

Wolfram Jäger, Angelika Mettke
Hassan Youssef, Stephanie Schmidt
Viktoria Arnold, Christian Matthes, Jakob Fischer

Entwicklung und Anwendung von komplett demontablen Wohneinheiten aus ressourcen- schonendem Beton – RC-WE-Modul

F 3192

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2020

ISBN 978-3-7388-0469-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Abschlussbericht

RC-WE-Modul

Titel: „Entwicklung und Anwendung von komplett demontablen Wohneinheiten aus ressourcenschonendem Beton “

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.54
Projektnummer TU/LS Twpl.: 61603-RC-WE-Modul

Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Auftragnehmer: Technische Universität Dresden
Fakultät Architektur
Lehrstuhl Tragwerksplanung
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
01062 Dresden

BTU Cottbus- Senftenberg
Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik
Arbeitsgebiet Bauliches Recycling
apl. Prof. PD Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
03046 Cottbus

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger
apl. Prof. PD Dr.-Ing. habil. Angelika Mettke
Dipl.-Ing. Hassan Youssef
Dipl.-Ing. Stephanie Schmidt
Dipl.-Ing. Viktoria Arnold
cand. B.Sc. Christian Matthes
B.Sc. Jakob Fischer

Datum: 30.11.2018/31.05.2019

Das Forschungsprojekt wurde mitfinanziert und unterstützt durch:

Mattig & Lindner GmbH
C.-A.-Groeschke-Str. 15
03149 Forst

Ecosoil Umwelt GmbH
Laugfeld 29
01968 Senftenberg

DYWIDAG-Systems International GmbH
Germanenstraße 8
86343 Königsbrunn

mCon GmbH
In der Schlade 1
D-57258 Freudenberg

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-16.54). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	6
1.1	Problemstellung.....	6
1.2	Zielsetzung	7
1.3	Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben	8
1.4	Vorgängerprojekt REMOMAB (2013).....	9
1.5	Schlussfolgerungen aus ReMoMaB.....	11
1.6	Arbeits- und Zeitplan.....	11
1.6.1	Zu Grunde gelegter Forschungsansatz.....	11
1.6.2	Angewendete Untersuchungsmethodik	12
1.7	Ausgangspunkte des Forschungsvorhaben	12
2	Theoretische Grundlagen für RC-WE-Modul.....	15
2.1	Stand der Forschung.....	15
2.1.1	Logosteine aus Wüstensand	16
2.1.2	Pilotprojekte in Recycling beton.....	17
3	Statische Betrachtungen.....	20
3.1	Einführung	20
3.2	Konstruktive Durchbildung.....	20
3.2.1	Baukonstruktion.....	20
3.2.2	Tragwerk und statisches System.....	21
3.2.3	Lastweiterleitung, Standsicherheit und Aussteifung	23
3.2.4	Gebäudeaussteifung.....	23
3.2.5	Aussteifende Wandscheiben	25
3.2.6	Optimierung von Tragwerken	27
4	Grundlagenermittlung / Recherche zum Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Herstellung von Fertigbetonteilen	27
4.1	Status Quo zum Einsatz von RC-Beton in der Betonfertigteilindustrie	27
4.2	Politische Forderungen	28
4.3	Rechtliche Rahmenbedingungen	29
4.3.1	Bauproduktenrecht	29
4.3.2	Kreislaufwirtschaftsrecht	29
4.4	Bautechnische Anforderungen.....	30
4.4.1	Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für den Einsatz im Beton.....	30
4.4.2	Untersuchungsergebnisse.....	38
4.4.3	Anforderungen an den Beton zur Herstellung der Betonsteine	42
4.4.4	Entwicklung der Betonrezeptur – durchgeführte Untersuchungen.....	44
5	Rahmenbedingungen, Festlegungen und Planung der RC-Wohneinheit.....	48
5.1	Allgemeines.....	48
5.2	Vorschläge zum Entwurf der RC-Wohneinheit	48
5.2.1	Pläne und Räumlichkeiten.....	48
5.2.2	Zu verwendende Einzelbauelemente (Allgemein)	50
5.2.3	Bauphasen des RC-WE-Moduls	53
5.2.4	Ansichten / Rohbau/Ausbau- Entwurfsvorschlag 1	58
5.3	Entwurfsmöglichkeiten zur Erstellung der RC-Wohneinheit.....	64
5.3.1	RC-Wohneinheit in Plattenbauweise.....	64
5.3.2	RC-Wohneinheit zusammengebaut aus Bauteilelementen	65
5.3.3	RC-Wohneinheit in Mauerwerksbauweise.....	66
5.4	Ausgewählter Entwurf der RC-Wohneinheit	70
5.5	Numerische Berechnung des RC-WE-Moduls/Statik.....	74
5.5.1	Allgemeines.....	74

5.5.2	Modell zur numerischen Berechnung	74
5.5.3	Materialien.....	76
5.5.4	Einwirkungen.....	77
5.5.4.1	Allgemeines.....	77
5.5.4.2	Ständige Lasten und Nutzlasten	77
5.5.4.3	Schneelast.....	77
5.5.4.4	Windbelastung	79
5.5.4.5	Gesamteinwirkungen:	82
5.5.5	Verformungen.....	83
5.5.6	Spannung.....	85
5.6	Dämmwirkung der RC-Wohneinheit	87
5.6.1	Anforderungen nach EnEV	87
5.6.2	Hinweise zur effektiven Wärmedämmung.....	87
5.6.3	Ausgewählte Dämmmaterialien.....	88
5.6.4	Bauphysikalische Analyse des Wandaufbaues.....	88
5.6.5	Bauphysikalische Analyse des Dachaufbaues.....	92
5.6.6	Bauphysikalische Analyse des Fußbodenaufbaues	96
5.7	Ausbau/Innenausbau.....	98
5.7.1	Die Schichtenlösung für Dach.....	98
5.7.2	Die Schichtenlösung für Fassade.....	100
5.7.3	Fenster und Tür	103
5.7.4	Der Demontierbare Innenausbau	107
5.7.4.1	Fußbodenaufbau	107
5.7.4.2	Nichttragende Trennwände	109
5.7.4.3	Wandverkleidung.....	111
5.7.4.4	Unterdecke.....	113
5.7.5	Technische Gebäudeausrüstungen TGA	115
5.7.5.1	Heizung und Sanitär.....	115
5.7.5.2	Elektroinstallation	116
5.7.6	Abdichtung des Rohbaus	116
6	Erstellung der RC-Wohneinheit	118
6.1	Allgemeine Beschreibung der RC-Wohneinheit	118
6.2	Grundriss und Ansichten der RC-Wohneinheit.....	121
6.3	Herstellung der RC-Bauteile.....	125
6.3.1	Bodenplatte	125
6.3.2	RC-Wandelemente	128
6.3.2.1	RC-Wand 1 (große Wandscheibe).....	128
6.3.2.2	RC-Wandelemente 1&2.....	129
6.3.2.3	RC-Deckenplatten 1&2.....	132
6.3.2.4	RC-Betonsteine	136
6.3.2.5	RC-Balken.....	145
6.3.2.6	RC-Attiken.....	149
6.4	Errichtung des Rohbaus der RC-Wohneinheit	153
6.4.1	Grundplatte.....	153
6.4.2	Verlegen der RC-Bodenplatte.....	154
6.4.3	Aufstellung der RC-Wand 1.....	156
6.4.4	Aufstellung RC-Wandelement 1&2	157
6.4.5	Aufmauern der RC-Betonsteine	158
6.4.6	Aufsetzen der RC-Betonbalken.....	160
6.4.7	Aufsetzen der RC-Deckenplatten.....	161
6.4.8	Aufsetzen der RC-Attiken	163
6.5	Prüfung der Stabilität des fertiggestellten Rohbaus der RC-Wohneinheit.....	165

6.5.1	Allgemeines.....	165
6.5.2	Durchführung des Belastungstestes.....	165
6.6	Rückbau des Rohbaus der RC-Wohneinheit.....	167
6.6.1	Allgemeines.....	167
	Arbeitsvorgänge des Rückbaus der RC-Wohneinheit.....	167
6.7	Re-Montage des Rohbaus der RC-Wohneinheit.....	170
6.8	Verbesserungsvorschlag für die RC-Mauerwerkswände.....	174
7	Begleitung der Realisierung.....	175
7.1	Herstellung des RC-Betons.....	175
7.1.1	Rezepturoptimierung, eingesetzte Rezeptur zur RC-Betonproduktion.....	175
7.1.2	Verarbeitbarkeit des RC-Betons zur Herstellung der Betonelemente.....	176
7.2	Ökobilanzielle Betrachtung zum Einsatz von RC-Beton im Vergleich zu Normalbeton....	179
7.2.1	Stoffstromanalyse.....	180
7.2.2	Aufwendungen bei der Herstellung der RC-GK im Vergleich zur Kiesgewinnung..	181
7.2.3	Energetische Betrachtung: Bereitstellung der Gesteinskörnungen für die Betonherstellung.....	183
7.2.4	CO ₂ -Emissionen für die Bereitstellung der RC-GK und des Kieses.....	187
7.2.5	Synopse des ökologischen Screenings von RC-Beton und Normalbeton.....	189
7.2.6	Effekte des Ressourcenschutzes.....	193
8	Materialkosten für die Herstellung der Betone (Normal- vs. RC-Beton).....	193
9	Allgemeines zur Herstellung der einzelnen Bauteile.....	194
10	Bewertung Montage des RC-WE-Moduls.....	197
10.1	Wissenschaftliche Begleitung.....	197
10.2	Erläuterung zum Montageablauf.....	197
10.3	Bewertung der entwickelten Verbindungen.....	201
10.4	Schlussfolgerungen für die praktische Umsetzung.....	201
11	Bewertung der Demontage des RC-WE-Moduls.....	201
11.1	Wissenschaftliche Begleitung der Demontage.....	202
11.2	Bewertung der entwickelten Verbindungen hinsichtlich ihrer Lösbarkeit.....	203
11.3	Schlussfolgerungen für die praktische Umsetzung.....	203
12	Bewertung der Re-Montage.....	203
12.1	Wissenschaftliche Begleitung.....	203
12.2	Erläuterungen zum Ablauf.....	204
12.3	Bewertung der Qualität der Elemente und Verbindungen nach einmaligem Gebrauch..	204
12.4	Bewertung der Re-Montage.....	204
12.5	Schlussfolgerungen für die praktische Umsetzung.....	204
13	Optimierungspotenziale.....	204
13.1	Produktion/Herstellung.....	205
13.2	Nachbearbeitung.....	205
13.3	Montage, Demontage, Re-Montage.....	206
14	Zusammenfassung und Ausblick.....	207
15	Normenverzeichnis.....	209
16	Quellen.....	211
17	Anlagen.....	221
17.1	Datenblätter Folien und Dichtungsbahnen.....	221
17.2	mCon Systemlösung RC-WE-Modul.....	223
17.3	U-Werte.....	226
17.4	Beton Mischungsberechnung - Abruf-Nr.: RCM-4.....	232
17.5	Prüfergebnisse Betonrezepturen.....	233
17.6	Beton Mischungsberechnung, Vergleichsrezeptur - Abruf-Nr.: 30 600.....	234
17.7	Prüfbericht - Umweltverträglichkeit RC-GK 0-8.....	235
17.8	Sieblinien GK 0/2.....	236

17.9	Produktinformationsblatt Fließmittel MasterGlenium ACE 455	241
18	Anhänge	243
18.1	Anhang 1 - Aufbaupläne der RC-Wohneinheit	243
18.2	Anhang 2 - Statische Berechnung der RC-Wohneinheit	248
18.3	Anhang 3 - Bewehrungspläne und Verbindungstechnikpläne.....	257
18.4	Anhang 4 - Mengenberechnung.....	277
18.5	Anhang 5 - Bauteilkatalog der RC-WE	280

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Neben der von der Bundesregierung proklamierten Energiewende rücken recyclinggerechte und ressourceneffiziente Bauweisen immer stärker in den Fokus. Rohstoffverbräuche und zunehmende Rohstoffvielfalt, steigende Rohstoffpreise auf der einen Seite und die jährlich erzeugten exorbitanten Mengen an Bauabfällen bei sinkenden Deponiekapazitäten und einschränkenden Verwertungsmöglichkeiten (Mantelverordnung), erfordern nachhaltige Lösungen.

Die derzeitige gesellschaftliche Entwicklung erfordert die Bereitstellung von schnell zu errichtenden und umsetzbaren Unterkünften bzw. Wohngebäuden. Deutschland steht vor der riesigen Herausforderung, Defizite an bezahlbarem Wohnraum zu kompensieren. Die dafür notwendigen Planungs- und Bauprozesse lassen sich mit Rückgriff auf das Prinzip der Modularität erheblich beschleunigen.

Beide Aspekte waren Gegenstand des abgeschlossenen Forschungsvorhabens. Der Beitrag zur innovativen Entwicklung auf diesen Gebieten besteht in der erstmaligen Anwendung des modularen massiven Bauens mit RC- Baustoffen.

Das modulare demontable Bauen unter Verwendung von RC-Betonmodulen trägt dem kreislaufgerechten Bauen Rechnung, vereint eine Vielzahl von Umweltvorteilen wie die entwickelten RC-Wohneinheiten als Bauteildepot zu nutzen, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Bauwirtschaft steigt.

Die zentrale Herausforderung einer nachhaltigen Gesellschaft im 21. Jahrhundert ist bzw. besteht in der Verringerung des Verbrauchs an natürlichen Rohstoffen und Materialien. Das KrW-Gesetz vom 24.02.2012, die Deutsche Rohstoffstrategie 2010 und das flankierende Programm „ProgRess“ vom 29.02.2012 sind Motor für den schonenden und zudem effizienten Umgang mit natürlichen Ressourcen. Die Bundesregierung hat sich – entsprechend der EU-Vorgaben - das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2020 Recyclingquoten von 70 % für Bau- und Abbruchabfälle zu realisieren, die Rohstoffeffizienz gegenüber dem Jahr 2008 um 20 % zu erhöhen und die ressourceneffizienteste Volkswirtschaft der Welt zu werden.

Vor allem der Wirtschaftsbereich Bau birgt – auf Grund der großen Massenströme – ein riesiges Ressourcenschonungspotenzial in sich. In Deutschland gehen über 60 % aller Abfallmaterialien, ca. 50 % der nichtbiologischen Rohstoffe sowie über 40 % des Primärenergiebedarfes auf die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Bauwerken zurück [3]. In der Vergangenheit lag der Fokus auf den ungenutzten Potenzialen des Gebäudesektors hinsichtlich des Energieverbrauchs, meist beschränkt auf die Nutzungsphase der Gebäude. Durch zahlreiche Instrumente wurde und wird vom Staat die energetische Gebäudeoptimierung und -sanierung gefördert. Aber Energieeffizienz ist nur eine Säule der Nachhaltigkeit. Erst nach und nach rückt die Ressourcenschonung, das heißt die Analyse von Stoffströmen über den gesamten Lebenszyklus, immer mehr in den Brennpunkt der Bemühen um das Bauen in der Zukunft.

Für die Bauwirtschaft sind dabei primär die Ressourcen an Steinen und Erden, insbesondere an Kiessanden, Kalk und Hartsteinen, Gips und Tongesteinen von Relevanz. Um diese Rohstoffressourcen nachhaltig zu schützen, müssen Gebäude so geplant und gebaut werden, dass bei Erreichen des Lebenszyklusende die eingesetzten Materialien wieder für etwas Neues zur Verfügung stehen, möglichst auf der gleichen Ebene.

Die hochwertigste Form des Recyclings ist die Wiederverwendung gebrauchter Bauteile. Auf diesem Weg bleibt die „graue“ Energie, also jene die zur Herstellung des Bauteils aufgewendet werden musste, erhalten. Die Voraussetzung, um nach Nutzungsende Bauteile in Gänze zurück zu gewinnen, ist eine de-montagegerechte Bauweise und Verbindungstechnik.

Einen weiteren ressourcenschonenden Effekt liefert der Einsatz von Recycling-Materialien (sog. Wiederverwertung), die zur Herstellung der Bauteile anstelle von Sekundärrohstoffen verwendet werden.

Weder die demontagegerechte Bauweise noch der Einsatz von Recycling-Materialien gehören in Deutschland zum Stand der Technik.

1.2 Zielsetzung

Hauptziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung und Demonstration einer massiven, modularen, transportablen und voll demontablen/recyclinggerechten Wohneinheit für die kurzfristige Bereitstellung temporärer Unterkünfte für Personen wie bspw. Asylunterkünfte. Die Zielstellung beinhaltet Anforderungen der Next Generation Buildings, Stoffkreisläufe nach dem Prinzip Cradle to Cradle (kreislaufgerechtes Bauen auf Bauteilebene) zu schließen. D.h. flexibel (schnell, demontierbar, anpassungsfähig etc.), schadstofffrei und ressourcenschonend mit System (modulare Bauweise) zu bauen. Dies beinhaltet neben der sortenreinen Trennbarkeit und der Wiederverwendbarkeit ganzer Bauteile des Rohbaus auch deren nachhaltige Herstellung durch die Nutzung von Recyclingmaterial. Einmal hergestellt, befinden sich ganze Module im Nutzungskreislauf, ohne eine Schredderung am Nutzungsende. Daher wird mit der Wiederverwendungsoption ein Beitrag zur Werterhaltung geleistet (Upcycling). Im Ergebnis des Projektes stehen die Erprobung der erarbeiteten Grundlagen und die Optimierung von wiederholbaren, adaptiven Konstruktionslösungen sämtlicher Gebäudeteile.

Ziel bei der Errichtung der demontablen Wohneinheit ist der Nachweis, dass die zuvor entwickelten Konstruktionen (nach definierter Nutzungsdauer) sich in gewünschter Weise zurückbauen lassen und dann als einzelne Bauelemente sofort wieder verwendbar zur Verfügung stehen oder sortenrein in den Materialkreislauf eingehen oder einer anderweitigen Nutzung zugeführt werden können. Die zukünftige Bewertung der Effizienz einer Konstruktion soll nach entsprechenden theoretischen Überlegungen anhand eines Demontagekoeffizienten (Input / Output) zukünftig in die Nachhaltigkeitsbeurteilung eingeführt werden.

$$K_D = \frac{\dot{a} M_{Output}}{\dot{a} M_{Input}}$$

(1)

K_D = Demontagekoeffizient

M = Material

Im Fokus steht die Optimierung von wiederholbaren, adaptiven Konstruktionsweisen sämtlicher Gebäudeteile mit dem Schwerpunkt:

- 1.) Die Entwicklung von Konstruktionen, welche als Ganzes oder aber deren Baustoffkomponenten zerstörungsfrei demontiert werden können und somit 100% wieder verwendbar sind.
- 2.) Eine Verbesserung der bauphysikalischen Bauteilkennwerte bei gleichzeitiger Möglichkeit Einzelschichten der Konstruktion zerstörungsfrei auswechseln zu können.
- 3.) Messungen hinsichtlich Luftdichtheit und Schallübertragung.
- 4.) Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung bisheriger konstruktiver Lösungsvorschläge.

Abschließendes Ziel des Forschungsvorhabens war die Errichtung eines Demonstrators als etwa 20 m² großes Anschauungsobjekt für „zwei Bewohner“ (siehe Bild 1). Die Ausbildung der modularen Nasszelle ist nur theoretisch entwickelt worden; aber aufgrund der überdurchschnittlichen Kosten nicht Bestandteil des Demonstrators geworden.

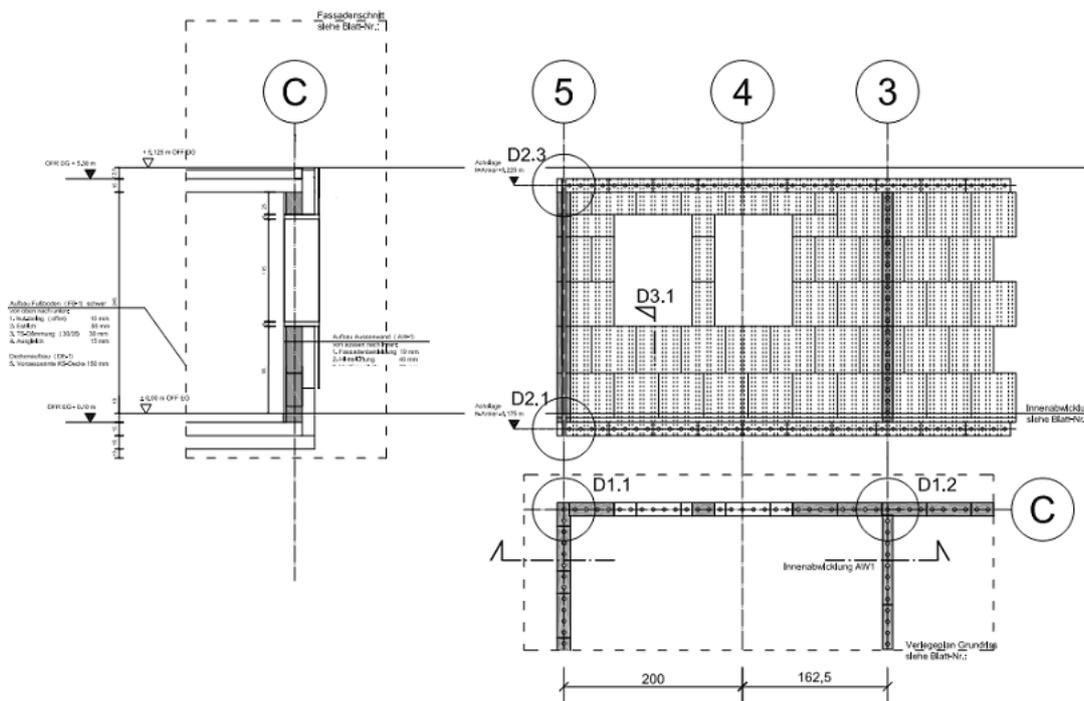


Bild 1. Erster Entwurf des Demonstrators für die RC-Wohneinheit [1]

1.3 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben

Als wesentliche Grundlagen sind die Forschungsprojekte-Projekte "Entwicklung von Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen" (REMOMAB [1]) und „Die Entwicklung eines Betonsteins unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen“ (Ökoblockstein) [2]) sowie "Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton" [3] zu nennen.

Mit dem Forschungsprojekt ReMoMaB wurden die Chancen und Möglichkeiten für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen analysiert sowie Lösungswege dafür entwickelt und aufgezeigt. Schwerpunkt des Projekts ReMoMaB waren massive Bauweisen in Mauerwerk. Die dabei

georteten, bereits in Ansätzen vorhandenen Teillösungen wurden modifiziert und zu einem System zusammen gefügt.

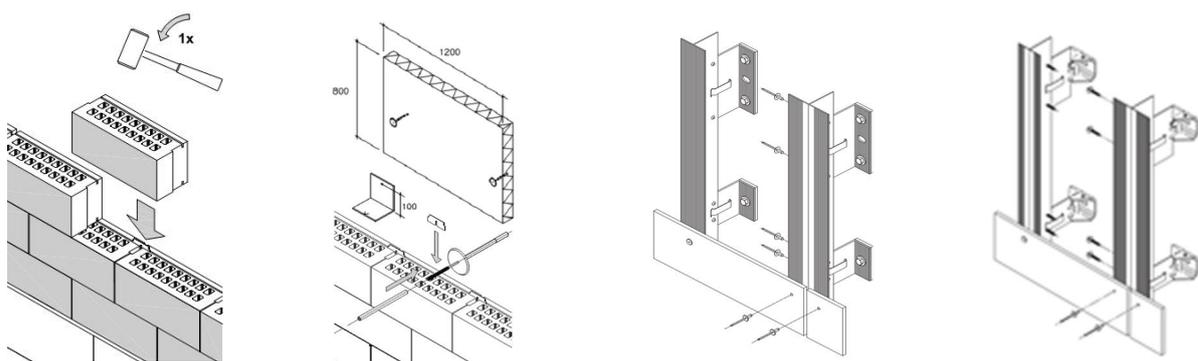
Der Lehrstuhl Tragwerksplanung, TU Dresden ist seit 2009 intensiv auf dem Gebiet der modularen rezyklierbaren Bauweise tätig.

In den o.a. FO-Projekten [2] und [3] wird nachgewiesen, dass auf dem Gebiet RC-Betonherstellung die FG Bauliches Recycling, BTU C-S, fundierte wissenschaftlich-technische Kenntnisse aufweist. Darüber hinaus sind umfassend Untersuchungen zur Demontage von herkömmlich industriell errichteten Gebäuden dokumentiert und Grundsätze für das recyclinggerechte Bauen mit Blick auf die Wiederverwendung von Betonbauteilen abgeleitet worden. Dabei stand nicht nur die Schaffung von theoretischen Grundlagen im Vordergrund, sondern die Bearbeitung erfolgte immer im Kontext der Entwicklung von anwendungsbezogenen Lösungen im Interesse der Gesellschaft, Wirtschaft (Bau- und Recyclingindustrie) und der baupolitischen Vorgaben.

1.4 Vorgängerprojekt REMOMAB (2013)

Da heute ca. 80 % der entstehenden Eigenheime als Massivbauten in Mauerwerk errichtet werden, lag es nahe, zunächst demontable Mauerwerkskonstruktionen zu untersuchen und die wesentlichen Grundlagen dazu zu schaffen. Mit dem Forschungsprojekt ReMoMaB wurden theoretische Lösungen für den demontablen Hochbau in Wandbauweise erarbeitet:

- 1- Mit dem Forschungsprojekt ReMoMaB wurden die Chancen und Möglichkeiten für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen analysiert sowie Lösungswege dafür entwickelt und aufgezeigt. Dabei wurde auf die in der Maschinenbau, Auto- und Elektroindustrie gewonnenen Erkenntnisse zum methodischen Vorgehen bei der Entwicklung von Demontagekonzepten für das Bauwesen zurückgegriffen und versucht diese systematisch auf Wandkonstruktionen des Hochbaus anzuwenden. Schwerpunkt des Projekts ReMoMaB waren massive Bauweisen in Mauerwerk. Die dabei georteten, bereits in Ansätzen vorhandenen Teillösungen (Bild 2) wurden modifiziert und zu einem System zusammen gefügt.



- a) System der Firma daas - clickbrick
b) System der Firma STO
c) System der BWM

Bild 2. Aus dem Projekt REMOMAB: Untersuchte, rückbaubare Fassaden-Systeme [1]

- 2- Aus den Untersuchungen konnte der Schluss gezogen werden, dass sich durch Kombination der am Markt existierender Rohbau- und Fassadensysteme heute bereits nahezu vollständig rückbaubare und somit sortenrein rezyklierbare Wände in Mauerwerk herstellen lassen. Im Ergebnis wurde ein systematisch aufgebauter Bauteilkatalog für eine definierte Anzahl an Gebäudeelementen und deren Bauteilknoten vorgelegt und so ein erster Schritt zur Erarbeitung einer Konstruktionslehre für demontables Bauen erreicht.

- 3- Details: Die Details wurden unter Berücksichtigung bauphysikalischer Aspekte, sowie Überlegungen zur Integration der Haustechnik optimiert. Durch Weiterführung und Übertragung der entwickelten Systematik auf alle wesentlichen Gebäudeelemente konnte somit ein kompletter Bauteilkatalog zusammengestellt werden.

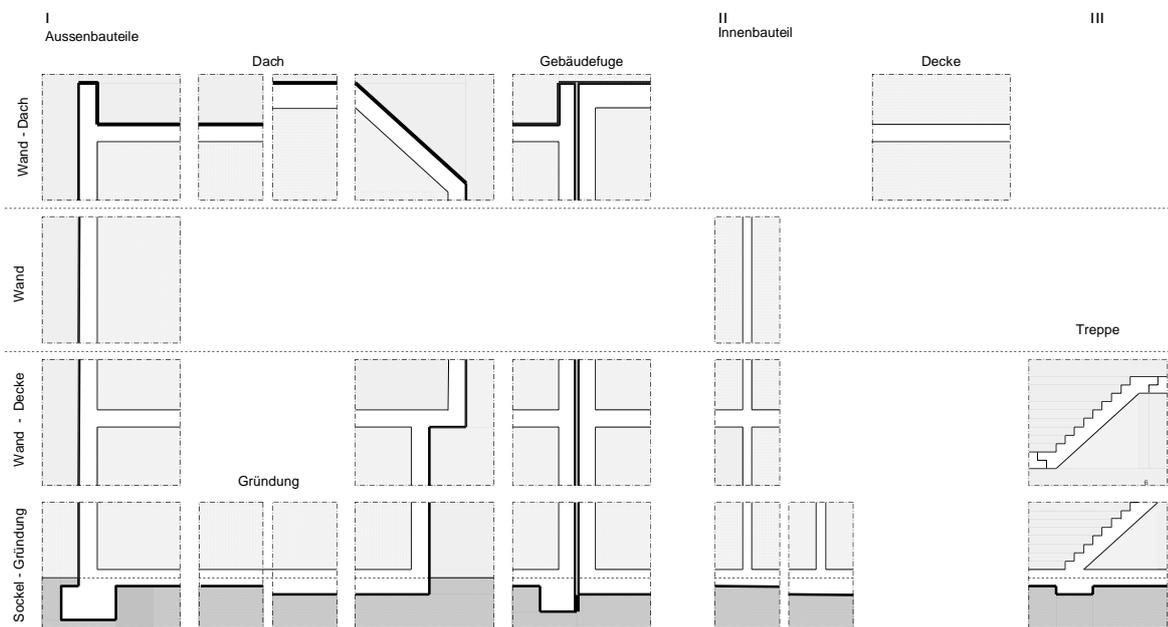
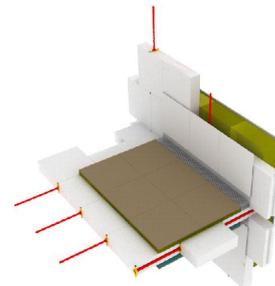
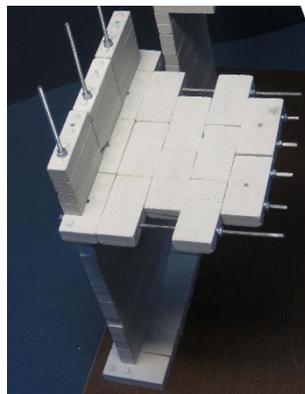
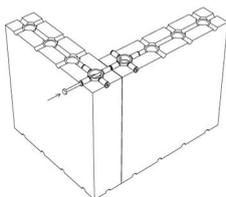


Bild 3. Übersicht und Systematik Bauteilkatalog REMOMAB [1]

Das Projekt REMOMAB hat seinen Schwerpunkt im Rohbau und schließlich seiner Kopplung mit dem Ausbau. Es schließt planmäßig mit dem Bauteilkatalog, seiner exemplarischen Anwendung sowie der Nachhaltigkeitsbewertung der Lösungen ab.



a)

b)

c)

a) Im Projekt REMOMAB entwickeltes Verbindungselement

- b) Rohmodell des lose vorgespannten Trockenmauerwerks im Wand-Decken-Knoten
- c) Simulation Wand-Decke-Knoten mit Darstellung des Einzelements und der Schnittstelle zum Ausbau

Bild 4. Arbeitsproben aus dem Projekt REMOMAB [1]

1.5 Schlussfolgerungen aus ReMoMaB

Der erreichte Stand des Projektes REMOMAB lässt den positiven Schluss zu, dass eine voll rezyklierbare massive Bauweise möglich ist, wobei eine Vielzahl von traditionellen Denk- und Lösungsansätzen verlassen werden müssen.

Mit dem Projekt wurden neue Felder betreten, die eine systematische Erprobung der in der Forschung entwickelten Ansätze und ihrer exemplarischen Durcharbeitung benötigen. Insbesondere die in der Baupraxis üblichen Vorgehensweisen wie das dauerhafte (mineralische) Kleben (bzw. Vermörteln oder Vergießen), sowie sämtliche Nassprozesse am Bau (wie das Putzen und Nassestriche) sind fest im Denken und Handeln aller am Bau Beteiligten verwurzelt. Die Ursache dafür sind gewisse psychologische und bauphysikalische Vorteile, die beim Verlassen des Verbundprinzips verloren gehen.

Die Kompensationslösungen bzw. -maßnahmen bedürfen entsprechender Akzeptanz und Prüfung. Die neuen, technologischen Lösungen nebst der an sie gestellten Anforderungen lassen sich, ohne die Konstruktionen zu testen, nicht glaubhaft umsetzen. Daher müssen die entwickelten Konstruktionen aufgebaut, in ihrer Funktion getestet, demontiert und dann hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit bewertet werden.

Somit ergibt sich zwingend die Notwendigkeit, die Ergebnisse des Projektes REMOMAB an praktische Anforderungen anzupassen und am Objekt zu testen, zu erproben und zu demonstrieren. Anhand eines Musterbaues können nicht nur Konstruktionen 1:1 aufgebaut, deren Funktionstüchtigkeit hinsichtlich Demontage getestet werden, sondern auch Untersuchungen auf komplexe bauphysikalische Anforderungen (Blower, Door-Test etc.) durchgeführt werden.

Für das Projekt Modulhaus bedeutet das, dass neben der optimalen Bauteilauslegung die Nutzbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit untersucht werden mussten.

1.6 Arbeits- und Zeitplan

1.6.1 Zu Grunde gelegter Forschungsansatz

Folgende Arbeitspakete sind im Laufe des Forschungsprojektes durchlaufen worden:

1. AP: Grundlagenermittlung / Recherche
2. AP: Anforderungen für den Entwurf demontabler temporärer Gebäude
3. AP: Betontechnologie
4. AP: Kenndaten/Bemessung/Dimensionierung Gebäude
5. AP: Ausführungsplanung / Produktionsablauf
6. AP: Bautechnologie

7. AP: experimentelle Untersuchungen an Verbindungen und Moduleinheiten, Prüfungen und Auswertungen
8. AP: Recycling / Lebenszyklusanalyse
9. AP: experimentelle Umsetzung / Errichtung eines Demonstrators
10. AP: Abschlussbericht

1.6.2 Angewendete Untersuchungsmethodik

1. Analyse gebauter RC-Gebäude in der Schweiz, in den Niederlande und in Deutschland
2. Bedarfsorientierter Entwurf einer RC-Wohneinheit (RC-WE) für eingeschossige Bauten inkl. Details
3. Baustoffuntersuchungen zu den gewählten Materialien / Variantenuntersuchungen zum Einsatz unterschiedlicher RC-GK-Anteile verschiedener geforderter bautechnischer Anforderungen
4. Ingenieurmäßige Berechnung der RC-WE inkl. Detailberechnungen
5. Planung und Herstellung der Module im Betonwerk Mattig & Lindner GmbH
6. Zusammenbau / Verbindung, Toleranzen, Fügetechnik
7. Nachweis der Gebrauchstauglichkeit der neu entwickelten modularen Bauteile (Traglastversuche im Labor)
8. Wirtschaftliche und ökobilanzielle Bewertung der RC-WE
9. Errichtung einer RC-WE auf einem Testgelände, Demontage dieser und Bewertung der Recyclingfähigkeit
10. Erstellung eines Bauteilkataloges als individuelle Planungsgrundlage

1.7 Ausgangspunkte des Forschungsvorhaben

Sekundärrohstoffe

Die Produktion der RC-Bauteile erfolgte aus Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (RC-GK), dem sogenannten RC-Beton. Dieser unterscheidet sich von Normalbeton nur durch die Substitution der natürlichen Rohstoffe Sand und Kies durch RC-GK.



Bild 5. Synopse Zusammensetzung Primärbeton mit RC-Beton [2]

RC-GK werden in Aufbereitungsanlagen aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen gewonnen. Geplant ist RC-GK der Liefertypen 1 und 2 einzusetzen. D.h. der Anteil an Betongranulaten Rc und Ru beträgt mind. 90% beim Liefertyp 1 und 70% beim Liefertyp 2 (vgl. *Tabelle 1*).

Tabelle 1: Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach DIN EN 12620:2008-07, Abschnitt 5.8 [2]

RC-Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2008-07 Abschn. 5.8			
Bestandteile	Beschreibung	Kategorie der Gesteinskörnung Zusammensetzung Massenanteil [%]	
		Typ 1 (Betonsplitt)	Typ 2 (Bauwerksplitt)
Rc + Ru	Rc: Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton Ru: ungebundenen Gesteinskörnungen, Naturstein, hydr. geb. GK	Rcu ₉₀ ≥ 90 M.-%	Rcu ₇₀ ≥ 70 M.-%
Rb	Rb: Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandstein, nicht schwimmender Porenbeton	Rb ₁₀ ≤ 10 M.-%	Rb ₃₀ ≤ 30 M.-%
Ra	Ra: Bitumenhaltige Materialien	Ra ₁ ≤ 1 M.-%	
X + Rg	sonst. Materialien: bindige Materialien (d.h. Ton und Boden), verschiedene sonst. Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips Rg: Glas	XRg ₁ ≤ 1 M.-%	XRg ₂ ≤ 2 M.-%
FL	FL: Schwimmendes Material im Volumen	FL ₂ ≤ 2 cm ³ /kg	

Da RC-GK für den Einsatz in Beton in der Regel nicht zum Lieferprogramm von Aufbereitungsunternehmen gehören, müssen die für das Projekt benötigten Mengen an RC-GK unter Mitwirkung der Mitarbeiter der Fachgruppe Bauliches Recycling produziert werden. Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Qualität werden in der Forschungs- und Materialprüfanstalt (FMFA) der BTU CS folgende Parameter an den RC-GK analysiert:

- stoffliche Zusammensetzung der RC-GK nach DIN 4226-100:2002-2 [5] (Bestimmung der Liefertypen),
- Kornzusammensetzung / Kornverteilung, Gehalt an Feinanteilen gemäß DIN EN 933-1:2012-03 [6],
- Dichte, Kornrohichte nach DIN EN 1097-6:2016-09 [7],
- Kornform nach DIN EN 933-4:2015-01[8],
- Feuchtigkeit und Wasseraufnahme nach DIN 4226-100:2002-02 [5],
- Kornzusammensetzung (Sieblinie der RC-Gesteinskörnung) nach DIN EN 12620:2008-07 [9],
- Frostwiderstand nach DIN EN 1367-1:2007-06 [10],
- säure- und wasserlösliche Chloride,
- säure- und wasserlösliches Sulfat nach DIN EN 1744-1:2007-09 [11],
- Alkali-Kieselsäure-Reaktivität gemäß der DAfStb-Richtlinie „Alkali-Reaktion“, Teil 3:2007-02 [12],

- k. Zementsteingehalt in Anlehnung an DIN 52170:1980-02, Teil 1-4 [13],
- l. strukturanalytische und mikroskopische Gefügeuntersuchungen,
- m. Raumbeständigkeit,
- n. Anteil gebrochener Oberflächen,
- o. organische Stoffe, die das Erstarrungsverhalten von Beton verändern.

Darüber hinaus werden die RC-GK auf umweltschädigende Inhaltsstoffe und deren mögliche Auslaugung aus dem Produkt Beton im Zentralen Analytischen Labor (ZAL) untersucht. Hier werden als Prüfparameter die länderspezifischen Vorgaben des Freistaates Sachsen und Brandenburg zugrunde gelegt. Sollten während der Bearbeitungszeit die Anforderungen der Ersatzbaustoffverordnung die Basis bilden, sind diese Parameter zu prüfen.

RC-Beton

Die eigens für dieses Projekt produzierten RC-GK der Liefertypen 1 und 2 wurden

- 1. in den zulässigen Anteilen nach DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 [14] und DIN 1045-2 [15] mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 [9]“ und
- 2. darüberhinausgehend im Beton zu 100% eingesetzt und getestet.

Die Betonrezepturen und Stoffraummodelle wurden unter Berücksichtigung des Einsatzes von unterschiedlichen Anteilen entsprechend der Expositionsklasse und der lastabhängigen Belastung zu substituierender natürlicher GK entwickelt. Neben der o.a. Richtlinie wurden folgende Normen zugrunde gelegt:

- DIN EN 206-1:2001-07+A1:2004+A2:2005 [14] „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“ und
- DIN 1045-2:2008-08 [15] „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206“.

Getestet wurde der Einsatz von verschiedenen Zementarten und -mengen zur Erreichung der geforderten Festigkeitsklassen und hinsichtlich der Verarbeitbarkeit (Konsistenz) des Betons.

Die Frischbeton- und Festbetoneigenschaften wurden anhand folgender Parameter charakterisiert:

- Frischbetonrohichte gemäß DIN EN 12350-6 [16],
- Ausbreitmaß gemäß DIN EN 12350-5 [17],
- Luftporengehalt gemäß DIN EN 12350-7 [18],
- Druckfestigkeit nach 28 Tagen gemäß DIN EN 12390-3 [19],
- Festbetonrohichte gemäß DIN EN 12390-7 [20] und
- Wassereindringtiefe gemäß DIN EN 12390-8 [21] (ausschließlich für die RC-Bauteile des Moduls Fundament).

Die Festbetonuntersuchungen erfolgten an Probekörpern gemäß DIN EN 12390-2 [22]. Auf den Erfahrungen vorangegangener Forschungsprojekte wurde aufgebaut.

Die zu entwickelnden RC-Bauteile sollten entsprechend der herausgearbeiteten Abmessungen im Projekt REMOMAB [1] für flexible Systeme der Recycling-Wohneinheit (RC-WE) konstruktiv ausgebildet werden. Bei der Wandausbildung sind Noppen auf der Oberseite und Taschen/Vertiefungen auf der Unterseite angeordnet worden, um die RC-Bauteile gut untereinander ohne Betonverguss zu verzahnen. Damit sollte neben der Stabilitätssicherung der Wandkonstruktion die Demontierbarkeit der Bauteile sichergestellt werden.

Im Laufe des Projektes entstand das Interesse, auch Wandtafeln aus RC-Beton herzustellen und in das System zu integrieren.

Entwurf, Bemessung und Dimensionierung

Der Entwurf richtete sich nach den spezifizierten Anforderungen. Die RC-WE ist als ein für sich eigenständiges System mit dem erforderlichen Ausbau gesehen worden. Grundlagen für den modularen Ausbau war das Projekt REMOMAB [1]. Für die Nutzung als statisch tragendes System sind Lasten und Einwirkungen zusammengestellt, Schnittgrößen und Spannungen ermittelt und daraus die Dimensionierung der Bauteile und Verbindungen abgeleitet worden.

RC-Bauteile

Die Fertigung der RC-Bauteile erfolgte im Betonwerk Mattig & Lindner GmbH in Forst.

Technologische Voraussetzungen des Herstellungsprozesses

Zur Sicherstellung einer effizienten Produktion der RC-Bauteile und -Elemente kann mit den Ergebnissen der Einzelfertigung der Prozess der Serienfertigung konzipiert werden. Erforderlich sind dann noch die Entwicklung einer effizienten Dosiertechnik und die Anpassung der Anordnung von Boxen für die sekundären Ausgangsstoffe unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten der Produktionsstätte. Für die Einzelsteine ist eine Form notwendig, die eine bessere Maßhaltigkeit insbesondere bei den Halbsteinen garantiert (z.B. in Batterieform).

Prüfung der Tragfähigkeit und Verbundwirkung der Bauteile Decken- und Wandsysteme

Bei den Einzelprüfungen ist gegenüber dem Antrag eine Reduzierung erfolgt. Dafür ist ein Belastungstest im aufgebauten Zustand durchgeführt worden (6.5.2).

Errichtung und Demontage der RC-WE

Die optimierte RC-WE ist demontabel auf dem Gelände der Mattig & Lindner GmbH in Forst errichtet, anschließend rückgebaut, umgesetzt und in Meißen erneut aufgebaut worden. Sie steht dort für weitere Demonstrations- und Untersuchungszwecke zur Verfügung. Die Herstellung der Betonelemente und der Fertigteile sowie die weiterten Bauleistungen zur Errichtung wurden von der Baufirma Mattig & Lindner ausgeführt. Eingebunden in diesen Prozess waren Studierende beider Universitäten. Mit der Demontage der RC-WE wurde die auf Rückbau spezialisierte Firma Ecosoil Ost GmbH beauftragt. Geprüft wurde, ob das modulare Konstruktionssystem beschädigungsfrei demontierbar ist und die zurückgewonnenen RC-Bauteile ohne Qualitätseinbußen wiederverwendbar sind. Das konnte schließlich mit dem anschließenden Umsetzungsprozess erfolgreich demonstriert werden. Außerdem konnte damit die Einheit für weitere Lehr- und Forschungszwecke erhalten werden.

2 Theoretische Grundlagen für RC-WE-Modul

2.1 Stand der Forschung

Da das Forschungsprojekt RC-WE-Modul das erste seiner Art ist, welches sich mit dem Nachhaltigen Bauen aus RC-Beton in demontierbarer Bauweise beschäftigt, konnte im Projekt kein direkter Bezug auf bestehende Forschungen auf diesem Gebiet genommen werden. Es existiert lediglich eine Firma, die bereits in modularer Massivbauweise arbeitet und ebenfalls Plansteine für die Errichtung von Mauerwerkswänden nutzt. Recyclingbeton findet dabei jedoch keine Anwendung. Er wird selbst in Deutschland noch sehr zurückhaltend eingesetzt. Mit dem Forschungsprojekt konnte in dieser Beziehung ein wesentlicher Durchbruch erreicht werden.

Nachfolgend werden einige tangierende Forschungsergebnisse besprochen, die teilweise als Grundlage dienen.

2.1.1 Logosteine aus Wüstensand

Zwei Thüringer Ingenieure haben es sich zur Aufgabe gemacht, mit Hilfe spezieller Technologien und eigens entwickelten Maschinen, aus örtlich vorhandenen Materialien einen neuen Baustoff zu schaffen. Wüstensand gibt es in Namibia mehr als genug, nur wurde dieser vorher nie als geeignetes Baumaterial angesehen.

Mit ihrer Firma „Polykarpe Research Technology“ entwickelte ein Team von Ingenieuren eine Möglichkeit, Polymerbeton aus dem feinen, rundgeschliffenen Wüstensand herzustellen. In Verbindung mit Polyesterharz statt Zement, entstehen tragfähige Steine. Diese sind nicht nur innerhalb von 24 Stunden bereits ausgehärtet, sie sind außerdem wasser- und feuerbeständig, umweltfreundlich und recycelbar. Außerdem besitzt der Polymerbeton im Vergleich zum normalen Beton eine höhere Tragfähigkeit und Zugfestigkeit [112].

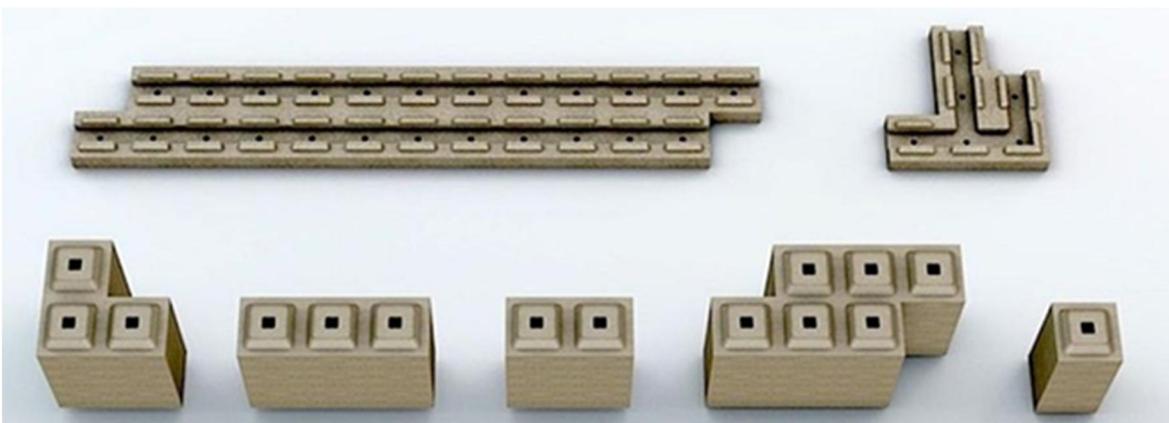


Bild 6. Polycare: Legosteine aus Polymerbeton. in:
<https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/dieses-haus-lego-steinen-wuestensand/>, 30.04.2018.

Ein weiterer Vorteil des Materials ist die Möglichkeit, die Steine fast immer vor Ort fertigen zu können. Sand ist in den meisten Ländern bereits vorhanden oder kann abgebaut werden, er muss somit keine langen Transportwege zurücklegen. Das Polyesterharz hat zudem lediglich einen Anteil von 13% des Kunststoffsteines. Angaben zufolge verursacht also ein Haus aus Polymerbeton nur etwa 15% der CO₂-Emissionen eines herkömmlichen Betonhauses.

Durch die Noppen der Steine können diese zügig ineinandergesteckt und verschraubt werden. Sie ermöglichen somit nicht nur einen schnellen und einfachen Aufbau der Wohneinheit, sondern kommen auch ganz ohne Mörtel und Kraneinsatz aus.

Polycare Research Technology will mit ihrem Produkt eine eigenständige Montage ermöglichen und liefert daher sogar einen eigenen Bauplan der Teile mit. Fünf verschiedene Formen von Steinen werden dabei auf Grundleisten gesetzt und bilden das Pendant zum klassischen Streifenfundament[113].

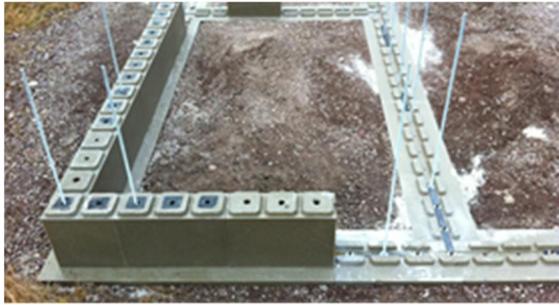


Bild 7. PD: Schmale Grundleisten als Fundament genügen, um die Bausteine aus Polymerbeton draufzusetzen. in: <https://www.tagesanzeiger.ch/wissen/technik/aus-sand-gebaut/story/11392560>, 12.05.2018.



Bild 8. Polycare: Musterhaus in Neu Delhi. in: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/dieses-haus-lego-steinen-wuestensand/>, 30.04.2018.

Diese Bauweise stellt vor allem für arme Länder eine Möglichkeit dar, schnell und günstig Wohnraum zu schaffen. Aber auch die Demontierbarkeit für temporär notwendige Gebäude bedeutet eine erhebliche Vereinfachung, um auf ungeplante Situationen schnellstmöglich reagieren zu können [114]



Bild 9. Polycare: Haus aus Polymerbeton. in: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/dieses-haus-lego-steinen-wuestensand/>, 30.04.2018.

Bild 10. Polycare: Zweigeschossiges Haus aus Polymerbeton. in: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/dieses-haus-lego-steinen-wuestensand/>, 30.04.2018.

Ein wesentlicher Nachteil ist, dass die Steine selbst aufgrund des verwendeten Bindemittels auch bei entsprechender Zerkleinerung nicht wieder verwendet werden können.

2.1.2 Pilotprojekte in Recycling beton

Vor allem in den 1950er bis 1970er Jahren wurde mit sehr reinem Beton gebaut, der sich nun besonders dafür eignet, in Form von Recyclingbeton erneut verwendet zu werden. Das Abrissmaterial

wird hierzu gebrochen und entsprechend den Sieblinien so sortiert, dass es problemlos den traditionellen Kies und die Gesteinskörnungen im Beton ersetzen kann. Er bietet also sowohl die Möglichkeit ressourcenschonendes, umweltfreundliches Material einzusetzen und gleichzeitig Bauschutt zu reduzieren.

Recyclingbeton hat im Wesentlichen die gleichen Eigenschaften wie Primärbeton und auch die Zusammensetzung des Gemisches ändert sich nicht. Zwar ist der Aufwand des Zerkleinerns und Sortierens hoch, er ersetzt aber dennoch den Vorgang des Abbauens am Kieswerk. Im städtischen Raum bedeutet die Verwendung von Sekundärmaterial wiederum einen niedrigeren Energiebedarf und eine geringere CO₂-Emissionen [115].

Während in Deutschland das Sekundärmaterial für Recyclingbeton nur mit einem Anteil von bis zu 45% der Gesteinskörnungen gemischt werden darf, kommen in der Schweiz bis zu 100% zum Einsatz. Das liegt unter anderem auch an den schwindenden Kiesvorkommen vor Ort und hat sich im Laufe der Zeit zu einem Standardbaustoff entwickelt.

Die Schweiz ist somit Vorreiter in Sachen RC-Beton. Beispiele für dessen Anwendung sind das Schulhaus von Christian Kerez in Zürich-Leutschenbach, das zu 75% aus wiedergewonnenem Material besteht, sowie das „e-Science Lab“ der ETH Zürich [116].



Bild 11. Pfammatter, Dario: Schulhaus Leutschenbach. in: <https://www.detail.de/artikel/praegnanter-glaskubus-mit-sichtbarer-stahlfachwerkkonstruktion-1267/>, 05.05.2018.

Bild 12. E-Science Lab Zürich. in: <https://www.baunetzwissen.de/sonnenschutz/objekte/kultur---bildung/laborgebaeude-e-science-lab-in-zuerich-835598>, 05.05.2018.

Deutsche Pilotprojekte entstehen derzeit in vielen großen Städten. Für die Berliner Humboldt-Universität entstand bereits ein Laborgebäude für Lebensmittelwissenschaften in Recyclingbeton. 5.500 m³ des Materials wurden dort bereits verarbeitet und mit den durchweg positiven Resonanzen will die Stadt ein Zeichen für Nachhaltigkeit und eine funktionierende Kreislaufwirtschaft setzen [117].

Prof. Dr.-Ing. Angelika Mettke beschäftigt sich nun schon seit mehreren Jahren mit dem Thema RC-Beton und begleitete unter anderem ein Hochbauprojekt in Ludwigshafen, an dem der Einsatz dessen untersucht wurde. Mit den positiven Ergebnissen des sogenannten Leuchtturmprojektes „Haus 3“, sollte vor allem den künftigen Bauherren das Vertrauen in das Material gegeben und langfristig eine nachhaltigere Bauwirtschaft garantiert werden. Entscheidend für den Einsatz von RC-Beton ist einzig die Qualität der Gesteinskörnungen. Diese wird durch den selektiven Rückbau

des Rohbaus, die Trennung der verschiedenen Baustoffe und letztendlich die qualitative Überwachung der RC-Anlage, sichergestellt.



Bild 13. Okulla, Armin: Das Innere des Forschungs- und Laborgebäudes der Humboldt-Universität Berlin in Sichtbeton. in: <http://dabonline.de/2015/04/29/kreislauf-aus-beton-recycling-greenbuilding-hochbau-wiederverwertung-recyclingbeton-r-beton-energieeffizienz-nachhaltigkeit/>, 05.05.2018

Insofern diese Kriterien erfüllt wurden, entspricht die Qualität des Recyclingbetons der von Normalbeton. Des Weiteren ist die besonders gute Verarbeitbarkeit zu benennen und die hervorragende Sichtbetonqualität. Je nach Projektlage, Entfernung zum Kieswerk und Vorhandensein von Betonwerken mit recycelten Gesteinskörnungen, können die Kosten für den RC-Beton sogar die der herkömmlichen Varianten unterschreiten.

Der Einsatz von Recyclingbeton eröffnet also neue, nachhaltigere Wege für die Zukunft der Bauindustrie und bedarf in Deutschland einzig weitreichenderer Akzeptanz [118].

3 Statische Betrachtungen

3.1 Einführung

Im Bauwesen liegen noch keine ausreichenden Erfahrungen zur methodischen Entwicklung von demontierbaren und vollständig rezyklierbaren Konstruktionen vor. Deshalb wird im Zuge der Analyse auf die im Maschinenbau sowie in der Auto- und Elektroindustrie gewonnenen Erkenntnisse zum methodischen Vorgehen bei der Entwicklung von Konzepten für das Bauwesen zurückgegriffen. Im Abschnitt 5 dieses Berichts konnte gezeigt werden, dass dieser Übertrag möglich ist, wenn die für das Bauwesen typischen Eigenheiten beachtet und bei der Konzeption berücksichtigt werden. Eine neue Systematik im konzeptionellen Denken ist dabei Grundvoraussetzung. Klar definierte, bisher feststehende Begriffe, müssen von der Strukturebene her bis hin zum Verbindungsmittel vor dem Hintergrund der Demontierbarkeit und Rezyklierbarkeit in neue Bezüge gesetzt werden. Dies gilt insbesondere bei den Schnittstellen zum technischen Ausbau, da die Austauschzyklen dieser Komponenten besonders stark von den Lebensdauern anderer Cluster abweichen. Die Unterscheidung der Verbindungen in solche, die zur konstruktiv wirksamen Fügung der Module dienen, und solche, die die einzelnen bauphysikalisch relevanten Schichten verbinden, führt zu ersten schematischen Konzepten für Grundprinzipien einer voll rezyklierbaren modularen Massivbauweise [1].

3.2 Konstruktive Durchbildung

Um Baustoffe im Stoffkreislauf zu halten, sind diese entsprechend ihren Stoffeigenschaften getrennt zu rezyklieren. Deshalb sind zur Errichtung rezyklierbarer Gebäude demontable Hochbaukonstruktionen notwendig. In den nun folgenden Abschnitten sollen schrittweise demontable Hochbaukonstruktionen entwickelt werden. Zur Entwicklung dieser demontablen Hochbaukonstruktionen ist es wichtig, die Rahmenbedingungen und die Anforderungen, welche für diese Konstruktionen gelten sollen, zu bestimmen.

Zur Festlegung der Rahmenbedingungen und Zielmarken von demontablen Konstruktionen ist es zunächst wichtig festzustellen, in welchem baurechtlichen Rahmen das (demontable) Gebäude errichtet wird. Da die zu entwickelnden demontablen Konstruktionen die gleichen Qualitätsansprüche vergleichbarer Nutzungen konventionell erstellter Gebäude erfüllen sollen, kann festgestellt werden, dass es sich bei Gebäuden mit demontablen Konstruktionen nicht um fliegende Bauten handelt. Infolge dessen kann bei Auswahl und Festlegung der zu erfüllenden Lebensdauer auf die bereits für konventionell errichtete Gebäude vorliegenden Systeme zurückgegriffen werden.

3.2.1 Baukonstruktion

Der Begriff Baukonstruktion kann nach jenem von Schulze [24] bestimmt werden. Demnach ist das Konstruieren „das Vorausbestimmen der Funktion, der Struktur und der Gestalt eines herzustellenden technischen Gebildes einschließlich seiner eindeutigen und vollständigen Darstellung und Dokumentation“. Wobei die Funktion einer Konstruktion „als Wechselwirkung zwischen dem Produkt bzw. dessen Elementen und der Umgebung im künftigen Einsatz beschrieben werden kann.“ Mit der Struktur einer Konstruktion werden Elemente des Produktes und deren Zusammenhänge dargestellt. Die Gestalt wird beschrieben durch:

- Werkstoff
- Form
- Abmessung
- Toleranz

Im Übertrag vom allgemeinen, auf das im Bauwesen benötigte Konstruieren, lässt sich die Formfindung bei Baukonstruktionen als „Wechselspiel dreier konvergierender Vektoren“ von Topos, Typos und Tektonik gemäß Deplazes [23] beschreiben. Demnach ist die Form das Resultat von Konstruktion und Material.

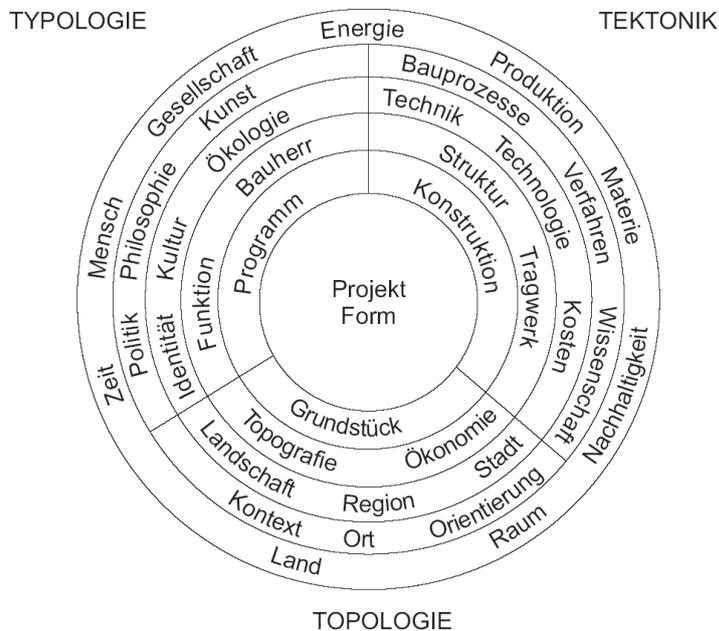


Bild 14. Formfindung im Bauwesen nach Deplazes [23]

3.2.2 Tragwerk und statisches System

Nach Pfeifer [25] ist „ein Tragwerksentwurf immer Teil des Gesamtentwurfs. Damit ist das Tragwerk immer Teil des architektonischen Vokabulars und der Grammatik mittels derer ein Entwurfs-gedanke zum Ausdruck gebracht wird. Analog zur Satzbildung fordert der Entwurf einen kontinuierlichen Abgleich zwischen auszudrückenden Gedanken und Grammatik und Wortwahl. Der Entwicklungsprozess des Tragwerks als primäre Struktur eines Gebäudes kann eben so wenig aus dem Entwurfsprozess herausgelöst werden, wie Lexikon und Grammatik dem Sprechenden entzogen werden können.“

Die Grundlagen der Tragwerksplanung, die Sicherheitskonzeption, sowie die Bemessungsregeln sind in DIN EN 1990 sowie NA angegeben. Grundsätzliches Ziel bei der Planung, Konstruktion und Ausführung ist die Sicherstellung einer angemessenen Zuverlässigkeit gegen Versagen und die Gewährleistung des vorgegebenen Nutzungszwecks für die vorgesehene Dauer unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Das Sicherheits- und Bemessungskonzept beruht auf dem Nachweis, dass diese Anforderungen erfüllt sind und sogenannte Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit mit einem bestimmten Sicherheitsabstand nicht überschritten werden.

