.3: Druckfestigkeit entnommener Bohrkerne

Bohrkern-Nr.	BK_1	BK_2	BK_3
Plattennummer	87	338	189
Betondruckfestigkeit $f_{c, is, Bohrkern100}$ [N / mm ²]	76,7	48,0	79,6
Festigkeitsklasse (EN 206-1)	C60/75	C35/45	C60/75

Foto 5.11: Bohrkernentnahme an Straßenbauplatte Nr. 87

Der **Chloridgehalt** der analysierten Bohrkerne schwankt von 0,006 M-% bis max. 0,030 M-% (siehe Anhang 12 Prüfbericht FMPA). Damit wird der gültige maximale Grenzwert für bewehrten Beton von 0,04 M-%¹¹⁶ deutlich unterschritten.

Dem Prüfbericht ist weiter zu entnehmen, dass das Gefüge des Betons als dicht bewertet wird. Jedoch sind unterschiedliche Gesteinskörnungen verwendet worden. Einerseits handelt es sich um Kiesbeton, andererseits um gebrochene Körner aus Grauwacke. An den Rändern einiger Körner wurden an der Grenzfläche zur Zementsteinmatrix Reaktionssäume festgestellt. Dies könnte ein Hinweis einer AKR sein. Zur Abklärung des Sachverhalts wären jedoch weitere Untersuchungen erforderlich.

5.2.3 Auswertung der Untersuchungsergebnisse zur Eignungsfeststellung

Anmerkung zur Zwischenlagerung der Straßenbauplatten

Die Straßenbauplatten sind mehrmals auf dem Zentralcampus der BTU umgelagert worden vor der begonnenen Projektbearbeitung. Die Platten waren ohne Stapelhölzer übereinandergestapelt (siehe Foto 5.9). Dies hat zur Folge, dass bei einem erneuten Umschlag ein erhöhter Aufwand einzuplanen ist. Die Anordnung von Stapelhölzern ermöglicht ein problemloses Einschieben der Gabeln des Staplers.¹¹⁷

¹¹⁶ Betontechnische Daten, Abschnitt 6.3.6; <https://www.betontechnische-daten.de/de/6-3-6-anforderungen-an-den-chloridgehalt>

¹¹⁷ Berufsgenossenschaft Holz und Metall: BGI 734, Transport und Lagerung von Platten, Schnittholz und Bauelementen, Oktober 2009, S. 20

Zuordnung einer Druckfestigkeitsklasse für die Weiterverwendung der Straßenbauplatten im Bauvorhaben Kletterfelsen

Wird das Ergebnis der Druckfestigkeitsuntersuchung an den Bohrkernen BK_1, BK_2 und BK_3 (siehe Tabelle 5.4) der Platten Nr. 87, 338 und 189 herangezogen, so erkennt man, dass die Ergebnisse durch Methode 2 nach Abbildung 5.2 näher an den tatsächlichen Druckfestigkeitsklassen durch Bestimmung der Bohrkernuntersuchung liegt, als Methode 1.

Tabelle 5.4: Abweichung der Festigkeitsklassen zwischen zerstörender und zerstörungsfreier Untersuchung

Bohrkern-Nr.	Plattennummer	Methode 1 Zuordnung der Festigkeitsklasse	Festigkeitsklasse Bohrkernuntersuchung	Methode 2 Zuordnung der Festigkeitsklasse
BK_1	87	C40/50	C60/75	C50/60
Abweichung um		4 Klassen		2 Klassen
BK_2	338	C25/30	C35/45	C30/37
Abweichung um		2 Klassen		1 Klasse
BK_3	189	C50/60	C60/75	C55/67
Abweichung um		2 Klassen		1 Klasse

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Druckfestigkeit (zerstörungsfrei und zerstörend), wird für die gebrauchten Straßenbauplatten eine Mindestfestigkeitsklasse von C30/37 angesetzt. Diese Einschätzung liegt angesichts der Durchschnittswerte aus den Rückprallhammer-Versuchen sowie der Bohrkern-Druckfestigkeiten auf einer sicheren Seite.

Beurteilung der Straßenbauplatten für die Weiterverwendung im Bauvorhaben Kletterfelsen

Aus den Bauzustandsuntersuchungen (Anhang 14) geht hervor, dass von den insgesamt 41 zugänglichen und untersuchten Straßenbauplatten acht in die „Bauzustandsstufe 4“ eingeordnet wurden, da sie durchgehende Risse aufwiesen bzw. durchgebrochen waren. Das bedeutet, dass deren Funktionsfähigkeit als nicht mehr gewährleistet angesehen wird und daher eine Weiterverwendung ausgeschlossen wird.

Die Anforderungen an die Herstellung des geplanten Kletterfelsens weichen jedoch von den primären Nutzungsanforderungen als Straßenbauplatte ab. Unter Hinzuziehung von Fachexperten bei Vor-Ort-Begehungen, Konsultationen externer Tragwerksplaner und der Einbindung von

Ausführenden wie Herrn Jens Brand¹¹⁸, die über weitreichende Erfahrungen beim Kletterfelsenbau aus gebrauchten Betonelementen verfügen, wurde davon ausgegangen, dass Straßenbauplatten mit Rissen größer 0,2 mm oder stärkere Randabplatzungen für diesen Anwendungsfall keine Weiterverwendungseinschränkung darstellen.

Die Annahme bzw. Aussage, dass Abplatzungen, größere Risse und offenliegende Bewehrungseisen für die weitere Verwendung der Straßenbauplatten im Rahmen des Kletterfelsenbaus nicht hinderlich sind, werden durch folgende Aspekte untersetzt:

- Es entstehen keine dynamischen Lasten, sowie hohe Momentenkräfte durch die Verwendung als gestapelte Türme für den Bau und den Betrieb eines Kletterfelsens.
- Die Straßenbauplatten werden ohne große Auskragungen übereinandergestapelt.
- Eine aus Bewehrungseisen und –matten sowie Spritzbeton hergestellte 15 cm dicke Schale sorgt für zusätzliche Tragsicherheit, sowie ausreichend Schutz vor eindringenden potenziell schädigenden Stoffen/Flüssigkeiten.

Um jedoch eine AKR auszuschließen bzw. Schäden des zu bauenden Bauwerks vorzubeugen, wird seitens der Projektbearbeiter empfohlen, eine solche Untersuchung unbedingt durchzuführen. Zwar sind keine netzartigen Rissbildungen oder anderweitige makroskopische Merkmale festgestellt worden, die auf eine AKR hindeuten könnten, aber die Analysen der Bohrkernprüfungen geben Anlass genug. Auf der Grundlage mikroskopischer Untersuchungen können u.a. innere Gelbildungen und Reaktionsräume an der Peripherie der Gesteinskörnung sicher geortet werden¹¹⁹.

Für die ganzheitliche Bewertung der Weiterverwendungseignung der Straßenbauplatten kann anhand der Ergebnisse der untersuchten Elemente eine mathematische Herangehensweise zur Weiterverwendungsrate in Betracht gezogen werden. „Dabei ist die Anzahl der für eine Weiterverwendung geeigneten Parts (pWV) der Gesamtzahl der zu beurteilenden Parts (pg) gegenüberzustellen“¹²⁰. Die entsprechende Formel lautet:

$$WV_r = \frac{\sum_{i=1}^x pWV}{p_g} * 100 [\%],$$

mit WV_r Weiterverwendungsrate

¹¹⁸ Jens Brand: Geschäftsführer der Felsenbaufirma „Build a Rock GmbH“ und Miteinreicher des Gebrauchsmusterschutzes zur Errichtung von Kletterfelsen aus gebrauchten Betonfertigteilelementen

¹¹⁹ Stark, Jochen; Wicht, Bernd: Dauerhaftigkeit von Beton, 2. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg 2013, S. 330-331

¹²⁰ aus: Materialien zur Abfallwirtschaft, Wiederverwendung von Gebäuden und Gebäudeteilen, Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), Bearbeiterin Mettke, Angelika et.al., 1999, S. 40

Die hier anzusetzende Weiterverwendungsrate im Rahmen der Anwendung als Bestandteil eines Kletterfelsens beträgt demzufolge

$$WV_r = \frac{41 - 8}{41} * 100 = 80 \%$$

Obwohl nur rund 10 % der Grundgesamtheit (41 von 395) der vorhandenen Elemente genauer untersucht werden konnten, wird aufgrund von optischen Bewertungen und Beobachtungen während des Umlagerungsprozesses der Straßenbauplatten eine Weiterverwendungsrate von insgesamt 80 % angesetzt.

5.3 Entwurfsplanung einer künstlichen Kletteranlage

Im Vorfeld der Stegreifarbeiten wurden seitens der Projektleiterin etliche Sondierungsgespräche zum Bauvorhaben mit Herrn Bernhard Laws, Leiter der Zentraleinheit Hochschulsport an der BTU, mit dem GF des Deutschen Alpenvereins, Dr. Olaf Tabor, mit dem GF des Österreichischen Kletterverbandes Herrn Heiko Wilhelm und infrage kommenden Bedarfsträgern geführt.

Im Ergebnis der Absprachen ist die Broschüre „Projekt Kletterfelsen – eine Idee greift Raum“ erarbeitet worden (s. Anhang 15). Auf dieser Basis ist dem Präsidium der BTU C-S, vertreten durch den Präsidenten, den Vizepräsidenten und der Kanzlerin, das Bauvorhaben von der Projektleiterin vorgestellt worden. Vorausgegangen waren umfassende Recherchen zu realisierten künstlichen Kletterfelsen hinsichtlich der gestalterischen Möglichkeiten, der Investitionskosten, Nutzer- und Betreiberfragen etc. Recherchiert wurde auch, ob die BTU C-S mit diesem nachhaltigen Bauvorhaben ein Alleinstellungsmerkmal in der Hochschullandschaft hätte. All diese Grundüberlegungen und das entwickelte Betreiber- und Nutzungskonzept überzeugte alle eingebundenen Akteure und Entscheidungsträger. Es trat regelrecht eine Euphorie zutage.

So konnte in einem weiteren Schritt die Standortfrage mit der Abteilungsleiterin Finanzen und Innere Organisation der BTU C-S Frau Claudia Eckert geklärt werden. Entschieden wurde, den Kletterfelsen auf dem Zentral-Campus der BTU in der Nähe der Sporthalle zu errichten (s. Anhang 15, Seite 6).

Im Rahmen einer Bachelorarbeit, die gemeinsam vom Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik und dem Arbeitsgebiet Bauliches Recycling an der BTU C-S betreut wurde, wurde die Eignung dieses Standortes mit erfolgreichem Ergebnis geprüft.

Im Zeitfenster der Erarbeitung des Projektes wurde das ehemalige Lehrgebäude 1C, in Stahlbetonskelettbauweise errichtet, auf dem Zentral-Campus der BTU rückgebaut. In Absprache mit dem Bauherrn, dem Landesamt für Bauen und Verkehr Brandenburg, wurde abgestimmt, dass

die vom Arbeitsgebiet Bauliches Recycling ausgewählten Betonelemente zur Verfügung gestellt werden. Im Bestandsgebäude sind 200 Betonplatten gekennzeichnet worden, die außer den Straßenbauplatten für den Bau des Kletterfelsens verbaut werden sollten. Die veranschlagten Mengen und geometrischen Maße der Straßenbauplatten sind auch in Abb.2 des Anhangs 9 ersichtlich.

5.3.1 Stegreif-Entwürfe zum Bauvorhaben Kletterfelsens

Im Zuge eines Stegreifs - wie o.a. - sind Studierende aus den Fachrichtungen Architektur und Stadt- und Regionalplanung der BTU C-S aufgerufen worden, konzeptionelle Entwürfe für einen Kletterfelsens zu erstellen. Der Stegreif hatte zum Ziel, eine Vielzahl an gestalterischen bzw. baulichen Umsetzungsmöglichkeiten zu entwickeln. Interdisziplinär zusammengesetzte Teams mit kletterkundigen Studierenden waren ausdrücklich erwünscht.

Die Besonderheit des zu konzipierenden Kletterfelsens lag in der Kombination von Straßenbauplatten und den ehemals verbauten Betonelementen aus dem Lehrgebäude 1C. Der Rückbau des LG 1C fand im IV. Quartal 2016 statt.

Die Studierende wurden auch darüber informiert, Spritzbeton einzusetzen. Die plastische Oberflächengestaltung war, entsprechend der Anforderungen an künstliche Kletterfelsens, zu beachten.

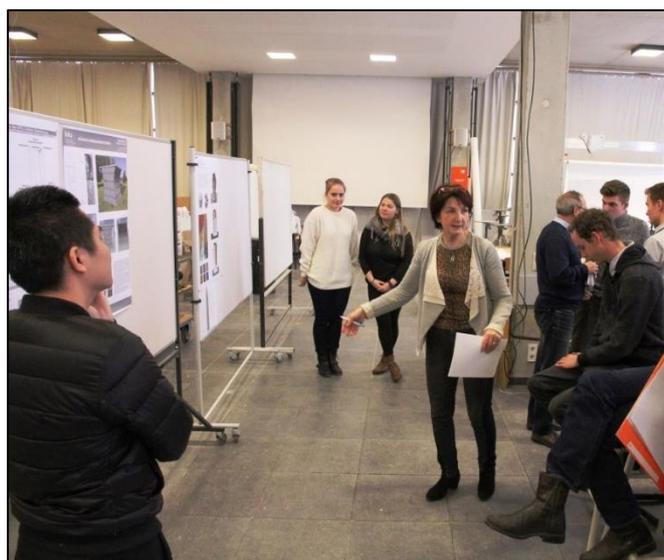
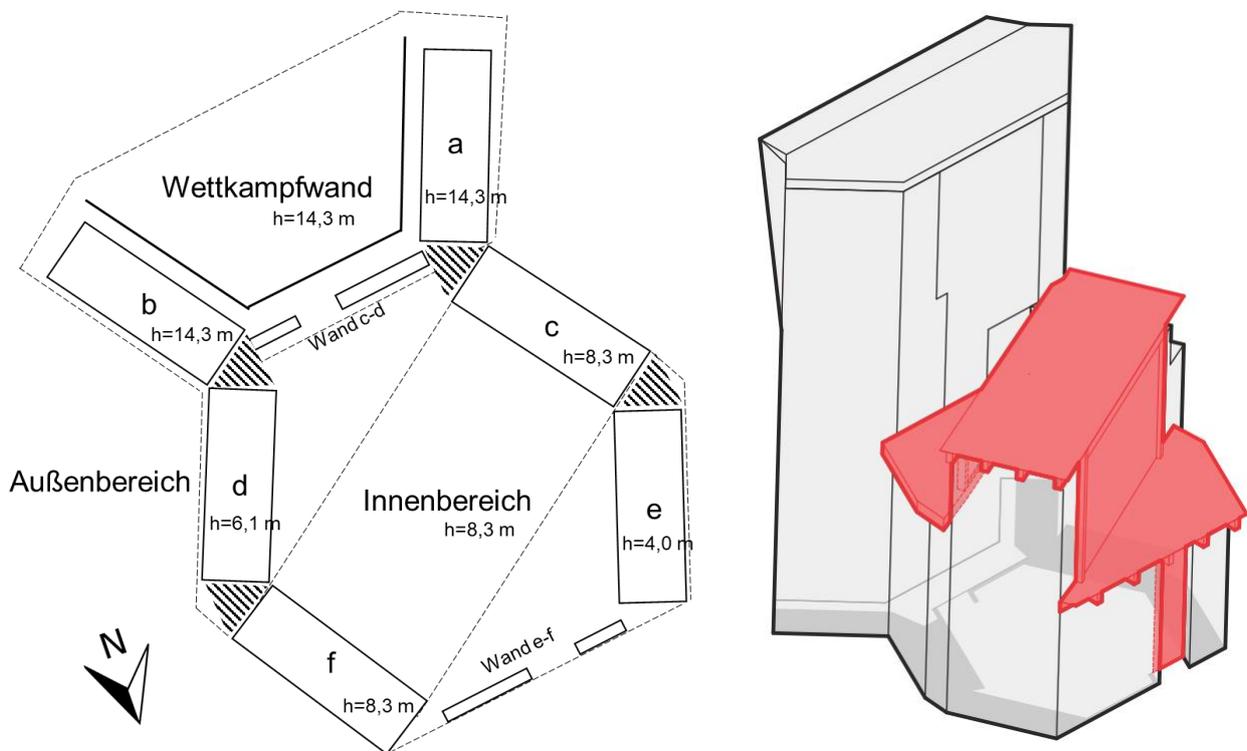


Foto 5.12: Stegreif-Aushang/Aufruf (links), Präsentationen im Rahmen des Stegreifs (rechts)

Die ausgearbeiteten und eingereichten Stegreif-Entwürfe sind dem Anhang 10 zu entnehmen. Neben diesen Entwürfen ist während der Projektlaufzeit dieses Forschungsberichtes eine weitere Masterarbeit mit dem Titel „Untersuchung und Konzeptionierung zur Wiederverwendung von Betonelementen in Kombination mit Recycling-Beton in unterschiedlichen Anwendungsfeldern“¹²¹ ausgegeben und betreut worden. Die in dieser Arbeit entwickelte und mit der Projektleiterin abgestimmte Variante wurde für den Bau des Kletterfelsens an der BTU C-S favorisiert. Nachfolgend wird diese Vorzugsvariante vorgestellt.

5.3.2 Empfehlung und Erläuterung der Vorzugsvariante¹²²

Bei der Vorzugsvariante handelt es sich um eine zur Y-Form (vgl. Kapitel 5.1.4) abweichende Anordnung von Plattenstapel in Form einer „Zange“. Die Idee besteht darin, eine umrahmende Gestaltung aus den Plattenstapeln c, d, e, f entsprechend Abbildung 5.3 und daraus resultierend einen Innenbereich zu schaffen. Es entstehen vier Bereiche, welche für den gestalterischen als auch funktionellen Nutzen der Kletteranlage zur Verfügung stehen. Zum leichteren Verständnis der Bereiche – wie nachfolgend erläutert – dienen die Entwurfszeichnungen im Anhang 16.



¹²¹ Fischer, Jakob: Untersuchung und Konzeptionierung zur Wiederverwendung von Betonelementen in Kombination mit Recycling-Beton in unterschiedlichen Anwendungsfeldern, Masterarbeit, Arbeitsgebiet Bauliches Recycling, BTU C-S, 2019.

¹²² Die in diesem Bericht dargestellte Vorzugsvariante inklusive Erläuterungen bildet einen Ausschnitt aus der Masterarbeit von Herrn Jakob Fischer ab.

Abbildung 5.3: Schematische Grundrissdarstellung und 3D-Darstellung (Nordansicht) der Vorzugsvariante

Bereich 1: Wettkampfwand [südliche Öffnung der Türme a und b ermöglicht die Integration einer Wettkampfwand]

Die Wettkampfwand mit einer Höhe von knapp 15 Metern und einer Breite von etwa 10,5 Metern wird an der südlichen Seite des Kletterfelsens vorgesehen. Für die Befestigung dienen die Türme a und b. Geplant ist, dafür die Straßenbauplatten zu verwenden. Die Lagerfugen sind aus RC-Spritzbeton auszubilden in einer Dicke von 4-8 cm; jede 3.-6. Fuge sollte mit einer Bewehrungsmatte ausgestattet werden, die mit dem Stahlbetonkernen (schraffierte Flächen Abbildung 5.3) zu verbinden ist. Alle Türme werden mit Bewehrungseisen bzw. -matten und einer Spritzbetonschicht ummantelt. Die vertikalen Lasten der Wettkampfwand werden durch das Fundament aufgenommen.

Insgesamt entstehen 185 m² Kletterfläche, mit teils Wandneigungen zur vertikalen Achse von 25° und 10°. Davon sind 35 m² auf der Rückseite der Wettkampfwand auf der Wandfläche c-d (üblich monolithisch hergestellte Spritzbetonwand aus RC-Spritzbeton) angeordnet.

Ein Dach von 37 m² BGF schließt die Konstruktion ab, liefert Stabilität für das Gesamtsystem und bietet Witterungsschutz für die innenliegende Tragstruktur. Zusätzlich kann das Dach für die Installation eines Solarmoduls zur Energieeinspeisung der Beleuchtung des Innenbereiches dienen.

Die komplette Wettkampfwand soll in Holzbauweise als Flächentragwerk konstruiert werden. Die Kletterwandelemente bestehen aus kunstharzbeschichteten Multiholzplatten. Für therapeutische Zwecke kann eine der vertikalen Flächen genutzt werden. Durch die individuelle Befestigung unterschiedlicher Griffgrößen lässt sich ein sportphysiologisches Trainingsprogramm gestalten.

Bereich 2: Innenbereich [halbumschlossener Raum durch die Türme c-f bietet die Möglichkeit zur Errichtung eines Innenbereiches]

Die Vorzugsvariante erfüllt mit dem Innenbereich ebenfalls die Vorgabe, einen witterungsgeschützten Raum als Teil der künstlichen Kletteranlage zu berücksichtigen. Der Raum wird durch die Anordnung der Straßenbauplatten (Türme c-f), der zwei Spritzbetonwände c-d und e-f sowie der horizontalen Begrenzung durch gebrauchte Betonfertigteile geschaffen. Auf einer BGF von 31,4 m² entsteht somit ein Raumvolumen von 217 m³. Der Innenbereich bietet eine Kletterfläche von 161 m².

Als Besonderheit kann die Möglichkeit eines sogenannten „Daches“ (Kletterrouten „über Kopf“) als Kletterelement im Innenbereich installiert werden. Insgesamt 17,4 m² in einer Höhe von 8,3 Metern zwischen den Türmen c und f, können als Kletterflächengestaltung genutzt werden. Die Wand a-b bietet durch ihre 6,1 Meter hohe Spalt-Öffnung eine Möglichkeit zum Trainieren der Kaminkletterei (Breite ca. 40-120 cm), sowie die Spaltkletterei (Breite <40 cm).

Bereich 3: Flachdach-Ensemble [Witterungsschutz des Innenbereichs; begehbare Fläche für unterschiedliche Nutzungen (Abseilen, Höhenrettung, Aussichtsplattform, etc.)]

Die drei zwischen den Türmen c bis f eingesetzten Flachdächer bzw. Podeste in Holzbauweise, bieten Bereiche für den gesicherten Nachstieg¹²³ sowie Verweil- und Ausblickmöglichkeiten. Die Dächer können alternativ als Gründächer angelegt werden, um eine naturnahe Landschaftsgestaltung zu erzeugen.

Durch die großflächigen Lichtöffnungen von ca. 12 m² und 23 m² kann auf eine künstliche Beleuchtung des Innenbereiches während des Tages weitestgehend verzichtet werden. Aufgrund der großen Fläche können hier vertikale Lichtbänder aus Polycarbonat-Hohlkammerplatten eingesetzt werden. Gestützt werden diese durch Holzträger in Längs- und Querrichtung.

Bereich 4: Außenfläche [bietet das felsstrukturnahe Klettern mit Seil und Bouldern in Absprunghöhe]

Der vierte Bereich umfasst die komplette äußere Kletterstruktur (Außenfläche Türme a bis f und Wand e-f), auf insgesamt 276 m² Kletterfläche. An der Außenseite von Turm c ist ein Einstieg zum Klettersteig vorgesehen, welcher bis zur Dachfläche der Wettkampfwand über die Außenfläche von Turm a führen soll. Dabei sind ausreichend Elemente (z.B. vertikale/horizontale Stiegen) vorzusehen, welche den alpinen Charakter eines Klettersteiges nachahmen sollen.

Als Zusatzelement, könnte ein Schacht für die Höhenrettung und als Zugang für die mittlere Dachfläche konzipiert werden. Dieser Schacht wäre dann ein Bestandteil der Wand e-f. Feuerwehr und Technisches Hilfswerk THW könnten denkbare Benutzer dieser Vorrichtung sein.

Zusammenfassung

Die Vorzugsvariante bietet insgesamt eine Kletterfläche von 513 m² auf etwa 100 m² Grundfläche. Durch die Wettkampfwand, die aussteifenden Wände zwischen den Türmen a und b sowie e und f, den diagonal eingebrachten Deckenplatten und durch das gesamte Flachdach über dem Innenbereich kann eine ausreichende Stabilität und hohe Aussteifung des Gesamtbauwerks erreicht werden. Durch die Öffnung und der Anordnung der 3 abgewinkelten Türme sind insgesamt vier monolithische Stahlbeton-Kerne zwischen den Plattentürmen vorzusehen.

Insgesamt könnten 280 von 318 Straßenbauplatten verwendet werden, was einer Weiterverwendungsquote von 88 % entspräche. Bei dem Verhältnis Gesamtgewicht (629 t) zur Kletterfläche erhält man als Ergebnis, dass 1,2 t Baumaterialien zur Herstellung von einem Quadratmeter Kletterfläche benötigt werden. Von insgesamt 720 m² Gesamt(mantel-)fläche fallen

¹²³ Beim gesicherten Nachstieg handelt es sich um eine Sicherungsmethode beim Klettern, bei dieser von oben, also über dem Kletternden mit dem Seil gesichert wird. Somit können Felsrouten, welche länger als die Hälfte des zur Verfügung stehenden Seiles, erklommen werden.

71 % der Kletterfläche (513 m²) zu. Eine grobe Mengen-Kalkulation der zu verbauenden Materialmengen und berechneten Flächen für den Kletterfelsen der Vorzugsvariante ist in Tabelle 5.5 aufgelistet.

Tabelle 5.5: Übersicht Mengenermittlung Vorzugsvariante (überschlägig)

Baubeschnitt/ Position	Höhe [m]	(Mantel-) Fläche [m²]		Volumen Körper [m³]	Art der Baumaterialien/ des Bauelements	Anzahl [-]	Gewicht [kg]	Fläche [m²]	Gewicht [kg]
		Gesamt	davon Kletterfläche						
Turm a	14,5	101,5	58,0	43,5	Straßenbauplatten (unterschiedliche Elemente) [Spalte 7+8]	Spalte 7 60	Spalte 8 108.750	Spalte 9 101,5	Spalte 10 38.063
Turm b	14,5	101,5	58,0	43,5	und	60	108.750	101,50	38.063
Turm c	8,3	49,8	49,8	24,9		34	62.250	49,8	18.675
Turm d	6,1	36,6	36,6	18,3	Spritzbeton [Spalte 9+10]	24	45.750	36,6	13.725
Turm e	4,0	24,0	24,0	12,0		34	30.000	24,0	9.000
Turm f	8,3	49,8	49,8	24,9	68	62.250	49,8	18.675	
Zwischen- summe				167,1	Gesamtzahl Straßenbauplatten	280			
Diagonale ac	-	5,8	-	0,8	Loggiaplatte (4,8 x 1,2 x 0,14 m)	1	2.030	-	-
Diagonale df	-	5,8	-	0,8		1	2.030	-	-
Kern ac	14,5	-	-	5,7	Stahlbeton [m³] <i>(mit 2.500 kg/m³)</i>	-	-	-	14.248
Kern bd	14,5	-	-	5,3		-	-	-	-
Kern ce	8,3	-	-	2,8		-	-	-	7.018
Kern df	8,3	-	-	3,0		-	-	-	7.543
Wand ab	6,1	40,3	21,0	7,1	Stahlbeton [m³]	-	-	40,3	17.797
Wand ef	4,0	31,2	31,2	6,5		-	-	-	31,2
Wettkampfwand (WKW)	14,5	149,5	149,5	-	Holztragwerk	1	?	-	-
WKW Rückseite	8,5	35,0	35,0	-	kunstharzbeschichtete Multiholzpaneele [m²]	-	-	149,5	2.138
Flachdach WKW	-	37,0	-	11,1		1	2.405	-	-
Flachdach cd	0,3 (Höhe)	12,7	-	3,8	Konstruktion aus Brettschichtbinder (Höhe 20 - 30 cm)	1	826	-	-
Flachdach ef	0,3 (Höhe)	15,2	-	4,6		1	988	-	-
Flachdach cf	0,3 (Höhe)	24,6	-	7,4		1	1.599	-	-
maximale Höhe	14,5	720,3			Gesamtgewicht (netto)		427.628	und	214.960
maximale Kletterfläche			512,9		Gesamtgewicht (brutto)				642.588

5.4 Ökologische Betrachtungen zum Bauvorhaben

Eine ökologische Betrachtung bzw. ein ökologisches Screening zielt darauf ab, Umweltwirkungen von Produkten für eine bestimmte Phase bzw. ausgewählte Prozesse im Lebenszyklus grob abzuschätzen. Herangezogen werden dafür Durchschnittsdaten.

Die Methode einer Ökobilanz hingegen umfasst einen ganzheitlichen Ansatz: eine systematische Analyse und Bewertung der Umweltwirkungen von Produkten entlang des gesamten Lebenszyklus als auch die Berücksichtigung aller Prozesse.

Das in der DIN EN ISO 14040/14044:2021-02 beschriebene Verfahren wird auch als Lebenszyklusanalyse (englisch: Life Cycle Assessment oder Life Cycle Analysis; LCA) bezeichnet.

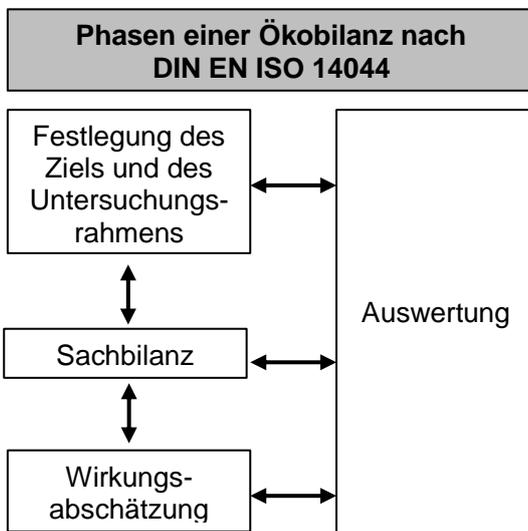


Abbildung 5.4: Phasen einer Ökobilanzierung

Eine Ökobilanz-Studie umfasst dabei grundsätzlich vier Phasen¹²⁴ (s. Abbildung 5.4).

Obwohl im Rahmen des Berichtes nur eine Teil-Lebenszyklusanalyse erfolgte, wird nachfolgend kurz auf den Aufbau einer LCA eingegangen.

Jede Phase wird entsprechend des Betrachtungsrahmens (s. Abbildung 5.5) untersucht.

Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

In der ersten Phase werden die zu untersuchenden Produkte und deren funktionelle Einheiten beschrieben. Somit werden beispielsweise Input- und Output-Größen auf eine mathematische Einheit normiert. Der Untersuchungsrahmen gibt an, ab Beginn welcher Prozessschritte¹²⁵ eines

¹²⁴ DIN EN ISO 14044:2021-02 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“, S. 11

¹²⁵ Die Gesamtheit der Prozessschritte ergibt dabei die nach Vorgaben des Untersuchungsrahmens zu betrachtende Prozesskette.

Produktes (z.B. Gewinnung, Herstellung, Transport, etc.) die spätere Sachbilanz und Wirkungsabschätzung erfolgen wird.

Sachbilanz

Bei der Sachbilanz, der zweiten Phase einer Ökobilanz, werden die Daten der Stoffstrommengen und die zugehörigen Input- sowie Output-Ergebnisse quantitativ erfasst. Dies umfasst insbesondere die über die gesamte Prozesskette hinweg benötigten Rohstoffe, Energie- und Betriebsmittel sowie die Erfassung von Koppelprodukten und von Abfällen.

Wirkungsabschätzung

Die vorletzte Phase umfasst die Überführung der Sachbilanzwerte in unterschiedliche Umweltwirkungen. D.h. es wird ermittelt, inwiefern ein bestimmter Prozessschritt durch z.B. verbrauchte Rohstoffe eine potenzielle Wirkung auf die Umwelt hat, in Form von unterschiedlichen Emissionen (allgemein Wirkungskategorien). Im Bereich von Baustoffen und -produkten werden in der Regel die folgenden Wirkungskategorien¹²⁶ angegeben:

- Treibhauspotential GWP [kg CO₂ – Äq.]
- Ozonabbaupotential ODP [kg R11-Äq.]
- Photochemisches Oxidantienbildungspotential POCP [kg C₂H₄-Äq.]
- Versauerungspotenzial AP [kg SO₂-Äq.]
- Eutrophierungspotential EP [kg PO₄₃--Äquivalent]

Daten der genannten Wirkungskategorien für Baustoffe und -produkte sind bspw. über die deutsche Baustoffdatenbank ÖKOBAUDAT www.oekobaudat.de erhältlich. Diese Sammlung an Daten basiert auf spezifischen Angaben von Herstellern, Planern, Architekten und Ingenieuren. Durch sog. EPDs (Environmental Product Declaration; zu Dt.: Umwelt-Produkt-Deklaration), wird die Baustoffdatenbank „gefüttert“ und regelmäßig durch Dritte überprüft und verifiziert.

Auswertung

Die letzte Phase und somit schlussfolgernde Betrachtung einer Ökobilanz ist die Auswertungsphase. In dieser werden die ausschlaggebenden Parameter auf Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz- und Wirkungsabschätzungsphasen identifiziert und beurteilt. Es soll auf die Vollständigkeit und mögliche Einschränkungen der ermittelten Werte Bezug genommen werden. Aus den Ergebnissen können Schlussfolgerungen sowie Empfehlungen für die weitere Planung resultieren.

„Bei der Ökobilanz handelt es sich grundsätzlich um eine wertfreie Beschreibung der Umweltwirkungen eines Produkts. Dementsprechend gibt es auch keine pauschale Aussage über

¹²⁶ Weiterführende Erläuterungen zu den einzelnen Wirkungskategorien:
Hartwig, Joost: „Ökobilanzierung von Gebäuden“, Vortrag/Fachbeitrag, 2011, abrufbar unter:
<https://www.baulinks.de/architektur/oekobilanz-oekobilanzierung.php> (zuletzt aufgerufen am 8.1.2020)

„gute“ oder „schlechte“ Produkte und Bauweisen von Gebäuden. Vielmehr bietet eine Ökobilanz dem Nutzer die Möglichkeit, auf Basis eigener Bewertungen Entscheidungen zu treffen.“¹²⁷

5.4.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Für die nachfolgenden Berechnungen werden die Herstellung und der Transport der jeweiligen Ausgangsstoffe der Spritzbeton- bzw. Spritzmörtelrezepturen betrachtet. Die Mengen bzw. die Annahmen der Ausgangsstoffe und deren Transportentfernungen werden im nächsten Kapitel aufgeschlüsselt.

Angenommen wird, dass während der Nutzungsphase der Kletterfelsen geringe bis keine Betriebsmittel (Strom, Wasser, Wärme) verbraucht. Deshalb wird die Nutzungsphase nicht betrachtet.

Somit begrenzt sich der Untersuchungsrahmen bzw. die Systemgrenze der ökologischen Betrachtung auf die Herstellung/Gewinnung und den Transport der Baustoffe. Der Bauprozess und die damit entstehenden Umweltwirkungen der eingesetzten Geräte und Maschinen sind nicht Teil dieser Betrachtung. Die Bereitstellung der Betonfertigteile (hier: Straßenbauplatten) wird nicht bilanziert, da sie bereits am geplanten Einbauort parat liegen.

Das Ziel der ökologischen Betrachtung ist es, eine Gegenüberstellung der potenziell einzusetzenden Ausgangsstoffe, den Einfluss des Transportweges aller Baustoffe und deren Gesamtumweltwirkungen für RC- Spritzbeton/-mörtel im Vergleich zu einem üblichen Trockenspritzbeton aufzuzeigen.

Die nachfolgende Abbildung 5.5 zeigt die Betrachtungsrahmen und die Systemgrenze der ökologischen Studie zur Herstellung von RC-Trockenspritzmörtel/-beton am Beispiel des Bauvorhabens Kletterfelsen.

¹²⁷ Weiterführende Erläuterungen zu den einzelnen Wirkungskategorien:
Hartwig, Joost: „Ökobilanzierung von Gebäuden“, Vortrag/Fachbeitrag, 2011, abrufbar unter:
<https://www.baulinks.de/architektur/okobilanz-oeokobilanzierung.php> (zuletzt aufgerufen am 8.1.2020)

5.4.2 Sachbilanz

In der Sachbilanz werden, wie eingangs erwähnt, alle Stoffstrommengen und die benötigten Ressourcen, Materialien und Betriebsmittel als auch die einzusetzenden Maschinen und Geräte quantitativ erfasst. In die Wirkungsabschätzung fließt außerdem der Umfang der einzukalkulierenden Transportwege ein.

5.4.2.1 Baustoffe (Materialmengen)

Die für die Sachbilanz benötigten Daten entsprechen den ermittelten Materialmengen, die für die Errichtung des Kletterfelsens vonnöten sind (siehe Tabelle 5.6).

Tabelle 5.6: Materialmengen für die Vorzugsvariante¹²⁸

Position/Material	Details	Stückzahl [-]	Länge [m]	Gewicht [kg]	Menge [m ³]
Schotter 0/45	als Frostschutzschicht	-	-	-	25,4
Bewehrungsmatten	Typ Q 188 A; Ø 6 mm; 2300x6000 mm; 41,7 kg/Matte, 3,02 kg/m ²	108	-	4.151	-
Querbewehrung	Bügel Ø 8 mm; 0,395 kg/m; verschiedene Größen	342	435	172	-
Längsbewehrung	Stabstahl B500B; Ø 14 mm; 1,21 kg/m	-	1.009	1.221	-
Beton Fundament	Normalbeton C30/37	-	-	30.733	13,4
Beton Bodenplatte	Normalbeton C30/37	-	-	8.660	3,8
Mörtel für Fugenausbildung	Spritzmörtelrezeptur C20/25 (RC-M 100)	-	-	61.548	26,8
Spritzbeton	Schicht 1 RC-Beton C16/20 (RC-B 50)	-	-	68.284	29,7
Spritzmörtel	Schicht 2 RC-Mörtel C25/30 (RC-M 50)	-	-	102.426	44,5
Beton Kernfüllung	Normalbeton C30/37	-	-	24.626	10,7
Aussteifungen als Betonfertigteile	Normalbeton C30/37	-	-	88.300	38,4
Anmerkungen: 1) Die Bewehrungsmatten werden für die gesamte Spritzbetonschale/Ummantelung des Kletterfelsens verwendet, ebenso für die Fugenausbildung zwischen den SBP 2) Für die Ummantelung des Kletterfelsens werden zwei Schichten aufgetragen; Schicht 1 für die statischen Eigenschaften, Schicht 2 für die statischen Eigenschaften und Modellierungsmöglichkeiten 3) Die Betonfertigteile sind zur Aussteifung der Plattentürme a-f auf unterschiedlichen Höhen und Positionen vorgesehen, sowie als Abschlussplatten 4) Die Betonkerne zwischen den Plattentürmen werden mit Ortbeton monolithisch hergestellt (vgl. auch Abbildung 5.3)			Gesamt:	390.130	192,6

Für die Position „Mörtel für Fugenausbildung“ wird die Grundrezeptur des Spritzmörtels angenommen. Die Trockenmischung soll mit der entsprechenden Menge an Zugabewasser – bis eine plastische und verarbeitbare Mörtelmasse erreicht ist - versetzt und als Mörtel für die

¹²⁸ Fischer, Jakob: Untersuchung und Konzeptionierung zur Wiederverwendung von Betonelementen in Kombination mit Recycling-Beton in unterschiedlichen Anwendungsfeldern, Masterarbeit, Arbeitsgebiet Bauliches Recycling, BTU C-S, 2020.

Horizontalfugen verwendet werden. Alternativ erfolgt die Auffüllung der Fugenlagen durch das Trockenspritzverfahren (vertikal im Winkel von möglichst 90 °) von oben auf jede Bewehrungslage.

Für die überschlägige Ermittlung der Materialmengen zur Mörtelherstellung (in Summe 71,3 m³ nach Positionen: Mörtel und Spritzmörtel entspr. Tabelle 5.6) wird jedoch vereinfachend nur die Rezeptur RC-M 50 betrachtet, da für die äußere Schicht 2 eine höhere Druckfestigkeitsanforderung mit C25/30 besteht.

5.4.2.2 Transportwege

Eine weitere wichtige Größe in der Sachbilanz ist die Abbildung der Transportentfernungen für die anzuliefernden Materialien Bewehrungsstähle und Beton. Beim Beton wird dabei unterschieden zwischen Transportbeton, welcher direkt zur Baustelle (Universitätsgelände in Cottbus) geliefert und eingebaut wird und dem Betontrockengemisch, welches für das Trockenspritzverfahren benötigt wird. In der praktischen Anwendung des Trockenspritzverfahrens werden, je nach Größe des Bauvorhabens, üblicherweise Silos mit einem Volumen zwischen 5 m³ und 20 m³ mit dem vorgemischten Trockengemisch angeliefert. Dies ist die übliche praktische Lösung der Anlieferung, d.h. alle Ausgangsstoffe werden zu einem Verarbeitungsbetrieb für die Trockenmischung transportiert und von dort weiter in Silos zur Baustelle gefahren. Die Ausgangsstoffe stammen aus unterschiedlichen Produktionsstandorten.

Eine Alternative wäre der separate Transport der Ausgangsstoffe - entsprechend der Rezeptur der Trockenmischung - zur Baustelle, um Vorort in einem Zwangsmischer die Trockenmischung herzustellen. Diese Variante sei lediglich erwähnt, aber hier im Weiteren nicht in Betracht gezogen.

Antransport des Trockengemisches in Silos

Da es in der unmittelbaren Umgebung von Cottbus keinen Betrieb für die Bereitstellung von Trockenmörtel/-beton gibt, wird als Hersteller die Firma SAKRET mit ihrem Standort in Rüdersdorf (BL Brandenburg) gewählt (a, vgl. Abbildung 5.6).

Bei der Ermittlung des Standortes des Aufbereitungswerkes für Bau- und Abbruchabfälle zur Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung, kann die ebenfalls in Rüdersdorf ansässige Firma Graf Recycling-Baustoffe genannt werden (b, vgl. Abbildung 5.6).

Das Zementwerk der Firma CEMEX befindet sich auch in Rüdersdorf (c, vgl. Abbildung 5.6).

Das nächstgelegene Kiessandwerk, betrieben durch die Firma Hülskens GmbH & Co. KG, befindet sich etwa 15 km östlich von der Firma SAKRET entfernt (d, vgl. Abbildung 5.6).

Die örtliche Nähe aller Standorte für die Herstellung der Trockenmischung bietet einen idealen Standortvorteil mit hohem Kooperationspotenzial. Die Entfernung nach Cottbus beträgt ca. 130 km.

Normalerweise ist die Anlieferung von Transportbeton über eine überdurchschnittlich hohe Entfernung (> 50 km) weder wirtschaftlich noch bautechnisch sinnvoll. Da Transportbeton in Form von Frischbeton bis zur Einbaustelle die geforderten Qualitätskriterien Verarbeitbarkeit bzw. der Konsistenz erfüllen muss. Ohne zusätzliche chemische Mittel (Zusatzmittel) wie Fließmittel und Verzögerer könnte eine Distanz von 130 km, d.h. in etwa 2 h Fahrtzeit unter den genannten Kriterien kaum gewährleistet werden.

Der große Vorteil von Trockenmischungen besteht daher in den unabhängigen Liefer- und Einbaumöglichkeiten und unterliegt daher keinem strengen „just in time“-Prinzip.

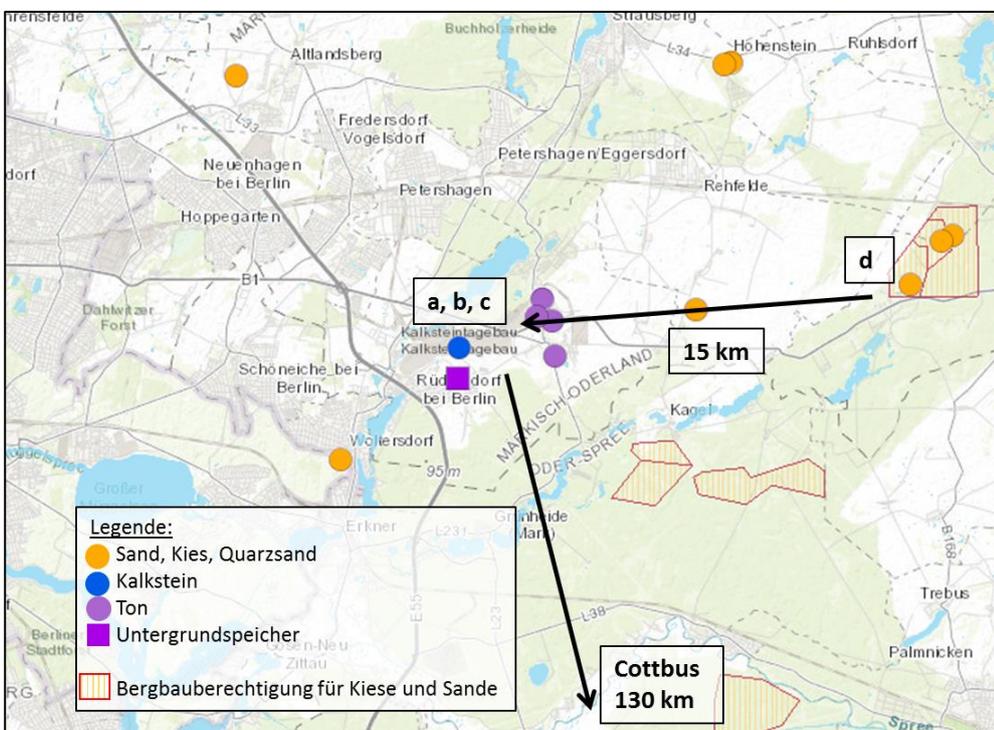


Abbildung 5.6: Ausgewählte Produktionsstandorte der Ausgangsstoffe¹²⁹; mit Produktionsstandort a für Hersteller für Trockenmörtel /-beton, b für RC-GK, c für Zement, d für natürliche GK

Betrachtet man das Umland von Cottbus und die dort ansässigen Anbieter für die notwendigen Ausgangsstoffe, resp. Kiese und Sande sowie rezyklierte Gesteinskörnungen, ist feststellbar, dass diese prinzipiell vorhanden/verfügbar sind. So existieren bspw. Kies- und Sandabbaugebiete in einer kürzeren Entfernung zu Cottbus, wie bspw. das Kieswerk Kahren GmbH (10 km), SCHWENK Sand

¹²⁹ Kartenquelle: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, abrufbar unter: <http://www.geo.brandenburg.de/lbgr/bergbau> (letzter Zugriff: 10.1.2021)

& Kies Nord GmbH in Guben (40 km), Agro-Dienst-Transport und Handels GmbH in Drebkau (15 km), das Kieswerk Ponickau (75 km) oder die KANN Beton Lausitz GmbH & Co. KG in Drebkau (15 km)

Auch Firmen, die Recyclingbaustoffe anbieten, sind in der Region tätig. So etwa die Firma Koalick Beton GmbH in Drebkau (Entfernung: 17 km) oder die Firma Peitzer Betonwerk GmbH (Entfernung: 16 km). Allerdings beschränkt sich das Produktangebot hierbei derzeit auf RC-GK der Körnungsgröße 0/45, welche v.a. für den klassischen Straßenunterbau nachgefragt werden. Zusätzliche Siebe wären notwendig, um die gewünschten Output-Größen von 0/4 bzw. 0/8 zu erhalten. Inwiefern regionale Baustoff-Recyclingunternehmen bereit wären, ihre RC-Anlagen mit zusätzlichen Sieben auszustatten, wurde nicht in Erfahrung gebracht. Daher werden für die nachfolgende Berechnung die Unternehmen aus o.g. Region östlich von Berlin betrachtet.

Anfahrtswege weiterer Materialien, Betriebsmittel und Maschinen

➤ Transportbeton

Für die Lieferung des „frischen“ Transportbetons wird ebenfalls der Standort Rüdersdorf gewählt, da dies der einzige Standort ist, welcher in der näheren Umgebung von Cottbus eine Kalksteinabbaustätte aufweist. Kalkstein ist der wesentliche Hauptbestandteil bei der Zementherstellung.

➤ Bewehrungsstahl

Als Produktionsstandort der benötigten Stabstähle und Bewehrungsmatten wird Eisenhüttenstadt gewählt mit dem Stahlwerk der Firma SBB Stahl & Bau GmbH. Dieser liegt 61,5 km entfernt.

➤ Wasser

Die Versorgung mit Wasser für den Spritzmörtel bzw. -beton wird bauseitig zur Verfügung gestellt. Da dies keinen zusätzlichen Transport benötigt, wird Wasser in der weiteren ökobilanziellen Betrachtung außer Acht gelassen.

➤ Geräte, Maschinen, Bauzäune und Gerüst

Die für die Baumaßnahmen notwendigen Geräte und Maschinen werden bei potenzieller Auftragserteilung durch die ortsansässige Firma Jens Brand Felsenbau GmbH zur Verfügung gestellt bzw. entsprechend geliefert. Bauzäune und Baugerüste sind ebenfalls durch kurze Lieferwege im Raum Cottbus verfügbar.

5.4.2.3 Geräte und Maschinen

Folgende Geräte und Maschinen, welche einen erhöhten Energie- und Verbrauchsmittelumsatz haben, werden für die Baumaßnahme „Kletterfelsen“ nach Abbildung 5.5 unter Einsatz von RC-Spritzmörtel/-beton in Kombination mit gebrauchten Straßenbauplatten benötigt:

- Turmdrehkran¹³⁰
 - o Hersteller: Liebherr
 - o Produktreihe: 550 EC-H 40 Litronic High-Top
 - o Max. Hakenhöhe 79,7 m
 - o Max. Tragfähigkeit 40.000 kg
 - o Max. Ausladung 80,00 m
 - o Tragfähigkeit bei max. Ausladung 4.000 kg
 - o Hubwerk 110 kW FU / 110 kW FU SD.shift / 65 kW FU SD.shift
 - o Drehwerk 3 x 7,5 kW FU
 - o Katzfahrwerk 11,0 kW FU
 - o Gleichlauffaktor: 0,7 (angenommen)
 - o → $(110 \text{ kW} + 3 \times 7,5 \text{ kW} + 11 \text{ kW}) \times 0,7 = 100,5 \text{ kW}$
- Radlader¹³¹
 - o Hersteller: Wacker Neuson
 - o Produktreihe: ET24
 - o Transportgewicht min. 2.057 kg
 - o Motor: wassergekühlter 3-Zylinder Dieselmotor
 - o Motorleistung: 13,8 kW
- Trockenspritzmaschine¹³²
 - o Hersteller: Werner Mader GmbH
 - o Produktreihe: WM-06FU
 - o Max. Korngröße: bis 16 mm
 - o Theoretische Leistung: 3-6 m³/Std
(abhängig von Material, Schlauchdurchmesser und -länge)
 - o Leistung des Elektromotors: 7,5 kW
 - o Förderdistanz: bis zu 300m
- weitere Maschinen: Schlagbohrmaschine, Hochdruckreiniger, Zwangsmischer, Hydraulikschneider

5.4.3 Wirkungsabschätzung - KEA und CO_{2e}-Emissionen

Wie eingangs erwähnt beschränkt sich die hier durchgeführte ökobilanzielle Betrachtung auf die Herstellung der Materialien, den Transporten sowie die Errichtungsphase des Kletterfelsens. Zugrunde gelegt werden Werte des kumulierten Energieaufwandes (KEA) und der daraus resultierenden CO_{2e}-Emissionen.

¹³⁰ Datenblatt: <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/622424/liebherr-550ec-h-40-litronic-datasheet.pdf>

¹³¹ Technische Daten: <https://www.wackerneuson.de/de/produkte/bagger/konventionelle-kettenbagger/model/et24/type/TechnicalData/>

¹³² Datenblatt: <https://www.werner-mader.de/cms/images/WM06FUde.pdf>

5.4.3.1 Baustoffe

Für die hier untersuchten Spritzmörtel-/ Spritzbetonrezepturen, werden Rechercheergebnisse, Schätzwerte bzw. Durchschnittswerte aus einschlägiger Literatur und Angaben von Herstellern herangezogen.

Tabelle 5.7 enthält die Baustoffe, die für die untersuchten Rezepturen angesetzt werden mit folgenden Angaben:

- Bezeichnung,
- kumulierter Energieaufwand (KEA) in MJ/t
- 'global warming potential' (GWP; zu dt. Treibhauspotential) in kg CO₂-Äquivalent/t Baustoff.

Die vorletzte Spalte der Tabelle 5.7 gibt ausgewählte Rezepturen (vgl. Tabelle 4.12) an, welche die entsprechenden Baustoffe aus Spalte 1 beinhalten und in den Feldversuchen (vgl. Kapitel 4.5) verwendet wurden. Die letzte Spalte gibt den Herkunfts- bzw. Quellennachweis der entsprechenden (Durchschnitts-)Werte der Spalten 3 und 4 an.

Tabelle 5.7: Energieaufwand und Treibhauspotenzial der Bereitstellung ausgewählter Baustoffe

Baustoff	Bezeichnung	KEA	GWP	Verwendung in Rezeptur	Quelle/ Berechnung
		nicht-erneuerbar + erneuerbar		Rezeptur	
		[MJ/t]	[kg CO ₂ e/t]		
Spalte	1	2	3	4	5
Zement	CEM I 42,5 R	6.200	800	RC-B 0, RC-B 100, RC-B 50	[a]
	CEM I 52,5 R	6.600	810	RC-M 0, RC-M 100, RC-M 50	
Sand-Kies, natürlich	Körnung 0/4	43	6,5	RC-M 0, RC-M 50	Durchschnitt aus [b], [c] und [d]
Kies, natürlich	Körnung 0/8	39	5,9	RC-B 0, RC-B 50	siehe nachfolgende Berechnungen
RC-GK (Brechsand)	Körnung 0/4	52	6,3	RC-M 100, RC-M 50	
RC-GK	Körnung 0/8	39	4,7	RC-B 100, RC-B 50	
Stahl	Stabstahl	12.587	683	-	[e]
Wasser	-	-	-	in allen Rezepturen	-
Anmerkung: RC-M/B 0 → 0 M.-% RC-GK; RC-M/B 50 → 50 M.-% RC-GK; usw.					
<u>Quellennachweise</u>					
[a] nach GaBi5 aus: Neufert, Winfried et al., Erforschung des Dreistoffgemisches Klinker, Hüttensand und Kalksteinmehl mit dem Ziel der Absenkung des Klinkeranteils im Zement zur Verminderung der CO ₂ -Emissionen in der Zementproduktion, DBU-Bericht: Aktenzeichen 28790/02, 2016					
[b] Haist, Michael; Müller, Harald S., Nachhaltiger Beton - Betontechnologie im Spannungsfeld zwischen Ökobilanz und Leistungsfähigkeit, 9. Symposium Nachhaltiger Beton, KIT, 2012					
[c] Bausand, aufgerufen unter: https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={89FA1FFA-0DC5-4DF2-9225-8A6DD27C79C8} , letzter Zugriff am: 11.2.2020					
[d] Schweizerischer Überwachungsverband für Gesteinsbaustoffe (SÜGB, Hrsg.), UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804 - Durchschnitts-EPD für Gesteinskörnungen, Bern, 2018					
[e] Ökobaudat Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl, Referenzjahr 2018, Gliederungsnummer 4.1.02					

Die in der Tabelle 5.7 angegebenen Werte der natürlichen Kiese und Sande sowie der rezyklierten Gesteinskörnungen werden nachfolgend aufgeschlüsselt.

Die Schwierigkeit bei der Datenerfassung bestand darin, dass für die Korngrößen 0/4 und 0/8 sowohl für die rezyklierte als auch für die natürliche Gesteinskörnungsfractionen keine oder nur unzureichende Angaben bzgl. des KEA und der CO₂e-Emissionen zu finden waren. Daher wird - wie eingangs aufgeführt (vgl. Kapitel 4.1) - die Kornverteilung der Regelsieblinie B 8 (Abbildung 4.2) herangezogen.

KEA und CO₂-Emissionen der rezyklierten Gesteinskörnung

Auf Grundlage des bereits aufgestellten Input-Output-Verhältnisses in Kapitel 4.1 zur Bestimmung der Menge an RC-GK der Korngrößen 0/4 und 0/8 kann der kumulierte Energieaufwand berechnet werden. Dazu wird ein energetischer Aufwand von 19,5 MJ¹³³ angesetzt, welcher bei dem Durchsatz von 1 t Betonbruch trocken aufbereitet ermittelt wurde. Daraus folgt für die RC-Gesteinskörnung 0/8 folgendes Ergebnis:

$$\frac{19,5 \text{ MJ}}{t \text{ Input Betonbruch}} \times \frac{2 \text{ t Input Betonbruch}}{t \text{ RC GK 0/8 Output}} = 39 \frac{\text{MJ}}{t \text{ RC-GK 0/8}}$$

Für die Ermittlung des Energieaufwandes der RC-GK der Körnung 0/4 wird die benötigte Input-Menge von 2,67 t Betonbruch für eine Tonne RC-GK 0/4 Output zugrunde gelegt (vgl. Berechnung in Kapitel 4.1).

$$\frac{2 \text{ t Input Betonbruch}}{0,75 \text{ t Output RC-GK 0/4}} = 2,67 \frac{t \text{ Input Betonbruch}}{t \text{ RC GK 0/4 Output}}$$

Der Energieaufwand für eine Tonne Brechsand 0/4 beträgt:

$$\frac{19,5 \text{ MJ}}{t \text{ Input Betonbruch}} \times \frac{2,67 \text{ t Input Betonbruch}}{t \text{ RC GK 0/4 Output}} = 52 \frac{\text{MJ}}{t \text{ RC-GK 0/4}}$$

Bei der Herstellung der RC-GK im Trockenaufbereitungsverfahren wird nach METTKE¹³⁴ der Energieaufwand von 19,5 MJ/t durch strombetriebene (10,1 MJ/t durch allgemeinen Strommix) und kraftstoffbetriebene (9,4 MJ/t durch Diesel) Prozesse erzeugt.

Für die Berechnung der Luftemissionen des CO₂-Äquivalents wurde für den Dieselverbrauch ein Wert von 88,7 g CO₂e/MJ¹³⁵ und für den Stromverbrauch 152,1 g CO₂e/MJ¹³⁶ angesetzt.

¹³³ Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), DBU-Bericht Aktenzeichen 26101-23, Cottbus, 2010, S. 37 ff.

¹³⁴ Mettke, Angelika; Heyn, Sören: Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), DBU-Bericht Aktenzeichen 26101-23, Cottbus, 2010, S. 37 ff.

¹³⁵ Bünger, Ulrich. et al.: Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Abschlussbericht, Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2016, S. 60 Tab. 22; [Anmerkung: CNG - Compressed Natural Gas, z. Dt. verdichtetes Erdgas und LNG - Liquid Natural Gas, z Dt. verflüssigtes Erdgas]

¹³⁶ CO₂-Äquivalent aus EI-KW-Park-DE-2020 (PRIMES) verfügbar unter:

<https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7b0E0B2796-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7d> aufgerufen am 23.12.2019

Es ergeben sich die in Tabelle 5.7 angegebenen CO₂e-Emissionen für

$$\text{Brechsand 0/4: } 2,67 * (9,4 \text{ MJ/t} * 88,7 \text{ g CO}_2\text{e/MJ} + 10,1 \text{ MJ/t} * 152,1 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}) = 6.328 \text{ g CO}_2\text{e/t}$$

~ 6,3 kg CO₂e/t

und

$$\text{RC-Kies 0/8: } 2,0 * (9,4 \text{ MJ/t} * 88,7 \text{ g CO}_2\text{e/MJ} + 10,1 \text{ MJ/t} * 152,1 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}) = 4.740 \text{ g CO}_2\text{e/t}$$

~ 4,7 kg CO₂e/t

KEA und CO₂-Emissionen natürliche Gesteinskörnung

Anhand verschiedener Literaturangaben (vgl. auch Tabelle 5.7) wird für die Gewinnung der natürlichen Gesteinskörnung 0/4 ein Durchschnittswert des kumulierten Energieaufwandes von **43 MJ/t** angenommen.

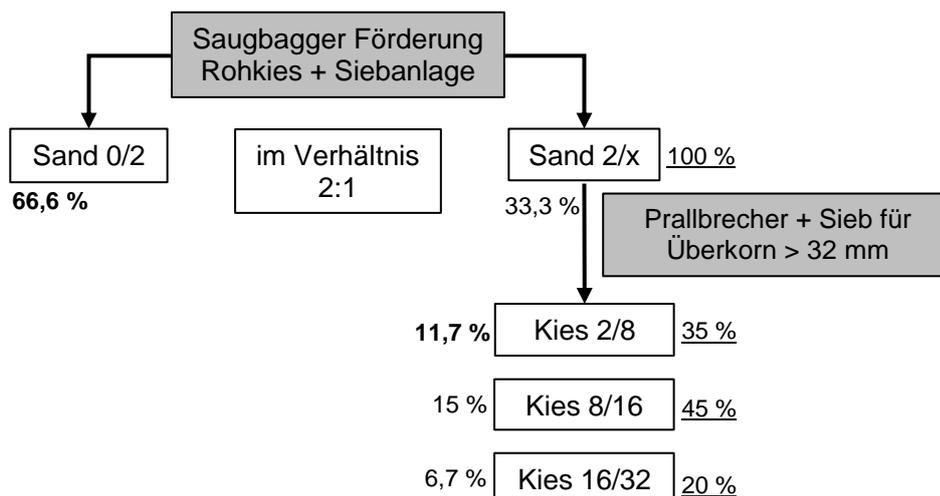


Abbildung 5.7: Stoffstromanalyse der Sand-Kies-Gewinnung [Mettke nach Angaben der Firma Wüffert GmbH & Co. KG]

Der KEA der Körnung 0/8 wurde anhand einer Stoffstromanalyse (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) der Sand-Kies-Gewinnung (Körnung 0/x) der Firma Wüffert GmbH & Co. KG und den damit verbundenen Energieaufwendungen durch die Maschinen und Geräte aufgestellt. Der benötigte Energieaufwand für den Output von 1 t Sand-Kies-Gemisch 0/x durch Förderungs- und Aufbereitungsprozesse beträgt 10,7 MJ.¹³⁷

Dabei fällt die Fraktion 0/2 zu zwei Drittel (66,6 %) und die Fraktionen 2/x zu einem Drittel (33,3 %) an. Von dieser Fraktion macht der Kies 2/8 einen Anteil von 35 % aus, d.h. bezogen auf den Gesamt-

¹³⁷ Mettke, A., et al.: Mehraufwand für innovative Ansätze zum Klima- und ressourcenschonendem Bauen bei der Umweltstation der Stadt Würzburg (KlimResBau) – Einsatz von Recycling-Beton, gefördert durch DBU (AZ: 33520/02-35/0), 2020, S. 52

Input etwa 11,7 %.

Bei einem Input von 1 t Sand-Kies-Gemisch werden folglich 666 kg Sand 0/2 und 117 kg Kies 2/8 gewonnen.

Übertragung auf die Regelsieblinie B8

Nach Regelsieblinie B8 (vgl. Abbildung 4.2) beträgt der Anteil der Körnung 0/2 57 Vol.-% und der Körnung 2/8 entsprechend 43 Vol.-%. Bezogen auf eine Tonne Input, müssten 570 kg 0/2 und 430 kg 2/8 produziert werden, um der Regelsieblinie B8 zu entsprechen.

Das bedeutet im Umkehrschluss, dass ein **Input von 3,68 t** benötigt wird, um die genannten Mengenanteile der Regelsieblinie B8 zu erhalten.¹³⁸

Dabei wird allerdings ein Überschuss von ca. 1,9 t Sand 0/2 erzielt:

(3,68 * 666 kg = 2.450 kg → 2.450 kg – 570 kg = 1.880 kg).

Der Gesamtenergieverbrauch berechnet sich somit wie folgt:

$$\frac{10,7 \text{ MJ}}{\text{t Input Kies-Sand-Gemisch}} \times \frac{3,68 \text{ t Input Kies-Sand-Gemisch}}{\text{t Kies 0/8 Output}} = 39 \frac{\text{MJ}}{\text{t Kies 0/8}}$$

Als Energieträger wird ausschließlich Strom verbraucht. Dieser hat, wie bereits oben erwähnt, einen Emissionswert von 152,1 g CO₂e/MJ. Daraus ergeben sich die folgenden CO₂e -Emissionen für die Gewinnung/Herstellung der natürlichen Gesteinskörnung zu:

Sand 0/4: **6,5 kg CO₂e/t** (43 MJ/t * 152,1 g CO₂e/MJ) und

Kies 0/8: **5,9 kg CO₂e/t** (39 MJ/t * 152,1 g CO₂e/MJ).

5.4.3.2 Transport

Für die Anlieferung der Ausgangsstoffe, wird angenommen, dass der Transport ausschließlich mit LKW über die Straße stattfindet. Um die genauen Werte für Energieaufwand und Treibhausgasemissionen für den Straßengüterverkehr zu bestimmen, bedarf es normalerweise Daten des jeweiligen Fahrzeugtyps und dessen technischer Spezifikationen, wie Verbrauch, Kraftstoff, Eigengewicht und Ladekapazität. In dieser Berechnung wird vereinfachend auf Durchschnittsverbrauchswerte zurückgegriffen.

¹³⁸ Für die hier getroffenen Annahmen wird von einer idealen Kornverteilung des Sand- und Kiesanteiles in der Output-Masse ausgegangen. Bei einem Output von 117 kg Kies 2/8 und einer Zielgröße von 430 kg Kies 2/8, wird die 3,68-fache Menge an Input benötigt.

Bei der Berechnung der Emissionswerte gehen letztendlich zwei Größen ein. Zum einen die Transportkilometer [km] und zum anderen die zu transportierende Tonnage [t]. Zusammen erhält man Tonnenkilometer [tkm], bzw. in Bezug auf den Energie-Output MJ/tkm.

Auf der Datenbasis des Umweltbundesamtes, welche über die Plattform ProBas erreicht werden kann, ergibt sich bei Tankstellen Diesel und 1 tkm Gütertransport-Dienstleistung eine benötigte Energie von 1,11 MJ/tkm¹³⁹. Wird dieser Wert mit den CO₂e-Emissionen für Diesel von 88,7 g CO₂e/MJ¹⁴⁰ multipliziert, so erhält man:

$$1,11 \frac{MJ}{tkm} * 88,7 g \frac{CO_2e}{MJ} = 98 g \frac{CO_2e}{tkm}$$

Der Wert von 88,7 g CO₂e/MJ (entspricht WTW) bezieht sich auf die gesamte Produktionskette und setzt sich zusammen aus 15,5 g CO₂e/MJ (WTT) und 73,2 g CO₂e/MJ (TTW). Die Gesamtbilanz bzw. der komplette Umfang wird als Well-to-Wheel (WTW-Emissionen) bezeichnet (vgl. Abbildung 5.8), was übersetzt so viel heißt wie „vom Bohrloch zum Rad“ bzw. auf andere bspw. nicht-fossile Rohstoffe „vom Rohstoff bis zum Verbrauch“.

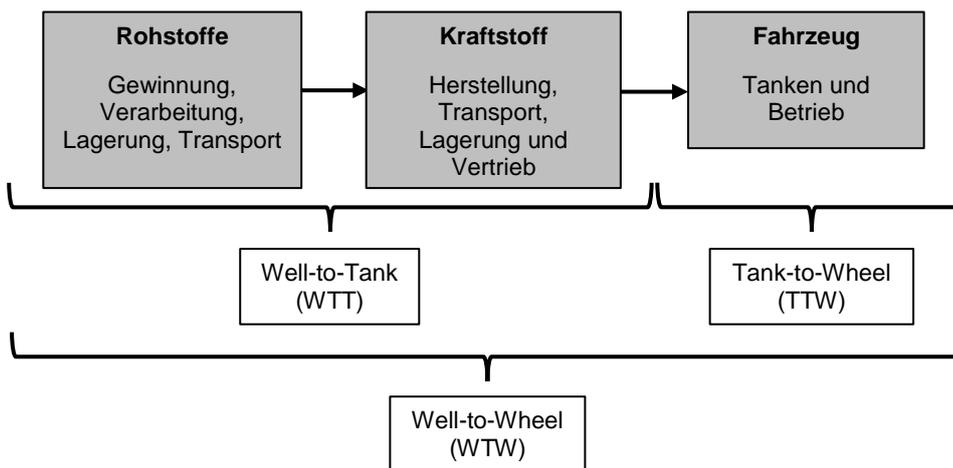


Abbildung 5.8: Umfang einer Well-to-Wheels-Analyse für Kraftstoff-/ Fahrzeugsysteme¹⁴¹

¹³⁹ 1 tkm Gütertransport-Dienstleistung, Auslastungsgrad 50 %, Kapazität 15,9 t, abrufbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={4C800A40-9FAE-B835-3C0E-7005AC5DD5C5}>, letzter Zugriff am: 5.1.2021

¹⁴⁰ Büniger, Dr. U. et al.: Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Abschlussbericht, Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2016, S. 60 Tab. 22; [Anmerkung: CNG - Compressed Natural Gas, z. Dt. verdichtetes Erdgas und LNG - Liquid Natural Gas, z Dt. verflüssigtes Erdgas]

¹⁴¹ In Anlehnung an: Brinkmann, N., et al.: Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions, Mai 2005, S. 11

5.4.3.3 Geräte und Maschinen

Für die Geräte und Maschinen müssen sowohl Strom als auch Diesel für den Betrieb vorgehalten werden. Für Diesel wird $88,7 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}^{142}$ und für den Stromverbrauch $152,1 \text{ g CO}_2\text{e/MJ}^{143}$ angesetzt. D.h. bei Maschinen, welche Diesel als Betriebsmittel verwenden, wird ein Ausstoß von $319,1 \text{ g CO}_2\text{e/kWh}$ und bei Strom von $547,1 \text{ g CO}_2\text{e/kWh}$ emittiert (Umrechnung von MJ in kWh: $1 \text{ MJ} = 0,278 \text{ kWh}$).

Für die in Kapitel 5.4.2.3 angesetzten Maschinen und Geräte bedeutet dies folgendes:

- Turmdrehkran: $100,5 \text{ kW} * 547,1 \text{ g CO}_2\text{e/kWh} = \mathbf{55,0 \text{ kg CO}_2\text{e/h}}$
- Diesel Radlader: $13,8 \text{ kW} * 319,1 \text{ g CO}_2\text{e/kWh} = \mathbf{4,4 \text{ kg CO}_2\text{e/h}}$
- Spritzmaschine: $7,5 \text{ kW} * 547,1 \text{ g CO}_2\text{e/kWh} = \mathbf{4,1 \text{ kg CO}_2\text{e/h}}$

5.4.4 Auswertung

Nachfolgend werden die Annahmen sowie berechneten Mengen aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung zusammengeführt. Dabei werden die einzelnen Spritzbeton- und Mörtelrezepturen, die Gesteinskörnungen für sich, die Mengen an Spritzbeton und -mörtel für den Kletterfelsen als auch die Gesamtbilanz aller einzusetzenden Baustoffe für die Errichtung der Vorzugsvariante „Kletterfelsen“ ausgewertet.

Bei der Auswertung liegt der Fokus auf der Gegenüberstellung bzw. dem Vergleich zwischen den drei Spritzbetonrezepturen und Spritzmörtelrezepturen. Somit lässt sich schnell erkennen, welche Rezeptur vorteilhaft ist. Der berechnete Mehrverbrauch bzw. Einsparung an CO_2e -Emissionen pro m^3 bzw. pro t (Spalten 3 u. 5 Tabelle 5.8) bezieht sich jeweils auf die Referenzrezeptur mit natürlichen Gesteinskörnungen, d.h. ohne RC-GK-Anteile (RC-M 0 und RC-B 0).

5.4.4.1 CO_2e -Emissionen für die Herstellung bzw. Gewinnung der Gesteinskörnungen und der Gesamtrezeptur

In diesem Abschnitt wird zum einen das Treibhausgaspotenzial für die Herstellung bzw. Gewinnung der (RC-)Gesteinskörnungen als auch für die Gesamtrezeptur untersucht.

¹⁴² Bünge, Ulrich et al.: Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Abschlussbericht, Ludwig Bolkow Systemtechnik, 2016, S. 60 Tab. 22;

[Anmerkung: CNG - Compressed Natural Gas, z. Dt. verdichtetes Erdgas und LNG - Liquid Natural Gas, z Dt. verflüssigtes Erdgas]

¹⁴³ CO_2 -Äquivalent aus EI-KW-Park-DE-2020 (PRIMES) verfügbar unter:

<https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7b0E0B2796-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7d> aufgerufen am 23.12.2019

Gesteinskörnung

Betrachtet man zunächst nur die Gesteinskörnungen der jeweiligen Rezeptur (siehe Abbildung 5.9), zeigt der Anteil mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung (für RC-M 100 und RC-B 100) den niedrigsten CO₂e-Wert auf, sowohl bei Spritzbeton- als auch Spritzmörtel.

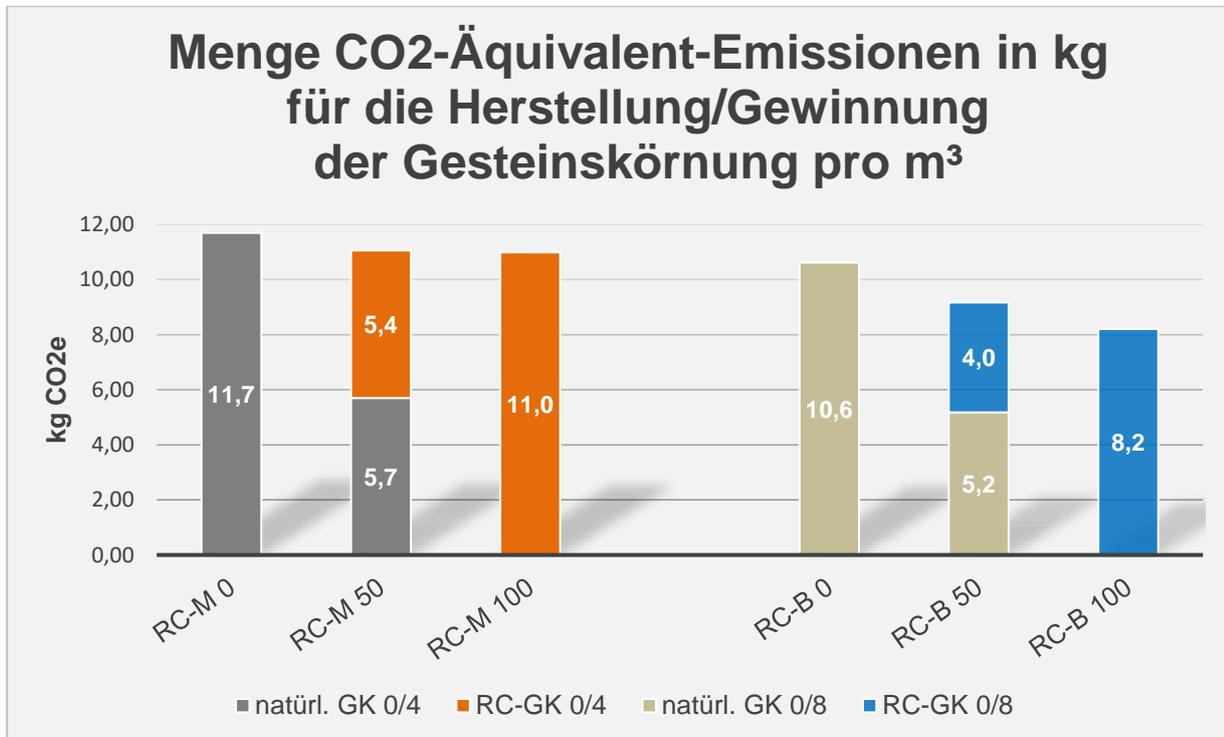


Abbildung 5.9: CO₂-Äquivalent-Emissionen pro m³ der Gesteinskörnung

Obwohl die Gesteinskörnung auf 1 m³ übertragen anteilig rund 78 M.-% ausmacht, trägt die Wahl der Gesteinskörnung, ob natürlich oder rezykliert nur einen Bruchteil der Gesamt-CO₂e-Emissionen bei der Bereitstellung der jeweiligen Mischung bei. Dies wird ersichtlich bei der Betrachtung der Gesamtrezepturen, d.h. inklusive der Herstellung der Zementmenge.

Beispielrechnung für die natürliche Gesteinskörnung für die Rezeptur RC-M 0 in Abbildung 5.9 (als Grundlage dienen Tabelle 5.10 mit den Spalten 3 u. 4, sowie die Tabelle 5.7 mit Spalte 3):

$$(1.800 \text{ kg/m}^3 / 1.000 \text{ kg/t}) \times 6,5 \text{ kg CO}_2\text{e/t} = 11,7 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$$

Gesamtrezeptur

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 5.10) zeigt die CO₂e-Emissionen, welche durch die Bereitstellung der eingesetzten Ausgangsstoffe für 1 m³ Frischbeton/-mörtel entstehen. Dabei werden die CO₂e-Emissionswerte der jeweiligen Ausgangsstoffe aus Tabelle 5.7 auf die in Tabelle 5.10 aufgestellten Rezepturen übertragen. Ein weiterer Ausgangsstoff bei der Frischbeton/-mörtelherstellung ist Wasser. Da dieser keine relevanten Treibhausgase bei der Förderung und Verwendung ausstößt, wird der Emissionsanteil des Wassers nicht weiter berücksichtigt.

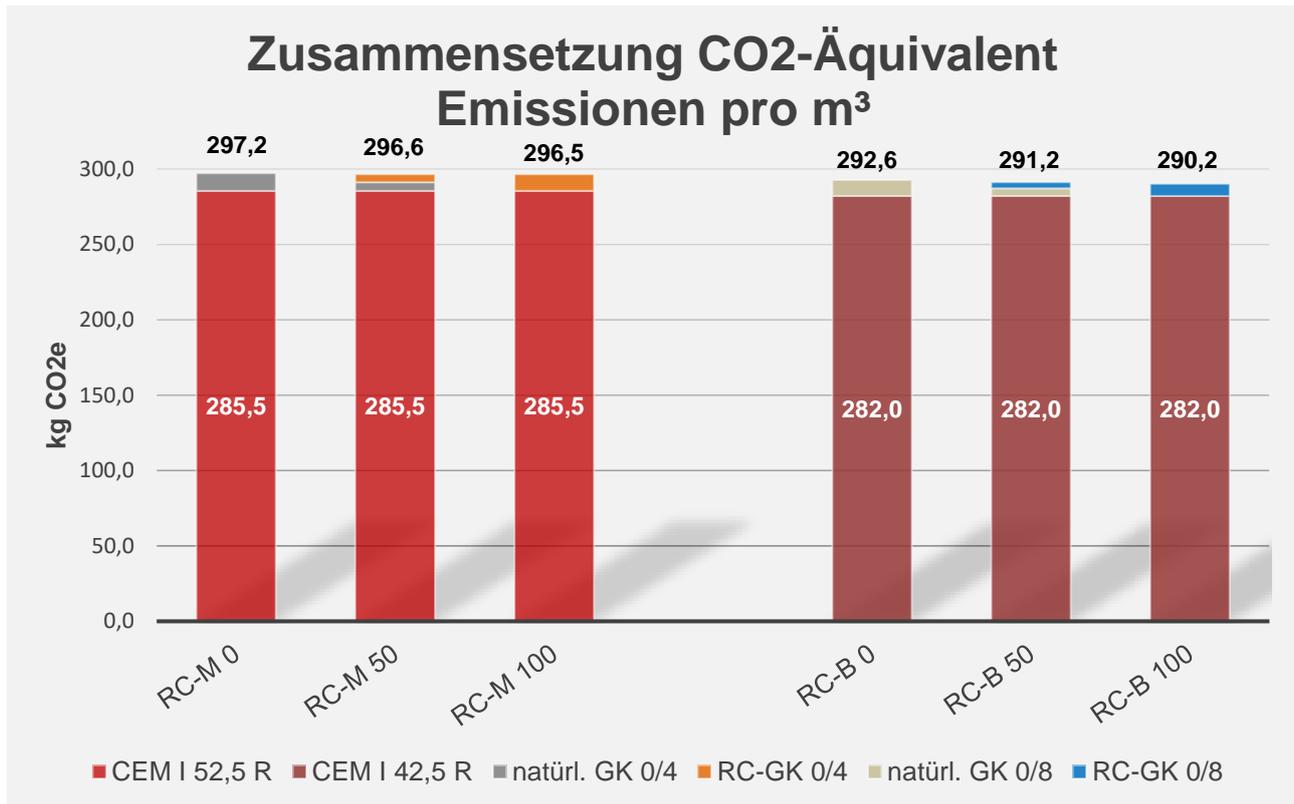


Abbildung 5.10: Zusammensetzung Gesamt-CO₂-Äquivalent-Emissionen pro m³ Trockenmischung Beton/Mörtel

Als Berechnungsgrundlage für die in Abbildung 5.10 angegebenen Werte dienen Tabelle 5.10 mit den Spalten 3, 4 u. 5, sowie die Tabelle 5.7 mit Spalte 3.