Nach [26] wird in folgende Grenzzustände unterschieden:

- Tragfähigkeit,
- Gebrauchstauglichkeit
- Anforderungen an die Dauerhaftigkeit.

Tabelle 2 fasst die Definitionen der in der Tragwerksplanung allgemein üblichen Begriffe zusammen:

Tabelle 2: allgemeine Begriffsdefinitionen der Tragwerksplanung in Teilen nach [26]

Begriff	Definition
Grenzzustand	Ein Zustand, bei deren Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt.
Einwirkung	E Auf ein Tragwerk einwirkende Kräfte, Lasten etc. als direkte Einwirkung, eingeprägte Verformung wie Temperatur und Setzungen als indirekte Einwirkung
Widerstand	R Durch Materialeigenschaften und geometrischen Größen sich ergebende aufnehmbare Beanspruchungen
Tragwerk	Miteinander Verbundene tragende und aussteifende Bauteile
Tragsystem	Summe der Tragenden Bauteile und ihr Zusammenwirken
Tragwerksmodell	Idealisierung des Tragsystems zur Schnittgrößenermittlung und Bemessung
Platten	In ihren Hauptabmessungen zwei dimensionale Bauteile, deren statische Lastaufnahme und Lastweiterleitung vorrangig orthogonal zur Scheibenebene über Biegung erfolgt
Scheiben	In ihren Hauptabmessungen zwei dimensionale Bauteile, deren statische Lastaufnahme und Lastweiterleitung vorrangig in Scheibenebene über Schub erfolgt

Wesentliche Voraussetzungen für den Entwurf eines Tragwerks ist die Entwicklung eines statischen Systems zur Lastweiterleitung und Standsicherheit von Gebäuden. Voraussetzungen hierfür sind:

- die Nutzungsanforderung – Art der Baulichen Nutzung,
- die Konstruktion, Aussteifung, Fugenanordnung – Maß der Baulichen Nutzung,
- der Standort – Baugrund und Klima (Schnee-, Windlasten) und ggf. Sonderlasten.

3.2.3 Lastweiterleitung, Standsicherheit und Aussteifung

Lasten sind Einwirkungen auf Tragwerke, die im Hochbau als Lastbilder aus Einwirkungsnormen, den bauartspezifischen Bemessungsnormen oder gleichwertigen Unterlagen entnommen werden können.

Gemäß DIN ENH 1990 & NA wird hinsichtlich der Tragfähigkeit in

- ständige und vorübergehende Bemessungssituationen,
- außergewöhnliche Bemessungssituationen ,
- Bemessungssituationen bei Erdbeben.

unterschieden. Entsprechende Lastkombinationen und Teilsicherheitsbeiwerte sind in der genannten Norm angegeben.

Lasteinwirkung und Ihr Verlauf sind bei der Entwicklung von Mauerwerkskonstruktionen für Gebäude insofern von gesteigerter Bedeutung, als dass es sich bei Mauerwerk aufgrund der schichtartigen Fügung um richtungsabhängige Tragsysteme handelt. Es ist deshalb neben der zweckmäßigen Anordnung der Mauerwerkswände als lastabtragendes Element im Gebäude entscheidend, wie und in welcher Art (Anzahl und Richtung) das Tragsystem Mauerwerk im Bezug zur Mauer-schicht belastet wird. Bei der Lastweiterleitung wird unterschieden in vertikale und horizontale Lasten.

- Vertikale Lastweiterleitung

Die vertikale Lastweiterleitung eines Bauwerks wird durch unterschiedliche Konstruktionsteile vom Dach über die Decken und die Wände bis in die Fundamente geleitet. Die Fundamente leiten alle von oben kommenden Lasten in den Baugrund ab. Es handelt sich hierbei um eine zentrische bzw. exzentrische Druckbeanspruchung im Mauerwerk.

- Horizontale Lastweiterleitung - Aussteifung

Horizontale Lasten werden über horizontale Aussteifungselemente (Deckenscheiben) in vertikale Aussteifungselemente (Wandscheiben) geleitet. Hierbei werden die aussteifenden Wände in ihrer Ebene beansprucht.

3.2.4 Gebäudeaussteifung

Ein Bauwerk gilt als ausgesteift, wenn planmäßig horizontal angreifende Lasten sicher und ohne große Verformung in den Baugrund abgeleitet werden. Horizontallasten werden durch Wind, einseitigen Erddruck verursacht. Gebietsspezifisch können horizontale Lasten auch durch Erdbeben hervorgerufen werden. Das Grundprinzip der Aussteifung beruht auf dem in Bild 15 dargestellten Zusammenwirken von Decken (horizontalen Aussteifungsscheiben) und Wänden (vertikalen Aussteifungsscheiben). Standsicherheitskonzepte bei Gebäuden werden daher nach der geometrischen Ausrichtung der Aussteifungen unterschieden in:

- vertikale Aussteifung
- horizontale Aussteifung



- a) Plattenwirkung der Decke bei vertikaler Belastung
b) Scheibenwirkung der Decke bei horizontaler Belastung
c) Schubwirkung in Decken- und Wandscheibe

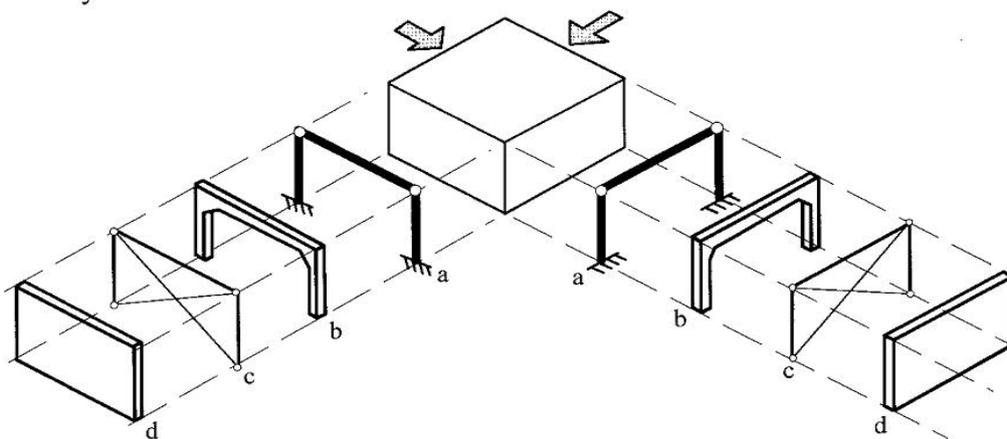
Bild 15. Grundprinzipien der Gebäudeaussteifung [1]

Vertikale Aussteifung

Bei der Anordnung von vertikalen Aussteifungselementen werden in Abhängigkeit von Anzahl und geometrischer Anordnung in statisch instabile, statisch labile und statisch stabile Systeme unterschieden. Ferner wird bei der Aussteifung von statisch bestimmten und statisch unbestimmten Aussteifungssystemen gesprochen.

Statisch bestimmte Aussteifungssysteme sind statisch stabile Systeme bei denen sich die Systemlinien der drei Aussteifungselemente nicht in einem Punkt schneiden und bei der die Horizontallasten der einzelnen Wandscheiben im Gleichgewicht sind.

Statisch unbestimmte Systeme sind zwar statisch stabile Systeme, führen aber aufgrund ungünstiger bzw. zu dichter Anordnung der Aussteifungselemente zu unerwünschten Behinderungen bei der Verformung (meist Schwinden oder Längenänderungen aufgrund von Temperaturänderungen) von Tragwerken. Derartige Zwängungen können auch zu Rissen in Wänden und Decken führen. Bewertet wird das Aussteifungssystem anhand dessen Einordnung in günstige bzw. ungünstige Anordnung der Einzelscheiben.



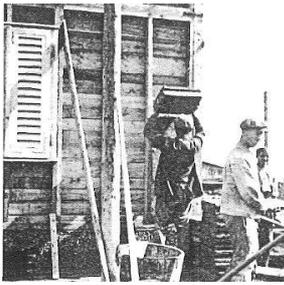
- a) Eingespannte Stütze
b) Rahmen
c) Fachwerk
d) Wandscheibe

Bild 16. Mögliche Aussteifungselemente

Für die Ausbildung der vertikalen Aussteifung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Bild 16 fasst diese Möglichkeiten zusammen. Im Vorgriff auf die in diesem Bericht dargestellten

demontablen Konstruktionen in Mauerwerk wurde betreffs deren Einsatzes als vertikales Aussteifungselement eine grundlegende Vorauswahl getroffen.

Mauerwerkskonstruktionen können als statisch wirksame Scheiben oder als nichttragende Ausfachungen in einer Stabstruktur (Skelettbau) eingesetzt werden. Die Grenzen in der Anwendung sind, bei singularer Betrachtung der statisch-konstruktiven Einsatzmöglichkeit, aufgrund der im Bauwesen bestehenden langen Entstehungs- und Entwicklungszeit der vorzufindenden Konstruktionen fließend.



a)



b)

a) Holzrahmen (FaFa) System mit Mauerwerksausfachung, von Schmitthenner in [27]

b) Stahlrahmen-System (Metsec Steel Framing Systems – atkingroup, UK) [28]

Bild 17. Typische Ausfachungswände, so genannte „Infill Walls“

Im Sinne einer Reduktion der Materialmischung wurde im Projekt ReMoMaB [1] von Mauerwerk als statisch eigenständig wirksames Element im Gebäudegefüge ausgegangen. Konstruktionen, bei denen Mauerwerk als Ausfachung ohne statische Funktion verwendet wird, den sogenannten „Infill Walls“ werden aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Darstellung von Tragwerk und Konstruktion ausgeschlossen. Zur vertikalen Aussteifung werden daher im Rahmen dieses Projekts aussteifende Wandscheiben in Mauerwerk betrachtet.

3.2.5 Aussteifende Wandscheiben

Aussteifende Wandscheiben müssen ausreichende Auflast erhalten, um dem Kippmoment der Bauteile aus der Horizontallast entgegenzuwirken. Die Standsicherheit ist gegeben, wenn die Exzentrizität der resultierenden Kraft $e \leq b/3$ ist (siehe Bild 18). Aus diesem Grund haben unter anderem Öffnungen Einfluss auf die Steifigkeit einer Wand. Aussteifende Wände besitzen die für die Aussteifung erforderliche Steifigkeit in nur einer Ebene. Deshalb ist eine versetzte Anordnung von aussteifenden Wänden in mehrgeschossigen Gebäuden zu vermeiden.

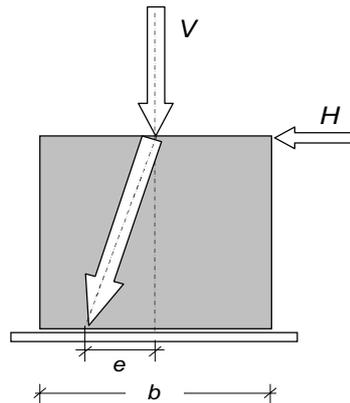


Bild 18. Exzentrizität bei schubbelasteten vertikalen Scheiben (Wände) [1]

Unter Bezug auf die allgemein geltenden Bauweisen werden nach Deplazes [23] folgende, eng im Zusammenhang mit der Aussteifung von Mauerwerksgebäuden stehende, Bauweisen genannt.

Tabelle 3: Bauweisen im Mauerwerksbau nach [23]

Bauweise	Definition
Schachtelbauweise (Kammerung)	<ul style="list-style-type: none"> • System aneinandergefüger, allseitig geschlossener Räume • Gleichmäßige Belastung aller Wände und gegenseitiges Aussteifen der Wände unter einander • Fenster und Türen in Einzelöffnungen
Schottenbauweise (Schottung)	<ul style="list-style-type: none"> • parallel - additierte Anordnung mehrere lastabtragender Wände • System aus quer zur Längsachse des Gebäudes ausgerichteten tragenden Wänden, das über den Deckenverbund mittels aussteifender Längsscheiben oder Kerne ausgesteift wird. • Eingrenzung des Schottenabstandes durch Spannweite der (meist einachsige) gespannten Decke
Scheibenbauweise	<ul style="list-style-type: none"> • freie Anordnung lastabtragender, vertikaler Scheiben (Wände) unter horizontalem Tragwerk – Decke oder Dach. • Raumfügung durch Kombination von Scheiben und nicht tragender Elemente (z.B. Glaswände) • Voraussetzung: horizontale Tragwerke, die den unterschiedlichen Bedingungen der Kraftübertragung gerecht werden können.

Horizontal Aussteifung

Deckenkonstruktionen, die zur Horizontalaussteifung herangezogen werden, müssen als Scheibe wirken. Die klassische Form einer derartigen Scheibenkonstruktion ist eine Stahlbetondecke. Aber auch andere Deckenkonstruktionen können bei entsprechender konstruktiver Ausbildung als Scheibe wirken. Bei Decken ohne Scheibenwirkung ersetzt je nach Konstruktion und Material ein Ringanker bzw. ein Ringbalken die Scheibenwirkung.

Der Ringbalken wirkt als ein Trägersystem das auf Biegung beansprucht wird. Der Ringanker ist ein Zugglied, das dem sich einstellenden Druckboden entgegenwirkt. Bild 19 verdeutlicht die beiden Grundprinzipien.



a) Ringanker: Zugband

b) Ringbalken: Biegebalken

Bild 19. Grundprinzipien der Scheibenwirkung bei Decken [1]

3.2.6 Optimierung von Tragwerken

Zusammenfassend können zur Optimierung von Tragwerken nach Rickenstorff und Berndt [29] folgende Grundsätze aufgeführt werden:

- Die Belastungen und Kräfte sind auf kürzestem Wege in den Baugrund abzuleiten. Stützweiten des Tragwerks sollten daher immer nur so groß gewählt werden, wie es mit Rücksicht auf Erfüllung der unmittelbaren und künftigen Forderungen an das Bauwerk unumgänglich ist. Große Stützweiten haben hohen Baustoffbedarf.
- Die Verwendung von Tragwerken mit ausschließlich Normalkraftbeanspruchung bzw. von Tragwerken, die durch Biegung mit gleichzeitig wirkender Normalkraft beansprucht werden, führt i.d.R. zu baustoffsparenden Lösungen.
- Bei Tragwerken mit reiner oder überwiegender Biegebeanspruchung wird der Baustoffaufwand durch den Extremwert des am jeweiligen Tragwerksteil auftretenden Biegemomentes bestimmt.
- Bei Rahmensystemen ist die Rahmenform in den Grenzen der funktionellen und gestalterischen Möglichkeiten der Stützlinie anzunähern.
- Das Tragverhalten des Baugrundes hat ebenfalls Einfluss auf die Wahl des Tragwerkes. Baugrundgutachten sind so früh wie möglich zu erstellen.
- Mögliche Versagensreaktionen im Gesamtkomplex sind zu betrachten.

4 Grundlagenermittlung / Recherche zum Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Herstellung von Fertigbetonteilen

4.1 Status Quo zum Einsatz von RC-Beton in der Betonfertigteilindustrie

Zum Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton liegt eine Vielzahl von Forschungsergebnissen vor. Auf dieser Grundlage sind eine Reihe von normativen Grundlagen geschaffen worden (siehe Kapitel 2 und 3). Zu nennen ist insbesondere die Richtlinie „Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen“ vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton. Der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton ist nur anteilig möglich und beschränkt sich auf Korngrößen > 2 mm, um womöglich Qualitätseinbußen gegenüber dem Normalbeton auszuschließen. International betrachtet erlauben fast alle Regelwerke nur die Verwendung von reinem Beton als rezyklierte Gesteinskörnung zur Betonherstellung. Der Brechsandanteil ≤ 2 mm bzw. ≤ 4 mm wird bspw. auch

in den Niederlanden restriktiv gehandhabt (Einsatz bis zu 20 % erlaubt). In der Schweiz, Dänemark und Japan hingegen ist ein Einsatz ohne Einschränkungen möglich [51]. Die Verwendung von RC-Beton ist in Deutschland – bis auf wenige Pilotprojekte im Zuge von Forschungsprojekten wie bspw. die Waldspirale in Darmstadt – nahezu unbekannt, obwohl RC-Beton über die Bauregelliste eingeführt ist.

Im Gegensatz dazu liegen in der Schweiz positive praktische Erfahrungen vor. Auf der Grundlage der in Deutschland eingeführten Normen hat sich der RC-Beton am Markt etabliert. Auch in Österreich ist dies zum Teil der Fall [52]. Seitens des IFEU, der BTU Cottbus (TP 3) und der Fa. TBS (TP 2), in Kooperation mit der Fa. Scherer & Kohl (RC-Baustoff-Lieferant), wurde die Initiative ergriffen, den RC-Betoneinsatz in Deutschland als Konstruktionsbeton zu forcieren. Im Zuge der Rheinuferbebauung in Ludwigshafen wurde ein Gebäude aus RC-Beton errichtet. Verbaut wurde Beton der Festigkeitsklasse C 30/37 unter Verwendung von RC-GK 2/8 und 8/16 vom Liefertyp 1 (=sortenreine Fraktion; Betonsplitt) gemäß den normativen Vorgaben. Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung der Erstellung des sog. Boardinghouses konnte nachgewiesen werden, dass die bautechnischen Eigenschaften der RC-Betone mit denen von Primärbeton vergleichbar sind und keine umwelttechnische Bedenken bestehen. Das FO-Projekt belegt die erfolgreiche Umsetzung [53]. Folgeprojekte in Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Berlin wurden durch eine intensive Öffentlichkeitsarbeit initiiert.

Bei allen Projekten wurde RC-Beton als Transportbeton – Beton, dessen Bestandteile außerhalb der Baustelle zugemessen werden und der in Fahrzeugen an der Baustelle in einbaufertigem Zustand übergeben wird [54]– verarbeitet.

Fertigteile aus Beton werden im Werk unter optimalen Bedingungen sowohl in einer hohen Qualität als auch wirtschaftlich produziert. Auf der Baustelle punkten Betonfertigteile vor allem durch Maßgenauigkeit, kurze Montagezeiten, Platzeinsparungen durch Just-in-time Lieferung und geringe Staub- und Lärmbelastigungen der Baustellenumgebung durch die Vorfertigung im Werk [56].

RC-Beton kommt derzeit insbesondere bei der Herstellung von Noppenblocksteinen zum Einsatz. Einige solcher Blockmodule, i.d.R. Schwergewichtssteine, sind durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) bauaufsichtlich zugelassen und werden in unterschiedlichen Variationen (Rezepturen und Formaten) produziert. Beispielhafte Fabrikate sind:

- Büscher-BLOCK Betonblocksteine – Einsatz von RCL 1 zertifiziertem Recyclingschotter,
- Öko-Stones der Fa. Feess – Einsatz von regionalen Recycling-Materialien,
- Twinbloc der Fa. Boden- und Baustoff- Aufbereitung GmbH & CO.KG – Einsatz von gütegeprüften Recycling-Baustoffen.

Ein weiteres Beispiel zum Einsatz von RC-Beton bei der Herstellung von Betonfertigteilen ist der Recyclingstein – Hydropor Siliton RC 40 - der Firma RINN, ein Pflasterstein für Wege, Parkplätze und Höfe.

Für die Verwendung von RC-Beton bei der Produktion von Betonfertigteilen für den Einsatz im Hochbau sind keine Beispiele bekannt.

4.2 Politische Forderungen

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) verfolgt das Ziel, natürliche Ressourcen zu schonen und den Schutz des Menschen und der Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen (§1). Politische Instrumente wie bspw. das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm ProgRess II (2016 – 2019) vom November 2016 verweisen darauf, der Schonung von begrenzt verfügbaren Primärrohstoffen nachzukommen [55]. Bauen mit RC-Beton ist eine Option, um natürliche Rohstoffe zu schonen und gleichwohl hochwertig einzusetzen.

4.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

4.3.1 Bauproduktenrecht

Bauprodukte, die nach dem 1. Juli 2013 in Verkehr gebracht werden, müssen der Bauproduktenverordnung (BauPVO) entsprechen. Die BauPVO regelt die Bedingungen für das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von harmonisierten Bauprodukten auf dem Markt und legt Anforderungen an die Leistungserklärung und die CE-Kennzeichnung fest. Die CE-Kennzeichnung ist auf Basis einer Leistungserklärung anzubringen, in der die Leistungen des Bauprodukts für dessen wesentliche Merkmale anzugeben sind. Welche Merkmale eines Bauprodukts wesentlich sind, ergibt sich aus den harmonisierten technischen Spezifikationen [30].

Technische Spezifikationen sind:

- harmonisierte Normen (hEN) – veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union,
- europäische technische Bewertung (ETA) – kann beantragt werden, wenn ein Bauprodukt nicht oder nicht vollständig in den Anwendungsbereich einer hEN fällt.

Dazu zählen beispielsweise die DIN EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“ sowie die DIN EN 771-3 „Festlegungen für Mauersteine – Teil 3. Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen)“.

Die BauPVO regelt im Anhang I die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen. Demgemäß muss ein Bauwerk derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden. Insbesondere muss Folgendes gewährleistet werden:

- a) das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt werden können,
- b) das Bauwerk muss dauerhaft sein,
- c) für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden [31][32].

4.3.2 Kreislaufwirtschaftsrecht

Ziel des KrWG ist es, den Umwelt- und Ressourcenschutz durch Abfallvermeidung, Recycling und Ressourceneffizienz zu verbessern sowie im Falle der Beseitigung von Abfällen hohe Umweltstandards zu etablieren [33].

Das Kreislaufwirtschaftsrecht und das Bauproduktenrecht kommen nebeneinander zur Anwendung. Bauprodukte, die den Normen und technischen Spezifikationen des Bauproduktenrechts nachkommen, können zwar nach Bauproduktenrecht für die zulässigen Verwendungszwecke eingesetzt werden. Aus dem Kreislaufwirtschaftsrecht können sich jedoch zusätzliche Anforderungen bezüglich Umwelt- bzw. Gesundheitsschutz ergeben. Die Verwendbarkeit von nach Bauproduktenrecht zulässigen Stoffen wird dann aufgrund abfallrechtlicher Bestimmungen eingeschränkt.

Für das Land Brandenburg steht im § 27 BbgAbfBodG [34] eine spezielle Regelung zur Berücksichtigung abfallarmer Erzeugnisse im Beschaffungs- und Auftragswesen der öffentlichen Hand. § 27 BbgAbfBodG entspricht über weite Strecken der für Bundesbehörden geltenden Bestimmung des § 45 KrWG. Beide Paragraphen erinnern die öffentliche Hand an ihre Vorbildfunktion. § 27 BbgAbfBodG geht über § 45 KrWG insoweit hinaus, dass den öffentlichen Auftraggebern vorgegeben wird, umweltschonenden Erzeugnissen den Vorzug zu geben (allerdings nicht als „Muss“- sondern lediglich als „Soll-Regelung“) [35].

4.4 Bautechnische Anforderungen

Die Herstellung der Betonsteine könnte in Anlehnung an die harmonisierte Norm DIN EN 771-3:2015-11 „Festigkeitsanforderungen für Mauersteine – Teil 3: Mauersteine aus Beton (mit dichten oder porigen Zuschlägen)“ erfolgen. Der Begriff Mauerstein wird gemäß DIN EN 771-3 definiert als „vorgeformtes Element zur Herstellung von Mauerwerk“. Vor- und Rücksprünge in Form von Noppen an der Oberseite und passenden Aussparungen an der Unterseite der Steine sorgen für eine gute Verzahnung der Betonsteine untereinander (Bild 20). Die mittig angeordneten Löcher, welche den Betonstein komplett durchdringen, dienen als Durchführung für die Spanndrähte.



Bild 20. Beispiel für Mauerstein aus Beton

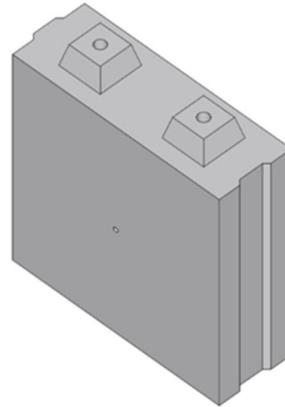


Bild 21. Modul-RC-Betonstein

Im weiteren Projektverlauf wurde der Modul-RC-Betonstein zusätzlich mit einer Nut-Feder-Verbindung an den Seitenflächen versehen (Bild 21), welche für zusätzliche Stabilität der Steine im Verbund sorgen soll. Diese Art des Formschlusses sorgt nicht nur dafür, dass sich die einzelnen Bauteile gegenseitig halten, sondern erzeugt gleichzeitig eine winddichtere Verbindungsstelle. Zudem ist es das Ziel, gänzlich aufs Vermörteln der Bauteile miteinander verzichten zu können und somit eine gut rückbaubare Verbindung zu schaffen.

Die angewendeten Verbindungssysteme zeigten bei den großflächigen Elementen eine sehr hohe Passgenauigkeit. Bei den kleinformatigen Elementen traten bei der Herstellung der Halbsteine zu große Toleranzen auf, sodass bei einer Industrieintroduktion die Form robuster ausgebildet werden muss.

4.4.1 Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für den Einsatz im Beton

Die harmonisierte europäische Norm (hEN) DIN EN 12620:2008-07 „Gesteinskörnungen für Beton“ legt die Eigenschaften von Gesteinskörnungen fest, die durch Aufbereitung natürlicher, industriell hergestellter oder rezyklierter Materialien und Mischungen daraus für die Verwendung als Betonzuschlag gewonnen werden. Recycling-Gesteinskörnung (kurz RC-GK) wird definiert als „Gesteinskörnung aus aufbereitetem anorganischem Material, das zuvor als Baustoff eingesetzt war“ [42].

Auf nationaler Ebene gelten die folgenden Normen mit:

- DIN 4226-101:2016-09 Entwurf „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton – Teil 101: Umweltauflagen und Liefertypen (nach DIN EN 12620)“ und

- DIN 4226-102:2016-09 Entwurf „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton – Teil 102: Qualitätssicherung (Typ-Prüfung und Werkseigene Produktionskontrolle)“

Die produzierten RC-GK müssen ebenso wie natürliche Gesteinskörnungen den bautechnischen Vorgaben der DIN EN 12620:2008-07 entsprechen. Diese Norm bildet die Grundlage für die erforderliche CE-Kennzeichnung der RC-GK in Vorbereitung der Vermarktung gemäß Bauproduktenverordnung vom 01. Juli 2013. Zusätzlich sind nach o.a. DAFStb-Richtlinie und DIN EN 12620 an rezyklierten Gesteinskörnungen folgende Parameter zu prüfen:

- Umweltverträglichkeit,
- stoffliche Zusammensetzung,
- Alkaliempfindlichkeit,
- säurelösliche Chloride,
- wasserlösliche Sulfate,

- Bestandteile, die den Erstarrungsbeginn des Zementleims beeinflussen.

In Deutschland dürfen RC-GK nach DIN EN 12620 nur dann verwendet werden, wenn sie keine umweltschädigenden Auswirkungen, insbesondere auf Boden und Grundwasser, haben. Dies betrifft in erster Linie Fundamente, Bodenplatten und Kellerwände aus Beton. Aber auch die aufgehenden Bauwerksteile, die nicht mit dem Boden verbunden sind, müssen die Umweltverträglichkeitsanforderungen einhalten und damit auch die im Projekt entwickelten Bauteile aus RC-Beton. Der Nachweis der Umweltverträglichkeit ist seit August 2017 nach DIN 4226-101:2017-08 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“ zu erbringen. Hinsichtlich der Inhaltsstoffe der RC-GK gelten die Höchstwerte für Eluat- und Feststoffparameter gemäß Tabelle 2 der DIN 4226-101. Gemäß DIN 4226-101 wird entgegen den Vorgaben aus der vorher geltenden DIN 4226-100 der Höchstwert für PAK nach EPA auf 25 mg/kg reduziert.

Ebenfalls gilt seit August 2017 die DIN 4226-102:2017-08 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 2: Werkseigene Produktionskontrolle“. Sie enthält Vorgaben zur Qualitätssicherung von rezyklierten Gesteinskörnungen für Beton. Die Typprüfung (bisher Erstprüfung) umfasst die erstmalige Überprüfung und Beurteilung zu Beginn der Herstellung. Anhang A legt die Anforderungen an das System der werkseigenen Produktionskontrolle für Hersteller von RC-GK (Art, Umfang und Häufigkeit der werkseigenen Produktionskontrolle) fest. Mit dieser normativen Regelung wurde das Erfordernis einer Zulassung im Einzelfall für den Einsatz von RC-Beton und/oder die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für den Einsatz von RC-GK im Beton, aufgehoben. Damit entfällt der in der Vergangenheit erforderliche zeitliche und finanzielle Zusatzaufwand. Die im Zeitraum von 2013 – 2017 bestehende Regelungslücke konnte dank des Arbeitsausschusses NA 005-07-15 AA „Gesteinskörnungen“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NA-Bau) geschlossen werden. Die im Arbeitsgebiet Bauliches Recycling durchgeführten Auslaugversuchsergebnisse wurden dem DIN-Ausschuss zur DIN-Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

Im Bild 22 ist die Entwicklung der europäischen und nationalen Regelwerke zum Einsatz von RC-GK zur Herstellung von RC-Beton zusammenfassend dargestellt

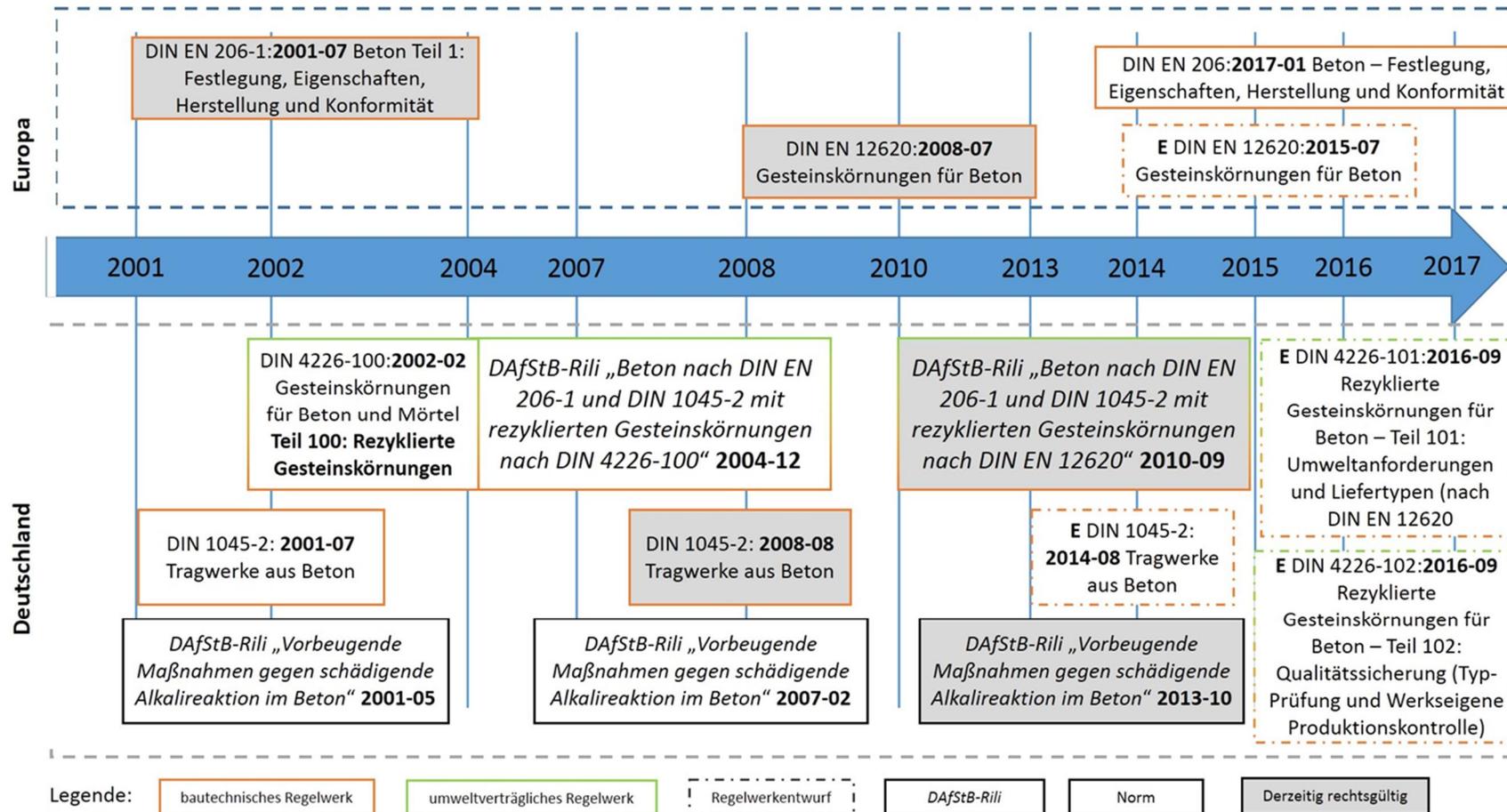


Bild 22. Entwicklung europäischer und nationaler Regelwerke zum Einsatz von RC-GK zur Herstellung von RC-Beton [Mettke]

Bezugnehmend auf die Ausführungen zur Umweltverträglichkeit von RC-GK wird empfohlen, nachstehende Parameter zu prüfen. Die Höchstwerte entsprechen den Z2-Werten und den entsprechenden bisherigen Vorgaben des DIBt, empfohlen wird jedoch Z 1.2-Werte einzuhalten. Der Nachweis der Umweltverträglichkeit ist dem Fremdüberwachungsbetrieb des Betonherstellers vorzulegen (*Tabelle 4*).

Tabelle 4: Bewertung der Inhaltsstoffe rezyklierter Gesteinskörnungen – Höchstwerte [44]

Eigenschaft	Höchstwerte	Z 1.2 Werte [45]	Analyseverfahren
Eluat			
pH-Wert	12,5 ^a	7 – 12,5	DIN EN ISO 10523
Elektrische Leitfähigkeit ^a	3 000 µS/cm	2500 µS/cm	DIN EN 27888
Chlorid	150 mg/l	40 mg/l	DIN EN ISO 10304-1
Sulfat	600 mg/l	300 mg/l	DIN EN ISO 10304-1
Arsen	50 µg/l	40 µg/l	DIN EN ISO 17294-2
Blei	100 µg/l	100 µg/l	DIN EN ISO 17294-2
Cadmium	5 µg/l	5 µg/l	DIN EN ISO 17294-2
Chrom gesamt	100 µg/l	75 µg/l	DIN EN ISO 17294-2
Kupfer	200 µg/l	150 µg/l	DIN EN ISO 17294-2
Nickel	100 µg/l	100 µg/l	DIN EN ISO 17294-2
Quecksilber	2 µg/l	1 µg/l	DIN EN 1483:2007-07, Abschnitt 4 und Abschnitt 5
Zink	400 µg/l	300 µg/l	DIN EN ISO 17294-2
Phenolindex	100 µg/l	50 µg/l	DIN 38409-16
Feststoff			
Kohlenwasserstoffe (H18) ^b	1 000 mg/kg	500 mg/kg	DIN EN 14039 in Verbindung mit M 35 der LAGA (KW/04)
PAK nach EPA	75 mg/kg	15 (50) mg/kg	DIN EN 15527
EOX	10 mg/kg	5 mg/kg	DIN 38414-17
PCB	1 mg/kg	0,5 mg/kg	DIN 38414-20
^a Kein Ausschlusskriterium ^b Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar.			

Unter Zugrundelegung des Entwurfs der DIN 4226-101:2016-09 ist für PAK nach EPA der Höchstwert auf 25 mg/kg zu reduzieren.

Je nach stofflicher Zusammensetzung der RC-GK werden diese gemäß DIN 4226-100 in 4 verschiedene Liefertypen unterteilt, wobei lediglich die Liefertypen 1 und 2 für den Einsatz im Beton zugelassen sind (vgl. *Tabelle 5*).

Tabelle 5: Stoffliche Zusammensetzung von RC-GK Liefertyp 1 und 2

RC-Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2008-07 Abschn. 5.8			
Bestandteile	Beschreibung	Kategorie der Gesteinskörnung Zusammensetzung Massenanteil [%]	
		Liefertyp 1	Liefertyp 2
Rc + Ru	Rc : Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton Ru : ungebundenen Gesteinskörnungen, Naturstein, hydr. geb. GK	Rcu ₉₀ ≥ 90 M.-%	Rcu ₇₀ ≥ 70 M.-%
Rb	Rb : Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandstein, nicht schwimmender Porenbeton	Rb ₁₀₋ ≤ 10 M.-%	Rb ₃₀₋ ≤ 30 M.-%
Ra	Ra : Bitumenhaltige Materialien	Ra ₁₋ ≤ 1 M.-%	
X + Rg	X : sonst. Materialien: bindige Materialien (d.h. Ton und Boden), verschiedene sonst. Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips Rg : Glas	XRg ₁₋ ≤ 1 M.-%	XRg ₂₋ ≤ 2 M.-%
FL	FL : Schwimmendes Material im Volumen	FL ₂₋ ≤ 2 cm ³ /kg	

Liefertyp 1: Betonsplitt unterscheidet sich vom Liefertyp 2: Bauwerkssplitt insbesondere durch die limitierten Anteile an R_{cu} und R_b (siehe Tabelle 2). Während der Liefertyp 1 mind. 90 M.-% an aufbereitetem Betonbruch enthalten muss und der Ziegelanteil max. 10 M.-% betragen darf, kann der Liefertyp 2 bis zu 30 M.-% Ziegel aufweisen. Dies hat Auswirkungen für das Input an der RC-Anlage in der Form, dass Betonbruch getrennt von Ziegelbruch anzuliefern und selektiv aufzubereiten ist. Dies wiederum hat Auswirkungen auf den Abbruch bzw. Rückbau der Bausubstanz hinsichtlich der getrennten Erfassung der verschiedenen verbauten Baustoffe. Diese Forderung geht konform mit der novellierten Gewerbeabfallverordnung Abschnitt 3, § 8, mit deren Abschluss im Frühjahr 2017 zu rechnen ist [46].

Laut Projektantrag war der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen der Liefertypen 1 und 2 für die Produktion des RC-Betons geplant. Nach Rücksprache mit Vertretern von Recyclingunternehmen wurde von dieser ursprünglichen Zielstellung abgewichen und der Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnungen auf den Liefertypen 1 beschränkt. Diese Entscheidung wird wie folgt begründet:

Für die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen vom Liefertyp 2 (mit 30 M.-% Ziegel) ist die separate Aufbereitung von Betonbruch und Ziegelbruch sowie die anschließende gezielte Dosierung beider Fraktionen notwendig. Aktuell erfolgt beim Recycler die Anlieferung von Ziegelbruch nicht sortenrein sondern als Bestandteil der Abfallart Bauschutt, bei der es sich um ein Gemisch aus Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik handelt. Eine gleichbleibende stoffliche Zusammensetzung der produzierten rezyklierten Gesteinskörnung des Liefertypen 2 kann daher nicht gewährleistet werden.

Der Einsatz von RC-GK zur Herstellung von Beton erfordert außerdem die Einhaltung der Vorgaben der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton“ (kurz Alkali-Richtlinie), Schlussfassung Juni 2013.

Hintergrund

Bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) reagiert das aus der reaktiven Gesteinskörnung gelöste amorphe u./o. schlecht kristallisierte SiO₂ unter Feuchteeinwirkung mit den Alkalihydroxiden (NaOH, KOH) der Porenlösung des erhärteten Betons bzw. mit denen, die von außen eindringen. Die zum Ablauf der Reaktion benötigten Alkalien können zum einen aus dem Zement, den Beton-

zusatzstoffen, den Betonzusatzmitteln und der Gesteinskörnung stammen, zum anderen auch von außen aus dem Meerwasser oder Tausalzen in den Beton eingetragen werden. Als Reaktionsprodukt entsteht ein Alkalisilikat-Gel [47]. Bei einer weiteren Wasseraufnahme quellen diese Gele stark auf und verursachen Treiberscheinungen im Beton, welche zu Abplatzungen und Rissbildungen führen. Im schlimmsten Fall kommt es zur Zerstörung von ganzen Bauteilen [48]. Diese chemische Reaktion bzw. deren Ausmaß hängt insbesondere von folgenden Faktoren ab:

- den Eigenschaften der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung (Art, Menge, Korngröße und Verteilung),
- dem Gehalt an Alkalihydroxid in der Porenlösung (hoher pH-Wert) und
- den Feuchtigkeits- und Temperaturbedingungen des erhärteten Betons [49].

Eine schädigende AKR kann verhindert werden, wenn mindestens ein Faktor von den drei genannten ausgeschaltet wird und daraus alle weiteren Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR getroffen werden.

Die Maßnahmen zur Vermeidung einer AKR sind in o.a. Richtlinie des DAfStb festgelegt. Ausgangspunkt bildet die Prüfung der Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität. Rezyklierte Gesteinskörnungen größer 2 mm sind gemäß Anhang B Alkali-Richtlinie zu prüfen und in eine der beiden Alkaliempfindlichkeitsklassen einzustufen (vgl. Bild 23):

- E I-S: Gesteinskörnungen, für die keine vorbeugenden Maßnahmen erforderlich sind,
- E III-S: Gesteinskörnungen, für die ggf. vorbeugende Maßnahmen erforderlich sind.

Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit des Betons ist die verwendete Gesteinskörnung entweder mittels dem Schnellprüfverfahren und/oder dem Betonversuch zu untersuchen. Da die AKR stark vom Feuchtigkeitsangebot abhängt, sind Betonbauteile gemäß DIN 1045-2 in Abhängigkeit der zu erwartenden Umwelteinflüsse definierten Feuchtigkeitsklassen (WO, WF, WA, WS) zuzuordnen.

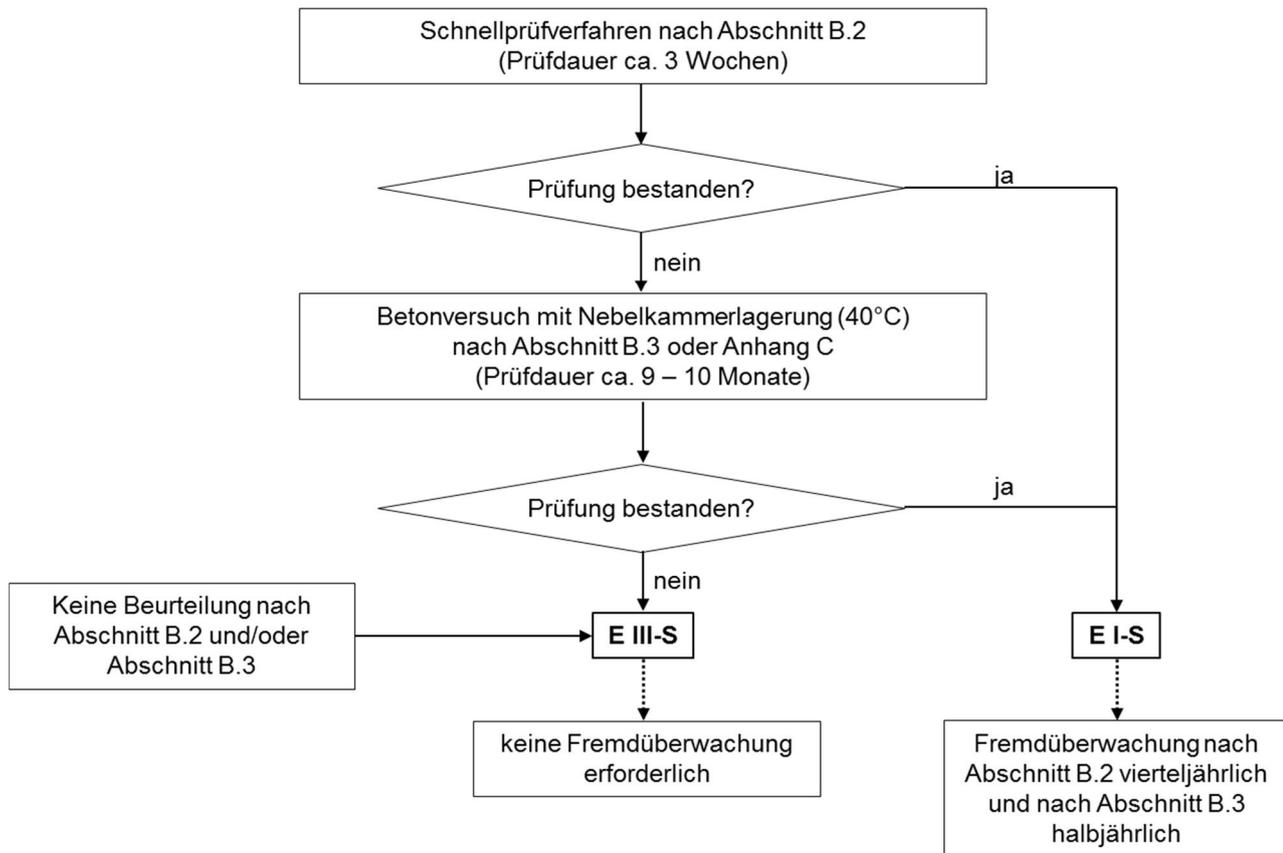


Bild 23. Prüfschema gemäß DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton“, Schlussentwurf 03. Juni 2013, S. 34, ergänzt um Angaben zur Fremdüberwachung¹

Wird eine rezyklierte Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S im Beton eingesetzt, müssen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse und dem Zementgehalt gegebenenfalls vorbeugende Maßnahmen getroffen werden. Einen Überblick erforderlicher Maßnahmen liefert die folgende *Tabelle 6*.

¹ Beim Schnellprüfverfahren sind drei Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm herzustellen, an denen zur Beurteilung möglicher Treiberscheinungen durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion Dehnungsmessungen durchgeführt werden. Nach der Nullmessung werden die Probekörper für 13 Tage in etwa 80°C heißer Natriumhydroxidlösung gelagert und weitere Dehnungsmessungen am 1., 4. o. 5., 8. o. 9. und 13. Tag durchgeführt. Gemäß Alkali-Richtlinie, Tabelle 3 muss für eine Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S die Dehnung der Mörtelprismen nach 13 Tagen unter 1,00 mm/m liegen. Für den Betonversuch mit 40°C Nebelkammerlagerung sind Prismen mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 500 mm für die Dehnungsmessung sowie ein Würfel mit den Kantenlängen 300 mm für die Beobachtung möglicher Rissbildungen herzustellen. Die Dehnungs- und Rissbreitenmessungen erfolgen unmittelbar vor dem Einbringen in die Nebelkammer (sog. Nullmessung), im Alter von 2, 7 und 28 Tagen sowie nach jeweils weiteren 28 Tagen bis zum Alter von 252 Tagen (36 Wochen). Die letzte Messung ist nach 270 Tagen (spätestens nach 273 Tagen) durchzuführen. Gemäß Alkali-Richtlinie, Tabelle 3 muss für eine Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S die Dehnung der Mörtelprismen nach 270 Tagen Nebelkammerlagerung unter 0,6 mm/m und die Rissbreiten im Würfel unter 0,2 mm liegen. Werden die Grenzwerte nicht eingehalten, erfolgt die Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S.

Tabelle 6: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliereaktion im Beton [Auszug aus Alkali- Richtlinie Tab. 6, S. 22]

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt kg/m ³	Erforderliche Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO (trocken)	WF (feucht)	WA (feucht + Alkalizufuhr von außen)
E III-S	≤ 300	keine	keine	keine
	≤ 350	keine		NA-Zement oder gutachterliche Stellungnahme ^a
	> 350	keine	NA-Zement oder gutachterliche Stellungnahme ^a	Austausch der Gesteinskörnung oder gutachterliche Stellungnahme ^a

^a Für die Erstellung einer gutachterlichen Stellungnahme sind besonders fachkundige Personen einzuschalten.

Die für die Errichtung des RC-Moduls benötigten Betonbauteile können der Feuchtigkeitsklasse WF (feucht) zugeordnet werden, da es sich um Außenteile handelt und mit einer Alkalizufuhr von außen nicht zu rechnen ist. Bei der Entwicklung der Betonrezepturen wurde aus wirtschaftlichen Gründen ein maximaler Zementgehalt von 330 kg/m³ angesetzt. Gemäß Tabelle 8 müssen bei Einhaltung der Feuchtigkeitsklasse WF, einem Zementgehalt unter 350 kg/m³ und einer in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S eingestuftten Gesteinskörnung keine vorbeugenden Maßnahmen getroffen werden.

Aus diesen angeführten Gründen wurde auf die Überprüfung der Alkaliempfindlichkeit mittels Schnellprüfverfahren verzichtet und die rezyklierte Gesteinskörnung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S eingestuft.

Von der Firma Mattig & Lindner verwendete natürliche Gesteinskörnungen sind zum Teil auch als alkaliempfindlich eingestuft, daher werden vorbeugend NA-Zemente für die Herstellung der Betonfertigteile eingesetzt.

In der nachfolgenden *Tabelle 7* sind die an den RC-GK zu prüfenden Parameter zusammengefasst.

Tabelle 7: Zu prüfende Parameter an RC-GK für den Einsatz im Beton [50]

Parameter	Kategorie der Gesteinskörnung	
	Typ 1	Typ 2
Stoffliche Zusammensetzung	siehe Tabelle 2	
Korngrößenverteilung	G _c 85/20	G _c 80/20
Gehalt an Feinanteilen [M.-%]	≤ 4	
Kornrohddichte [kg/m ³]	≥ 2000	
Wasseraufnahme (nach 10 min) [M.-%]	≤ 10	≤ 15
Kornformkennzahl	≤ SI ₅₅ oder FI ₅₀	
Wasserlösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,15	
Säurelösliches Chlorid [M.-%]	≤ 0,04	
Wasserlösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,2	
Säurelösliches Sulfat [M.-%]	≤ 0,8	
Gehalt an Gesamtschwefel [M.-%]	≤ 1	
Gehalt an organischen Bestandteilen	max. gelbe Färbung	
Alkaliempfindlichkeitsklasse	siehe Abbildung 2	

4.4.2 Untersuchungsergebnisse

In Absprache mit dem Laborleiter des Betonfertigteileproduzenten und dem Recyclingunternehmer Heim Deponie & Recycling GmbH in Berlin wurden im Rahmen des Projektes die folgenden rezyklierten Gesteinskörnungen für die Entwicklung der RC-Betonrezeptur verwendet:

- 0/16 mm Betonbruch und
- 8/16 mm Betonbruch mit CE-Kennzeichen nach DIN EN 12620.

Da der Betonbruch der Körnung 8/16 mm bereits einer Qualitätskontrolle unterliegt und mit dem CE-Kennzeichen versehen ist, wurde auf weitere Untersuchungen verzichtet. Für die rezyklierten Gesteinskörnungen der Korngröße 0/16 mm liegen seitens des Herstellers keine Prüfprotokolle vor. Die bautechnischen und bauphysikalischen Eigenschaften wurden in den Laboren der BTU Cottbus – Senftenberg an mehreren Chargen (zeitlich versetzt) untersucht, um zu kontrollieren, ob die rezyklierte Gesteinskörnung gleichbleibende Eigenschaften aufweist oder Unregelmäßigkeiten auftreten. Die Haufwerksbeprobung (vgl. Bild 24) erfolgte in ca. 3-monatigen Abständen.



Bild 24. Probenahme vom Haufwerk 0/16 mm Betonbruch auf dem Betriebsgelände der Firma Heim Deponie & Recycling GmbH

Insbesondere wurden die folgenden Parameter mehrfach geprüft, da die Werte für die Berechnung der Betonrezeptur benötigt wurden:

- Kornzusammensetzung / Kornverteilung gemäß DIN EN 933-1:2012-03,
- Gehalt an Feinanteilen gemäß DIN EN 933-1:2012-03,
- Kornrohichte gemäß DIN EN 1097-6:2005-12,
- Wasseraufnahme nach 10 Minuten gemäß Anhang B der DAfStB – Richtlinie Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen.

Die folgenden Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen, die direkten Einfluss auf die Qualität des Betons nehmen (können) wurden ebenfalls geprüft:

- organische Stoffe, die das Erstarrungsverhalten von Beton verändern,
- Kornform gemäß DIN EN 933-4:2015-01,
- Zementsteingehalt in Anlehnung an DIN 52170:1980-02, Teil 1 – 4.

Wesentliche Ergebnisse sind in der *Tabelle 8*, Bild 25 und Bild 26 zusammengefasst:

Tabelle 8: Untersuchungsergebnisse zur Überprüfung der Eigenschaften von Betonbruch 0/16 mm, Proben I - III

Parameter	Einheit / Kategorie	0/16 mm		
		Probe I	Probe II	Probe III
Gehalt an Feinanteilen	M.-%	1,3	3,8	3,4
Kornform	SI	15	15	15
Kornrohddichte	g/cm ³	2,63	2,55	2,42
Organische Bestandteile		nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Wasseraufnahme nach 10 Minuten	M.-%	6,4	13	11,09
wasserlösliche Chloride	M.-%	< 0,01	nicht bestimmt	nicht bestimmt
säurelösliche Chloride	M.-%	< 0,01	nicht bestimmt	nicht bestimmt
wasserlösliche Sulfate	M.-%	< 0,01	nicht bestimmt	nicht bestimmt
säurelösliche Sulfate	M.-%	0,63	nicht bestimmt	nicht bestimmt

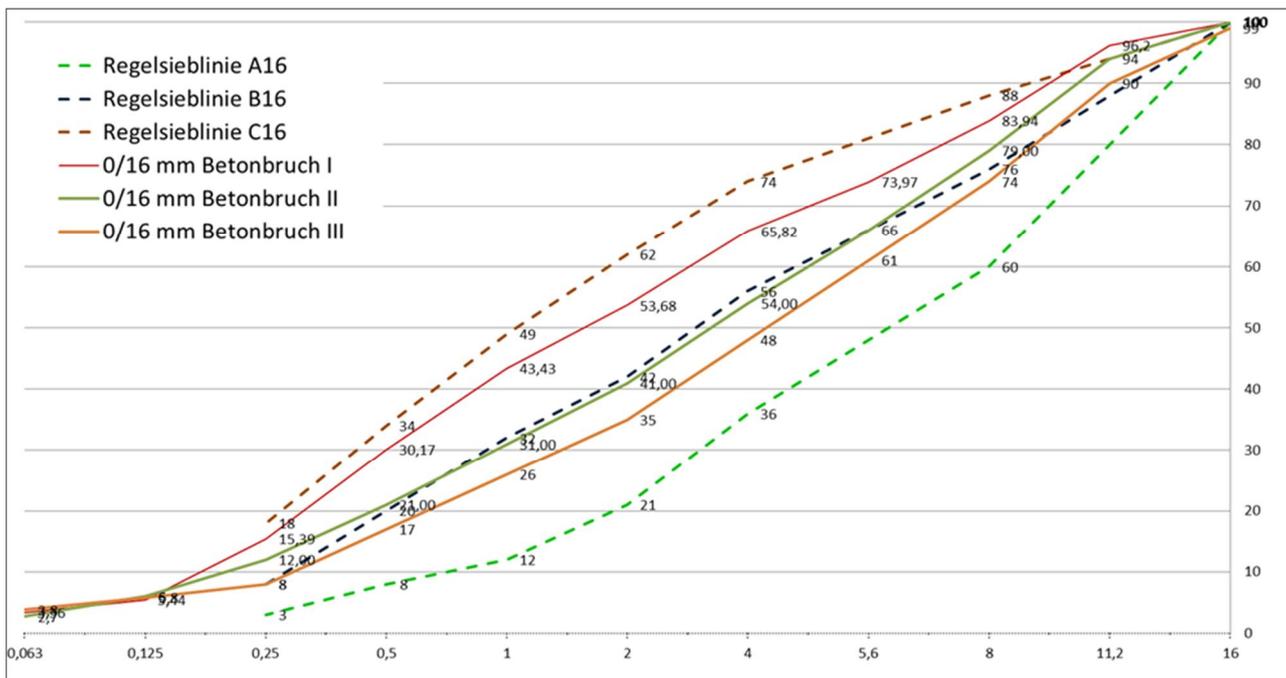


Bild 25. Grafische Darstellung der Kornverteilung des Betonbruch 0/16 mm Probe I - III und der Regelsieblinien

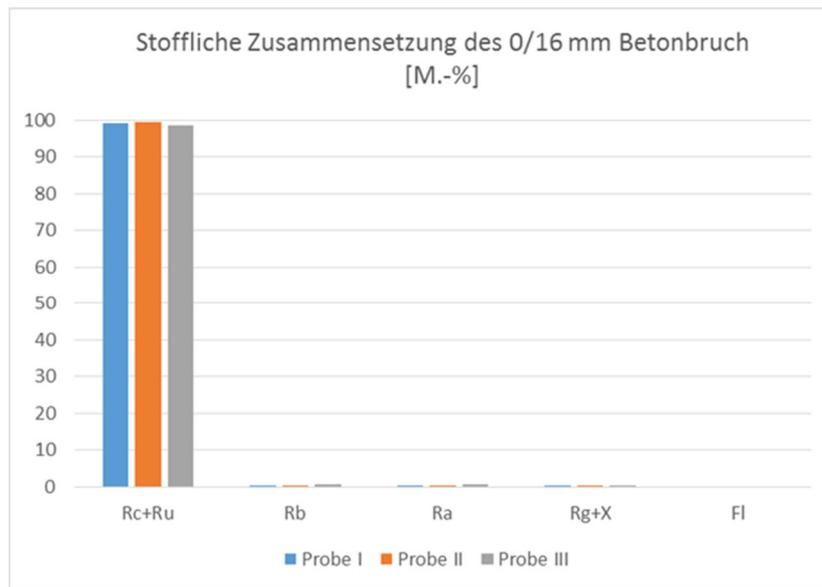


Bild 26. Grafische Darstellung der stofflichen Zusammensetzung des Betonbruch 0/16 mm, Proben I – III

Auswertung:

Gemäß DAfStb-Richtlinie ist bei dem Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton die Korngröße < 2 mm ausgenommen, weil der beim Brechen entstehende Sand in der Regel sehr viele Feinstanteile, die überwiegend aus Zementstein des Altbetons bestehen, enthält. Bei der Untersuchung des Zementstein- bzw. Bindemittelgehaltes der rezyklierten Gesteinskörnung 0/16 mm wurde ein Zementstein- bzw. Bindemittelgehalt von 14,7 Ma.-% ermittelt.

Im Rahmen des Projektes soll dieser Anteil jedoch ebenfalls zum Einsatz kommen, indem das Körnungsgemisch 0/16 mm für die Herstellung des RC-Betons verwendet wird. Die Regelanforderungen gemäß Anhang U, Tabelle U.1 der DIN 1045-2:2008-02 an Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 für den Einsatz in Beton werden von dem 0/16 mm Betonbruch, mit Ausnahme der Überschreitung des zulässigen Feinanteils, vollumfänglich erfüllt.

Sowohl die Korngröße als auch die Kornform nehmen direkten Einfluss auf den Zementleimbedarf. Umso kleiner die Einzelkörner einer Gesteinskörnung sind, umso größer ist deren Gesamtoberfläche und demzufolge auch der Zementleimbedarf zur Umhüllung aller Einzelkörner. Bei einem Gesteinskörnungsgemisch mit möglichst großen Körnern wird wiederum viel Zementleim für die Verfüllung der vorhandenen Hohlräume benötigt. Aus diesen Gründen ist eine optimale Kornverteilung der Gesteinskörnung wichtig. Aufgrund des zu hohen Feinanteils der rezyklierten Gesteinskörnung und dem damit verbundenen erhöhten Bedarf an Zement wurde die Sieblinie der rezyklierten Gesteinskörnung optimiert, indem anteilig natürliche Gesteinskörnungen (Kiese) der Korngrößen 2/8 mm und 8/16 mm hinzugefügt wurden.

Gemäß DAfStB – Richtlinie „Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen“, Tabelle 4 darf für den Liefertypen 1 die Wasseraufnahme nach 10 Minuten 10 M.-% nicht übersteigen. Bezüglich der Wasseraufnahme liegen sehr unterschiedliche Ergebnisse in dem Bereich 6,9 – 13 M.-% bei den untersuchten Proben I – III vor. Dies kann zum einen an den unterschiedlichen Proben und zum anderen an den durchführenden Personen liegen. Besonders problematisch erwies sich die Bestimmung der Wasseraufnahme an der Korngröße 0 – 2 mm gemäß Anhang F der DIN EN 1097-6:2013 „Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme“. Die schwer bestimmbare Was-

seraufnahmekapazität der Fraktion < 2 mm führte ursprünglich auch zu deren Ausschluss vom Einsatz zur Herstellung von Beton.

Bei der Erstellung der Betonrezepturen wurde aus diesem Grund zum eigentlichen Wasserbedarf pauschal zusätzliches Wasser in Höhe von 8 M.-% bezogen auf das Gewicht der enthaltenen rezyklierten Gesteinskörnung hinzugerechnet.

4.4.3 Anforderungen an den Beton zur Herstellung der Betonsteine

Der Beton wird gemäß DIN EN 206:2017-01 „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“ produziert. Diese Norm gilt für Beton, der für Ortbetonbauwerke, vorgefertigte Betonbauwerke sowie für Fertigteile für Gebäude und Ingenieurbauwerke verwendet wird[38].

Für den Beton der Wandbetonsteine wird eine Einstufung in die Expositionsklasse XC4 (Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Karbonatisierung – Außenbauteile mit direkter Beregnung, wechselnd nass und trocken) [39], XF1 (mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel – Außenbauteile), woraus sich eine empfohlene Druckfestigkeit von C25/30 ergibt.

Damit ist der Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß Anhang E.3, Tabelle E.2 der DIN EN 206

- für Typ A auf einen Massenanteil von 30 % bezogen auf die Gesamtmenge der Gesteinskörnungen und
- für Typ B auf einen Massenanteil von 0 % bezogen auf die Gesamtmenge der Gesteinskörnungen begrenzt (vgl. *Tabelle 9*).

Neben der DIN EN 206 gelten auf nationaler Ebene die

- DIN 1045-2:2008-08 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1“ und
- DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010.

Die zulässigen Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der Expositionsklasse gemäß DAfStb-Richtlinie weichen von den Vorgaben der DIN EN 206 ab (vgl. *Tabelle 10*).

Tabelle 9: Höchstwerte für den Austausch grober Gesteinskörnung (Massenanteil in Prozent) gemäß DIN EN 206 [38]

Typ der rezyklierten Gesteinskörnung	Expositionsklassen			
	X0	XC1, XC2	XC3, XC4, XF1, XA1, XD1	alle anderen Expositionsklassen ^a
Typ A: RC ₉₀ , RCU ₉₅ , Rb ₁₀ , Ra ₁ , FL ₂ , XRG ₁ .	50 %	30 %	30 %	0 %
Typ B ^b : RC ₅₀ , RCU ₇₀ , Rb ₃₀ , Ra ₅ , FL ₂ , XRG ₂ .	50 %	20 %	0 %	0 %

^a Der Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen vom Typ A mit bekannter Herkunft darf bei Expositionsklassen, für die der ursprüngliche Beton entworfen worden war, bis zu 30 % der Gesamtmenge der Gesteinskörnung betragen.

^b Rezyklierte Gesteinskörnungen vom Typ B sollten nicht in Beton mit einer Druckfestigkeitsklasse >C30/37 verwendet werden.

Tabelle 10: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%) gemäß DAfStb-Richtlinie

Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
Alkali-Rili (Betonkorrosion infolge AKR)	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 Expositionsklassen	Gesteinskörnungstyp 1: Rcu ₉₅ , Rb ₁₀ , Ra ₁ , FL ₂ , XRg ₁ .	Gesteinskörnungstyp 2: Rcu ₇₀ , Rb ₃₀ , Ra ₁ , FL ₂ , XRg ₂ .
WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	≤ 45 Vol.-%	≤ 35 Vol.-%
	kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4		
WF ¹⁾ (feucht)	Frost ohne Taumittleinwirkung XF1 ¹⁾ und XF3 ¹⁾ und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%
	chemischer Widerstand (XA1)	≤ 25 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%
¹⁾ zusätzliche Anforderungen s. Abschnitt 1, (3) und (4) DAfStb-Rili hinsichtlich Nachweis einer unbedenklichen Alkaliempfindlichkeitsklasse			

Da die DIN EN 206 bisher noch nicht bauaufsichtlich eingeführt wurde [38] und in der aktuell angewendeten DIN EN 206-1 keine Regeln für den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen im Beton enthalten sind [39], werden die Vorgaben der DAfStb-Rili (vgl. *Tabelle 10*) berücksichtigt.

Bei der erstmaligen Herstellung von RC-Beton sind vor dessen Verwendung vom Betonproduzenten die entsprechenden Rezepturen - nach o.a. Vorgaben der DAfStb-Richtlinie und DIN EN 206-1 sowie DIN 1045-2 - zu entwickeln und zu prüfen. Die Zusammensetzung des Betons bzw. Eignung des RC-Betons ist anhand einer erweiterten Erstprüfung nach Abschnitt 4 der o.a. DAfStb-Rili nachzuweisen. Im Rahmen der Erstprüfung nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 ist zu belegen, in welcher Zusammensetzung der frische und erhärtete Beton die vorgegebenen Anforderungen mit einem ausreichendem Vorhaltemaß erfüllt. Erweiterte Erstprüfung bedeutet, dass neben den Standarduntersuchungen (Überprüfung der Temperatur des Frischbetons (i.d.R. 15 bis 22°C), der Konsistenz zum voraussichtlichen Zeitpunkt des Betoneinbaus oder der Betonübergabe und der Druckfestigkeit an mind. 3 Probekörpern aus jeweils 3 Chargen) zusätzlich der Feuchtegehalt der RC-GK zu bestimmen und bei der Festlegung der Mischungsanteile zu berücksichtigen ist. Außerdem ist die Konsistenz des Frischbetons in Abhängigkeit der Zeit nach 10, 45 und 90 Minuten festzustellen.

Bei der Herstellung von Betonfertigteilen spielt die Konsistenz des Frischbetons in Abhängigkeit von der Zeit lediglich eine untergeordnete Rolle, da im Fertigteilwerk zwischen dem Mischvorgang und der Verarbeitung des Frischbetons in der Regel nur eine sehr geringe Zeitspanne (wenige Minuten) liegt. Die Entwicklung der Konsistenz wurde dennoch bestimmt und dokumentiert.

Im Rahmen der Produktionskontrolle des Betonherstellers sind zusätzlich zur DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 nachstehend aufgeführte Prüfungen durchzuführen:

- Sichtprüfung der stofflichen Zusammensetzung der RC-GK (Liefertyp 1 oder 2) in jedem Lieferfahrzeug,
- Ermittlung der Kornrohddichte (ofentrocken) nach DIN EN 1097-6 in jeder Produktionswoche,
- Ermittlung der Wasseraufnahme der RC-GK nach 10 Minuten in jeder Produktionswoche,
- Ermittlung des Wassergehalts der rezyklierten Gesteinskörnung bei Änderung der Feuchtebedingungen,
- Ermittlung des Luftgehalts am Frischbeton und der Frischbetonrohddichte im Rahmen des Festigkeitsnachweises für den Beton [40].

Der Recyclingbeton muss im Lieferverzeichnis des Betonherstellers als solcher ausgewiesen werden und den Zusatz „*Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN EN 12620: keine Verwendung für Spannbeton*“ tragen. Auf Anfrage sind die verwendeten Anteile an RC-GK anzugeben [41].

4.4.4 Entwicklung der Betonrezeptur – durchgeführte Untersuchungen

Vor der Entwicklung der Betonrezepturen wurden, in Absprache zwischen TU DD und BTU C-S, die Anforderungen an den Recyclingbeton festgelegt. Folgende Vereinbarungen wurden getroffen:

- Druckfestigkeitsklasse C30/37,
- Expositionsklasse XF1 (mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel – Außenbauteile) und XA1 (chemisch schwach angreifende Umgebung – Grundwasser oder natürlicher Boden),
- Konsistenzklasse F3,
- Größtkorn 16 mm,

woraus sich Folgendes ergibt:

- maximaler w/z-Wert 0,6,
- Mindestzementgehalt 270 kg/m³,
- höchstmögliche Substitution der natürlichen Gesteinskörnung liegt gemäß Regelwerk bei 25 M.-%.

Wie bereits in Kapitel 1.7 erläutert, sollen die rezyklierten Gesteinskörnungen des Liefertypen 1

- a) in den zulässigen Anteilen nach DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 [14] und DIN 1045-2 [15] mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 [9]“ und
- b) darüber hinausgehend im Beton bis zu 100 % eingesetzt und getestet werden.

Begonnen wurde die Rezepturentwicklung nach Variante b). Die bisher erzielten Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Entwickelt wurden 3 Betonrezepturen (vgl. *Tabelle 4*) mit jeweils unterschiedlichen Anteilen rezyklierter Gesteinskörnung, Wasser, Zement und Fließmittel.

Tabelle 11: Übersicht zur Zusammensetzung der entwickelten Betonrezepturen

Materialien	Einheit	Rezeptur 1	Rezeptur 2	Rezeptur 3
Betonrecycling 0/16 mm	kg	864	1210	747
Betonrecycling 8/16 mm	kg	363	0	0
Sand 0/2 mm	kg	328	200	331
Kiessand 2/8 mm	kg	173	0	172,4
Kiessand 8/16 mm	kg	0	280	362
CEM I R-(ft)	kg	300	330	330
Frischwasser	kg	165	180	195
Zusatzwasser	kg	67	97	0
Fließmittel	kg	2,1	0	2,31
Steinkohlenflugasche	kg	80	80	80

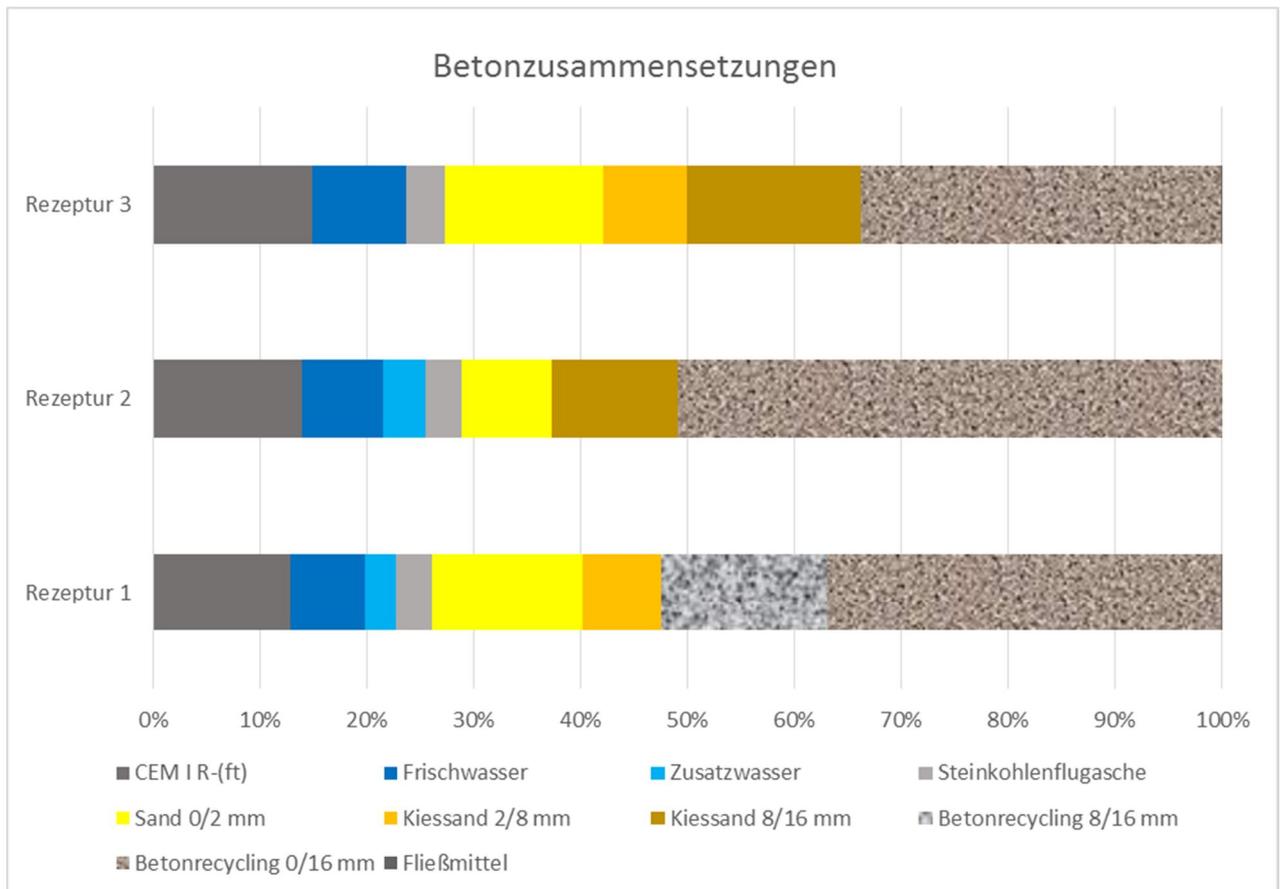


Bild 27. grafische Darstellung der Betonzusammensetzungen

Folgende Parameter wurden bestimmt:

- Ausbreitmaß nach 10, 40 und 90 Minuten,
- Frischbetonrohddichte,
- Festbetonrohddichte und
- Druckfestigkeit nach 2, 4 und 7 Tagen (jeweils an einem Probekörper) sowie nach 28 Tagen (jeweils an drei Probekörpern).

Die zeitliche Entwicklung der Ausbreitmaße der hergestellten Betone ist im Bild 28 grafisch dargestellt. Deutlich wird, dass nach etwa 30 Minuten alle drei Betone nicht mehr der Konsistenzklasse F3 entsprechen, was auf das Wassersaugen der rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen ist. Dass die Rezeptur 2 bereits direkt nach dem Mischvorgang (etwa 10 Minuten) eine höhere Steifigkeit aufweist, als angestrebt wurde, liegt eindeutig an dem Verzicht auf Fließmittel. Die Zugabe des zusätzlichen Saugwassers konnte das fehlende Fließmittel lediglich in den ersten Minuten nach dem Mischvorgang ausgleichen und führte letztendlich zu einer geringeren Druckfestigkeit. Dass das Ausbreitmaß der Betonrezeptur 1 größer ist als bei Betonrezeptur 2 basiert auf dem geringeren Anteil des 0/16 mm Betonrecyclings, welches ausschlaggebend für das Wassersaugen ist und dadurch direkten Einfluss auf die Konsistenz des Frischbetons nimmt.

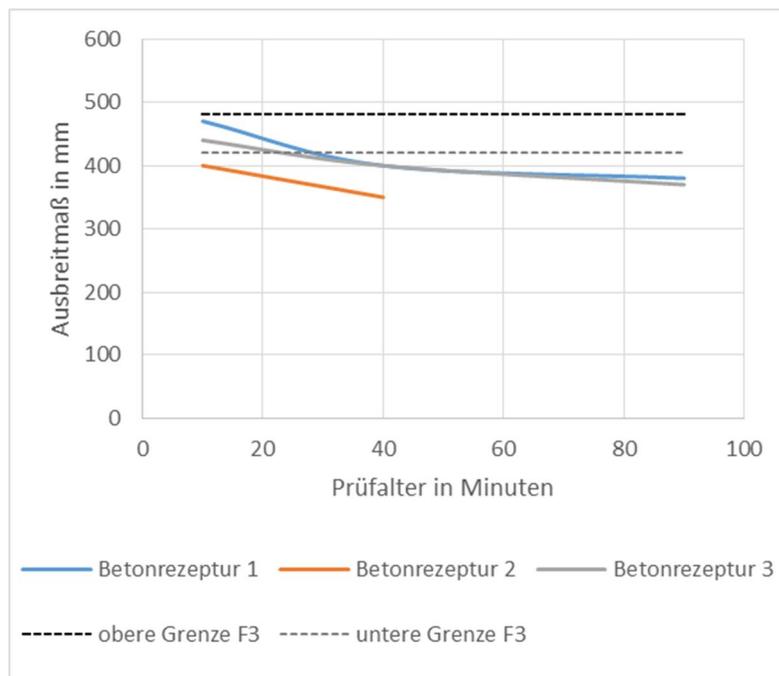


Bild 28. Ausbreitmaße inkl. Darstellung der oberen und unteren Grenze der Konsistenzklasse F3

Die Frischbetonrohddichte nimmt mit steigendem Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen ab, was daran liegt, dass die Rohddichte der RC-Materialien bei ca. 2,2 Mg/m³ und die Rohddichte von natürlichen Gesteinskörnungen bei ca. 2,6 – 2,7 Mg/m³ liegt. Die ermittelten Frisch- und Festbetonrohddichten sind in der Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Frisch- und Festbetonrohddichten der Betone

Rezeptur- nummer	Frischbetonrohddichte in kg/m ³	Festbetonrohddichte in kg/m ³
1	2240	2233
2	2221	2220
3	2316	2308

Die Druckfestigkeiten wurden nach 2, 4 und 7 Tagen an jeweils einem Probekörper und nach 28 Tagen an drei Probekörpern geprüft. Die Ergebnisse sind im Bild 29 grafisch dargestellt. Die angestrebte Druckfestigkeitsklasse C30/37 inklusive Vorhaltemaß in Höhe von 6 bis 12 N/mm² (im Rahmen der Erstprüfung) wird ausschließlich von der bereits optimierten Betonrezeptur 3 erfüllt. Die anderen beiden Betone erfüllen mit großer Sicherheit die Anforderungen der Druckfestigkeitsklasse C20/25. An dieser Stelle kann noch diskutiert werden, ob für die Wandbauteile auch diese Druckfestigkeitsklasse ausreichend ist, so dass im Rahmen des Projektes zwei Betone entwickelt und produziert werden.

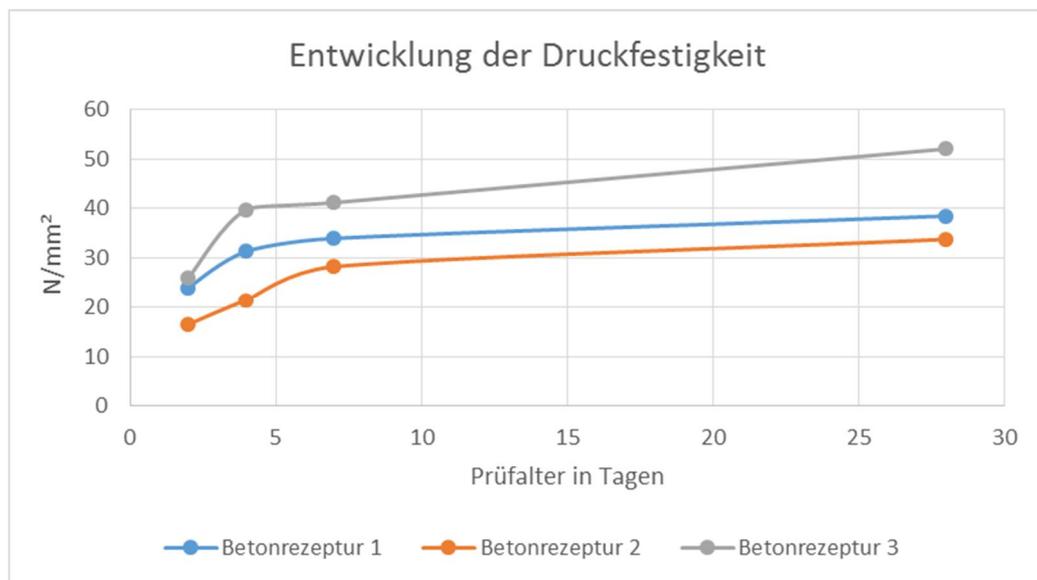


Bild 29. Entwicklung der Druckfestigkeiten der Betone

5 Rahmenbedingungen, Festlegungen und Planung der RC-Wohneinheit

5.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens war die Planung sowie Errichtung eines Demonstrators als etwa 20 m² großes Anschauungsobjekt für „zwei Bewohner“ vorgesehen. Um den Bau der Wohneinheit beherrschbar zu machen, sollten beim Entwurf folgende Räumlichkeiten in Betracht kommen:

- Ein Zimmer zum Wohnen und Schlafen,
- Küche,
- Bad und
- Windfang.

Materialseitiger Ausgangspunkt waren für die Tragkonstruktion RC-Betonelemente in Größenordnung von Mauerelementen, welche modular in Trockenbauweise mit einer dazu passenden Vorspanntechnik aufgebaut werden. Im Verlauf des Projektes wurde entschieden, auch großformatige Tafeln als Wandkonstruktion einzusetzen.

Für die Abbildung der Decke sowie Fundamentplatte waren RC-Deckenelemente vorgesehen worden.

Beim Ausbau ist ein Vorhangfassadensystem ausgewählt worden, welches aus einer demontierbaren Fassadenverkleidung besteht und über eine Dämmschicht mit einer ausreichenden Wärmedämmung verfügt.

Die Anfertigung der technischen Gebäudeausrüstung ist aus Zeitmangel bzw. Kostengründen nicht zu realisieren gewesen. Die zugehörigen Elemente wurden allerdings bei der Planung in passenden Kanälen vorgesehen.

Die Ausbildung der modularen Nasszelle wurde nur theoretisch entwickelt und aufgrund der überdurchschnittlichen Kosten nicht als Bestandteil des Demonstrators realisiert.

5.2 Vorschläge zum Entwurf der RC-Wohneinheit

5.2.1 Pläne und Räumlichkeiten

Beim Entwurf der RC-Wohneinheit wurden die vorgenannten Randbedingungen berücksichtigt.

Die festgelegte, für zwei Personen ausreichende Grundrissfläche (20 m²) wurde in einem Entwurf mit den Abmessungen von LxBxH= 5x4x3 m gewährleistet (siehe Bild 30). Einen Längsschnitt im Rohbau stellt das Bild 31 dar. Der vorgeschlagene Entwurf des RC-Wohneinheitsmoduls verfügt über die folgenden Räumlichkeiten (*Tabelle 13*):

Tabelle 13: vorhandene Räumlichkeiten im RC-Wohneinheitsmodul

Raum	Fläche [m ²]
Zimmer (Wohnen/Schlafen)	12
Küche und Windfang	5
Bad	3

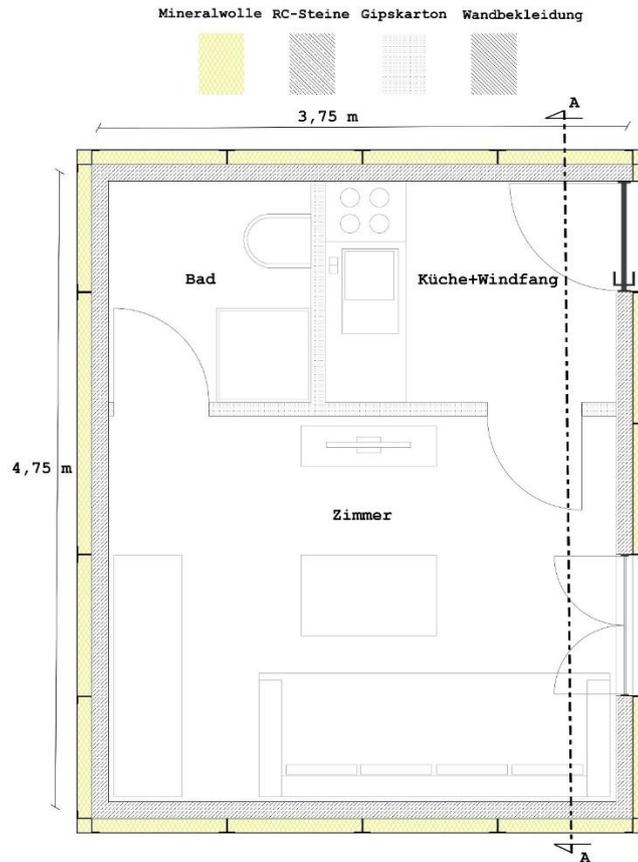


Bild 30. Grundriss der RC-Wohneinheit

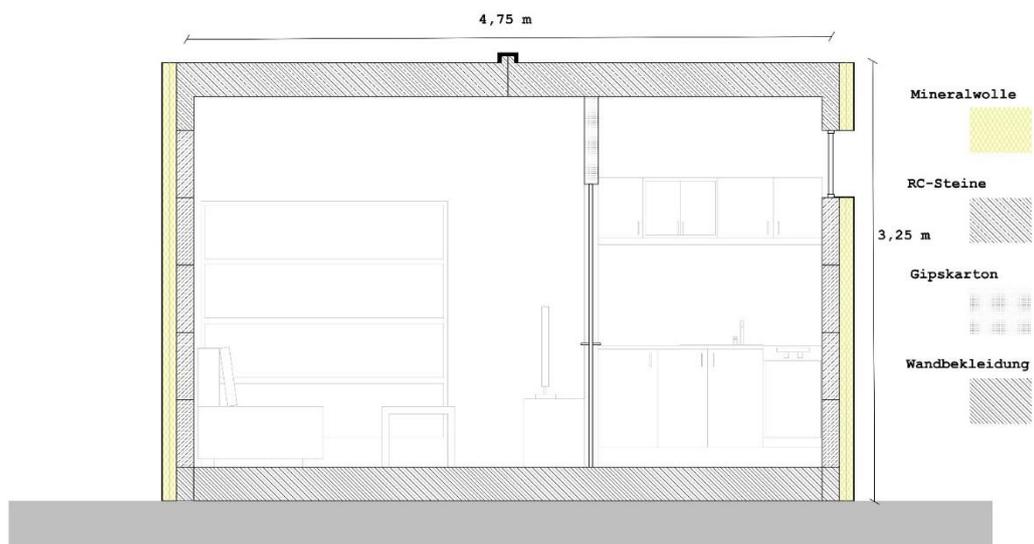


Bild 31. Längsschnitt der RC-Wohneinheit

5.2.2 Zu verwendende Einzelbauelemente (Allgemein)

Zur Errichtung der Wohneinheit waren folgende Einzelbauelemente für den Einsatz näher untersucht worden (siehe Bild 32 und Bild 33):

- 1- Modularer RC-Betonstein (LxBxH: 500 x 175 x 500 mm) in Lego-Stein-Prinzip und mit einem Nut-Federsystem zur Abbildung der Wohneinheitswände. Der RC-Betonstein verfügt über durchgehende Löcher (\varnothing 25 mm) zur späteren Montage der Spanntechnik.
- 2- Modulare Stahlbetonwandplatten aus RC-Beton (LxBxH: 2350 x 175 x 2780 2 x sowie 4500 x 175 x 2780) Die zwei Einzelplatten sind mit Fasen an der Stoßfuge ausgebildet worden, die dann übereinander greifen (s. S. 270 ff.)
- 3- Modulares RC-Bodenplattenelement (LxBxH: 500 x 250 x 500 mm) mit einer Sonderfertigung zum Verhindern eindringender Feuchtigkeit und vorgesehenen Löchern für die Spanntechnik zur Zusammenstellung der Bodenplatte aus den einzelnen Elementen.
- 4- RC-Stahlbetonplatte (Ohne Unterzüge LxBxH: 2500 x 2000 x 200/250 mm oder mit Unterzügen (LxBxH: 2500x2000x500 mm). Die Stahlbetonplatte könnte in verschiedenen Ausführungen, als Stahlbetondecke mit RC-Hohlkörpern zur Überdeckung von großen Spannweiten, als RC-Spannbetonplatte oder als herkömmliche Vollplatte gebaut werden (Bild 34).
- 5- RC-Fundamentbalken bzw. RC-Ringanker (LxBxH: 4000/5000 x 175 x 250 mm) mit Lego-Prinzip zur Anpassung an den oberliegenden RC-Betonstein
- 6- Demontierbares Fassadensystem, welches aus einer Tragkonstruktion (Metallprofile), einer ausreichenden Dämmung aus Mineralwolle-Dämmplatten (150 mm) und Aluminium-Fassadenplatten (3 mm) besteht.
- 7- Spanntechnik aus zugelassenen Spanngliedern in Form eines kompletten Vorspannsystems oder eine einfache Ausführung mit Gewindestangen und den dazugehörigen Hülsen. Diese Technik ist sowohl in den Wohneinheitswänden als auch für die Bodenplatten vorgesehen.
- 8- Verbundtechnik zwischen verschiedenen Einzelbauteilen: Hierbei werden Verbundelemente zur Zusammenführung der verschiedenen Einzelbauteile der Wohneinheit mit entsprechenden Toleranzen verwendet. Beispielsweise könnten Schlaufen oder Spannschlösser zum Einsatz kommen. Diese sind insbesondere in den folgenden Verbindungen zu finden: Fundamentbalken/ Fundamentbalken, Ringanker/Ringanker, Ringanker/RC-Stahlbetonplatte und RC-Stahlbetonplatte/ RC-Stahlbetonplatte.

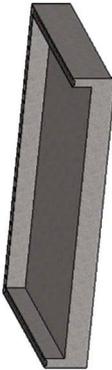
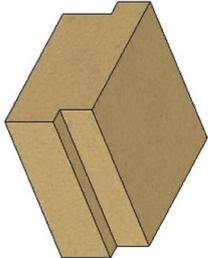
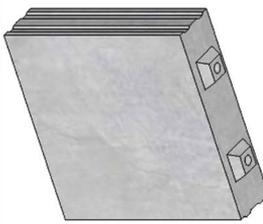
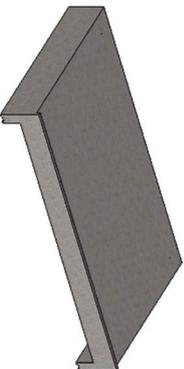
4-Fundamentbalken Mit Lego-Prinzip 4000/5000x 175 x 250 mm)	3-RC-Stahlbetonplatte Mit oder Ohne Unterzügen (2500 x 2000 x 500 mm)	2-RC-Bodenplatte Federsystem (500 x 500 x 250 mm)	1-RC-Betonstein (500 x 500 x 175 mm) Legostein-Prinzip Nut-Federsystem
			
			
			

Bild 32. Verwendete RC-Bauelemente aus der Anfangsphase der Planung

Die Wandplatten sind zu einem späteren Zeitpunkt entschieden worden.

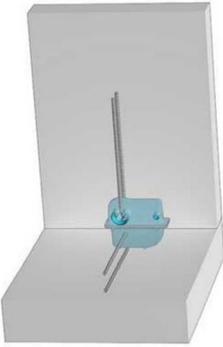
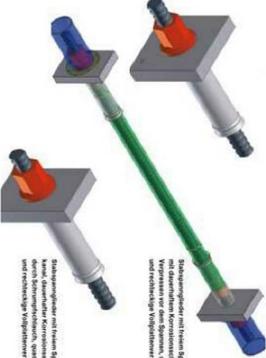
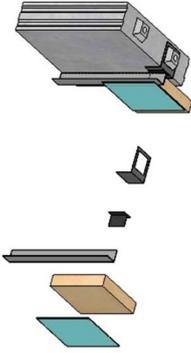
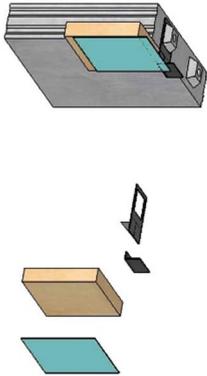
7-Verbindungstechnik - Schlaufen - Spannschloss	6-Vorspannsystem -DYWIDAG Spanglieder mit freiem Spannkanal -Gewindestange mit Hülsen	5- Fassadensystem -Demontierbar- mCon Dämmung Mineralwolle Aluminium Fassadenplatte
	 <p style="font-size: small;"> Spanglieder mit freiem Spannkanal und demontierbarem Kernschlauch, der die Spanglieder in den und reibschlüssig festhalten kann. </p> <p style="font-size: small;"> Spanglieder mit freiem Spannkanal, Kern, demontierbare Kernschlauch und reibschlüssig festhalten können. </p>	
		
		

Bild 33. Verwendete Spann- und Verbindtechnik

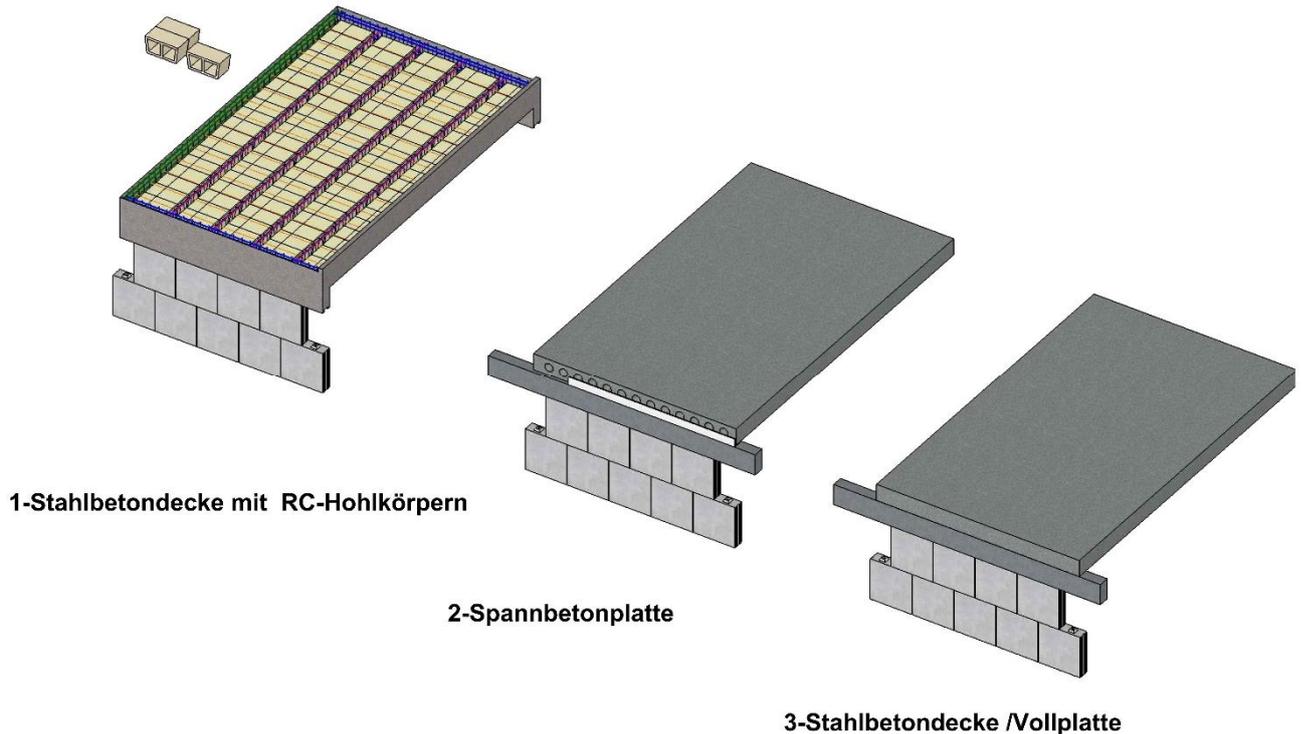


Bild 34. Vorschläge für Deckensysteme der RC-Wohneinheit

5.2.3 Bauphasen des RC-WE-Moduls

Das Errichten der RC-Wohneinheit erfolgte auf dem Werksgelände der FA. Mattig und Lindner in Forst, weil dort die notwendige Hebeteknik und Werkstattkapazität zur Verfügung stand. Folgende Bauphasen (siehe Bild 35 bis Bild 50) wurden dabei durchlaufen:

- 1- Erdarbeiten und Vorbereitungen: Die RC-Wohneinheit wurde auf dem betonierten Boden des Versuchsgeländes aufgebaut. Daher wurden die Bauphasen auf Bodenplanung/Tragschicht herstellen und Verlegung der Feuchteschutzfolien unter der Bodenplatte beschränkt.
- 2- Zusammenstellung des Rohbaus: Hierbei wurden alle im Abschnitt 5.2.2 beschriebenen Tragelemente aufgestellt und mit der vorgesehenen Verbund- und Spanntechnik verbunden.
- 3- Aus- und Innenausbau (Fertigstellung): In dieser Bauphase sollten die Ausbuarbeiten (Fassadensystem mit Dämmung) und der Innenausbau (Zementplatten [fermacell] und Nasszelle im Bad zusätzlich zu allen inneren Einrichtungen) durchgeführt und die RC-Wohneinheit fertiggestellt werden. Diese Phase konnte aus Zeit- und Kostengründen nicht mehr ausgeführt werden.

Da das Modul weiter nach Projektende zur Verfügung steht, kann die Phase 3 noch nachgesetzt werden.

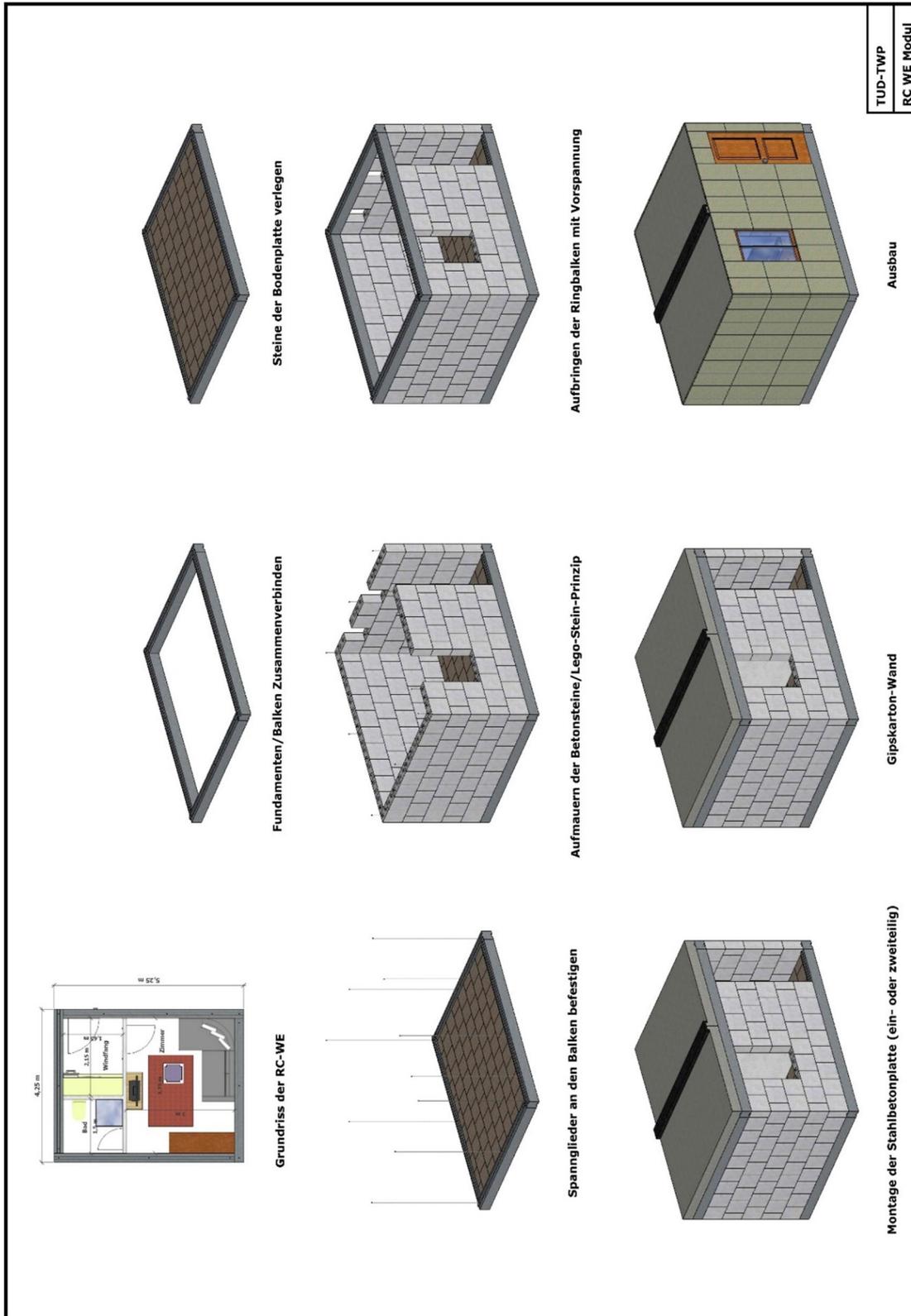


Bild 35. Bauphasen-Variante 1 – Wände komplett aus Planelementen

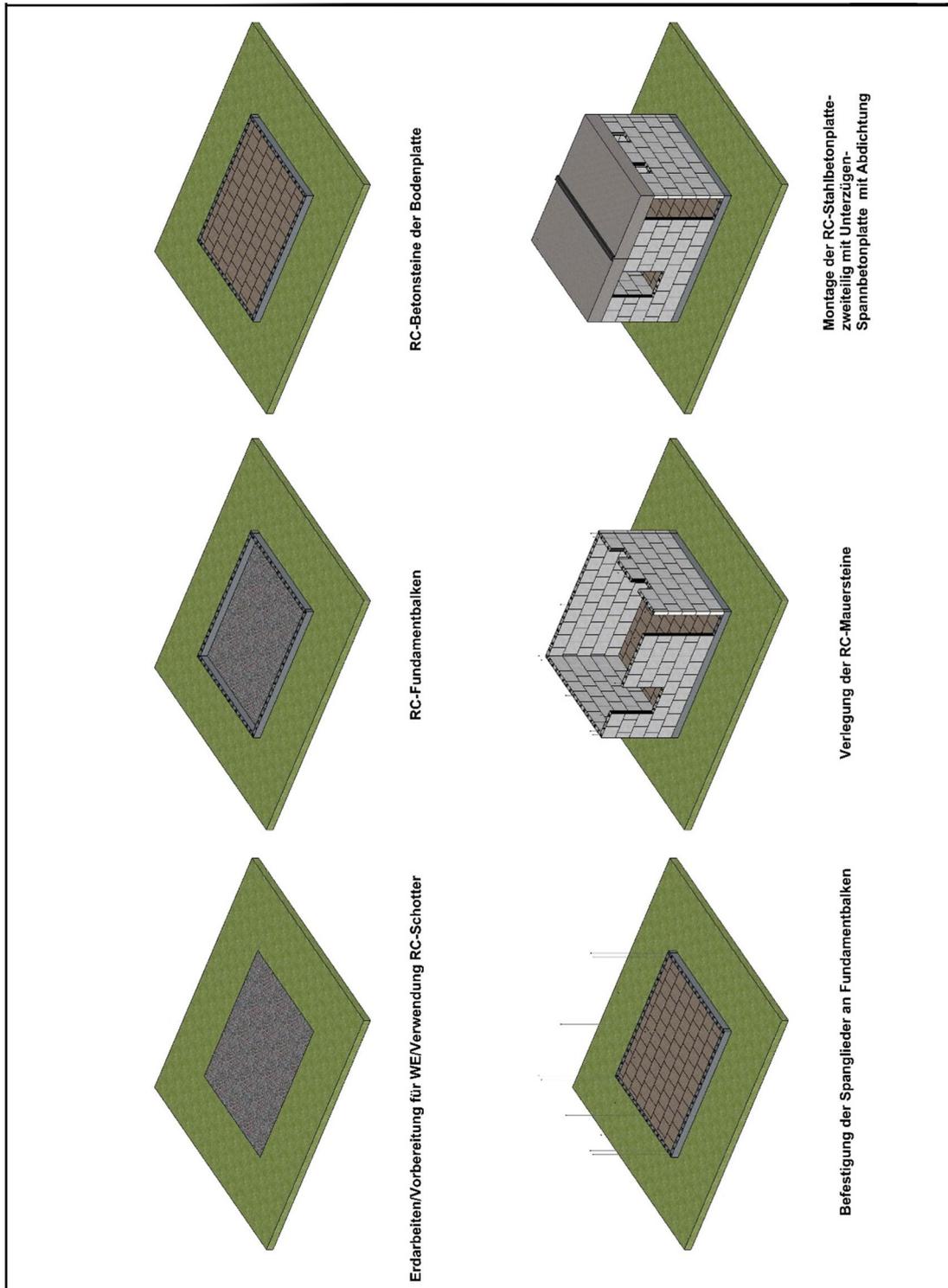


Bild 36. Bauphasen-Variante 2

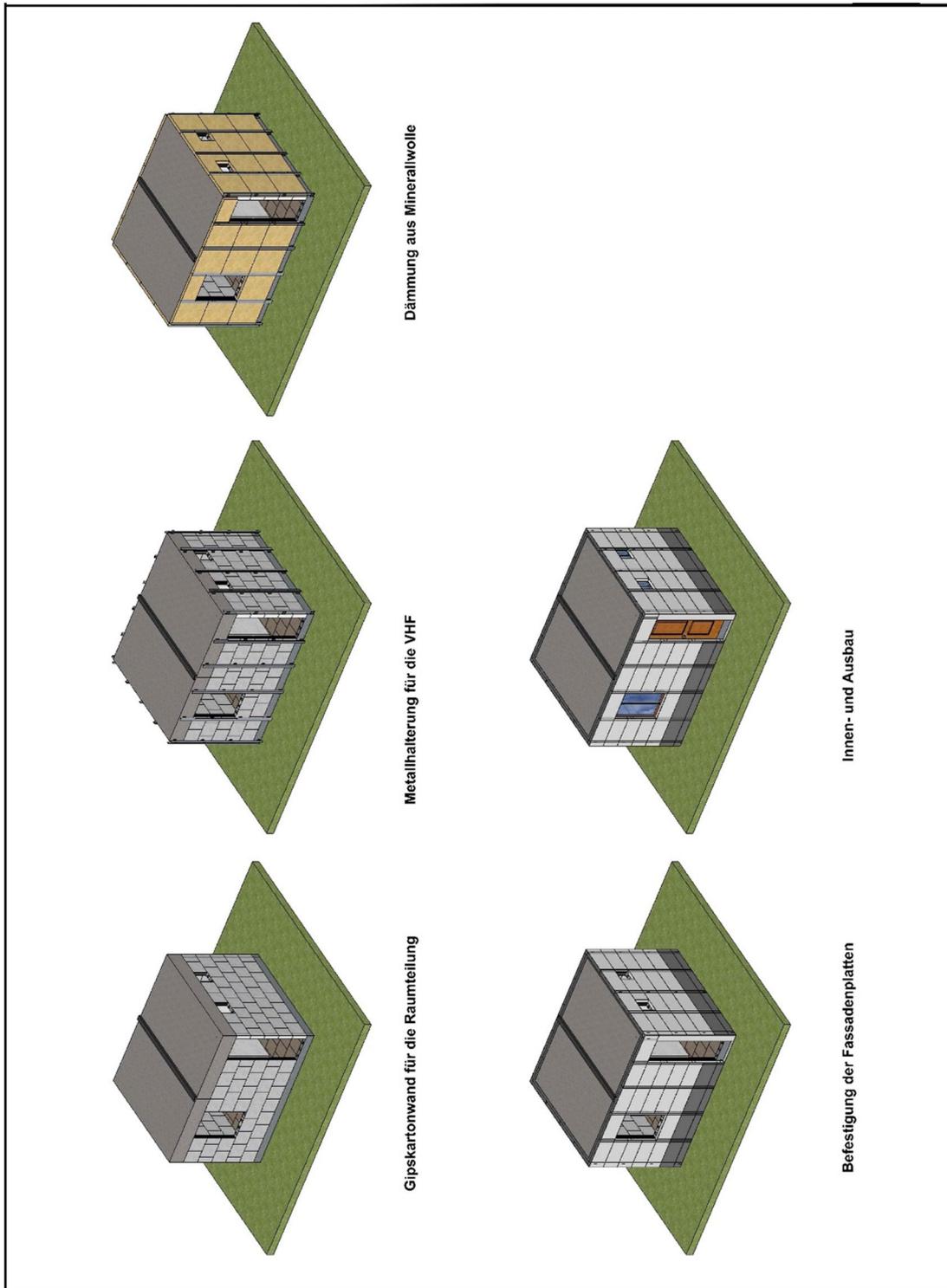


Bild 37. Bauphasen-Variante 2

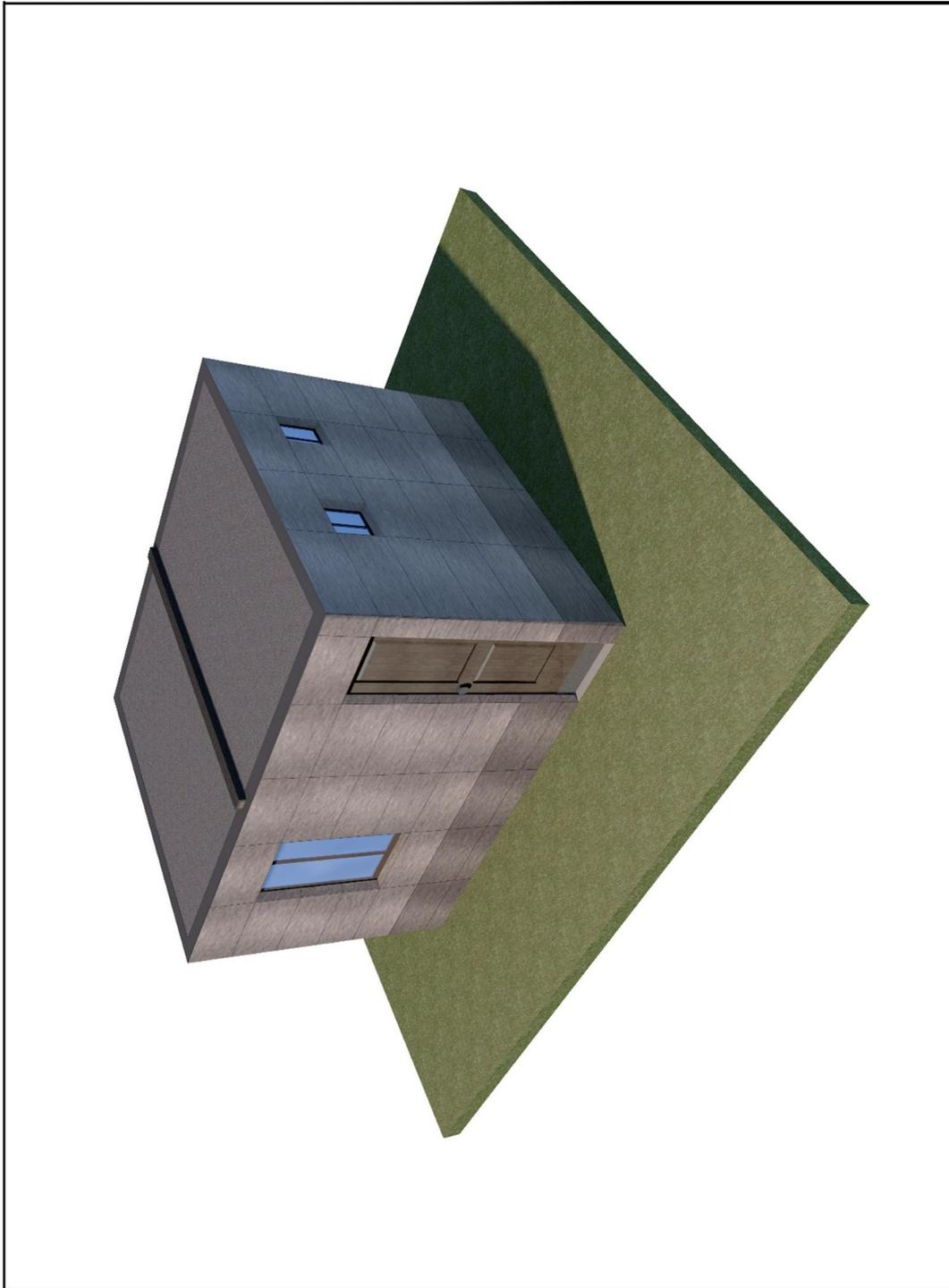


Bild 38. Bauphasen-Fertigstellung der RC-Wohneinheit

5.2.4 Ansichten / Rohbau/Ausbau- Entwurfsvorschlag 1

Für den Entwurfsvorschlag 1 sind die Ansichten des Rohbaus bzw. Pläne des vorgeschlagenen demontierbaren Ausbaues des fertiggestellten Moduls in den folgenden Abbildungen (Bild 39 bis Bild 50) dargestellt.