Die durchschnittliche Emissionsmenge aller aufgestellten Rezepturen beträgt rund 294,1 kg CO₂e/m³, wobei 283,8 kg CO₂e/m³ (~96%) durchschnittlich dem Zement zufallen. Dies liegt daran, dass Zement bekanntermaßen der energieintensivste Baustoff bei der Betonherstellung ist und somit in der Emissionsbilanz den größten Einfluss hat.

Die Menge des Zements ist in allen Rezepturen mit 350 kg/m³ angesetzt, d.h. diese 15 M.-% Zement sind für rund 96 % der Gesamtemissionen verantwortlich. Dabei ist es nicht signifikant, ob ein Zement der Sorte CEM I 52,5 R oder CEM I 42,5 R eingesetzt wird (vgl. Tabelle 5.7).

5.4.4.2 CO₂e-Emissionen durch Transport der Ausgangsstoffe

Die CO₂e-Emissionen werden für 1 t bzw. 1 m³ Trockenmischbeton/-mörtel je nach Rezeptur entsprechend den angenommenen Transportentfernungen von 130 km und 145 km berechnet. Als Berechnungsgrundlage dienen die

- CO₂e-Emissionen des LKW-Transportes in kg/tkm (vgl. Kapitel 5.4.3.2)
- Entfernungen in km (vgl. Abbildung 5.6) und
- Mengenangaben der Ausgangsstoffe pro m³ (vgl. Tabelle 5.10, Spalten 3-5), sowie

- Rohdichte des Frischbetons von $\rho = 2,3 \text{ t/m}^3$

So errechnen sich bspw. die Transportemissionen pro t für den RC-Spritzbeton RC-B 100 (mit 100 M.-% rezyklierter Gesteinskörnung) aus

- 0,098 kg CO₂e/tkm Gütertransport-Dienstleistung
- 130 km Entfernung zwischen Zement- bzw. RC-Anlage und Cottbus (Standort Kletterfelsen)
- 1752,0 kg/m³ RC-GK der Rezeptur RC-B 100
- 350 kg/m³ Zementanteil der Rezeptur RC-B 100
- 2.300 kg/m³ Frischbetonrohichte zu

$$0,098 \text{ kg CO}_2\text{e/tkm} * (130\text{km} * (1752,0 \text{ kg/m}^3 + 350 \text{ kg/m}^3) * 0,001 \text{ t/kg}) / 2,3 \text{ t/m}^3 = \underline{\underline{11,7 \text{ kg CO}_2\text{e/t}}}$$

Hierbei ist anzumerken, dass aufgrund der Einsparung des Wasseranteils von 196 l/m³, der beim Transport der Trockenbetonmischung gegenüber von Transportbeton nicht berücksichtigt wurde, eine Reduktion der CO₂e-Emissionen von 1 kg/t (siehe nachfolgende Gleichung) zu verzeichnen ist.

$$[0,098 \text{ kg CO}_2\text{e/tkm} * (130 \text{ km} * (196 \text{ l/m}^3) * 0,001 \text{ t/kg})] / 2,3 \text{ t/m}^3 = 1,09 \text{ kg CO}_2\text{e/t}$$

Eine zusammengefasste Übersicht der Ergebnisse ist der Tabelle 5.8 entnehmbar.

Tabelle 5.8: CO₂e-Transportemissionen pro t und m³

Rezeptur	RC-Anteil	Transportemissionen pro m ³	Mehrverbrauch (> 0) / Einsparung (< 0) der CO ₂ e-Emissionen pro m ³ im Vergleich zu RC-0	Transportemissionen pro t (mit $\rho = 2.300 \text{ kg/m}^3$)	Mehrverbrauch (> 0) / Einsparung (< 0) der CO ₂ e-Emissionen pro t im Vergleich zu RC-0
	[%]	[kg CO ₂ e/m ³]	[kg CO ₂ e/m ³]	[kg CO ₂ e/t]	[kg CO ₂ e/t]
Spalte	1	2	3	4	5
Spritzmörtel (RC-M 0)	0	30,1	-	13,1	-
RC-Spritzmörtel (RC-M 50)	50	28,5	-1,5	12,4	-0,7
RC-Spritzmörtel (RC-M 100)	100	27,0	-3,1	11,7	-1,3
Spritzbeton (RC-B 0)	0	30,1	-	13,1	-
RC-Spritzbeton (RC-B 50)	50	28,4	-1,6	12,4	-0,7
RC-Spritzbeton (RC-B 100)	100	26,8	-3,2	11,7	-1,4

Es lässt sich feststellen, dass der Transport der Ausgangsstoffe sowohl für den Spritzbeton als auch Spritzmörtel mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung rund 3 kg CO₂e/m³ bzw. über 1 kg CO₂e/t einsparen lassen im Vergleich zum Referenz- Spritzmörtel RC-M 0 und Referenz-Spritzbeton RC-B 0.

Anmerkung: Die hier ermittelten Transportemissionen beziehen sich auf die Menge von 1 m³ bzw. 1 t der jeweiligen Rezeptur. Für den Anwender ist dabei zu beachten, dass der Anteil des Rückpralls

bei der Bestellung einzukalkulieren ist. Es muss sozusagen zwischen Netto-Einbaumenge und Brutto-Verbrauchsmenge unterschieden werden. In Kapitel 5.4.5 wird dies für das Bauvorhaben Kletterfelsen berücksichtigt.

Bewehrungsstahl

Bei einer Distanz von 61,5 km ergibt sich der Transportenergieaufwand und die Transportemissionen für 1 t Bewehrungsstahl bei der Verwendung von Diesel-LKW zu

68,23 MJ/t (61,5 km * 1,11 MJ/tkm)

und

6,0 kg CO₂e/t (61,5 km * 0,098 kg CO₂e/tkm).

5.4.4.3 Einsatz der Geräte und Maschinen

Die ermittelte Sachbilanz als auch die Wirkungsabschätzung zum Einsatz der Geräte und Maschinen bietet einen Überblick über die CO₂e-Emissionen sowie den Energieverbrauch pro eingesetzte Stunde. Eine Übertragung auf die Herstellung bzw. die Errichtung der Vorzugsvariante (Leuchtturmprojekt Kletterfelsen) kann jedoch erst **nach einer wissenschaftlichen Begleitung und einem Monitoring des Bauprozesses stattfinden**. Das Monitoring umfasst die stundengenaue (besser minutengenaue) Erfassung des Geräte- und Maschineneinsatzes, inkl. Stand-/Leerlaufzeiten sowie die Ermittlung aller eingesetzten Mengen von Betriebs- und Verbrauchsstoffen (Strom, Benzin, Diesel, Wasser, etc.)

5.4.5 Ökobilanzielle Betrachtung der Vorzugsvariante

Abschließend werden die ermittelten CO₂e-Werte auf die Baustoffmengen der Vorzugsvariante zur Errichtung des Kletterfelsens aus Kapitel 5.3.2 übertragen. Dabei werden zunächst alle drei Rezepturen (0-, 50-, 100%-Substitution) sowohl der Mörtel- als auch der Betonmischungen betrachtet und miteinander verglichen. Abschließend wird die Vorzugsmörtel- und Vorzugsbetonrezeptur gewählt.

5.4.5.1 Herstellung und Verbrauch der Baustoffe

In Tabelle 5.9 wird der Anteil der Gesamtemissionen für die Herstellung und den Verbrauch berechnet. Dabei wird wie im Kapitel zuvor der massenanteilige Rückprall der jeweiligen Rezeptur berücksichtigt.

Es werden wieder zunächst alle untersuchten Spritzmörtel- und -betonrezepturen mit und ohne RC-

Anteil (vgl. Spalte 1) betrachtet und einander gegenübergestellt. Des Weiteren werden die ermittelten Rückprallwerte (vgl. Spalte 2) einerseits auf die Mengen, als auch auf die CO_{2e}-Emissionen übertragen. Die Spalten 3 und 4 zeigen die CO_{2e}-Emissionen der Rezepturen jeweils in kg CO_{2e}/t bzw. kg CO_{2e}/m³ an; dabei wurde für die Umrechnung eine Rohdichte von $\rho = 2.300 \text{ kg/m}^3$ gewählt.

Aus Kapitel 5.4.2.1 gehen die Baustoffmengen hervor, welche am Ende für den Kletterfelsen verbraucht werden (vgl. Spalte 5). Da durch das Trockenspritzverfahren ein Rückprall entsteht, wird dieser zusätzliche Anteil in Spalte 6 dazu addiert.

Für die vergleichende Gegenüberstellung bieten Spalten 7 und 9 eine Übersicht des Mehrverbrauches bzw. der Einsparung bei der Verwendung der Rezepturen mit Substitutionsanteil gegenüber der Referenz-Rezeptur ohne rezyklierte Gesteinskörnung. In Spalte 8 sind die Gesamt-CO_{2e}-Emissionen der Baustoffe durch Herstellung und den Verbrauch für die hier betrachtete Vorzugsvariante zusammengefasst.

Im zweiten Teil der Tabelle werden ebenfalls die CO_{2e}-Emissionen für die Herstellung der benötigten Baustähle (in Form von Stabstahl und Bewehrungsmatten) und des Transportbetons berechnet.

Tabelle 5.9: CO₂-Äquivalent-Emissionen der Baustoffe durch Herstellung und Verbrauch für die Vorzugsvariante

Material (Rezeptur)	RC-Anteil	Rückprall	CO ₂ e-Emissionen (Herstellung + Verbrauch) mit $\rho = 2.300 \text{ kg/m}^3$		zu verbauende Menge nach Mengenermittlung (gemäß Tabelle 5.6)	Gesamt benötigte Menge inkl. Rückprall	Mehrverbrauch (> 0) / Einsparung (< 0) der Mengen im Vergleich zu RC-0	Gesamt CO ₂ e-Emissionen benötigter Menge	Mehrverbrauch (> 0) / Einsparung (< 0) der CO ₂ e-Emissionen im Vergleich zu RC-0
			[kg CO ₂ e/t]	[kg CO ₂ e/m ³]					
Spalte [Berechnung]	1	2	3	4	5	6 [5+5*2]	7	8 [4*6]	9
Spritzmörtel (RC-M 0)	0	23%	129,2	297,2	71,3	87,7	-	26.064	-
RC-Spritzmörtel (RC-M 50)	50	20%	129,1	296,9		85,6	-2,1	25.377	-687 (-2,6%)
RC-Spritzmörtel (RC-M 100)	100	19%	129,0	296,6		84,8	-2,9	25.157	-907 (-3,5%)
Spritzbeton (RC-B 0)	0	17%	127,2	292,6	29,7	34,7	-	10.168	-
RC-Spritzbeton (RC-B 50)	50	31%	126,7	291,4		38,9	4,2	11.330	1.162 (+11,4%)
RC-Spritzbeton (RC-B 100)	100	12%	126,2	290,2		33,3	-1,5	9.653	-514 (-5,1%)
Baustoff	CO ₂ e-Emissionen (Herstellung + Verbrauch)		benötigte Menge		Gesamt CO ₂ e-Emissionen				
	[kg CO ₂ e/t]	[kg CO ₂ e/m ³]	[kg]	[m ³]	[kg CO ₂ e]				
Baustahl	683,0	-	5.543	-	3.786				
Transportbeton	100,8	231,9	152.318	66,2	15.354				

5.4.5.2 Transport der Baustoffe

Überträgt man nun die CO₂e-Emissionen auf den Transport der insgesamt berechneten Menge an Spritzmörtel und -beton für das Bauvorhaben, so darf nicht vergessen werden, dass außerdem die Menge des Rückpralls einzukalkulieren ist. Dies wird in der nachfolgenden Tabelle 5.10 berücksichtigt. Dabei sind die in den Vorversuchen ermittelten Rückprallwerte in Spalte 2 angegeben, die Zusammensetzung der Rezepturen bezogen auf 1 m³ in Spalten 3-5, die zu verbauende Menge in Spalte 6 und unterteilt in die einzelnen Ausgangsstoffe sind die benötigten Mengen für das Gesamtvorhaben (inkl. Rückprall); in den Spalten 7-9 aufgeführt. Die Gesamt-Transportemissionen, als CO₂-Äquivalent angegeben, sind der Spalte 10 zu entnehmen. Um nun den Mehrverbrauch bzw. die Einsparung der CO₂e-Emissionen darzustellen, werden die Rezepturen mit 50- und 100-% RC-Anteil der Rezeptur ohne RC-GK gegenübergestellt. Bei negativem Wert wird CO₂e eingespart und bei einem positiven Wert wird gegenüber dem herkömmlichen Spritzmörtel/-beton mehr CO₂e emittiert.

Der zweite Teil der Tabelle 5.10 gibt der Vollständigkeit halber eine Übersicht der Transportemissionen für die Baustoffe „Baustahl“ und „Transportbeton“ wieder.

Tabelle 5.10: CO₂-Äquivalent-Emissionen der Transportaufwendungen für die Baustoffe der Vorzugsvariante für den Kletterfelsen

Material /Rezeptur	RC-Anteil	Rückprall	Sand-Kies-Gemisch	RC-Sand-Kies-Gemisch	Zement	zu verbauende Menge nach Mengenermittlung (gemäß Tabelle 5.6)	Entfernung des Produktionsstandortes			Gesamt Transportemissionen (gerundet)	Mehrverbrauch (> 0) / Einsparung (< 0) der CO ₂ e-Emissionen im Vergleich zu RC-0
							145 km	130 km			
							Menge Sand-Kies-Gemisch inkl. Rückprall	Menge RC-Sand-Kies-Gemisch inkl. Rückprall	Menge Zement inkl. Rückprall		
	[%]	[M.-%]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[m ³]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg CO ₂ e]	[kg CO ₂ e]
Spalte [Berechnung]	1	2	3	4	5	6	7 [6*(2*3+3)]	8 [6*(2*4+4)]	9 [6*(2*5+5)]	10 [s. Beispiel unten]	11
Spritzmörtel (RC-M 0)	0	23%	1800	-	350	71,3	157.855,2	-	30.957,8	2.638	-
RC-Spritzmörtel (RC-M 50)	50	20%	900	883	350		77.004,0	75.549,5	30.302,7	2.442	-196,0 (-7,4%)
RC-Spritzmörtel (RC-M 100)	100	19%	-	1745	350		-	148.058,0	29.951,0	2.268	-369,7 (-14,0%)
Spritzbeton (RC-B 0)	0	17%	1800	-	350	29,7	62.276,0	-	12.202,5	1.040	-
RC-Spritzbeton (RC-B 50)	50	31%	900	876	350		34.976,2	34.043,5	13.699,0	1.105	64,8 (+6,2%)
RC-Spritzbeton (RC-B 100)	100	12%	-	1752	350		-	58.100,3	11.689,7	889	-151,3 (-14,5%)
Baustoff	Transportemissionen	Entfernung	CO ₂ e-Emissionen	Menge	Gesamt Transportemissionen						
	[kg CO ₂ e/tkm]	[km]	[kg CO ₂ e/t]	[kg]	[kg CO ₂ e]						
Baustahl	0,098	61,5	6,0	5.543	33						
Transportbeton	0,098	130	12,7	152.318	1.941						

*Beispielrechnung Gesamt Transportemissionen Rezeptur RC-M 50 [Spalte 10]:

$$0,098 \text{ kg CO}_2\text{e/tkm} * [(130 \text{ km} * 0,001 \text{ t/kg} * (75.549,5 \text{ kg} + 30.302,7 \text{ kg})) + (145 \text{ km} * 0,001 \text{ t/kg} * 77.004,0 \text{ kg})] = \underline{\underline{2.441,5 \text{ kg CO}_2\text{e}}}$$

Die Herleitung der 0,098 kg CO₂e/tkm ist dem Kapitel 5.4.3.2 zu entnehmen.

5.4.5.3 Zusammenfassung

Transport

Beim Transport der Ausgangsstoffe lässt sich eine Einsparung von ca. 15 % der Transportemissionen für die RC-Spritzbetonrezeptur (RC-B 100) und RC-Spritzmörtelrezeptur (RC-M 100) gegenüber den Rezepturen ohne RC-GK-Substitution erzielen (vgl. Tabelle 5.10).

Herstellung und Verbrauch

Es ist zu erkennen, dass bei der Verwendung des RC-Spritzmörtels und RC-Spritzbetons mit 100 %-iger RC-GK-Substitution, eine Einsparung von 2,9 m³ Spritzmörtel (sowie 0,2 t CO_{2e}) und 1,5 m³ Spritzbeton (sowie 1,7 t CO_{2e}) erzielt wird im Vergleich zu den Rezepturen ohne RC-GK-Substitution. Des Weiteren lässt sich feststellen, dass die Spritzmörtelrezeptur mit 50 %-iger RC-GK-Substitution zu einer Einsparung von 2,1 m³ Spritzmörtel und 0,69 t CO_{2e} führen könnte. Begründet liegt dies an den geringeren Rückprallmengen bei fast allen RC-Spritzmörtel- bzw. Spritzbetonmischungen (außer RC-B 50) im Vergleich zu den Versuchen mit den Rezepturen mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung.

Aufgrund des Rückpralls der Rezeptur RC-B 50 in Höhe von 31 M.-% (siehe Tabelle 5.9) weist diese Rezeptur die schlechteste Performance auf.

Insgesamt kann bei der Anwendung von RC-Spritzbeton mit 100 % RC-Substitution 5,1 % der Gesamtemissionen eingespart werden (siehe Tabelle 5.9).

Für die Errichtung des Kletterfelsens kommen aus ökologischer Sicht sowohl die Spritzmörtelrezeptur als auch die Spritzbetonrezeptur mit 100 %-iger Substitution rezyklierter Gesteinskörnungen als Vorzugsrezepturen in Betracht.

Bereitstellung (Transport + Herstellung und Verbrauch der Baustoffe)

Werden nun die Gesamtemissionen der drei Betrachtungsrahmen (Herstellung RC-GK, Gewinnung Sand/Kies, Transport) mit dem Zusatzverbrauch durch die Rückprallmengen zusammengeführt, bleiben sowohl der RC-Spritzbeton als auch der RC-Spritzmörtel mit 100 %-iger Substitution rezyklierter Gesteinskörnung in der Gesamtbilanz die emissionsärmsten Varianten (vgl. Abbildung 5.11).

Da allerdings der Spritzmörtel mit 50 % RC-Anteil in den Vorversuchen eine höhere Druckfestigkeit erreicht hat (C20/25), wird aufgrund der Anforderungen der äußeren Spritzbeton/-mörtelschicht die Rezeptur RC-M 50 gewählt. Dennoch weißt auch diese Rezeptur mit 50 % RC-Anteil gegenüber der Rezeptur mit natürlichen Gesteinskörnungen folgende **Einsparungen im Gesamtbauvorhaben Kletterfelsens** auf:

- Transport (vgl. Tabelle 5.10, Spalte 11): 196 kg CO_{2e}
- Herstellung (vgl. Tabelle 5.9, Spalte 9): 687 kg CO_{2e}

Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass für die Herstellung, den Transport und den Verbrauch bei Verwendung von 100 % RC-Spritzbeton-/mörtel für das BV Kletterfelsen (Vorzugsvariante) insgesamt 59,4 t CO₂e-Äquivalent (farbig markiert in Tabelle 5.11) ausgestoßen werden. Durch die Verwendung von 100% RC-Spritzbeton-/mörtel können 1,6 t – 2 t CO₂e-Äquivalent (~2,7% bis ~3,4%) eingespart werden.

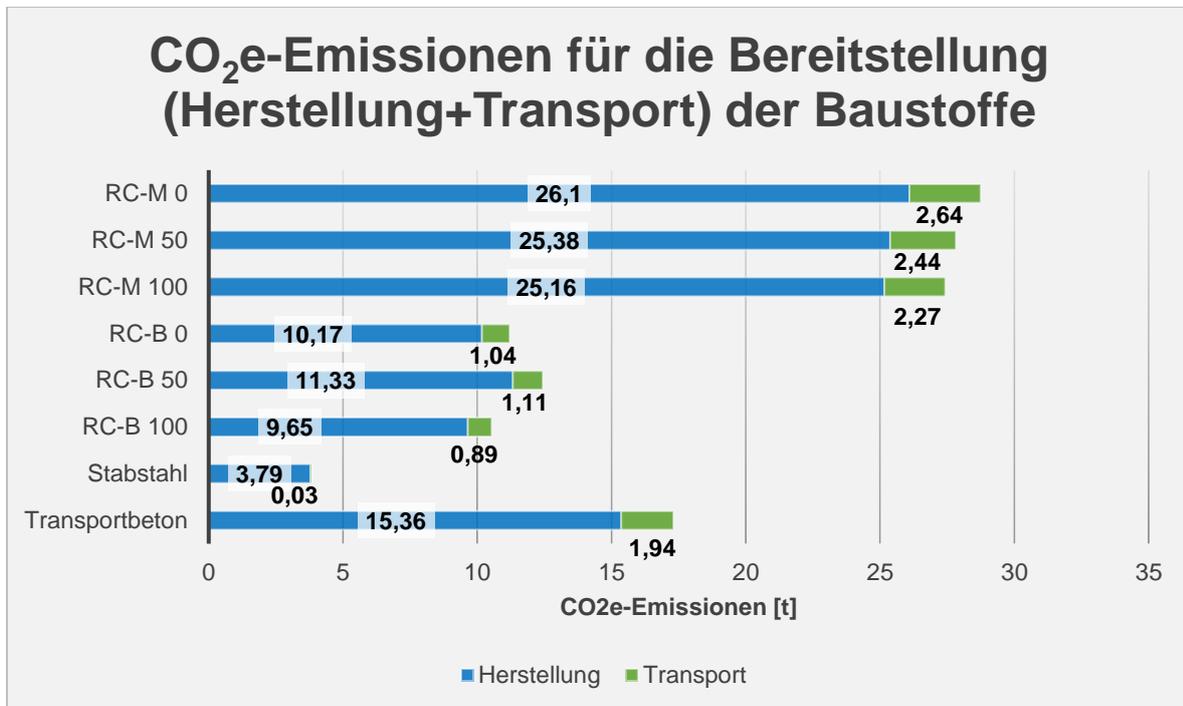


Abbildung 5.11: CO₂e-Gesamtemissionen für die Bereitstellung der Baustoffe der Vorzugsvariante

Tabelle 5.11: Übersicht der CO₂e-Gesamtemissionen [t]

Baustoff/Rezeptur	Bereitstellung [t CO ₂ e]	Mögliche Rezeptur-Kombinationen			
Spritzmörtel (RC-M 0)	28,7	X			
RC-Spritzmörtel (RC-M 50)	27,8		X		X
RC-Spritzmörtel (RC-M 100)	27,4			X	
Spritzbeton (RC-B 0)	11,2	X			
RC-Spritzbeton (RC-B 50)	12,4		X		
RC-Spritzbeton (RC-B 100)	10,5			X	X
Stabstahl	3,8				
Transportbeton	17,3				
	Ergebnis	61,0	61,3	59,0	59,4

5.5 Kostenschätzung des Bauvorhabens

Die Kostenschätzung ist im Rahmen der Leistungsphase 2 nach HOAI eine grundlegende Leistung des Bauplaners (siehe Tabelle 5.12). Es handelt sich hierbei um eine erste Abschätzung der Kosten bzw. eine überschlägige Ermittlung der zu erwartenden Kosten auf der Grundlage der DIN 276:2018-12 Kosten im Bauwesen¹⁴⁴.

Tabelle 5.12: Stufen einer Kostenermittlung entsprechend DIN 276 und HOAI

Stufe der Kostenermittlung	Anwendung entsprechend dem Planungsfortschritt (Grundlage)	Leistungsphase nach HOAI
Kostenrahmen	Bedarfsplanung	LP 1
Kostenschätzung	Vorplanung	LP 2
Kostenberechnung	Entwurfsplanung	LP 3
Kostenvoranschlag	Ausführungsplanung und Vorbereitung der Vergabe	LP 5 + LP 6
Kostenanschlag	Vergabe und Ausführung	LP 7
Kostenfeststellung	Ermittlung der entstandenen Kosten	LP 8

Die Kostenschätzung dient als Grundlage für weitere Entscheidungen zum Bauvorhaben. Sie weist aus, ob das Konzept tragfähig ist oder nicht.

Entsprechend der DIN 276 sind u.a. folgende Informationen für die Kostenschätzung heranzuziehen:

- Ergebnisse der Vorplanung (Planungsunterlagen und zeichnerische Darstellungen; vgl. Anhang 16)
- Berechnung der Mengen von Bezugseinheiten der Kostengruppen nach der DIN 276 und der Normenreihe 277 Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau; vgl. Kapitel 5.3.2

Für die Errichtung künstlicher Kletteranlagen aus Spritzbeton werden grob geschätzt Preise von 300 – 350 €/m² netto angegeben ohne Bodenplatte, Vermessung, Erdarbeiten, inkl. Einbau Fallschutzkies sowie Umfeldgestaltung¹⁴⁵. Die Felsenbaufirma Build a Rock GmbH rechnet für die Errichtung einer künstlichen Kletteranlage aus Spritzbeton mit 500 € netto/m² Kletterfläche. Nicht enthalten dabei sind die Herstellung des Fundaments, die Einrichtung von Kletterrouten, Erdarbeiten und Maßnahmen zur Umfeldgestaltung sowie Statik- und Planungsleistungen.

¹⁴⁴ Eine Abweichung zwischen geschätzten und tatsächlichen Kosten um ± 25% bis ± 30% ist bei der Kostenschätzung am größten.; <https://sidoun.de/wissen/din276/kostenschaetzung/> - aufgerufen im Oktober 2022

¹⁴⁵ www.kunstfelsen.de/common/info/preise; aufgerufen im Oktober 2022

Nachstehende Positionen basieren auf Kostenschätzungen und Angebotsabgaben drei unterschiedlicher Fachbetriebe für Kunstfelsenbau aus den Jahren 2018 und 2019 für eine vorangegangene Entwurfsvariante. Die nachstehende Kostenschätzung basiert demzufolge auf Erfahrungswerten und Schätzwerten durch Angaben von Bauausführenden. Die Angaben zu Erdarbeiten, zur Routeneinrichtung, Umfeldgestaltung sowie zu den Kosten für die Bauabschnitte 2 und 3 sind angenommen.

Übertragen auf die Vorzugsvariante folgt die Berechnung:

Vorarbeiten:	Vermessung, Gutachten, Genehmigungen	5.000 €
Kranmiete:	Turmdrehkran vorhalten, 4 Wochen	6.800 €
Rohbau:	512,9 m ² Kletterfläche x 500 € netto/m ²	256.450 €
Erdarbeiten:	55,76 m ³ Bodenaushub x 25 € netto/m ²	1.394 €
Fundament:	13,4 m ³ x 550 € netto/m ³	7.370 €
Kletterrouten:	26 Stk. x 4.500 € netto/Route	117.000 €
Gestaltung:	Farbanstrich, Einfriedung, Umfeld (pauschal)	45.000 €
Bauabschnitt 2:	Wettkampfwand (Anlieferung und Montage)	75.000 €
Bauabschnitt 3:	Flachdach-Ensemble	30.000 €
		544.014 €
	Honorar nach § 35 HOAI (Objektplanung, anrechenbare Kosten 400.000 €, Honorarzone I, Mittelsatz 40.878 €, LP 3+4, 18 % d. anrechenbaren Kosten)	+ 7.358 €
	Honorar nach § 51 HOAI (Tragwerksplanung, anrechenbare Kosten 300.000 €, Honorarzone I, Mittelsatz 22.468 €, LP 3-5, 85 % d. anrechenbaren Kosten)	+ 19.098 €
	Zwischensumme (netto)	570.470 €
	+ 19 % MwSt.	108.389 €
	<u>Gesamt geschätzt (brutto)</u>	<u>678.859 €</u>

Anmerkung: Zugrunde gelegt wurde die HOAI 2013 in der Fassung vom 10.7.2013.

Ohne Gewähr auf Vollständigkeit und des aktuellen, nicht kalkulierbaren Baupreisspiegels wird von einem 20 %-igen Aufschlag der dargestellten Kostenschätzung ausgegangen. Die Gesamtkosten für das Bauvorhaben „Projekt Kletterfelsen BTU Cottbus-Senftenberg“ würden sich demnach auf ~ 848.580 € (brutto) belaufen.

6 Zusammenfassung und Ableitung von weiterführenden Untersuchungen

Der erfolgreiche Einsatz von Brechsanden in der Spritzbetonanwendung, speziell dem Trockenspritzverfahren, konnte durch die Förderung der DBU im Zuge dieses Forschungsprojekts nachgewiesen werden.

Es wurde mit unterschiedlichen Substitutionsgraden der rezyklierten Gesteinskörnung experimentell im Laborversuch als auch im Feldversuch gezeigt, dass der feine Anteil $< 2 \text{ mm}$ (Brechsand) prinzipiell für Bauwerke bzw. Bauarbeiten mit Spritzbetontechnik geeignet ist. Weiter konnte nachgewiesen werden, dass sämtliche Umweltverträglichkeitsprüfungen gemäß DIN 4226-101 bestanden wurden und somit ein gleichwertiger Einsatz in der Spritzbetonherstellung im Vergleich mit Natursanden 0/2 möglich ist. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwertung von Brechsanden nicht nur im Beton, respektive Spritzmörtel/-beton möglich ist, sondern selbst in ungebundenen Einsatzbereichen, wie beispielweise im Bereich des Straßenbaus oder anderen Tiefbau- und Erdbauarbeiten, in denen die umwelttechnischen Anforderungen an die Ausgangsstoffe entsprechend den Zuordnungswerten Z0 bis Z1.2 der LAGA M20 „Bauschutt“ höher sind als im gebundenen Einsatzbereich.

Neben der Spritzbetonanwendung kann der Einsatz von Brechsanden im Betonbau allgemein dazu beitragen, natürliche Sande (vornehmlich der Korngröße 0/2 oder auch 0/4) zu substituieren und somit der Ressourcenschonung als auch dem Kreislaufgedanken gerecht zu werden.

Die Verwertung der in der rezyklierten Gesteinskörnung 0/4 und 0/8 vom Typ 1 (gemäß DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Ausgabe September 2010) enthaltenen Brechsande zur Spritzbetonherstellung erfolgte im Labor und im Feld. Getestet wurden Rezepturen für Spritzmörtel mit RC-GK 0/4 und Spritzbetone mit RC-GK 0/8. Der Substitutionsanteil der natürlichen Sandfraktion betrug 50, 75 und 100% für die Herstellung der Spritzmörtel als auch Spritzbetone.

Ausgewählte Ergebnisse der Laboruntersuchungen

➤ Brechsand

Analysiert wurde die Brechsandfraktion RC-GK 0/2; abgesiebt aus der RC-GK 0/8.

- Die Ermittlung des Fließkoeffizienten in die Kategorie $E_{cs} 35$ belegt die Scharfkantigkeit des RC-Brechsandes.

- Die Alkaliempfindlichkeit der RC-GK wurde entsprechend der Alkalirichtlinie nach Anhang B im Schnellprüfverfahren an Mörtelprismen untersucht mit dem Resultat der Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsstufe E III-S. Dies hatte zur Folge, dass der Zementgehalt von max. 350 kg/m³ für die Feuchtigkeitsklasse WF (feucht) als vorbeugende Maßnahmen gegen eine schädigende Alkalireaktion im Beton berücksichtigt wurde (siehe Tabelle 4.10).
- Frischbeton
 - Insgesamt wurden 6 Rezepturen (siehe Tabelle 4.10) getestet. Als Zemente kamen CEM I 52,5 R und CEM II/A-LL 32,5 R zum Einsatz.
 - Die Frischbetonrohddichten bewegen sich in Abhängigkeit der Rezepturen zwischen 1,95 kg/m³ mit 100% rezyklierter GK 0/4 unter Verwendung von CEM I 52,5 R und 2,16 kg/m³ mit 100% rezyklierter GK 0/4 unter Verwendung von CEM II/A-LL 32,5 R (siehe Abbildung 4.8).
 - Die Verarbeitbarkeit bzw. die gewünschte Konsistenz der Mörtel- und Betonmischungen der untersuchten rezyklierten Gesteinskörnungen 0/4 wurde durch die vorbereitenden Maßnahmen des Vornässens und der (späteren) Zugabe des Fließmittels Master Glenium ACE 430 erreicht.
- Festbeton
 - Die Festbetonmörtelrohddichten nach 28 Tagen schwanken zwischen 1,95 kg/m³ bei der Rezeptur mit 100% RC-GK unter Verwendung von CEM II/A-LL 32,5 R und 2,2 kg/m³ mit 50% RC-GK unter Verwendung von CEM I 52,5 R (siehe Abbildung 4.9).
 - Die gemessenen Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen schwanken zwischen 4,4 N/mm² bei 100%-igem RC-GK- Einsatz mit CEM II/A-LL 32,5 R (Bezeichnung: RC-100-32 (1)) und 6,2 N/mm² mit 50% RC-GK und einem CEM I 52,5 R (Bezeichnung: RC 50-52 (1,5)); vgl. Abbildung 4.10.
 - Hinsichtlich der Druckfestigkeitsergebnisse wurde festgestellt, dass bei 100-igem RC-GK - Einsatz ein C 16/20 erzielt wurde unabhängig der Zementart. Die höchste Druckfestigkeit C 25/30 wurde mit 50% RC-GK und dem Zement CEM I 52,5 R erzielt.

Ausgewählte Ergebnisse der Felduntersuchungen

Für die Herstellung der Spritzkörper blieben die Substitutionsraten der RC-GK sowohl für den RC-Mörtel mit RC-GK 0/4 als auch für den RC-Beton mit RC-GK 0/8 unverändert im Vergleich zu den vorangegangenen Laboruntersuchungen. Für die RC-M-Trockenmischungen wurde ein CEM 52,5 R und für die RC-B-Trockenmischungen ein CEM 42,5 R verwendet.

Insgesamt wurden 9 Spritzkästen aus Holz hergestellt: ein Spritzkasten für die Referenzrezeptur mit ausschließlich natürlichen Sanden (Bezeichnung RC-M Brand) und die übrigen acht Spritzkästen für jede entwickelte Rezeptur (entnehmbar dem Anhang 6).

➤ Ausführung der Spritzarbeiten

- Im Feldversuch erwies sich der Brechsand bei den Spritzarbeiten in keiner Weise als einschränkend.
- Die Rückprallmessungen (siehe Tabelle 4.13) ergaben beim RC-B mit 100 % RC-GK den geringsten Anfall mit 12%. Im Vergleich zum Referenz-Spritzmörtel RC-M Brand sind dies 3% weniger. Den höchsten Rückprallwert wies der RC-Spritzbeton mit 50% RC-GK 0/8 (Bezeichnung RC-B 50) auf: 31%.

➤ Ergebnisse der Festbetonprüfungen

- Druckfestigkeitsprüfung mittels Rückprallhammer

Mit der Rezeptur 50% an RC-GK 0/4 (Bezeichnung: RC-M 50) wurde die höchste Betondruckfestigkeitsklasse C25/30 erreicht. Die Rezeptur mit gleichen Anteilen an RC-GK 0/8 jedoch mit der niedrigeren Zementfestigkeitsklasse (CEM 42,5 R) erreichte eine Druckfestigkeitsklasse C16/20. Insofern ist eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht gegeben.

Der Austausch der natürlichen GK zu 100% durch RC-GK 0/8 (Bezeichnung: RC-B 100) ergab eine Einordnung in die Betondruckfestigkeitsklasse C8/10.

- Druckfestigkeitsprüfung an Bohrkernen

Aus jedem Spritzkörper wurden jeweils 3 Bohrkern im Durchmesser von 50mm gezogen.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsuntersuchungen mittels Rückprallhammer wurden für den RC-50 mit C20/25, RC-M 100 und RC-B 50 bestätigt. Der RC- B 100 und der RC-M 75 weisen um eine Betondruckfestigkeitsklasse höhere Werte auf. Der RC-B 75, eingestuft als C20/25 verminderte sich auf eine C12/15 (siehe Tabelle 4.15 und Abbildung 4.13).

- Prüfung der Wassereindringtiefe

Die Wassereindringtiefe wurde an jeweils einem Bohrkern mit einem Durchmesser von 150mm, entnommen aus jedem Spritzkasten, geprüft.

Lediglich der RC-B 75 überschritt den Grenzwert von 30mm gemäß ZTV-Wasserbau. Alle anderen Spritzbetone unterschreiten diesen Grenzwert mit hoher Sicherheit (siehe Abbildung 4.15).

Insgesamt wird festgestellt, dass Brechsande zur Herstellung von Spritzmörtel und -betonen geeignet sind. Es kann sogar der Einsatz von Beton und Mörtel im Trockenspritzverfahren zur Abdichtung von WU-Bauwerken dienen. Dennoch sind weitere Untersuchungen erforderlich. Dazu zählen bspw.:

- Zur Verbesserung der statistischen Sicherheit sind pro Rezeptur 3 Spritzkörper herzustellen an denen die Druckfestigkeitsuntersuchungen an Bohrkernen nachzuweisen sind.
- Der Einsatz von Fließmitteln beim RC-Spritzmörtel und -beton wurde im Feldversuch nicht getestet. Daher steht diese Erprobung noch aus. In diesem Zuge wird empfohlen, auch den Einsatz von Silikastaub zu testen. Dies begünstigt nicht nur den Fülleffekt, sondern auch die Fließfähigkeit und somit die Verarbeitung und demzufolge eine erhöhte Dauerhaftigkeit und ggf. Druckfestigkeit.
- Zur Beurteilung des Haftverbundes zwischen Alt- und Spritzbeton ist die Haftzugfestigkeit zu ermitteln. Dies spielt u.a. bei Instandsetzungen von Betonen eine Rolle.
- Die Festigkeitsprüfung für die Griffbefestigung ist beispielsweise beim Einsatz von RC-Spritzbeton für Kletterfelsen erforderlich und bisher noch nicht erforscht.
- Der Einsatz des Rückpralls ist für die sekundäre Weiterverarbeitung zu testen, um eine effiziente Verwertung zu gewährleisten.
- Um CO_{2e} bei der Herstellung und letztendlich bei der Verwendung einzusparen, sollten Portlandkompositzemente des Typs CEM II anstelle CEM I getestet werden.
- Die AKR-Prüfung der Brechsande ist durch den Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40°) nach AKR-Richtlinie des DAfStb Anhang C zu ergänzen. Bei einer Einstufung in E I-S ist die Zementmenge reduzierbar.
- Frost-Tau-Wechsel-Untersuchungen und die Einwirkung von Chloriden ist an RC-Spritzmörtel und -betonen zu prüfen für einen vielversprechenden Einsatz bspw. zur Hangabsicherung unmittelbar neben Straßenfahrbahnen.

Weitere Erkenntnisse und ableitende Handlungs- als auch Untersuchungsempfehlungen:

Die Übertragung des Einsatzes von RC-Spritzmörtel und -betonen für den Bau eines Kletterfelsens unter Verwendung von gebrauchten Straßenbauplatten ist konzipiert worden. Als Leuchtturm-Projekt der Nachhaltigkeit insbesondere im Sportbereich könnte ein solcher Felsen Vorbild für kommende Projekte im Bereich des Sportkletterns und der Spielplatzgestaltung sein. Kinder und Jugendliche kämen frühzeitig mit innovativen und nachhaltigen Lösungsansätzen in Kontakt, welche ein weiterer Baustein der gesamtgesellschaftlichen Herausforderung gegen den sich verändernden Klimabedingungen

bedeuten würde. Eine Vielzahl von Ideen existiert (siehe Anhänge 11 und 16). Berücksichtigt wurde bei den gestalterischen Konzepten der Standort auf dem Universitätscampus der BTU Cottbus-Senftenberg mit den vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten – nicht nur für Kletterer (siehe Anhang 15). Eine Umsetzung des Bauvorhabens erfolgte noch nicht.