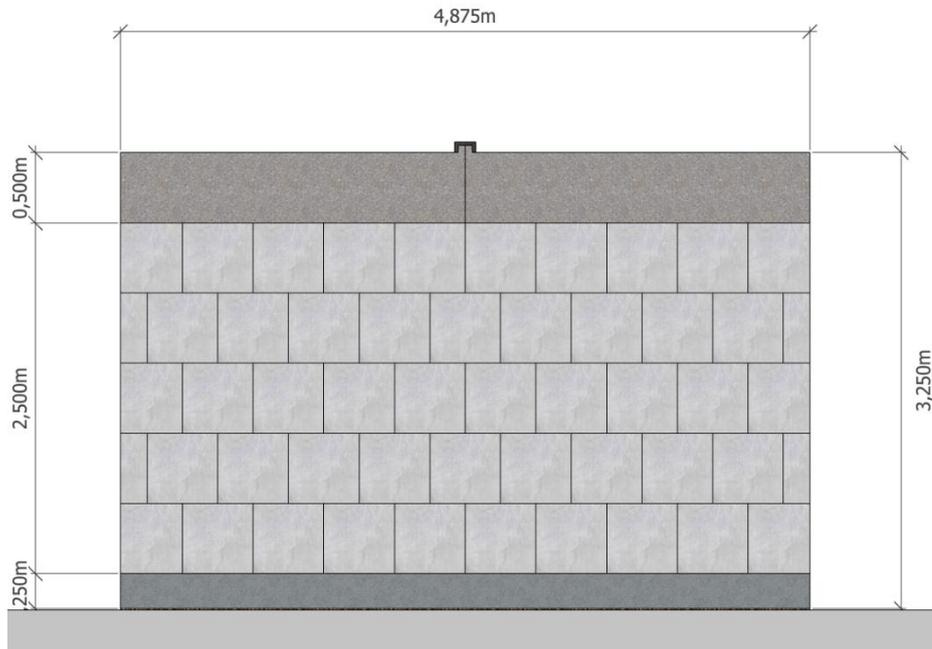


Bild 39. Ansicht Nord-Rohbau

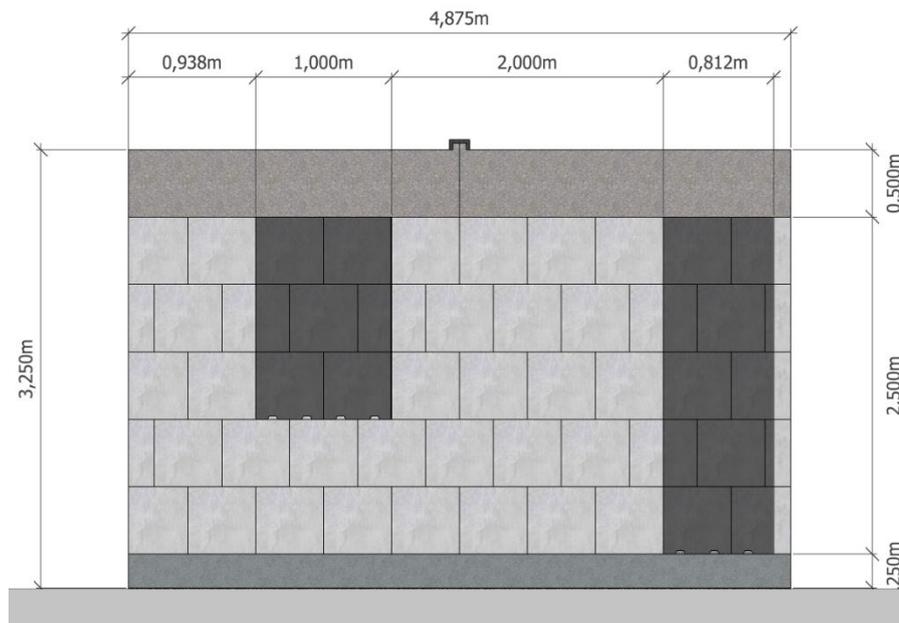


Bild 40. Ansicht Süd-Rohbau

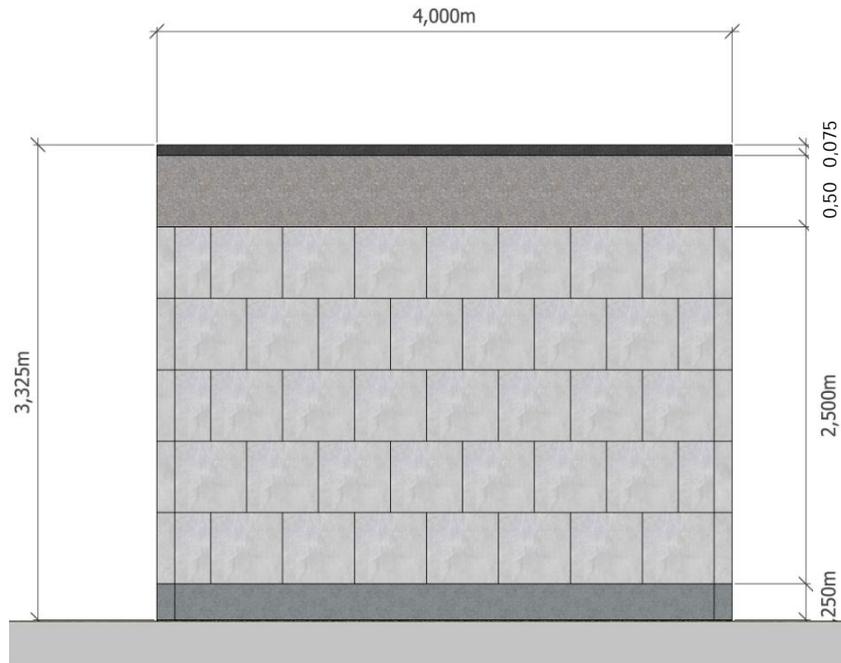


Bild 41. Ansicht Ost- Rohbau

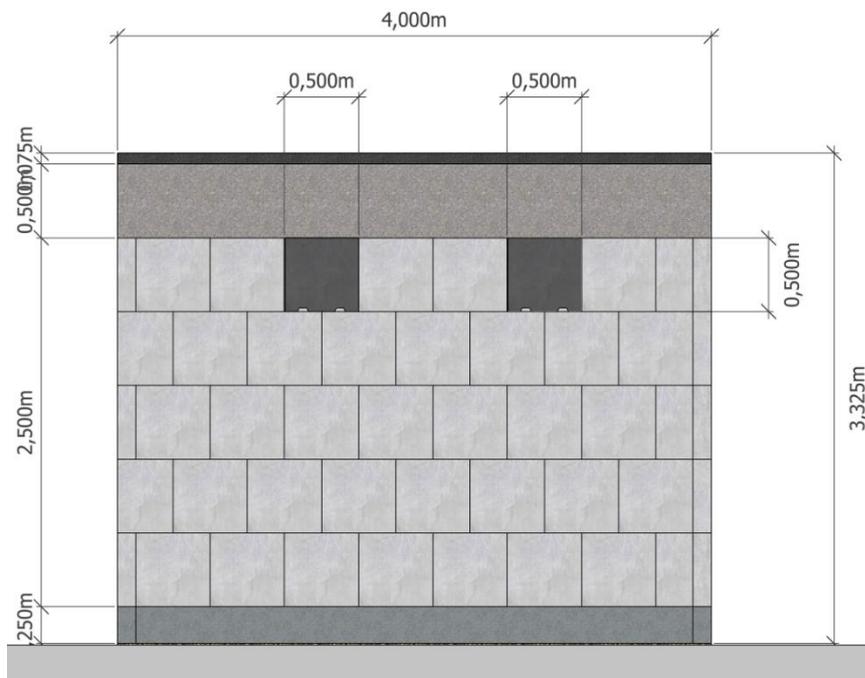


Bild 42. Ansicht West- Rohbau

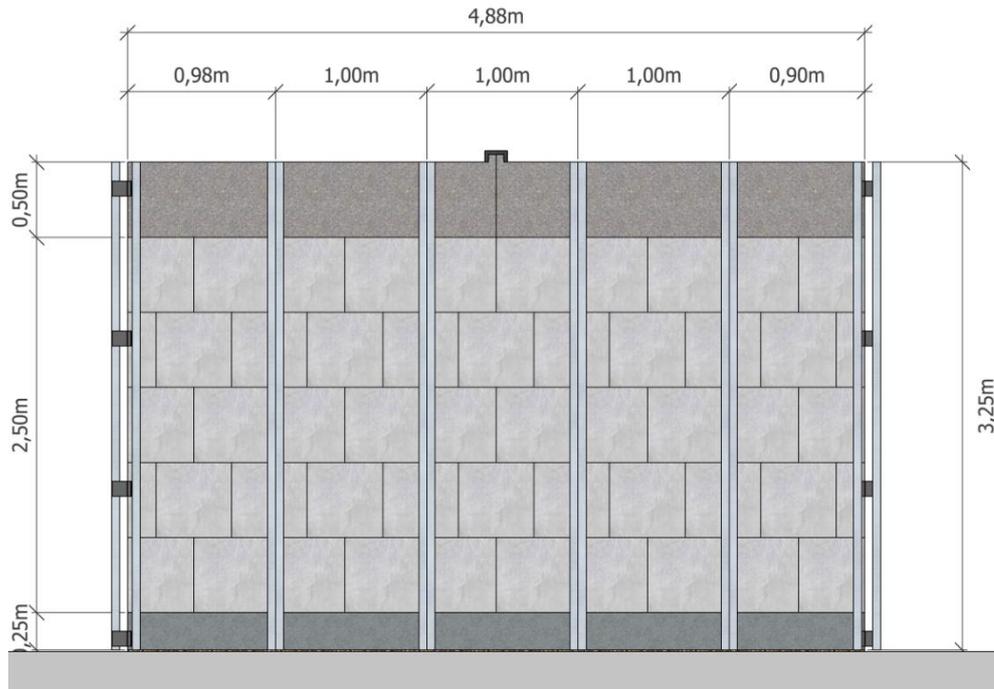


Bild 43. Ansicht Nord-Ausbau-Fassadenkonstruktion

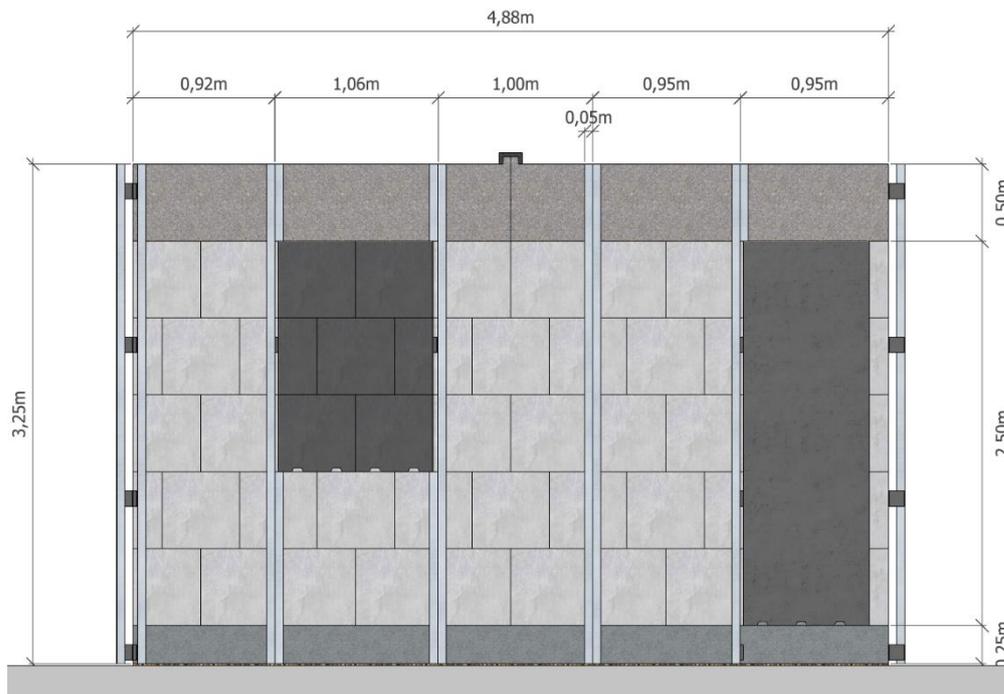


Bild 44. Ansicht Süd-Ausbau-Fassadenkonstruktion



Bild 45. Ansicht West-Ausbau-Fassadenkonstruktion

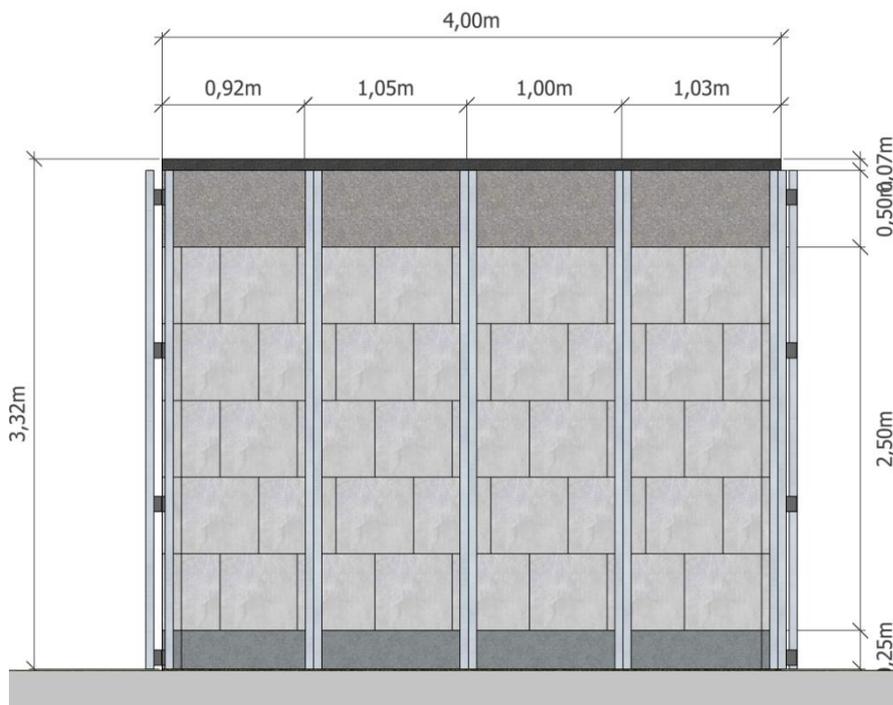


Bild 46. Ansicht Ost-Ausbau-Fassadenkonstruktion



Bild 47. Ansicht Nord- Anfertigung

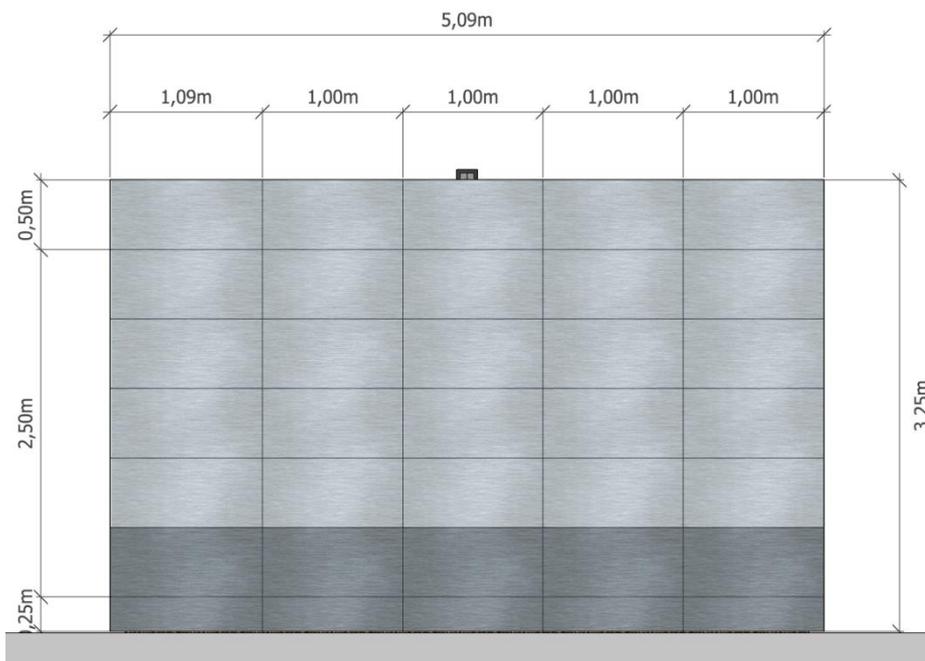


Bild 48. Ansicht Süd- Anfertigung

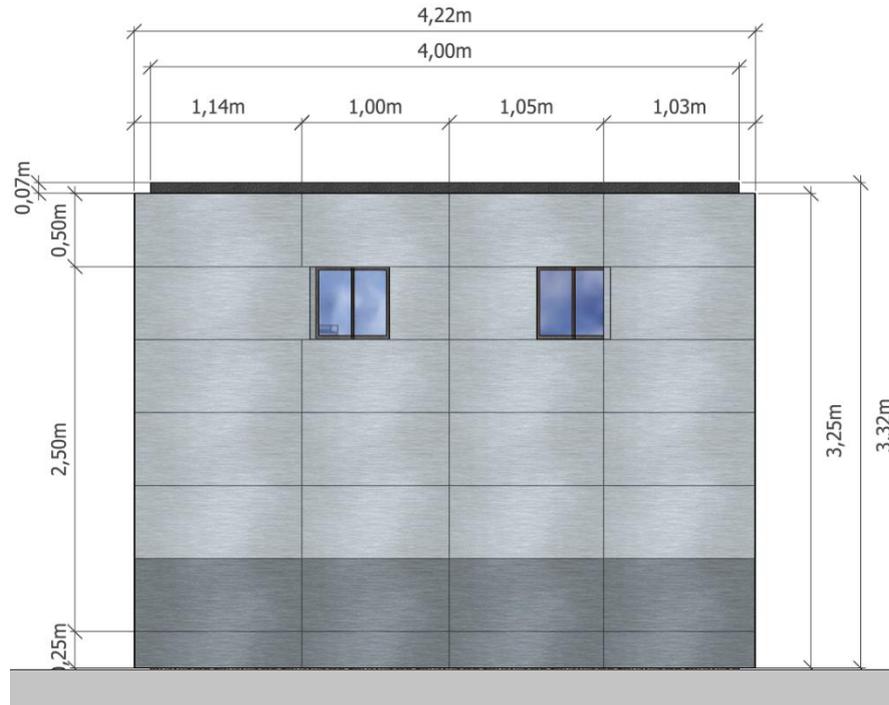


Bild 49. Ansicht Ost- Anfertigung

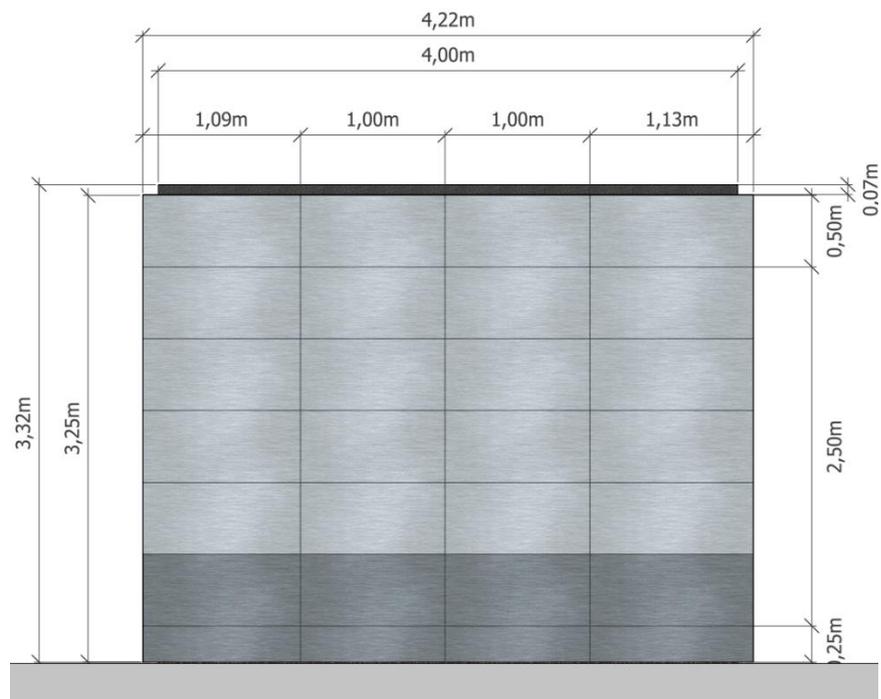


Bild 50. Ansicht Ost- Anfertigung

5.3 Entwurfsmöglichkeiten zur Erstellung der RC-Wohneinheit

Bei der Vorplanung der demontierbaren RC-Wohneinheit können Vorschläge für die verschiedenen massiven Bauarten bzw. Bauprinzipien ausgewählt werden. Zu diesem Zweck werden die Bestandteile der RC-Wohneinheit nachfolgend in verschiedenen, vereinfachten Ausführungen vorgeschlagen, um die Erstellung der Wohneinheit mit den üblichen Baumethoden zu ermöglichen bzw. der Modifizierung des kleinen RC-Moduls in größere Bauobjekte bautechnisch durchführbar zu machen. In diesem Zusammenhang werden Erstentwürfe zur Erstellung der RC-Wohneinheit in drei Bauweisen vorgestellt:

- 1- RC-Wohneinheit in Plattenbauweise
- 2- RC-Wohneinheit zusammengesetzt aus Bauteilelementen
- 3- RC-Wohneinheit in Mauerwerksbauweise

5.3.1 RC-Wohneinheit in Plattenbauweise

Die Erstellung der demontierbaren RC-Wohneinheit in Plattenbauweise ermöglicht eine schnelle Montage (inklusive aller Fenster- und Türöffnungen) im Vergleich zu den anderen Bauarten. Hierbei werden die RC-Wände, RC-Bodenplatte und RC-Betondecke als komplette, statisch tragende RC-Bauteile gefertigt und mittels einer passenden handhabbaren Verbindungstechnik miteinander verschraubt (Bild 51). Mit diesem Bauprinzip werden folgende Vorteile erreicht:

- optimale Wärmedämmung
- hohe Schalldämmung
- hoher Brandschutz
- schnelle Montage der RC-Bauteile
- volle Winddichtigkeit
- minimaler Personaleinsatz
- hohe Festigkeit (Anwendung von dünnen Bauteilen ist möglich)

Als Hauptnachteile dieser Bauart sind der Transport der großen Bauteile sowie die erforderliche, hohe Genauigkeit an den Verbindungsstellen zwischen den Bauelementen zu erwähnen. Hierbei ist die Flexibilität des Bauteiltransports aufgrund der großen Abmessungen deutlich beschränkt.

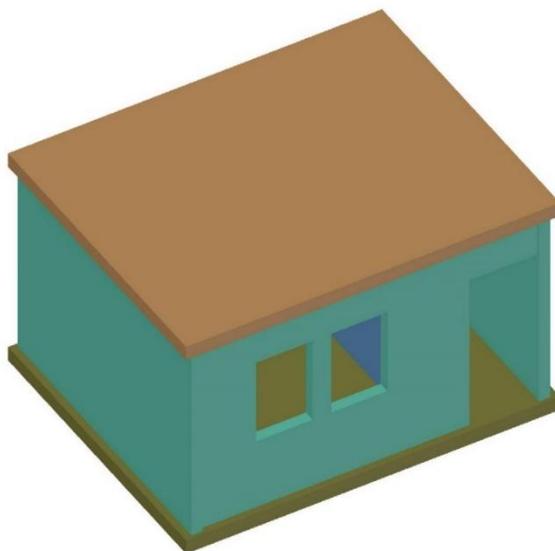


Bild 51. RC-Wohneinheit in Plattenbauweise

Die Modifizierung der RC-Wohneinheit in größere Bauobjekte (beispielweise zweigeschossige, mehrfache Wohneinheiten) lässt sich nach dieser Bauart bautechnisch einfacher bzw. schneller umsetzen (Bild 52). Aufgrund der schweren stabilen Bauteile ist keine große Aussteifung des RC-Bauobjektes erforderlich.

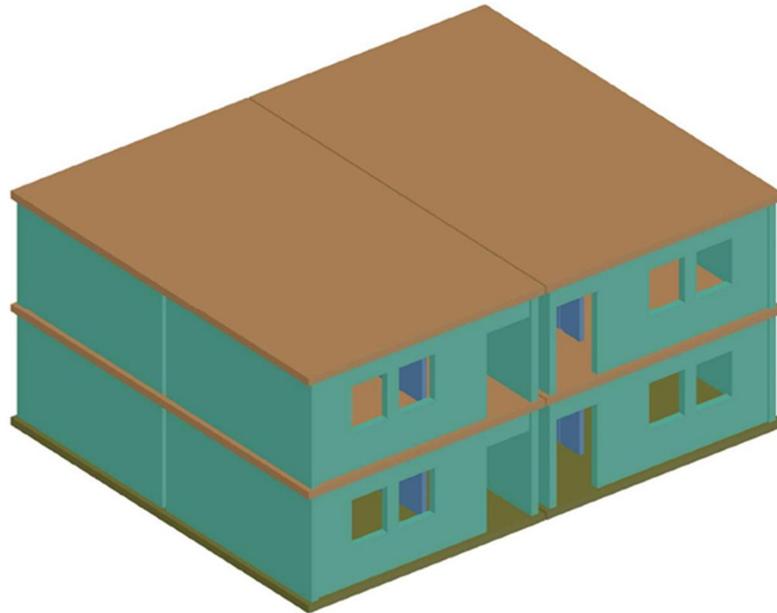


Bild 52. Modifizierte RC-Wohneinheit in Plattenbauweise

5.3.2 RC-Wohneinheit zusammengebaut aus Bauteilelementen

Mit diesem Bauprinzip lässt sich die RC-Wohneinheit schnell errichten. Die relativ kleinen Bauelemente (Bodenplatten-, Decken- und Wandelemente) ermöglichen mehr Flexibilität im Entwurf (Grundriss) im Vergleich zur Plattenbauweise. Zur Gewährleistung der Stabilität der RC-Wohneinheit besonders bei Errichtung von mehrgeschossigen Wohneinheiten in dieser Bauweise sind hier deutlich größere Aussteifung und mehr Verbindungsstellen erforderlich (Bild 53, Bild 54).



Bild 53. RC-Wohneinheit aus Bauteilelementen



Bild 54. Modifizierte RC-Wohneinheit aus Bauteilelementen

5.3.3 RC-Wohneinheit in Mauerwerksbauweise

Die Errichtung der RC-Wohneinheit in Mauerwerksbauweise ermöglicht maximale Flexibilität bei der Gestaltung des Grundrisses. Die Durchbildung der Bodenplatte und Wände erfolgt unter Verwendung eines modularen RC-Betonsteines (Bild 55, Bild 56, Bild 57). Der Aufbau der RC-Steine aufeinander sowie die Verbindungen der Steine zu den RC-Betonbalken erfolgen nach dem Lego-Stein-Prinzip.

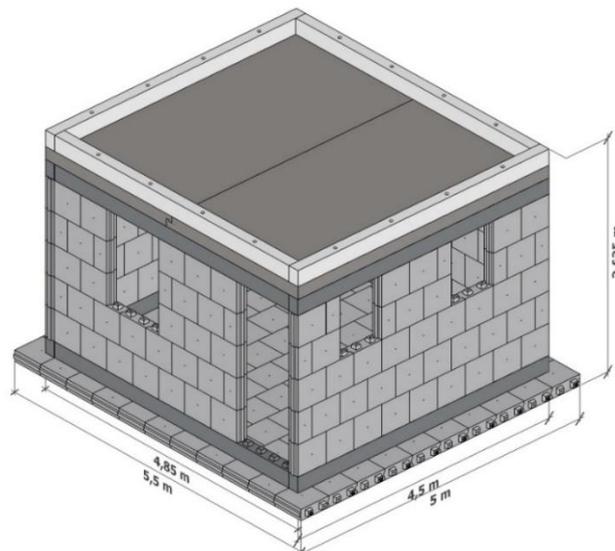


Bild 55. RC-Wohneinheit in Mauerwerksbauweise

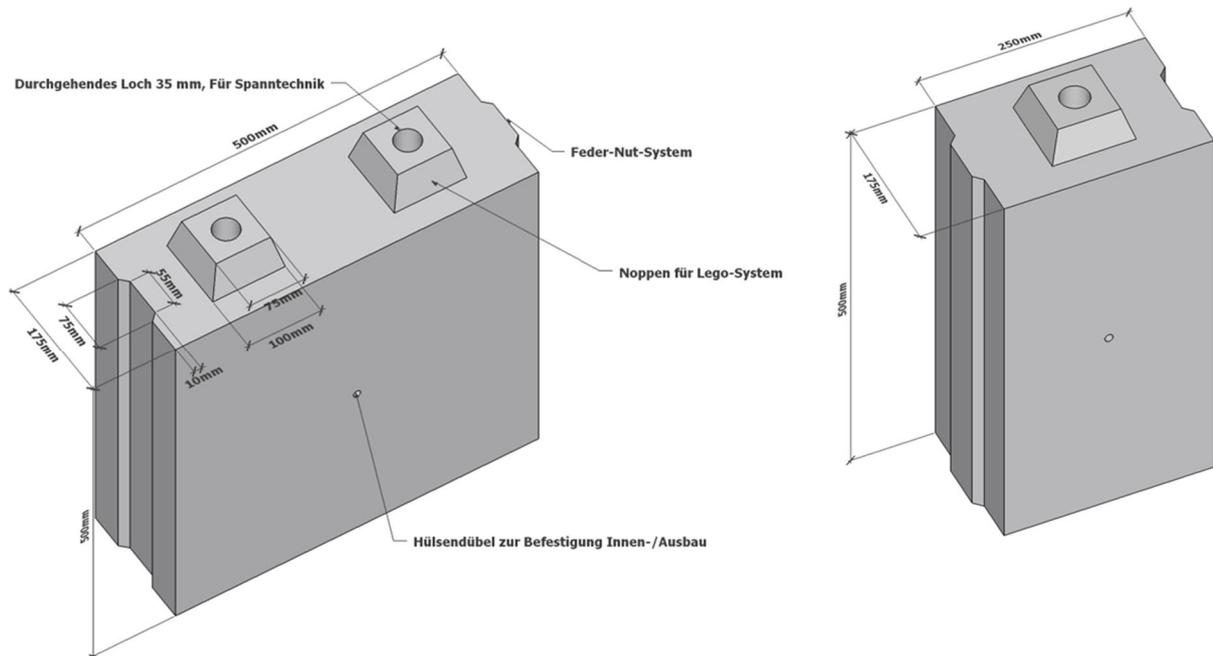


Bild 56. RC-Betonstein 500 x 175 x 500, Lego-Prinzip+ Feder-Nut-System

Bild 57. RC-Betonstein/ Halbstein

Der prinzipielle Aufbau in Mauerwerksbauweise ist im Bild 58 verdeutlicht.

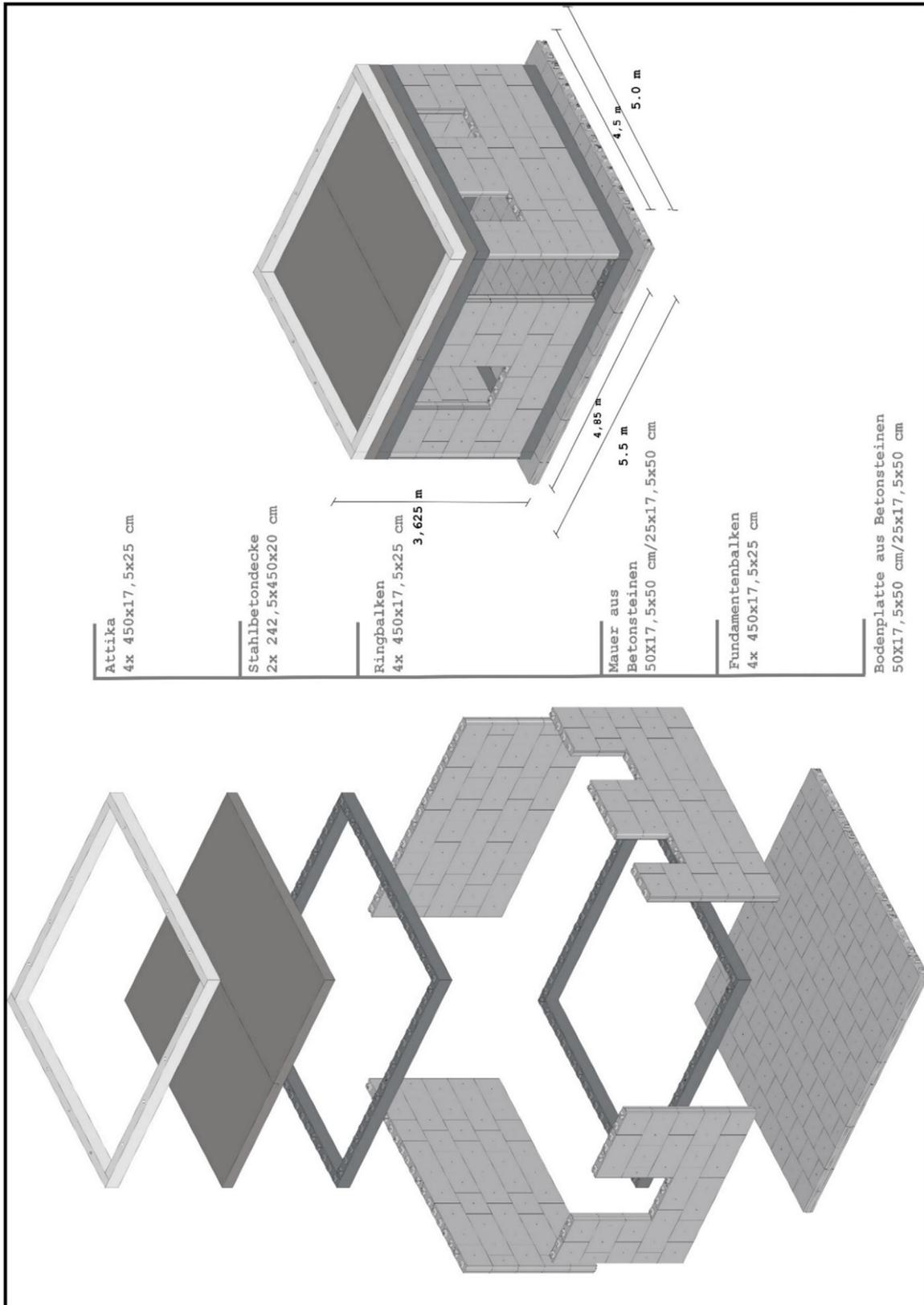


Bild 58. Detaillierte Skizze zur Errichtung der RC-Wohneinheit in Mauerwerksbauweise

Für die Stabilisierung der RC-Wohneinheit wird eine einfache Verbindungs- und Spanntechnik vorgesehen (Bild 59).

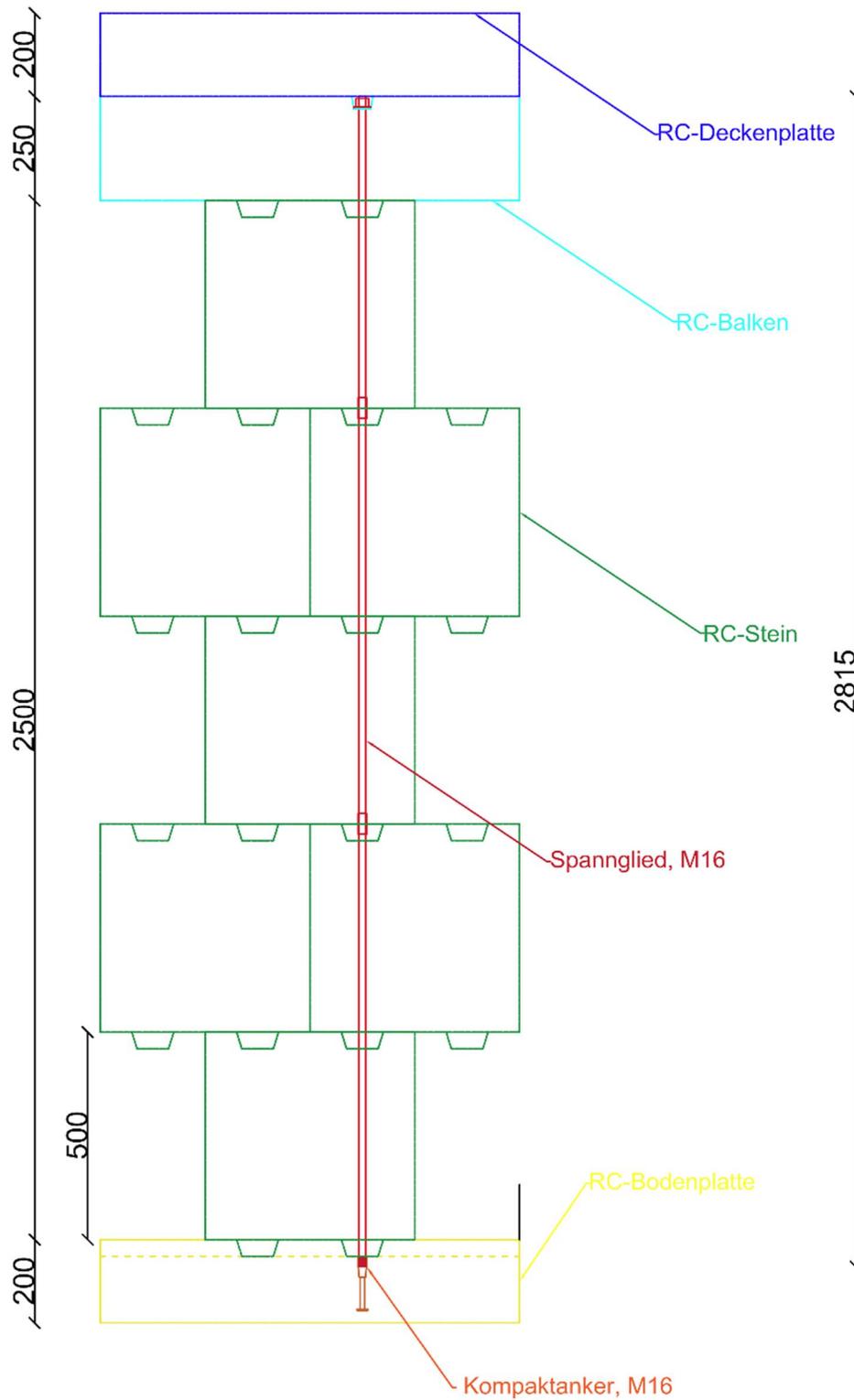


Bild 59. Einbauskitze der Spannglieder in Mauerwerksbauweise

Die Modifizierung des RC-Modules in mehrgeschossigen Wohneinheiten stellt sich bei der Mauerwerksbauweise schwieriger als bei den anderen Bauprinzipien dar (Bild 60). Die für die Aussteifung bzw. Demontierbarkeit erforderliche Verbindungstechnik sowie die längeren Bauabläufe bilden die größte Herausforderung für die Anwendbarkeit dieses Bauprinzips bei größeren Bauobjekten.

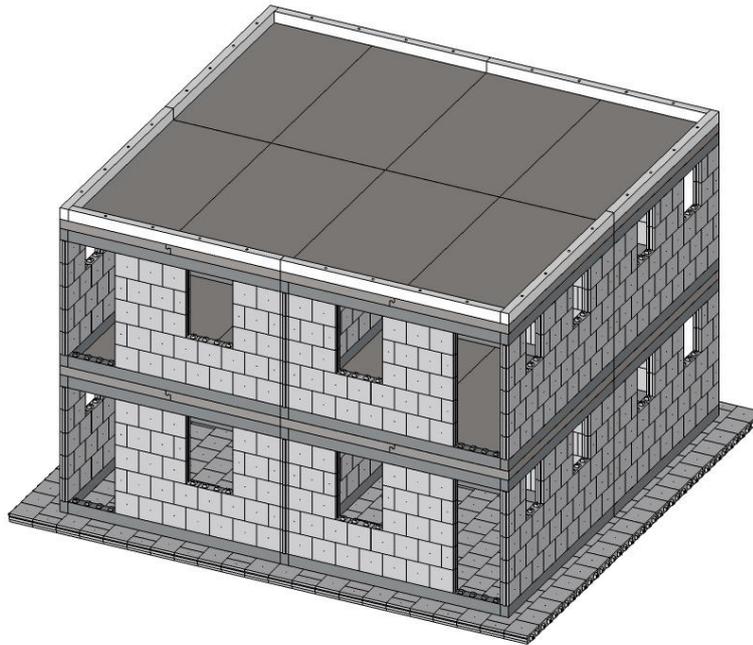


Bild 60. Modifizierte RC-Wohneinheit in Mauerwerksbauweise

Insbesondere ist auf die Gebäudeaussteifung auch während der Bauphase zu achten. Ggf. sind temporäre Abstützungen vorzusehen.

5.4 Ausgewählter Entwurf der RC-Wohneinheit

Aufgrund der Zeit- und Kosteneinschränkungen lässt sich im Rahmen des Forschungsvorhabens nur ein kleines RC-Modul errichten. Die Errichtung eines mehrgeschossigen Bauobjektes ist aus den vorgenannten Gründen ausgeschlossen worden. Zur Feststellung der Eignung der entwickelten RC-Beton-Rezepturen bei der Herstellung verschiedener Bauelemente wurde entschieden, das RC-Modul aus unterschiedlichen Bauelementen zur Anwendung verschiedener Bauprinzipien zu errichten. Hierbei werden folgende Bauteile je nach Bauprinzip gewählt:

- 1- Zwei Wände bestehend aus modularen RC-Betonsteinen und RC-Balken: Die Wände werden nach dem Lego-Stein-Prinzip mittels modularen RC-Steinen (L x B x H: 500 x 175 x 500) (Bild 56) zur Realisierung der Mauerwerksbauweise aufgebaut (Bild 61, Bild 63). Die darauf liegenden RC-Balken dienen mittels der Spannglieder zur Stabilisierung der jeweiligen Wandscheibe. Die Spannglieder sind durch die in den RC-Betonsteinen vorgesehenen Aussparungen angeordnet und zwischen den RC-Balken und mit in der Bodenplatte befindlichen Kompaktankern befestigt (Bild 64). Die entstehenden RC-Wandscheiben werden wiederum miteinander bzw. zu den benachbarten RC-Wänden im RC-Balken-Level durch passende Verbindungstechnik befestigt (Siehe Anhang 18.3).

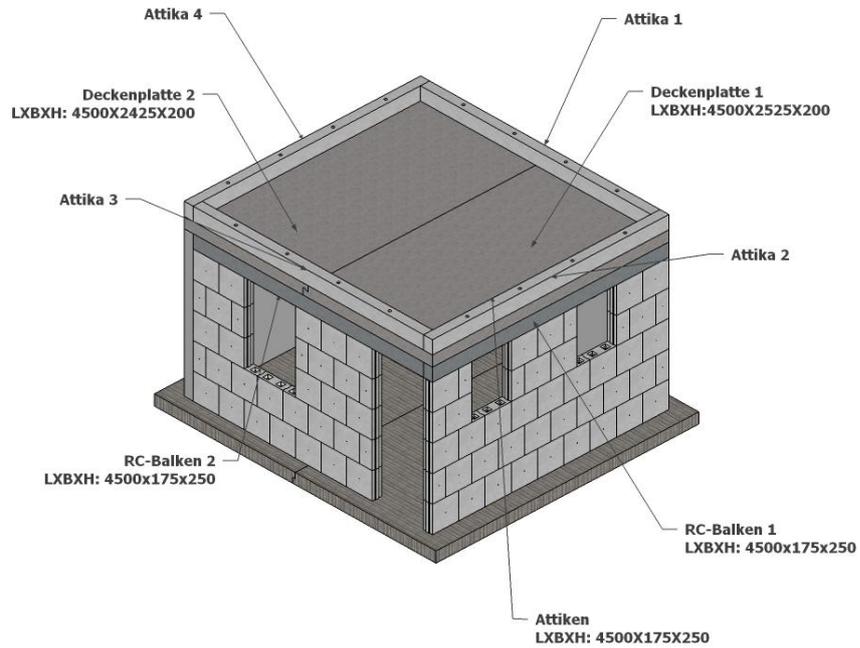


Bild 61. 3D-RC-Wohneinheit – Ansicht 1

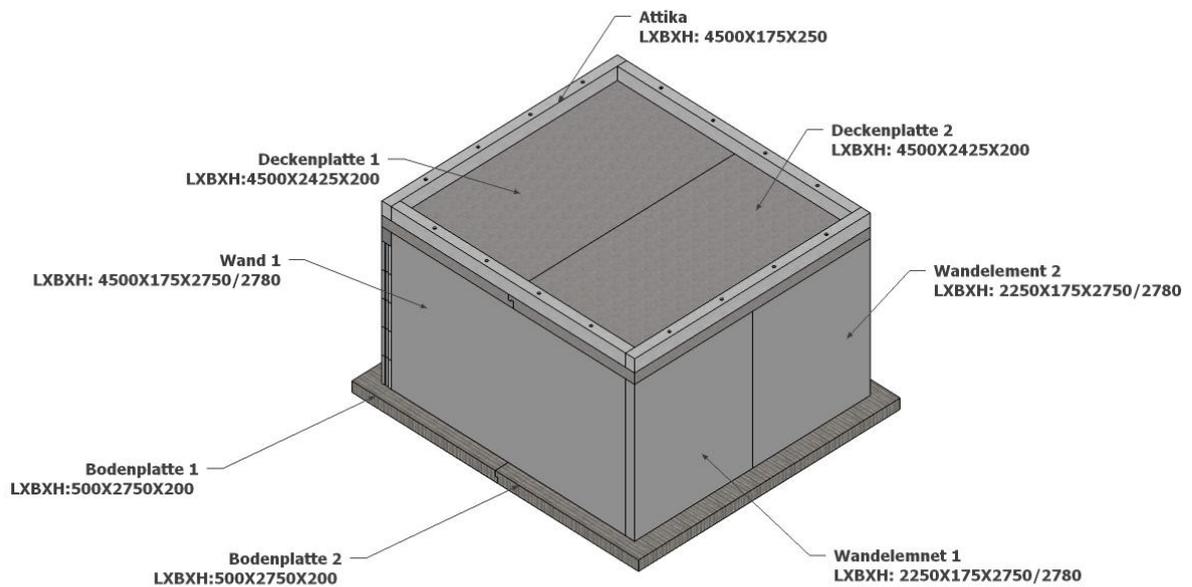


Bild 62. 3D-RC-Wohneinheit – Ansicht 2

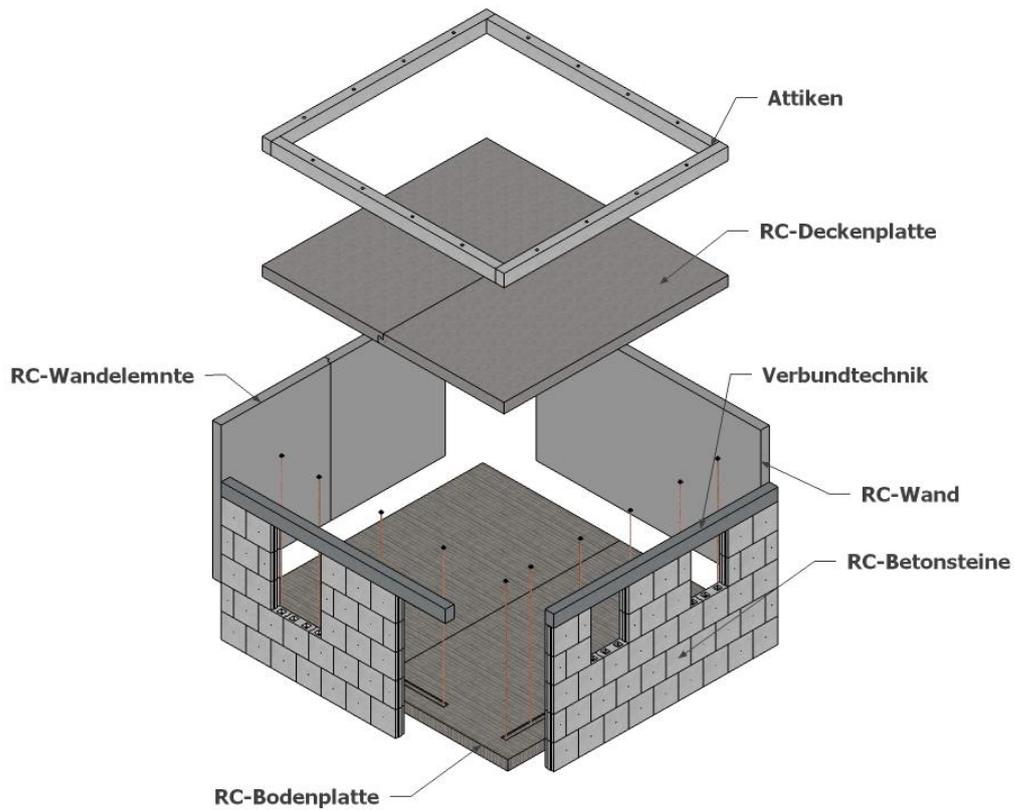


Bild 63. 3D-RC-Wohneinheit – Aufbauskitze

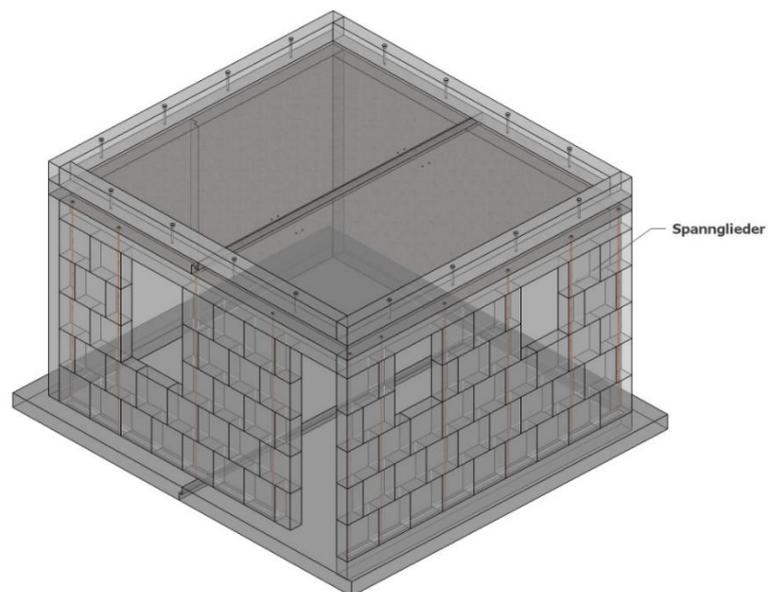


Bild 64. 3D-RC-Wohneinheit – Spannglieder

- 2- RC-Wand zur Realisierung der Plattenbauweise: Die RC-Wand wird in den Abmessungen 4500 x 175 x 2750 mm hergestellt. Zwecks des Schutzes gegen horizontale Verschiebungen am Wandfuß ist eine Führung (175 x 30 mm) in der RC-Bodenplatte entlang der RC-Wand vorzusehen. Die RC-Wand wird mit einer passenden Verbindungstechnik zu den anderen RC-Wandelementen sowie zu den RC-Deckenplatten und den RC-Balken gehalten.
- 3- RC-Wandelemente: Die RC-Wandelemente dienen zur Prüfung der Machbarkeit zur Errichtung der RC-Wohneinheit aus RC-Bauteilelementen (Wandelemente, Deckenelemente, Bodenplattenelemente usw.). Die RC-Wandelemente werden jeweils mit den Abmessungen 2250 x 175 x 2750 hergestellt, und zu einer Wandscheibe 4500 x 175 x 2750 mm zusammengeschaubt.
- 4- RC-Deckenplatten: Die Deckenplatten werden zweiteilig hergestellt. Die Abmessungen der jeweiligen RC-Deckenplatte betragen 4500 x 2425 x 200 mm. Die RC-Deckplatten sind einerseits miteinander und andererseits zu der RC-Wand, den RC-Wandelementen und RC-Balken dicht verschraubt.
- 5- RC-Attiken: Die Attiken haben die Abmessungen von 4500 x 175 x 250 mm und sind zu den RC-Betondecken befestigt.
- 6- RC-Bodenplatten: Die RC-Bodenplatten werden zweiteilig in den Abmessungen von 5000 x 2750 x 200 mm hergestellt. Die RC-Bodenplatten liegen auf einer passenden Schotter-schicht zur Verhinderung der Frostgefahr. sind einerseits miteinander und andererseits zu der RC-Wand, den RC-Wandelementen und RC-Balken dicht verschraubt.

Die Ausführungspläne, Bewehrungspläne und Aufbaupläne sowie die statische Berechnung sind im Anhang 17.4 dargestellt.

5.5 Numerische Berechnung des RC-WE-Moduls/Statik

5.5.1 Allgemeines

Die RC-Wohneinheit soll die Anforderungen der Rückbaubarkeit und Rückführbarkeit erfüllen. Dies hat zur Folge, demontierbare Bauteile beim Aufbau der RC-Wohneinheit zu verwenden. Der Aufbau soll eine bausichere Lasteinleitung zwischen den Einzelbauteilen sicherstellen. Die numerische Berechnung dient an dieser Stelle dazu, die aus den Einwirkungen zu erwartenden Verformungen bzw. entstehenden Lokalspannung an den Anschlussstellen genauer zu betrachten und damit an den kritischen Stellen die Querschnitte nachzuweisen.

Die statische Berechnung der RC-Wohneinheit wird mit Hilfe eines FEM-Programmes (ANSYS) erfolgen.

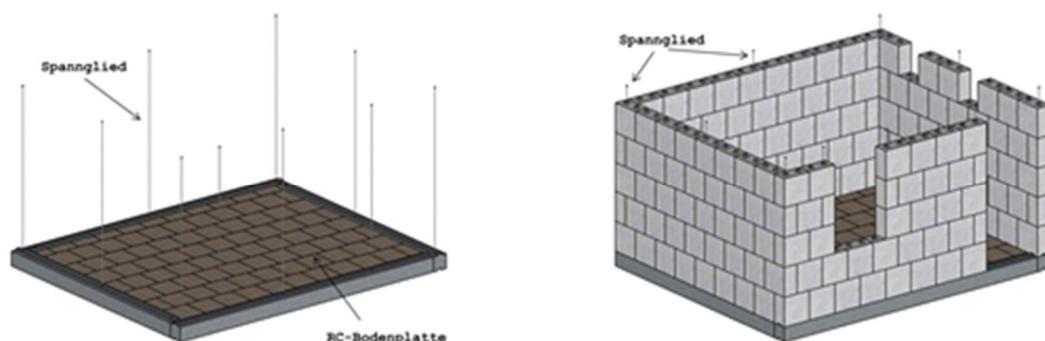
5.5.2 Modell zur numerischen Berechnung

Das Tragsystem der RC-Wohneinheit setzt sich aus folgenden Bauteilen (Bild 65) zusammen:

- 1- Fundamentbalken - werden durch die angeordneten Spannglieder auf den Mauersteinen durch eine passende Verbindungstechnik an der Stahlbetondecke befestigt und miteinander an den Enden verbunden.
- 2- Modulare RC-Mauersteine - welche in Mauerwerksbauweise verlegt werden.
- 3- RC-Ringanker - werden durch die angeordneten Spannglieder auf den Mauersteinen durch eine passende Verbindungstechnik an der Stahlbetondecke befestigt und miteinander an den Enden verbunden.
- 4- Zweiteilige RC-Stahlbetondecke - welche in der kurzen Richtung der RC-Wohneinheit auf den Ringankern verlegt und angeschlossen wird.
- 5- Spannglieder - werden vertikal in den durchgehenden Löchern an den Mauersteinen angeordnet. Sie verbinden die Fundamentbalken und die Ringanker und applizieren durch deren Vorspannung einen Vordruck in den RC-Mauersteinen.

Die Abstände zwischen den Spanngliedern bewegen sich im Raum zwischen 0,5 bis 2,5 m. Aus diesem Grund und zur Gewährleistung eines sicheren Nachweises werden bei der statischen Berechnung zwei Tragsysteme berechnet und nachgewiesen (Bild 66):

- 1- System 1 (an den Stellen der Spannglieder): Bei diesem System wird die Einwirkung der Vorspannung in den Wänden der RC-Wohneinheit auf die Lastabtragung mitberücksichtigt (an den Stellen der Spannglieder).
- 2- System 2 (an den Stellen ohne Spannglieder): Bei diesem System wird die Einwirkung der Vorspannung in den Wänden der RC-Wohneinheit auf die Lastabtragung nicht berücksichtigt.



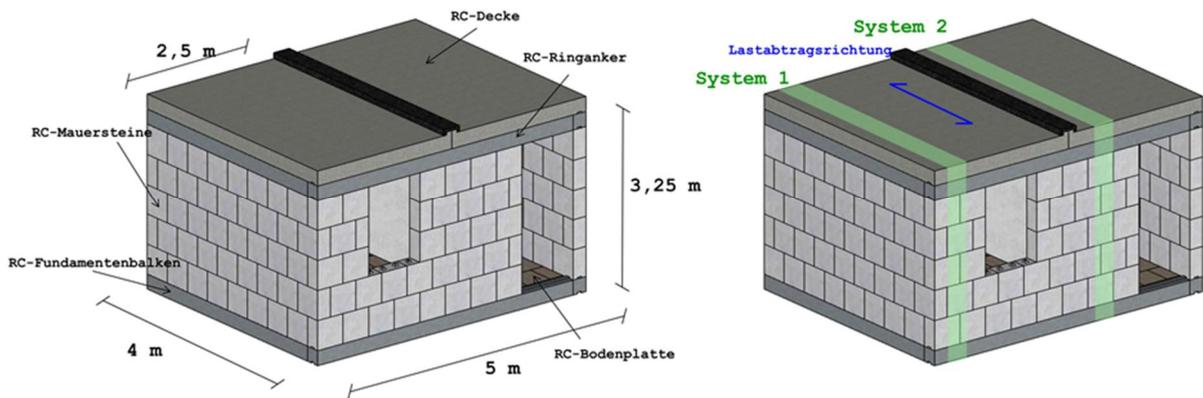


Bild 65. Tragwerkssystem der RC WE

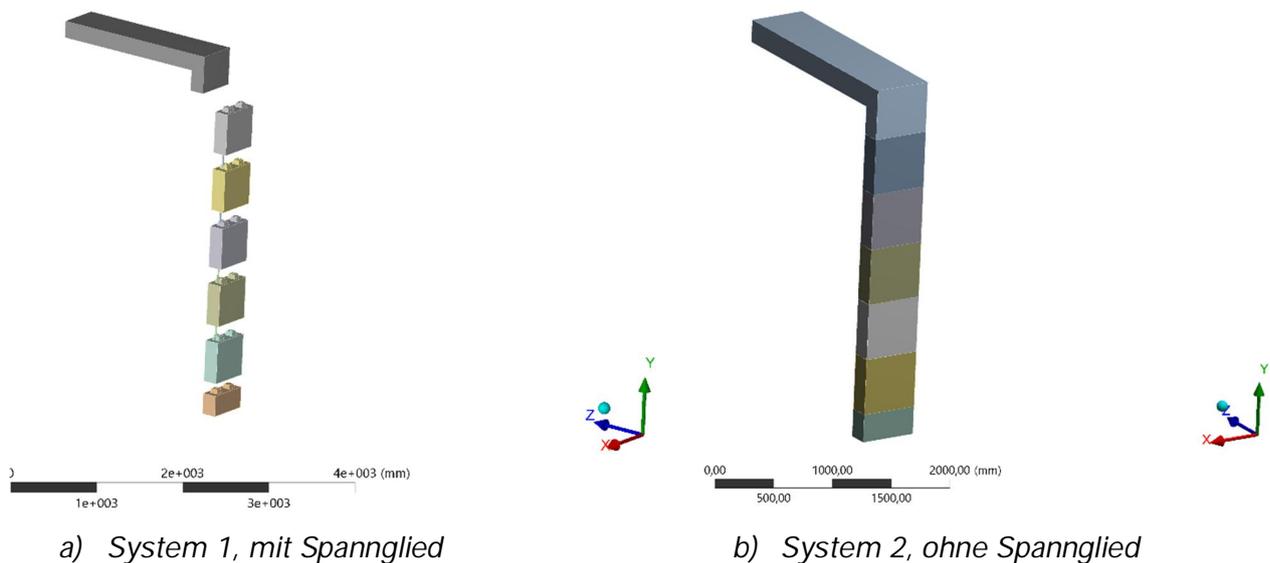


Bild 66. Rechenmodelle

Der RC-Mauerstein verfügt über die im Bild 67 dargestellte Form. Die Verzahnung zwischen den Mauersteinen erfolgt hauptsächlich durch das Lego-Stein-Prinzip. Das Federsystem (die Federverzahnung) dient zu einer extra Aussteifung in Querrichtung der RC-Wand. Bei der numerischen Berechnung wurde auf das Federsystem verzichtet. Die Mitwirkung der Verzahnung in die Querrichtung dient als Reserve zur Verhinderung der horizontalen Verformungen.

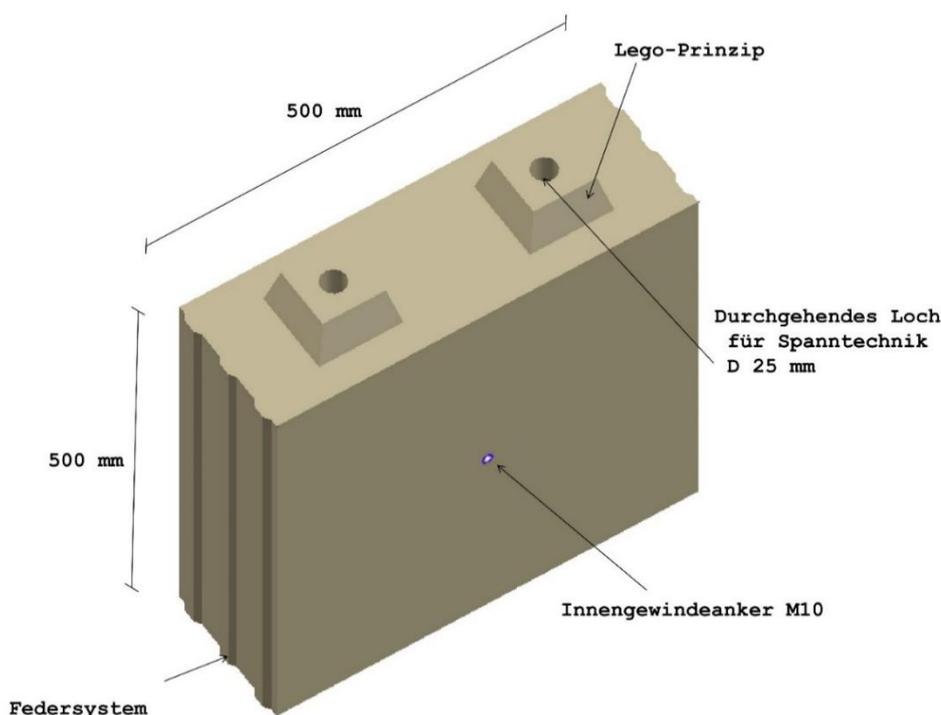


Bild 67. RC-Mauerstein der RC WE (Lego-Stein-Prinzip + Federsystem)

5.5.3 Materialien

Zur Herstellung der tragenden Elemente der kreislaufgerechten und ressourcenschonenden RC-Wohneinheit wird der RC-Beton als Hauptbaustoff verwendet. Bezugsnehmend werden die Tragbauteile aus RC-Beton jeweils bewehrt oder unbewehrt je nach Bauteil hergestellt. Die RC-Betondecke sowie der Fundamentbalken und Ringanker sind hauptsächlich auf Biegung beansprucht und werden demzufolge als RC-Stahlbeton der Betongüte C30/37 vorgesehen. Die Wände der Wohneinheit werden aus RC-Betonsteinen unvermörtelt aufeinander mit Hilfe eines eigenen Entwurfs versetzt und planmäßig nur auf Druck beansprucht. In diesem Fall werden die RC-Betonsteine unbewehrt, aus einem RC-Beton der Güte C30/37 produziert. Die Verbinde- und Spanntechnik werden aus rostfreiem Stahl der Stahlgüte 8.8 ausgewählt. Als vertikal angeordnete Spannglieder in den Mauersteinkanälen werden Gewindestange $\text{Ø}20$ mm vorgeschlagen. Die verwendeten Baustoffe zur Herstellung der Tragbauteile der RC-Wohneinheit sind in der *Tabelle 14* zusammengestellt.

Tabelle 14: Verwendete Baustoffe zur Herstellung der Tragbauteile der RC-WE

Bauteil	Baustoff
Decke, Fundamentbalken und Ringanker	RC-Stahlbeton, C30/37
Mauersteine	RC-Beton, C30/37
Vorspanntechnik	Edelstahl $\text{Ø}20$ mm, Zugfestigkeit=240 MPa [62]

5.5.4 Einwirkungen

5.5.4.1 Allgemeines

Die Wohneinheit soll alle gewöhnlichen Einwirkungen bei Wohnbauten abtragen. Neben dem Eigengewicht soll die Wohneinheit die Geschosslasten, ständige bzw. Nutzlasten sowie die Windbelastung und Schneelast zusätzlich zu den aus der Spanntechnik entstehenden Vorspannungen aufnehmen. Die zukünftige Breitenanwendung der RC-Wohneinheit sollte in der ersten Linie alle Gebiete der Bundesrepublik Deutschland überdecken. Demzufolge sollte die Wohneinheit die zu erwartenden, maximalen Einwirkungen sicher abtragen. In den folgenden Abschnitten werden die berücksichtigten Einwirkungen dargestellt.

5.5.4.2 Ständige Lasten und Nutzlasten

Die ständigen Lasten enthalten die Eigengewichte der unveränderlichen Bauteile, sowohl der tragenden als auch der nichttragenden. In diesem Fall bestehen die ständigen Lasten aus Eigengewichten der Betondecke ($d = 20 \text{ cm}$, 5 kN/m^2) zusätzlich zu den Ausbau- und Innenausbaukosten (geschätzt 2 kN/m^2).

Die Wohneinheit ist unter der Kategorie A im DIN EN 1991-1-1 [57] klassifiziert. Die einwirkende Nutzlast wird daher aus der *Tabelle 15* entnommen.

Tabelle 15: lotrechte Nutzlasten für Decken [57]

Spalte	1	2	3	4	5	
Zeile	Kategorie	Nutzung	Beispiele	q_k kN/m ²	Q_k^e kN	
1	A	A1	Spitzböden	Für Wohnzwecke nicht geeigneter, aber zugänglicher Dachraum bis 1,80 m lichter Höhe	1,0	1,0
2		A2	Wohn- und Aufenthaltsräume	Decken mit ausreichender Querverteilung der Lasten, Räume und Flure in Wohngebäuden, Bettenräume in Krankenhäusern, Hotelzimmer einschl. zugehöriger Küchen und Bäder	1,5	—
3		A3		wie A2, aber ohne ausreichende Querverteilung der Lasten	2,0 ^c	1,0
4	B	B1	Büroflächen, Arbeitsflächen, Flure	Flure in Bürogebäuden, Büroflächen, Arztpraxen ohne schweres Gerät , Stationsräume, Aufenthaltsräume einschl. der Flure, Kleinviehställe	2,0	2,0
5		B2		Flure und Küchen in Krankenhäusern, Hotels, Altenheimen, Flure in Internaten usw.; Behandlungsräume in Krankenhäusern , einschl. Operationsräume ohne schweres Gerät; Kellerräume in Wohngebäuden	3,0	3,0
6		B3		Alle Beispiele von B1 u. B2, jedoch mit schwerem Gerät	5,0	4,0

5.5.4.3 Schneelast

Die Berechnung der Schneelasten auf der Wohneinheitsdecke (als Flachdach) wird nach DIN EN 1991-1-3 [58] in Abhängigkeit von den Schneelastzonen (Bild 68) ermittelt. Der charakteristische Wert der Schneelast auf dem Boden ergibt sich aus den im Bild 69 angegebenen Gleichungen. Bei der Berechnung wird die maximale Schneelast in Höhe von ($1,1 \text{ kN/m}^2$) berücksichtigt.

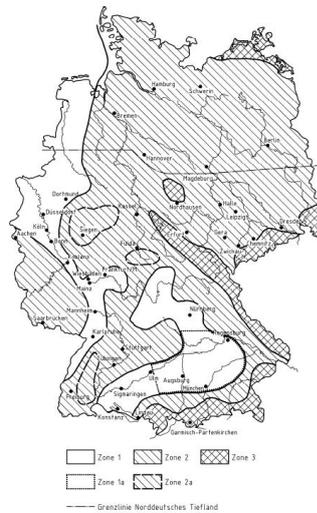


Bild 68. Schneelastzonen nach [58]

$$\text{Zone 1: } s_k = 0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

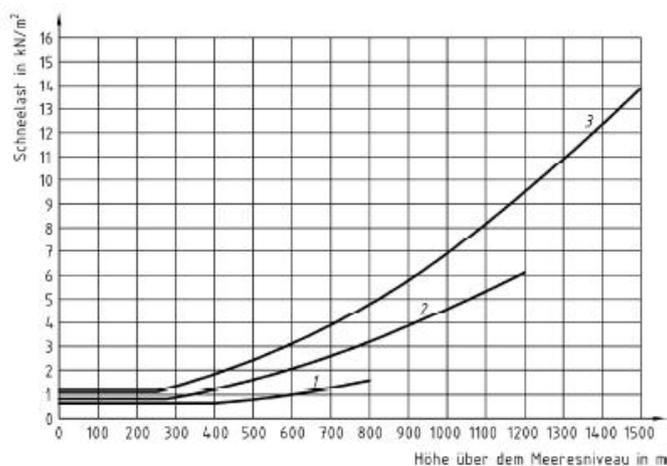
$$\text{Zone 2: } s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

$$\text{Zone 3: } s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2$$

Dabei ist

s_k der charakteristische Wert der Schneelast auf dem Boden, in kN/m^2 ;

A die Geländehöhe über Meeresniveau, in m.



Legende

- 1 Zone 1
- 2 Zone 2
- 3 Zone 3

Sockelbeträge (Mindestwerte):

- Zone 1 0,65 kN/m^2 (bis 400 m ü. d. M.)
- Zone 2 0,85 kN/m^2 (bis 285 m ü. d. M.)
- Zone 3 1,10 kN/m^2 (bis 255 m ü. d. M.)

Bild 69. Charakteristischer Wert der Schneelast nach DIN EN 1991-1-3/NA [58]

5.5.4.4 Windbelastung

Die Berechnung der Windlasten auf die Wohneinheit wird gemäß DIN EN 1991-1-4 [59] in Abhängigkeit von den Windzonen (Bild 70) ermittelt. Beim Nachweis der Wohneinheit unter Windbelastung kommt die maximal ermittelte Windlast in Betracht. Dies betrifft das Gebiet der Windzone 4.

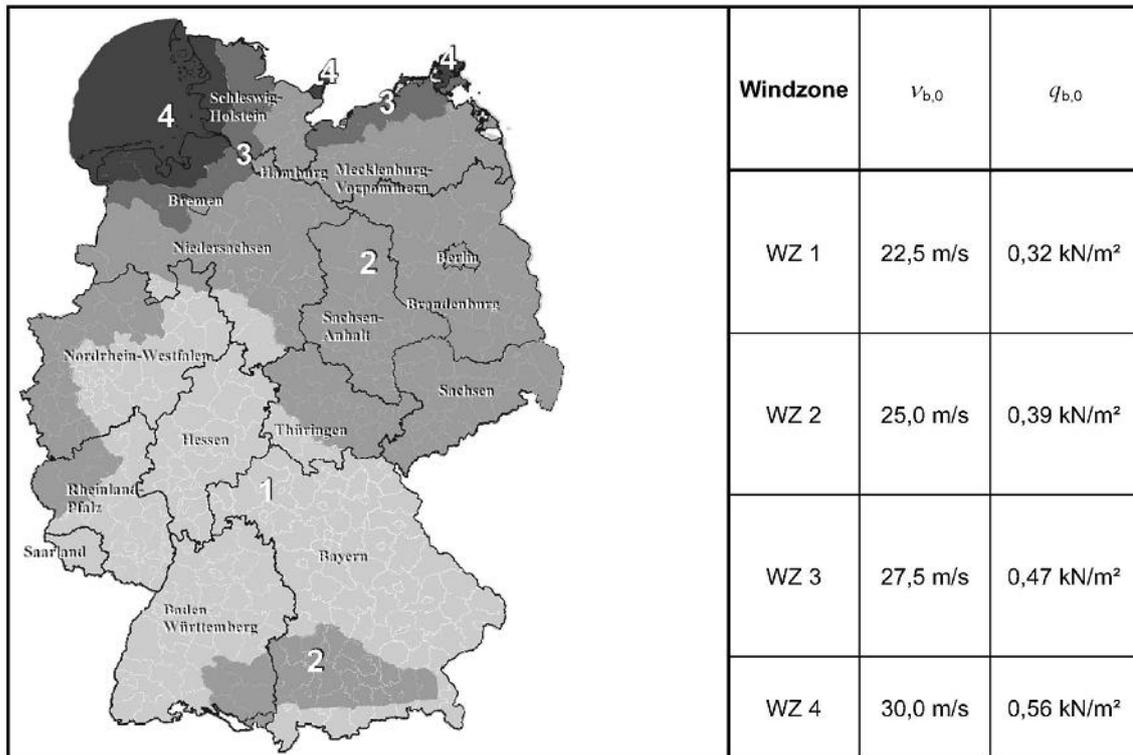


Bild 70. Windzonenkarte gemäß Bild NA.A.1 - Windzonenkarte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland aus DIN EN 1991-1-4_NA_2010-12 [59]

Nach DIN EN 1990 [60] müssen die Windlasten als veränderliche, freie und unabhängige Einwirkungen betrachtet werden und entsprechend mit anderen Einwirkungen (z. B. Eigengewicht, Schnee) kombiniert werden. Die DIN EN 1991-1-4 [59] gibt die Windlast als charakteristischen Böengeschwindigkeitsdruck q_p an, der im Mittel nur einmal in 50 Jahren überschritten werden darf. Die Böengeschwindigkeitsdrücke können nach zwei Verfahren ermittelt werden:

- vereinfachte Ermittlung eines über die Höhe konstanten Geschwindigkeitsdrucks für Gebäude bis zu einer Höhe von 25 m,
- höhenabhängiger Böengeschwindigkeitsdruck in Abhängigkeit der Bodenrauigkeit

- Winddruck:

Der Winddruck auf Außenflächen eines Tragwerkes errechnet sich allgemein wie folgt:

$$w_e = c_{pe} \times q_p(z_e)$$

mit

w_e = Außendruck in kN/m²

c_{pe} = Aerodynamischer Beiwert

z_e = Gebäudehöhe beim vereinfachten Verfahren

$q_p(z_e)$ = Geschwindigkeitsdruck für die Bezugshöhe z_e

Die Ermittlung der Werte c_{pe} und q_k werden im Folgenden ermittelt:

- Vereinfachter Böengeschwindigkeitsdruck

Die Einwirkungen aus Wind werden bei nichtschwingungsanfälligen Tragwerken durch eine statische Ersatzlast, den Böengeschwindigkeitsdruck q_p , erfasst. Bei Bauwerken bis 25 m Höhe darf vereinfachend der Böengeschwindigkeitsdruck q_p nach *Tabelle 16* in Abhängigkeit von den Windzonen angesetzt werden. Für vorübergehende Zustände, z. B. im Bauzustand, kann der Geschwindigkeitsdruck nach DIN EN 1991-1-4 [59] zusätzlich abgemindert werden.

Nachfolgende Hinweise bzw. Anwendungsgrenzen sind bei Verwendung des vereinfachten Böengeschwindigkeitsdrucks zu beachten:

- Der Geschwindigkeitsdruck ist über die gesamte Gebäudehöhe als konstant wirkend anzusetzen.
- Zur Küste zählt ein 5 km breiter Streifen.
- Gilt auf den Inseln der Nordsee nur bis zu einer Gebäudehöhe von 10 m (der Fall der RC-Wohneinheit)

Tabelle 16: Tabelle NA.B.3 — Vereinfachte Geschwindigkeitsdrucke für Bauwerke bis 25 m Höhe aus DIN EN 1991-1-4_NA_2010-12 [59]

Windzone		Geschwindigkeitsdruck q_p in kN/m ² bei einer Gebäudehöhe h in den Grenzen von		
		$h \leq 10\text{m}$	$10\text{ m} < h \leq 18\text{ m}$	$18\text{ m} < h \leq 25\text{ m}$
1	Binnenland	0,50	0,65	0,75
2	Binnenland	0,65	0,80	0,90
	Küste und Inseln der Ostsee	0,85	1,00	1,10
3	Binnenland	0,80	0,95	1,10
	Küste und Inseln der Ostsee	1,05	1,20	1,30
4	Binnenland	0,95	1,15	1,30
	Küste der Nord- und Ostsee und Inseln der Ostsee	1,25	1,40	1,55
	Inseln der Nordsee	1,40	—	—

- Aerodynamischer Beiwert

Der aerodynamische Beiwert c_{pe} für nicht hinterlüftete Wandflächen hängt von der Größe der Lasteinzugsfläche A des Bauteils ab. Die Tabellen in den nachfolgenden Abschnitten geben den Außendruckbeiwert für $A = 1\text{ m}^2$ ($c_{pe,1}$) und für $A = 10\text{ m}^2$ ($c_{pe,10}$) wieder. Zwischenwerte können entsprechend Bild 71 bzw. Gleichung (logarithmisch) interpoliert werden.

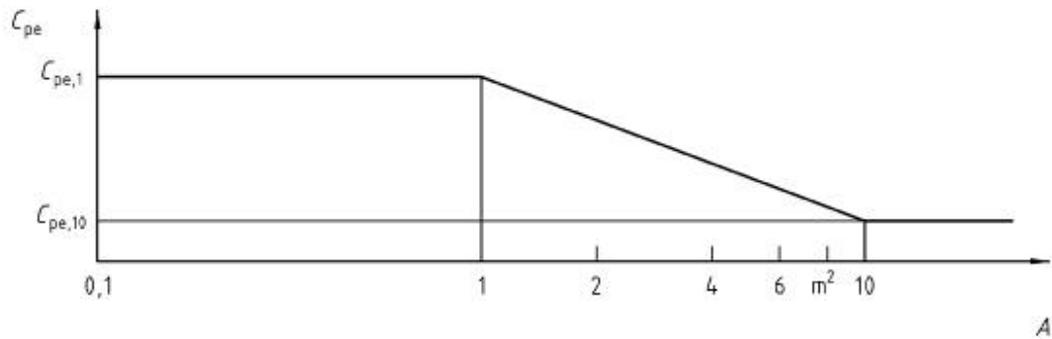


Bild 71. Außendruckbeiwert in Abhängigkeit der Lastezugsfläche A aus [102]

Die Werte für $A < 10 \text{ m}^2$ dienen z. B. der Berechnung von Ankerkräften von unmittelbar durch Windeinwirkung beanspruchten Bauteilen bzw. von Bauteilen mit keiner Möglichkeit zur Lastumlagerung.

Aus Bild 72 und Tabelle 17 können für Wände die Druckbeiwerte c_{pe} und deren Wirkungsflächen entnommen werden. Die Ermittlung der Windlast auf die Vorsatzschale erfolgt mit dem Druckbeiwert $c_{pe,10}$ für den Bereich A und B bzw. D. Für Einzelbauteile bzw. Einzelverankerungen sind die Windlasten mit dem Druckbeiwert $c_{pe,1}$ zu bestimmen. Die Ankerreihen stellen keine Einzelverankerung dar, da eine Lastumlagerung innerhalb der Reihe vorausgesetzt wird.

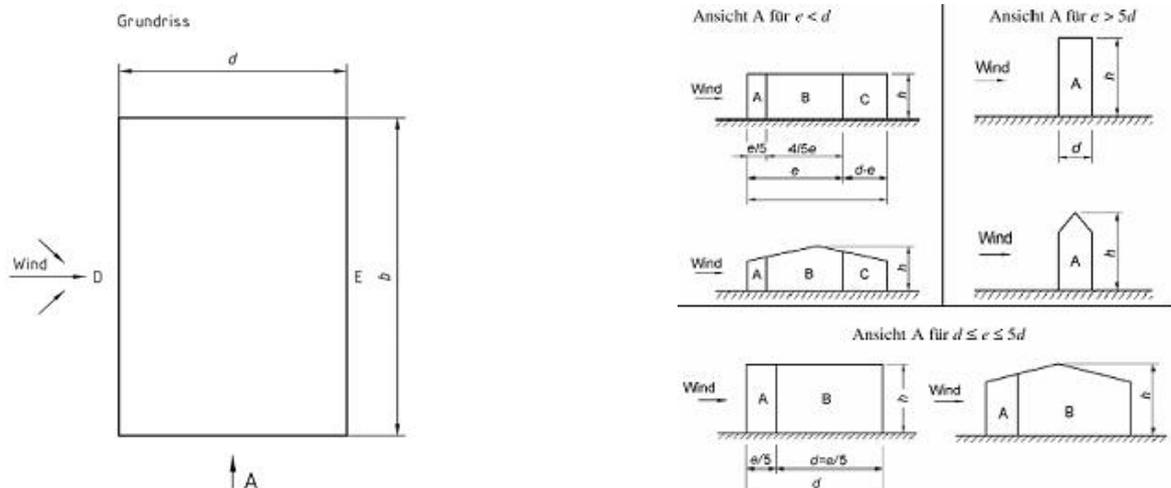


Bild 72. Einteilung der Wandflächen aus [61]

Tabelle 17: Aerodynamische Beiwerte für rechteckige Gebäude aus [61]

Bereich	A		B		C		D		E	
	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$								
≥ 5	-1,4	-1,7	-0,8	-1,1	-0,5	-0,7	+0,8	+1,0	-0,5	-0,7
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	-0,5

Bemerkung: Der maximale, ungünstigste Wert der Windbelastung ergibt sich in der Windzone 4. Mit Berücksichtigung der Höhe der RC-Wohneinheit (max. zweigeschossig < 10 m) ergibt sich der maximale Windsog in Höhe von: $-0,5 \times 1,4 \text{ kN/m}^2 = -0,7 \text{ kN/m}^2$

5.5.4.5 Gesamteinwirkungen:

Die Gesamteinwirkungen auf der RC-Wohneinheit lassen sich in der *Tabelle 18* zusammenfassen:

Tabelle 18: Gesamteinwirkungen auf der RC-Wohneinheit

Art der Einwirkung	Wert
Ständige Lasten	Eigengewicht+ 2kN/m ²
Nutzlasten	1,5 kN/m ²
Schneelasten	1,1 kN/m ²
Windbelastung [Windsog]	0,7 kN/m ²
Vorspannung (Anstelle der Spannglieder)	2 kN

Die Einwirkungen auf beide berechneten Systeme sind im Bild 73 dargestellt.

E: RCWEModul-Höhe 3m+VSp
Deckenbelastung
Time: 1, s
26.05.2017 09:17

- A Deckenbelastung: 1,e-002 MPa
- B Windsog: -1,e-003 MPa
- C Vorsp1: 2000, N
- D Vorsp2: 2000, N



a) System 1, mit Vorspannung

E: RCWEModul-Höhe 3m+VSp
Deckenbelastung
Time: 1, s
26.05.2017 09:53

- A Deckenbelastung: 1,e-002 MPa
- B Windsog: 1,e-003 MPa



b) System 2, ohne Vorspannung

Bild 73. Einwirkungen auf die Wohneinheit

5.5.5 Verformungen

Ziel der Berechnung der Verformungen ist es, die Stabilität der Wohneinheit unter den verschiedenen Einwirkungen nachzuweisen. Die zu erwartenden Gesamtverformungen im Grenzzustand in beiden Systemen (mit und ohne Vorspannung) sind im Bild 74 dargestellt.

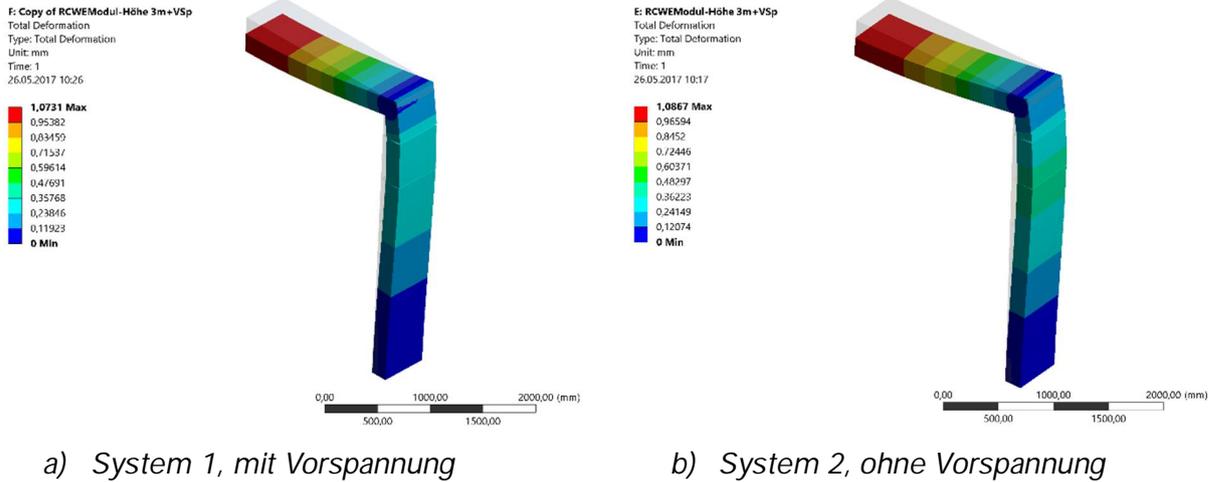


Bild 74. Gesamtverformung der Wohneinheit unter verschiedenen Einwirkungen

Die maximale Verformung der Stahlbetonplatte in beiden Systemen ist deutlich geringer als die im [61] zulässige Durchbiegung ($f=1 \text{ mm} < l/240 = 16 \text{ mm}$). Da die Horizontalverformungen eine große Bedeutung für die Stabilität der Wohneinheit unter horizontalen Einwirkungen haben, sind diese im Bild 46 dargestellt. Die niedrigen Werte der Horizontalverformungen ($< 0,5 \text{ mm}$) weisen darauf hin, dass die RC-Wohneinheit eine ausreichende Aussteifung in horizontaler Richtung hat und schließt damit das Kippen der Wohneinheit unter horizontalen Einwirkungen aus.

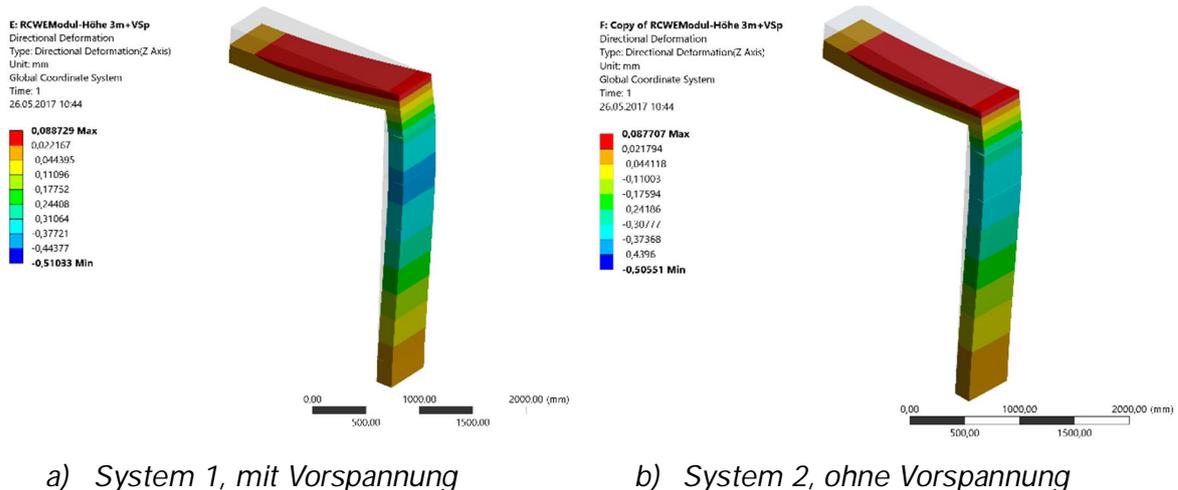


Bild 75. Verformung der RC-Wohneinheit in horizontaler Richtung

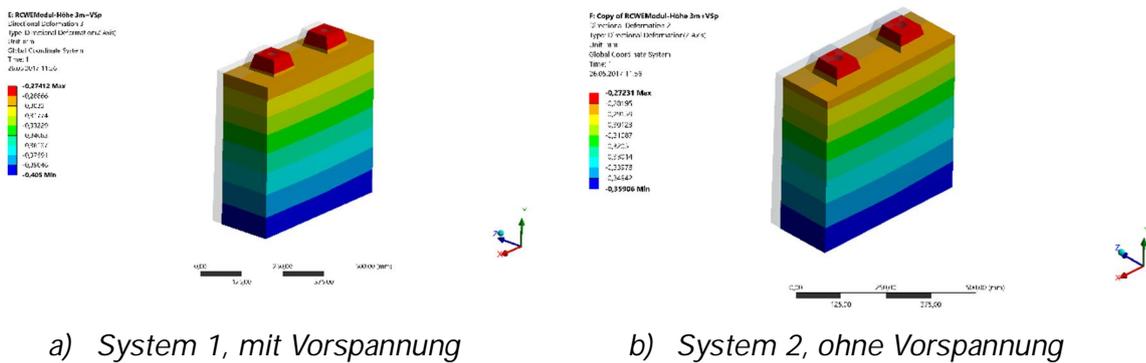


Bild 76. Verformung in horizontaler Richtung im oberen Mauerstein

Die kritische Stelle ist in diesem Fall der oberste Mauerstein (Bild 76). Dieser Mauerstein ist mit den Ringankern jeweils mit oder ohne Spanngliedern verbunden. Die geringen Verformungen weisen darauf hin, dass das Aufklaffen der Mauerfuge infolge horizontaler Einwirkungen an dieser Stelle verhindert ist.

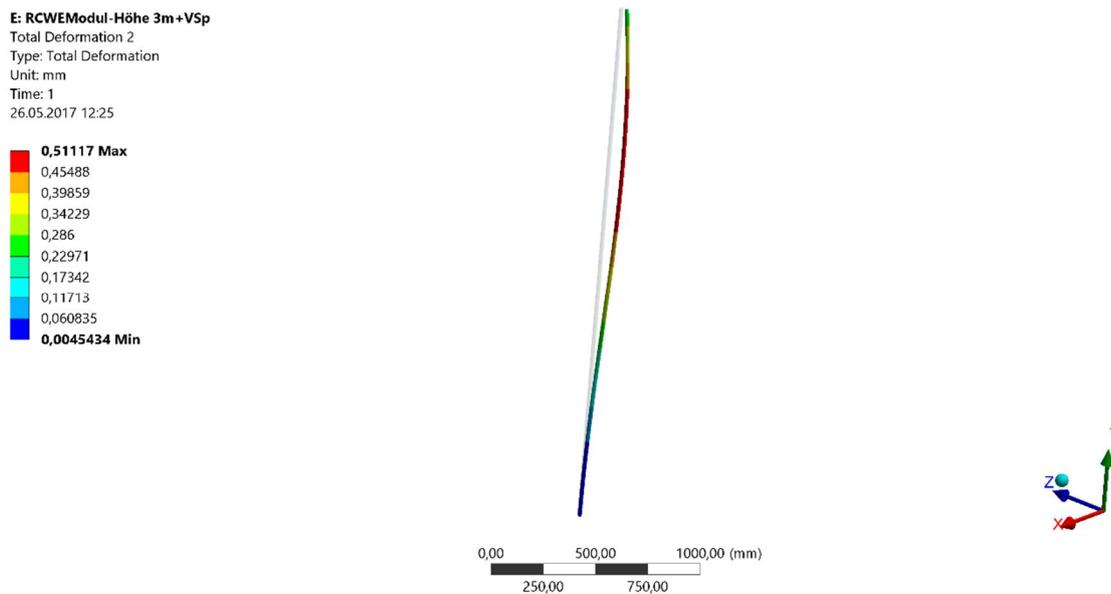


Bild 77. System 1, Verformung- Spannglied

Die Spannglieder werden in die durchgehenden Kanäle der Mauersteine gezogen und zwischen den Ringankern und Fundamentbalken vorgespannt. Die auftretenden Verformungen im Spannglied sind im Bild 77 dargestellt und weisen eine bausichere Mitwirkung im System auf.

5.5.6 Spannung

Die entstehenden Spannungen in allen Bauteilen der RC-Wohneinheit sollen die nach aktuellen Normen zugelassenen Spannungen nicht überschreiten. Die Lokalspannung an den Anschlussstellen sollen genauer betrachtet und damit die kritischen Stellen ggf. Querschnitte nachgewiesen werden.

Die erwarteten Spannungen in beiden Tragsystemen sind im Bild 78 dargestellt. Bei der Stahlbetondecke sowie dem Fundamentbalken ist zu bemerken, dass die Normalspannungen deutlich niedriger als die für die Betongüte C30/37 zugelassenen Spannungen sind und damit ist die Stabilität (siehe Abschnitt 5.5.5) und Tragfähigkeit dieser Bauteile nachgewiesen

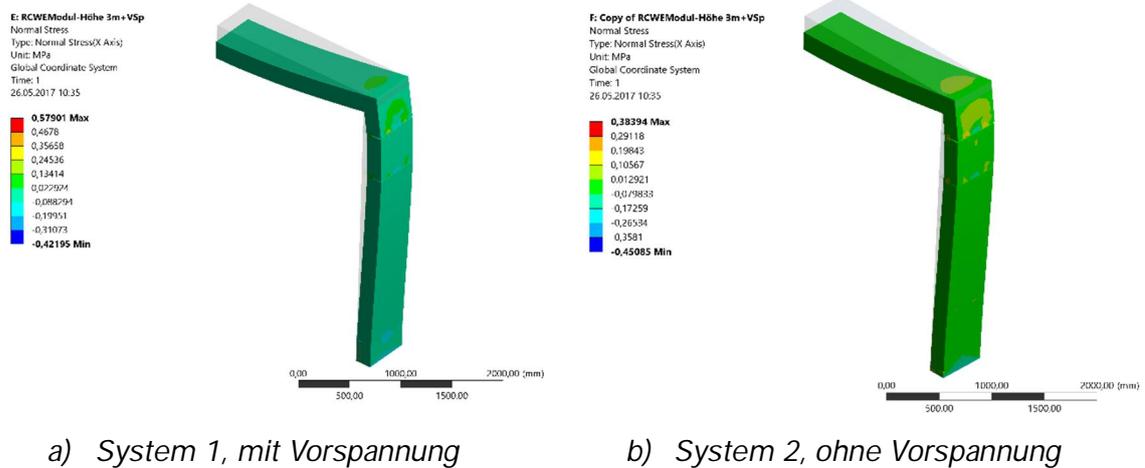


Bild 78. Normalspannung in den Bauteilen der RC-Wohneinheit

Die Mauersteine der Wohneinheit sind hauptsächlich auf Druck beansprucht. Der Vergleich der unter verschiedenen Einwirkungen entstehenden Spannungen in den Mauersteinen der gesamten Wand der Wohneinheit (siehe Bild 78) und im obersten Stein (siehe Bild 79) zu den zugelassenen Druck/Zugspannungen beim RC-Beton C30/37 zeigt einen hohen Sicherheitsfaktor und damit eine sichere Abtragung der einwirkenden Belastungen.

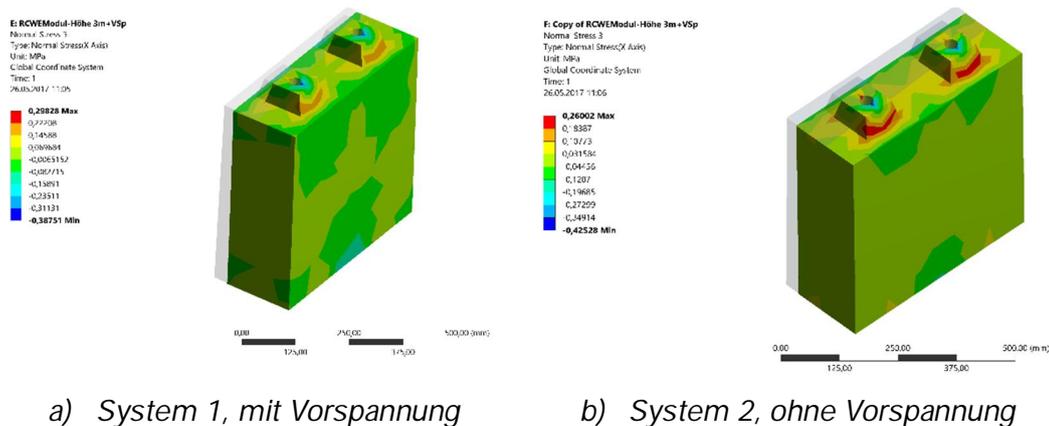


Bild 79. Spannung am obersten Mauerstein

Die in den Spanngliedern erwarteten Normalspannungen sind im Bild 80 abgebildet. Hierbei wird festgestellt, dass die entstehenden Spannungen im Vergleich zu den für Edelstahl zugelassenen Spannungen ($560/1,1 = 509 \text{ MPa}$) sehr gering sind. Die Spannglieder sind damit auch nachgewiesen.

E: RCWEModul-Höhe 3m+VSp
 Normal Stress 2
 Type: Normal Stress(X Axis)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 1
 26.05.2017 12:27

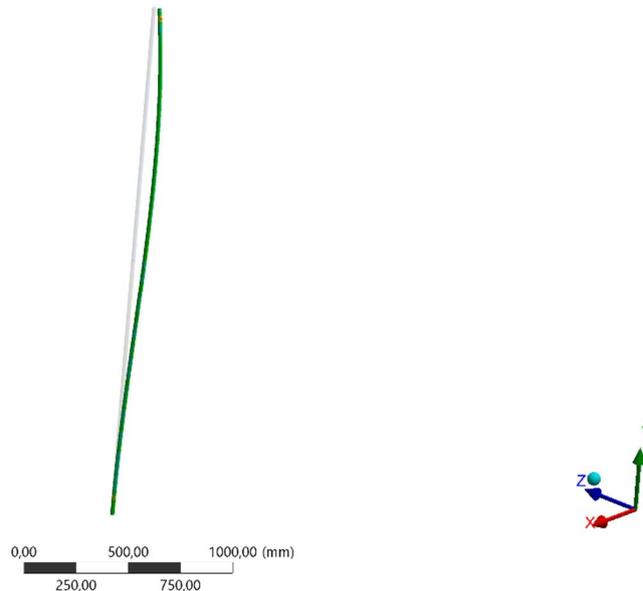
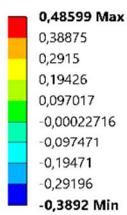


Bild 80. System 1, Spannung- Spannglied

Die Bewertung der Ergebnisse aus der numerischen Berechnung der RC-Wohneinheit weist eine ausreichende Stabilität und Tragfähigkeit aller einzelnen Bauteile sowie des Gesamtsystems der Wohneinheit auf.

5.6 Dämmwirkung der RC-Wohneinheit

5.6.1 Anforderungen nach EnEV

Die EnEV, also die Energieeinsparverordnung, ist eine politische Verordnung zur Unterstützung der Energiewende und ist Teil des Wirtschaftsverwaltungsrechtes. Die EnEV gilt für Wohngebäude, gewisse Betriebsgebäude und Bürogebäude.

Inhaltlich schreibt die EnEV den Bauherren vor, welche bautechnischen Standardanforderungen für einen effizienten Betriebsenergiebedarf ihres Gebäudes einzuhalten sind

Bei der Dämmung von verschiedenen Gebäudeteilen wie z.B. Fassade, Dach, Boden oder neuen Fenstern sind von der EnEV verschiedene Wärmedurchgangskoeffizienten, die sogenannten U-Werte vorgeschrieben.

Die EnEV schreibt für Neubauten individuelle Maximalwerte für den Primärenergiebedarf vor. Diese Maximalwerte hängen von der Geometrie und Ausrichtung des Gebäudes ab und müssen für jeden Neubau neu berechnet werden. Von Vorteil ist dagegen, dass nicht nur dicke Isolierungen den Primärenergiebedarf senken, sondern auch umweltfreundliche Wärmequellen, wie z.B. Holz oder Sonnenenergie.

Für Altbauten gilt ein 40% höherer Grenzwert für den Primärenergiebedarf oder alternativ eine wesentlich einfachere Regel:

Werden bestimmte Bauteile verändert oder erneuert, gelten fest vorgeschriebene Maximalwerte für den zu erzielenden U-Wert. Diese Grenzwerte können z.B. auf EnEV-Online.org nachgeschlagen werden. So beträgt z.B. der maximal erlaubte U-Wert für Außenwände $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ vor. Dies bedeutet für eine 24 cm starke Wand aus Vollziegeln eine Isolierung von 15 cm Dämmstoff (WLG040). Um Wärmebrücken und eine Schießscharten-Optik zu vermeiden, sollten Fenster in die Dämmebene hinein verschoben werden, d.h. von außen auf die ungedämmte Fassade aufgesetzt werden. Wird dies aus Kostengründen unterlassen, ändert sich das äußere Erscheinungsbild negativ und es steigt die Gefahr von Schimmelbildung im Bereich der Wärmebrücken.

Eine Befreiung von den Anforderungen der EnEV ist möglich, insbesondere "soweit die Anforderungen im Einzelfall wegen besonderer Umstände durch einen unangemessenen Aufwand oder in sonstiger Weise zu einer unbilligen Härte führen." Siehe §25.

5.6.2 Hinweise zur effektiven Wärmedämmung

1. Für gute Dämmeigenschaften ist eine Außendämmung gegenüber einer Innendämmung (weniger Wärmebrücken und besserer Feuchteschutz) bevorzugt.
2. Die einzelnen Schichten des Bauteils sollten von innen nach außen diffusionsoffener werden, d.h. die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ sollte von innen nach außen abnehmen.
3. Vermeidung von Dampfsperren: Wenn ein Tauwasserausfall nicht konstruktiv vermieden werden kann, hilft eine raumseitig angeordnete Dampfbremse. Dampfsperren sollten vermieden werden, da sie selten dauerhaft dicht bleiben.
4. Der Transmissionswärmeverlust ist nur ein Teil des Gesamtwärmeverlustes. Bei gut gedämmten Gebäuden beträgt er etwa 30%. Deswegen ist die Optimierung der Lüftungsverluste und Ihrer Heizungsanlage von großer Bedeutung.

5.6.3 Ausgewählte Dämmmaterialien

Ausgangspunkt bei der Auswahl geeigneter Dämmmaterialien für die RC-Wohneinheit ist die Gewährleistung der nach EnEV [64] angeforderten Dämmwirkung sowie die Forderung nach bestmöglicher Rezyklierbarkeit. Insbesondere für die Gebäudehülle erfordert die gewünschte Kombination aus guter Rezyklierbarkeit und anspruchsvoller energetischer Performance neue Lösungsansätze.

Aufgrund deren guten Dämmeigenschaften und Rezyklierbarkeit werden Dämmplatten aus Mineralwolle für die Wand- und Dachstruktur sowie begehbare Dämmplatten aus Hartschaum (fermacell [63]) für die Bodenplatte und Zwischendeckenstruktur (Im Falle der zweigeschossigen Wohneinheit) verwendet.

5.6.4 Bauphysikalische Analyse des Wandaufbaues

Durch die Berechnung des U-Wertes werden die RC-Bauteile (Wände, Decken und Fußboden) nach jeder Änderung hinsichtlich ausreichender Dämmwirkung (EnEV), möglicher Feuchteschäden und sommerlichem Hitzeschutz analysiert.

Der Wandaufbau der RC-Wohneinheit ist grafisch im Bild 81 sowie tabellarisch in der *Tabelle 19* dargestellt.

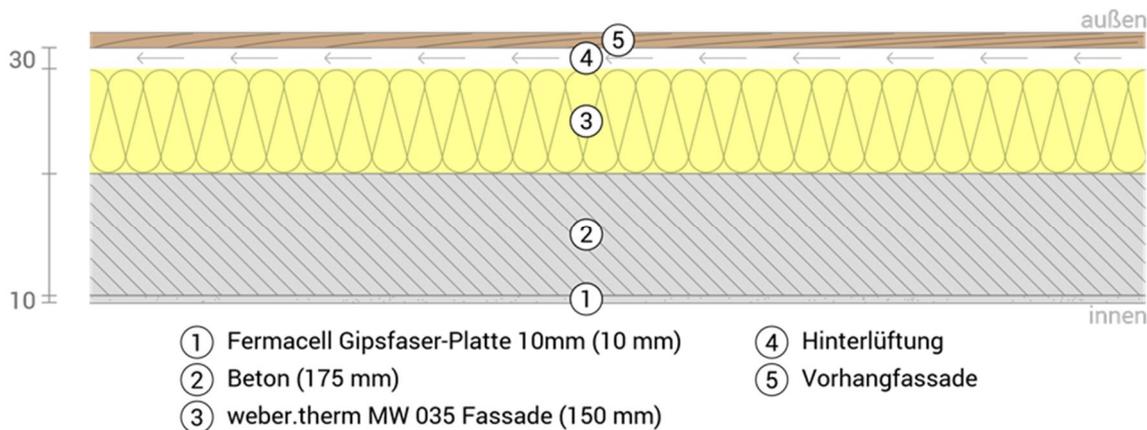


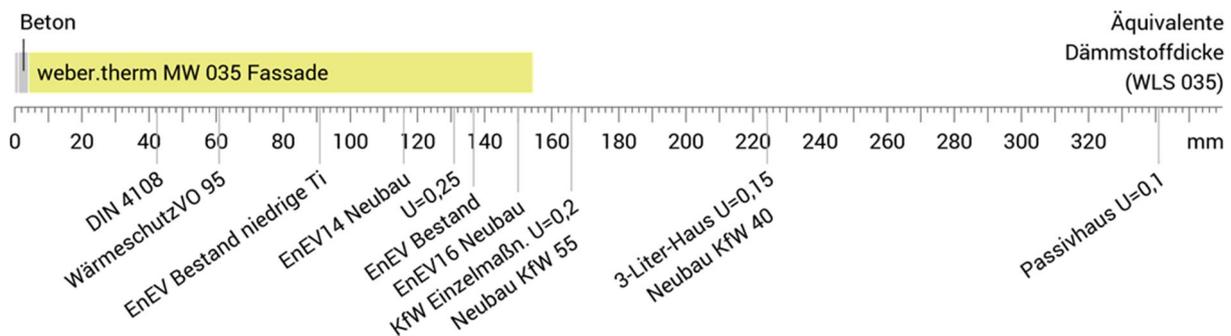
Bild 81. Darstellung des Wandaufbaus der RC-Wohneinheit

Tabelle 19: Schichten (von innen nach außen) der Wand der RC-Wohneinheit

#	Material	λ [W/m K]	R [m ² K/ W]	Temperatur [°C]		Gewicht [kg/m ²]
				min	max	
	Wärmeübergangswiderstand*		0,130	19,3	20,0	
1	1 cm Fermacell Gipsfaser-Platte 10mm	0,32	0,031	19,1	19,3	11,5
2	17,5 cm Beton	2,00	0,088	18,6	19,1	420,0
3	15 cm weber.therm MW 035 Fassade	0,03	4,286	-4,8	18,6	19,5
	Wärmeübergangswiderstand*		0,130	-5,0	-4,8	
4	Hinterlüftung (Außenluft)			-5,0	-5,0	0,0
5	Vorhangfassade			-5,0	-5,0	9,5
	38,6 cm Gesamtes Bauteil		4,664			460,5

*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 6946 für die U-Wert-Berechnung. Für Feuchteschutz und Temperaturverlauf wurden R_{si}=0,25 und R_{se}=0,04 gemäß DIN 4108-3 verwendet.

Für die folgende Darstellung (Bild 82) werden die Wärmedurchgangswiderstände (Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf das verwendete Dämmstoff (Mineralwolle) der Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/mK.

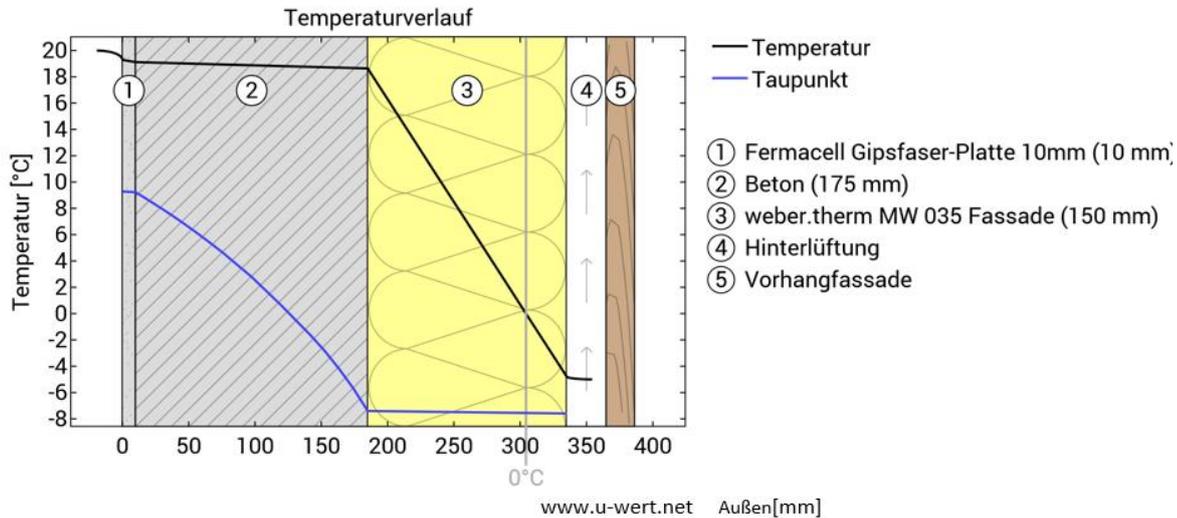


Dämmwirkung einzelner Schichten des Wandaufbaues der RC-Wohneinheit

Temperaturverlauf/Wärmeschutz:

Der Verlauf von Temperatur und Taupunkt innerhalb des Wandaufbaues ist im Bild 83 dargestellt. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Wandaufbaues an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Be-

rührungspunkten Tauwasser aus. Bei der vorgegebenen Darstellung verfügt der Wandaufbau der RC-Wohneinheit über einen U-Wert in Höhe von $0,214 \text{ W/m}^2\text{K} < 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ und erfüllt damit die Anforderung der EnEV [64]. Die Abbildung vom Tauwasser ist ebenfalls ausgeschlossen.



Der Temperaturverlauf innerhalb der Wand der RC-Wohneinheit

Luftfeuchtigkeit:

Die Oberflächentemperatur der Wandinnenseite beträgt $19,3 \text{ °C}$ was zu einer relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von 52% führt. Unter diesen Bedingungen sollte nicht mit Schimmelbildung zu rechnen sein. Das folgende Diagramm (Bild 84) zeigt die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Bauteils.

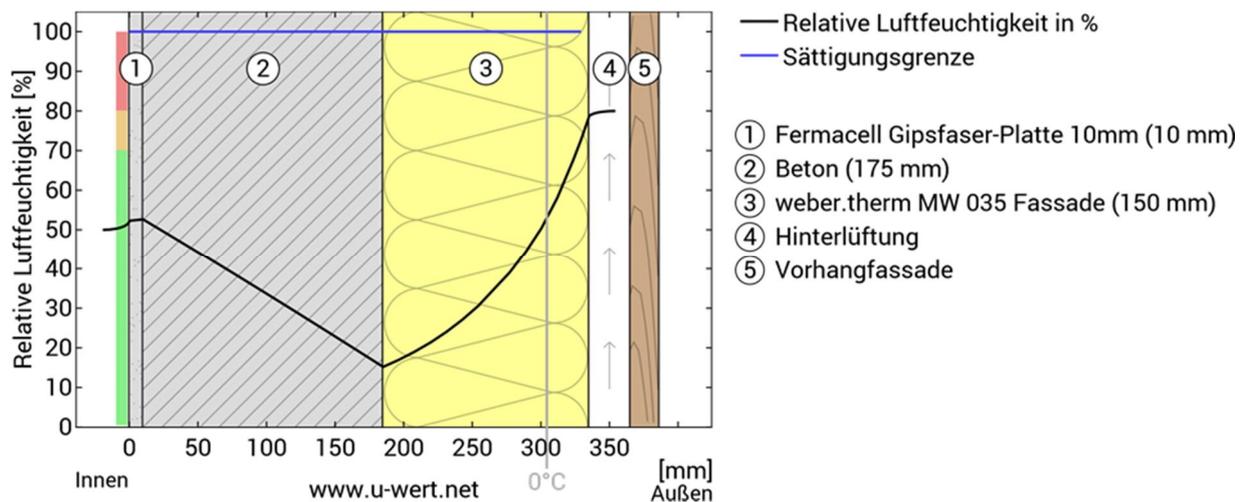
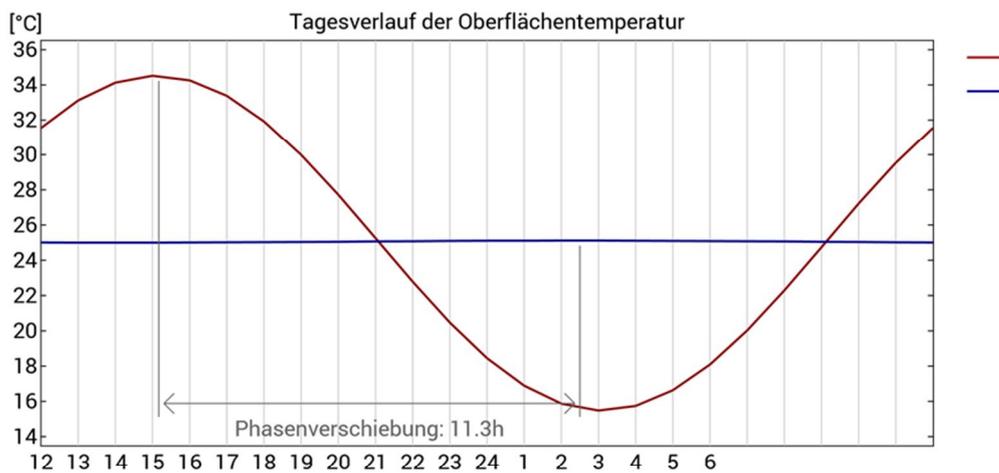
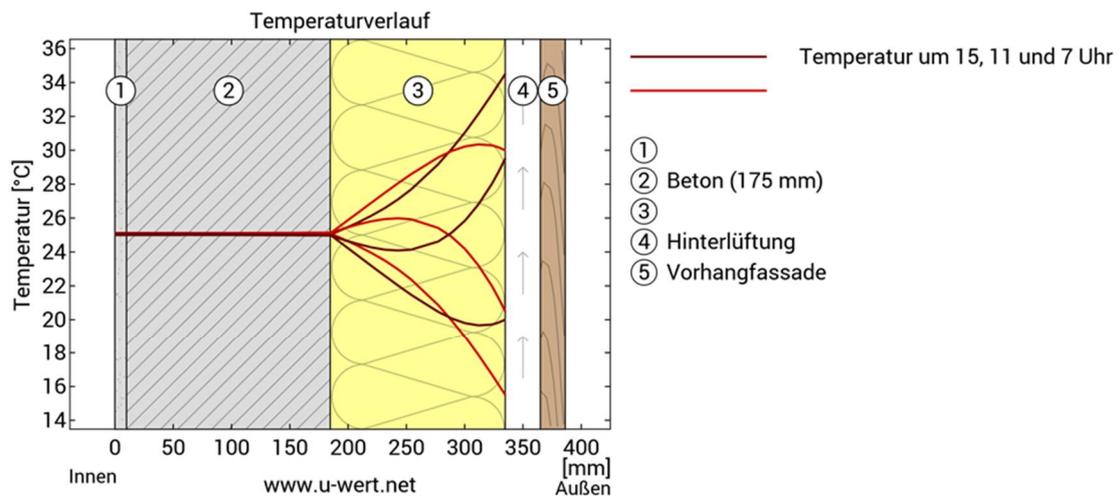


Bild 84. Luftfeuchtigkeit im Wandaufbau der RC-Wohneinheit, $U=0,214 \text{ W/m}^2\text{K}$

Sommerlicher Wärmeschutz:

Für die Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes wurden die Temperaturänderungen innerhalb des Wandaufbaues im Verlauf eines heißen Sommertages simuliert (Bild 85):



Obere Abbildung: Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils zu verschiedenen Zeitpunkten. Jeweils von oben nach unten, braune Linien: um 15, 11 und 7 Uhr und rote Linien um 19, 23 und 3 Uhr morgens.
Untere Abbildung: Temperatur auf der äußeren (rot) und inneren (blau) Oberfläche im Verlauf eines Tages. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Temperaturhöchstwerte. Das Maximum der inneren Oberflächentemperatur sollte möglichst während der zweiten Nachthälfte auftreten.

Phasenverschiebung*	nicht relevant	
Amplitudendämpfung**	>100	Temperaturschwankung auf äußerer Oberfläche:
TAV***	0,006	Temperaturschwankung auf innerer Oberfläche: 0,1°C

Bild 85. Tagesverlauf der Oberflächentemperatur im Wandaufbau der RC-Wohneinheit

5.6.5 Bauphysikalische Analyse des Dachaufbaues

Der Dachaufbau der RC-Wohneinheit ist grafisch im Bild 86 sowie tabellarisch in der *Tabelle 20* dargestellt.

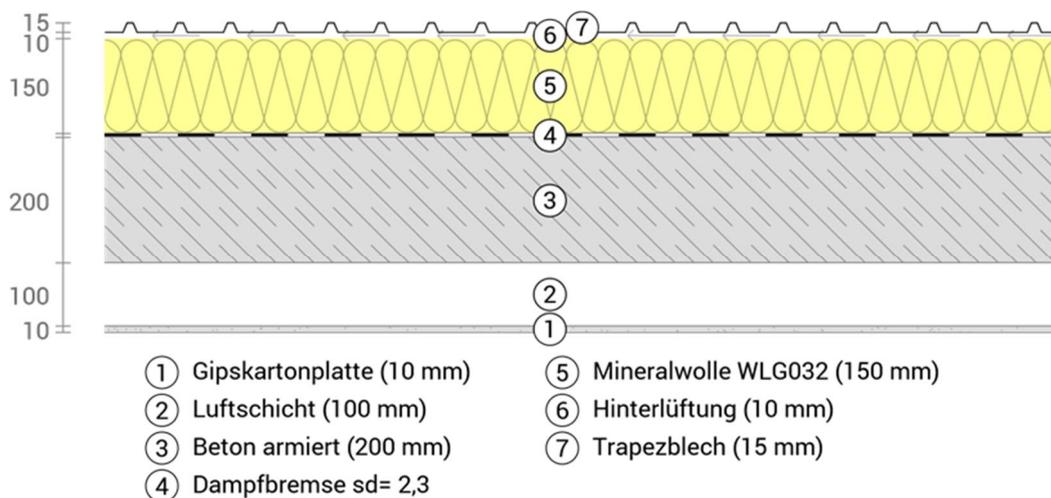


Bild 86. Darstellung des Dachaufbaus der RC-Wohneinheit

Tabelle 20: Schichten (von innen nach außen) des Daches der RC-Wohneinheit

#	Material	λ [W/m K]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C] min max		Gewicht [kg/m ²]
	Wärmeübergangswiderstand*		0,100	18,8	20,0	
1	1 cm Gipskartonplatte	0,25	0,040	18,6	18,8	6,8
2	10 cm Luftschicht (ruhend)	0,62	0,160	17,9	18,6	0,1
3	20 cm Beton armiert (2%)	2,10	0,095	17,4	17,9	480,0
4	0,05 cm Dampfbremse sd= 2,3	0,22	0,002	17,4	17,4	0,1
5	15 cm Mineralwolle WLG032	0,03	4,688	-4,8	17,4	3,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,100	-5,0	-4,8	
6	1 cm Hinterlüftung (Außenluft)			-5,0	-5,0	0,0
7	1,5 cm Trapezblech			-5,0	-5,0	1,5
48,55	Gesamtes Bauteil cm		5,185			491,6

*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 6946 für die U-Wert-Berechnung. Für Feuchteschutz und Temperaturverlauf wurden R_{si}=0,25 und R_{se}=0,04 gemäß DIN 4108-3 verwendet.

Für die folgende Darstellung (Bild 87) werden die Wärmedurchgangswiderstände (Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf den verwendeten Dämmstoff (Mineralwolle) der Wärmeleitfähigkeit 0,032 W/mK.

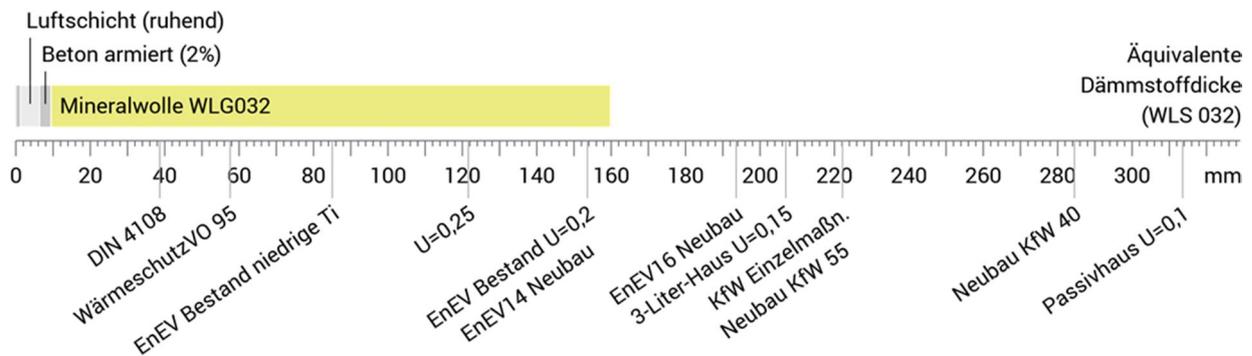


Bild 87. Dämmwirkung einzelner Schichten des Dachaufbaues der RC-Wohneinheit

Temperaturverlauf/Wärmeschutz:

Der Verlauf von Temperatur und Taupunkt innerhalb des Dachaufbaues ist im Bild 83 dargestellt. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Dachaufbaues an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus. Bei der vorgegebenen Darstellung verfügt das Dachaufbau der RC-Wohneinheit über einen U-Wert in Höhe von $0,193 \text{ W/m}^2\text{K} < 0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ und erfüllt damit die Anforderung der EnEV [64]. Die Abbildung vom Tauwasser ist ebenfalls ausgeschlossen.

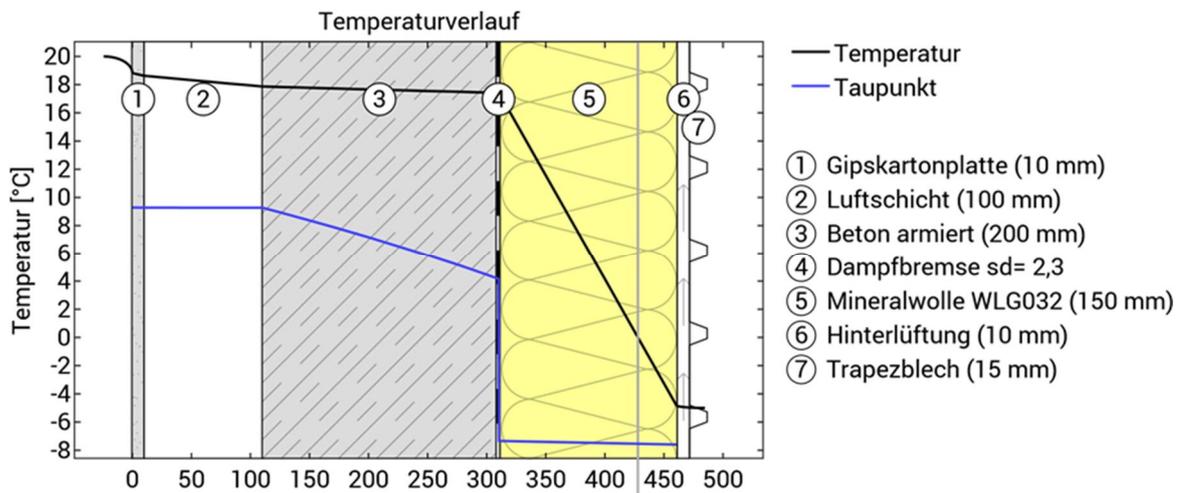


Bild 88. Der Temperaturverlauf innerhalb des Daches der RC-Wohneinheit

Luftfeuchtigkeit:

Die Oberflächentemperatur der Dachinnenseite beträgt $18,8 \text{ °C}$ was zu einer relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von 54% führt. Unter diesen Bedingungen sollte nicht mit Schimmelbildung zu rechnen sein. Das folgende Diagramm (Bild 89) zeigt die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Bauteils.

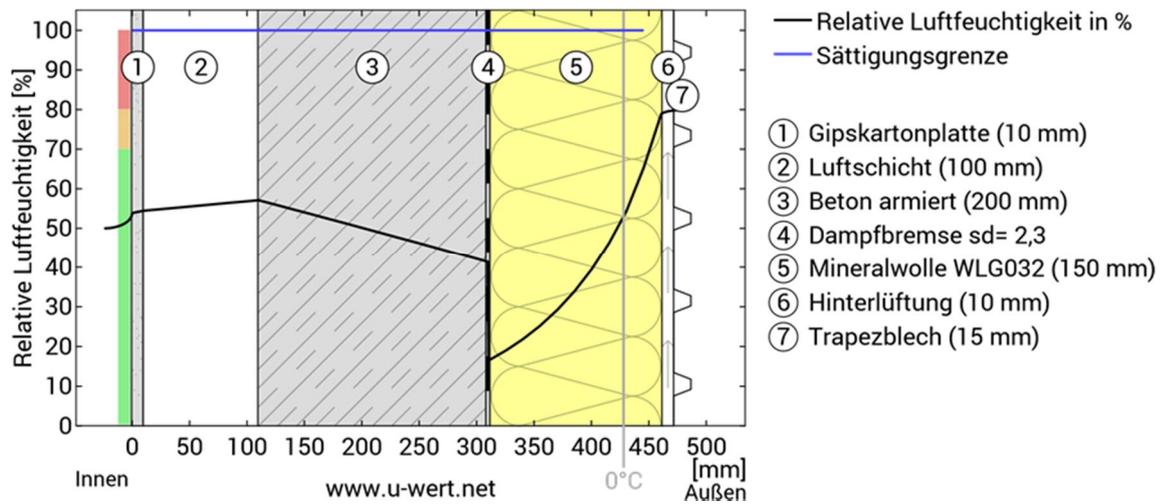


Bild 89. Luftfeuchtigkeit im Dachaufbau der RC-Wohneinheit, $U=0,193 \text{ W/m}^2\text{K}$

Sommerlicher Wärmeschutz:

Für die Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes wurden die Temperaturänderungen innerhalb des Dachaufbaues im Verlauf eines heißen Sommertages simuliert (Bild 90):

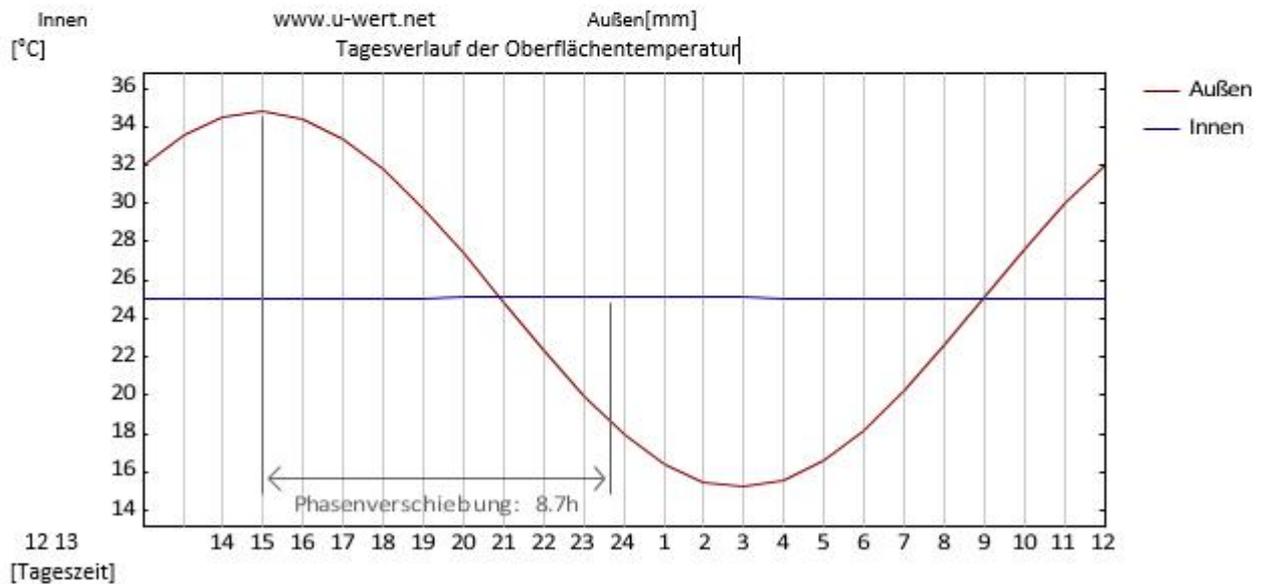
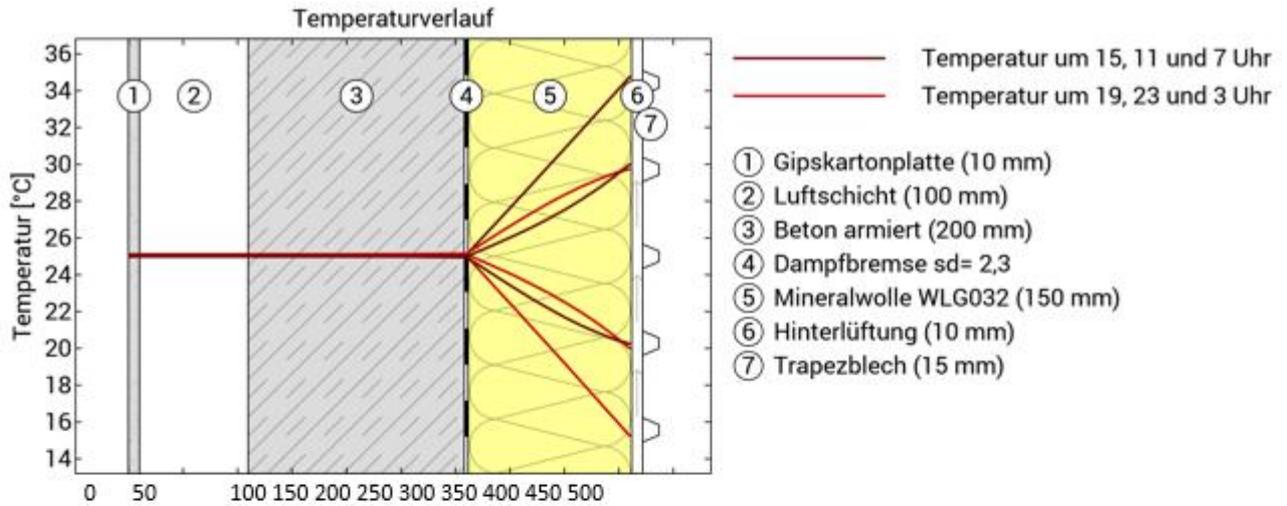


Abbildung: Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils zu verschiedenen Zeitpunkten. Jeweils von oben nach unten, braune um 15, 11 und 7 Uhr und rote Linien um 19, 23 und 3 Uhr morgens.

Abbildung: Temperatur auf der äußeren (rot) und inneren (blau) Oberfläche im Verlauf eines Tages. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Temperaturhöchstwerte. Das Maximum der inneren Oberflächentemperatur sollte möglichst während der zweiten Nachthälfte auftreten.

Bild 90. Tagesverlauf der Oberflächentemperatur im Dachaufbau der RC-Wohneinheit

5.6.6 Bauphysikalische Analyse des Fußbodenaufbaues

Der Fußbodenaufbau der RC-Wohneinheit ist grafisch im Bild 91 sowie tabellarisch in der *Tabelle 21* dargestellt.