Die ökologische Bewertung der hier im Bericht erarbeiteten Vorzugsvariante weist für den RC-B 100 die geringsten CO₂-Emissionen für die Bereitstellung der Baustoffe (Herstellung und Transport) auf. Inwiefern die erzielte Druckfestigkeit des RC-Spritzbetons mit 100%-iger RC-GK ausreichend ist, ist noch nachzuweisen. Ein gezielter Einsatz von Trockenfließmitteln und Zusatzstoffen können zu einer Erhöhung der Enddruckfestigkeit beitragen. Interessant wäre zudem der Vergleich der hier dargestellten Vorzugsvariante mit einer herkömmlichen Ausführung eines solchen Kletterfelsens in monolithischer Bauweise mit einem Stützgerüst aus Streckmetall.

Schlussbemerkung

Während der Projektlaufzeit ergaben sich zuvor nicht kalkulierbare hochschulpolitische, finanzielle wie auch planerische Veränderungen, die dazu führten, dass über die planerischen Vorarbeiten hinausgehend eine Umsetzung des Fallbeispiels nicht ermöglicht werden konnte. So ist es trotz des anfänglich hohen hochschulinternen als auch öffentlichen Zuspruchs und Interesses zum Bau eines künstlichen Kletterfelsens aus gebrauchten Betonelementen (BE) in Kombination mit RC-Spritzbeton/-mörtel auf dem Gelände der BTU Cottbus-Senftenbergs, zu keiner Realisierungsphase gekommen. Sowohl die anvisierten Fertigteilelemente aus dem Rückbauvorhaben des LG 1C, die ca. 400 bereits akquirierten/erworbenen „herrenlosen“ Straßenbauplatten unmittelbar auf dem Universitätsgelände, als auch die fertigen Konzepte und Entwürfe, konnten das während der Projektlaufzeit neue Präsidium nicht überzeugen. Eine Finanzierung konnte nicht zugesichert werden, der Bedarf einer „Sporteinrichtung der Nachhaltigkeit und des Ressourcenschutzes“ wurde nicht erkannt.

Daher sind alle praktischen Anwendungen im Zuge der ursprünglich geplanten Wieder/-Weiterverwendung der Betonelemente (Errichtung eines Sportkletterfelsens, Einsatz von neu zu entwickelnden Spannsystemen, RC-Betoneinsatz im Fundament für Anker-/Mörtellagen zwischen den gebrauchten BE) in diesem Forschungsbericht weggefallen.

Der Fokus wurde daher verstärkt auf das Hauptziel, die Machbarkeit der praktischen Anwendung von RC-Brechsanden in der Trockenspritztechnik, gelegt. Dabei sind eine umfangliche Analyse zur Umweltverträglichkeit, die Untersuchungen von bautechnischen Eigenschaften im Labormaßstab als auch in einem Feldversuch, in den Vordergrund genommen worden.

Quellen- und Literaturverzeichnis

Literatur

- BEHLER, K.; MEYER, A.: Untersuchungen zum Einsatz von Betonbrechsanden in sandreichen Betonen, Schlussbericht AiF-FO-Nr. 12349, MPA Bremen, Februar 2002
- BREIT, Wolfgang; SCHEIDT, Julia; BÖING, Raymund: BMBF HighTechMatBau Vorhaben „R-Beton“ – erste Ergebnisse und erste praktische Umsetzung im Großdemonstrator (2017), In: Newsletter Technik HeidelbergCement AG, Dezember 2017
- BRINKMANN, Norman, WANG, Michael, WEBER, Trudy, DARLINGTON, Thomas: Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions, Mai 2005
- BÜNGER, Dr. Ulrich, LANDINGER, Hubert, WEINDORF, Werner. et al.: Vergleich von CNG und LNG zum Einsatz in LKW im Fernverkehr – Abschlussbericht, Ludwig Bölkow Systemtechnik, 2016
- Deutsche Forschungsgemeinschaft: Sonderforschungsbereich 385 "Baustoffrecycling" (DFG - SFB 385). Magdeburg 1995-1997
- DITTRICH, Sebastian, DÖRMANN, Joseph, GRUNA, Robin, NÜHLEN, Jochen, THOME, Volker: Das Verbundprojekt BauCycle, in: Thome-Kozmiensky, Karl J. (Hrsg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3, Neuruppin 2016
- DORA, Bernd: Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand – Phasenveränderungen durch Temperaturbehandlung und Einsatzmöglichkeit, Braunschweig 2001
- FISCHER, Jakob: Untersuchung und Konzeptionierung zur Wiederverwendung von Betonelementen in Kombination mit Recycling-Beton in unterschiedlichen Anwendungsfeldern (Masterarbeit, unveröffentlicht), 2020
- GLOCK, Christian; SEFRIN, Rabea: (2020) Bewertung neuer Verfahren zur Ermittlung der charakteristischen In-situ-Betondruckfestigkeit bei Bestandstragwerken mittels indirekter und direkter Prüfmethode nach E DIN EN 13791:2018, Endbericht zum Forschungsauftrag DBV 317, TU Kaiserslautern
- HAUER, Bruno.; PIERKES, Roland; SCHÄFER, Stefan; SEIDEL, Maik; HERBST, Tristan; RÜBNER, Katrin; MENG, Birgit; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Heft 584 – Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ – Teilprojekt B „Potenziale des Sekundärrohstoffeinsatzes im Betonbau“
- IKEN, Hans W., LACKNER, Roman R., ZIMMER, Uwe P., WÖHNL, U., BREIT, Wolfgang: Handbuch der Betonprüfung, 6. Auflage, Verlag Bau+Technik, 2012
- MAIDL, Bernhard.: Handbuch für Spritzbeton, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1992
- METTKE, Angelika: Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus, Reihe Umweltwissenschaften, Band 5, Eberhard Blottner Verlag, Taunusstein, 1995
- METTKE, Angelika., HEYN, Sören.: Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen als Zuschlag in der Betonherstellung am Beispiel einer Wohnbebauung an der Rheinallee in Ludwigshafen, FKZ: AZ 26101-23, Cottbus, 2009
- METTKE, Angelika, HEYN, Sören, Ökologische Prozessbetrachtungen - RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), Cottbus, 2010

METTKE, Angelika: Material- und Produktrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Habilitationsschrift, BTU Cottbus, 2010

METTKE, Angelika, SCHMIDT, Stephanie, JACOB, Steffen, Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin, in Berlin-Mitte, Hrsg. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Referat Abfallwirtschaft, Berlin, 2015

METTKE, Angelika; SCHMIDT, Stephanie; JACOB, Steffen: Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Referat Abfallwirtschaft (Hrsg.), Berlin, 2015

METTKE, Angelika, DAGEFÖRDE, Angela, MEETZ, Michael: Brandenburger Leitfaden „Ausschreibungen“ Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (MLUL) (Hrsg.), 2017

METTKE, Angelika, JACOB, Steffen, ARNOLD, Viktoria, FISCHER, Jakob: Mehraufwand für innovative Ansätze zum Klima- und ressourcenschonendem Bauen bei der Umweltstation der Stadt Würzburg (KlimResBau) – Einsatz von Recycling-Beton, gefördert durch DBU (AZ: 33520/02-35/0), 2020

MÜLLER, Anette: Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau, i.A. des BBSR und BBR, Aktenzeichen 10.08.17.7 – 14.27, Abschlussbericht 2016

NEROTH, Günter, VOLLENSCHAAR, Dieter (Hrsg.): Wendehorst Baustoffkunde, Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz, 27. Auflage, 2011

NEUFERT, Winfried., MÜLLER, Christoph, GRAUBNER, Carl-Alexander, et al., Erforschung des Dreistoffgemisches Klinker, Hüttensand und Kalksteinmehl mit dem Ziel der Absenkung des Klinkeranteils im Zement zur Verminderung der CO₂-Emissionen in der Zementproduktion, DBU-Bericht: Aktenzeichen 28790/02, 2016

REFORMAT, Martin M.Sc. (Dissertation), Zementmahlung – Untersuchungen zum Zusammenhang von Mahlaggregat und Materialeigenschaften, Bauhaus-Universität Weimar, 2020

RUFFERT, Günther; BRUX, Gunther; BADZONG, Hans J.: Spritzbeton, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1995

SEVERINS, Katrin; BEHROUZI, Dennis: Recyclingbrechsande – Möglichkeiten und Grenzen künftiger Anwendung im Zement, Verein Deutscher Zementwerke e.V., Vortrag am 01.12.2020 „Runder Tisch Ressourceneffizienz im Bauwesen“, 14. Sitzung

STARK, Jochen; WICHT, Bernd: Dauerhaftigkeit von Beton, 2. Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg 2013

THIELE, Catherina; WEBER, Michael: Untersuchungen zur Korrelation von Druck- und Zugfestigkeit in alten, niederfesten Betonen als Grundlage für die Bestimmung der Tragfähigkeit von z.B. Befestigungsmitteln, 2016 Fraunhofer IRB Verlag

VDZ. Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Brechsand als Zementhauptbestandteil - Leitlinien künftiger Anwendung im Zement und Beton, in: VDZ-Information Betontechnik, 2019

WEBER, Michael; Schnell, Jürgen.; SEFRIN, Rabea (2019) Ermittlung der charakteristischen Betondruckfestigkeit im Bestand bei geringem Stichprobenumfang. Abschlussbericht zum AiF/IGF-Projekt Nummer 19346 N, Technische Universität Kaiserslautern.

WEBER, Michael: Zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen, Dissertation, TU Kaiserslautern, 2019

WEIMANN, Karin: Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik, BAM-Dissertationsreihe, Band 51, Berlin, 2009

WIENS, Udo; BREIT, Wolfgang: Beton ressourcenschonend – wie wird das neue Regelwerk für den R-Beton aussehen?, Vortrag auf dem Fachsymposium am 19.02.2020 in Stuttgart „Kreisläufe schließen – Ressourcen und Klimaschutz auf dem Bau“

ZANGE, Rainer M.: Anwendungsbezogenes Prozeßmodell der Wandlung elektrischer Energie in Energie des Leistungsschallimpulses, Dissertation, 2000

Weitere Literaturquellen

Arbeitsmittel zur verbesserten Vorbereitung der Reproduktion baulicher Grundfonds in der Industrie, Teil 3, 1985, in: Mettke, Angelika: Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilebaus – Umweltwissenschaften, Band 5, Taunusstein 1995

Berufsgenossenschaft Holz und Metall: BGI 734, Transport und Lagerung von Platten, Schnittholz und Bauelementen, Oktober 2009

Beton- und Stahlbetonbau Jahrgang 101, Hrsg. Ernst & Sohn, Heft 9 (2006)

Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V. (Hrsg.): Kreislaufwirtschaft Bau - Mineralische Bauabfälle – Monitoring 2018, Berlin 2021

DEPATISnet, Deutsches Patent- und Markenamt (Hrsg.): Gebrauchsmuster DE 295 05 633 U 1, Künstliches Felsengebilde, 1995

Fachbuchreihe BKI Baukosten

Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.) Bearbeiterin Mettke, Angelika et.al.: Materialien zur Abfallwirtschaft, Wiederverwendung von Gebäuden und Gebäudeteilen, 1999

Schweizerischer Überwachungsverband für Gesteinsbaustoffe (SÜGB, Hrsg.), UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804 - Durchschnitts-EPD für Gesteinskörnungen, Bern, 2018

Sika Spritzbeton Handbuch, Sika Schweiz AG, 4. Ausgabe 02/2012

Verband der Europäischen Bauindustrie (<https://straitresearch.com/report/europe-shotcretesprayed-cement-market/>)

VDZ (Verein Deutscher Zementwerke e.V., Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2021/2022, Berlin 2021

Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI 2013)

Normen, Richtlinien und Merkblätter

DIN EN 196-1:2016-11 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit

DIN EN 197-1:2011-11 Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

DIN EN 206-1:2001-07 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

DIN EN 933-1:2012-03 - Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren

DIN EN 1744-5:2006 Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 5: Bestimmung der säurelöslichen Chloride

DIN EN 1991-2:2010-12 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken

DIN 4226-101:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen

DIN 4226-102:2017-08 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle

DIN EN 12390-3:2019-10 Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern

DIN EN 12390-8:2019-10 Prüfung von Festbeton - Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck

DIN EN 12504-1:2009-07 Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 1: Bohrkernproben – Herstellung, Untersuchung und Prüfung der Druckfestigkeit; Anmerkung: Mittlerweile existiert eine überarbeitete Norm mit gleichnamigem Titel (DIN EN 12504-1:2019-09)

DIN EN 12504-2:2012-12 Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung – Bestimmung der Rückprallzahl

DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton

DIN EN 12620:2002+A1:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton

DIN EN 13791:2008-05 Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen

DIN EN 13791/A20:2017-02 Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen

DIN EN 14487-1:2006-03 Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität

DIN 18551:2014-08 Spritzbeton – Nationale Anwendungsregeln zur Reihe DIN EN 14487 und Regeln für die Bemessung von Spritzbetonkonstruktionen

DIN 276:2018-12 Kosten im Bauwesen

DIN EN ISO 14044:2021-02 Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen

DAfStb-Richtlinie Anforderungen an Ausgangsstoffe zur Herstellung von Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2, August 2019

DAfStb-Richtlinie Herstellung und Verwendung von Trockenbeton und Trockenmörtel (Trockenbeton-Richtlinie), 2005

DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe 2010-09

DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton, Berlin, 2013

DAfStb-Heft 619 (2017) Sachstandbericht Bauen im Bestand – Teil II „Bestimmung charakteristischer Betondruckfestigkeiten und abgeleiteter Kenngrößen im Bestand“. Berlin, Beuth Verlag

DAfStb-Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, 1998

LAGA PN 98 Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA; Hrsg.), 2001

Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20 – Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln, November 2003

Zement-Merkblatt Betontechnik B30, 11.2021 Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung – R-Beton

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2012, EU-Notifizierung Nr. 2012/491/D vom 17.08.2012

Internetquellen

Betontechnische Daten, Abschnitt 6.3.6; <https://www.betontechnische-daten.de/de/6-3-6-anforderungen-an-den-chloridgehalt>

Spezialfirma für Spritzbetonanwendungen im Kunstfelsenbau: www.buildarock.de

„Europe Shotcrete/Sprayed Cement Market Study, Forecast & Opportunities“; abrufbar unter: <https://straitresearch.com/report/europe-shotcretesprayed-cement-market/>

Hartwig, Dipl.-Ing. Joost, „Ökobilanzierung von Gebäuden“, Vortrag/Fachbeitrag, 2011, abrufbar unter: <https://www.baulinks.de/architektur/oekobilanz-oekobilanzierung.php> (zuletzt aufgerufen am 8.1.2020)

1 tkm Gütertransport-Dienstleistung, Auslastungsgrad 50 %, Kapazität 15,9 t, abrufbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={4C800A40-9FAE-B835-3C0E-7005AC5DD5C5}> (zuletzt aufgerufen am: 5.1.2021)

CO₂-Äquivalent aus EI-KW-Park-DE-2020 (PRIMES) abrufbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7b0E0B2796-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49%7d> (zuletzt aufgerufen am: 23.12.2019)

Bausand, abrufbar unter: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={89FA1FFA-0DC5-4DF2-9225-8A6DD27C79C8}>, (zuletzt aufgerufen am: 11.2.2020)

Anhangsverzeichnis

- Anhang 1 Prüfbericht 1: Prüfbericht Nr. 16 – 25520 Produktprüfung nach 1000 t zur RC-GK 8/16 [BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH, Berlin Okt 2016]
- Anhang 2 Prüfbericht 2: Prüfbericht Nr. 17 – 18299/45-1 Umweltanalytische Untersuchung RC-GK 0/8 [Prüflabor BOLAB Analytik, Nov. 2017]
- Anhang 3 Prüfbericht 3: Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung RC-GK 0/2 [M&S Umweltprojekt GmbH, Dez. 2018]
- Anhang 4 Ergebnisse zur Untersuchung des Ausbreitmaßes - Versuchsreihe 1
- Anhang 5 Biege- und Druckfestigkeiten Versuchsreihen 1 und 2
- Anhang 6 Mischungszusammensetzung der Trockenmischungen für die Herstellung der Spritzkörper
- Anhang 7 Prüfbericht 4: Prüfbericht Nr. BK 15/2019 zur Bestimmung der Gesteinsdruckfestigkeit [Baustoffprüflabor Bautzen, Jul. 2019]
- Anhang 8 Auswertung der Rückprallwerte aus zerstörungsfreier Prüfung
- Anhang 9 Aufruf und Skizzierung der Aufgabenstellung – Stegreif Kletterfelsen
- Anhang 10 Entwürfe von Architekturstudenten/-innen der BTU Cottbus-Senftenberg zum Bau eines künstlichen Kletterfelsens
- Anhang 11 Prinzipsskizze (Draufsicht) der Y-Bauweise aus Balkonbrüstungsplatten bzw. Betonfertigteilelementen
- Anhang 12 Prüfbericht 5: Prüfbericht Nr. 16-999-601 zur Bestimmung der Druckfestigkeit, des Chloridgehaltes und von Gefügebesonderheiten an Bohrkernproben aus Beton [FMPA der BTU C-S, Nov. 2016]
- Anhang 13 Technische Zeichnung Straßenbauplatte (3000x1000m) der Firma RAILBETON HAAS KG
- Anhang 14 Bauelementeliste der Straßenbauplatten mit Einordnung in eine Bauzustandsstufe (BZS); *bestehend aus Anhang 14.1 und 14.2*
- Anhang 15 Broschüre zum Projekt Kletterfelsen an den ehem. Präsidenten der BTU Cottbus-Senftenberg
- Anhang 16 Entwurfsskizzen des Kletterfelsen (Vorzugsvariante)

Ingenieurgesellschaft mbH
Baugrunduntersuchungen, Boden- und
Baustoffprüfungen für Berlin/Brandenburg
Umweltanalytik, Betonprüfung

BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH · Herzbergstr. 124 · 10365 Berlin

Heim Deponie und RC GmbH
Herrn Drechsler
Bitterfelder Straße 23

12681 Berlin-Marzahn

Prüfstelle nach RAP Stra 10

	Fachgebiet		
	A	D	i
0		D 0	
1	A1		I 1
2			I 2
3	A 3	D 3	I 3
4			



Berlin, 27.10.2016

PRÜFBERICHT

Nr. 16 – 25520

1 Allgemeines

Objekt: Heim Deponie und RC GmbH, Recyclingplatz Bitterfelder Straße, RC-GK 8/16 mm für Hochbauanwendungen
Produktprüfung nach 1000 t entsprechend den Vorgaben der Checkliste:
„WPK-Prüfungen, Mindesthäufigkeiten, Durchführung“

Auftraggeber: Heim Deponie und RC GmbH

Auftrag vom: 29.09.2016 (Herr Drechsler)

Gegenstand des Auftrages: Entnahme einer RC-Lieferkörnung RC-GK 8/16 mm, Prüfung der rezyklierten Gesteinskörnungen (GK) nach DIN EN 12620: 2013-07, nach DASTb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2“ und Beurteilung der Untersuchungsergebnisse zum Erteilen eines CE-Kennzeichens

Anzahl der Proben: 1 Mischprobe aus Haufwerk

Probenahme: am 29.09.2016 durch BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH

Dieser Prüfbericht umfasst 8 Seiten und 4 Anlagen mit insgesamt 14 Blättern. Der Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die gekürzte oder auszugsweise Vervielfältigung bedarf der schriftlichen Genehmigung der BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH.

■ **Geschäftsführer**
Dipl.-Ing. Harald Hesse
Tel. 0173 962 70 84

■ **Prüfstellenleiter**
Dr.-Ing. Uwe Rüdiger
Tel. 0172 919 29 33

■ **AG Berlin Charlottenburg**
HR B 99383 B

Ust-Ident-Nr.: DE 180653916
St.-Nr.: 37/235/30445 F298

■ **Prüfstelle**
Herzbergstraße 124
10365 Berlin
Telefon 030 29 33 16-0
Telefax 030 29 11 33 6
Mail: info@bolab.de

■ **Bankverbindungen:**
Berliner Volksbank eG
IBAN DE52 10090000 210 290 4004 • BIC BEVODE33
Deutsche Bank Berlin
IBAN DE25 10070024 042 011 2500 • BIC DEUTDE33
Berliner Sparkasse
IBAN DE12 10050000 019 010 3736 • BIC BELADE33

2 Laborergebnisse und Beurteilung

2.1 Korngrößenverteilung RC-GK 8/16 mm geprüft nach DIN EN 933-1

Korngrößenverteilung siehe Anlage 1
Siebanalyse siehe Anlage 1.1

2.2 Bewertung nach DIN EN 12620

2.2.1 Korngrößenverteilung

Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang [M.-%]			
	Körnung 8/16 mm			
	SOLL nach DIN EN 12620		IST	Anforderungen erfüllt
	min.	max.		
31,5	100	100	100	ja
22,4	98	100	100	ja
16	85	99	96,67	ja
11,2	-	-	61,33	-
8	0	20	12,13	ja
5,6	-	-	2,79	-
4	0	5	2,24	ja
2	-	-	1,95	-
1	-	-	1,87	-

2.2.2 Gehalt an Feinanteilen nach DIN EN 12620

RC-GK 8/16 mm

IST: $d_{0,063 \text{ mm}} = 0,69 \text{ M.-%}$

SOLL: Kategorie nach Tabelle 11: $d_{0,063 \text{ mm}} < 1,5 \text{ M.-%}$ $f_{1,5}$

2.2.3 Stoffliche Kennzeichnung nach DIN EN 933-11

RC-GK 8/16 mm

Bewertung nach DIN EN 12 620

Bestand- teile	Beschreibung	SOLL, Kategorie der Gesteinskörnung Zusammensetzung Massenanteil (M.-%)		IST, Kategorie der Gesteinskörnung Zusammensetzung Massenanteil (M.-%)	
		Typ 1 Betonsplitt/Be- tonbrechsand	Typ 2 Betonwerk- splitt/Bauwerks- brechsand	Massenanteil (M.-%)	Kategorie Typ 1
R _c + R _u	R _c : Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	R _{CU90} : ≥ 90	R _{CU70} : ≥ 70	93,0	R _{CU90} erfüllt
R _b	R _b : Mauerziegel (d. h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandstein, nicht schwimmender Porenbeton	R _{b10} : ≤ 10	R _{b30} : ≤ 30	6,2	R _{b10} - erfüllt
R _a	R _a : Bitumenhaltiges Material	R _{a1} : ≤ 1		0,8	R _{a1} - erfüllt
X + R _g	X: sonst. Material: bindige Materialien (d. h. Ton und Boden), verschiedene sonst. Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Gummi, Gips und Kunststoff R _g : Glas	XR _{g1} : ≤ 1	XR _{g2} : ≤ 2	0	XR _{g1} - erfüllt
FL	FL: Schwimmendes Material im Volumen	FL ₂ : ≤ 2 cm ³ /kg		0	FL ₂ - erfüllt

IST: Typ 1: Betonsplitt/Betonbrechsand und Typ 2: Bauwerksplitt/Bauwerksbrechsand
nach DIN 4226-100

SOLL: Typ 1: Betonsplitt/Betonbrechsand und Typ 2: Bauwerksplitt/Bauwerksbrechsand
nach DIN 4226-100

2.3 Kornrohddichte und Wasseraufnahme nach 24 Std. nach DIN EN 1097-6**Rohddichte****Bewertung nach DIN EN 12620**IST: Rohddichte auf ofentrockener Basis $\rho_{rd} = 2,24 \text{ Mg/m}^3$ SOLL: $\rho_{rd} \geq 2,0 \text{ Mg/m}^3$ **Wasseraufnahme nach 24 Std.****Bewertung nach DIN EN 12620**

IST: 5,8 M.-%

SOLL: $\leq 10 \text{ M.-%}$ **2.4 Wasseraufnahme nach 10 Min. nach DIN 4226-100****Bewertung nach DIN 4226-100**

IST: 1,0 M.-%

SOLL: $\leq 10 \text{ M.-%}$ **2.5 Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4****Bewertung nach DIN EN 12620**IST: 1,8 M.-%, Kategorie: SI_{15} SOLL: Kategorie: SI_{55}

2.6 Organische Bestandteile nach DIN 52 099**Bewertung nach DIN 52 099**

IST: farblos
SOLL: gelbe Färbung

2.7 Säurelösliches Chlorid nach DIN EN 1744-1

Chemisch-analytische Untersuchung siehe Anlage 4

Bewertung nach DIN EN 12620

IST: Probe 1: 0,021 M.-%
Probe 2: 0,017 M.-%
Probe 3: 0,023 M.-%
Durchschnitt: 0,02 M.-%
SOLL: $\leq 0,04$ M.-%, Kategorie $ACl_{0,04}$

2.8 Säurelösliches Sulfat nach DIN EN 1744-1

Chemisch-analytische Untersuchung siehe Anlage 4

Bewertung nach DIN EN 12620

IST: Probe 1: 0,57 M.-%
Probe 2: 0,45 M.-%
Probe 3: 0,63 M.-%
Durchschnitt: 0,55 M.-%
SOLL: $\leq 0,8$ M.-%, Kategorie $AS_{0,8}$

2.9 Wasserlösliches Sulfat nach DIN EN 1744-1

Chemisch-analytische Untersuchung siehe Anlage 2

Bewertung nach DIN EN 12620

IST: Probe 1: 0,12 M.-%
Probe 2: 0,16 M.-%
Probe 3: 0,2 M.-%
Durchschnitt: 0,16 M.-%
SOLL: $\leq 0,2$ M.-%, Kategorie $SS_{0,2}$

2.10 Wasserlösliches Chlorid nach DIN EN 1744-1

Chemisch-analytische Untersuchung siehe Anlage 2

Bewertung nach DIN EN 12620

IST: Probe 1: 0,014 M.-%
Probe 2: 0,022 M.-%
Probe 3: 0,017 M.-%
Durchschnitt: 0,018 M.-%

SOLL: $\leq 0,15$ M.-%**2.11 Gesamt-Schwefelgehalt nach DIN EN 1744-1**

Chemisch-analytische Untersuchung siehe Anlage 4

Bewertung nach DIN EN 12620

IST: Probe 1: 0,19 M.-%
Probe 2: 0,15 M.-%
Probe 3: 0,21 M.-%
Durchschnitt: 0,18 M.-%

SOLL: $\leq 1,0$ M.-%**2.12 Umweltverträglichkeit, Bewertung der Inhaltsstoffe nach TR LAGA 20 für RC-Baustoffe**

Chemisch-analytische Untersuchung siehe Anlage 3

IST: Proben 1 bis 3
Nach TR LAGA 20 für RC-Baustoffe werden die Zuordnungswerte Z 1.1 für die Proben 1-3 eingehalten.
Probe 1: Die elektrische Leitfähigkeit im Eluat ist Z 1.1, alle anderen untersuchten chemischen Parameter halten die Zuordnungswerte Z 0 ein.
Probe 2: Die elektrische Leitfähigkeit im Eluat und Chrom im Feststoff sind Z 1.1, alle anderen untersuchten chemischen Parameter halten die Zuordnungswerte Z 0 ein.
Probe 3: Die elektrische Leitfähigkeit im Eluat ist Z 1.1, alle anderen untersuchten chemischen Parameter halten die Zuordnungswerte Z 0 ein.

2.13 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) nach DAfStb- Richtlinie

Bei rezyklierten Gesteinskörnungen deren Herkunft nicht bekannt ist, werden diese in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S eingestuft.

In Tabelle 3-3 der Alkali-Richtlinie müssen die Bedingungen für ein Material mit Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S – im vorliegendem Fall treffen die Feuchtigkeitsklassen WO und WF - eingehalten werden.

Der Zementgehalt wird bei der Erarbeitung der Zementrezeptur festgelegt und muss der Forderung nach Spalte 2 entsprechen. Darüber hinaus soll als zusätzliche Sicherheit ein CEM III/A 32,5 N-LH/LH verwendet werden.

2.14 Frost-Tau-Widerstand nach Abschnitt 5.7.1 der DIN EN 12620

Frost-Tau-Wechsel nach DIN EN 13267-7 und Einstufung nach DIN EN 12620

IST:

	Absplitterung in M.-%				
Prüfkörnung 8/16 mm	Teilversuch 1	Teilversuch 2	Teilversuch 3	Durchschnitt	Kategorie nach Tabelle 18 der DIN EN 12620
	2,1	1,5	1,4	1,7	F ₂

SOLL:

Kategorie F₂

2.15 Leichtgewichtige organische Verunreinigungen nach DIN EN 12620**2.15.1 Bestimmung des Humusgehaltes nach DIN EN 1744-1; 1998, Abschnitt 15.1**

- Prüfung: NaOH-Test mit 3-% NaOH-Lösung, Prüfkörnung < 4 mm
- Ergebnis: Die ermittelte Farbe der Prüflösung ist heller als die Farbbezugslösung.
- SOLL: Farbe der Prüflösung muss heller als die der Farbbezugslösung sein.

2.15.2 Prüfung der Bestandteile, die die Oberflächenbeschaffenheit von Beton beeinflussen nach DIN EN 1744-1; 1998, Abschnitt 14.2

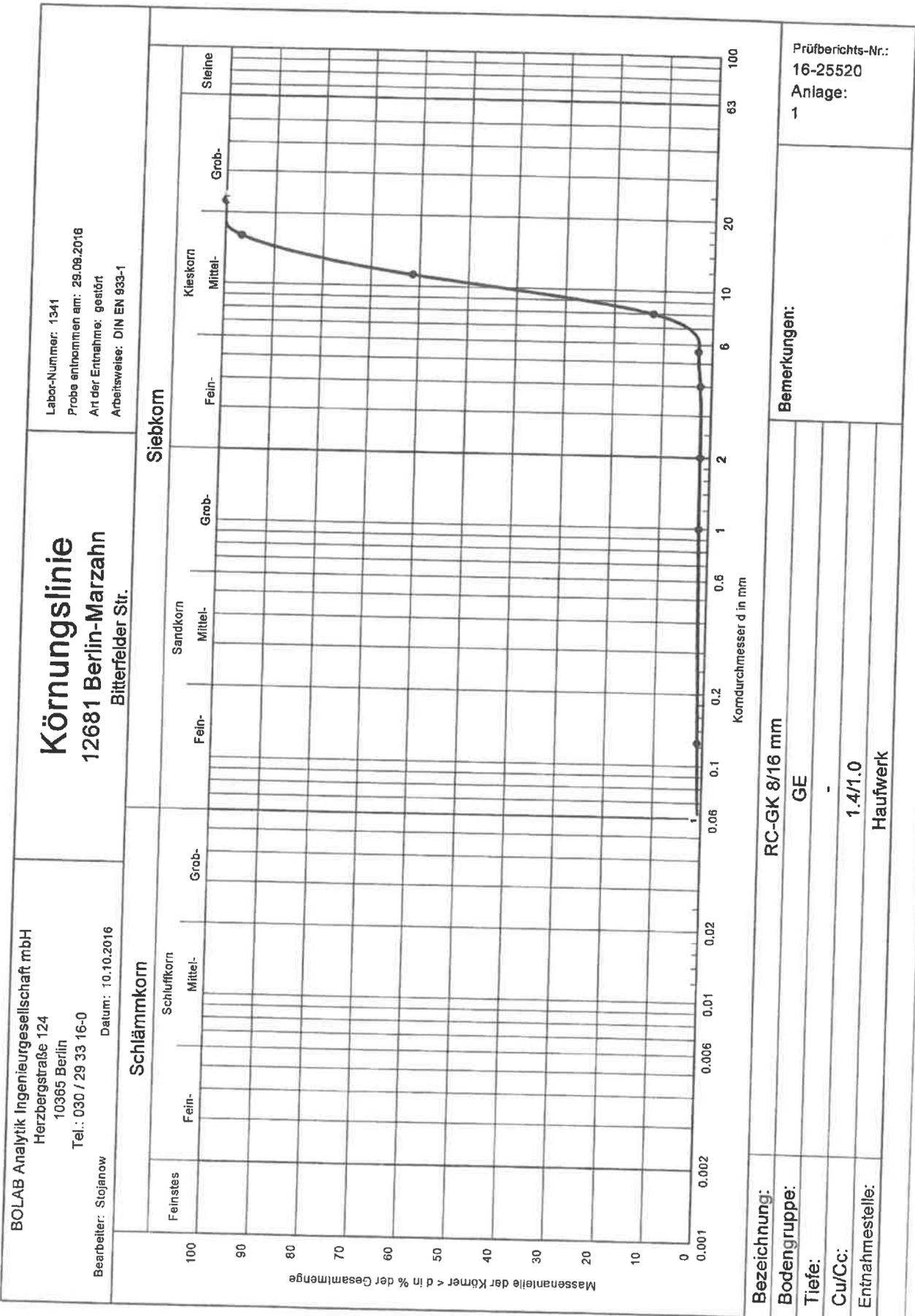
- Prüfung: Anteil von aufschwimmenden Verunreinigungen, Prüfkörnung 8/16 mm
- Ergebnis: 0 M.-%
- SOLL: $\leq 0,1$ M.-%

3 Gesamtbeurteilung

Die Anforderungen für die Anwendungen der RC-Lieferkörnungen RC-GK 8/16 in Hochbaubeton nach DIN EN 12620, nach DASTb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1, DIN 1045-2“ und nach „Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung“ Nr. Z-3.43-2117 vom 01.03.2016 werden erfüllt.


Dr.-Ing. U. Rüdiger
Prüfstellenleiter

BOLAB
AnalytikIngenieurgesellschaft mbH
www.bolab.deHerzbergstr. 124
10365 BerlinTel : 030 / 29 33 16 - 0
Fax : 030 / 29 11 33 - 6
mail: info@bolab.de



BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH
Herzbergstraße 124
10365 Berlin
Tel.: 030 / 29 33 16-0

Prüfberichts-Nr.: 16-25520
Anlage: 1.1

Körnungslinie

12681 Berlin-Marzahn
Bitterfelder Str.

Labor-Nummer: 1341

Probe entnommen am: 29.09.2016

Art der Entnahme: gestört

Arbeitsweise: DIN EN 933-1

Bearbeiter: Stojanow

Datum: 10.10.2016

Siebanalyse

Bezeichnung: RC-GK 8/16 mm
Bodengruppe: GE
Tiefe: -
Cu/Cc: 1.4/1.0
Entnahmestelle: Haufwerk
d10/d30/d60 [mm]: 7.772 / 9.239 / 11.105
Siebanalyse:
Trockenmasse [g]: 6540.00

Korngröße [mm]	Rückstand [g]	Rückstand [%]	Siebdurch- gänge [%]
22.4	0.00	0.00	100.00
16.0	217.70	3.33	96.67
11.2	2311.00	35.34	61.33
8.0	3218.00	49.20	12.13
5.6	610.70	9.34	2.79
4.0	35.80	0.55	2.24
2.0	19.31	0.30	1.95
1.0	4.99	0.08	1.87
0.125	52.50	0.80	1.07
0.063	25.00	0.38	0.69
Schale	45.00	0.69	-
Summe	6540.00		
Siebverlust	0.00		

Prüfberichts-Nr.: 16 – 25520
Anlage 2

Analysenergebnisse

der WESSLING GmbH

Proben 1-3: Prüfbericht Nr. CBE16-016106-1 vom 10.10.2016

wasserlösliches Chlorid und Sulfat

WESSLING GmbH
Haynauer Straße 60 · 12249 Berlin
www.wessling.de

WESSLING GmbH, Haynauer Str. 60, 12249 Berlin

BOLAB Analytik GmbH
Herr Dr.-Ing. U. Rüdiger
Herzbergstraße 124
10365 Berlin

Geschäftsfeld: Umwelt
Ansprechpartner: S. Schulz
Durchwahl: +49 30 77 507 402
Fax: +49 30 77 507 444
E-Mail: stefan.schulz@wessling.de

Prüfbericht

Berlin - Marzahn, Bitterfelder Str. 23

Prüfbericht Nr.	CBE16-016106-1	Auftrag Nr.	CBE-05823-16	Datum	10.10.2016
Probe Nr.		16-155795-01-1	16-155795-02-1	16-155795-03-1	
Eingangsdatum		30.09.2016	30.09.2016	30.09.2016	
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3	
Probenart		RC-Material	RC-Material	RC-Material	
Probenahme		29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016	
Probenahme durch		BOLAB	BOLAB	BOLAB	
Probengefäß		1 x PP	1 x PP	1 x PP	
Anzahl Gefäße		1	1	1	
Untersuchungsbeginn		30.09.2016	30.09.2016	30.09.2016	
Untersuchungsende		10.10.2016	10.10.2016	10.10.2016	

Probenvorbereitung

Probe Nr.		16-155795-01-1	16-155795-02-1	16-155795-03-1
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Mahlen		07.10.2016	07.10.2016	07.10.2016
Auszug wasserlösliches Chlorid	OS	07.10.2016	07.10.2016	07.10.2016



Prüfbericht Nr. **CBE16-016106-1** Auftrag Nr. **CBE-05823-16** Datum **10.10.2016**

Kationen, Anionen und Nichtmetalle

Probe Nr.		16-155795-01-1	16-155795-02-1	16-155795-03-1
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Chlorid (Cl), wasserlöslich	Gew% TS	0,014	0,022	0,017
Sulfat (SO ₄), wasserlöslich	Gew% TS	0,12	0,16	0,2

Abkürzungen und Methoden

Mahlen	DIN ISO 11464 ^A
Auszug/Aufschluss	DIN EN 1744-1
Chlorid-/Sulfatbestimmung	DIN EN 1744-1, mod.
OS	Originalsubstanz
TS	Trockensubstanz

ausführender Standort

Umweltanalytik Hannover
Umweltanalytik Hannover
Umweltanalytik Hannover

Stefan Schulz
Dipl.-Ing. Technischer Umweltschutz
Abteilungsleiter Umwelt und Wasser



Prüfberichts-Nr.: 16 – 25520
Anlage 3

Analysenergebnisse

der WESSLING GmbH

Proben 1-3: Prüfbericht Nr. CBE16-016210-1 vom 12.10.2016

Tabelle 2 der „Allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung“ Nr. Z-3.43-2117 vom 01.03.2016 und TR LAGA 20 für Recyclingbaustoffe/nichtaufbeiteter Bauschutt

WESSLING GmbH
Haynauer Straße 60 - 12249 Berlin
www.wessling.de

WESSLING GmbH, Haynauer Str. 60, 12249 Berlin

BOLAB Analytik GmbH
Herr Dr.-Ing. U. Rüdiger
Herzbergstraße 124
10365 Berlin

Geschäftsfeld: Umwelt
Ansprechpartner: S. Schulz
Durchwahl: +49 30 77 507 402
Fax: +49 30 77 507 444
E-Mail: stefan.schulz@wessling.de

Prüfbericht

Berlin - Marzahn, Bitterfelder Str. 23

Prüfbericht Nr.	CBE16-016210-1	Auftrag Nr.	CBE-05823-16	Datum	12.10.2016
Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03	
Eingangsdatum		30.09.2016	30.09.2016	30.09.2016	
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3	
Probenart		RC-Material	RC-Material	RC-Material	
Probenahme		29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016	
Probenahme durch		BOLAB	BOLAB	BOLAB	
Probengefäß		1 x PP	1 x PP	1 x PP	
Anzahl Gefäße		1	1	1	
Untersuchungsbeginn		30.09.2016	30.09.2016	30.09.2016	
Untersuchungsende		11.10.2016	11.10.2016	11.10.2016	

In der Originalsubstanz

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Farbe	OS	grau	grau	grau
Aussehen	OS	Bauschutt	Bauschutt	Bauschutt

Probenvorbereitung

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Eluat		10.10.2016	10.10.2016	10.10.2016
Königswasser-Extrakt	TS	07.10.2016	07.10.2016	07.10.2016