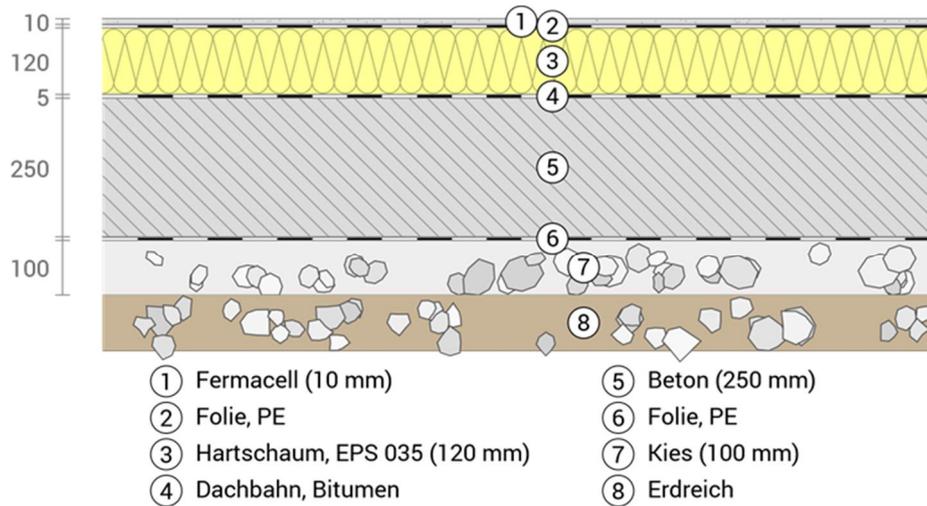


Bild 91. Darstellung des Fußbodenaufbaus der RC-Wohneinheit

Tabelle 21: Schichten (von innen nach außen) des Fußbodens der RC-Wohneinheit

#	Material	λ [W/mK]	R [m ² K/W]	Temperatur [°C] min max		Gewicht [kg/m ²]
	Wärmeübergangswiderstand*		0,170	19,1	20,0	
1	1 cm Fermacell	0,320	0,031	18,9	19,1	11,5
2	0,02 cm Folie, PE	0,400	0,001	18,9	18,9	0,2
3	12 cm Hartschaum, EPS 035	0,035	3,429	5,9	18,9	3,6
4	0,5 cm Dachbahn, Bitumen	0,170	0,029	5,8	5,9	5,3
5	25 cm Beton	2,000	0,125	5,3	5,8	600,0
6	0,01 cm Folie, PE	0,400	0,000	5,3	5,3	0,1
7	10 cm Kies (erdfeucht)	2,000	0,050	5,2	5,3	220,0
	Wärmeübergangswiderstand*		0,000	5,0	5,2	
8	Erdreich			5,0	5,0	82,5
48,53	Gesamtes Bauteil cm		3,836			840,6

*Wärmeübergangswiderstände gemäß DIN 6946 für die U-Wert-Berechnung. Für Feuchteschutz und Temperaturverlauf wurden R_{si}=0,25 und R_{se}=0,04 gemäß DIN 4108-3 verwendet.

Für die folgende Darstellung (Bild 92) werden die Wärmedurchgangswiderstände (Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf den verwendeten Dämmstoff (Mineralwolle) der Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/mK.

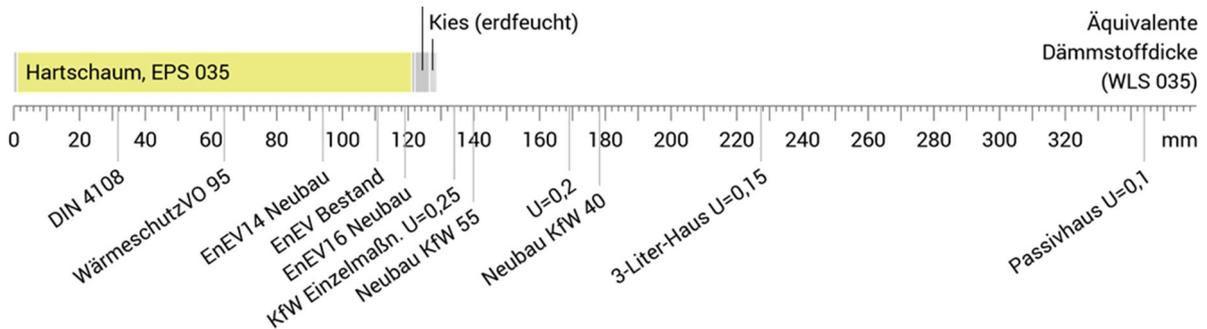


Bild 92. Dämmwirkung einzelner Schichten des Fußbodenaufbaues der RC-Wohneinheit

Temperaturverlauf/Wärmeschutz:

Der Verlauf von Temperatur und Taupunkt innerhalb des Fußbodenaufbaues ist im Bild 93 dargestellt. Der Taupunkt kennzeichnet die Temperatur, bei der Wasserdampf kondensieren und Tauwasser entstehen würde. Solange die Temperatur des Fußbodenaufbaues an jeder Stelle über der Taupunkttemperatur liegt, entsteht kein Tauwasser. Falls sich die beiden Kurven berühren, fällt an den Berührungspunkten Tauwasser aus. Bei der vorgegebenen Darstellung verfügt das Fußbodenaufbau der RC-Wohneinheit über einen U-Wert in Höhe von $0,261 \text{ W/m}^2\text{K} < 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ und erfüllt damit die Anforderung der EnEV [64]. Die Abbildung vom Tauwasser ist ebenfalls ausgeschlossen.

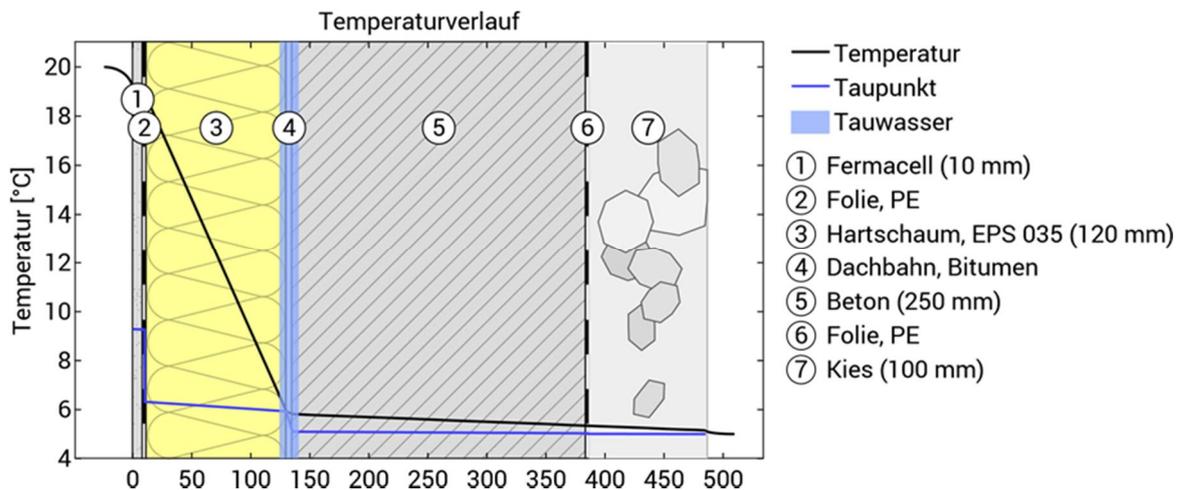


Bild 93. Der Temperaturverlauf innerhalb des Fußbodens der RC-Wohneinheit

Luftfeuchtigkeit:

Die Oberflächentemperatur der Fußbodeninnenseite beträgt $19,9 \text{ °C}$ was zu einer relativen Luftfeuchtigkeit an der Oberfläche von 53% führt. Unter diesen Bedingungen sollte nicht mit Schimmelbildung zu rechnen sein. Das folgende Diagramm (Bild 89) zeigt die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb des Fußbodenaufbaues.

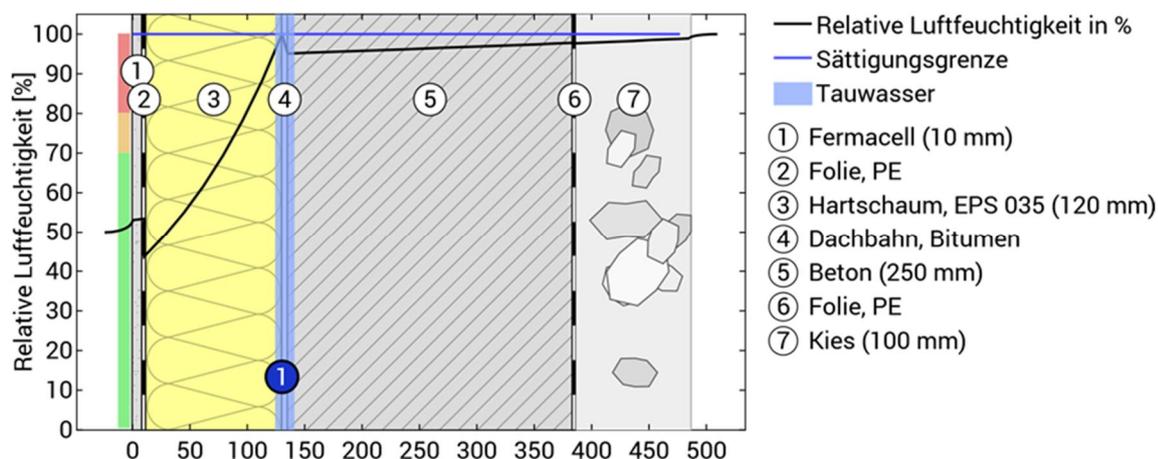


Bild 94. Luftfeuchtigkeit im Fußbodenaufbau der RC-Wohneinheit, $U=0,261$ W/m^2K

5.7 Ausbau/Innenausbau

Mit diesem Kapitel sollen Lösungen für die Gestaltung von Dach, Fassade einschließlich Hauseingangstür und Fenster der RC-Wohneinheit unter dem Aspekt von Demontierbarkeit und Wiederverwendung dargestellt werden.

5.7.1 Die Schichtenlösung für Dach

Unter diesem Aspekt werden für den Dachaufbau mehrere Lösungen vorgeschlagen. Eine Lösung wurde mit Trapezblechdeckung nach DIN 18807[73] konzipiert. Für den Fall der Gewährleistung der Begehbarkeit wird das Trapezblech von Hoesch T100.1 075 ausgewählt, das bei optimalem Gewicht ($9,05 \text{ kg/m}^2$) und der vorhandenen Typenprüfung nach DIN EN 1993-1-3 eine Überspannung der gesamten Tiefe des RC-Moduls bei nur zwei Auflagern zulässt [74]. Eine Begehbarkeit ohne lastverteilende Maßnahmen ist mit dieser Auswahl gegeben. Als Auflager für das Trapezblech dient das Attika (Höhe 25 cm). Das Attika wird durch die RC-Stahlbetonbalken gebildet, welche mit Edelstahlgewindestäben M12, Edelstahlmuttern und U-Scheiben an der RC-Stahlbetondecke gesichert werden. Die Gewindestäbe werden in je 6 Stück mittig angeordneten Hülsenankern T-Fixx von Halfen verankert, die im Betonwerk im Abstand von $995 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ während des Herstellungsprozesses in den Deckenplatten auf der Längsseite impliziert werden [75]. Für den Fall eines unbegehbaren Daches können Trapezbleche mit geringeren Höhen (T35) benutzt werden, welche analog zum Fassadensystem (Kapitel 5.5.2) an die Deckenplatte befestigt werden.

Bei dem Pilotprojekt können sowohl die Löcher für die Gewindestäbe als auch notwendige Aussparungen für Spannglieder ohne Probleme vor Ort eingebracht werden. Zum Erfüllen einer sinnvollen Lösung für die Dachentwässerung werden die Trapezbleche einseitig durch ein passendes Stahlprofil (HEA100) höher angeordnet. Das HEA Profil wird auf der RC-Betondachplatte verschraubt.

Die bereits vormontierte Dampfbremse (siehe 5.7.6) wird nur punktuell durchbrochen. Bei wiederholter Montage erübrigen sich diese Anpassungsarbeiten. Auf der Dampfbremse werden vor Montage der Trapezbleche die Dämmplatten Fixrock 035 in einer Dicke von 200 mm dicht und lose im Ortbereich bis Außenkante Fassadendämmung verlegt. Die Dicke der Dämmung wurde unter dem Aspekt einer geringen Heizlast gewählt (siehe 5.6). Die Trapezblechdeckung mit einer Dachneigung von 3° - da ohne Querstoß - wird mittels Edelstahlschrauben JA3 6,5 x 175 E16 mit Scheibe und Kalotten W17/40 in Positivlage mit den Auflagern verbunden. Die Längsstöße der

Trapezbleche werden mittels Butyldichtband 4 x 20 mm gedichtet und mit Fassadenbauschrauben 4,8 x 22 mit Dichtscheibe und EPDM Abdichtung im Abstand ≤ 500 mm verschraubt.

Der Ortgang der Deckung wird mit einem Hoeschprofil K40-033 und einem Lochprofil 35 x 60 x 170mm zum Beispiel von Maas, das mit dem T-Profil der Fassade verschraubt wird, gebildet

Analog wird der Pultfirst mit einer Pultfirstkappe K40-0041 und dem gleichen Lochprofil gestaltet. Die Abstände der Schraubverbindungen von 500 mm sollten exakt mit Maßtoleranzen von < 2 mm eingehalten werden (Bild 95).

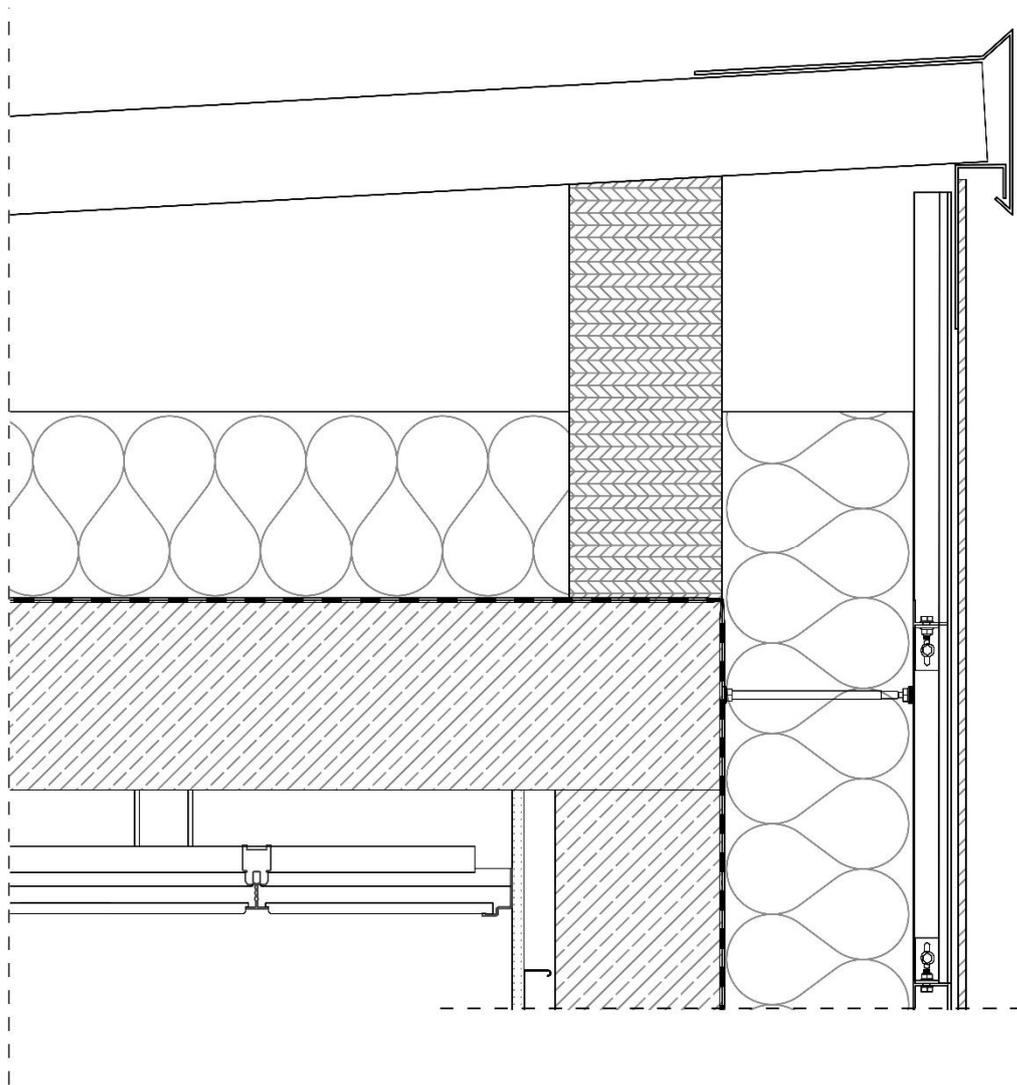


Bild 95. Schnittzeichnung- Darstellung Pultfirst

Der Traufbereich wird mit einem Hoesch Wasserleitblech K30-0124 und dem Rinneneinlaufblech K30-131 in Verbindung mit der Dachrinne gebildet. Für die Rinne wurde das System von Lindab mit der Nenngröße 100 ausgewählt [76]. Die Rinnenhalterung (SSK verstellbare Konsolrinneneisen Gr. 100) werden im Abstand von 500 mm mit den Fassaden T-Profilen oder der Fassadenverkleidung verschraubt. Das Fallrohr hat eine Nennweite von 75 mm (Bild 96).

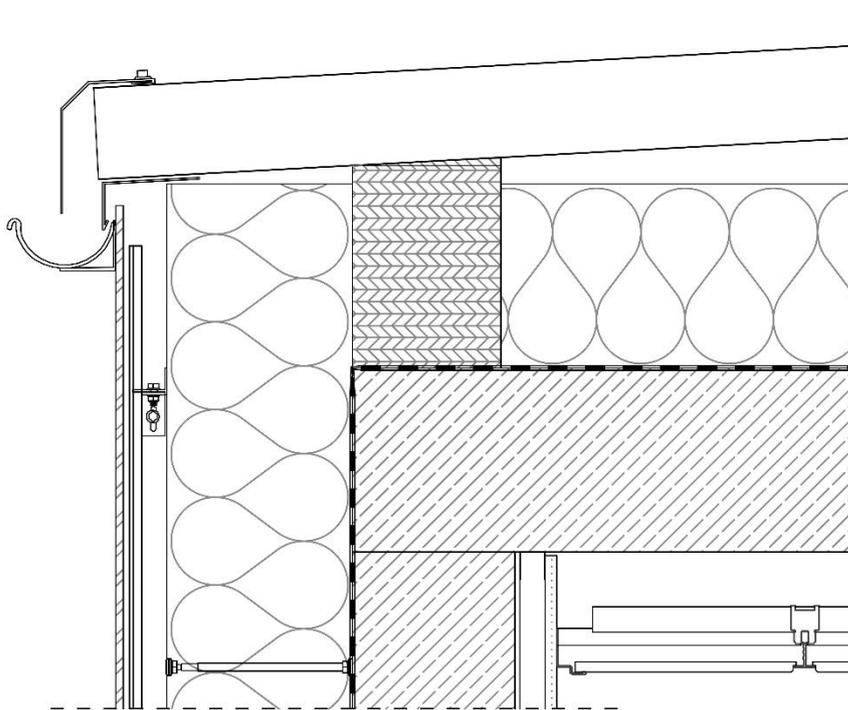


Bild 96. Schnittzeichnung - Darstellung Traufe Schnitt

5.7.2 Die Schichtenlösung für Fassade

Ausgehend von dem Grundanliegen der Rezyklierbarkeit verbieten sich herkömmliche Wärmeverbundsysteme mit unterschiedlichsten Putzaufträgen.

Als Lösung wird daher eine hinterlüftete Vorhangfassade (VHF) gewählt, die nicht nur den Wetter- schutz und die Wärmedämmung garantiert, sondern auch die Aufheizung des Bauwerks im Sommer verhindert. Analog des Daches wird wegen der angestrebten geringen Heizlast eine Stein- wolldämmung WLG 035 mit 150/200 mm Dicke der Firma Rockwool (Fixrock) gewählt. Diese Dämmplatte der Baustoffklasse A wurde speziell für hinterlüftete Fassaden entwickelt [77]. Nach DIN 18516 bzw. DIN18351 sind Dämmplatten in der Regel mit 5 Dämmstoffhaltern pro Platte zu sichern oder zu verkleben. Unter dem Aspekt der Demontierbarkeit ist diese Lösung kontrapro- duktiv. Die Deutsche Rockwool entwickelte eine Ein- Dübel- Befestigung, die eine Befestigung mit nur einem Dübel pro Platte zulässt. Nur im Randbereich des Gebäudes sind zwei Dübel erforder- lich. Die Dübel werden nach Vorbohren eines Loches im RC-Beton eingeschlagen und nachträglich der Kunststoffteller \varnothing 90 mm aufgesetzt [19]. Bei der Demontage kann der Teller abgezogen und die Dämmstoffplatten wiederverwendet werden. Die Dübel sind zu ziehen und im Notfall abzufle- xen. Im unteren Bereich wird die Dämmung 150 mm über OKG mit einem Abschlussprofil zum Beispiel Protector Systemwinkel 9472 gesichert, das mittels Hohlraumanker zum Beispiel FHY M6 der Firma Fischer und Schrauben M6 und U-Scheibe am Fundamentbalken befestigt wird. Die Hohlraumdübel können bei der Demontage im Balken verbleiben und so wiederverwendet wer- den. Als Fassadenverkleidung wird wegen des geringeren Gewichtes eine Dicke von 8mm vorge- sehen. Angeboten werden diese Verkleidungen z.B. von RESOPAL, TRESPA und Eternit [79][80][81]. Ausgewählt wurde die Fassadentafel EQUITONE tectiva von Eternit 8mm, die als Faserbetonerzeugnis gegenüber den Kunst-harz-basierten Platten den kleineren energetischen

Fußabdruck hinterlässt. Die Platten gibt es in verschiedenen Farbvarianten. Die Platte tectiva ist sowohl für eine sichtbare Befestigung als auch einer Montage mit Hinterschnittdübel geeignet. Als Unterkonstruktion der hinterlüfteten VHF dienen sowohl Holz als auch Metallunterkonstruktionen. Aufgrund der Dicke der Dämmung und der möglichen Wiederverwendbarkeit ist einer Metallkonstruktion der Vorrang einzuräumen.

Unterkonstruktionen aus Metall werden von einer Vielzahl von Firmen angeboten. Genannt seien beispielhaft die Firmen Sto, Systema und Hilti [82] [83] [84]. Bei einer nicht sichtbaren Hinterschnittmontage folgt der grundsätzliche Aufbau einem einheitlichen Muster (Bild 97).

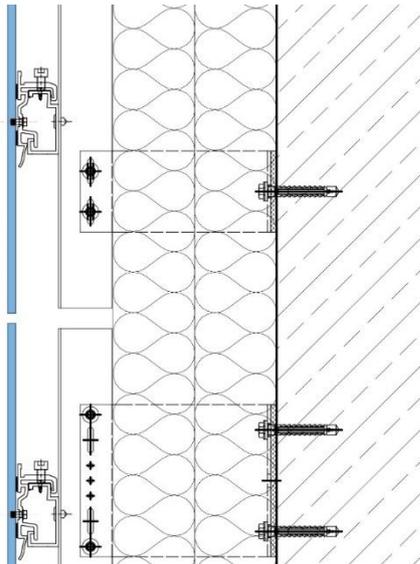


Bild 97. Vertikalschnitt VHF Wandhalter, Resopal GmbH, „www.resopal.de,“ [Online]. Available: http://static.wilsonart.com.cdnga.net/sites/resopal/files/docs/resources/resopal_facade_verarbeitungshinweise.pdf. Seite 25 [Zugriff am 04. 07. 2017].

Die auf dem Mauerwerk durch Dübel- Schraubverbindung befestigten Wandhalter dienen der Aufnahme vertikaler Tragprofile, an denen die horizontalen „Agraffenprofile“ befestigt werden. An den mit Hinterschnittdübeln versehenen Fassadenplatten werden die sogenannten Agraffen verschraubt und anschließend in die Agraffenprofile eingehängt. An den Fixpunkten werden die Agraffen mit dem Profil verschraubt. An den Gleitpunkten erfolgt keine Verschraubung der Agraffe, um thermische Längenausdehnungen auszugleichen. Bei den gewählten Eternitplatten empfiehlt der Hersteller die Hinterschnittdübel (Edelstahl M6) werkseitig einzubringen. Zwischen den einzelnen Platten ist ein Luftspalt von 10mm vorzusehen.

Diese Montageart bedingt eine genaue Vorplanung der VHF gemäß DIN 18516 [85] unter Einbeziehung von Windlast und Eigengewicht von Fassadenplatte und Unterkonstruktion, um die Anzahl und Lage der Fix- und Gleitbefestigungspunkte festlegen zu können.

Für die volle Wirksamkeit der Wärmedämmung ist eine wärmebrückenarme Wandhalterung erforderlich, die zum Beispiel Hilti mit seinem System Fox-VT anbietet [84]. Einen anderen Ansatz verfolgt die Firma mCon GmbH, die nur mit Edelstahlstäben punktuelle Verbindungen zwischen Baukörper und VHF herstellt (s. 17.2). Wegen der geringen Anzahl der Befestigungspunkte und der variablen Befestigungsmöglichkeit ist dieser Unterkonstruktion beim RC-WE-Modul der Vorzug zu geben. Insbesondere kann eine Befestigung im Fugenbereich der RC-Betonsteine durch V-Anordnung der Edelstahlstäbe vermieden werden.

Die Befestigung der Edelstahlstäbe kann sowohl mit Bolzenanker M8 A4 als auch Hülsen-dübel M8 A4 erfolgen, die bei der Demontage im RC-Betonstein verbleiben. Zum Einsatz können zum Beispiel Fischer Bolzenanker FAZ II 8/50 A4 [86] und Bolzenanker mit Innengewinde M8 von inox boli 8050-4 [87] kommen.

Die Anordnung der Unterkonstruktion und der Fassadenplatten ist den Anlagen Nummer 3-1 und 3-2 zu entnehmen.

Wegen der einfachen Montage und Demontierbarkeit wurde eine sichtbare Verschraubung der Fassadenplatten gewählt. Die Fassadenplatten können dann vor Ort die notwendigen Bohrungen für die Fix- und Gleitpunkte erhalten. Die Verschraubung mit den Einschubadaptern AB1 erfolgt mittels Blindnietmutter zum Beispiel HEXATOP-E-KLSK-G A2 M6 [88] und Flachrundkopfschrauben mF A4 M6 x 22 [89]. An den in der Regel mittig der Fassadenplatten angeordneten Fixpunkten werden die Schrauben mit einer Hülse versehen. Die vertikale Fixierung der Fixpunkte wird durch „Quetschen“ des Vertikalprofils AP2 unterhalb des Einschubadapters erreicht. Im Bereich der vertikalen Plattenstöße werden die Adapter nur einseitig im Profil AP2 eingeführt, um den Plattenabstand von 10mm zu gewährleisten.

Die Vertikalprofile AP2 werden im Bereich OK Dachplatte und Bodenplatte durch horizontal angebrachte Aluminiumlüftungsprofile AL1 mittels Winkel AW1 und M6 Edelstahlschrauben mit Mutter und Sprengling gegen Verschieben gesichert.

Im Bereich der Dachkonstruktion werden soweit erforderlich die Vertikalprofile AP2 zusätzlich mit Horizontalstäben und im Bereich des Ortganges mit S-Stäben, die mit Bolzenanker auf der Dachplatte verschraubt werden, gegen Verschiebung durch Winddruck/-Sog gesichert.

Fenster und Türsturz einschließlich der seitlichen Abschlüsse erhalten eine Verkleidung vorzugsweise aus Edelstahlblech $\geq 1\text{mm}$, die mit der Fassadenplatte und dem Fensterrahmen durch Schrauben A4 verbunden werden, sodass eine Wiederverwendung gewährleistet ist (Bild 98).

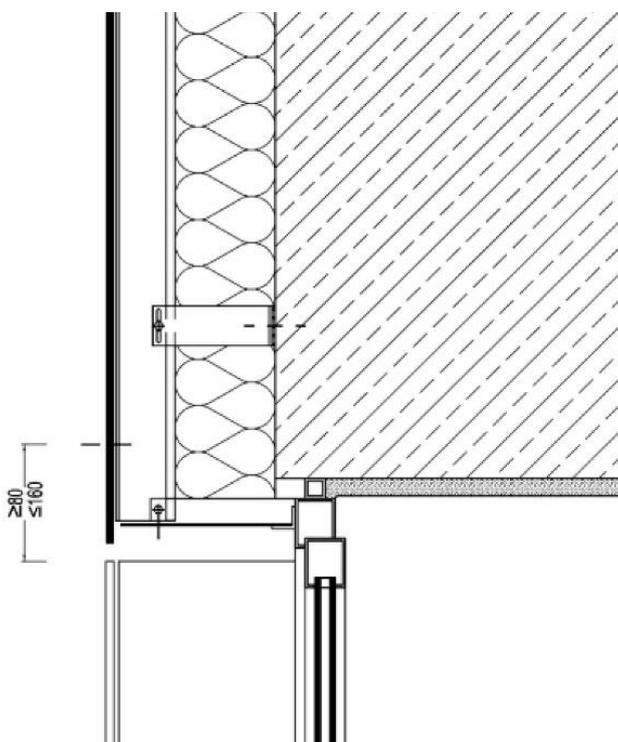


Bild 98. Vertikalschnitt Eternit GmbH, „<http://www.eternit.de>,“ [Online]. Available: http://www.eternit.de/downloads/downloads/dl/file/id/1136/eternit_planung_anwendung_fassadentafas_equitone_02_2017.pdf. Seite 58 [Zugriff am 06. 07. 2017].

5.7.3 Fenster und Tür

Unter dem Blickwinkel der Wiederverwendung werden für das WE-Modul Fenster und Haustür als Aluminiumelemente vorgesehen. Holz- und Kunststoffelemente sind wegen der leichten Verletzungsgefahr aus Sicht des Verfassers ungeeignet. Darüber hinaus neigen Kunststoffe zur Versprödung. Holzfenster sind relativ wartungsintensiv. Im Gegensatz hierzu sind Aluminiumelemente form- und wetterbeständig. Sie benötigen nur geringen Wartungsaufwand und erreichen heute vergleichbar gute Schall- und Wärmedämmeigenschaften wie Holzfenster. Nachteil von Alufenstern und Türen gegenüber Holzfenstern ist trotz guter Rezyklierbarkeit die Ökobilanz, da die Herstellung sehr energieintensiv ist.

Für die Fenster wurde das System Schüco AWS/ADS 112.IC als einteiliges Aluminiumelement vorgeschlagen. Die Fensterelemente haben Abmessungen von 980 x 1480 mm bzw. 480 x 980 mm oder (730 x 980 mm beim Endentwurf) (Bild 99, Bild 100). Eine ursprünglich vorgesehene Größe von 500 x 500 mm hat sich nach Rücksprache mit dem potenziellen Hersteller Pietsch Metallbau GmbH als nicht sinnvoll erwiesen, da sowohl der Lichteinfall als auch der angestrebte Lüftungseffekt nicht gewährleistet wird.

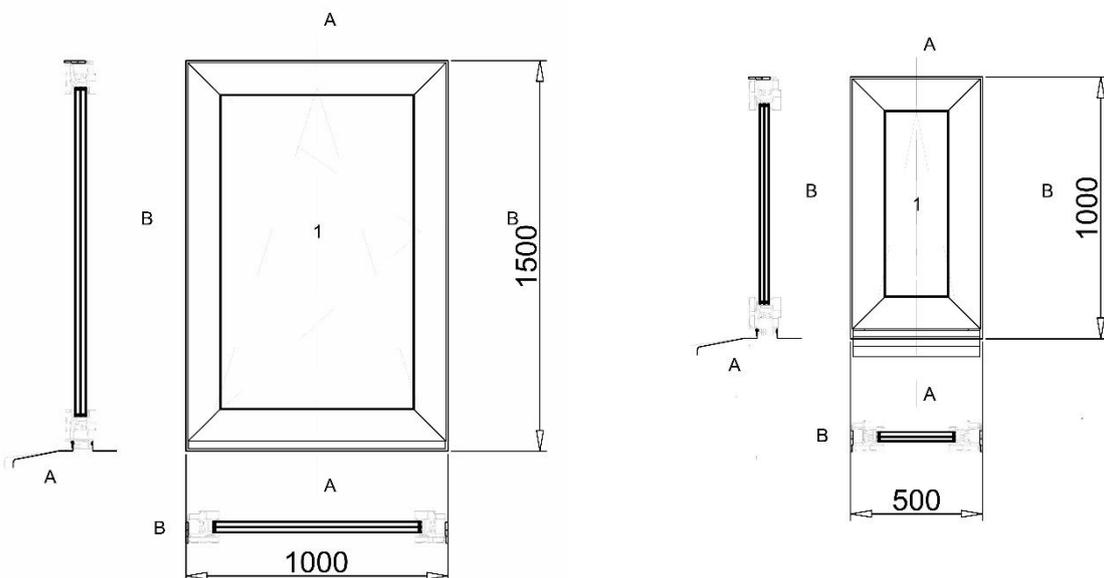


Bild 99. Aluminium Drehkipfenster mit Bild 100. Aluminium Kipp-Fenster mit Schüco AWS/ADS → Pietsch Metallbau GmbH Tröbitz, 07.07.2017

Aluminium Kipp-Fenster mit Schüco AWS/ADS Profilsystem → Pietsch Metallbau GmbH Tröbitz, 07.07.2017

Der UW-Wert wird für das große Fenster mit 0,67 W/m²K und die beiden kleinen Fenster mit 0,84 W/m²K angegeben.

Nachweise UW-Wert Fenster und Tür sind der Anlage 4 zu entnehmen.

Die Auswahl der Befestigungsmittel von Fenstern und Tür und deren Anzahl wird durch die Windlasten nach DIN 1055-4 [90] bzw. EDIN 18055 [91] und das Eigengewicht der Elemente bestimmt. Wenn Sachsen als Standort der WE angenommen wird, so liegt der Geschwindigkeitsdruck bei einer Gebäudehöhe von ≤ 10m bei $q=0,65 \text{ kN/m}^2$. Auf das Gebäude bezogen sind die Windlasten für das Fenster 1000 x 1500 mm $WLF1=1,5 \times 0,65 \text{ kN} = 0,975 \text{ kN}$ für Fenster 500 x 1000 $WLF2=0,325 \text{ kN}$ und für die Hauseingangstür $WLT=(2,5-0,145) \times 1,0 \times 0,65=1,53 \text{ kN}$ bei der Auswahl der

Befestigungsmittel zu berücksichtigen. Da die Hauseingangstür im Eck- bzw. Randbereich liegt, ist die Windlast nach ift-Richtlinie FE-05/2 mit dem Faktor 1,7 zu erhöhen. Daraus ergibt sich die Windlast zu $WLT=2,6$ kN. Bei der Wahl der Fenster und Außentür sind entsprechend der Einsatzempfehlungen für Fenster und Außentüren des ift Rosenheim [92] die Widerstandsfähigkeit gegen Windlast, die Schlagregendichtheit und die Luftdurchlässigkeit die wesentlichen Auswahlkriterien unabhängig von der Materialbeschaffenheit. Für den Bereich Sachsen mit der Windlastzone 2 gelten damit für die Klassifizierung der Fenster die Einstufungen B2-4A-2 und für die Außentür B2-3A-2 als Mindestforderung.

Spezifische Regelungen zu Fensterbefestigungen in den verschiedenen Untergründen gibt es zurzeit noch nicht [93]. Sie können jedoch aus Prüfberichten des ift Rosenheim und dem Leitfaden der RAL-Gütegemeinschaft abgeleitet werden [94].

Zur Ermittlung der auf die einzelnen Befestigungsmittel wirkenden Kräfte ist das Gewicht des Fensters und das Flügelgewicht wie folgt zu ermitteln (Fenster 1000 x 1500 mm):

Blendrahmen $(1,5+1)m \cdot 2 \cdot 6,7 \text{ kg/m} = 16,75 \text{ kg}$

Fensterrahmen $(1,37+0,92)m \cdot 2 \cdot 6,7 \text{ kg/m} = 30,69 \text{ kg}$

Isolierglas $2,5 \text{ kg/mm} + m^2 \cdot (2 \cdot 4 + 6) \cdot 1,27 \cdot 0,82 = 36,46 \text{ kg}$

Fenstergewicht = 83,89 kg

Flügelgewicht = 67,14 kg

Eigenlast $G_{Fe} = 0,823 \text{ kN}$

Eigenlast $G_{FI} = 0,659 \text{ kN}$

Wirkende Kräfte in Fensterebene:

$V_1 = V_2 = G_{Fe} / 2 \approx 0,42 \text{ kN}$

Die Einwirkung aus Eigengewicht bei geöffnetem Fensterunter unter Berücksichtigung von EN13115 - $P = 600 \text{ N}$

ergibt sich für $V_1 = G_{FI} + P = 0,66 + 0,6 \text{ kN} = 1,26 \text{ kN}$

Die Horizontalkräfte ergeben sich zu:

$H_1 = H_2 = b/h \cdot (G_{FI}/2 + P) = 0,92/1,37 \cdot (0,66/2 + 0,6) \text{ kN} = 0,62 \text{ kN}$

Die Kräfte aus Windlast ergeben sich bei 8 Befestigungspunkten zu $WLF_{1/8} = 0,122 \text{ kN}$. Die maximale Auflagerkraft beträgt $V_1 = 1,26 \text{ kN}$. Die Auflagerkräfte rechtwinklig zur Fenster-ebene BP1-5 u. 7 $= \pm 0,122 \text{ kN}$

BP 6 u. 8 $= \pm 0,62 \text{ kN}$

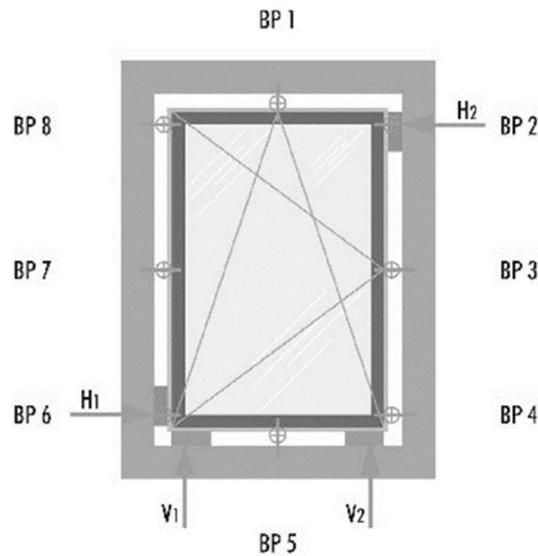


Bild 101. Mauerwerk Kalender 2014; 39. Jahrgang, Dresden; Ernst & Sohn; Seite 168

Zur Aufnahme der maximalen Auflagekraft V_1 sind neben den Dübeln Auflageklötze unten im Eckbereich und seitlich im Bereich BP 6 u. 8 anzuordnen.

Entsprechend der Zulassung werden Würth-Dübel AMOIII- Schraube $\varnothing 7,5$ Typ 1 mit einer Länge von 102 mm vorgeschlagen.

Die Lastaufnahme bei Quer- bzw. Schrägzug bis 30° beträgt hier 0,5 kN. Der minimale Randabstand muss ≥ 50 mm betragen. Bei einer Rahmentiefe der Fenster von rund 110 mm und mittlerer Anordnung der Schrauben wird diese Nebenbedingung bei Abschluss des Fensters mit der Außenkante Mauerwerk erfüllt. Für eine Demontage können die Schrauben gelöst und bei Neumontage auch die gleichen Bohrlöcher genutzt werden. Die Dübel 1,3,5 und 7 werden mittig des Rahmens, die Dübel 2,4,6 und 8 werden 100mm von der Rahmenecke entfernt angeordnet. Die Abstände der Dübel liegen so bei maximal 640 mm < als der zulässige Abstand von 800 mm bei Befestigung in Beton. Bei den kleinen Fenstern erfolgt die Befestigung mit 6 Dübeln, das heißt je zwei seitliche Dübel und je einen Dübel mittig oben und unten. Auf einen rechnerischen Nachweis kann aufgrund der geringen Größe und Gewicht verzichtet werden.

Die Fuge Betonstein/ Fenster wird mit Dichtungsband für 7-12mm Fugenbreite zum Beispiel Ilbruck illmod duo RK geschlossen [95]. Im unteren Anschluss des Fensters wird im Außenbereich eine diffusionsoffene Folie wie zum Beispiel Fassatan unter der Fensterbank angeordnet und im Innenbereich eine diffusionsdichte Folie wie zum Beispiel Fassatyl der Firma Bosig am Rahmen verklebt [96]. Die Fensterbank aus Alu wird am äußeren Rahmen des Fensters mit einer Unterlage Fensterdichtband zum Beispiel VKP Plus 8m verschraubt, um ein Eindringen von Wasser in die darunterliegende Dämmung zu verhindern. Die Fensterbank wird bis ≥ 30 mm der Außenkante VHF geführt. Zur seitlichen Abdichtung erhält die Fensterbank links und rechts einen Aluminiumgleitanschluss, der an die Edelstahlumrandung (siehe 5.7.2) mit hinterlegtem Dichtband anschließt. Als Systemlösung bietet sich die Fensterbank der Firma Alurit GmbH mit einer Fensterbanktiefe von 290 mm an [35].

Infolge des unmittelbar auf der Bodenplatte aufbauenden Doppelbodens und der geringen Rohbaubreite der Türöffnung von 1000 mm ist für die Haustür eine Sonderkonstruktion erforderlich, die zum Doppelboden und der Bodenplatte bündig und dicht abschließt. Potenzielle Lieferanten dieser Sonderlösung sind die Firma Pietsch Metallbau GmbH aus Tröbitz und die Firma Bayerwald-Fenster Haustüren GmbH aus Neukirchen v. Wald. Die konstruktive Lösung ist den Detailzeichnungen zu entnehmen.

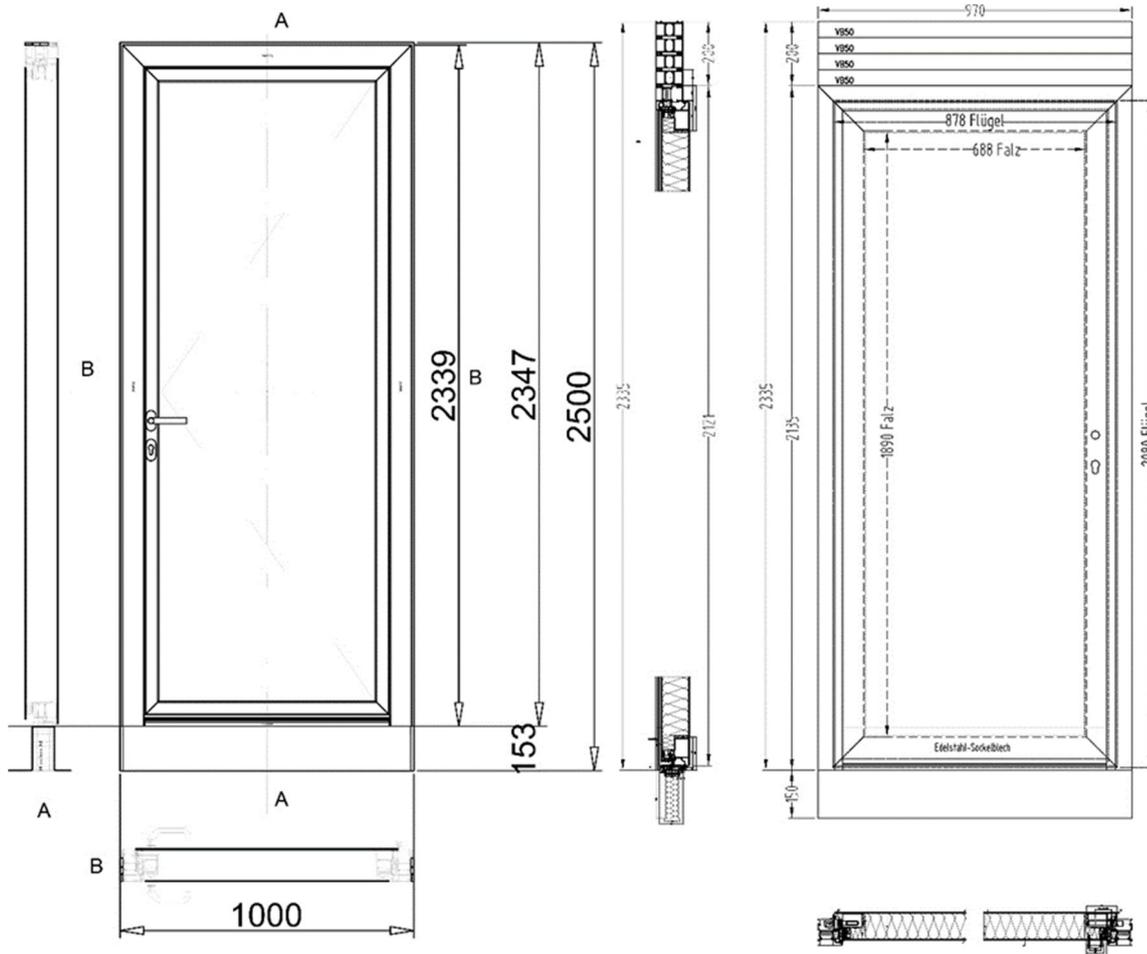


Bild 102. Aluminiumtür → Pietsch Me-Bild 103.

Aluminiumtür Fa. Bayerwald
Fenster Haustüren GmbH Neukir-
chen v. Wald

Da die Türkonstruktion auf der Grundplatte lagert, ist bei der Auswahl der Befestigungsmittel vorrangig die Windlast zu berücksichtigen. Nach den Prüfberichten des ift Rosenheim sind 9 Stück Rahmendübel AMO III Typ1 bei der Konstruktion der Firma Pietsch/Schüco vorgesehen. Die beidseitig zu je 4 Stück und einem Dübel am oberen Rahmen angeordnet werden. Die Abstände liegen damit bei <800 mm. Die aufzunehmende Windlast je Dübel beträgt damit $2,6 \text{ kN}/9=0,29 \text{ kN}$. Im oberen und unteren Bereich werden seitlich analog der Fenster Auflageklötzer eingesetzt. Die Abdichtung der Tür zum Trockenmauerwerk erfolgt dreiseitig umlaufend mit Dichtband, zum Beispiel Ilbruck illmod duo RK.

Bei der Lösung Bayerwald ist statt des oberen Dübels das Oberteil mittels zwei Winkel links und rechts zu sichern. Auf der Außenseite wird anschließend an die Bodenplattendichtung bis unter die Türschwelle führend eine Abdichtungsfolie wie beispielsweise Fassatan 1,2 mm dicht verlegt. Der untere Aufsatz erhält über der Abdichtungsfolie ein Dichtband, zum Beispiel Ilbruck, an das ein erforderliches Treppenelement, zum Beispiel RC-Beton, angefügt werden kann. Auf der Innenseite der Türschwelle wird die Dampfbremse des Doppelbodens unter der Türschwelle mit der Dichtungsbahn außen zusammengeführt (siehe 5.7.4.1). Der UW-Wert wird von beiden Herstellern mit $UW=0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ angegeben (s. 17.3-1/2).

5.7.4 Der Demontierbare Innenausbau

Im Folgenden sollen Lösungen für den Innenausbau vorgestellt werden, die der eingangs genannten Schichtenlösung folgen. Im Einzelnen werden Fußboden, nichttragende Trennwände, Wandverkleidung und Unterdecke betrachtet.

5.7.4.1 Fußbodenaufbau

Wie im Abschnitt 5.7.6 dargestellt, ist die Abdichtung der Bodenplatte zu schützen. Dieser Schutz soll mit der nach EnEV 2014/2016 notwendigen Wärmedämmung mit 120/150 mm Steinwolle z.B. Fixrock 035 erreicht werden (siehe 5.6), die auf der Dichtbahn lose verlegt wird.

Als leicht demontierbares und wiederverwendbares System könnte als WE-Modulboden ein Doppelboden-System eingesetzt werden. Die Bodenplatten haben in der Regel eine Dicke von ≥ 38 mm (Bild 104).

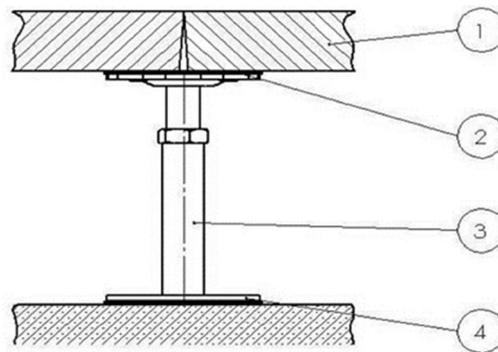


Bild 104. Doppelboden im Schnitt, WEISS Doppelbodensysteme GmbH,
 „<http://weiss-dbs.de>,“ [Online]. Available: <http://weiss-dbs.de/wp-content/uploads/typ-3122.pdf>. [Zugriff am 19 07 2017].

Der Feuchteschutz der Räume erfordert jedoch eine Dampfsperre auf der raumzugewandten warmen Seite. Hierzu wären zwingend Rasterstäbe erforderlich, auf denen die Dampfsperre aufgelegt und gegebenenfalls punktuell verklebt werden kann, wie z.B. beim System Ligna Typ RO von Lindner AG (Bild 105).



Bild 105. Perspektivische Darstellung Doppelfußboden, Lindner GmbH, „<https://www.lindner-group.com/>“, [Online]. Available: https://www.lindner-group.com/fileadmin/user_upload/intranet/dienste/marketing/techn_broschueren/boden/boden_br_ligna--de.pdf. [Zugriff am 10. 07. 2017].

Infolge der Punktlasten des Systems wären über der Dichtbahn lastverteilende Bleche $d \geq 2$ mm lose zu verlegen, auf denen die Stützen wieder lösbar auch verklebt werden könnten. Der Bodenbelag ist je nach Anforderung der Nutzung bei fast allen Systemherstellern frei wählbar. Eine Systemhöhe von 165 mm über OK Bodenplatte wäre erreichbar. Nachteil dieser Konstruktion sind die hohen Kosten. Aus diesem Grund wird für RC-WE-Modul eine kostengünstigere Lösung vorgesehen, die letztlich ebenfalls das Kriterium der leichten Demontierbarkeit und Wiederverwendung erfüllt.

Der Aufbau des Fußbodens erfolgt direkt auf der Bodenplattendichtung, die mit einem Schutzvliesstoff 300 g/m², 3 mm dick z.B. von Ludwig [97] ganzflächig geschützt wird. Im Randbereich werden Mineralwollrandstreifen $\leq 120/150$ mm ca. 10-20mm dick aufgestellt, an denen umlaufend zu den Umfassungswänden 80 x 120/150 mm Brettschichtholz (BSH) Fichtebohlen aufgestellt werden. Von der Stirnseite ausgehend werden dann im Abstand von 500 mm (Achismaß) Brettschichthölzer quer zur Raumachse verlegt. Eine Verschraubung ist nicht zwingend erforderlich. Die Verwendung von Brettschichthölzern erscheint wegen der höheren Formstabilität und weniger Rissbildung gegenüber Schnittholz angezeigt. In den Zwischenräumen der Hölzer werden die 120 mm dicken Mineralwollplatten Fixrock dicht verlegt. Über der Konstruktion wird die Dampfbremsschicht OWOLEN 0,4 mm (siehe 5.7.6) an den Umfassungswänden aufsteigend über die gesamte Fläche des WE-Moduls überlappend gespannt. Die Überlappungsstöße sind, soweit bei einer Bahnbreite von 4 m überhaupt erforderlich, mit systemrelevanten Dichtstreifen zu verbinden.

Auf der Brettschichtkonstruktion werden OSB3-Platten 2500 x 625 mm 25 mm dick nach EN300 mit Nut und Feder parallel zur Raumachse mittels Senkholzschrauben 3,6 x 50 mm befestigt. Im ungünstigsten Lastfall sind damit Flächenlasten von $\geq 6,5$ KN/m² bei $l/300$ erreichbar.

Entlang der Außenwände wird ein Mineralwollrandstreifen 5 mm gestellt an den die Dampfbremse und nachfolgend die OSB3 – Platten anschließen. In Höhe OK des U-Profiles der Wandverkleidung (siehe 5.7.4.3) werden überstehende Randstreifen abgeschnitten. Nach erfolgter Montage der Wandverkleidung kann der Bodenbelag z.B. Laminat Logoclick VINTO mit einer Stärke von 8mm [98] trocken verlegt werden. Infolge seiner langen Lebensdauer von mind. 20 Jahren und der einfachen „Klick“ – Montage ist auch dieser demontierbar und im Rahmen der Nutzungsdauer wiederverwendbar. Der Randabschluss erfolgt mit einer Fußleiste. Die Einbautiefe des Fußbodenaufbaues beträgt damit einschließlich Bodenplattendichtung rund 158 mm über OK Bodenplatte (Bild 106).

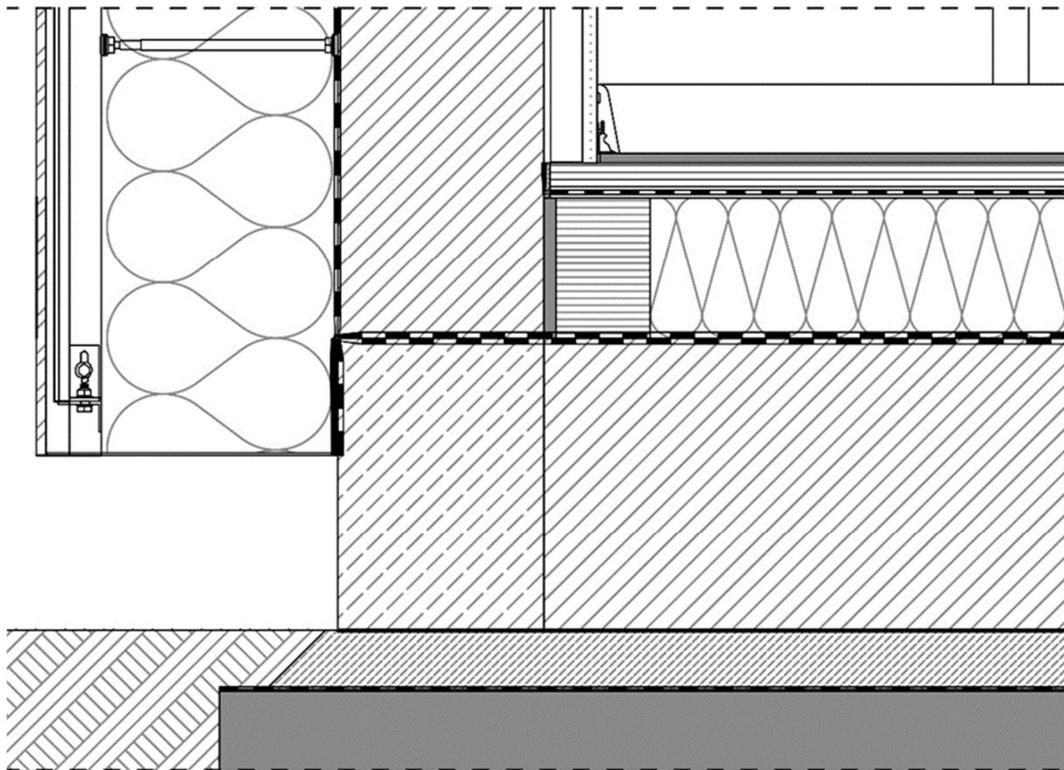


Bild 106. Schnitt durch Fußbodenbereich

5.7.4.2 Nichttragende Trennwände

Für den Einsatz im RC-WE-Modul müssen die nichttragenden Trennwände umsetzbar ausgebildet werden. Hierzu eignen sich Schalenwände, die vor Ort aus werkseitig vorgefertigten Einzelteilen zusammengefügt werden oder Monoblockwände, bei denen werkseitig vorgefertigte raumhohe Innenwandelemente auf der Baustelle montiert werden [99]. Zu letzteren werden System-Trennwände, zum Beispiel von Faay, Vianen W.V. [100] und Goldbach Kirchner T10 [101], angeboten, die sich für einen Einsatz im WE-Modul eignen. Wegen der Möglichkeit, auch während der Bauphase noch Elektro- und Sanitärinstallationen einzusetzen und vor allem die gleichen Deckschalen für die notwendigen Vorsatzschalen verwenden zu können, wird die Variante Schalenwand favorisiert. Angeboten werden solche Systemwände zum Beispiel von der Lehnert GmbH [102] mit der Trennwand 82 und der Keisinger Systemwände GmbH & Co.

Wegen der ausschließlich mit Stahlprofilen gefertigten Metallständerwand SK-100 und dem Achsraster von 1200 mm (12M) entsprechend DIN18000 und der Möglichkeit einer variablen Anpassung bis zu 1250 mm wird die Systemwand der Firma Keisinger eingesetzt [103]. Die Beplankung der Wand wird wahlweise mit Gipskartonplatten (normal, GKF und GKI) mit fertiger Beschichtung, GK Platten mit Metallbelegung oder melaminharzbeschichteten Spanplatten geliefert. Gegenüber nichttragenden fest eingebauten Gipskartonwänden werden die Platten selbst nicht verschraubt und verspachtelt. Die Befestigung der Beplankung erfolgt an den CW-Profilen 75 mm durch Verschraubung mit verzinkten Hutprofilen, die mit aufgeschnappten Leisten verdeckt werden (Bild 107).

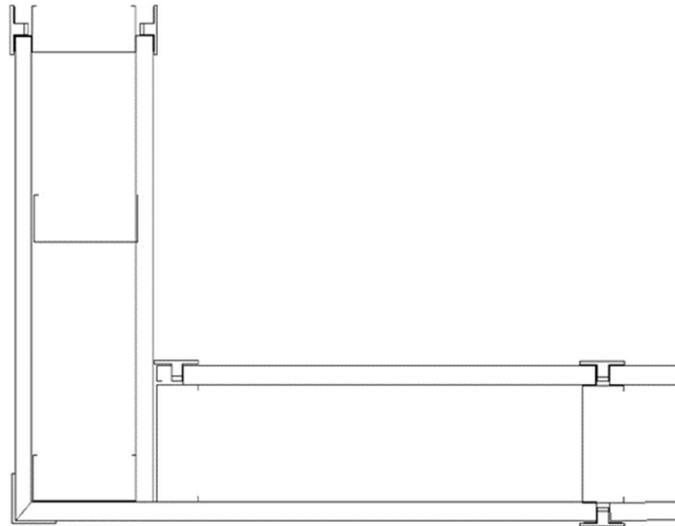


Bild 107. Eckausbildung Horizontalschnitt SK-100, Keisinger GmbH & CO

Der untere und seitliche Anschluss erfolgt mit Dichtband und U-Profil, in das die Beplankung eingeschoben wird. Die U und CW- bzw. UW- Profile werden mit der Wand mittels Hohldübel M5 und Schraube M5 an den Betonelementen, mittels Flachkopfschrauben am Doppelboden befestigt (Bild 108).

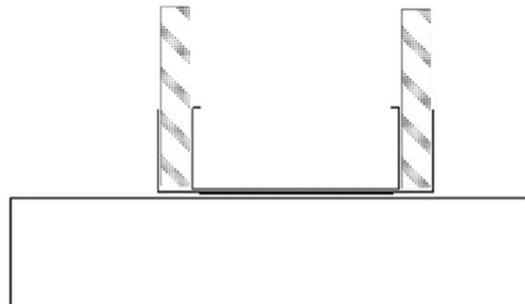
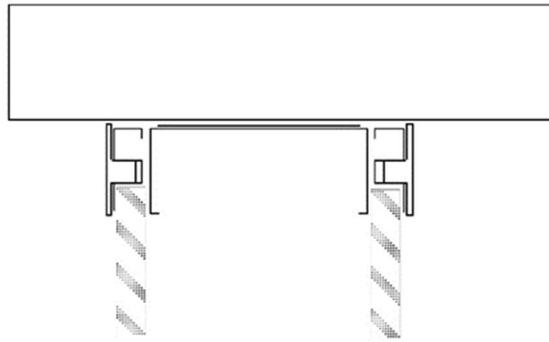


Bild 108. Wand/Bodenanschluss mit UW75 und U-Profil Horizontalschnitt SK-100, Keisinger GmbH & CO.

An der Decke wird das UW-Profil einschließlich Dichtband mit Hohlraumdübeln FHY M5 befestigt. Die Beplankung wird mittels verschraubten Hutendprofil eingespannt (Bild 109).



*Bild 109. Decken/ Wandanschluss mit UW 75 und Hutendprofil horizontalschnitt
 SK-100, Keisinger GmbH & CO.*

Im Bereich WC und Küche sind die Wände mit imprägnierten und beschichteten Gipskartonplatten (GKI) auszuführen. Im Bereich Waschbecken und Hängeschränken werden Traversen (Stahlprofil oder Holzbohle) zwischen den CW-Profilen im Nutzungsbereich eingefügt.

Als Türen kommen Röhrenspantüren mit einem Schalldämmwert ≥ 27 dB in den Abmessungen 760 x 2135 mm (WC) und 885 x 2135 mm (Küche) zum Einsatz. Die Türzargen werden als leicht demontierbare zweiteilige Zargen mit fertiger Beschichtung ausgeführt, die analog einer herkömmlichen Einfachständerwand zwischen UA-Profilen mit oberseitigen UW-Profil eingestellt werden. Die Türbeschläge sind Bestandteil des Lieferumfanges. Die hier vorgestellte SK-100 mit einer Mineralwolleinlage ≥ 40 mm erreicht eine Schalldämmung von ≥ 43 dB, sodass ein Einsatz des RC-WE-Moduls auch als Büroeinheit möglich ist.