Prüfbericht Nr. **CBE16-016210-1** Auftrag Nr. **CBE-05823-16** Datum **12.10.2016**
Physikalische Untersuchung

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Trockensubstanz	Gew% OS	97,5	97,7	97,8

Summenparameter

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
EOX	mg/kg TS	<0,5	<0,5	<0,5
Kohlenwasserstoff-Index	mg/kg TS	53	82	66
Kohlenwasserstoff-Index > C10-C22	mg/kg TS	11	27	15

Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
PCB Nr. 28	mg/kg TS	<0,01	<0,01	<0,01
PCB Nr. 52	mg/kg TS	<0,01	<0,01	<0,01
PCB Nr. 101	mg/kg TS	<0,01	<0,01	<0,01
PCB Nr. 138	mg/kg TS	<0,01	<0,01	<0,01
PCB Nr. 153	mg/kg TS	<0,01	<0,01	<0,01
PCB Nr. 180	mg/kg TS	<0,01	<0,01	<0,01
Summe der 6 PCB	mg/kg TS	-/-	-/-	-/-
PCB gesamt (Summe 6 PCB x 5)	mg/kg TS	-/-	-/-	-/-

Im Königswasser-Extrakt**Elemente**

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Arsen (As)	mg/kg TS	6,7	5,8	6
Blei (Pb)	mg/kg TS	8,8	15	14
Cadmium (Cd)	mg/kg TS	<0,01	<0,01	<0,01
Chrom (Cr)	mg/kg TS	40	64	64
Kupfer (Cu)	mg/kg TS	17	14	19
Nickel (Ni)	mg/kg TS	13	11	15
Quecksilber (Hg)	mg/kg TS	<0,03	0,07	<0,03
Zink (Zn)	mg/kg TS	44	43	40



Prüfbericht Nr. **CBE16-016210-1** Auftrag Nr. **CBE-05823-16** Datum **12.10.2016**

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Naphthalin	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Acenaphthylen	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Acenaphthen	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Fluoren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Phenanthren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Anthracen	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Fluoranthren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Pyren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Benzo(a)anthracen	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Chrysen	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Benzo(b)fluoranthren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Benzo(k)fluoranthren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Benzo(a)pyren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Dibenz(ah)anthracen	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Benzo(ghi)perylen	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/kg TS	<0,06	<0,06	<0,06
Summe nachgewiesener PAK	mg/kg TS	-/-	-/-	-/-

Im Eluat filtriert nach CO2 Begasung

Physikalische Untersuchung

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
elektr. Leitfähigkeit n. CO2-Begasung	µS/cm WE	640	621	570

Im Eluat

Physikalische Untersuchung

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
pH-Wert	WE	11,9	11,9	11,8
Leitfähigkeit [25°C], elektrische	µS/cm WE	2.310	663	843



Prüfbericht Nr. **CBE16-016210-1** Auftrag Nr. **CBE-05823-16** Datum **12.10.2016**
Kationen, Anionen und Nichtmetalle

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Chlorid (Cl)	mg/l WE	10	10	10
Sulfat (SO₄)	mg/l WE	14	30	22

Elemente

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Arsen (As)	µg/l WE	<10	<10	<10
Blei (Pb)	µg/l WE	<10	<10	480
Cadmium (Cd)	µg/l WE	<0,5	<0,5	<0,5
Chrom (Cr)	µg/l WE	14	16	9
Kupfer (Cu)	µg/l WE	2	2	2
Molybdän (Mo)	µg/l WE	5	6	6
Nickel (Ni)	µg/l WE	<2	<2	<2
Quecksilber (Hg)	µg/l WE	<0,2	<0,2	<0,2
Vanadium (V)	µg/l WE	<1	<1	<1
Zink (Zn)	µg/l WE	7	7	4

Summenparameter

Probe Nr.		16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung		RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Phenol-Index nach Destillation	mg/l WE	<0,01	<0,01	<0,01



Prüfberichts-Nr.: 16 – 25520
Anlage 4

Analysenergebnisse

der WESSLING GmbH

Proben 1-3: Prüfbericht Nr. CBE16-017313-1 vom 27.10.2016

Schwefel gesamt, säurelösliches Chlorid und Sulfat

WESSLING GmbH
Haynauer Straße 60 · 12249 Berlin
www.wessling.de

WESSLING GmbH, Haynauer Str. 60, 12249 Berlin

BOLAB Analytik GmbH
Herr Dr.-Ing. U. Rüdiger
Herzbergstraße 124
10365 Berlin

Geschäftsfeld: Umwelt
Ansprechpartner: S. Schulz
Durchwahl: +49 30 77 507 402
Fax: +49 30 77 507 444
E-Mail: stefan.schulz@wessling.de

Prüfbericht

Berlin - Marzahn, Bitterfelder Str. 23

Prüfbericht Nr.	CBE16-017313-1	Auftrag Nr.	CBE-05823-16	Datum	27.10.2016
Probe Nr.	16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03		
Eingangsdatum	30.09.2016	30.09.2016	30.09.2016		
Bezeichnung	RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3		
Probenart	RC-Material	RC-Material	RC-Material		
Probenahme	29.09.2016	29.09.2016	29.09.2016		
Probenahme durch	BOLAB	BOLAB	BOLAB		
Probengefäß	1 x PP	1 x PP	1 x PP		
Anzahl Gefäße	1	1	1		
Untersuchungsbeginn	21.10.2016	21.10.2016	21.10.2016		
Untersuchungsende	27.10.2016	27.10.2016	27.10.2016		

Seite 1 von 2



DAKKS
Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14152-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die mit ^A markierten Prüfverfahren. Eine detaillierte Auflistung unserer akkreditierten Prüfverfahren befindet sich in der Urkundenanlage der DAKKS auf unserer Internetseite unter www.wessling.de. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die uns vorliegenden Prüfobjekte. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

Geschäftsführer:
Julia Wefling, Florian Wefling
HRB 1953 AG Steinfurt
Zweigniederlassung Berlin

Prüfbericht Nr. **CBE16-017313-1** Auftrag Nr. **CBE-05823-16** Datum **27.10.2016**

Probenvorbereitung

Probe Nr.	16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung	RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Säureaufschluss Gesamtschwefel	OS	26.10.2016	26.10.2016

Kationen, Anionen und Nichtmetalle

Probe Nr.	16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung	RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Schwefel, gesamt (S)	Gew% TS	0,19	0,15
Sulfat, HCl-löslich (ber. als SO ₄)	Gew% TS	0,57	0,45

Sonstige Untersuchungen

Probe Nr.	16-155795-01	16-155795-02	16-155795-03
Bezeichnung	RC - GK 8/16 mm - Probe 1	RC - GK 8/16 mm - Probe 2	RC - GK 8/16 mm - Probe 3
Chlorid in Beton	Gew% TS	0,021	0,017

Abkürzungen und Methoden

Chlorid a. heißen HNO₃-Extrakt
Auszug/Aufschluss
Gesamtschwefel
OS
TS

DIN EN 14629^A
DIN EN 1744-1
DIN EN 1744-1, mod.
Originalsubstanz
Trockensubstanz

ausführender Standort

Umweltanalytik Oppin
Umweltanalytik Oppin
Umweltanalytik Oppin

Stefan Schulz

Dipl.-Ing. Technischer Umweltschutz
Abteilungsleiter Umwelt und Wasser

Seite 2 von 2



DAkkS
Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die mit ^A markierten Prüfverfahren. Eine detaillierte Auflistung unserer akkreditierten Prüfverfahren befindet sich in der Urkundenanlage der DAkkS auf unserer Internetseite unter www.wessling.de. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die uns vorliegenden Prüfobjekte. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

Geschäftsführer:
Julia Weßling, Florian Weßling
HRB 1953 AG Steinfurt
Zweigniederlassung Berlin

HEIM
Deponie und Recycling GmbH
Herrn Hahnel
Bitterfelder Straße 23 a

12681 Berlin



Berlin, 21.11.2017

PRÜFBERICHT

Nr. 17 – 18299/45-1

[Ersatz für den Prüfbericht 17 – 18299/45 vom 21.11.2017]

1 Allgemeines

Objekt: **12681 Berlin-Marzahn, Bitterfelder Str. 23A / Wolfener Str.**
hier: **Umweltanalytische Untersuchung eines Verlegematerials 0/8 mm**

Auftraggeber: **HEIM Deponie und Recycling GmbH**

Auftrag vom: **14.11.2017 (Herr Hahnel)**

Gegenstand des Auftrages: **Probenahme, chemisch-analytische Untersuchung und Bewertung einer Mischprobe nach den Festlegungen der „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen: Technische Regeln – (TR LAGA 20) vom 06.11.2003 für RC-Baustoffe**

Anzahl der Proben: **1 Materialprobe Verlegematerial 0/8 mm; Haufwerk mit ca. 500 m³**
Probenbezeichnung: **MP 0/8**

Probenahme: **14.11.2017 durch die BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH (siehe Anlage 1)**

Ergebnisse: **Analytikbericht (siehe Anlage 2)**

Der Prüfbericht umfasst 2 Seiten und 2 Anlagen mit insgesamt 8 Blättern. Der Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die gekürzte oder auszugsweise Vervielfältigung bedarf der schriftlichen Genehmigung der BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH.

Durch die DAkKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium.

Die Akkreditierung gilt für die Probenahmeverfahren, welche der detaillierten Auflistung unserer akkreditierten Prüfverfahren in der Urkundenanlage der DAkKS auf unserer Internetseite unter www.bolab.de zu entnehmen sind. Prüfberichte dürfen ohne schriftliche Genehmigung der BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden.

■ **Geschäftsführer**

Dipl.-Ing. Harald Hesse
Tel. 0173 962 70 84

■ **Prüfstellenleiter**

Dr.-Ing. Uwe Rüdiger
Tel. 0172 919 29 33

■ **AG Berlin Charlottenburg**

HR B 99383 B

Ust-Ident-Nr.: **DE 180653916**

St.-Nr.: **37/235/30445 F298**

■ **Prüfstelle**

Herzbergstraße 124
10365 Berlin

Telefon 030 29 33 16 0

Telefax 030 29 11 33 6

Mail: info@bolab.de

■ **Bankverbindungen:**

Berliner Volksbank eG

IBAN DE52 10090000 210 290 4004 • BIC BEVODEBB

Deutsche Bank Berlin

IBAN DE25 10070024 042 011 2500 • BIC DEUTDE33

Berliner Sparkasse

IBAN DE12 10050000 019 010 3736 • BIC BELADEBXXX

2 Untersuchungsergebnisse

Gemäß Auftrag wurde aus dem zu untersuchenden Haufwerk eine Mischprobe aus 18 Einzelproben zusammengestellt und analysiert. Die Analysenergebnisse der Einzelparameter sind der Anlage 2, Prüfbericht Nr. CBE17-021188-1 der Wessling GmbH vom 20.11.2017 zu entnehmen.

3 Bewertung

MP 0/8

Zuordnungswert Z 1.1 nach TR LAGA 20;

bewertungsbestimmend ist der Parameter elektrische Leitfähigkeit *) im Eluat.

Alle weiteren untersuchten Parameter sind unauffällig (Zuordnungswert Z 0).

*) Nach Begasung mit CO₂ zur Einstellung eines realistischen Leitfähigkeitswertes für den frisch gebrochenen Beton wird dem beprobten Material folgender Zuordnungswert zugewiesen:

Gesamtbewertung des Materials (ca. 500 m³) nach TR LAGA 20: Z 1.1

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf das untersuchte Material. Weitergehende behördliche Festlegungen bleiben von der Bewertung ausgenommen.

Probenahmeprotokoll Abfall, Seite 1

Mitgeltende Vorschriften: LAGA PN 98, DIN EN 932-1, AltholzV, BioAbfV, VDLUFA Methodenbuch Bd.I, DIN 38414-S11, AbfKlärV, AltöIV, DIN 51750

Bauvorhaben		12681 Berlin-Marzahn, Bitterfelder Straße		Projekt-Nr.	17 - 18299/45-1
				Anlage	1
Auftraggeber Heim Deponie und Recycling GmbH					
Ansprechpartner AG Herr Hahnel				Tel.-Nr.	030/93490487
Anwes. Personen Herr Hahnel, Baggerfahrer					
Probenehmer BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH; Herr Meding					
Entnahmedatum		14.11.2017	Uhrzeit		10:00 Uhr
Witterung		bedeckt	Temperatur [°C]		1
Grund der PN		Deklarationsanalyse	Vermutete Schadstoffe		unbekannt
Herkunft des Abfalls Aufbereitung vor Ort					
Probenahmestelle u. Probenbezeichnung Haufwerk auf dem Lagerplatz MP 0/8					
Untersuchungslabor Wessling GmbH					
Abfallart <input type="checkbox"/> Boden + Steine <input type="checkbox"/> Bauschutt <input type="checkbox"/> Klärschlamm <input type="checkbox"/> Altöl <input type="checkbox"/> Schlämme <input type="checkbox"/> Altholz <input type="checkbox"/> Asphalt <input checked="" type="checkbox"/> RC-Baustoffe <input type="checkbox"/> Baggergut <input type="checkbox"/> Bio-Abfall/Kompost <input type="checkbox"/> Ind. Nebenprodukte <input type="checkbox"/> Gleisschotter					
Form der Lagerung <input type="checkbox"/> kegelförmiges Haufwerk ¹⁾ <input checked="" type="checkbox"/> trapezförmiges Haufwerk ²⁾ <input type="checkbox"/> Container <input type="checkbox"/>					
Gesamtvolumen [m³]		ca. 500	Max. Korngröße ³⁾		8 mm
Lagerungsdauer		kurzfristig	Einflüsse auf das Abfallmaterial		Witterung
PN-Verfahren <input checked="" type="checkbox"/> Einstiche <input type="checkbox"/> Schürfe <input type="checkbox"/> Bohrungen <input type="checkbox"/> Meißelprobe <input type="checkbox"/> Schöpfprobe <input type="checkbox"/> Kernbohrung <input type="checkbox"/> Baggerschürfe					
PN-Gerät		<input checked="" type="checkbox"/> Handschaufel <input checked="" type="checkbox"/> Spaten <input checked="" type="checkbox"/> Bagger <input type="checkbox"/> Hammer + Meißel <input type="checkbox"/> Bohrstock <input type="checkbox"/> Rammkernsonde <input type="checkbox"/> Schlitzsonde/Handbohrer <input type="checkbox"/> verrohrte Bohrung <input type="checkbox"/> Probenahmespeer <input type="checkbox"/> Schöpfbecher <input type="checkbox"/> Sedimentstecher / -greifer <input type="checkbox"/> Kernbohrgerät			
Probenvorbereitungsschritte <input type="checkbox"/> Probenkreuz <input type="checkbox"/> Riffelteiler <input checked="" type="checkbox"/> Fraktionierendes Schaufeln					
Anzahl:	Einzelproben	18	Mischprobe	1	Sammelproben -
Volumen der Laborprobe [l]		<input type="checkbox"/> 0,5 <input type="checkbox"/> 1,0 <input checked="" type="checkbox"/> 4,0 <input type="checkbox"/>		Volumen der Einzelproben [l]	
Probengefäß		<input type="checkbox"/> Braunglas <input checked="" type="checkbox"/> Edelstahl-Eimer <input type="checkbox"/> PE-Becher / Beutel <input type="checkbox"/>		Transport und Lagerung	
				gekühlt bei 4 °C im Pkw	
Hauptbestandteile		Organik-anteile	Mineralische Fremdbestandteile	Nichtmineralische Fremdbestandteile	Farbe
Beton		-	-	-	graubraun
Prozentualer Anteil min. Fremdbestandteile		<input type="checkbox"/> ohne min. Fremdbestandteile <input type="checkbox"/> < 10 % <input type="checkbox"/> 10 - 50 % <input checked="" type="checkbox"/> > 50 %			
Bestimmung der Bodenart		<input type="checkbox"/> Sand <input type="checkbox"/> Schluff / Lehm <input type="checkbox"/> Ton			
Beobachtungen bei der Probenahme / Bemerkungen / Sonderproben					

¹⁾ $V = 1/3 \cdot h \cdot \pi \cdot r^2 = 1/3 \cdot h \cdot 3,14 \cdot r^2$

²⁾ $V = ((a + b) / 2) \cdot h \cdot l$

mit: V = Volumen

h = durchschnittliche Höhe des Haufwerks / der Miete

r = Kreisradius der Grundfläche

a = Länge der Grundlinie der Stirnseite

b = Länge der Oberkante der Stirnseite

l = Länge der Miete

³⁾ Korngrößen < 5 V. % bleiben unberücksichtigt

bitte zutreffendes ankreuzen

Probenahmeprotokoll Abfall, Seite 2

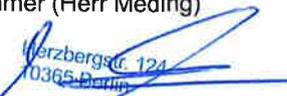
Bauvorhaben	12681 Berlin-Marzahn, Bitterfelder Straße	Projekt-Nr.	17 - 18299/45-1
		Anlage	1

Lageskizze / Fotodokumentation:



Bei Lageskizzen bitte einen Nordpfeil eintragen!

Unterschrift: Probenehmer (Herr Meding)


Herzbergstr. 124
10365 Berlin
Tel.: 030 / 29 33 16 - 0
Fax: 030 / 29 11 33 - 0
mailto:info@bolab.de

Juli 2015 / Ausfertigung 003

N:\Vorlagen\Allgemein\Probenahmeprotokolle\Probenahmeprotokolle Abfall\Probenahmeprotokoll-Abfall_Ausf03.doc

Prüfberichts-Nr.: 17 – 18299/45-1
Anlage 2

Analysenergebnisse
der Wessling GmbH
Prüfbericht Nr. CBE17-021188-1
vom 20.11.2017

WESSLING GmbH
 Haynauer Straße 60 · 12249 Berlin
 www.wessling.de

WESSLING GmbH, Haynauer Str. 60, 12249 Berlin

BOLAB Analytik GmbH
 Herr Michael Muske
 Herzbergstraße 124
 10365 Berlin

Geschäftsfeld: Umwelt
 Ansprechpartner: C. Möx
 Durchwahl: +49 30 77 507 440
 Fax: +49 30 77 507 444
 E-Mail: caren.moex@wessling.de

Prüfbericht

**12681 Berlin-Marzahn, Bitterfelder Straße 23A /
 Wolfener Straße**

Prüfbericht Nr.	CBE17-021188-1	Auftrag Nr.	CBE-07897-17	Datum	20.11.2017
Probe Nr.	17-180101-01				
Eingangsdatum	14.11.2017				
Bezeichnung	MP 0/8				
Probenart	RC-Material				
Probenahme	14.11.2017				
Probenahme durch	Auftraggeber				
Probengefäß	1 PP-Becher				
Anzahl Gefäße	1				
Untersuchungsbeginn	14.11.2017				
Untersuchungsende	20.11.2017				

In der Originalsubstanz

Probe Nr.	17-180101-01	
Bezeichnung	MP 0/8	
Farbe	OS	braun
Aussehen	OS	Sand

Probenvorbereitung

Probe Nr.	17-180101-01	
Bezeichnung	MP 0/8	
Eluat	16.11.2017	
Königswasser-Extrakt	TS	16.11.2017

Prüfbericht Nr. **CBE17-021188-1** Auftrag Nr. **CBE-07897-17** Datum **20.11.2017**
Physikalische Untersuchung

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
Trockensubstanz	Gew%	OS	90,9

Summenparameter

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
EOX	mg/kg	TS	<0,5
Kohlenwasserstoff-Index > C10-C22	mg/kg	TS	<7,0
Kohlenwasserstoff-Index	mg/kg	TS	56
TOC	Gew%	TS	0,15

Im Königswasser-Extrakt
Elemente

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
Arsen (As)	mg/kg	TS	3,2
Blei (Pb)	mg/kg	TS	13
Cadmium (Cd)	mg/kg	TS	0,42
Chrom (Cr)	mg/kg	TS	17
Kupfer (Cu)	mg/kg	TS	14
Nickel (Ni)	mg/kg	TS	6,5
Quecksilber (Hg)	mg/kg	TS	<0,03
Zink (Zn)	mg/kg	TS	31

Prüfbericht Nr. **CBE17-021188-1** Auftrag Nr. **CBE-07897-17** Datum **20.11.2017**
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
Naphthalin	mg/kg	TS	<0,06
Acenaphthylen	mg/kg	TS	<0,06
Acenaphthen	mg/kg	TS	<0,06
Fluoren	mg/kg	TS	<0,06
Phenanthren	mg/kg	TS	0,07
Anthracen	mg/kg	TS	<0,06
Fluoranthren	mg/kg	TS	0,12
Pyren	mg/kg	TS	0,13
Benzo(a)anthracen	mg/kg	TS	<0,06
Chrysen	mg/kg	TS	<0,06
Benzo(b)fluoranthren	mg/kg	TS	<0,06
Benzo(k)fluoranthren	mg/kg	TS	<0,06
Benzo(a)pyren	mg/kg	TS	<0,06
Dibenz(ah)anthracen	mg/kg	TS	<0,06
Benzo(ghi)perylen	mg/kg	TS	<0,06
Indeno(1,2,3-cd)pyren	mg/kg	TS	0,07
Summe nachgewiesener PAK	mg/kg	TS	0,383

Im Eluat filtriert nach CO₂ Begasung
Physikalische Untersuchung

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
pH-Wert nach CO ₂ -Begasung	WE		6,9
elektr. Leitfähigkeit n. CO ₂ -Begasung	µS/cm	WE	672

Im Eluat
Physikalische Untersuchung

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
pH-Wert	WE		12,1
Leitfähigkeit [25°C], elektrische	µS/cm	WE	2.660

Prüfbericht Nr. **CBE17-021188-1** Auftrag Nr. **CBE-07897-17** Datum **20.11.2017**
Kationen, Anionen und Nichtmetalle

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
Chlorid (Cl)	mg/l	WE	5,9
Sulfat (SO ₄)	mg/l	WE	7,4

Elemente

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
Arsen (As)	µg/l	WE	<10
Blei (Pb)	µg/l	WE	<10
Cadmium (Cd)	µg/l	WE	<0,5
Chrom (Cr)	µg/l	WE	<3,0
Kupfer (Cu)	µg/l	WE	6,0
Nickel (Ni)	µg/l	WE	<2,0
Quecksilber (Hg)	µg/l	WE	<0,2
Zink (Zn)	µg/l	WE	6,0

Summenparameter

Probe Nr.	17-180101-01		
Bezeichnung	MP 0/8		
Phenol-Index nach Destillation	mg/l	WE	<0,01

Prüfbericht Nr. **CBE17-021188-1** Auftrag Nr. **CBE-07897-17** Datum **20.11.2017**

Abkürzungen und Methoden

Aussehen, Farbe, Geruch (F)
Trockenrückstand / Wassergehalt im Feststoff
Extrahierbare organische Halogenverbindungen (EOX)
Kohlenwasserstoffe in Abfall (GC)
Gesamter organischer Kohlenstoff (TOC)
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)
Königswasser-Extrakt vom Feststoff
Metalle/Elemente in Feststoff
Quecksilber
Eluierbarkeit mit Wasser
pH-Wert in Wasser/Eluat
Leitfähigkeit, elektrisch
Gelöste Anionen, Chlorid in Wasser/Eluat
Gelöste Anionen, Sulfat in Wasser/Eluat
Metalle/Elemente in Wasser/Eluat
Quecksilber in Wasser/Eluat (AAS)
Phenol-Index in Wasser/Eluat
pH-Wert nach CO₂-Begasung
Elektr. Leitfähigkeit in Wasser/Eluat n. CO₂-Begasung

OS
TS
WE

WES 088
DIN ISO 11465^A
DIN 38414 S17^A
DIN EN 14039^A
DIN ISO 10694^A
DIN 38414 S23^A
DIN ISO 11466^A
DIN EN ISO 11885^A
DIN ISO 16772^A
DIN 38414-4^A
DIN 38404-5^A
DIN EN 27888^A
DIN EN ISO 10304-1^A
DIN EN ISO 10304-1^A
DIN EN ISO 11885^A
DIN EN 1483^A
DIN EN ISO 14402^A
DIN 38404 C5^A
DIN EN 27888

Originalsubstanz
Trockensubstanz
Wasser/Eluat

ausführender Standort

Umweltanalytik Oppin
Umweltanalytik Oppin

Stefan Schulz

Dipl.-Ing. Technischer Umweltschutz
Abteilungsleiter Umwelt und Wasser

Seite 5 von 5

Anhang 3 (3 Seiten)



M&S UMWELTPROJEKT GMBH
INGENIEURGESELLSCHAFT

Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln Bauschutt, Stand 6. November 2003 (ausgewählte Parameter)

Deklarationsanalyse

Auftraggeber:	BTU Cottbus-Senftenberg	Fakultät II Umwelt- und Naturwissenschaften				
Projekt:	Charakterisierung von Brechsand ≤2mm (RC-GK 0/2)					
Probenahme:	2. Dezember 2016	Probenehmer:			Auftraggeber	
Projekt.-Nr.:	18-10-1015 SP	Probe:			Brechsand MP1	
Feststoffuntersuchungen:						
Parameter	Zuordnungswerte				Dimension	Prüfergebnis
	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2		180668
MKW C ₁₀ -C ₄₀	100	300	500	1.000	mg/kg TS	82,9
EOX	1	3	5	10	mg/kg TS	< 0,2
PAK (16)	1	5	15	75	mg/kg TS	0,56
PCB (6)	0,02	0,1	0,5	1	mg/kg TS	< 0,02
Eluatuntersuchungen:						
Parameter	Zuordnungswerte				Dimension	Prüfergebnis
	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2		180668
Trockensubstanz	---	---	---	---	Ma.-%	96,6
pH-Wert	7,0 - 12,5				---	11,0
elektr. Leitfähigkeit	500	1500	2.500	3.000	µS/cm	595
Phenolindex	< 10	10	50	100	µg/l	< 10
Chloride	10	20	40	150	mg/l	5,67
Sulfate	50	150	300	600	mg/l	76,0
Arsen	10	10	40	50	µg/l	< 5
Blei	20	40	100	100	µg/l	< 20
Cadmium	2	2	5	5	µg/l	< 2
Chrom, gesamt	15	30	75	100	µg/l	< 10
Kupfer	50	50	150	200	µg/l	< 10
Nickel	40	50	100	100	µg/l	< 10
Quecksilber	0,2	0,2	1	2	µg/l	< 0,2
Zink	100	100	300	400	µg/l	< 10

* nach dem Begasen mit CO₂

Die Einstufung zu den Zuordnungswerten Z 1.1 und Z 1.2 wird "grün" gekennzeichnet, die Einstufung zum Zuordnungswert Z 2 "violett" und die Überschreitung des Zuordnungswertes Z 2 "rot".

Einstufung: Zuordnungswert Z 1.1

Abfall-Schlüssel 17 01 01

Spremberg, 19.12.2018


Dip. Ing. (FH) Frank Zschech
Prüfingenieur Lausitz





DAKKS
Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14319-01-00

Durch die DAKKS deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
nach DIN EN ISO / IEC 17025:2005
akkreditiertes Prüflaboratorium.
Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde
aufgeführten Prüfverfahren.



M&S UMWELTPROJEKT GMBH
INGENIEURGESELLSCHAFT

Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen - Technische Regeln Boden, Stand 5. Nov. 2004 (ausgewählte Parameter)

Deklarationsanalyse

Auftraggeber:	BTU Cottbus-Senftenberg	Fakultät II Umwelt- und Naturwissenschaften
Projekt:	Charakterisierung von Brechsand ≤2mm (RC-GK 0/2)	
Probenahme:	2. Dezember 2016	Probenehmer: Auftraggeber
Projekt.-Nr.:	18-10-1015 SP	Probe: Brechsand MP1

Feststoffuntersuchungen:					
Parameter	Zuordnungswerte			Dimension	Prüfergebnis
	Z 0	Z 1	Z 2		
					180668
MKW C ₁₀ -C ₄₀	100	600	2.000	mg/kg TS	82,9
EOX	1	3	10	mg/kg TS	< 0,2
PAK (16)	3	3 (9) ¹⁾	30	mg/kg TS	0,56
dav. Benzo-a-pyren	0,3	0,9	3	mg/kg TS	0,035
PCB (6)	0,05	0,15	0,5	mg/kg TS	< 0,02

Eluatuntersuchungen:						
Parameter	Zuordnungswerte				Dimension	Prüfergebnis
	Z 0	Z 1.1	Z 1.2	Z 2		
						180668
Trockensubstanz	---	---	---	---	Ma.-%	96,6
pH-Wert	6,5 - 9,5	6,5 - 9,5	6,5 - 12	5,5 - 12	---	11,0
elektr. Leitfähigkeit	250	250	1.500	2.000	µS/cm	595
Phenolindex	20	20	40	100	µg/l	< 10
Chloride	30	30	50	100	mg/l	5,67
Sulfate	20	20	50	200	mg/l	76,0
Arsen	14	14	20	60	µg/l	< 5
Blei	40	40	80	200	µg/l	< 20
Cadmium	1,5	1,5	3	6	µg/l	< 2
Chrom, gesamt	12,5	12,5	25	60	µg/l	< 10
Kupfer	20	20	60	100	µg/l	< 10
Nickel	15	15	20	70	µg/l	< 10
Quecksilber	< 0,5	< 0,5	1	2	µg/l	< 0,2
Zink	150	150	200	600	µg/l	< 10

* nach dem Begasen mit CO₂

2) Bodenmaterial mit Zuordnungswerten > 3 mg/kg und ≤ 9 mg/kg darf nur in Gebieten mit hydrogeologisch günstigen Deckschichten eingebaut werden.

Die Einstufung zu den Zuordnungswerten Z 1.1 und Z 1.2 wird "grün" gekennzeichnet, die Einstufung zum Zuordnungswert Z 2 "violett" und die Überschreitung des Zuordnungswertes Z 2 "rot".

Einstufung: Zuordnungswert Z 2
Abfall-Schlüssel 17 05 04

Spremberg, 19.12.2018

Dip. Ing. (FH) Frank Zschech
Prüfingenieur / Vorsitz



**DAKKS**Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14319-01-00Durch die DAKKS deutsche Akkreditierungsstelle GmbH
nach DIN EN ISO / IEC 17025:2005
akkreditiertes Prüflaboratorium.
Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde
aufgeführten Prüfverfahren.**M&S UMWELTPROJEKT GMBH**
INGENIEURGESELLSCHAFT

Prüfbericht Nr.:	18-10-1015 SP			
Auftraggeber:	BTU Cottbus-Senftenberg			
Projekt:	Charakterisierung von Brechsand $\leq 2\text{mm}$ (RC-GK 0/2)			
Art der Proben:	Probe 1	RC-GK 0/2	Eingang:	15.11.2018
Prüfzeitraum:	15.11.2018		bis :	19.12.2018

Parameter	Analysenwert 180668	Dimension	Bestimmungs- grenze	Prüfmethode
MKW C ₁₀ -C ₄₀	82,9	mg/kg TS	20	DIN ISO 16703
EOX	< 0,2	mg/kg TS	0,2	DIN 38414-S17
PAK (16)	0,56	mg/kg TS	0,1	DIN ISO 18287
davon Benzo-a-pyren	0,035	mg/kg TS	0,001	
PCB (6)	< 0,02	mg/kg TS	0,02	DIN EN 15308
Trockensubstanz	96,6	Ma.-%	0,1	DIN ISO 11645
Eluat hergestellt	---	---	---	DIN 38414 S4
pH-Wert	11,0	---	0,1	DIN EN ISO 10523
elektr. Leitfähigkeit	595	$\mu\text{S/cm}$	1	DIN EN 27888
Phenolindex	< 10	$\mu\text{g/l}$	10	DIN 38409 H16-3
Chloride	5,67	mg/l	1	DIN 38405 D1
Sulfate	76,0	mg/l	1	DIN 38405 D5
Arsen	< 5	$\mu\text{g/l}$	5	DIN EN ISO 11969
Blei	< 20	$\mu\text{g/l}$	20	DIN 38406 E6
Cadmium	< 2	$\mu\text{g/l}$	2	DIN EN ISO 5961
Chrom gesamt	< 10	$\mu\text{g/l}$	10	DIN EN 1233
Kupfer	< 10	$\mu\text{g/l}$	10	DIN 38406 E7
Nickel	< 10	$\mu\text{g/l}$	10	DIN 38406 E11
Quecksilber	< 0,2	$\mu\text{g/l}$	0,2	DIN EN 1483
Zink	< 10	$\mu\text{g/l}$	10	DIN 38406 E8

TS Trockensubstanz

* nach dem Begasen mit CO₂*Elke Hoche*

Bad Muskau, 19.12.2016

Dipl.-Chem. Elke Hoche
Laborleiterin Bad Muskau

Anhang 4

Ergebnisse zur Untersuchung des Ausbreitmaßes - Versuchsreihe 1

durchgeführt von den Studenten Jakob Fischer und Maria Dell im Baustofflabor des BTU Campus Sachsendorf (Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Gert Gebauer), Juni 2019

Probe (w/z-Wert)	Menge Zement [kg]	Menge Wasser [kg]	w/z Wert	Menge nat. GK [kg]	Menge RC-GK [kg]	Anteil RC-GK	Menge FM	Beschreibung	Maße Kegel vor Rütteln	Maße Kegel nach Rütteln	Ergebnis	verwendet für Biege- und Druckfestigkeitsprüfung
Brand 0,5	0,264	0,132	0,50	~ 1,50	-	0%	2,00%	steif, zu trocken			durchgefallen	
Brand 0,55	0,264	0,145	0,55	~ 1,50	-	0%	2,00%	steif, zu trocken	9,95 / 9,73	10,6 / 10,25	durchgefallen	
Brand 0,6	0,264	0,158	0,60	~ 1,50	-	0%	2,00%	erdfeucht	9,7 / 9,9	11,8 / 11,8	verwendbar	x
M1 0,5	0,264	0,132	0,50	1,350	-	0%		zu trocken, mehr Wasser			durchgefallen	
M1 0,55	0,264	0,145	0,55	1,350	-	0%		zu trocken, mehr Wasser			durchgefallen	
M1 0,6	0,264	0,158	0,60	1,350	-	0%		steif bis plastisch	9,95 / 9,73	11,3 / 11,4	verwendbar	
M10 0,6	0,264	0,158	0,60	1,215	0,1309	10%		zäh, stabiler Kegel	10,0 / 10,0	10,3 / 10,4	verwendbar	
M10 0,6	0,264	0,158	0,60	1,215	0,1309	10%	1,00%	sehr weiche Konsistenz	10,0 / 10,0	verworfen, Wasser- und Leimaustritt	durchgefallen	
M10 0,6	0,264	0,158	0,60	1,215	0,1309	10%	2,00%	sehr weiche Konsistenz	10,0 / 10,0	verworfen, Wasser- und Leimaustritt	durchgefallen	
M20 0,6	0,264	0,158	0,60	1,080	0,2618	20%		stabiler Kegel, zu trocken	10,0 / 10,0	10,3 / 10,3	durchgefallen	
M20 0,6	0,264	0,158	0,60	1,080	0,2618	20%	1,00%	plastische Konsistenz	10,0 / 10,0	verworfen, Wasser- und Leimaustritt	durchgefallen	
M30 0,6	0,264	0,158	0,60	0,945	0,3927	30%		zu trocken, stabiler Kegel	10,0 / 10,0	10,2 / 10,2	durchgefallen	
M30 0,6	0,264	0,158	0,60	0,945	0,3927	30%	1,00%	steif bis plastische Konsistenz	10,0 / 10,0	verworfen, Wasser- und Leimaustritt	durchgefallen	
M40 0,6	0,264	0,158	0,60	0,800	0,5236	40%		zu trocken, Kegel gebrochen	10,0 / 10,0	10,0 / 10,0	durchgefallen	
M40 0,6	0,264	0,158	0,60	0,800	0,5236	40%	1,00%	steif bis plastisch	10,0 / 10,0	verworfen, Wasser- und Leimaustritt	durchgefallen	
M4 0,6	0,264	0,158	0,60	0,675	0,655	50%		zu trocken, Kegel gebrochen	9,95 / 9,9	9,95 / 9,9	durchgefallen	
M4 0,65	0,264	0,171	0,65	0,675	0,655	50%		erdfeucht, stabiler, Bruchlinien	9,8 / 9,9	9,9 / 9,9	durchgefallen	
M4 0,7	0,264	0,184	0,70	0,675	0,655	50%		erdfeucht, stabiler, Bruchlinien	9,7 / 9,9	10,1 / 10,1	durchgefallen	
M4 0,75	0,264	0,197	0,75	0,675	0,655	50%		feuchter als erdfeucht, keine Bruchlinien mehr	9,9 / 9,9	10,3 / 10,3	durchgefallen	
M4 0,6	0,264	0,158	0,60	0,675	0,655	50%	1,00%	zäh, stabiler Kegel	10,0 / 10,0	10,0 / 10,3	durchgefallen	
M4 0,6	0,264	0,158	0,60	0,675	0,655	50%	1,50%	zäh, stabiler Kegel	9,8 / 9,9	10,2 / 10,1	verwendbar	x
M4 0,6	0,264	0,158	0,60	0,675	0,655	50%	2,00%	sehr weiche Konsistenz	10,0 / 10,0	10,2 / 10,4	verwendbar	
M4 0,6	0,264	0,158	0,60	0,675	0,655	50%	3,00%	sehr weiche Konsistenz, zu wässrig	10,0 / 10,0	10,3 / 10,4	durchgefallen	
M4 0,65	0,264	0,171	0,65	0,675	0,655	50%	1,50%	plastische Konsistenz, wässrig			durchgefallen	
M3 0,6	0,264	0,158	0,60	0,338	0,982	75%		zu trocken, Kegel bricht	9,6 / 9,5	9,6 / 9,5	durchgefallen	
M3 0,8	0,264	0,210	0,80	0,338	0,982	75%		plastisch angenehm, Kegel stabil	9,5 / 9,8	10,0 / 10,1	durchgefallen	
M2 0,6	0,264	0,158	0,60		1,309	100%		zu trocken, Kegel bricht			durchgefallen	
M2 0,65	0,264	0,171	0,65		1,309	100%		zu trocken, Kegel bricht	9,9 / 9,9	17,4 / 16,8	durchgefallen	
M2 0,7	0,264	0,184	0,70		1,309	100%		zu trocken, Kegel bricht	9,9 / 9,8	9,9 / 9,8	durchgefallen	
M2 0,9	0,264	0,236	0,89		1,309	100%		trocken, aber stabiler Kegel	9,8 / 9,8	10,1 / 10,1	durchgefallen	
M2 0,6	0,264	0,158	0,60		1,309	100%	1,00%	trocken, aber stabiler Kegel			durchgefallen	
M2 0,6	0,264	0,158	0,60		1,309	100%	2,00%	trocken, aber stabiler Kegel			durchgefallen	
Fischer 85	0,353	0,212 + 0,0212 (Vornässung)		0,900	0,873	50%	2,00%	steif bis plastisch, stabiler Kegel	10,0 / 10,0	10,9 / 11,2	verwendbar	x

Anhang 5 Ergebnisse Biege- und Druckfestigkeit der Versuchsreihen 1 & 2

Versuchsreihe 1

Probenalter 1d_ Rezeptur Ref-0-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
Ref-0-32	a	162,2	40	39,7	537,4	2,14	1,6	5,7
								6,3
	b	163,2	40	40	533,1	2,14	1,4	5,8
								5,7
	c	163,3	40,1	40	536,9	2,14	1,3	5,3
								5,4

Probenalter 1d_ Rezeptur RC-50-52 (1,5)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-50-52 (1,5)	a	160,5	40	40,1	544	2,12	5,1	29,6
								27,9
	b	160,5	40	40	541,2	2,12	4,7	27,3
								27,9
	c	160,2	41,6	40,1	545,5	2,11	4,8	27,7
								27,3

Probenalter 2d_ Rezeptur Ref-0-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
Ref-0-32	a	159,5	40	40	548,4	2,08	2,1	8,4
								9,2
	b	160	40,5	40,2	471,8	2,47	1,7	7,4
								8,9
	c	160,2	40,1	40,5	533,07	2,11	1,8	8,3
								8,2

Probenalter 2d_ Rezeptur RC-50-52 (1,5)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-50-52 (1,5)	a	160,2	40,5	41	547,56	1,97	5,3	37,1
								37,4
	b	159,9	40	40	546,2	2,10	5,7	36,0
								36,9
	c	160,1	40	40,5	535,9	2,07	5,4	37,2
								36,4

Probenalter 7d_Rezeptur Ref-0-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
Ref-0-32	a	160	40	40,2	538,7	2,16	2,7	12,9
								12,8
	b	160	41	40,7	545,8	2,16	2,5	13,4
								12,4
	c	159,1	40	40,5	538,64	2,17	2,6	12,6
								13,0

Probenalter 7d_Rezeptur RC-50-52 (1,5)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-50-52 (1,5)	a	159,1	40,25	40,5	535	2,13	5,4	37,9
								40,5
	b	160	40,25	40,5	523,5	2,14	4,3	37,3
								35,2
	c	160	40,5	40,5	534,3	2,14	5,1	38,9
								39,3

Probenalter 28d_Rezeptur Ref-0-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
Ref-0-32	a	163,5	42,5	40,5	563,09	2,16	3,0	17,2
								17,6
	b	164	40,1	40,5	558,78	2,17	3,1	17,1
								15,9
	c	164,4	40	40	557,19	2,17	3,2	16,3
								15,9

Probenalter 28d_Rezeptur RC-50-52 (1,5)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-50-52 (1,5)	a	160	40,5	41	545,35	2,12	5,8	45,6
								41,4
	b	160,5	40	41,5	548,56	2,11	5,8	44,4
								41,3
	c	160	40	41	546,53	2,12	5,9	43,3
								43,1

Probenalter 28d_Rezeptur RC-50-52 (2)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-50-52 (2)	a	160	40,5	40	562,59	2,21	5,5	33,6
								33,1
	b	160,5	40	40,5	559,63	2,20	5,4	31,2
								30,7
	c	160	40	40	556,13	2,20	4,9	32,6
								33,9

Versuchsreihe 2

Probenalter 2d_Rezeptur RC 50-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-50-32	a	160	40,5	40	523,2	2,06	2,72	13,5
								12,8
	b	160	40	40	524,8	2,07	2,74	12,9
								13,6
	c	160	40	40	524,7	2,07	2,62	12,7
								14,2

Probenalter 2d_Rezeptur RC 50-52(1)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-50-52 (1)	a	160	40,5	40	526,4	2,07	2,6	14,2
								14,4
	b	160	41	40	535,9	2,09	2,5	14,9
								14,7
	c	160	39,5	40	537,5	2,08	2,8	14,9
								14,3

Probenalter 2d_Rezeptur RC 100-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-100-32	a	160	40,5	40	504,1	1,97	1,05	4,3
								4,8
	b	160	40	40	508,4	1,98	1,07	4,7
								4,8
	c	160	40	40	507,3	1,98	1,19	4,8
								5

Probenalter 2d_Rezeptur RC 100-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC-100-52	a	160	40,5	40,5	505,3	1,97	2,36	10,5
								11
	b	160	40,5	40	510,8	1,97	2,21	10,7
								11,1
	c	160	40	40	505,1	1,97	2,27	10,6
								11,1

Probenalter 7d_Rezeptur RC 50-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 50-32	a	160,1	40	39,9	513,34	2,04	3,9	21,1
								19,2
	b	159,8	40	40	521,46	2,05	3,8	20,5
								19,6
	c	160	39,9	39,9	514,16	2,05	4,5	21,8
								20,8

Probenalter 7d_Rezeptur 50-52 (1)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 50-52 (1)	a	159,8	40	39,9	528,75	2,09	4,1	24,9
								25,5
	b	159,9	40	40	528,81	2,09	4,3	26,3
								25,8
	c	160	40	39,9	532,58	2,09	4,4	26,9
								27

Probenalter 7d_Rezeptur 100-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 100-32	a	159,9	39,9	39,9	503,66	1,98	3,6	18,1
								18,4
	b	160	40	39,9	501,41	1,98	3,7	17,5
								17,4
	c	160	39,9	39,8	500,4	2,07	3,5	17,7
								18,4

Probenalter 7d_Rezeptur 100-52

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 100-52	a	160,1	40	39,9	509,08	2,01	4,6	23,57
								24,34
	b	160	40	39,9	508,32	2,01	4,4	22,86
								23,29
	c	160	40,1	40	518,85	2,02	4,6	24,97
								24,03

Probenalter 28d_Rezeptur 50-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 50-32	a	160	40	40,5	528,87	2,09	4,6	29,46
								20,44
	b	160	40,5	41	532,2	2,09	4,5	29,31
								29,38
	c	160	40	40	528,9	2,1	4,5	30,39
								29,45

Probenalter 28d_Rezeptur 50-52(1)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 50-52(1)	a	160,5	40	41	539,43	2,09	5,1	33,06
								31,94
	b	160	40	40	537,4	2,09	4,9	32,44
								31,56
	c	160	40	39	530	2,08	5,3	31,31
								29,88

Probenalter 28d_Rezeptur 100-32

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 100-32	a	160	40	40,5	503,6	1,99	4,6	25,07
								25,23
	b	160	40	41	511,1	1,99	4,1	24,14
								25,58
	c	160,5	40	40	502,9	1,99	4,3	24,41
								25,14

Probenalter 28d_Rezeptur 100-52

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
RC 100-52	a	160	40	39,5	504,31	1,98	5,1	27,56
								27,44
	b	160	40	40	504,66	1,98	5,1	27,69
								27,81
	c	160	40,5	40,5	509,7	1,98	4,9	27,94
								28,19

Probenalter 28d_Rezeptur R5 (Zusatzprüfung)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
R5	a	160	40,5	40	481,98	1,85	2,75	10,4
								11,5
	b	160,5	40	40	481,21	1,87	2,64	10,9
								11,8
	c	160	40	40	478,87	1,87	2,74	10,9
								10,9

Probenalter 28d_Rezeptur R6 (Zusatzprüfung)

Rezeptur	Probekörper	Länge	Breite	Höhe	Gewicht	Rohdichte	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
		mm	mm	mm	g	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²
R6	a	160	40	40,5	494,37	1,9	4,23	19,14
								20,01
	b	160	40	40,5	497,06	1,91	4	19091
								19,84
	c	160,5	40	40,5	494,26	1,9	3,86	20,81
								21,11

Anhang 6 Zusammensetzung der Trockenmischungen für die Herstellung der Spritzkörper

Referenzmischung und Spritzmörtelmischung (inkl. einkalkulierte Rückprallmenge)

Spritzkörperbezeichnung	Anteil und Art der GK	Zusammensetzung Trockengemisch		
		bestehend aus	Menge in kg	entspricht M.-%
RC-M Brand	100% nat. GK	Fa. Sakret, 81 % nat. GK (Sand 0/2, Kalksteinmehl), 17% CEM II/A-LL 32,5 R, 2% Additive		
RC-M 0	100% nat. GK	nat. GK 0/4	97,2	83,6
		CEM I 52,5 R	19,1	16,4
RC-M 50	50 % natürlich 50 % RC-GK	nat. GK 0/4	48,6	42,1
		RC-GK 0/4	47,7	41,3
		CEM I 52,5 R	19,1	16,5
RC-M 75	25 % natürlich 75 % RC-GK	nat. GK 0/4	24,3	21,2
		RC-GK 0/4	71,5	62,3
		CEM I 52,5 R	19,1	16,6
RC-M 100	100% RC-GK	RC-GK 0/4	95,3	83,3
		CEM I 52,5 R	19,1	16,7

Spritzbetonmischung (inkl. einkalkulierte Rückprallmenge)

Spritzkörperbezeichnung	Anteil und Art der GK	Zusammensetzung Trockengemisch		
		bestehend aus	Menge in kg	entspricht M.-%
RC-B 0	100% nat. GK	nat. GK 0/8	97,2	83,6
		CEM I 42,5 R	19,1	16,4
RC-B 50	50 % natürlich 50 % RC-GK	nat. GK 0/8	48,6	49,0
		RC GK 0/8	31,6	31,8
		CEM I 42,5 R	19,1	19,2
RC-B 75	25 % natürlich 75 % RC-GK	nat. GK 0/8	24,3	21,3
		RC GK 0/8	70,8	62,0
		CEM I 42,5 R	19,1	16,7
RC-B 100	100% RC-GK	RC GK 0/8	94,5	83,2
		CEM I 42,5 R	19,1	16,8

Zugehörige (ermittelte) Rohdichten:

- natürlicher Sand/Kies 0/4 bzw. 0/8 2,65 kg/dm³
- RC-Sand/Kies 0/4 bzw. 0/8 2,60 kg/dm³
- CEM I 42,5 R u. CEM I 52,5 R 3,1 kg/dm³



Baustoffprüflabor in Bautzen
Planung - Überwachung - Beratung
Prüfstelle E + W
Inhaber : Marco Wessely
Preuschwitzer Str. 92, 02625 Bautzen
Telefon: 03591 / 279549 ; **Fax:** 03591/ 374634
WEB: www.baustofflabor-bautzen.de
E-Mail: info@baustofflabor-bautzen.de



Firma
B-TU

Siemens- Halske- Ring 8
03046 Cottbus

Abteilung: Baustoffprüflabor
Bearbeiter: Herr Walther
Bautzen , 29. 07. 2019

Prüfbericht Nr. BK 15/ 2019

zur Bestimmung der Gesteinsdruckfestigkeit ; laut Auftrag vom 23.07.2019

Art der Probe: Beton

Probe: B1.a,b,c
B2.a,b,c
B3.a,b,c
B4.a,b,c
M1.a,b,c
M2.a,b,c
M3.a,b,c
M4.a,b,c
R.a,b,c

Prüfung: 29.07.2019

Ergebnis:

Nr.	Durchm	Höhe	Fläche	Volumen	Gew.	V	Bruchlast	Druckfestigk.
	mm	mm	mm ²	cm ³	g	g/cm ³	N	N/mm ²
B1.a	42,60	43,40	1425	61,8	151	2,44	58298	40,92
B1.b	42,60	43,20	1425	61,5	150	2,44	48459	34,02
B1.c	42,60	43,30	1425	61,7	147	2,38	45616	32,02
B2.a	42,70	43,60	1431	62,4	145	2,32	40778	28,49
B2.b	42,70	43,80	1431	62,7	147	2,34	35538	24,83
B2.c	42,70	43,50	1431	62,3	144	2,31	34165	23,87
B3.a	42,70	43,60	1431	62,4	149	2,39	39003	27,25
B3.b	42,70	43,90	1431	62,8	141	2,24	30469	21,29
B3.c	42,70	43,20	1431	61,8	140	2,26	36762	25,68
B4.a	43,00	43,40	1451	63,0	147	2,33	46959	32,35
B4.b	43,10	43,60	1458	63,6	144	2,26	46121	31,63
B4.c	43,10	44,00	1458	64,2	148	2,31	44586	30,58
M1.a	43,00	43,50	1451	63,1	155	2,45	82094	56,56
M1.b	43,00	43,40	1451	63,0	154	2,44	86879	59,86
M1.c	43,10	43,50	1458	63,4	158	2,49	56113	38,48
M2.a	42,80	43,30	1438	62,3	145	2,33	44065	30,64
M2.b	42,80	43,00	1438	61,8	142	2,30	49893	34,70
M2.c	42,80	43,00	1438	61,8	140	2,26	55067	38,29
M3.a	43,00	44,10	1451	64,0	148	2,31	57288	39,47
M3.b	43,00	44,00	1451	63,9	145	2,27	57420	39,56
M3.c	43,10	44,10	1458	64,3	146	2,27	68198	46,77
M4.a	43,00	44,30	1451	64,3	149	2,32	60763	41,86
M4.b	43,00	44,00	1451	63,9	145	2,27	67284	46,36
M4.c	43,10	44,30	1458	64,6	151	2,34	71240	48,85
R.a	43,30	44,20	1472	65,1	153	2,35	54245	36,86
R.b	43,40	44,50	1479	65,8	155	2,36	54582	36,91
R.c	43,30	44,40	1472	65,3	154	2,36	70102	47,63

Bemerkung: Die Kernhöhe ergibt sich nach schneiden und schleifen der Prüfkörper

Mit freundlichen Grüßen

Walther
Prüfstellenleiter



Anhang 8

Auswertung der Rückprallwerte aus zerstörungsfreier Prüfung

Rezeptur	Ref-M Brand	RC-M 0	RC-M 50	RC-M 75	RC-M 100	RC-B 0	RC-B 50	RC-B 75	RC-B 100
nat. GK [%]	100	100	50	25	0	100	50	25	0
RC-GK [%]	-	0	50	75	100	0	50	75	100
Rückprallwerte	40	38	37	33	32	34	30	34	26
	40	38	38	34	32	36	33	35	26
	41	40	38	34	32	36	33	36	28
	42	41	38	34	33	39	34	36	28
Median	42	41	39	34	33	39	34	36	28
	42	41	39	34	34	39	34	36	29
	43	41	40	34	34	40	36	36	30
	44	42	40	35	34	41	37	37	30
	44	44	41	35	35	42	37	38	31
Durchschnitt	42,0	40,7	38,9	34,1	33,2	38,4	34,2	36,0	28,4
Standardabweichung	1,5	1,9	1,3	0,6	1,1	2,6	2,2	1,1	1,7
Variationskoeffizient	3,6%	4,6%	3,3%	1,8%	3,3%	6,8%	6,5%	3,1%	6,1%
Korrekturwert	2	2	2,1	2,6	2,7	2,1	2,6	2,4	3
Median+Korrekturwert	44	43	41,1	36,6	35,7	41,1	36,6	38,4	31
gerundet	44	43	41	37	36	41	37	38	31
Ergebnis	C35/45	C30/37	C30/37	C25/30	C20/25	C30/37	C25/30	C25/30	C12/15

Anmerkungen:

Korrekturwert gemäß IKEN et al.: Handbuch der Betonprüfung, 6. Auflage, Verlag Bau+Technik, 2012, Tabelle 104.1, S. 514

Ergebnis gemäß der Rückprallzahlen und vergleichbaren Druckfestigkeiten nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [aus DIN EN 13791:2008-05, Tabelle NA.2, S. 7]

Anhang 9 (6 Seiten)

Arbeitsgebiet Bauliches Recycling
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
Joachim Faßmann M.Sc.

Cottbus, 21. Dezember 2016

Stegreif Kletterfelsen



Skizzierung der Aufgabe:

Studierende aus den Fachrichtungen Architektur und Stadt- und Regionalplanung sind aufgerufen, konzeptionelle Entwürfe für einen Kletterfelsen auf dem Zentral-Campus der BTU in der Nähe der Sporthalle zu erstellen (s. Luftbild). Im Stegreif sollen gestalterische bzw. bauliche Umsetzungsmöglichkeiten erarbeitet werden. Interdisziplinär zusammengesetzte Teams mit kletterkundigen Studierenden sind erwünscht.

Die Besonderheit des zu konzipierenden Kletterfelsens liegt in der Wiederverwendung von gebrauchten Betonelementen (BE), welche nördlich des BTU Sportplatzes zwischengelagert sind sowie BE, die durch den selektiven Rückbau des LG 1C im IV. Quartal 2016 verfügbar werden. Möglich ist auch eine Mischbauweise aus BE und einer konventionellen Spritzbetonkonstruktion. Die plastische Oberflächengestaltung ist, entsprechend der Anforderungen eines künstlichen Kletterfelsens, zu beachten.



Anforderungen:

- Klettersportfelsen für Studierende, Mitarbeiter und weitere Bedarfsträger
- Möglichkeit zur Austragung von nationalen und internationalen Wettkämpfen
- barrierefreier Zugang bzw. Gestaltung und Möglichkeit zum Therapiesport
- Boulder- und Kletterfläche von insgesamt mind. 500 m²
- Boulderfläche bis max. 3m Höhe mit Bouldersport-spezifischen Elementen
- Kletterfläche mit einer leicht überhängenden Wandseite (Winkel zum Boden < 90°; Länge ca. 10 - 15 Meter); Option für Kaminklettern
- Integration eines überdachten bzw. wettergeschützten Kletterbereiches
- Standort (siehe Luftbild), Grundfläche ca. 20m (Nord-Süd) x 20m (Ost-West-Ausdehnung auch größer), Höhe etwa 18 - 20 m
- Verwendung der im Anhang dargestellten BE

Organisation / fachliche Betreuung:

Fachgebiet Plastisches Gestalten – Prof. Jo Achermann in interdisziplinärer Zusammenarbeit der AG Bauliches Recycling - apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke (Aufgabenstellerin)

Ausgabe: Montag, 12.12.2016, 10:45Uhr, Atelier PlaGe
Abgabe: Montag, 09.01.2017, 10:45Uhr, Atelier PlaGe
Abgabeleistung: 1 DIN A1 mit allen notwendigen konzeptionellen und visuellen Darstellungen + 1-2
DIN A4 Seiten Erläuterungstext
Credits: 2 CP

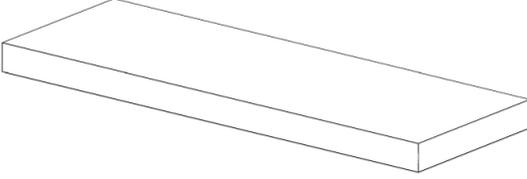
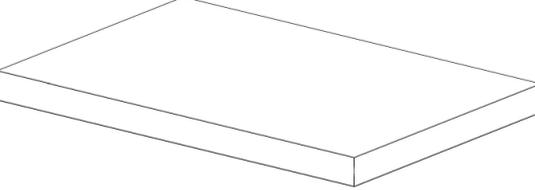
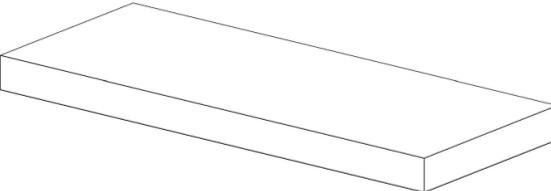
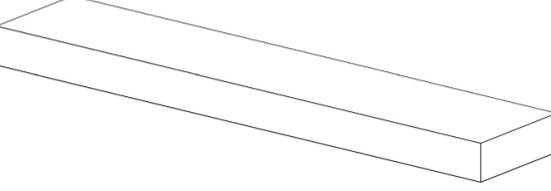
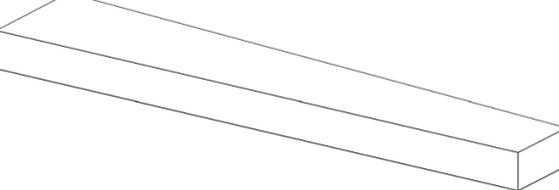
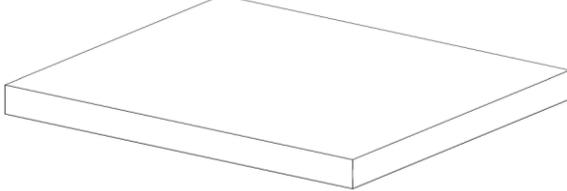
Kontakt Ansprechpartner:

Prof. Jo Achermann	LG 2D, R. 215, plast_gestalten@b-tu.de
Sven Kalden	LG 2D, R. 215, kalden@b-tu.de
apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke	LG 4A, R. 1.14, mettke@b-tu.de
Joachim Faßmann M.Sc.	LG 4B, R. 2.16, fassmjoa@b-tu.de

Anhänge:

- Tab.1: Schematische Darstellung der auf dem Zwischenlager befindlichen Straßen-Betonplatten
- Tab.2: Schematische Darstellung der nach dem Rückbau des LG 1C voraussichtlich verfügbaren BE
- Abb.1: Zwischenlager der Straßen-Betonplatten nördlich des Sportplatzes
- Abb.2: Schematische Darstellung der verfügbaren Betonelemente aus dem Zwischenlager und dem Rückbau LG 1C

Tab.1: Schematische Darstellung der auf dem Zwischenlager befindlichen Straßen-Betonplatten [Fak.2, AG Bauliches Recycling]

Betonelemente	Systemmaße LxBxH [mm]	Anzahl
	3500 x 1200 x 200	4
	3500 x 1000 x 200	5
	3000 x 2000 x 200	34
	3000 x 1500 x 200	5
	3000 x 1200 x 200	10
	3000 x 1200 x 300	2
	3000 x 1100 x 200	3
	3000 x 1000 x 200	168
	3000 x 600 x 200	14
	3000 x 500 x 200	12
	3000 x 400 x 200	4
	„Konusplatte“ bzw. „Keil“ 3000 x 400/600 x 200	132
	2200 x 1900 x 200	2

Tab.2: Schematische Darstellung der nach dem Rückbau des LG 1C voraussichtlich verfügbaren Elemente
 [Fak.2, AG Bauliches Recycling]

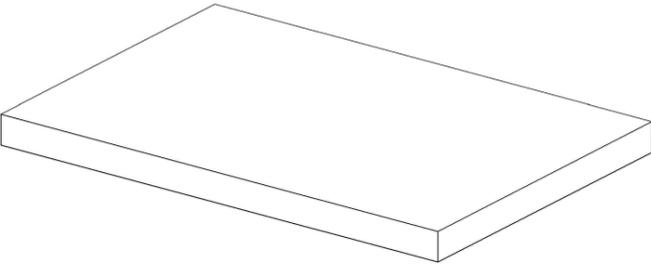
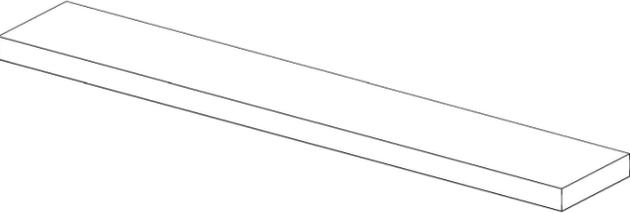
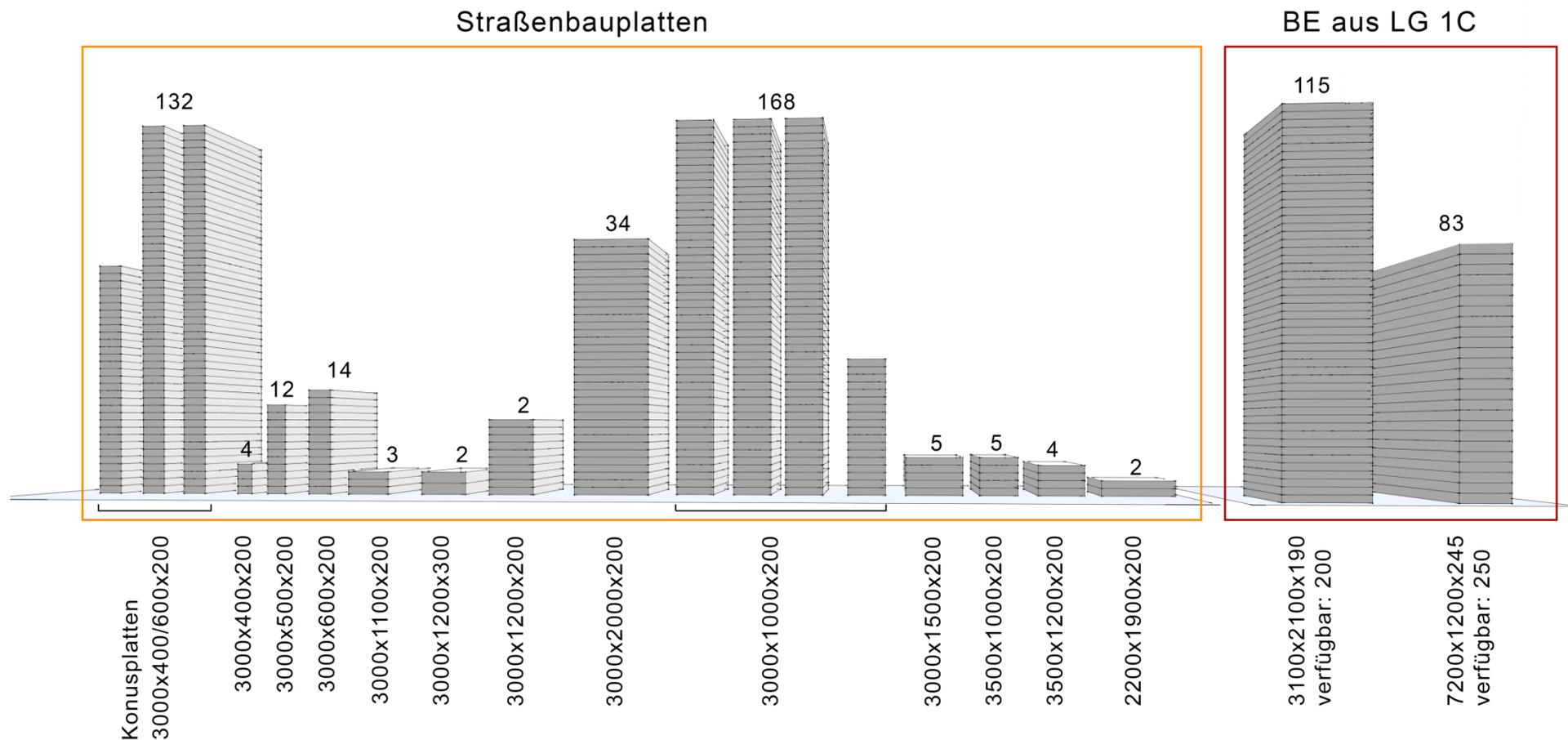
Betonelemente	Systemmaße LxBxH [mm]	Anzahl
	Innenwandplatten tragend 3100 x 2100 x 190	115
	Geschossdecken- platten 7200 x 1200 x 245	83

Abb.1: Zwischenlager der Straßen-Betonplatten nördlich des Sportplatzes [Fak.2, AG Bauliches Recycling]



Abb.2: Schematische Darstellung der verfügbaren Betonelemente aus dem Zwischenlager und dem Rückbau LG 1C [Fak.2, AG Bauliches Recycling]



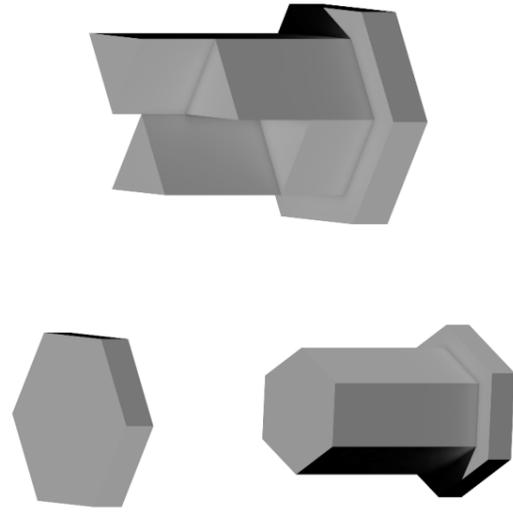
BTU Cottbus-Senftenberg

AG Bauliches Recycling / Plastisches Gestalten

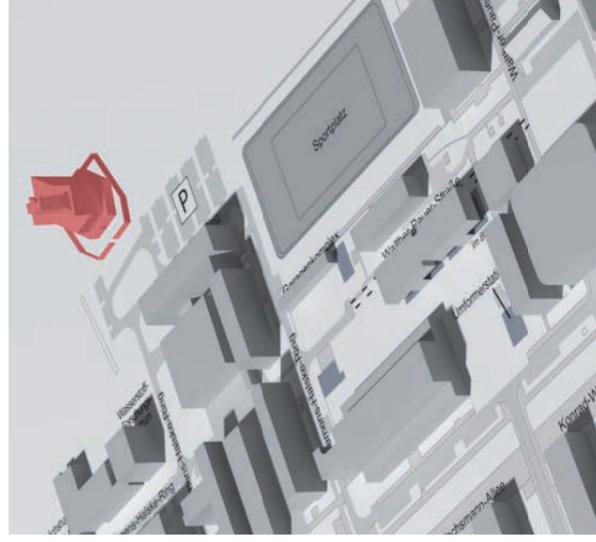
Prof. Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke/ Prof. Jo Achermann

KLETTERTURM

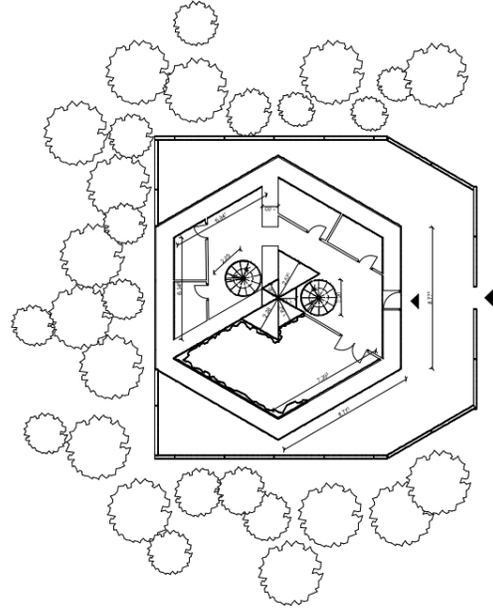
Bearbeiterinnen: Karolina Kazana 3212525, Alicja Szpak 3455363



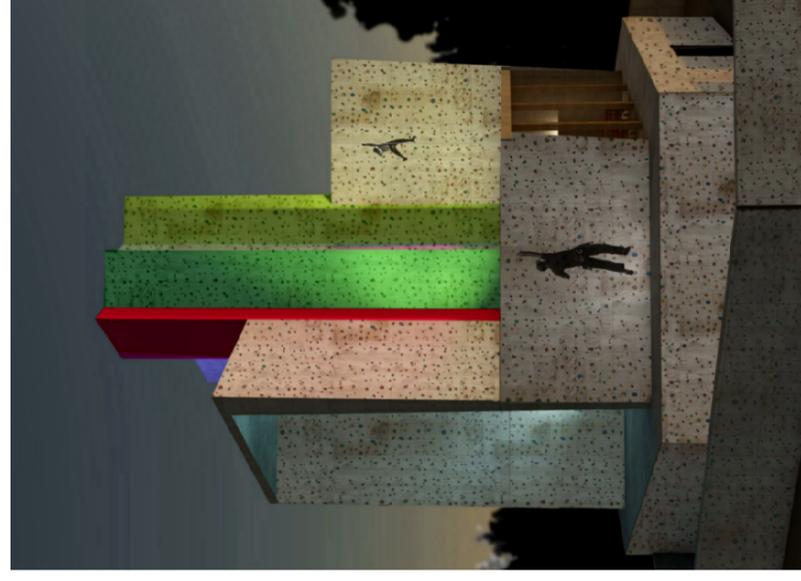
Konzept, ohne Masstab



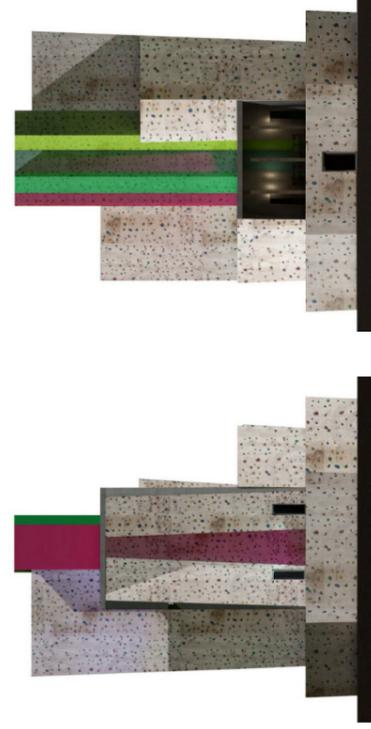
Lageplan o.M



Grundriss EG mit Umgriff, M 1:200



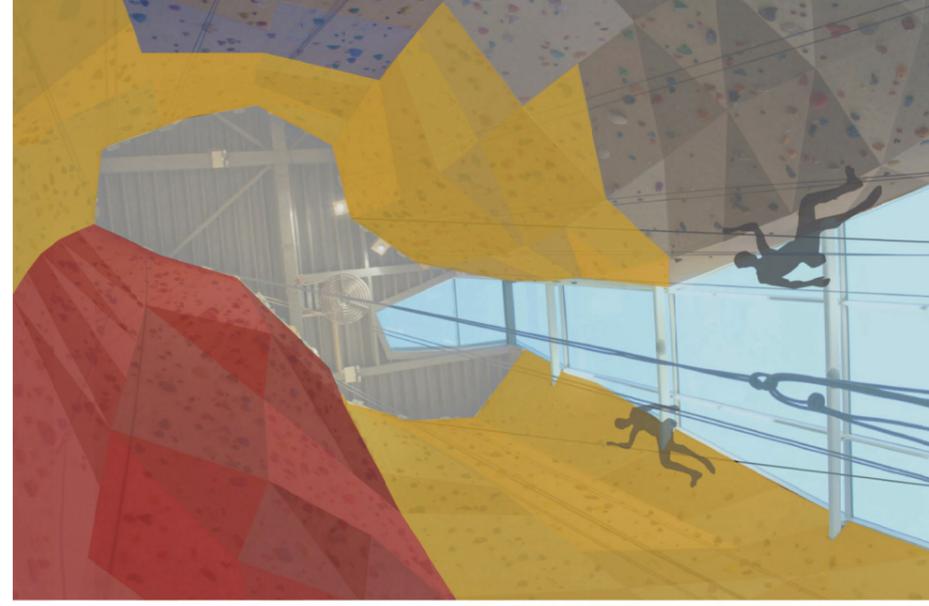
Außenraumperspektive



Ansicht Ost, M 1:200

Ansicht Süd, M 1:200

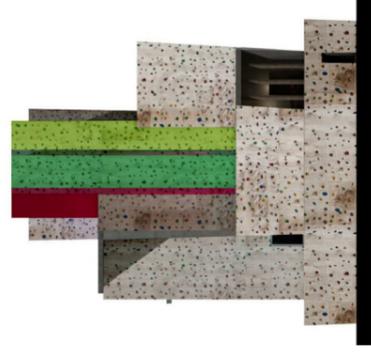
Ansicht West, M 1:200



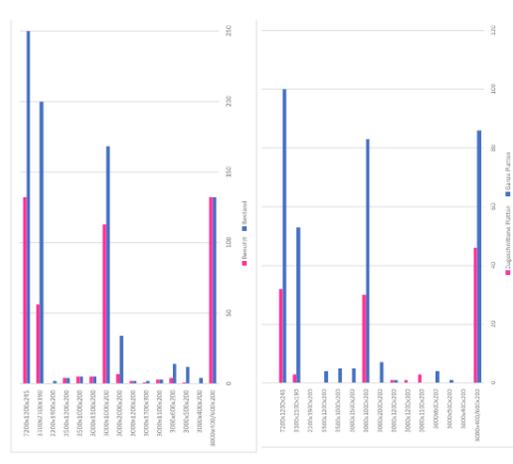
Vorschlag für den Innenraum



Außenraumperspektive



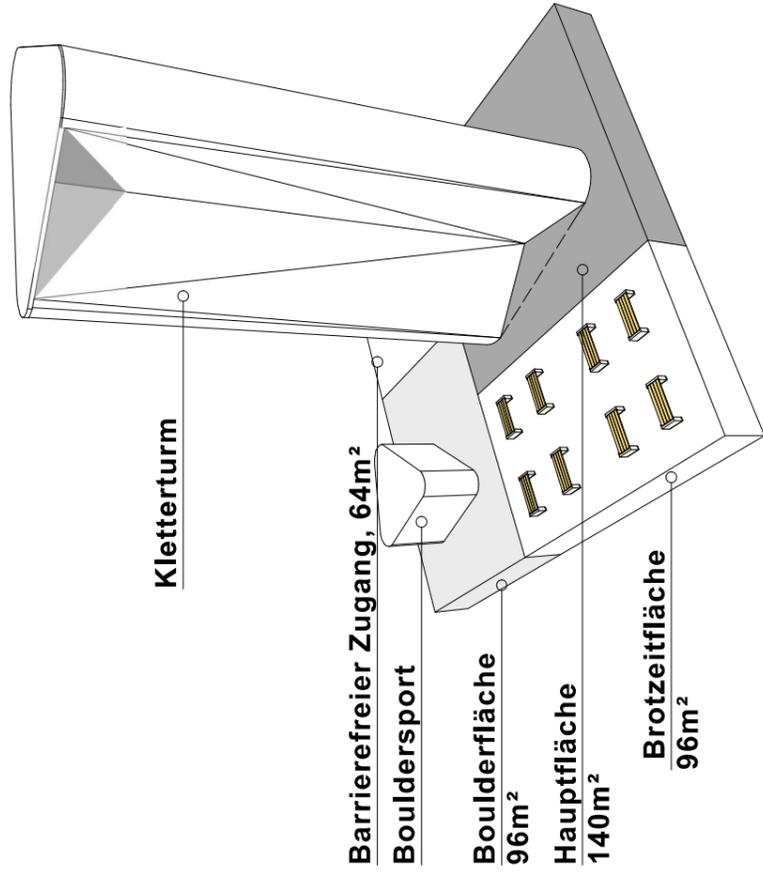
Anordnung der Betonelemente



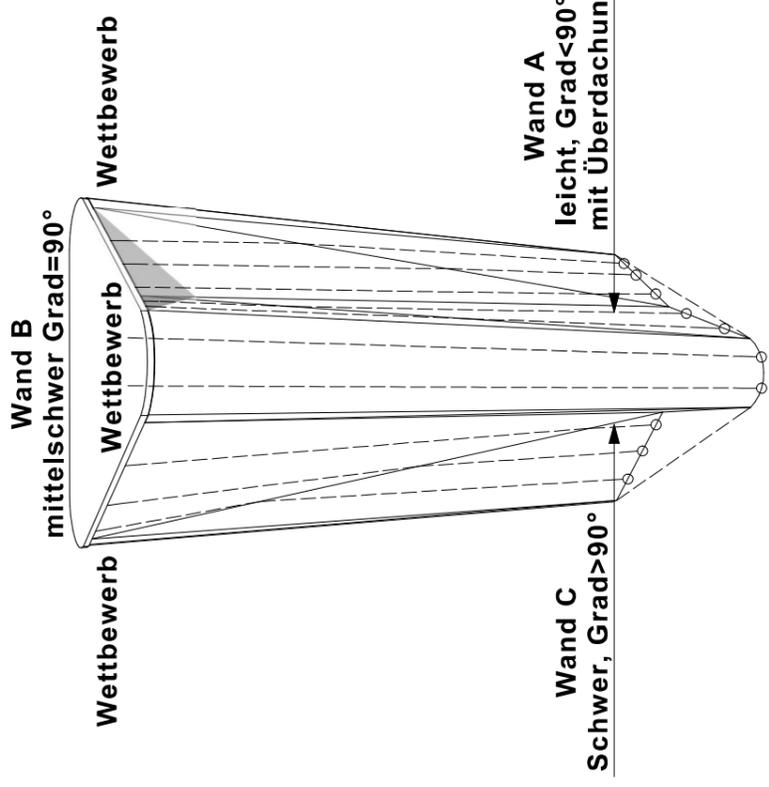
Diagramme

Kletterfelsen der Nachhaltigkeit in der BTU, Cottbus, Brandenburg

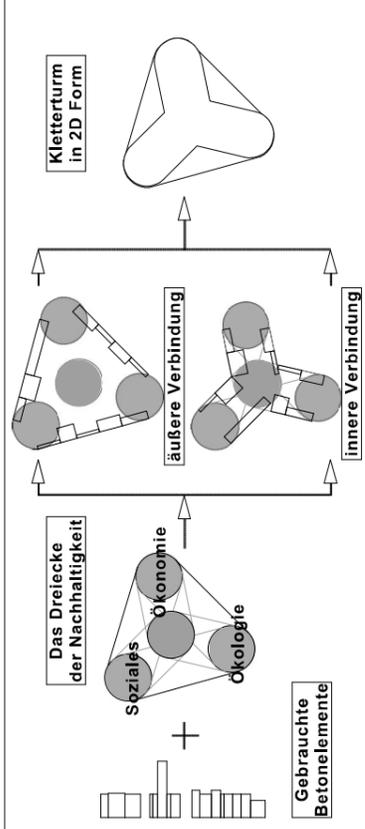
Stegreif von Fakultät 2 Umwelt u. Naturwissenschaft Prof. Mettke und Fakultät 6 Architektur Prof. Achermann, Verfasser: Li He, 3152230