5.7.4.3 Wandverkleidung

Mit dem Einsatz einer Schalenwand wie der SK-100 wird es möglich, die gleiche Beplankung raumhoch mit Breiten von bis zu 1250 mm einschließlich der benötigten Hutprofile und Deckleisten über den Hersteller zu beziehen. Damit wird ein einheitliches Gesamtbild der Räume geschaffen. Abweichend von der Wandkonstruktion wird die Unterkonstruktion hier durch CD-Profile 27 x 60 mm und UD-Profilen gebildet. Das CD-Profil wird mittig durch einen Direktabhängiger, der nur durch einen Dübel und Schraube M5 gehalten wird, mit dem Mauerwerk verbunden. Die UD-Profile werden im Abstand von ≤ 700 mm an Decke, Wand und Fußboden mittels Dübel und Schrauben M5 beziehungsweise Holzschrauben verankert. Die Einbautiefe der Wandverkleidung beträgt damit maximal 45 mm. Eine Befestigung der Wandverkleidung mittels 15 mm Hutprofil, wie beim Projekt ReMoMaB vorgeschlagen, wurde verworfen, da hier mindestens 14 Dübel pro Profil zu setzen wären und eine Wiederverwendung infrage steht. Eine Einspannung der Beplankung mittels Hutprofilen im oberen und L- Profilen im unteren Bereich wäre nicht möglich. Die Unterkonstruktion folgt dem Prinzip befestigte Vorsatzschale W623 von Knauf (Bild 110):

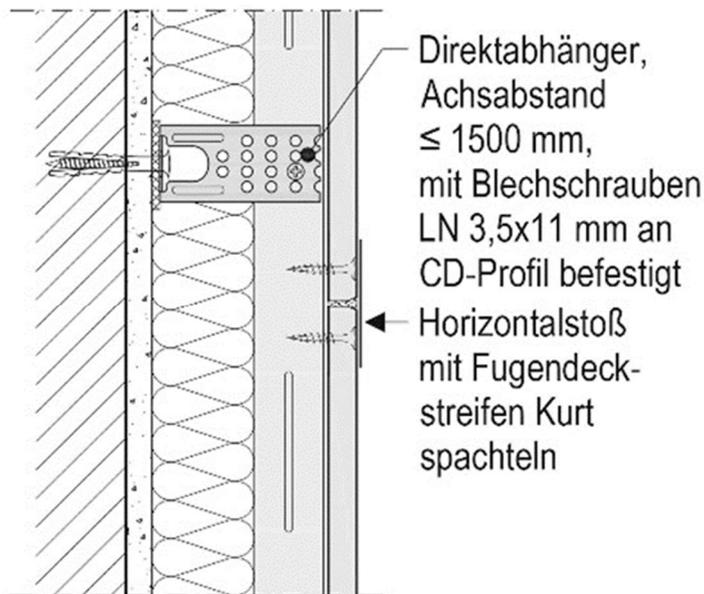


Bild 110. W623.de-VW1 Wandmitte/Plattenstoß Vertikalschnitt mit Direktabhänger, Knauf Gips KG, „<https://www.knauf.de/>“, [Online]. Available: <https://www.knauf.de/profi/sortiment/systeme/trockenputz-und-vorsatzschalen.html#vpDetails>. [Zugriff am 19 07 2017]

Die Befestigung der Beplankung erfolgt analog der nichttragenden umsetzbaren Trennwände, wobei im Bodenbereich statt eines U-Profils ein L-Profil gemeinsam mit dem UW-Profil am Boden verschraubt wird. Den Abschluss am Boden bildet dann nach Verlegung des Bodenbelages eine Fußleiste (siehe 5.7.4.1). Im Bereich der Fenster- und Türleibung werden beidseitig vertikal CD-Profile wie vor befestigt, die im Sturz- und Fensterbankbereich ein horizontal mit den Profilen verschraubtes CD-Profil erhalten. Den unteren Abschluss an den Fenstern bildet dann eine Fensterbank mit einer Breite von 155 mm zum Beispiel Werzalit [104], die auf einer Mineralwolldämmschicht von circa 20mm auf der Dichtbahn Fasatyl und unter dem Falz des Fensters, an dem ein Abschlussprofil Protector AP17 von Protektor befestigt wurde, eingeschoben. Von unten wird die Fensterbank mit dem horizontalen CD-Profil verschraubt. Die seitlichen und oberen Laibungsverkleidungen werden in ein Einfassprofil AP 13, das am Fensterrahmen verschraubt wird, eingeschoben und mittels verschraubten Eckprofil an den CD-Profilen befestigt (Bild 111).

Die Toleranzen im Ausbau für Wände und Vorsatzschalen liegen bei ± 1 mm um ein einheitliches Fugenbild zu erreichen.

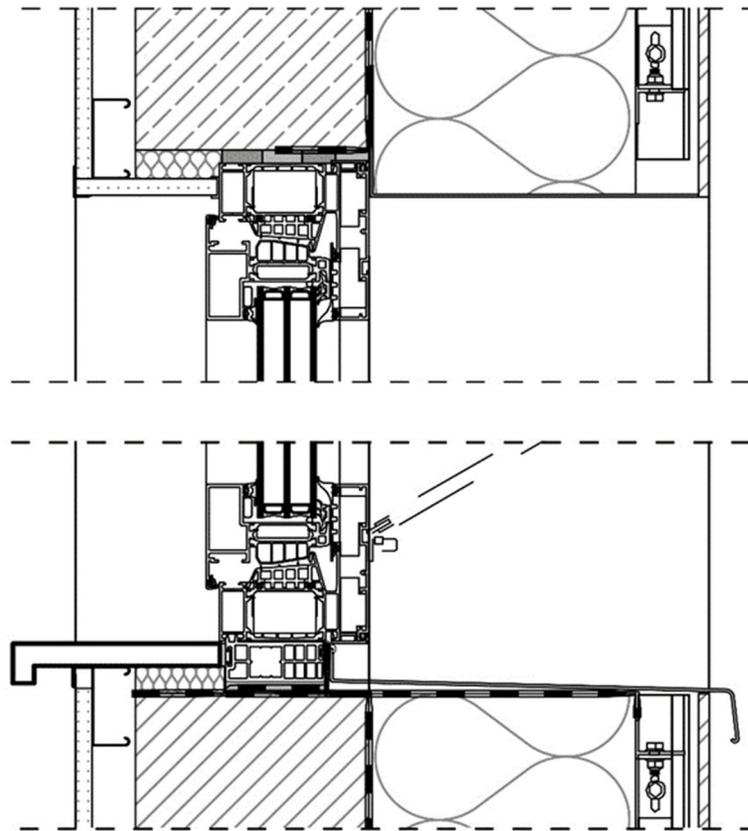


Bild 111. Vertikalschnitt Fenster

5.7.4.4 Unterdecke

Eine Unterdecke ist nicht zwingend erforderlich. Sie wirkt jedoch als zusätzliche Wärmedämmung und kann als Installationsraum für Kabel, Beleuchtung und im Bedarfsfall für eine Deckenstrahlheizung genutzt werden.

Leicht demontierbare Unterdecken sind Mineralfaser- oder Blechplatten mit sichtbarer Unterkonstruktion und herausnehmbaren Platten mit den Abmessungen 626 x 625 mm und 1250 x 625 mm wie zum Beispiel der Firma OWA [105], Armstrong und AMF, die in unterschiedlichsten Dekoren angeboten werden. Mit der gleichen Unterkonstruktion können auch Gipskartenelemente 625 x 625 mm verlegt werden, die sowohl als gelochte als auch glatte Platten sowohl von Rigips als auch Knauf [106] angeboten werden. Darüber hinaus sind auch Paneeldecken möglich, die als Stahl- oder Alu-Ausführung zum Beispiel von der Firma NE [107] in Breiten von 84-292 mm angeboten werden. Wie die bereits vorstehend genannten Deckensysteme können sie auch zur Regulierung der Nachhallzeit je nach Ausführung zum Beispiel bei Büronutzung dienen.

Eine für eine elektrische Strahlungsheizung geeignete Deckenvariante ist die Knauf Cleaneo Akustik-Paneeldecke Visona, die unter der Bezeichnung Regula R auch als ungelochte Platte 1200 x 400 mm angeboten wird. Als Deckenstrahlheizung bietet sich hier die Deckenfolie ECOFILM C der Firma Fenix an, die mit der Systembreite von 400 mm bei diesem Deckentyp einsetzbar wäre [108].

Aufgrund des geringen Wärmebedarfs des WE-RC-Moduls soll beispielhaft die Deckenkonstruktion der letztgenannten Paneeldecke von Knauf dargestellt werden. Bei der Auswahl der Anordnung der Deckendübel wurde berücksichtigt, dass ohne Lageveränderung Art und Anzahl der Dübel jede der genannten Decken eingesetzt bzw. bei Nutzungsänderung ausgetauscht werden kann.

Da die für Beton üblichen Deckenstahlnägel wegen der kaum möglichen Demontierbarkeit nicht verwendet werden können, werden die bereits dargestellten Hohldeckenanker FHY M5 o. 6 eingesetzt. Die Dübel verbleiben auch nach Demontage in den Deckenplatten und können so bei analoger Montage wiederverwendet werden. Die Lage der Dübel ist der Skizze nach Anlage 5 zu entnehmen. Umlaufend erhalten die Decken einen Randwinkel, in Höhe von 130 -150 mm unter UKRD, der im Abstand von 300 mm mit der Wandverkleidung beziehungsweise der nichttragenden Wand mittels Flachkopfschrauben verschraubt wird. Im Bereich der Hutprofile sind Blechtreiberschrauben 3,6 x 25 mm, im Bereichen von GK- Verkleidung GK- Dübel M4 + Schrauben einzusetzen. Bei der Demontage verbleiben die GK- Dübel in den Platten und können wiederverwendet werden.

An den Deckenankern werden justierbare Direktabhängiger mit einer Schraube M5/6 befestigt, an denen die CD-Profile als Tragschiene verankert werden. Mit diesen werden dann mittels T-Kreuzverbindern die T-Profile verbunden.

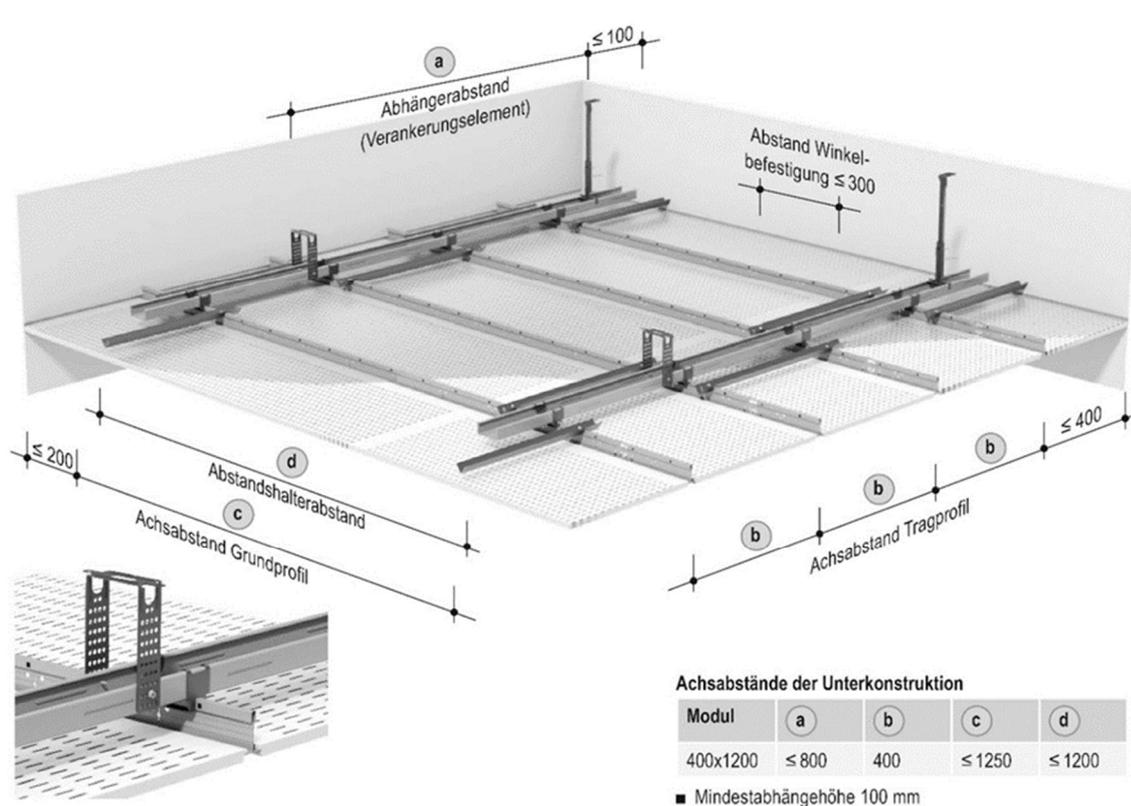


Bild 112. *Detail Isometrie D144.de Klau Cleano Akustik-Paneeldecke Visona, Knauf Gips KG, „<https://www.knauf.de/>“, [Online]. Available: <https://www.knauf.de/profi/sortiment/systeme/revisionierbare-knauf-cleaneo-akustikdecken.html#vpDetails>. [Zugriff am 10. 07. 2017].*

Versetzt wird mittels Abstandshaltern der Montageraum für die GK-Paneele hergestellt, die dann nach Schiffsbodenmuster in die T-Profile eingelegt werden.

Bei Einsatz einer Deckenstrahlheizung ECOFILM C sind die Heizfolien mit Mineralwolle $d \geq 60$ mm WLG 040 abzudecken. Die Materialkomponenten sind der Stückliste unter Punkt 7.2.6 zu entnehmen. Die Deckenstrahlheizung einschließlich Mineralfaserauflage wurde hier nicht berücksichtigt.

Die lichte Raumhöhe beträgt mit dieser Unterdecke 2,47 m. In den meisten Bundesländern gilt nach Bauordnung eine lichte Raumhöhe von mindestens 2,4 m.

Bei den Unterdecken liegen die Toleranzen in der Achsrichtung (Trageprofile) bei $\pm 5\text{mm}$ und bei den Auflageprofilen $\pm 0,2\text{ mm}$

5.7.5 Technische Gebäudeausrüstungen TGA

Im Folgenden sollen grundsätzliche Anregungen für die Ausführung der technischen Gebäudeausrüstung aufgezeigt werden, die sich in das Grundanliegen der Rezyklierbarkeit des gesamten RC-WE-Moduls einordnen.

5.7.5.1 Heizung und Sanitär

Trink- und Abwasserleitung werden durch die Bodenplattensteine dem WE-Modul zugeführt (vergleiche 5.7.6). Das WC ist sinnvoller Weise als Stand-WC mit senkrechtem Abfluss direkt an das Abflussrohr, das durch den Doppelboden geführt wird, mit Steckverbindung anzuschließen.

Vom Abflussrohr DN100 abzweigend ist das Abflussrohr DN 40 oder 50 für Waschbecken und Küche mittels Schraubverbindungen in der Schalenwand SK-100 zu führen. Die Verschraubung erfolgt im Bereich des Boden-U-Profiles der SK-100. Über ein ebenfalls verschraubtes T-Stück kann das Abwasser von Küche und Waschtisch abgeführt werden.

Das Trinkwasser wird analog mit einem Verschraubungssystem zum Beispiel Marley DreMa [109] den Verbrauchsstellen WC, Waschtisch und Spüle zugeführt. Im Bereich Waschtisch kann ein elektrischer Durchlauferhitzer installiert werden, der auch für die Spüle zu nutzen ist.

Aufgrund der Schalenbauweise sind die Leitungen während der Wandmontage zu verlegen und bei der Demontage nach Abnahme einer Schale wieder rückzubauen. Mit der Verschraubungslösung sind sämtliche Rohrleitungen, Fittings und Armaturen wieder zu verwenden.

Grundsätzlich ist auf der gleichen Basis auch eine Warmwasserheizung denkbar, wobei die Vor- und Rücklaufleitungen in einem Fußleistenkanal geführt werden können und so nach Lösung der Verschraubungen leicht demontierbar sind.

Wegen der geringen maximalen Heizlast von 1,5 kW (vergleiche 5.6) erscheint diese Lösung für das WE-Modul nicht zielführend. Auch kleine Heizgeräte wie CERAMINI von Junkers [110] arbeiten erst ab circa 5,5 kW im Bereich eines optimalen Wirkungsgrades.

Darüber hinaus sind ein Tanklager oder Gasanschluss einschließlich eines Rauchgasrohres zwingende Voraussetzung.

Bei einem Einsatz mehrerer Module ist diese Lösung jedoch zu favorisieren.

Wie im Abschnitt 5.7.4.4 bereits erwähnt, wird für das Modul eine elektrische Deckenstrahlheizung [108] als Vorzugsvariante betrachtet, die in versetzter Anordnung im Aufenthaltsbereich angeordnet wird.

Denkbar sind gleichermaßen elektrische Ölradiatoren mit Temperaturregeleinrichtung, die im ökologischen Sinne nicht mehr zeitgemäß sind.

Bei der Anordnung einer Vielzahl von WE-Modulen ist abweichend von der Schichtenlösung der Einsatz von Fertigbädern zum Beispiel VARIS [111] unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit zu prüfen. Diese Fertigbäder sind dem Doppelboden anzugleichen und vor der Deckenplattenmontage einzusetzen.

Bei der Demontage kann das Fertigbad nach Abnahme der Deckenplatte als Ganzes entnommen und nach eventueller Sanierung im Herstellerwerk zur Wiederverwendung eingelagert werden.

5.7.5.2 Elektroinstallation

Ausgehend vom Übergabepunkt des Netzbetreibers in dem auch der Zähler installiert sein kann, wird die Zuleitung durch die Bodensteine zum Verteilerkasten, der im WC oder Küche platziert sein kann, über den Doppelboden hinter der Beplankung der Vorsatzschale geführt.

Alle abgehenden Stromkreise können mittels Kabel und Steckverbindungen sowohl in der Schalenwand SK-100 und Vorsatzschalen als auch über die Unterdecke geführt werden.

Sämtliche Steckdosen können als „Aufputz-“ oder „Unterputzsteckdosen“ ausgeführt werden und über Steckverbindungen angeschlossen werden (vergleiche FAAY [100] Seite 9).

Je nach Nutzungsart ist der Einsatz von vor den Vorsatzschalen geführten Kabelkanälen sinnvoll, in denen auch die IT-Leitungen geführt werden und die Anschlussdosen integriert werden können. Die Kabel für die Deckenbeleuchtung und die Deckenstrahlheizung werden soweit erforderlich über die Unterdecke geführt. Der Anschluss der Verbrauchstellen erfolgt grundsätzlich über Steckverbindungen. Mit den gewählten Steckverbindungen ist eine einfache Demontage der Kabel und deren Wiederverwendung gesichert.

5.7.6 Abdichtung des Rohbaus

Die entstandene Bodenplatte soll auf RC-Betonschotter verlegt werden, auf den über einer lose verlegten PE-Folie eine Sauberkeitsschicht C20/25 aufgebracht wurde. Betonplatte und Sauberkeitsschicht werden nochmals durch eine PE-Folie getrennt. Entsprechend DIN 18195-4 [68] sind die Bodenplatten abzudichten. Unter dem Aspekt der Demontage ist eine lose Verlegung der Dichtungsbahnen erforderlich, die sich durch leichte Verform- und Dehnbarkeit und Reißfestigkeit auch für die Verlegung unter der formschlüssigen Verbindung Wandelemente/ Fundamentbalken eignen.

Diese Anforderung erfüllt beispielsweise die OWOLUX PVC-Dichtungsfolie 1,2 mm dick, die mittels Warmgasschweißen wasserdicht gefügt werden kann [66]. Die Folie ist an der Außenseite des Ringbalkens bis unter das Abschlussprofil der Vorhangfassade zu führen und hier mit einzuspannen. Im Bereich der Eingangstür ist die Dichtungsbahn bis unter die Schwelle zu verlegen. Der Schutz der Abdichtung im Innenbereich nach DIN 18195-10 [69] wird durch die Dämmschicht im Fußbodenbereich gesichert.

Die Durchdringungen für Versorgungsleitungen sind in den hierfür vorgesehenen Betonsteinen bereits im RC- Betonwerk durch entsprechende Aussparungen vorzusehen. Die Abdichtung der Rohrdurchführungen erfolgt nach DIN 18195-9 [70] mithilfe eines Klebeflansches, eines An-schweißflansches oder einer Manschette mit Schelle an der Durchdringung. Im Fall von nichtdrückendem Wasser ist eine Festflanschkonstruktion zu präferieren, die eine Demontage und Wiederverwendung erleichtert [67].

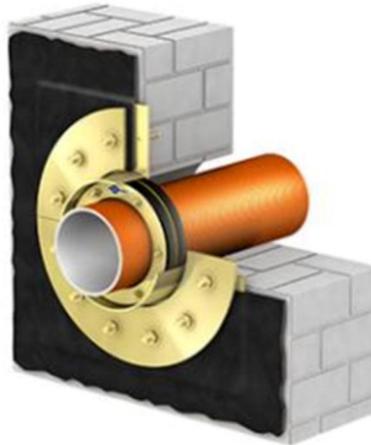


Bild 113. *Beispiel Los- und Festflanschkonstruktion, www.fhrk.de/grundlagen, Dipl.-Ing. (FH) Thomas Wagner, Doyma GmbH & Co Aufruf am 01.07.2017*

Für die Außenhülle des RC-WE-Modules wurden mit DIN 4108-7 [72] in Verbindung mit der Wärmeschutzverordnung (WSV) die Anforderungen der Luftdichtheit vorgegeben. Daneben sind entsprechend der Richtlinien der Wärmeschutzverordnung auf der warmen Seite der Dämmung Dampfbremsen vorzusehen. Da eine Wiederverwendung der in der Regel aus PE-Folien bestehenden Dichtungen kaum realisierbar erscheint, soll beim RC-WE-Modul sowohl die Wind-/Luftdichtung als auch die Dampfbremse in einer Ebene an der Außenfläche realisiert werden. Als geeignetes Material kann zum Beispiel die OWOLEN-Dampfbremsfolie von ThyssenKrupp Plastics mit einer Dicke von 0,4 mm und einer Temperaturbeständigkeit von -20°C bis 70°C zur Anwendung kommen [71]. Die Dampfbremsfolien in Breiten von 4 m werden sowohl auf den Dachplatten als auch den Wänden überlappend dicht verlegt. Im Bereich der Bodenplatte sind die Folien analog der Mauerisolierfolie mit Schaumstoffdichtungsband unter dem Abschlussprofil der Vorhangfassade zu befestigen.

Die Überlappungen der Folien werden luftdicht mittels Butyl-Kautschuk Dicht- und Klebeband verschlossen. Mit diesem Klebeband sind auch notwendige Durchdringungen für die Vorhangfassade und die Auflagerhalterungen der Dacheindeckung abzudichten. Wo absolut notwendig, sind die Folien punktuell mit Folienkleber am Beton zu sichern. In keinem Fall sollte die Folie mit den Spanngliedern, wie beim Projekt ReMoMaB [1] vorgesehen, eingespannt werden, um Dehnungsrisse zu vermeiden (Datenblätter Anlage 1-1 und 1-2).

6 Erstellung der RC-Wohneinheit

6.1 Allgemeine Beschreibung der RC-Wohneinheit

Das Hauptziel der Errichtung der RC-Wohneinheit war es, die Bauqualität der aus dem RC-Beton hergestellten Bauteile zu prüfen. Zu diesem Zweck wurde die RC-Wohneinheit aus verschiedenen RC-Bauteilen in einer demontierbaren Bauweise errichtet. In diesem Sinne wird der Rohbau der RC-Wohneinheit aus RC-Tafeln/Platten, RC-Bauelementen, RC-Betonbalken sowie RC-Betonsteinen aufgebaut.

Die errichtete RC-Wohneinheit setzt sich aus insgesamt 88 einzelnen Bauteilen zusammen, die entweder ineinandergesteckt, miteinander verschraubt oder verspannt sind. Die beiden Bodenplatten bilden die Grundlage, auf der die weiteren Module aufgebaut werden. Diese haben ein Gesamtmaß von etwa 5,3 m x 5 m, wobei die Außenmaße des Gebäudes nur noch 4,85 m x 4,50 m betragen. Die beiden Wandscheiben, die sich aus den RC-Betonsteinen zusammensetzen, lassen Aussparungen für eine Eingangstür und drei Fenster zu, wohingegen die anderen beiden Wände als vollständige Platten ohne Löcher ausgeführt werden. Auf den Mauerwerkswänden liegen die RC-Balken auf, die die RC-Wände kraftschlüssig verbinden. Über den beiden Deckenplatten schließen vier Attiken das Gebäude nach oben hin ab.

Mit einer Wandstärke von 17,5 cm bleibt dem quadratischen Grundriss noch eine Innennutzfläche von 18,7 m² (Bild 114, Bild 115).

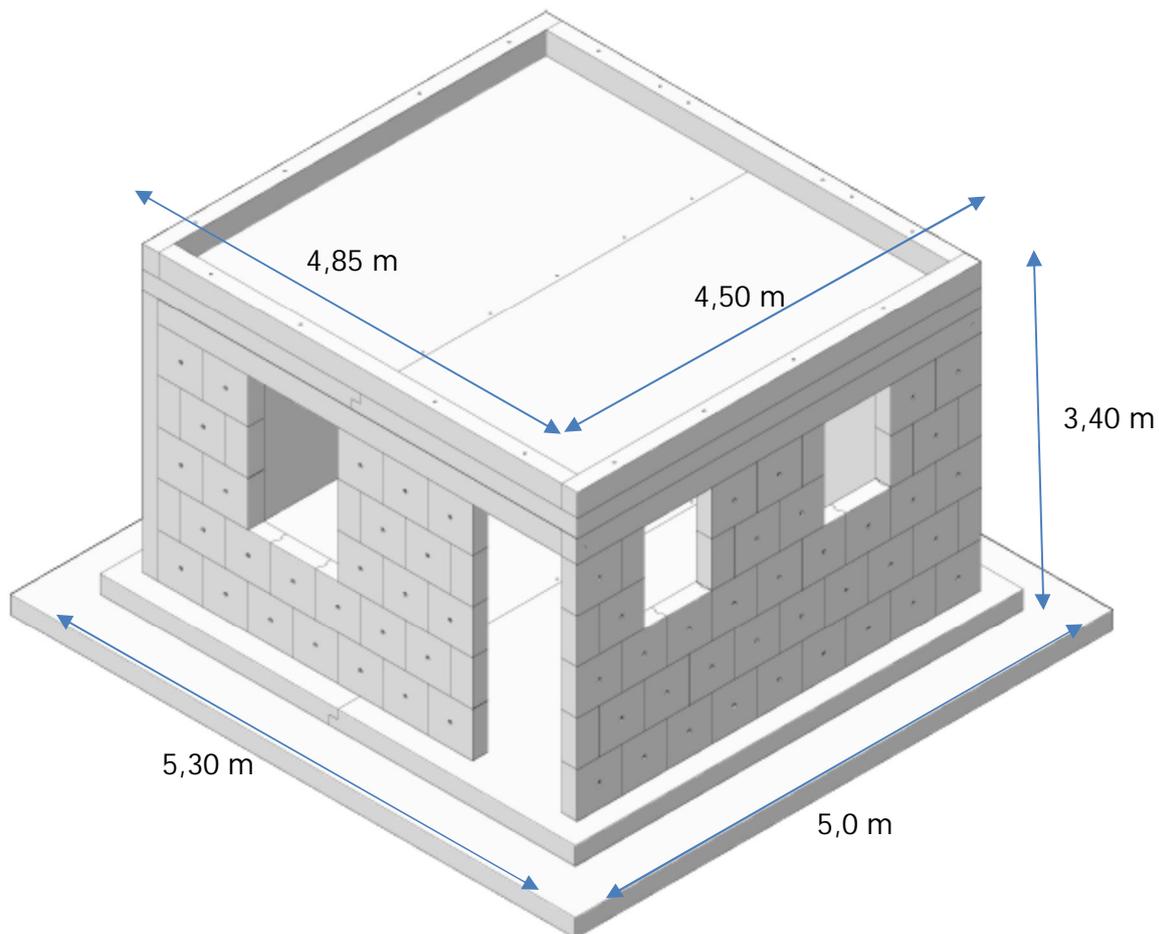


Bild 114. Prospektive RC-Wohneinheit, Rendering Süd-West

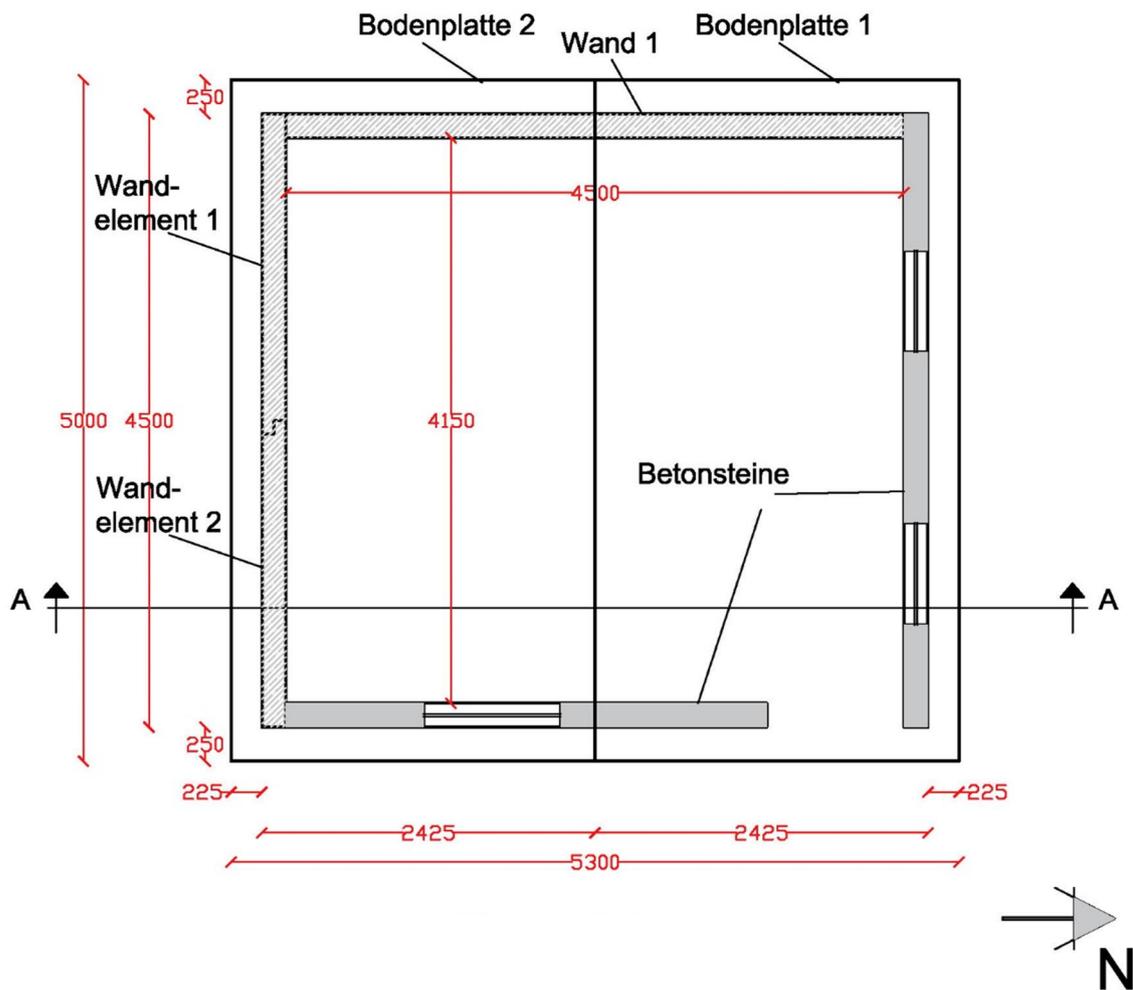
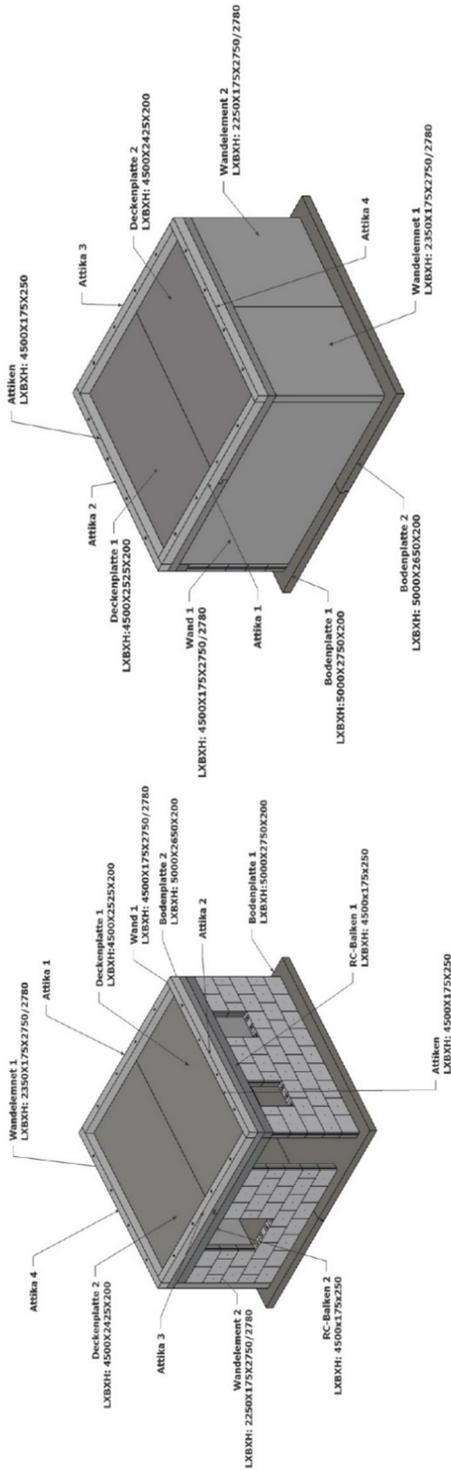


Bild 115. RC-Wohneinheit- Grundriss

In der folgenden *Tabelle 22* sind die allgemeinen Bauteilbeschreibungen, z. B. Bauteilabmessungen, -anzahl, -gewicht aufgelistet. Die Wohneinheit wiegt insgesamt etwa 42 Tonnen. Die Abmessungen der RC-Bauteile wurden mit Rücksicht auf die Transportanforderungen ausgewählt. Genauere Details für jedes RC-Bauteil sind aus dem Anhang 18.5 zu entnehmen.

Tabelle 22: Bauteilliste der RC-Wohneinheit



Pos	Bauteil	Abmessungen [mm]			Anzahl	Volumen/Stück [m³]	Gewicht/Stück [kg]	Gesamtvolumen [m³]	Gesamtgewicht [kg]
		L	B	H					
1	Wand1	4500	175	2780	1	2,19	5035	2,19	5035
2	Wandelement1	2350	175	2780	1	1,14	2630	1,14	2630
3	Wandelement2	2250	175	2780	1	1,09	2518	1,09	2518
4	Bodenplatte 1	5000	2750	200	1	2,75	6325	2,75	6325
5	Bodenplatte 2	5000	2650	200	1	2,65	6095	2,65	6095
6	Deckenplatte 1	4500	2425	200	1	2,18	5020	2,18	5020
7	Deckenplatte 2	4500	2525	200	1	2,27	5227	2,27	5227
8	RC Balken1+2	4500	175	250	2	0,20	453	0,39	906
9	RC Attiken 1-4	4500	175	453	4	0,20	453	0,79	1811
10	RC-Betonsteine	500	175	500	61	0,04	101	2,67	6138
11	RC-Betonsteine	250	175	500	14	0,02	50	0,31	704
Summe								18	42408

6.2 Grundriss und Ansichten der RC-Wohneinheit

Im Folgenden werden die Ansichten des Rohbaus der RC-Wohneinheit dargestellt.

Mit den Ansichten werden die Positionen der RC-Bauteile sowie der Verbindungstechnik verdeutlicht. Diesbezüglich sind die Verankerungen in den Bauteilen vorgesehen.

Diese dienen an den Außenseiten zur Befestigung der Fassadenelemente. Um die Demontierbarkeit gewährleisten zu können, können die Teile in die einbetonierten Gewinde ohne Probleme ein- und wieder ausgeschraubt werden. Auf der nördlichen Ansicht (Bild 116) sind die Verbindungspunkte zwischen den zwei RC-Wandelementen sowie zwischen der RC-Wand1 und RC-Wandelement 1 als auch zwischen RC-Wandelement 2 und RC-Balken 2 zu bemerken.

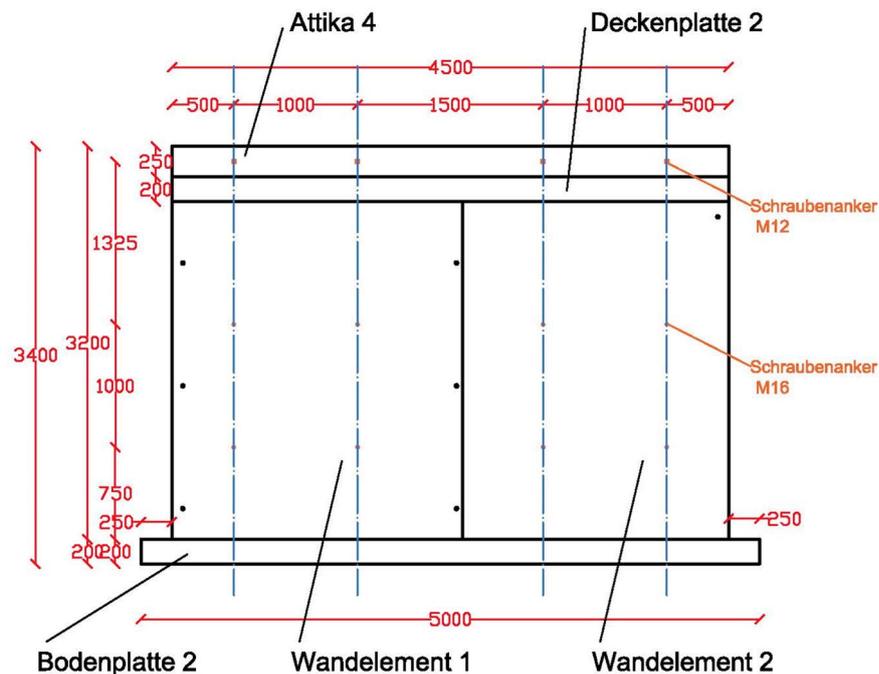


Bild 116. RC-Wohneinheit- Ansicht Nord

Die orangen Markierungen an dieser Ansicht stellen die für den Ausbau benötigten, eingebauten Hülseanker dar. So konnten mit Hilfe der Ansichten passgenaue Fassadenelemente geplant werden, die nach Errichtung des Rohbaus, die Wohneinheit von außen verkleiden sollen.

Auf der östlichen Ansicht (Bild 117) ist die größte Wandscheibe RC-Wand 1 sowie die Attika 1 und die dazugehörigen Einbauteile zur Befestigung des Fassadenausbaus dargestellt.

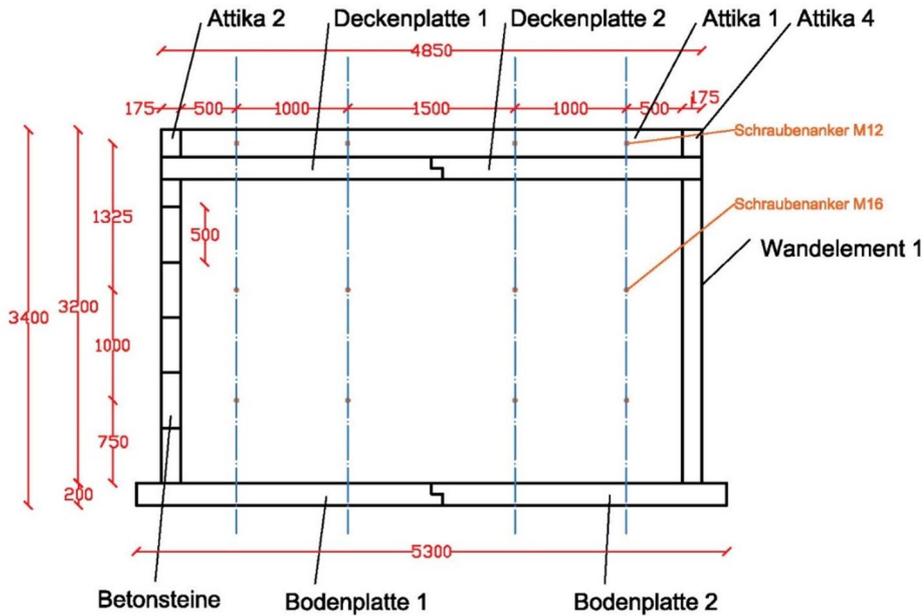


Bild 117. RC-Wohneinheit- Ansicht Ost

Auf der südlichen Ansicht (Bild 118) ist die aus RC-Betonsteinen und RC-Betonbalken 1, zusammengestellte Mauer sowie die Attika 2 aufgezeigt. Die Verbindungspunkte zwischen dem Fassadenausbau und Rohbau sind auf den RC-Betonsteinen markiert. Die lösbare Verbindung zwischen RC-Balken 1 und RC-Wand 1 sowie zwischen RC-Balken 1 und RC-Balken 2 sind zu erkennen.

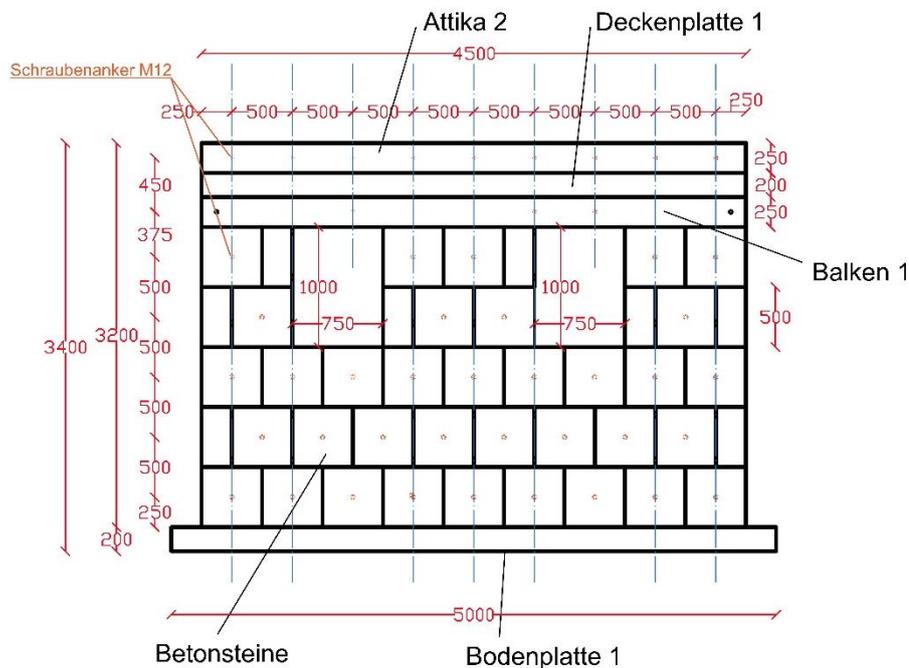


Bild 118. RC-Wohneinheit- Ansicht Süd

Auf der westlichen Ansicht (Bild 119) ist die aus RC-Betonsteinen und RC-Betonbalken 2, zusammengestellte Mauer sowie die Attika 3 aufgezeigt. Die Verbindungspunkte zwischen dem Fassadenausbau und Rohbau sind auf den RC-Betonsteinen markiert.

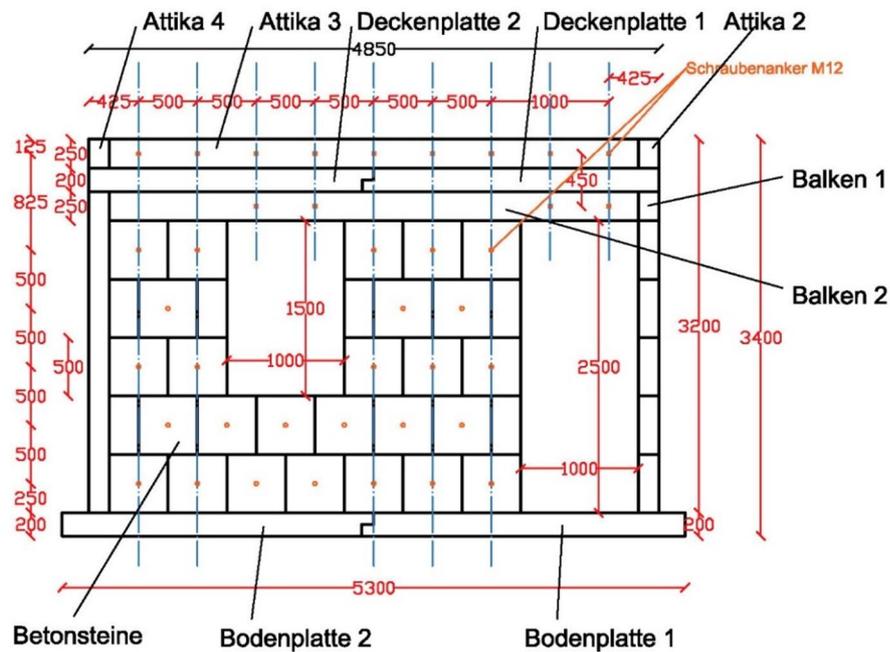


Bild 119. RC-Wohneinheit- Ansicht West

Auf der Draufsicht (Bild 120) ist die Verbindung zwischen den RC-Betonplatte 1 und 2 sowie zwischen den Attiken und den RC-Betonplatten zu sehen. Die Verbindungspunkte zwischen dem Dachausbau und Rohbau sind auf den RC-Betonplatten und Attiken dargestellt.

Im Schnitt A-A (Bild 121) sind die Lichthöhe und -länge der RC-Wohneinheit zu sehen.

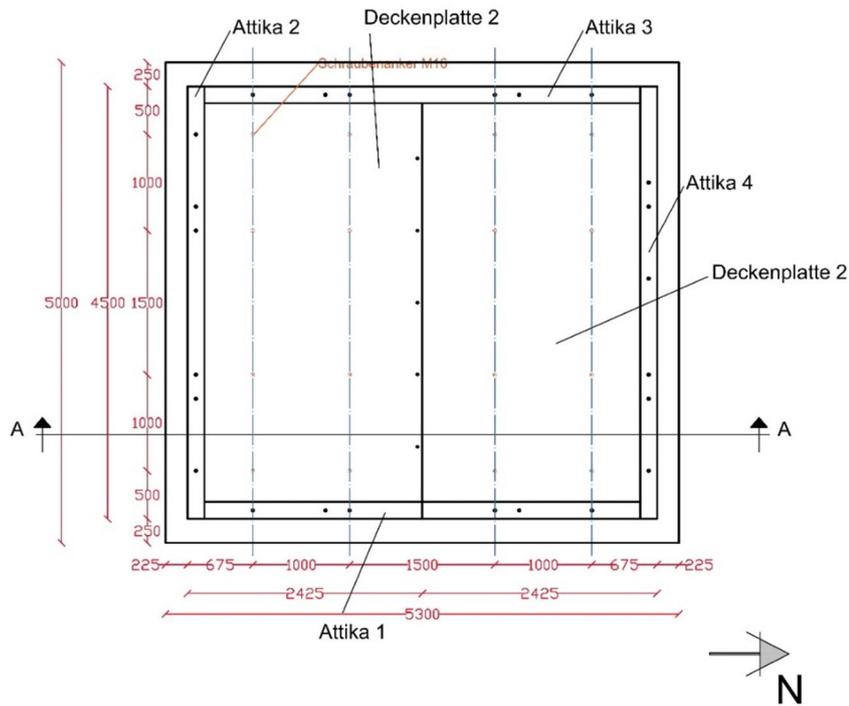


Bild 120. RC-Wohneinheit- Draufsicht

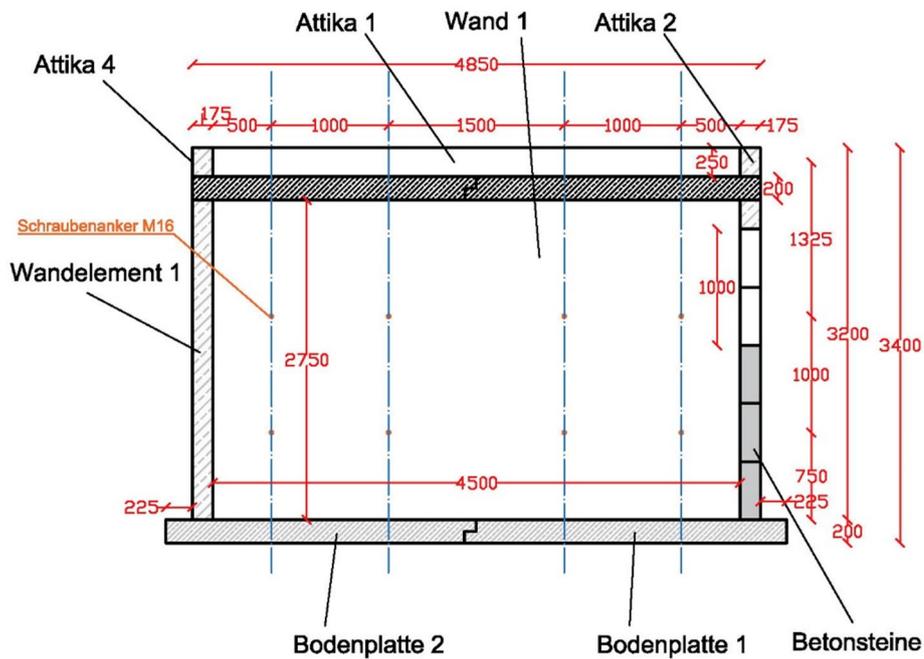


Bild 121. RC-Wohneinheit- Schnitt A-A

6.3 Herstellung der RC-Bauteile

In diesem Kapitel werden die einzelnen Bauteile mit ihren Besonderheiten und Elementen zur Demontierbarkeit beschrieben sowie die Herstellung der Bauteile bei der Firma Mattig & Lindner GmbH erklärt. Dazu sind sowohl die Bewehrungs- und Verbindungspläne als auch die Dokumentation der Fertigung im Abschnitt 18 zu finden [119].

Die gesamten RC-Bauteile wurden aus RC-Beton C30/37 nach der bereits entwickelten RC-Beton-Rezeptur hergestellt. Im Herstellungsprozess wurden sämtliche herstellungsbedingte Anforderungen eingehalten. Die Konsistenz des Frischbetons wurde so beschaffen, dass er ohne wesentliches Entmischen gefördert, eingebaut und vollständig verdichtet werden kann. Die Bauteiloberflächen wurden nach dem Betonieren nachbehandelt, sodass die gewünschte Qualität für jedes RC-Bauelement gewährleistet wurde. Für die Gewährleistung der Demontierbarkeit wurde ein Gewinde-System in den Bauteilen der RC-Wohneinheit vorgesehen.

6.3.1 Bodenplatte

Die Bodenplatte wurde zweiteilig mittels speziell angefertigter Schalungen hergestellt. Die Bodenplatte 1 (3,78 m x 4,5 m) funktioniert nur in Verbindung mit Bodenplatte 2, mit der sie später über eine Blattverbindung verschraubt wird (Bild 122, Bild 123). Dafür sind an der Verbindungsstelle bereits fünf Schraubenanker M16 angebracht. Ähnliche Schraubenanker M16 verteilen sich zusätzlich auf der Fläche der Platte in bestimmten Abständen und dienen während der Montage dem Stellen der Schrägstützen für die Wände, als auch später dem Aufbringen des demontierbaren Fußbodens. Die unterschiedlich breiten Rinnen/Ausführungen in der Platte sind für die Wände angedacht. Dabei unterscheidet man zwischen den breiteren für die Wandelemente und denen, in die die Mauerwerkswände gestellt werden. Die schmaleren feineren erkennt man außerdem an den vorgesehenen Kompaktankern, in die zu gegebenem Zeitpunkt der Errichtung, Spannglieder geschraubt werden (Bild 124, Bild 125).

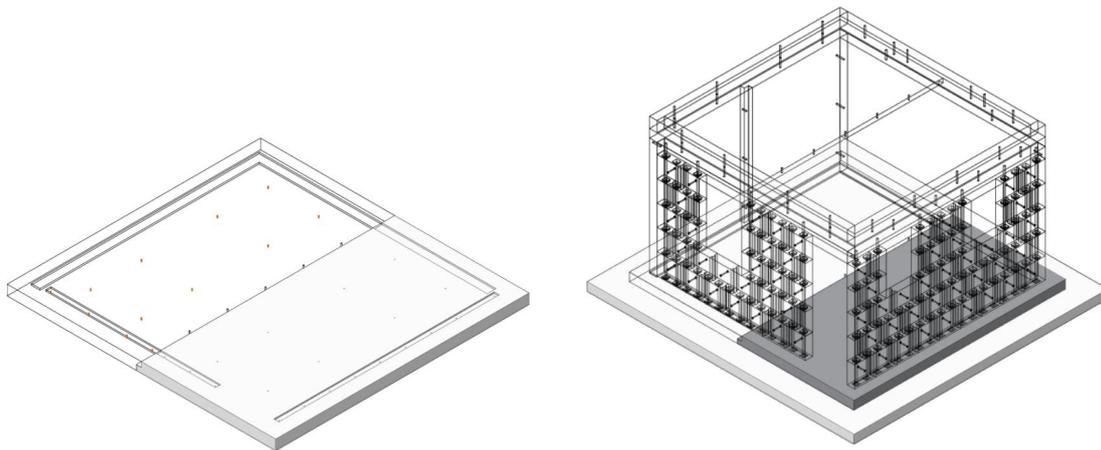


Bild 122. RC-Bodenplatte 1, 3D-Modell | Bild 123. RC-Bodenplatte 1, Position im Modul

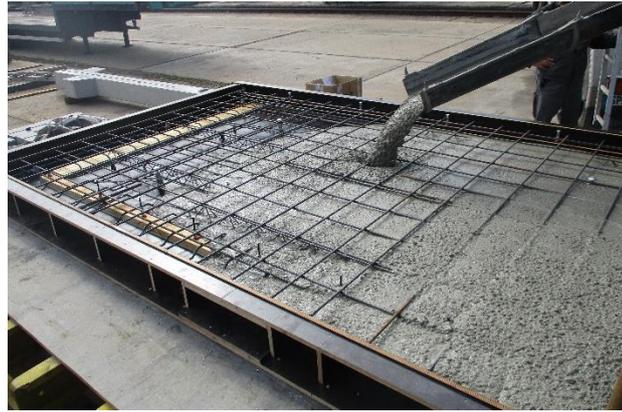
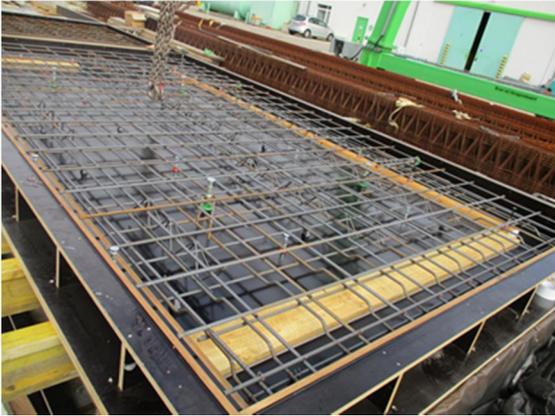


Bild 124. RC-Bodenplatte 1, Schalung, Bild 125. RC-Bodenplatte 1, Betonlage
 Verbindungstechnik

Die RC-Bodenplatte 2 (Bild 126, Bild 127) besitzt zur Verbindung mit der RC-Bodenplatte 1 an der Verplattung fünf Durchführungen, die direkt über den zugehörigen Schraubenankern liegen. Identisch zu RC-Bodenplatte 1 sind diese zusätzlich über die Fläche verteilt und dienen der Befestigung von Schrägstützen und des Fußbodenausbaus. Auch das Prinzip der Rinnen/Ausführungen für die späteren Wände wird fortgesetzt (Bild 128, Bild 129).

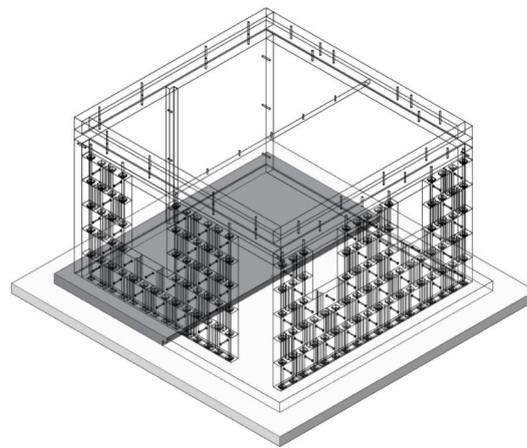
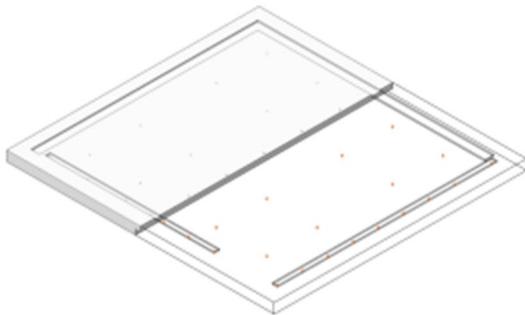


Bild 126. RC-Bodenplatte 2, 3D-Modell Bild 127. RC-Bodenplatte 2, Position im Modul



Bild 128. Bodenplatte 2, Schalung



Bild 129. Bodenplatte 2, Betonlage

Bei der Herstellung der RC-Bodenplatten wurde der RC-Beton mit der im Betonwerk vorhandenen Verdichtungstechnik (Rüttelbohle, Rüttelflasche) verdichtet. Nach Einfüllen und Verdichten des RC-Betons wurde die Oberseite der RC-Betonplatte geglättet (Bild 130, Bild 131).



Bild 130. RC-Bodenplatten, Rütteln mit-
tels Rüttelflasche



Bild 131. RC-Bodenplatten, Glätten der Ober-
fläche

Die Ausschalung der RC-Bodenplatten erfolgte nach 48 Stunden ab der Betonlage (Bild 132, Bild 133). Aufgrund des relativ großen Gewichtes (~ 6 Tonnen) ist diese Aushärtungszeit bis zur erforderlichen Tragfähigkeit zur Vermeidung der Rissentstehung beim Abheben der RC-Bodenplatten notwendig.



Bild 132. RC-Bodenplatte 1 nach der Ausschalung
Bild 133. RC-Bodenplatte 2 nach der Ausschalung

6.3.2 RC-Wandelemente

6.3.2.1 RC-Wand 1 (große Wandscheibe)

Die RC-Wand 1 wirkt als eine vertikal gestellte Scheibe (2,78 m x 4,5 m) mit zahlreichen Befestigungsankern (Bild 134, Bild 135). Sie wird später in die östliche Rinne auf den RC-Bodenplatten gestellt und während der Montage mit Schrägstützen ausgerichtet. Um diese zu verschrauben, sind auf der Innenseite der Platte vier Schraubenanker M16 vorgesehen. Die gleichen Anker befinden sich zusätzlich in achtfacher Ausführung auf der Außenseite, um daran in der Ausbauphase die Fassade anbringen zu können. Weiterhin befinden sich an der Oberkante der RC-Wand zwei Power-System-Anker M24. Sie sind dafür gedacht, um zum Schluss die Wand über die RC-Deckenplatte mit den Attiken zu verspannen. Drei Anker sind ebenfalls an der nordöstlichen Kante der Wand angebracht. Sie verbinden die RC-Wand 1 horizontal mit dem RC-Wandelement 1. Für die horizontale Verbindung mit den RC-Balken 1 im Südosten dient außerdem ein Kompaktanker.

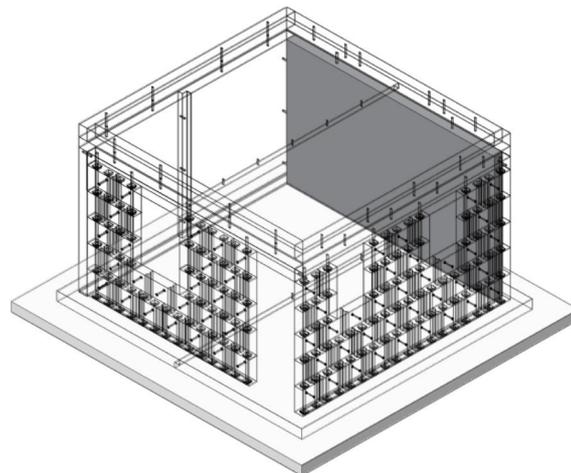
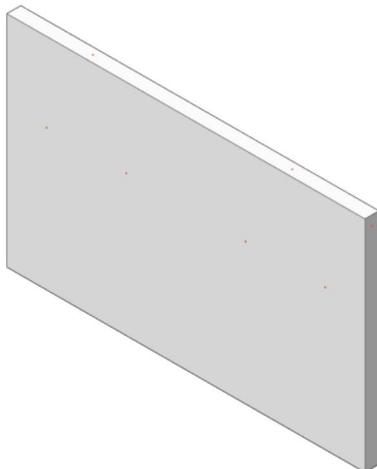


Bild 134. RC-Wand 1, 3D-Modell

Bild 135. RC-Wand 1, Position im Modul



*Bild 136. RC-Wand 1, Schalung, Verbin-Bild 137. RC-Wand 1, Betonlage, Verdichtungs-
 dungsstechnik*

Bei der Herstellung der RC-Wand1 wurde der RC-Beton mit der Rüttelbohle und Rüttelflasche verdichtet. Anschließend wurde die Außenseite der RC-Wand geglättet. An der Außenseite wurden die für den Ausbau, benötigten Einbauteile angebracht. Zwecks einer problemlosen Bauteilabhebung erfolgte die Ausschalung der RC-Wand1 nach 48 Stunden ab der Betonlage (Bild 136 bis Bild 139).



*Bild 138. RC-Wand 1, Rütteln mittels Rüttel-Bild 139. RC-Wand 1, Ausschalen
 flasche*

6.3.2.2 RC-Wandelemente 1&2

Das RC-Wandelement 1 funktioniert ausschließlich in Verbindung mit Wandelement 2 (Bild 140, Bild 141). Die beiden Teile werden nach dem gleichen Prinzip wie bei den Boden- und Deckenplatten miteinander verbunden. Wandelement 1 besitzt dazu in der Verplattung drei durchgehende Löcher. Diese wiederholen sich noch einmal an der nordöstlichen Kante und dienen der Verbindung mit den horizontalen Ankern in RC-Wand 1. Für das Ausrichten mit den Schrägstützen befinden sich auf der Innenseite der Scheibe zwei Schraubenanker M16, die auf der Außenseite noch einmal in doppelter Ausführung für die Fassadenmontage verbaut sind. Zusätzlich befinden sich dann noch zwei Power-System-Anker an der Oberkante des Elementes, um dieses später mit Deckenplatte und Attika zu verspannen.