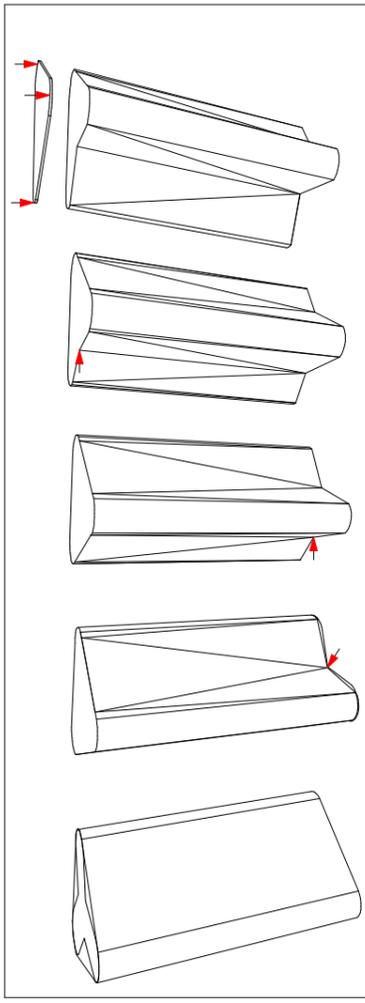
Lageplan mit Flächenaufteilungen



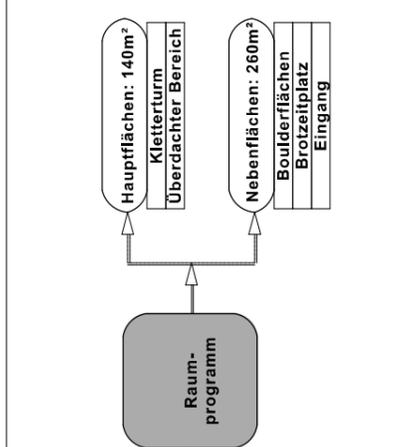
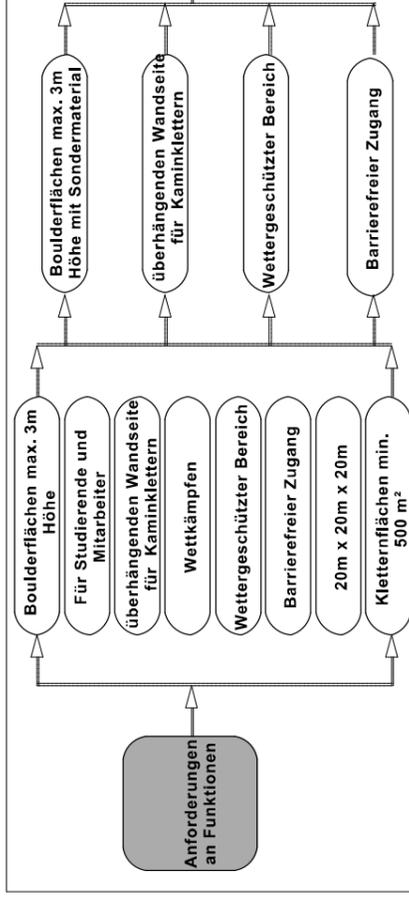
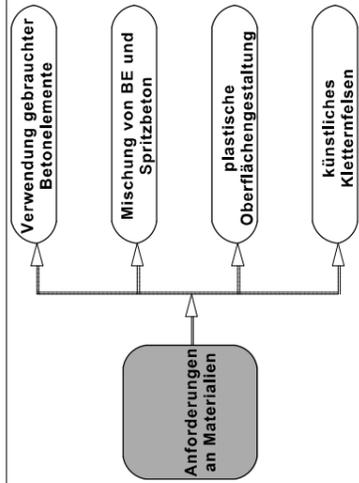
Schwierigkeitsstufen des Kletterturms, Wände A und C



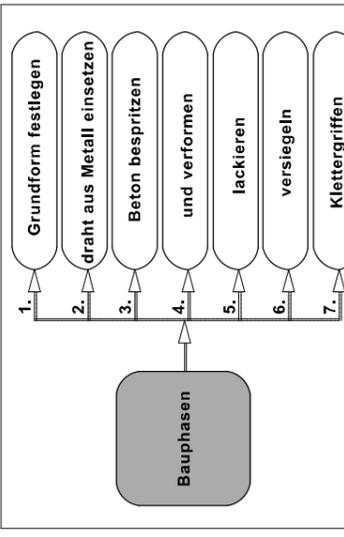
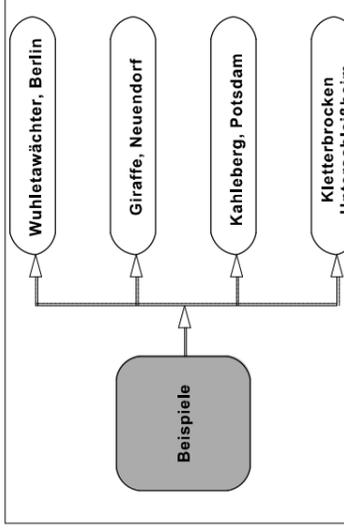
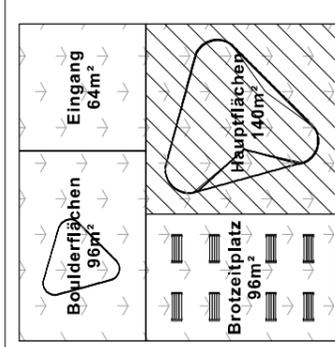
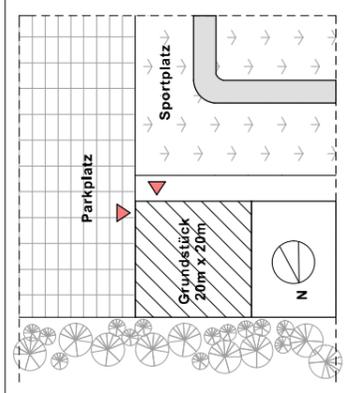
Ideentwicklung des Kletterturms Teil1-Entstehung



Ideentwicklung des Kletterturms Teil2-Verformung



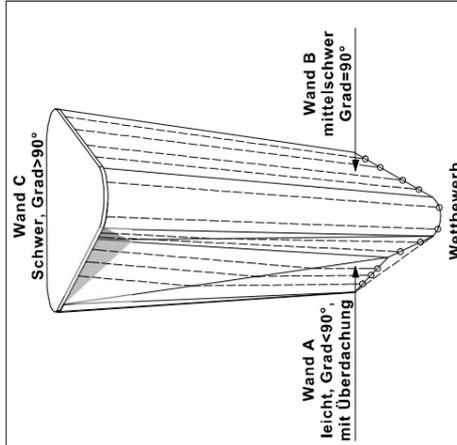
Analyse der Anforderungen an Materialien sowie Funktionen damit Raumprogramm entstanden



Lageplan schematisch und Grundriss

Beispiele Untersuchungen

Bauphasen des Kletterturms



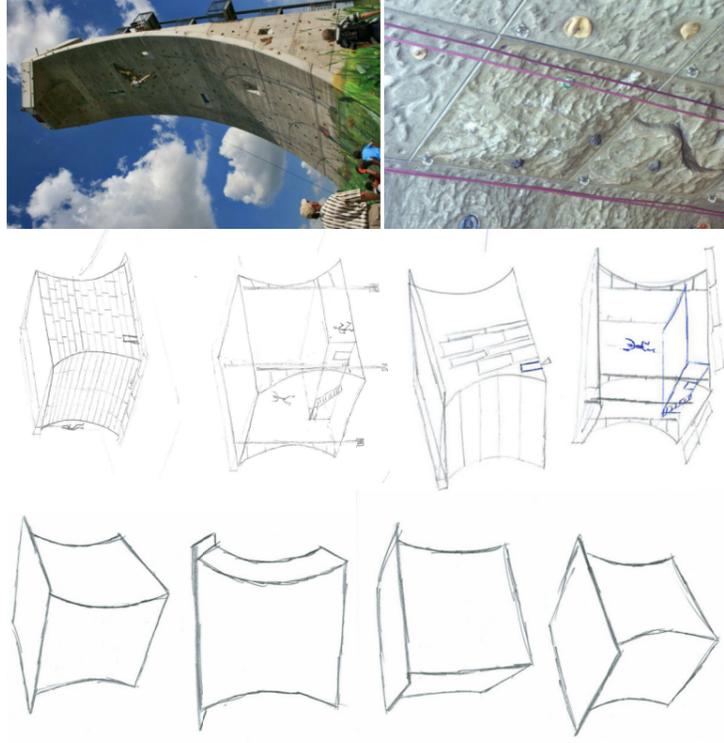
Kletterturm Wände A und B

Maße LxBxH mm	Anzahl
3500 x 1200 x 200	4
3500 x 1000 x 200	5
3000 x 2000 x 200	34
3000 x 1500 x 200	5
3000 x 1200 x 200	10
3000 x 1200 x 300	2
3000 x 1000 x 200	3
3000 x 600 x 200	14
3000 x 500 x 200	12
3000 x 400 x 200	12
3000 x 3000 x 200	1
3000 x 2000 x 200	4
3000 x 1200 x 200	132
2200 x 1900 x 200	2
3100 x 2100 x 190	115
7200 x 1200 x 245	83
Anordnung an Betonelemente	83

Maße LxBxH mm	Anzahl
3000 x 1000 x 200	168
3000 x 400/600 x 200	132
3100 x 2100 x 190	115
7200 x 1200 x 245	83
3000 x 2000 x 200	34
3000 x 600 x 200	14
3000 x 500 x 200	12
3000 x 1200 x 200	10
3500 x 1000 x 200	5
3000 x 1500 x 200	5
3500 x 1200 x 200	4
3000 x 400 x 200	4
3000 x 1100 x 200	3
3000 x 1200 x 300	2
3000 x 1900 x 200	2
Absteigerung von Anzahl	2

Maße LxBxH mm	Anzahl
3000 x 1000 x 200	168
3100 x 2100 x 190	115
3000 x 2000 x 200	34
Gruppe 1	317
3000 x 400/600 x 200	132
7200 x 1200 x 245	83
3000 x 600 x 200	14
3000 x 500 x 200	12
3000 x 1200 x 200	10
Gruppe 2	251
3500 x 1000 x 200	5
3000 x 1500 x 200	5
3500 x 1200 x 200	4
3000 x 400 x 200	4
3000 x 1100 x 200	3
3000 x 1200 x 300	2
2200 x 1900 x 200	2
Gruppe 3	25
Aufteilung nach Typen	25

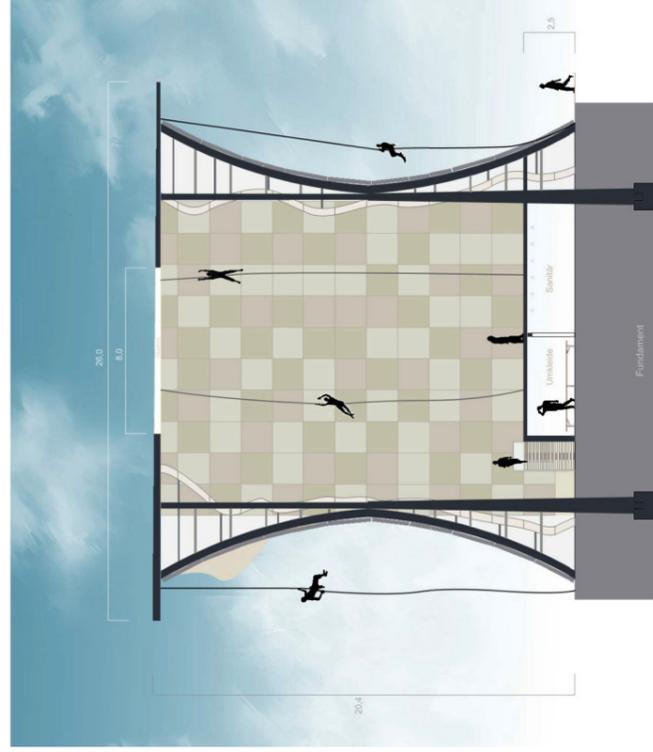
Anordnung an Betonelemente



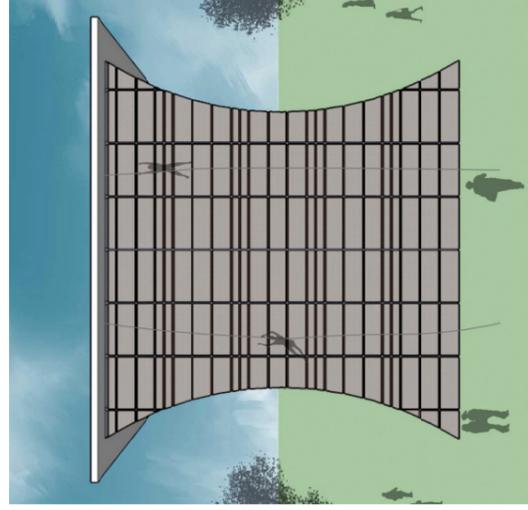
Entwurfsskizzen und Referenzbeispiele, o. M.



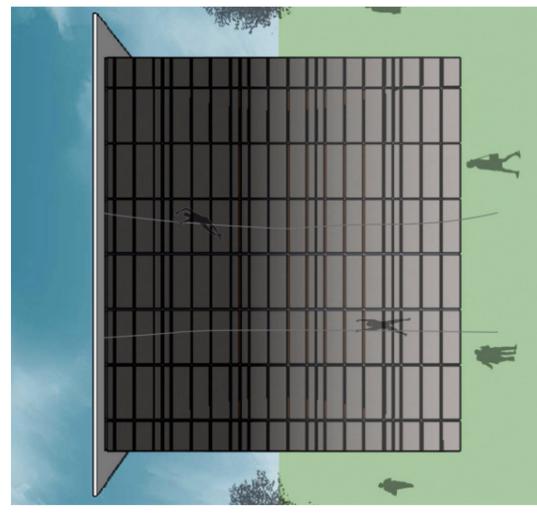
Perspektive



Schnitt, o. M.



Ansicht 1, o. M.



Ansicht 2, o. M.



Technisches Detail, o. M.

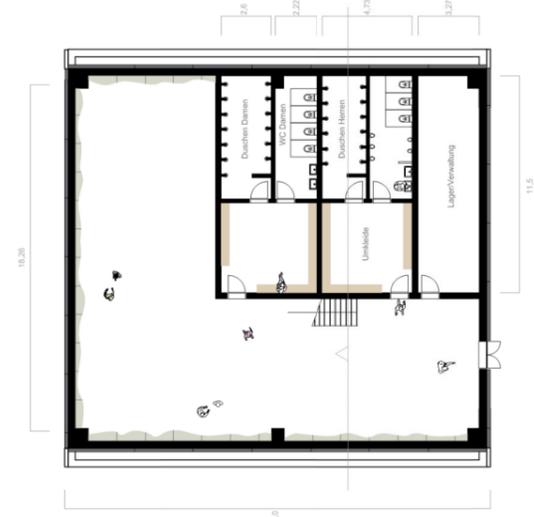
Der neue Kletterfelsen wird zukünftig den Klettersport auf dem Campus der BTU Cottbus-Senftenberg über die Stadt Cottbus hinaus repräsentieren und fördern. Geplant ist ein Kletterfelsen mit den Grundmaßen 20m x 20m und einer Höhe von etwa 21m. Aufgrund der Kubatur des Bauwerkes, ist mehr von einem Kletterwürfel zu sprechen. Der Kletterwürfel ist von innen und außen auf, jeweils vier Seiten zu beklattern. An den senkrechten und konkaven Außenwänden sollen Studenten, Mitarbeiter, Gäste oder auch professionelle Kletterer den Kletterfelsen erklimmen. Zu den Besonderheiten zählt, dass der Kletterfelsen nicht, wie üblich, bloß mit Spritzbeton überzogen wird, sondern er abgebaute Betonplatten von einem ehemaligen Lehrgebäude wiederverwertet und somit naturbelassene, urbane Kletterwände entstehen. Mit Hilfe dieser unterschiedlich langen und breiten Platten (3m x 2m x 0,2m / 3m x 1m x 0,2m / 3m x 0,4m x 0,2m) nimmt der Kletterfelsen eine unverkennbare Gestalt an und lässt auf den ersten Blick den Gedanken des "Recycling" erleben. Verwendung finden 115 Platten des abgerissenen Lehrgebäudes und 334 Straßen-Betonplatten.

Die Form erinnert an einen Würfel, an dem zwei gegenüberliegende Seiten nach innen gewölbt sind und an den oberen Enden überkragen. Die übrigen zwei Seiten stellen eine vertikale Wand dar. Im Inneren des Felsens stehen vier weitere Kletterwände zur Verfügung, die über eine Treppe aus, von der Erdgeschosszone, zu erreichen sind. Mit der Anbringung und Anordnung der Klettergriffe können alle Schwierigkeitsgrade bedient werden sowie auch durch die acht Kletterwände, bzw. 2952,11 m² Kletterfläche. Räumlichkeiten vorgesehen: getrennte Umkleekabinen mit WC und Duschen für Männer und Frauen, die Verwaltung sowie ein Geräteraum mit den notwendigen Erste-Hilfe-Utensilien. Eine Treppe führt auf das Dach dieser Räumlichkeiten. Ebenenrig und vom Dach der genannten Räume ist das Klettern möglich. Bovendien ist aufgrund des fehlenden Seils, nur bis 3 m Höhe vom jeweiligen Niveau möglich. Sechs Stahlbetonplätze, die im Betonfundament gründen, stellen die Konstruktion dar. Mit Verstrebungen werden die Wände gehalten.

Betrieben wird die Kletteranlage von der zentralen Einrichtung für den Hochschulsport der BTU Cottbus-Senftenberg. Eigentümer ist die Stadt Cottbus, ggf. mit einem Kooperationspartner. Hauptnutzende sind der Hochschulsport, Vereine und Wettkampfteilnehmende.

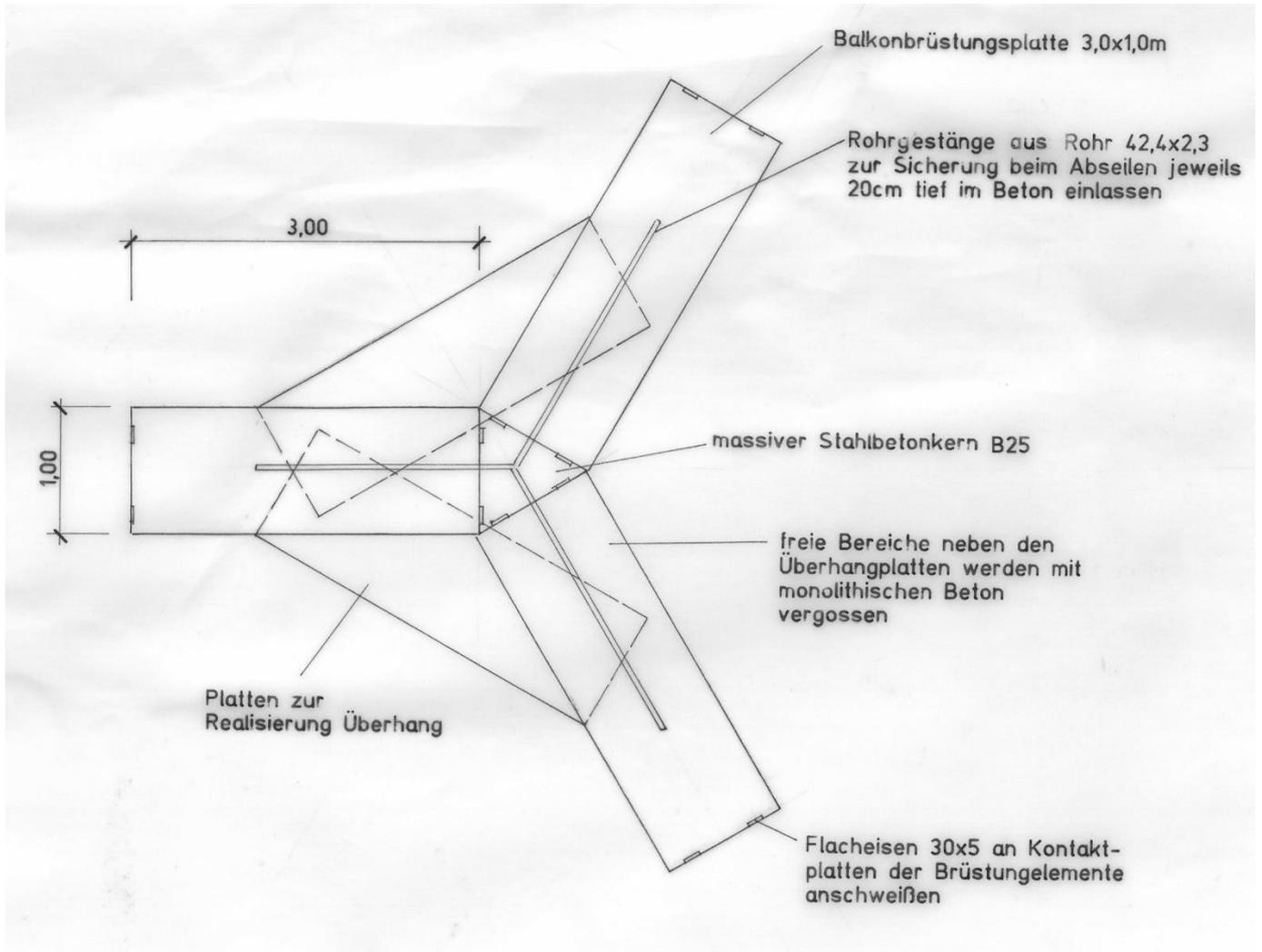
Sobald der Kletterfelsen fertig gestellt ist, wird das Team einen Kurs im Rahmen des Hochschulsports der BTU Cottbus-Senftenberg anbieten und freut sich auf Deinen Besuch!

Erläuterung des Konzepts



Grundriss, o. M.

Anhang 11 – Prinzipsskizze (Draufsicht) der Y-Bauweise aus Balkonbrüstungsplatten bzw. Betonfertigteilelementen



[Quelle: Ausschnitt aus „Konstruktionszeichnung Kletterfelsen“, erstellt durch Ingenieurbüro für Bau- und Tragwerksplanung Dipl.-Ingenieure Armin Kluba & Bodo Queitsch, Feb. 1995]

PRÜFBERICHT

Nummer des Berichtes	:	16-999-601
Auftraggeber	:	BTU Cottbus-Senftenberg Fakultät 2 Arbeitsgebiet Bauliches Recycling Siemens-Halske-Ring 8 03046 Cottbus
Auftrag vom	:	21.11.2016
Auftragsgegenstand	:	Bestimmung der Druckfestigkeit, des Chloridgehaltes und von Gefügebesonderheiten an Bohrkernproben aus Beton
Bauvorhaben	:	BTU Cottbus-Senftenberg, Kletterfelsen
Prüfmaterial	:	3 Bohrkern, Ø 99,5 mm, Länge 200 mm
Bauteil	:	Straßenplatten ca.3000 x 1000 x 200 mm
Probenahme durch	:	BTU Cottbus-Senftenberg; FMPA, FG Betontechnologie
Datum der Probenahme	:	23.11.2016
Prüfstelleneingang	:	23.11.2016
Umfang dieses Berichtes	:	3 Seiten, 1 Bilddokumentation

Hinweis: Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Prüfgegenstände.
Dieser Prüfbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden und ist nur gültig
mit den Originalunterschriften und dem Originalstempel

Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton an Bohrkernproben nach DIN EN 12504-1:2009-07

1. Allgemeine Angaben zum Prüfmaterial und Zuordnung von Probekörpern

An einer Vielzahl von Straßenplatten wurden aus 3 Platten jeweils 1 Bohrkern entnommen und daraus je ein Probekörper im Verhältnis $h/d=1$ hergestellt.

Bez. d. Bohrkerns	Durchmesser / Bohrkernlänge	besondere Merkmale	Bez. d. Probekörpers
BK 1	Ø 99,5 / 200 mm	-	1_D
BK 2		Bewehrung	2_D
BK 3		Bewehrung	3_D

2. Prüfergebnisse

Bez. d. Probekörpers	Durchmesser [mm]	Höhe [mm]	Rohdichte [kg/m ³]	Bruchlast [kN]	Druckfestigkeit [N/mm ²]		
					$f_{c, is, Bohrkern100}$	$f_{c, is, Würfel}$	$f_{m(n), is}$
1_D	99,5	102,1	2280	596,4	76,7	76,7	-
2_D		101,4	2240	373,1	48,0	48,0	
3_D		100,3	2360	618,8	79,6	79,6	

Die Ergebnisse der Druckfestigkeit schwanken zwischen 48,0 N/mm² und mehr als 70 N/mm². Sie beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Probekörper, ob es weitere Platten gibt, deren Festigkeit geringer ist als 48 N/mm² kann nicht beurteilt werden.

Bestimmung des Chloridgehaltes von Betonproben

Aus den 3 Bohrkernproben, entnommen aus Straßenbauplatten, wurden insgesamt 9 Proben (3 je Kern aus unterschiedlichen Tiefen der Platten) präpariert und daran der Chloridgehalt bestimmt. Die Ergebnisse enthält die nachfolgende Tabelle.

3. Prüfergebnisse

Probe	Tiefe (mm)	Einwaage (g)	A (mg/l)	Cl (M.-%)	
BK1	1-1	0-15	2,0044	10,5	0,013
	1-1	15-30	2,0161	4,9	0,006
	1-3	30-45	2,0120	3,2	0,004
BK2	2-1	0-15	2,0459	24,7	0,030
	2-2	15-30	2,0027	24,0	0,030
	2-3	30-45	2,0187	18,6	0,023
BK3	3-1	0-15	2,0087	11,6	0,014
	3-2	15-30	2,0320	10,4	0,013
	3-3	30-45	2,0280	8,7	0,011

Mit einem Chloridgehalt von maximal 0,030 M.-% wird der für eine Bewehrungsstahlkorrosion gültige Grenzwert deutlich unterschritten.

Allgemeine Bemerkungen zum Gefüge des Betons

Das Gefüge des Betons lässt sich als dicht beschreiben, die Zusammensetzung der 3 entnommenen Kerne ist jedoch sehr unterschiedlich, wie auch den Bildern nachfolgend im Bericht entnommen werden kann. Einerseits handelt es sich um Kiesbeton, an anderen Platten sind gebrochene Körner (wahrscheinlich Grauwacke) zu finden. Um einige der Körner (sowohl beim Kies, als auch bei den Grauwackekörnern) können Reaktionssäume festgestellt werden (siehe Details zu den Bohrkernen 2 und 3), die als Hinweis für das Stattfinden einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion gewertet werden können. Zur Klärung des Sachverhaltes wären weitere Untersuchungen notwendig.

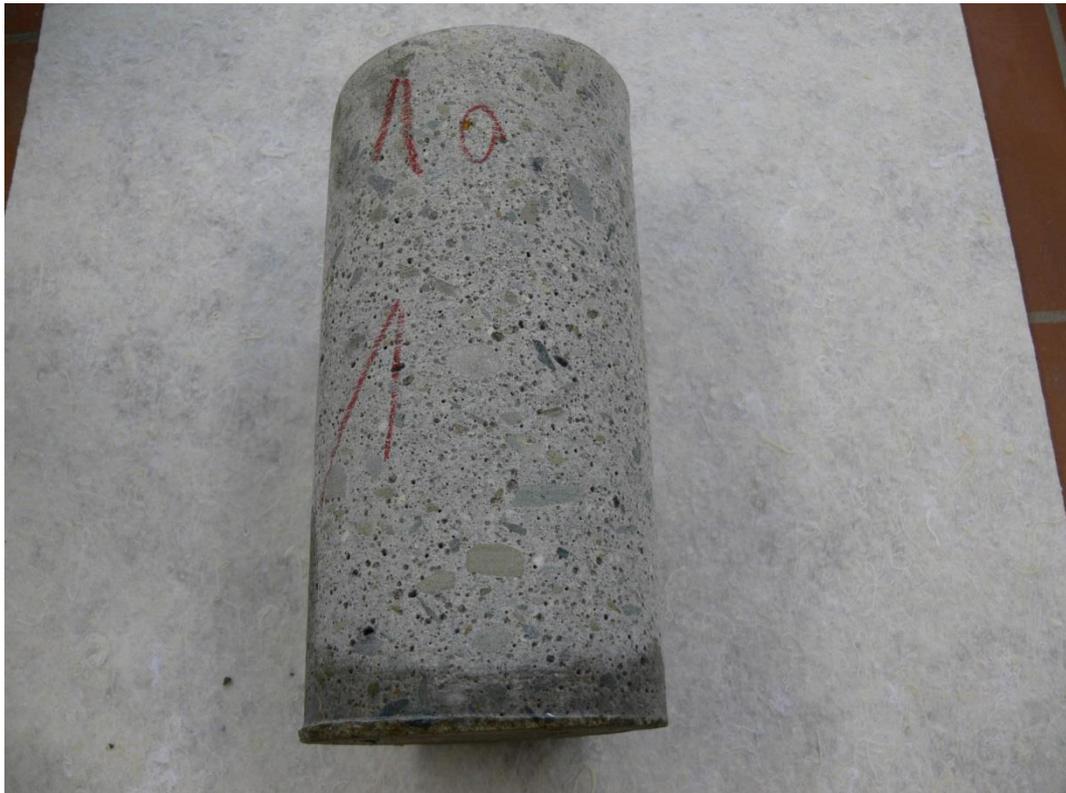
Cottbus, 25.11.2016



Prof. Dr. Dr. K.-J. Hüniger
Direktor

Bilddokumentation

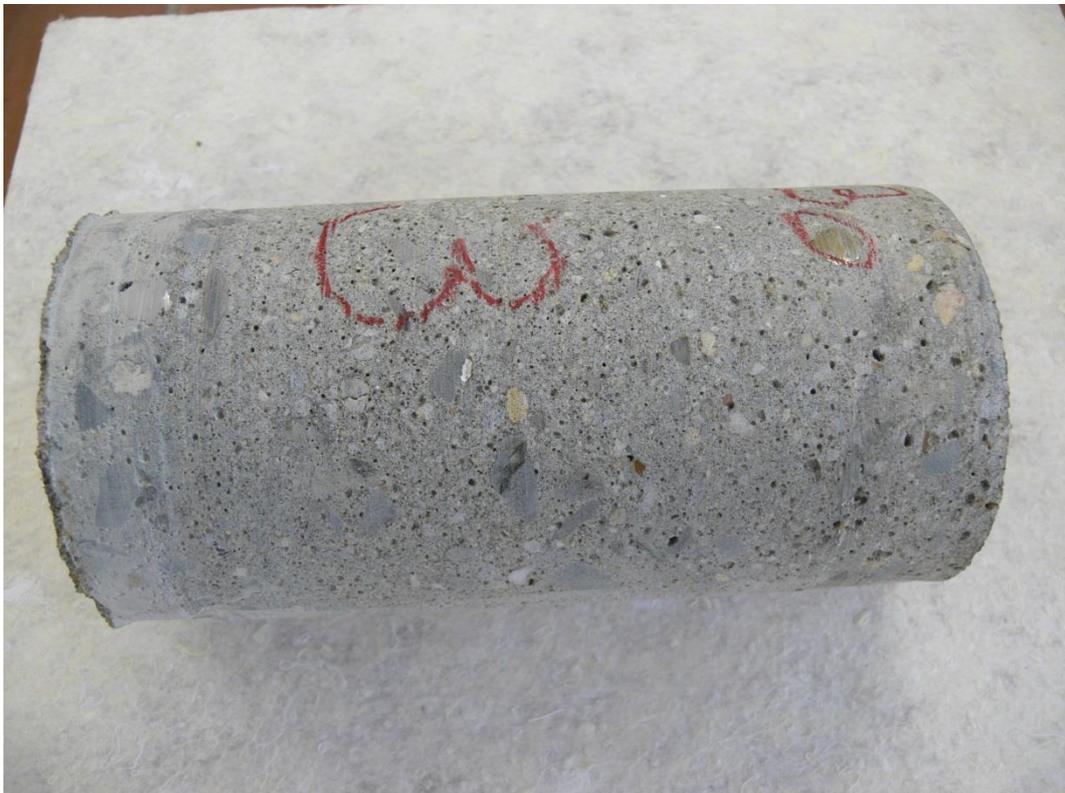
Bohrkern 1



Bohrkern 2



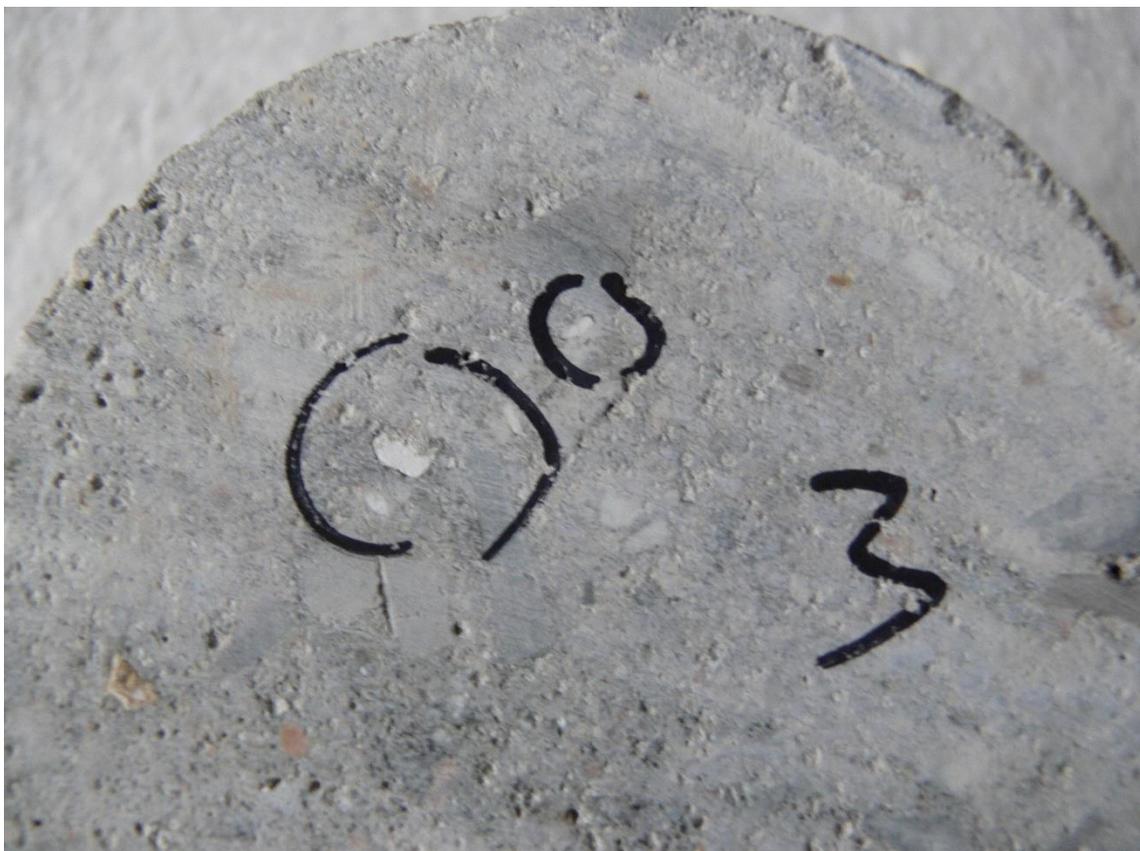
Bohrkern 3



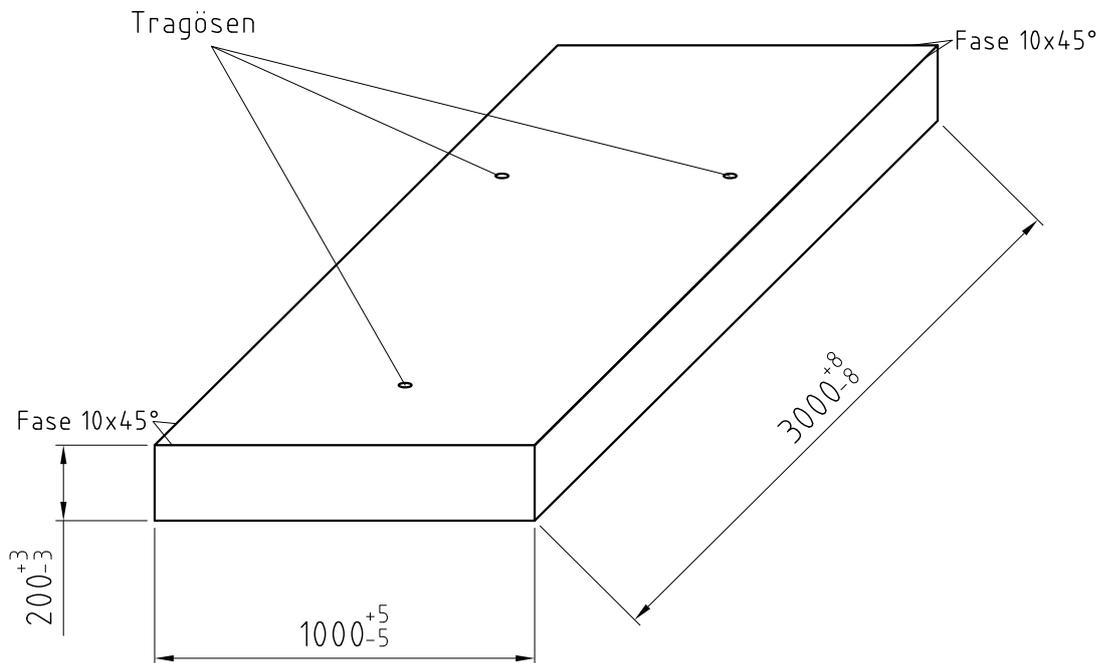
Detail Bohrkern 2



Detail Bohrkern 3



Anhang 13



Radlast 100 kN

Berechnung in Anlehnung an DIN - Fachbericht 101

Angebotszeichnung			
Fertigung nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2, Güteüberwachung nach DIN 1045-4			
Technische Angaben			
Farbe betongrau			
Oberfläche schalungsglatt			
bewehrt			
Beton / Werkstoff		Volumen	Gewicht
C35/45 XC4, XD3, XF4			1510 kg
RAILBETON HAAS KG Fischweg 27 - 09114 Chemnitz Tel. 0371/ 4725 - 0, Fax - 100 E-Mail: info@RAILBETON.de Internet: www.RAILBETON.de			
Bauherr		Artikel-Nr.	
Bauvorhaben		71103	
Bezeichnung Baustraßenplatte		Auftrags-Nr.	
3,00 x 1,00 x 0,20			
Datum	Name	Maßstab	Zeichnungsnummer
bearbeitet 10.02.2009	Loeffler		
geprüft/WPL	----	32.0475A	
freigegeben	----		
In Bearbeitung			
Diese Zeichnung ist urheberrechtlich geschützt. Vervielfältigung und Weitergabe an Dritte ist nur mit Zustimmung von RAILBETON gestattet.			

Anhang 14.2: Bauelementeliste mit Aufnahme zum Bauzustand nach visuellen Merkmalen der Straßenbauplatten (Fortsetzung)

Lfd.- Nr.	Abmaße			Verwitterung		Transportösen				Bemerkungen	BZS1	BZS2	BZS3	BZS4
	Breite	Höhe	Länge	Bewuchs	Allgemein	vorhanden	Zustand							
				Moos			Rost	Defekt	Verbogen					
1	120	20	350			X	X		X			X		
2	100	18	300		X	X	X	X		Anrosten der offen liegenden Bewehrung		X		
3	100	20	300		X	X	X	X						X
4	100	20	300		X	X	X					X		
5	120	20	300			X	X	X	X	BE aussondern, nicht zur WV geeignet				X
6	100	20	300			X	X	X				X		
7	100	20	300			X	X	X	X	starke Rostbildung an Transportöse, 1 cm Ø Reststahl		X		
8	100	20	300			X	X			Bohrkern gezogen;starke Rostbildung an Transportöse, 1 cm Ø Reststahl		X		
9	195	20	222		X	Keine Transportösen vorhanden				Platte längs gesägt, Bewehrungslagen deutlich erkennbar	X			
10	100	20	300			X	X		X		X			
11	100	20	300			X	X		X			X		
12	100	20	300		X	X				Transportösen einbetoniert		X		
13	100	20	300		X	X	X		X				X	
14	100	20	300			X								X
15	40	18	300			X	X	X	X	BE aussondern, nicht zur WV geeignet				X
16	60	20	300			Keine Transportösen vorhanden								X
17	100	20	300			X					X			
18	100	20	300			X				Bohrkern gezogen, nur 2 transportösen, Bewehrung zeichnet sich ab		X		
19	40	20	300			Keine Transportösen vorhanden				BE aussondern, nicht zur WV geeignet				X
20	40	20	300			X	X		X				X	
21	60	20	300			X	X		X				X	
22	40	20	300			Keine Transportösen vorhanden							X	
23	100	20	300			X	X		X			X		
24	100	20	300			X	X			Bauteil liegt verkehrt herum, Bewehrung zeichnet sich ab		X		
25	100	20	300			X	X			BE aussondern, nicht zur WV geeignet				X
26	100	20	300			X				Transportösen vollständig intakt		X		
27	100	20	300			Keine Transportösen vorhanden				alternative Anschlagmöglichkeit erforderlich			X	
28	100	20	300			Keine Transportösen vorhanden							X	
29	50	20	300			X				Transportösen vollständig intakt		X		
30	50	20	300							keine Transportösen		X		
31	100	20	275			X	X			Transportösen vollständig intakt, Oberfläche ist nachbehandelt		X		
32	100	20	300		X	X	X			Transportösen vollständig intakt			X	
33	60	20	300			Keine Transportösen vorhanden					X			
34	100	20	300			X	X		X			X		
35	100	20	300			X	X		X	Bohrkern gezogen			X	
36	60	20	300			Keine Transportösen vorhanden				keine Transportösen			X	
37	60	20	300			Keine Transportösen vorhanden				keine Transportösen				X
38	100	20	300			X				nur zwei Transportösen vorhanden			X	
39	100	18	300			X	X		X	starke Reduktion des Stahlquerschnittes der Transportösen, Längsrisse			X	
40	40	20	300	X	X	X	X			nur eine Öse vorhanden			X	
41	60	20	300			Keine Transportösen vorhanden							X	
in Summe											4	16	13	8

Legende:  Straßenbauplatten von welchen jeweils ein Bohrkern entnommen wurde

BZS 1 bis 4: Bauzustandsstufen 1 bis 4

PROJEKT KLETTERFELSEN

EINE IDEE GREIFT RAUM



Der Präsident der BTU Cottbus-Senftenberg Prof. Dr.-Ing. Jörg Steinbach
eine Initiative des Arbeitsgebiets Bauliches Recycling und ZE Hochschulsport

Geschäftsführer des Deutschen Alpenverein, Dr. Olaf Tabor

„Der Kletterfelsen wäre zweifellos ein Gewinn sowohl für die Breitensportlich orientierten Kletterer als auch für die Leistungssportlich interessierten Athleten mit Perspektiven für den nationalen und internationalen Wettkampfsport. [...] die Errichtung eines Kletterfelsens [dürfte] für Ihre Universität eine lohnende Investition sein.“

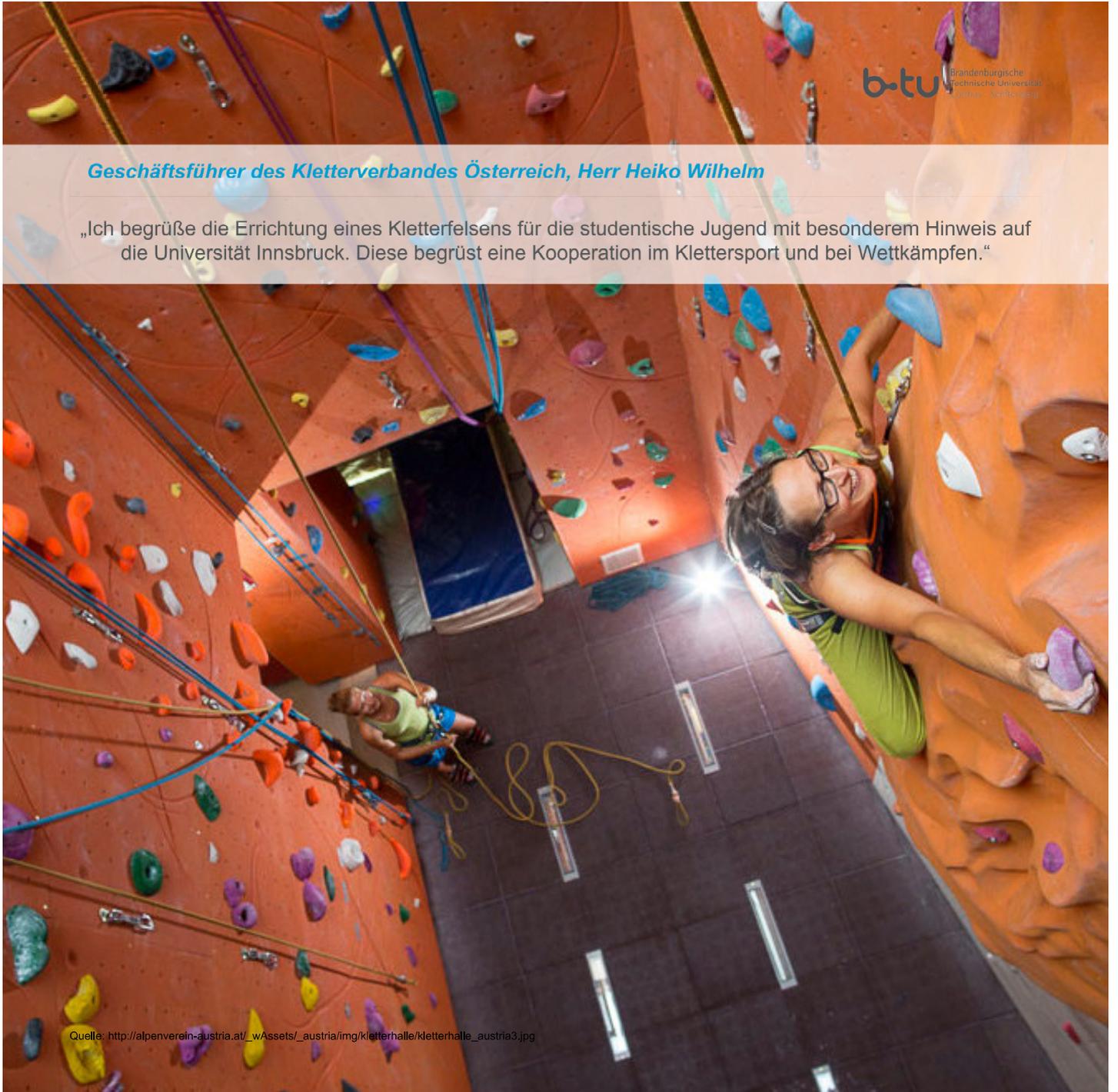


Quelle: http://live-cdn.alpenverein.de/chameleon/mediapool/thumbs/4/24/2016-BWC-Vertical-Axis-12_1000x563-ID64442-b5ff31799794793dff8a9d4fe98c91f0.jpg

Mountains and More

Geschäftsführer des Kletterverbandes Österreich, Herr Heiko Wilhelm

„Ich begrüße die Errichtung eines Kletterfelsens für die studentische Jugend mit besonderem Hinweis auf die Universität Innsbruck. Diese begrüßt eine Kooperation im Klettersport und bei Wettkämpfen.“



KLETTERSPORT UND BEDARFSTRÄGER

Vordergründig steht die Profilierung des Hochschulsports für Studierende und Mitarbeiter. Seit dem Bau der Indoor-Kletterwand - ein Eigenprojekt der ZE Hochschulsport und Studierender - in der Sporthalle konnte eine stetig steigende Teilnehmerzahl verzeichnet werden.

Im Wintersemester 2015/2016 waren es bereits 300 Teilnehmer in 14 Kursen. Damit entwickelt sich das Klettern zur Premiumsportart an der BTU Cottbus-Senftenberg! Aktuell kann konstatiert werden, dass das vorhandene Angebot der weiter steigenden Nachfrage nicht mehr gerecht wird.

Der Kletterfelsen ist in seiner Konzeption eine bedarfsgerechte Ergänzung des Sportangebots an der Universität, sowohl im Hinblick auf die Nachwuchsförderung im Kinder- und Jugendsport als auch als Breitensportart für die Bevölkerung.

Dadurch ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten in Verbindung mit den drei lokalen Bildungsträgern, als auch in Bezug auf Therapiesport, Inklusions- und Integrationsangebote.

Mit der Aufnahme des Klettersports in die Olympiashortlist für Tokio 2020 und dem aussichtsreichen Status als olympische Disziplin ergeben sich mit der Durchführung von nationalen und internationalen (Studenten-) Wettkämpfen darüberhinaus weitreichende Möglichkeiten und die hiesigen Klettersportler müssten nicht mehr auf externe Trainingsmöglichkeiten in Dresden oder Berlin zurückgreifen.

Der Kletterfelsen auf dem Campus der BTU wird sich mit seiner Bedeutungskraft sowohl Standortfaktor als auch Alleinstellungsmerkmal darstellen.



Klettereinrichtungen an deutschen Hochschulen

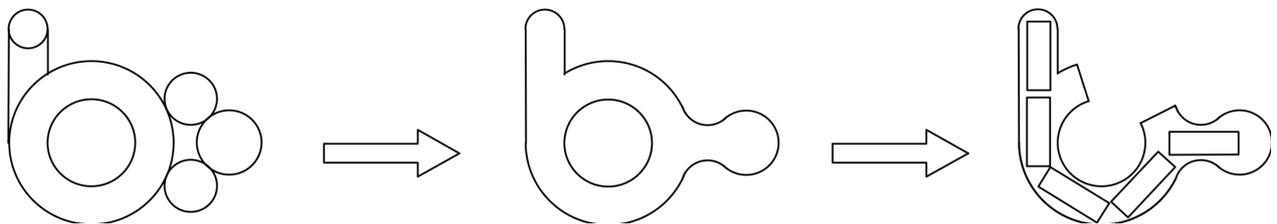
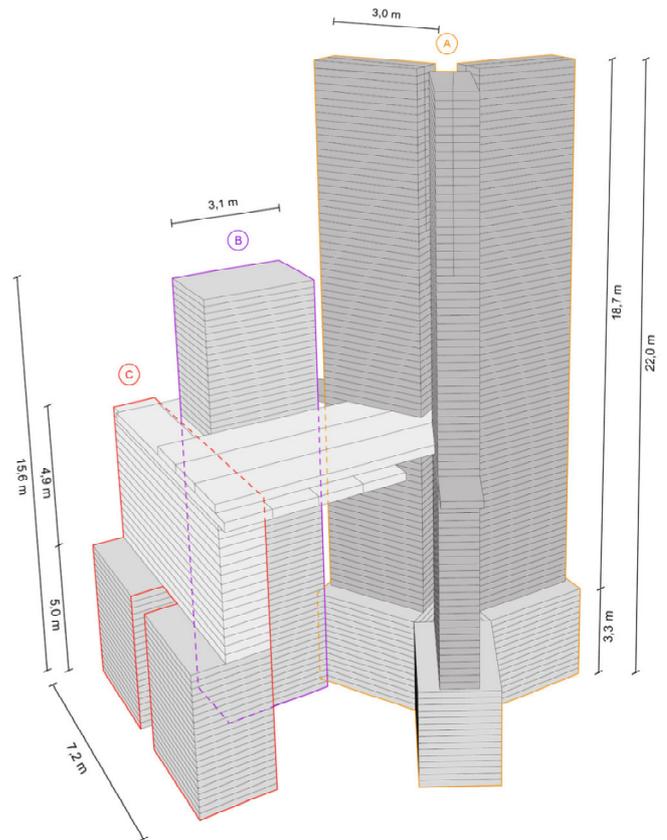
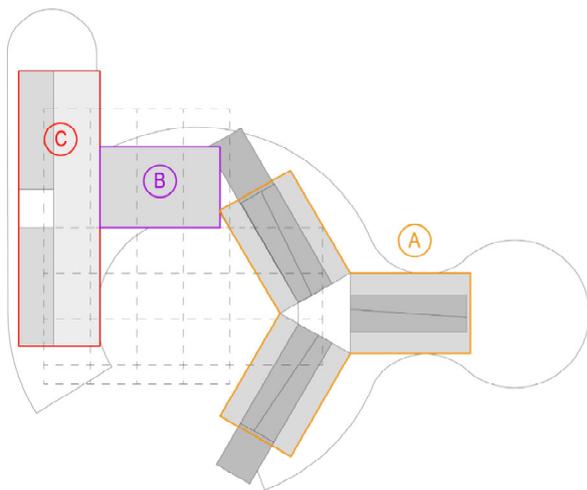
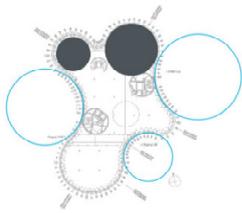


Kletterfelsen an deutschen Hochschulen

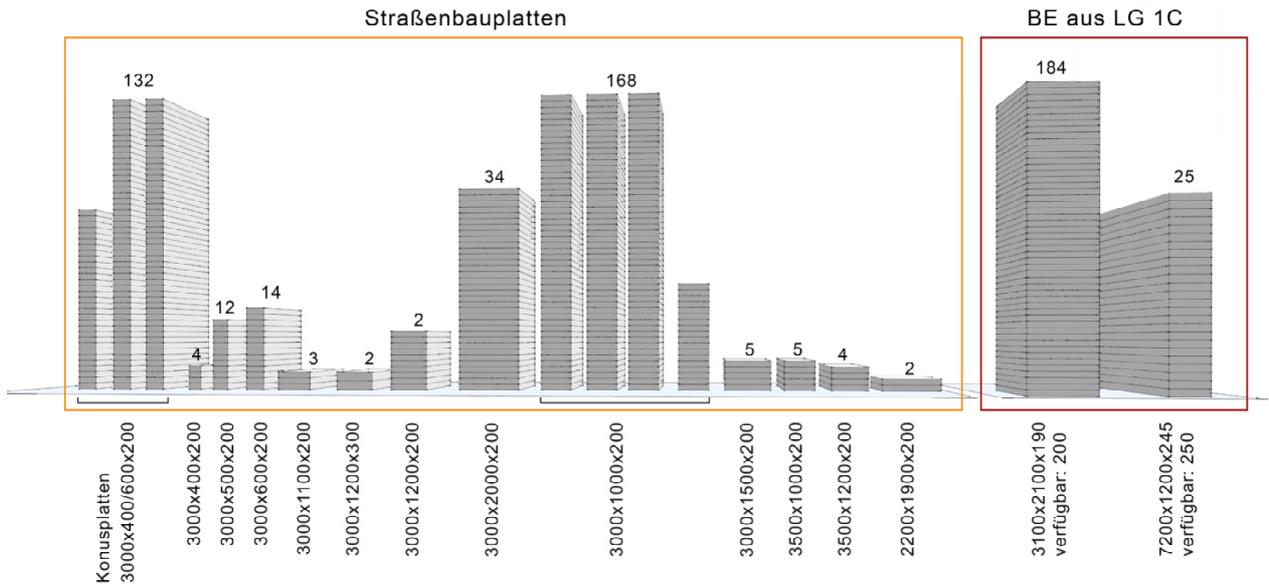


Entwicklung der Teilnehmerzahl an Kletterkursen an der BTU Cottbus

FORMSPRACHE UND ENTWURFSIDEEN



STANDORT UND RESSOURCEN



- a) Lagerung von 397 Betonbauteilen eines Straßenrückbaus
- b) Potentieller Standort des Kletterfelsens und Boulderfelsens bzw. erweiterter Outdoor-Sportstätte



INVESTITIONSKOSTEN UND FINANZIERUNG

KOSTEN (traditionelle Bauweise)

In unterschiedlicher Ausführung belaufen sich die Baukosten in Spritzbetonbauweise zwischen 275.000€ - 420.000€.

KOSTEN (Verwendung gebrauchter BE)

Das Referenzprojekt ‚Reichenbacher Zinne‘ in Guben kostete rund 195.000€. Bei dieser Bauweise werden wiederverwendete Betonelemente übereinander gestapelt und anschließend mit einer Spritzbetonschicht überzogen, die eine natürliche Gesteinsoberfläche darstellt.

FOLGEKOSTEN

Die anschließenden Wartungskosten sind gering, da diese in Eigenleistung durch die ZE Hochschulsport und zertifizierte Trainer C getätigt werden können.

EINSPARUNGSPOTENZIAL

Durch Eigenleistungen der am Campus ansässigen Bau- und Planungsfachgebiete kann ein Großteil der Leistungen abgedeckt werden. Ein wesentliches Einsparpotenzial liegt in der Materialeinsparung durch die Wiederverwendung der Betonelemente, die bereits am Campus verfügbar sind. Die funktionale Angliederung an die vorhandenen Sport- und Sanitäreinrichtungen spart den Neubau der Versorgungseinrichtungen.

FINANZIERUNG

Die Finanzierung des Vorhabens erfolgt über Haushaltsmittel des Landes, die Prüfung von geeigneten Fördermitteltöpfen sowie durch die Akquise von Spenden und Sponsoren.



Monte Balkon, Berlin



Peterstein 20, Nordhausen



Reichenbacher Zinne, Guben

PFLICHTENHEFT ZUM KLETTERFELESEN

ALLGEMEINES:

1. Der Kletterfelsen der BTU C-S befindet sich neben dem eingezäunten Gelände des Sportplatzes, der Beachanlage und der asphaltierten Laufstrecke. Neben diesem eingezäunten Sportbereich wird der Kletterfelsen angrenzend an den Sportplatz auf einem eingezäunten Gelände mit separat verschlossenen Ein- und Ausgang und ist Eigentum der BTU C-S.

Die Einzäunung des Geländes des Kletterfelsen ist aus Sicherheitsgründen notwendig. Damit wäre auch eine optimale und zeiteinsparende Nutzung des Kletterfelsens durch die qualifizierten Trainer C im Sportklettern möglich.

Eine Nichteinzäunung würde zur Folge haben, dass die unteren Griffe mit einem hohen Zeitaufwand ständig ein- und ausgeschraubt werden müssen.

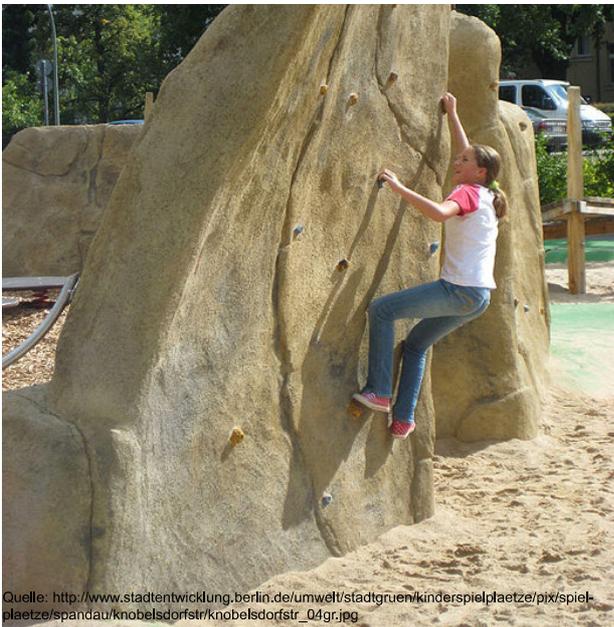
2. Durch den Betreiber ist der Zugang und die Nutzung des Kletterfelsens zu organisieren.

3. Im Pflichtenheft sind die Aufgaben des Eigentümers und die Aufgaben des Betreibers nachfolgend ausführlich festgelegt. Des Weiteren gilt für den Kletterfelsen eine sichtbare Benutzungsordnung, die am Eingang des Kletterfelsenareals für alle Nutzer einsehbar ist.

AUFGABEN DES EIGENTÜRMERS:

(1) Der Eigentümer stellt den Kletterfelsen beim Betreiber kostenfrei zur Verfügung.

(2) Der Eigentümer stellt sicher, dass für die Bewirtschaftung (Instandhaltung durch Wartungsarbeiten) des Kletterfelsens im Haushalt der BTU C-S ein jährlicher Sockelbetrag in Höhe von 2000€ bereit steht.



Quelle: http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/stadtgruen/kinderspielplaetze/pix/spielplaetze/spandau/knobelsdorfstr/knobelsdorfstr_04gr.jpg



Quelle: <http://www.naturpark-suedharz.de/wp-content/gallery/kletterfelsen/kletterfelsen-jugend-sozialwerk-3.jpg>

BETREIBER- UND NUTZUNGSKONZEPT

(3) Der Eigentümer stellt sicher, dass die Sauberkeit des Kletterfelsenareals gegeben ist, soweit nicht der Betreiber hierfür verantwortlich ist.

AUFGABEN DES BETREIBERS:

(1) Die Zugänglichkeit und die Nutzung des Kletterfelsen für Studierende, Mitarbeiter und Gästen wird durch den Betreiber organisiert.

(2) Der Betreiber hat dafür zu sorgen, dass den Nutzern Anleitung und Hilfestellung gewährt wird.

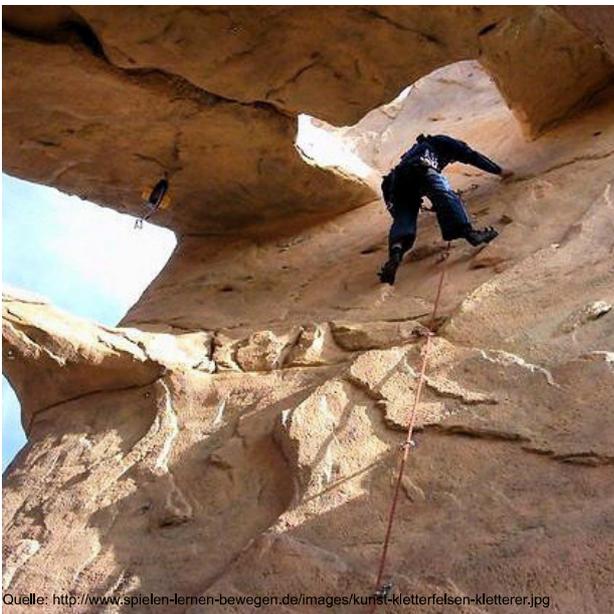
(3) Vom Betreiber ist für die Nutzung ein Nutzungsangebot (Kursangebot) zu erarbeiten, dass den Nutzern das Klettern am Kletterfelsen ermöglicht.

(4) Der Betreiber trägt die Verantwortung dafür, dass nur geeignetes Betreuungspersonal zum Einsatz kommt. Der Betreiber hat die Betreuungspersonen

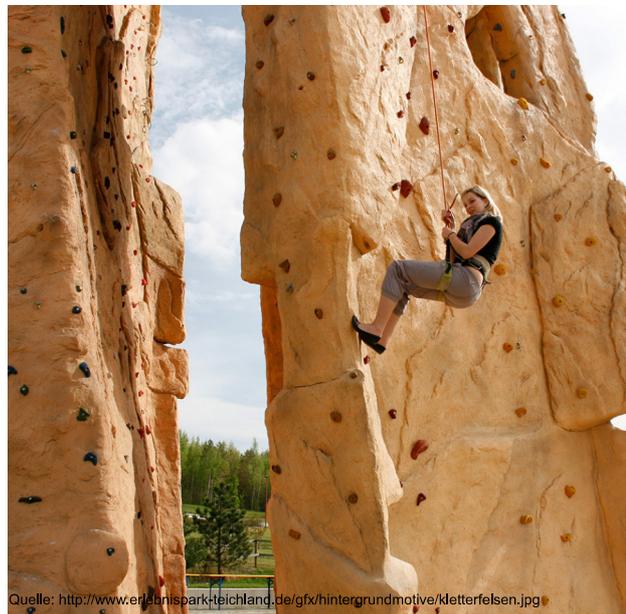
(lizenzierte Trainer-C Bergsport mit Honorarvertrag) zu verpflichten, die Einhaltung der Benutzungsordnung durch die von ihnen betreuten Nutzern zu überwachen und bei Verstoß gegen die Benutzungsordnung diese Nutzer auszuschließen.

(5) Die Nutzung des Kletterfelsen von Schulen (AG's), von Sportvereinen und weiteren Nutzern der Stadt sind nach Anmeldung vom Betreiber zu bearbeiten, dafür sind in Abstimmung mit dem Betreiber, Überlassungsverträge zu realisieren, in dem ein lizenzierter Trainer-C Bergsport ausgewiesen ist.

(6) Der Betreiber ermöglicht den Zugang zum Kletterfelsenareal durch ein organisiertes System von Schlüsselkartenvergabe und Schlüsselempfang durch den Wachschatz (ähnlich der Nutzung der Kletterwand in der Sporthalle).

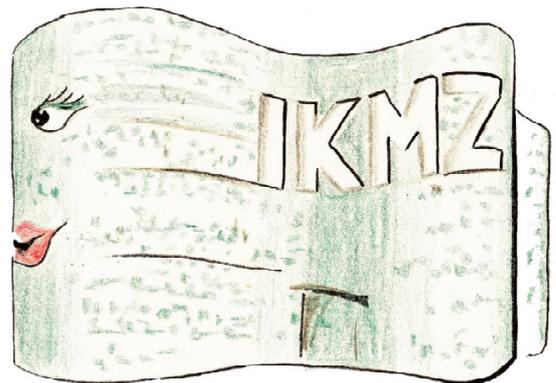


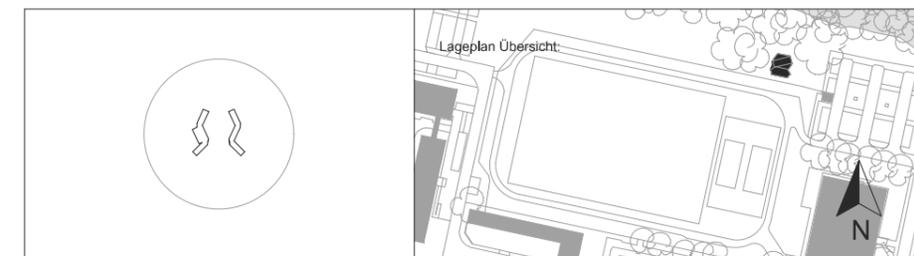
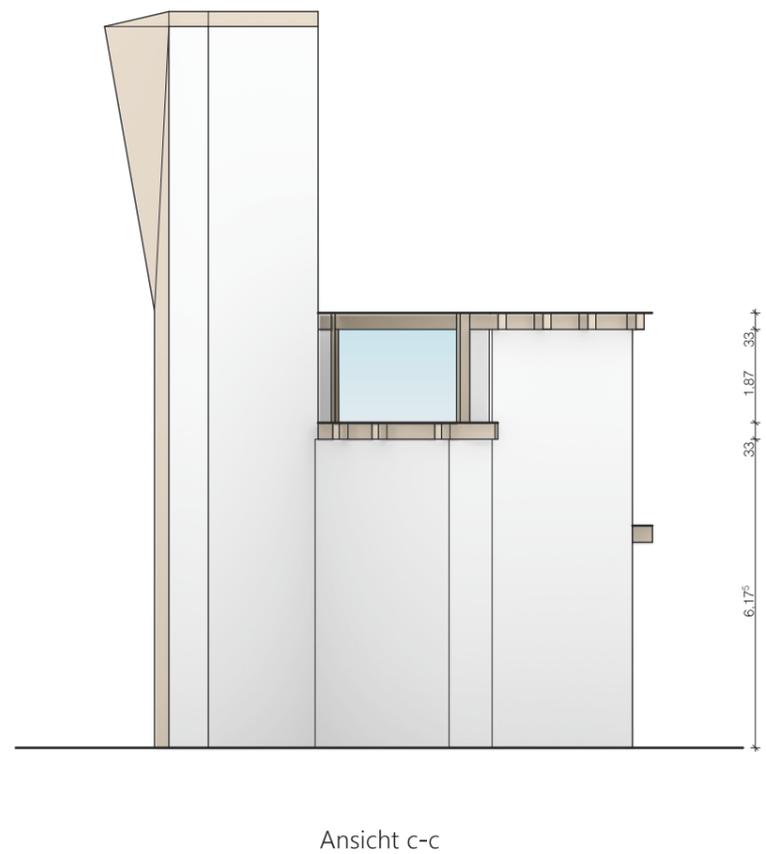
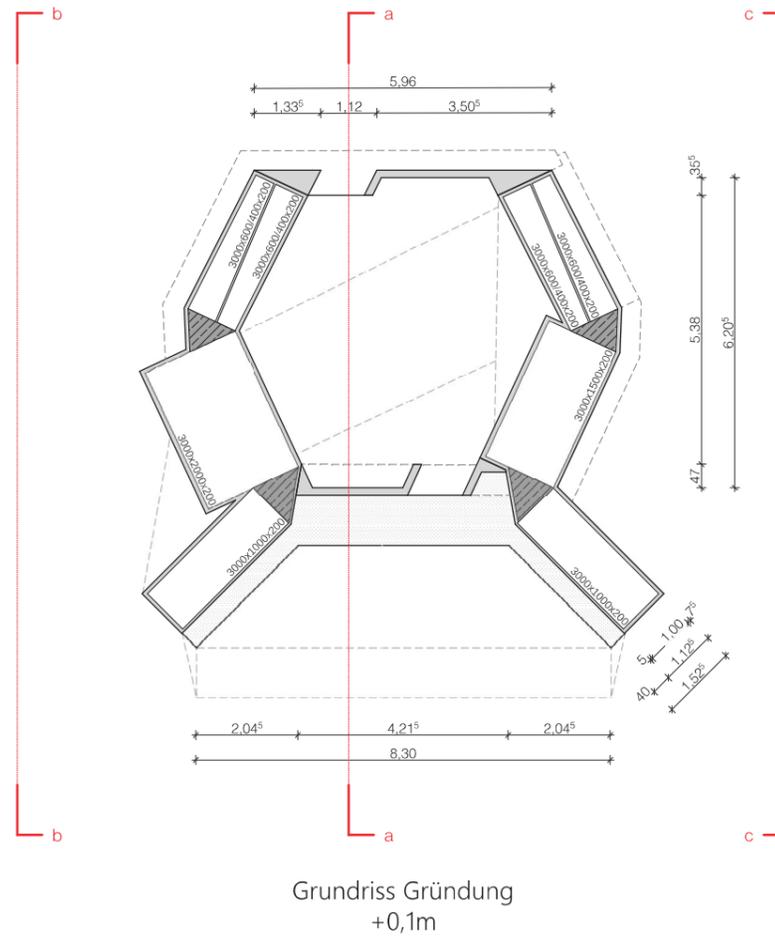
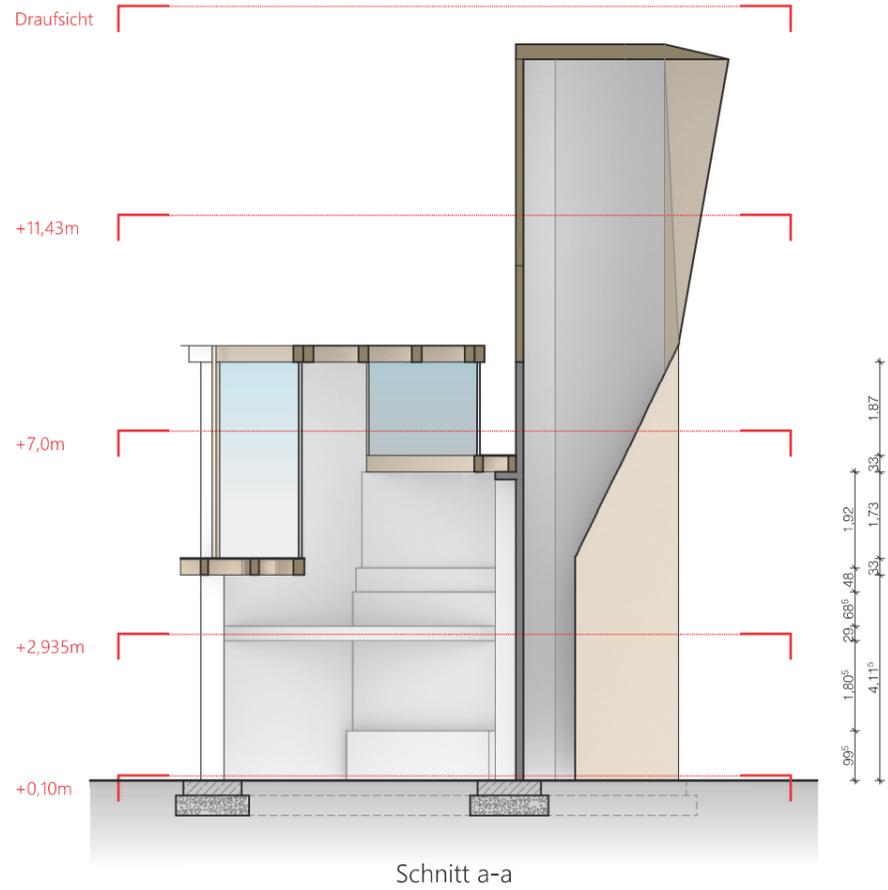
Quelle: <http://www.spielen-lernen-bewegen.de/images/kunst-kletterfelsen-kletterer.jpg>



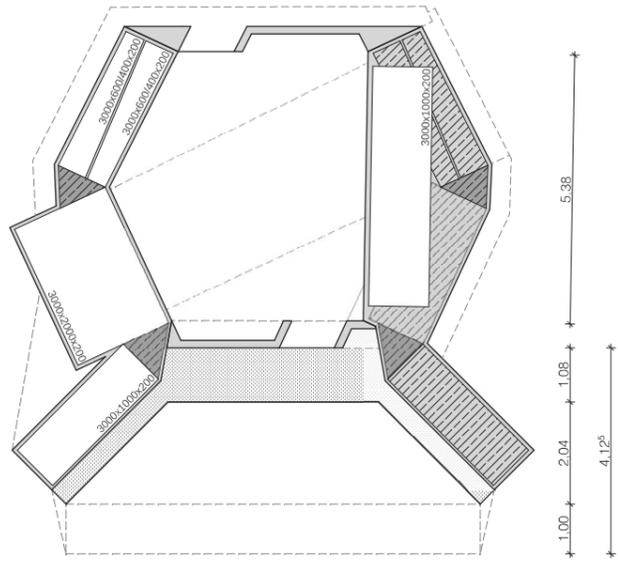
Quelle: <http://www.erlebnispark-teichland.de/gfx/hintergrundmotive/kletterfelsen.jpg>

IMPRESSUM
UND
KONTAKT

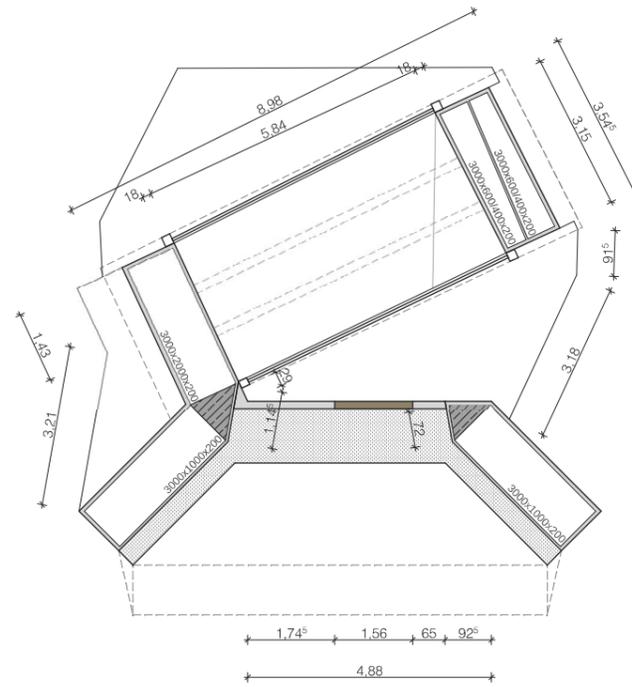




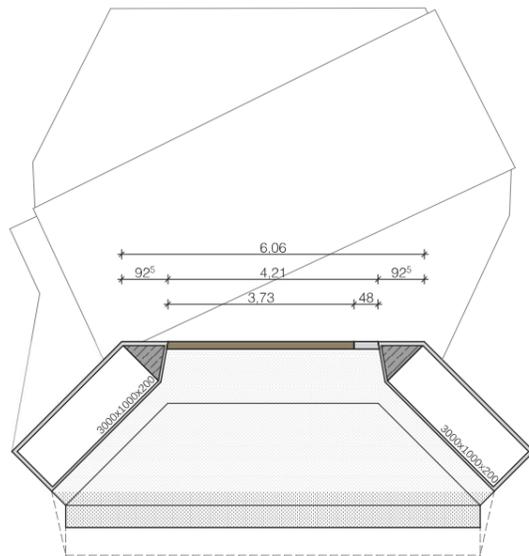
Bauherr:	BTU Cottbus-Senftenberg, AG Bauliches Recycling			
Bauvorhaben:	Kletterfelsen Variante 2, Zentralcampus BTU			
Planinhalt:	Schnitt, Grundriss, Ansichten, Perspektive	Maßstab:	gezeichnet:	Datum:
			geprüft:	Datum:
Planungsstand:	Entwurfsplan	Index:	Projektnummer:	Plannummer:
Bemerkungen:	erstellt und bearbeitet von Patricia Cott im Rahmen ihrer Seminararbeit im SoSe 2019			



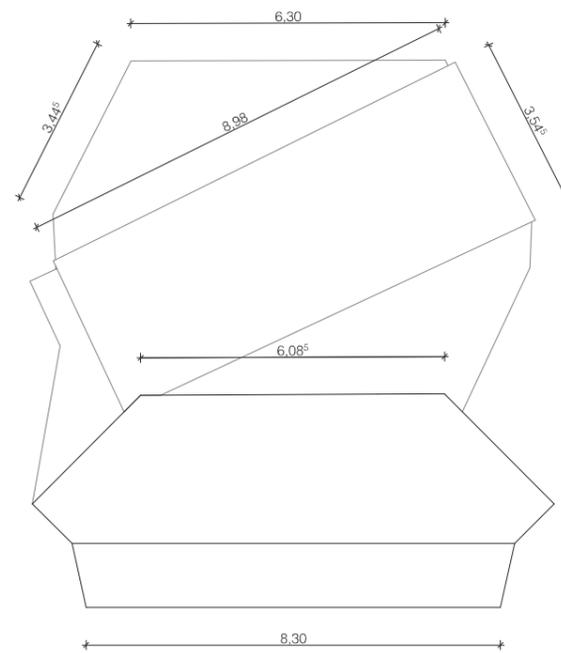
Grundriss
+2,935m



Grundriss
+7,0m



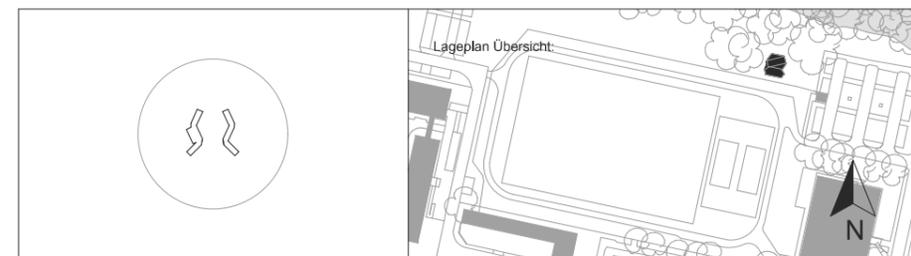
Grundriss
+11,32m



Draufsicht



Perspektive Südseite



Bauherr:		BTU Cottbus-Senftenberg, AG Bauliches Recycling			
Bauvorhaben:		Kletterfelsen Variante 2, Zentralcampus BTU			
Planinhalt:	Grundrisse, Draufsicht, Perspektive	Maßstab: 1:100	gezeichnet:	Datum:	
			geprüft:	Datum:	
Planungsstand:	Entwurfsplan	Index:	Projektnummer:	Plannummer:	erstellt am:

Bemerkungen: **erstellt und bearbeitet von Patricia Cott im Rahmen ihrer Seminararbeit im SoSe 2019**