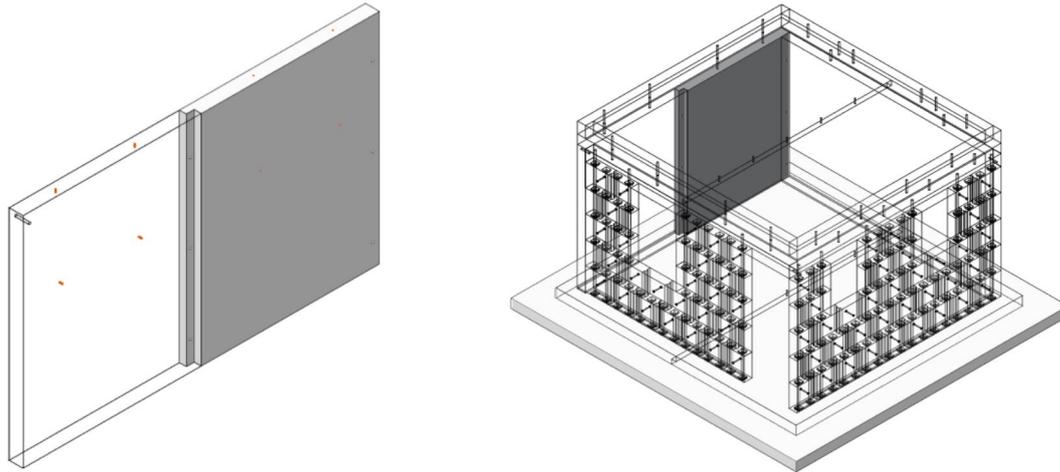


Bild 140. RC-Wandelement 1, 3D-Modell Bild 141. RC-Wandelement 1, Position im Modul



Bild 142. RC-Wandelement1, Scha-Bild 143. RC-Wandelement 1, Betonnage, Verbindungstechnik
 Verdichten

Bei der Herstellung des RC-Wandelementes 1 wurde der RC-Beton mit der Rüttelbohle und Rüttelflasche verdichtet. Anschließend wurde die Außenseite des RC-Wandelementes 1 geglättet und gegebenenfalls nach 48 Stunden ab der Betonnage ausgeschalt (Bild 142, Bild 143 und Bild 144).



Bild 144. RC-Wandelement 1, Ausschaln

Das RC-Wandelement 2 ist das Gegenstück zum Wandelement 1 (Bild 145, Bild 146). Es besitzt an der Verplattung die passenden drei Schraubenanker M16 zu den Durchführungen im anderen Element. Die weiteren Schraubenanker und Power-System-Anker sind nach dem gleichen Prinzip angeordnet und besitzen die gleichen Funktionen, wie jene in RC-Wandelement 1. Eine Unterscheidung der beiden Scheiben stellt die Durchführung in der oberen nordwestlichen Ecke des RC-Wandelementes 2 dar. Diese ist dafür gedacht, um eine Verbindung mit dem RC-Balken 2 einzugehen.

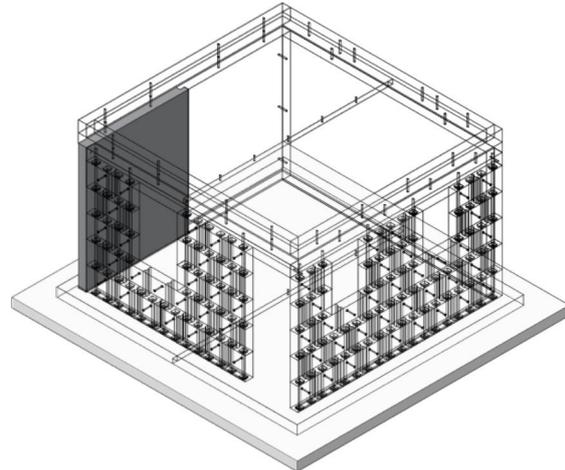
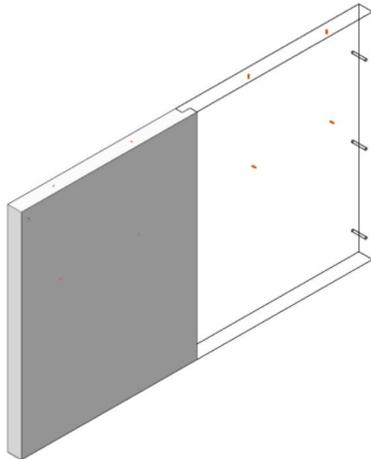
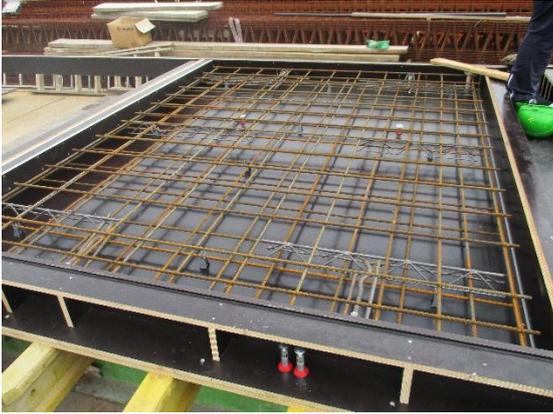


Bild 145. RC-Wandelement 2, Modell

3D-Bild 146. RC-Wandelement 2, Position im Modul



*Bild 147. RC-Wandelement 2, Schalung, Bild 148. RC-Wandelement 2, Betonung
Verbindungstechnik*

Bei der Herstellung des RC-Wandelementes 2 wurde der RC-Beton mit der Rüttelbohle und Rüttelflasche verdichtet. Die Einbauteile für die Außenseite wurden angebracht. Anschließend wurde die Außenseite der RC-Wandelement 1 geglättet und gegebenenfalls nach 48 Stunden ab der Betonung ausgeschalt (Bild 147 bis Bild 150).

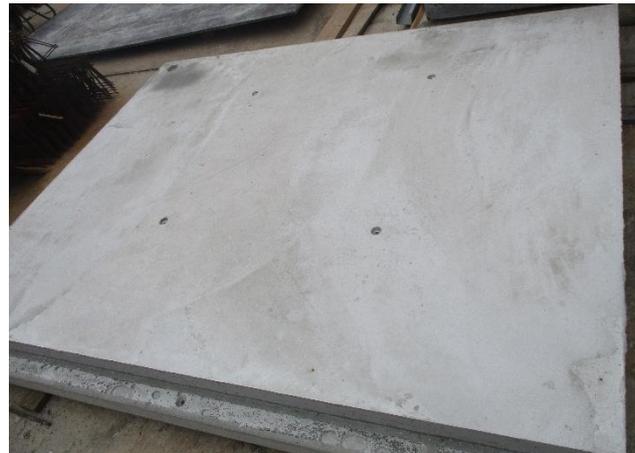
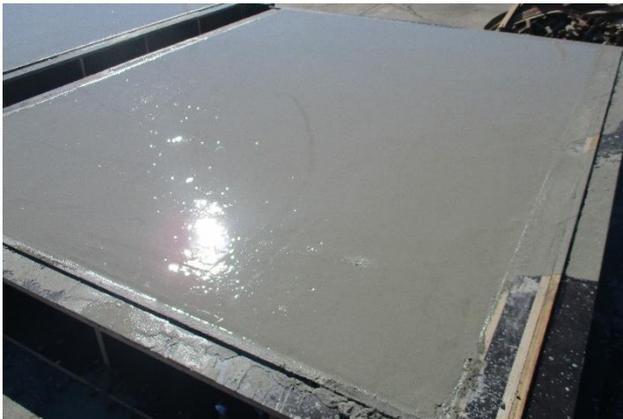


Bild 149. RC-Wandelement 2, Glätten Bild 150. RC-Wandelement 2, Ausschalen

6.3.2.3 RC-Deckenplatten 1&2

Die RC-Deckenplatten funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie die RC-Bodenplatten und RC-Wandelemente. Sie werden an der Verplattung miteinander verbunden. Dazu sind in der RC-Deckenplatte 1 (Bild 151, Bild 152) fünf Schraubenanker M16 angebracht. Die weiteren vertikalen Durchführungen am Rand der Platte dienen der Verbindung mit den darunter- und darüber liegenden RC-Bauteilen. Außerdem sind auf der Fläche nach oben zeigende Schraubenanker verteilt, in die später die Dachdeckung eingeschraubt wird.

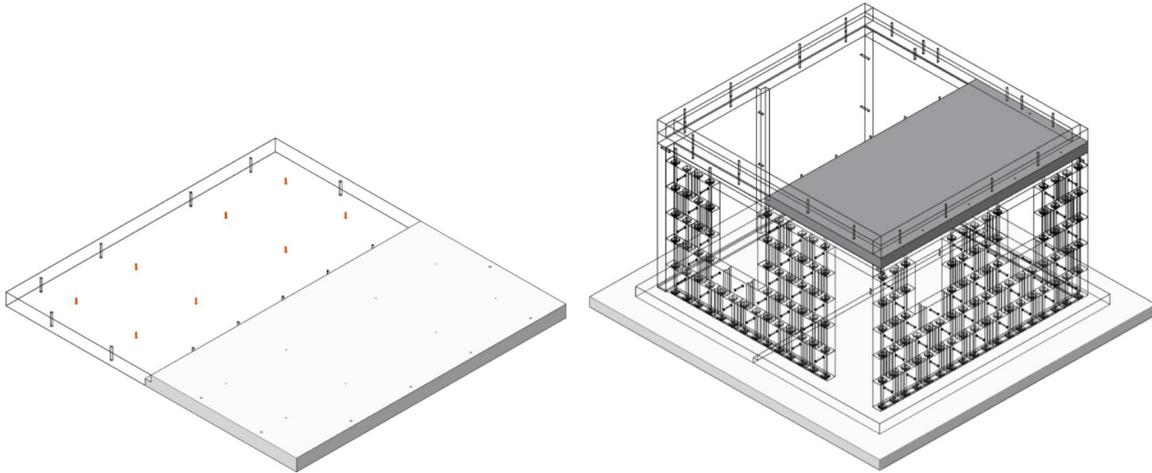


Bild 151. RC-Deckenplatte 1, 3D-Modell Bild 152. RC-Deckenplatte 1, Position im Modul



Bild 153. RC-Deckenplatte 1, Schalung, Bild 154. RC-Deckenplatte 1, Betonage Verbindungstechnik

Bei der Herstellung der RC-Deckenplatte 1 wurde der RC-Beton mit der Rüttelbohle und Rüttelflasche verdichtet. Die Einbauteile an der Oberseite wurden angebracht. Anschließend wurde die Oberseite der RC-Deckenplatte 1 geglättet und gegebenenfalls nach 48 Stunden ab der Betonage ausgeschalt (Bild 153 bis Bild 156).



Bild 155. RC-Deckenplatte 1, Glätten, Bild 156. RC-Deckenplatte 1, Ausschalen
 Verbindungstechnik

Die RC-Deckenplatte 2 (Bild 157, Bild 158) wird an der Verplattung über die fünf Durchführungen mit den passenden Schrauben in der RC-Deckenplatte 1 verbunden. Die zusätzlichen Löcher und Schraubenanker verteilen sich nach dem gleichen Prinzip und dienen den gleichen Aufgaben, wie jene in der RC- Deckenplatte 1.

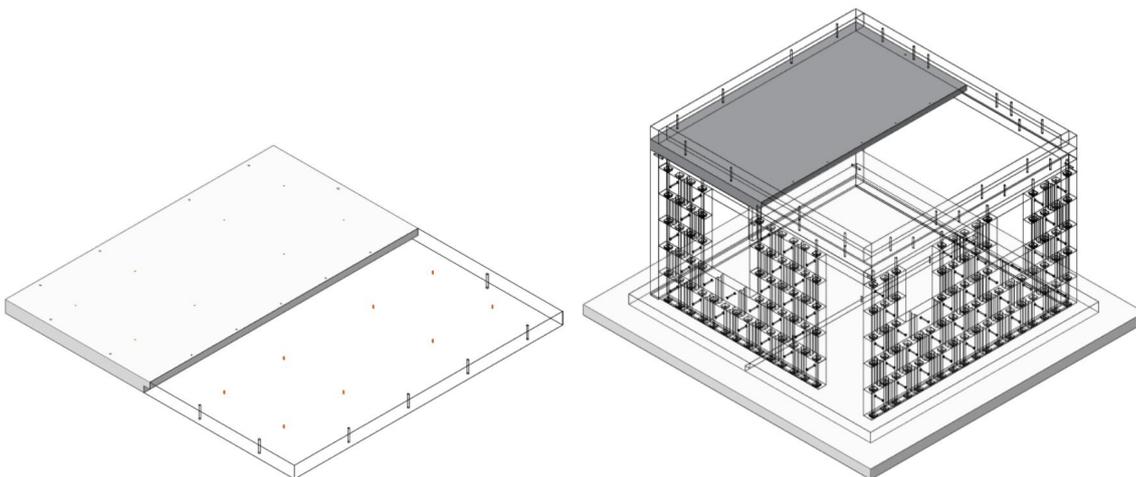


Bild 157. RC-Deckenplatte 2, 3D-Modell, Bild 158. RC-Deckenplatte 2, Position im Modul



*Bild 159. RC-Deckenplatte 2, Schalung, Bild 160. RC-Deckenplatte 2, Betonage
 Verbindungstechnik*

Bei der Herstellung der RC-Deckenplatte 2 wurde der RC-Beton mit der Rüttelbohle und Rüttelflasche verdichtet. Die Einbauteile an der Oberseite wurden angebracht. Anschließend wurde die Oberseite der RC-Deckenplatte 2 geglättet und gegebenenfalls nach 48 Stunden ab der Betonage ausgeschalt (Bild 159 bis Bild 162).

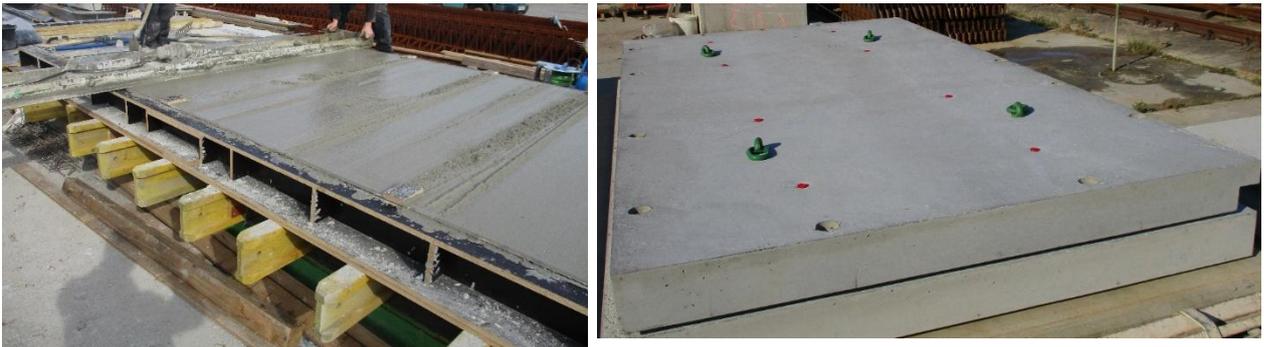


Bild 161. RC-Deckenplatte 2, Verdichten mit der Rüttelbohle Bild 162. RC-Deckenplatte 2, Betonage

6.3.2.4 RC-Betonsteine

Die RC-Betonsteine bilden die übrigen zwei Mauerwerkswände der RC-Wohneinheit und wurden komplett aus Recyclingbeton hergestellt. Die RC-Steine werden mit dem Lego-Prinzip aufgebaut. Diesbezüglich wurde ein modularer Betonstein (RC-Betonstein 1) entwickelt. Der RC-Stein verfügt über zwei negative bzw. auch positive Noppen auf der Ober- und Unterseite. Seitlich verfügt der Stein über ein Feder-Nut-System. Bei der Herstellung der RC-Betonsteine wurde zwischen den folgenden fünf Steinausführungen unterschieden:

RC-Betonstein 1

Der komplette Vollstein (RC-Betonstein 1) dient dem Mauern der beiden übrigen Wände im Süden und Westen (Bild 163, Bild 164). Dieser Stein wird in den Maßen 50 x 50 x 17,5 cm (l x h x b) gefertigt und in dieser vollständigen Ausführung 44-mal hergestellt. Er besitzt des Weiteren zwei Noppen, die im verbauten Zustand nach unten zeigen und auf der anderen Seite zwei Antinoppen, in die dann die darüber liegenden Steine gestellt werden. Durch diese Noppen führt außerdem jeweils eine Röhre, durch die später die Stahlstäbe gefädelt werden. An den kurzen Außenseiten des Steins befinden sich außerdem Nut und Feder, die ein lückenloses Vermauern der Elemente ermöglichen sollen. Zusätzlich führt ein horizontaler Schraubenanker mittig durch den Stein, der an der Außenseite zur Befestigung der Fassade dienen wird (Bild 165, Bild 166).

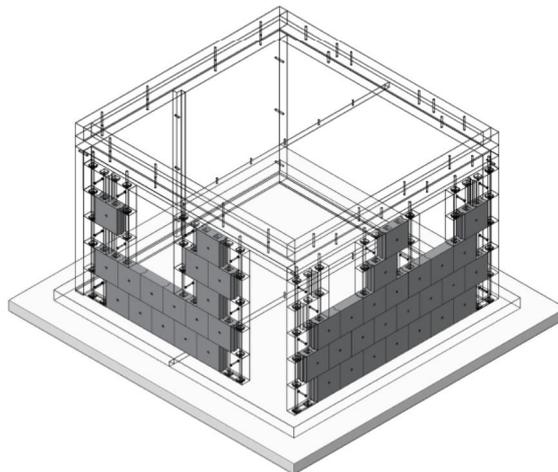
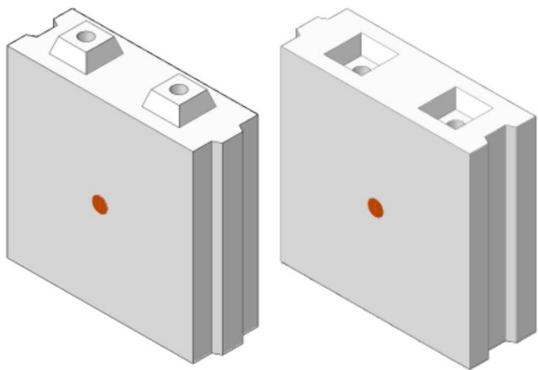


Bild 163. RC-Betonstein 1, 3D-Modell *Bild 164. RC-Betonstein 1, Position im Modul*



Bild 165. Verwendete Nagelteller mit Schraubenanker

Bild 166. RC-Betonstein 1, Befestigung der Anker an der Schalung

Die Schalung der RC-Betonsteine besteht aus speziell angefertigten Stahlelementen, die für den Betonier-Vorgang miteinander verschraubt und verspannt werden. Pro Betonlage können fünf Vollsteine gefertigt werden. Insgesamt gibt es jeweils ein großes Stahlelement mit Noppen und eines mit Antinoppen. Diese werden zuerst auf dem Schaltisch in die richtige Position gebracht und anschließend erstmals die beiden gegenüberstehenden Enden mit jeweils zwei Gewindestäben M10 fixiert. Um den genauen Abstand der Schalelemente einzuhalten, werden im nächsten Schritt die fünf horizontalen Schienen oben aufgelegt und über den angeschweißten Winkel mit den großen Elementen verschraubt. Da die Höhe der Steine somit fixiert ist, folgen danach die gebogenen Bleche, die später Nut und Feder ausbilden werden. Diese werden senkrecht und in eine Richtung zeigend in die vorgesehenen Rillen, zwischen die Schalelemente geschoben. Im Anschluss werden alle Verbindungen fest verschraubt, sodass die Abstände fixiert und das System stabil ist (Bild 167, Bild 168).



Bild 167. Fertiges Schalsystem, Einzelstein

Bild 168. Fertiges Schalsystem, 5 Steine mit Befestigungsmagneten

Pro Vollstein werden zwei Kompaktanker verbaut und bereits vor der Betonlage an die vorgesehene Stelle gebracht. Der erste Anker wird für den Transport bzw. beim Aufbau des Steines benötigt und befindet sich auf der Oberseite zwischen den Antinoppen. Dafür wird zuerst ein Klebetel-

ler mit passendem Gewinde an die richtige Stelle geklebt und nach dem Erhärten des Klebstoffes der Stahlanker darauf geschraubt. Der zweite Anker befindet sich an der Außenseite des Steines. Diese zeigt während der Fertigung nach oben und dient später der Befestigung von Fassadenelementen. Zu dessen Platzierung sind in den oben aufgetragenen Schienen mittig Löcher angeordnet, durch die der Anker mit einer Schraube verbunden werden kann.

Als letztes Bauteil werden dann ~52 cm lange PVC-Röhren durch die Löcher von Noppe und Antinoppe geschoben, um so die ausgesparten Durchführungen der Steine herzustellen und das System zusätzlich zu stabilisieren.

Um das Auslaufen des Betons zu vermeiden, werden nach Fertigstellung der Schalung alle Fugen mit Silikon abgedichtet und diese im Anschluss mit Kokosöl eingeeölt. Dieses schafft nicht nur eine gute Sichtbetonqualität, sondern ist auch umweltfreundlich. Zur Befestigung des Schalungssystems am Rütteltisch werden starke Magnethalter verwendet, die die Stahlelemente seitlich ein-klemmen.

Nach Fertigstellung des Schalungssystems wird der RC-Beton im Betonmischer hergestellt und dann mit Eimern in die Schalung gegossen. Für ein gleichmäßigeres Endergebnis werden die Steine schichtweise mit einem Stabrüttler verdichtet und am Ende die Oberfläche mit diversen Kellen glattgezogen (Bild 169, Bild 170).



Bild 169. Betonier-Vorgang RC-Betonsteine Bild 170. Fertig betonierte RC-Betonsteine/ Glätten

Nach 24 Stunden sind die Steine bereit zum Ausschalen (Bild 171, Bild 172). Dazu werden zuerst alle Schraubverbindungen gelöst und anschließend die Schalelemente durch Holzkeile abgestemmt. Nach der Ausschalung werden die Steine gekennzeichnet. Im Anschluss wird dann die Schalung wieder gesäubert und somit für die nächste Betonlage vorbereitet.



Bild 171. Ausschalen der RC-Betonsteine Bild 172. Kennzeichnung der fertigen RC-Betonsteine

RC-Betonstein 2

Der RC-Betonstein 2 (50 x 50 x 17,5 cm) stellt eine Abwandlung des kompletten Vollsteines (RC-Betonstein 1) dar. Dieser besitzt an der Seite, an der im Vollstein die Feder ausgebildet ist, eine flache Kante und wird auf Grund dessen als Randstein benutzt (Bild 173, Bild 174). Die weiteren Merkmale entsprechen denen des RC-Betonsteines 1.

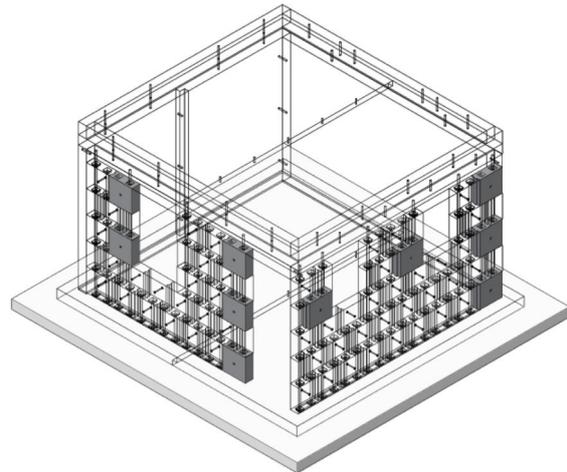
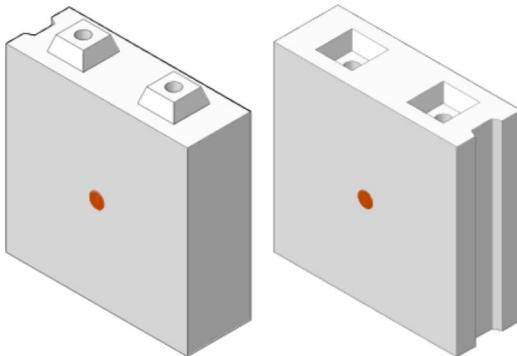


Bild 173. RC-Betonstein 2, 3D-Modell Bild 174. RC-Betonstein 2, Position im Modul

Zur Herstellung der Vollsteine mit jeweils einer abgeflachten Kante werden die gleichen Fertigungsschritte durchlaufen, wie für die RC-Betonsteine 1. Mit dem einzigen Unterschied, dass gerade Bleche für eine seitliche Begrenzung der Steine eingebaut werden. Im Falle des RC-Betonsteines 2, wird an der Seite der eigentlichen Feder, ein gerades Stahlblech in das Schalungssystem eingesetzt (Bild 175, Bild 176).



Bild 175. RC-Betonstein 2 nach Aus-Bild 176. RC-Betonstein 2 nach Ausschalen, Ansicht-Nut
 Bild 176. RC-Betonstein 2 nach Ausschalen, Ansicht-Kante

RC-Betonstein 3

Der RC-Betonstein 3 (50 x 50 x 17,5 cm) stellt eine Abwandlung des kompletten Vollsteines (RC-Betonstein 1) dar. Dieser besitzt an der Seite, an der im Vollstein die Nut ausgebildet ist, eine flache Kante und wird auf Grund dessen als Randstein benutzt (Bild 177, Bild 178). Die weiteren Merkmale entsprechen denen des RC-Betonsteines 1.

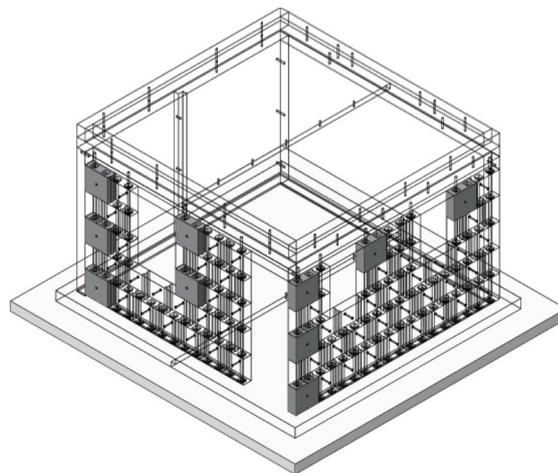
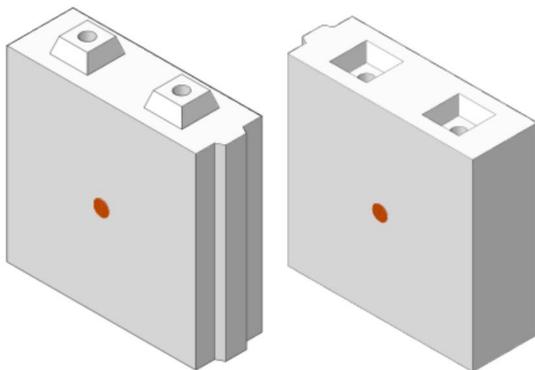


Bild 177. RC-Betonstein 3, 3D-Modell
 Bild 178. RC-Betonstein 3, Position im Modul

Zur Herstellung der Vollsteine mit jeweils einer abgeflachten Kante werden die gleichen Fertigungsschritte durchlaufen, wie für die RC-Betonsteine 1. Mit dem einzigen Unterschied, dass gerade Bleche für eine seitliche Begrenzung der Steine eingebaut werden. Im Falle des RC-Betonsteines 3, wird an der Seite der eigentlichen Nut, ein gerades Stahlblech in das Schalungssystem eingesetzt (Bild 179).



Bild 179. RC-Betonsteine 2 und 3, Ausschalen, Kennzeichnung & Lagerung

RC-Betonstein 4

Der RC-Betonstein 4 ist ein Halbstein und besitzt mit den Maßen von 25 x 50 x 17,5 cm (l x h x b) nur die halbe Länge des Vollsteines und wird als Randabschluss eingesetzt (Bild 180, Bild 181). Ähnlich dem RC-Betonstein 2 ist die Seite der eigentlichen Feder abgeflacht und lediglich die Nut wird ausgebildet. Noppe und Antinoppe sind folglich der Länge, nur in einfacher Ausführung vorzufinden, besitzen aber trotz dessen die gleiche Durchführung. Auf den Schraubenanker zur Fassadenbefestigung wurde verzichtet.

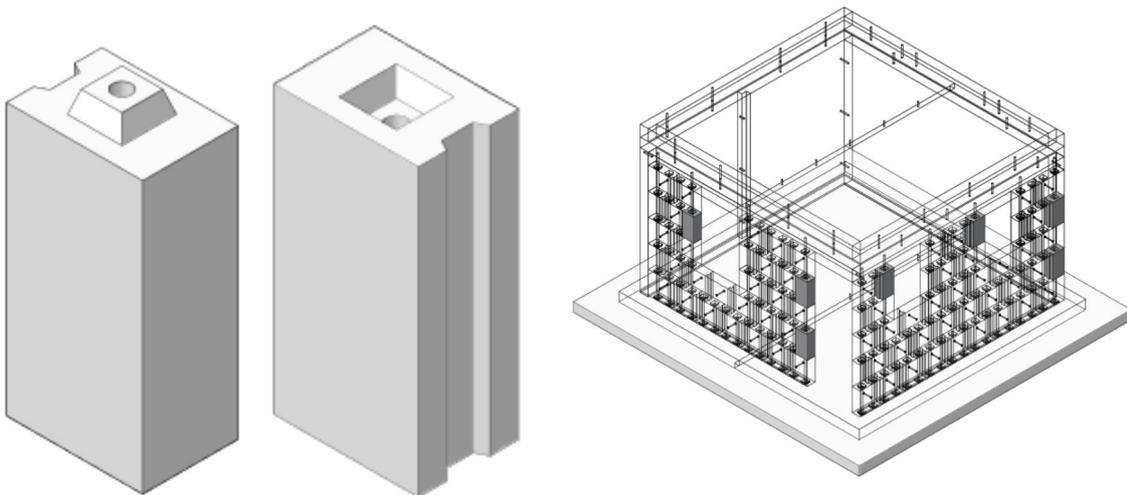


Bild 180. RC-Betonstein 4, 3D-Modell Bild 181. RC-Betonstein 4, Position im Modul

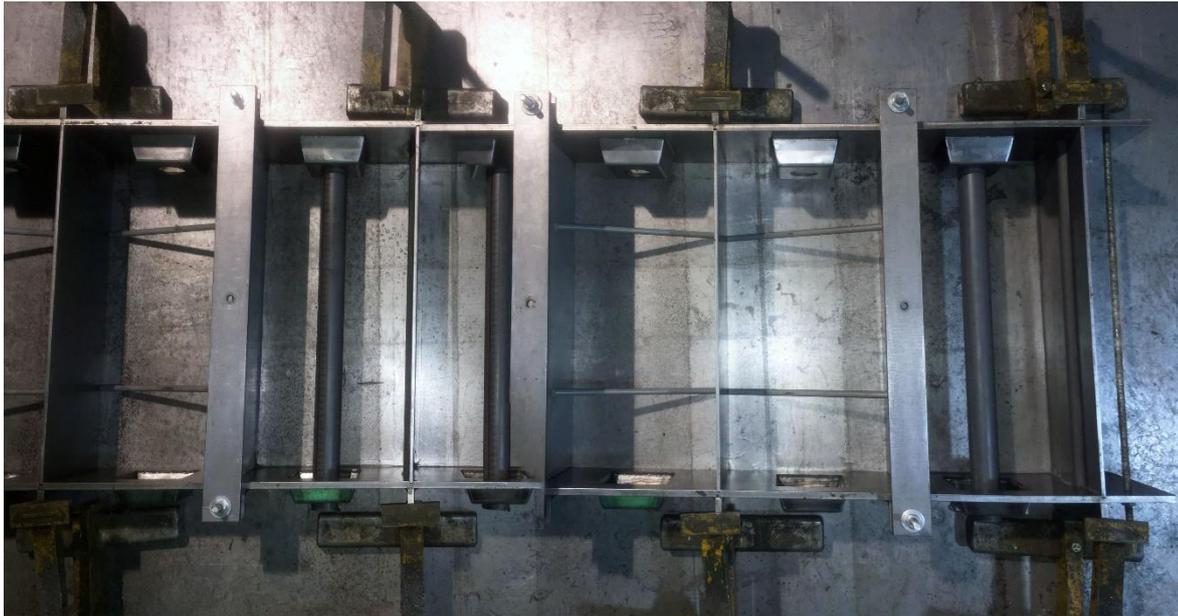


Bild 182. Schalungssystem für die Halbsteine

Die RC-Beton-Halbsteine werden mit Hilfe des gleichen Schalungssystems hergestellt, wie auch die RC-Beton-Vollsteine. In einem Betoniervorgang können fünf Steine auf einmal gefertigt werden (Bild 182).

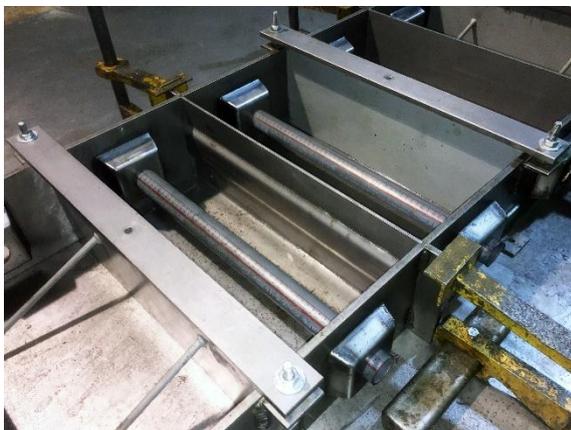


Bild 183. Schalung für RC-Beton-Halbsteine *Bild 184. Schalprinzip für Halbsteine*

Dazu wird das Grundgerüst der Schalung wie gewohnt zusammengebaut. Die beiden großen Stahlelemente zur oberen und unteren Begrenzung der Steine stehen sich gegenüber und werden an den Enden mit Gewindestäben verspannt. Die horizontalen Schienen halten von oben den Abstand zwischen den einzelnen Teilen. Zwischen zwei zu betonierende Steine werden gebogene Bleche eingesetzt und damit in einem Durchgang, sowohl Halbstein 4 als auch Halbstein 5, hergestellt. Für die geraden Kanten der Bauteile wurden noch zusätzliche Stahlblecheinlagen mit schrägen Abstützungen gefertigt, die dadurch wiederum die Breite der Elemente bestimmen. Zum Schluss werden die PVC-Rohre in die Schalung eingebracht, um Durchführungen auch in den Halbsteinen auszusparen (Bild 183, Bild 184). Mit Hilfe von Silikon werden nach Fertigstellung der

Schalung alle Fugen verschlossen und so das Auslaufen des Betons verhindert. Kurz vor dem Einfüllen des RC-Gemisches wird das System mit Kokosöl eingölt.



*Bild 185. Betonierte
 Halbsteine*

RC-Beton-Bild 186. Eingeschalte Halbsteine

Für die Betonmischung wird je nach benötigter Gesamtmenge des Tages, entweder die große Mischanlage der Firma Mattig & Lindner oder ein normaler Betonmischer verwendet.

Nach Einfüllen des RC-Betons wird das Prinzip der Halbstein-Schalung noch einmal deutlicher. Zwischen zwei Steinen befindet sich ein gebogenes Blech, welches Nut und Feder ausbildet. Danach folgen zwei leere Felder, in denen die schrägen Abstützungen den Abstand zum nächsten Stahlblech einhalten.



Bild 187. RC-Betonstein 4, Noppenseite



*Bild 188. RC-Betonstein 4, Anti-
 Noppenseite*

Nach etwa 24 Stunden können die Halbsteine ausgeschalt werden (Bild 185 bis Bild 188). Zur Nachbearbeitung werden anschließend noch die Überstände der PVC-Rohre mit einem Dremel/Multifunktionswerkzeug abgeschliffen.

RC-Betonstein 5

Der RC-Betonstein 5 (25 x 50 x 17,5 cm) ist ähnlich dem RC-Betonstein 4 ein Halbstein und besitzt die gleichen Eigenschaften. Lediglich die Feder wird hier anstatt der Nut ausgebildet (Bild 189, Bild 190). Er dient als Randstein für einen geraden Wandabschluss.

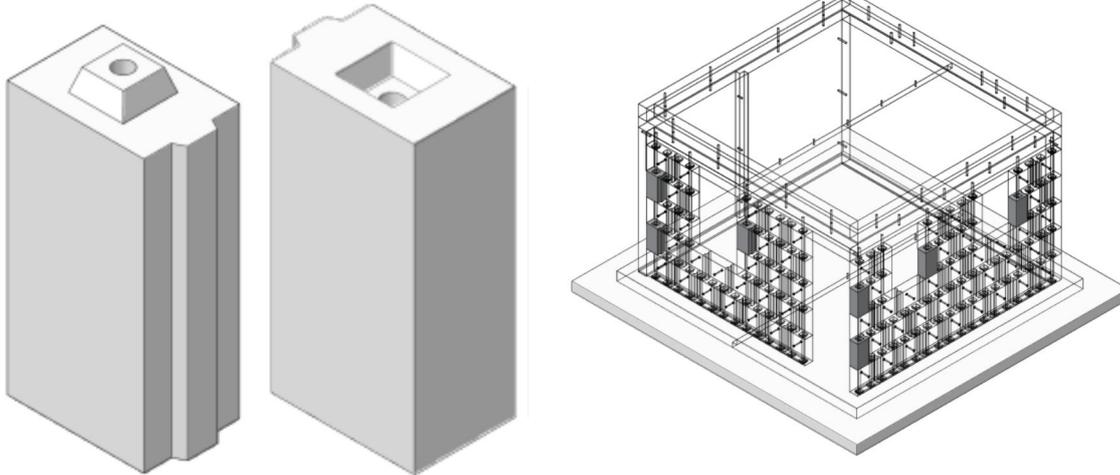


Bild 189. RC-Betonstein 5, 3D-Modell Bild 190. RC-Betonstein 5, Position im Modul



Bild 191. RC-Betonstein 4, Noppenseite



Bild 192. RC-Betonstein 4, Anti-Noppenseite

Die RC-Betonsteine 5 werden gemeinsam mit den anderen Halbsteinen gefertigt und durchlaufen somit auch die gleichen Produktionsschritte, wie die RC-Betonsteine 4 (Bild 191 bis Bild 194).



Bild 193. RC-Betonstein 4 &5, Noppenseite Bild 194. RC-Betonstein 4&5, Anti-Noppenseite

6.3.2.5 RC-Balken

Die RC-Balken dienen hauptsächlich dazu, die aus RC-Betonsteinen gebildeten Wandscheiben zu stabilisieren. Diese wurden ebenfalls aus Recyclingbeton hergestellt. Die RC-Balken sind gegebenenfalls die Verbund-Bauelemente zwischen den RC-Stein-Mauern und der darauf liegenden RC-Betondecken. Bei der Herstellung der RC-Betonbalken wurde zwischen RC-Balken 1 und 2 unterschieden:

RC-Balken 1

Der RC-Balken 1 (450 x 17,5 x 25 cm) wurde aus Recyclingbeton hergestellt und an den oberen Abschluss der südlichen Mauerwerkswand (Bild 195, Bild 196) eingebaut. Dieser Balken besitzt wie die RC-Betonsteine Noppe und Antinoppe, jedoch nur an den Stellen, an denen die Stahlstäbe durch die zugehörigen Durchführungen gefädelt werden. In den sechs Antinoppen werden diese später bis zur Bodenplatte verspannt und aus den gemauerten Wänden werden kraftschlüssige Wandscheiben gebildet. An den Enden des Balkens ist jeweils eine horizontale Durchführung vorgesehen. Diese dient am nordwestlichen Ende zur Verbindung mit RC-Balken 2 und am südöstlichen Ende dem Verspannen mit der RC-Wand 1. Zusätzlich sind vier Kompaktanker am oberen Rand des Balkens verbaut, über die er zum Schluss mit der RC-Deckenplatte und der Attika verbunden wird.

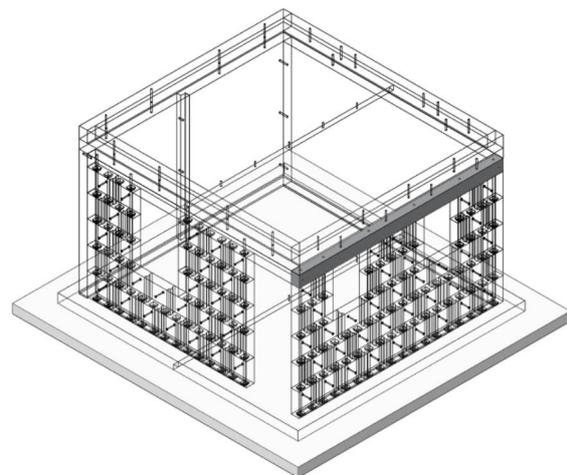
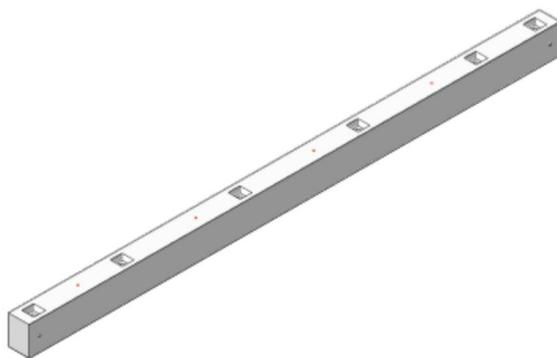


Bild 195. RC-Balken1, 3D-Modell Bild 196. RC-Balken 1, Position im Modul

Die Schalung der RC-Balken ist zusammengesetzt aus Schaltafeln, die durch Vollholzstreben zusätzlich abgestützt und verspannt werden, sowie aus Metallelementen, die Begrenzungen und Noppen ausbilden. Die Balken werden auf der Seite liegend betoniert, somit zeigen die Noppen

und vertikalen Durchführungen zu den Seiten. Um den genauen Abstand der vertikalen Begrenzungen einzuhalten und somit eine einheitliche Höhe des Balkens zu gewährleisten, können die Gewindestäbe mittels zugehöriger Schrauben auf die passende Länge eingestellt werden. Das Schalsystem soll sowohl für beide Balken, als auch alle Attiken genutzt werden und muss vor jedem Betonier-Vorgang individuell angepasst werden. An der späteren Unterseite sind also in den vorgesehenen quadratischen Aussparungen entweder flache Metallplatten zu befestigen oder eine metallische Noppe. An der späteren Oberseite des Balkens sind außerdem Löcher für die zugehörigen Durchführungen vorgesehen. Diese müssen auch je nach Bauteil verschlossen oder mit einem PVC-Rohr durchfädelt werden. Im Falle des RC-Balken 1 werden vier Noppen mit vertikalen Durchführungen ausgebildet, alle anderen Öffnungen im Schalsystem werden verschlossen. Für die Antinoppen der Balken werden würfelförmige Styroporquader geschnitten und an den PVC-Rohren mittels Fugenschaum befestigt. In ihnen sollen später beim Aufbau die Schrauben beim Verspannen der Teile versinken (Bild 197, Bild 198).

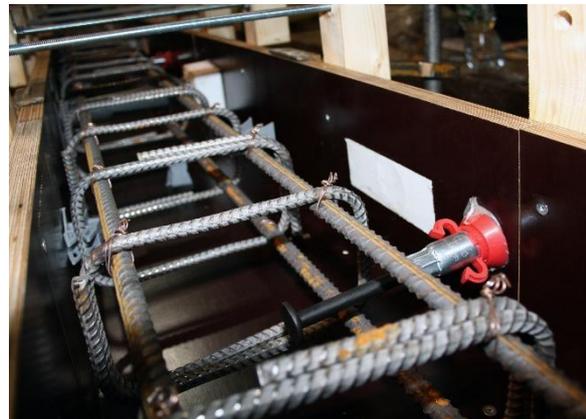


Bild 197. RC-Balken1, Schalungsdetail: Noppe & Antinoppe
Bild 198. RC-Balken 1, Bewehrung

Um die genaue Platzierung der Bewehrung innerhalb des Bauteils und während des Betonier-Vorganges gewährleisten zu können, werden Abstandshalter aus Plastik eingesetzt, die an die Stahlbügel geklemmt werden. Zum Verspannen des Balkens mit Deckenplatte und Attiken, sind Kompaktanker an der Oberseite des Bauteils vorgesehen. Diese werden, wie bei den RC-Betonsteinen, an die passende Stelle in der Schalung geklebt. Sie können nach dem Ausschalen von der Schaltafel gelöst und aus dem ausgehärteten Beton geschraubt werden (Bild 199, Bild 200). Vor dem Einfüllen des Betons werden schließlich alle Fugen mit Silikon abgedichtet und die Schalung mit Kokosöl eingefettet.



Bild 199. RC-Balken 1, Schalungsdetail: Abstandhalter



Bild 200. RC-Balken 1, Schalungsdetail: Kompaktanker

Auf Grund der großen Menge an benötigtem RC-Beton wurde die für die Herstellung der RC-Balken benötigte RC-Beton-Rezeptur in der großen Mischanlage der Firma Mattig & Lindner GmbH vorbereitet. Der große Beton-Kübel wird dann mit Hilfe diverser Kranwerkzeuge und -vorrichtungen in der Werkhalle zur Schalung transportiert und durch den Auslass an der Unterseite, problemlos eingefüllt (Bild 201, Bild 202). Je nach Standhaftigkeit der Systeme wird jeder Bereich der Bauteile anschließend einzeln mittels Rütteltisch oder Rüttelflasche verdichtet und schlussendlich die Oberfläche mit speziellen Kellen glattgezogen (Bild 202, Bild 203).



Bild 201. RC-Balken, Betonier-Vorgang



Bild 202. RC-Balken, Einfüllen des RC-Betons

Zum späteren Transport kommen nach Fertigstellung des Balkens noch die seitlichen Kompaktanker dazu. Diese dienen nach dem Erhärten zum Anheben des Bauteils mit dem Kran und sind somit ebenfalls eine Hilfe beim Ausschalen der großen Elemente.

Nach zwei Tagen kann das System ausgeschalt und zur weiteren Verwendung gesäubert werden.



Bild 203. Vorbereitete Schalungen für RC-Bild 204. RC-Balken nach Betonieren und Glätten

RC-Balken 2

Der RC-Balken 2 (450 x 17,5 x 25 cm) besteht ebenfalls aus Recyclingbeton und weist die gleichen Merkmale wie Balken 1 auf und wird auf der übrigen Mauerwerkswand angebracht (Bild 205, Bild 206). Es sind ebenfalls vier vertikale Kompaktanker verbaut, jedoch gibt es nur vier Durchführungen für die Stahlstäbe mit Noppe und Antinoppe. Zusätzlich sind an der Außenseite des Balkens vier Schraubenanker M16 angebracht, die später der Befestigung der Fassadenelemente dienen. An den Querschnittsenden ist außerdem jeweils ein Schraubenanker vorgesehen, der in der südwestlichen Ecke zur Verbindung mit dem RC-Balken 1 dient und in der nordwestlichen Ecke zum Verschrauben mit dem RC-Wandelement 2 und dessen Durchführung angedacht ist.

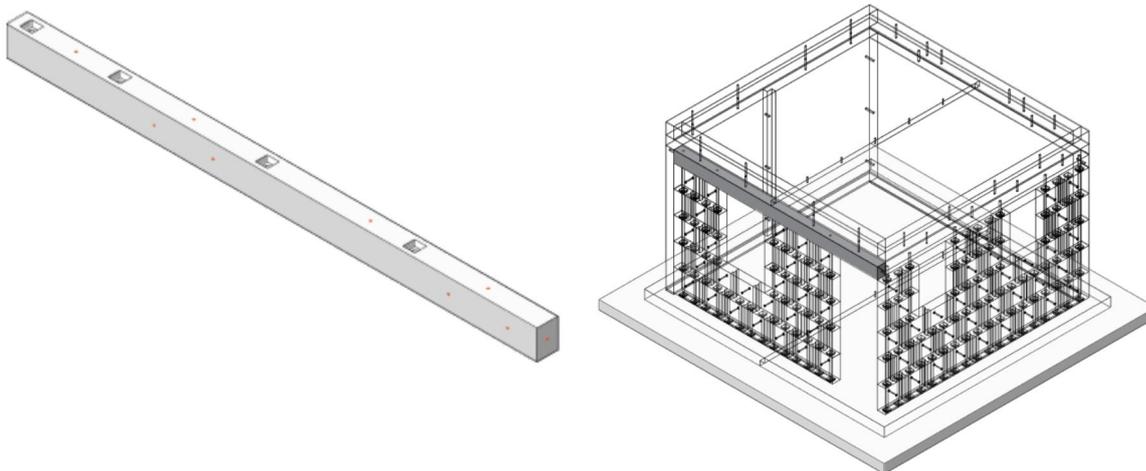


Bild 205. RC-Balken 2, 3D-Modell

Bild 206. RC-Balken 2, Position im Modul

Zur Herstellung des RC-Balkens 2 werden die gleichen Herstellungsschritte durchlaufen, wie für den RC-Balken 1. Es wird dementsprechend die Position der Durchführungen angepasst und die vorgesehenen Anker in das Schalsystem eingebracht (Bild 207). In der Nachbearbeitung werden dann noch die Überstände der PVC-Rohre abgeschnitten und gegebenenfalls die Oberfläche geglättet.



Bild 207. RC-Balken 1 & 2 nach dem Ausschalen

6.3.2.6 RC-Attiken

Die RC-Attiken dienen zur Verdeckung des Daches und zur Halterung des Dachaufbaues (Dämm- und Abdeckplatten) der RC-Wohneinheit.

Die vier Attiken wurden in der gleichen Schalung gefertigt, wie die RC-Balken. Um eine höhere Passgenauigkeit der Teile beim Aufbau der Wohneinheit erzielen zu können, werden die Durchführungen nachträglich gebohrt und somit die PVC-Rohre zur Betonnage eingespart. Die Schrauben, mit denen die Attiken zum Schluss mit den darunterliegenden Elementen verspannt werden, sollen im Bauteil versinken. Dazu und zur Markierung der nachträglichen Durchführung werden die grünen Nagelteller in die Schalung geklebt.

RC-Attika 1

Die RC-Attika 1 (4,5 x 0,175 x 0,25 m) wird als Balken hergestellt und an der östlichen Seite als oberer Abschluss der Wohneinheit angebracht (Bild 208, Bild 209). Diese besitzt zwei vertikale Durchführungen zur Verbindung mit den darunterliegenden Bauteilen und zusätzlich zwei vertikale Kompaktanker, die das Aufbringen der Dachdeckung ermöglichen. Außerdem befinden sich an der Außenseite der RC-Attika 1 vier horizontale Schraubenanker M16, an denen in der Ausbauphase die Fassade befestigt werden kann.

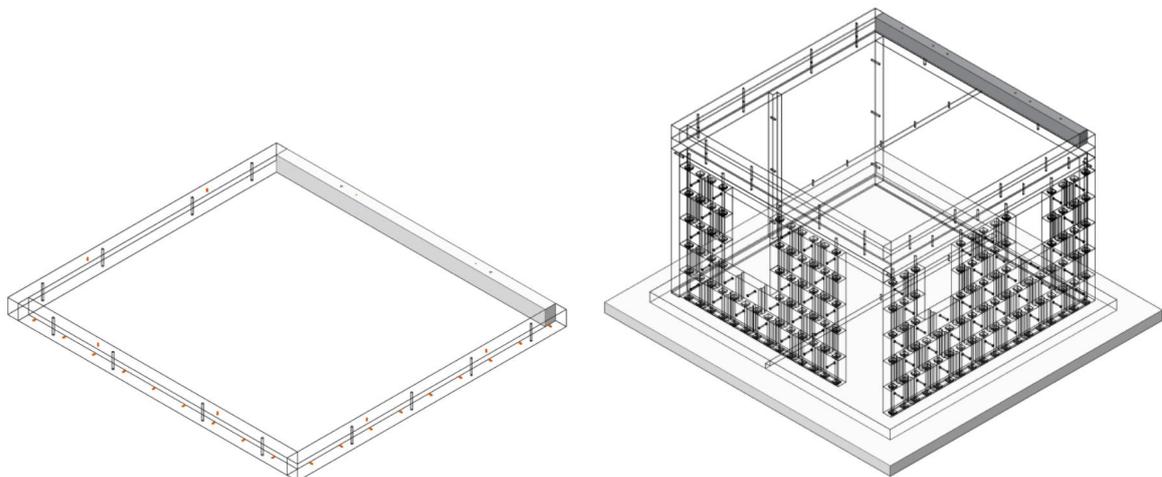


Bild 208. RC-Attika 1, 3D-Modell

Bild 209. RC-Attika 1, Position im Modul

Ähnlich wie bei den RC-Balken, werden mit den orangen Tellern die Schraubenanker und mit den roten Tellern die Kompaktanker angebracht. Diese Verbindungsteile werden für die Demontierbarkeit benötigt (Bild 210, Bild 211).



Bild 210. Bewehrung, Verbindungstechnik, Bild 211. RC-Attika 1 nach Betonlage

Da bei den Attiken weder Noppen noch Antinoppen vorgesehen sind, werden alle Öffnungen im Schalungssystem verschlossen. Nach Einfüllen des Betons werden dann noch zwei Kompaktanker von oben in die Oberfläche gedrückt. Sie dienen nach dem Aushärten der Mischung dazu, die Elemente sowohl auszuschalen, als auch sie mit dem Kran zu transportieren und bei der Montage aufzubauen (Bild 212, Bild 213).



Bild 212. Ausschalen, RC-Attika 1

Bild 213. RC-Attika 1, Lagerung

RC-Attika 2

Die RC-Attika 2 (4,5 x 0,175 x 0,25 m) wird ebenfalls als Balken hergestellt und an der südlichen Seite als oberer Abschluss der RC-Wohneinheit aufgebracht (Bild 214, Bild 215). Diese besitzt vier vertikale Durchführungen zur Verbindung mit den darunterliegenden Bauteilen und zusätzlich zwei vertikale Kompaktanker, die das Aufbringen der Dachdeckung ermöglichen. Außerdem befinden sich an der Außenseite der RC-Attika 2 neun horizontale Schraubenanker M16, an denen in der Ausbauphase die Fassade befestigt werden kann.

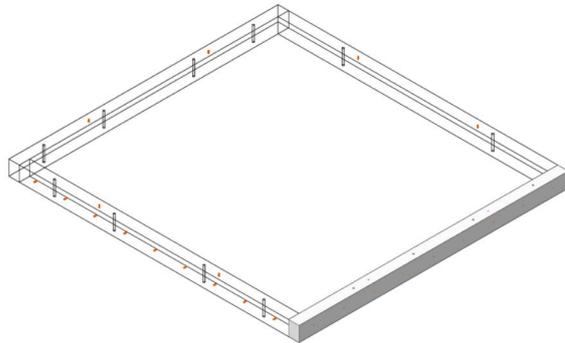


Bild 214. RC-Attika 2, 3D-Modell

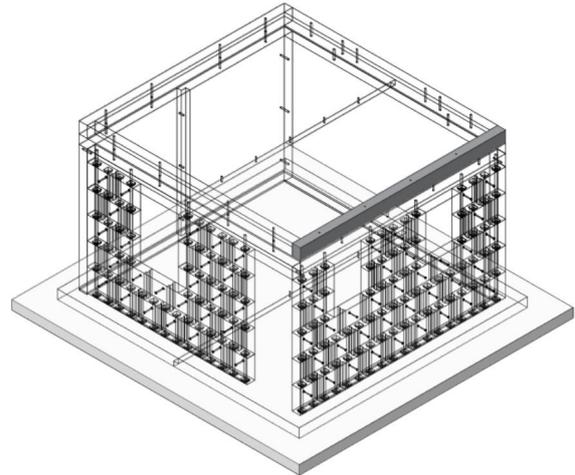


Bild 215. RC-Attika 2, Position im Modul

Für die Herstellung der RC-Attika 2 werden die gleichen Herstellungsschritte durchlaufen, wie für die RC-Attika 1. Die für die Demontierbarkeit benötigten Verbindungsmittel und Anker werden entsprechend den jeweiligen Ausführungsplänen gesetzt und die Bewehrung eingebracht (Bild 216, Bild 217).



Bild 216. Bewehrung, Verbindungstechnik, RC-Attika 2



Bild 217. RC-Attika 2 nach Betonlage

RC-Attika 3

Die RC-Attika 3 (4,5 x 0,175 x 0,25 m) wird ebenfalls als Balken hergestellt und an der westlichen Seite als oberer Abschluss der RC-Wohneinheit aufgebracht (Bild 218, Bild 219). Diese besitzt vier vertikale Durchführungen zur Verbindung mit den darunterliegenden Bauteilen und zusätzlich zwei vertikale Kompaktanker, die das Aufbringen der Dachdeckung ermöglichen. Außerdem befinden

sich an der Außenseite der RC-Attika 3 neun horizontale Schraubenanker M16, an denen in der Ausbauphase die Fassade befestigt werden kann.

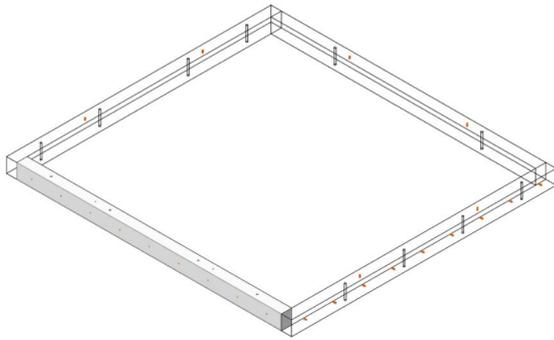


Bild 218. RC-Attika 3, 3D-Modell

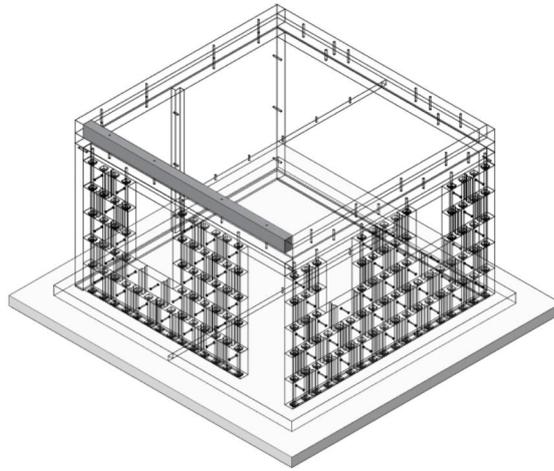


Bild 219. RC-Attika 3, Position im Modul

Für die Herstellung der RC-Attika 3 werden die gleichen Herstellungsschritte durchlaufen, wie für die RC-Attika 1. Die für die Demontierbarkeit benötigten Verbindungsmittel und Anker werden entsprechend den jeweiligen Ausführungsplänen gesetzt und die Bewehrung eingebracht (Bild 220, Bild 221).



Bild 220. Bewehrungskorb und Verbindungstechnik, RC-Attika 3



Ver-Bild 221. RC-Attika 3, Bewehrung und Verbindungstechnik

RC-Attika 4

Die RC-Attika 4 (4,5 x 0,175 x 0,25 m) wird ebenfalls als Balken hergestellt und an der nördlichen Seite als oberer Abschluss RC-Wohneinheit aufgebracht (Bild 222, Bild 223). Diese besitzt vier vertikale Durchführungen zur Verbindung mit den darunterliegenden Bauteilen und zusätzlich zwei vertikale Kompaktanker, die das Aufbringen der Dachdeckung ermöglichen. Außerdem befinden sich an der Außenseite der RC-Attika 4 vier horizontale Schraubenanker M16, an denen in der Ausbauphase die Fassade befestigt werden kann.

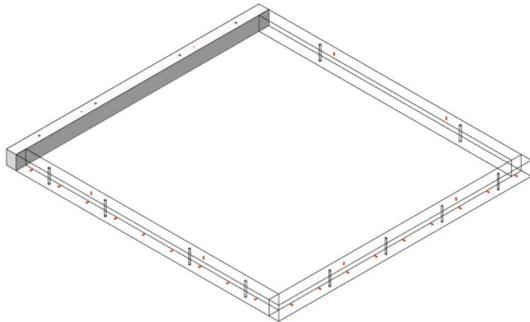


Bild 222. RC-Attika 4, 3D-Modell

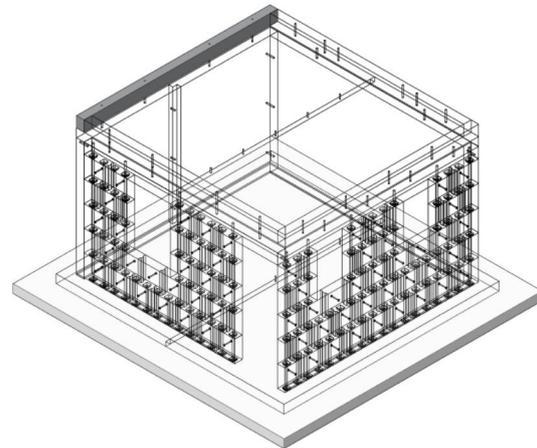


Bild 223. RC-Attika 4, Position im Modul

Für die Herstellung der RC-Attika 4 werden die gleichen Herstellungsschritte durchlaufen, wie für Attika 1. Die für die Demontierbarkeit benötigten Verbindungsmittel und Anker werden entsprechend den jeweiligen Ausführungsplänen gesetzt und die Bewehrung eingebracht (Bild 224, Bild 225).

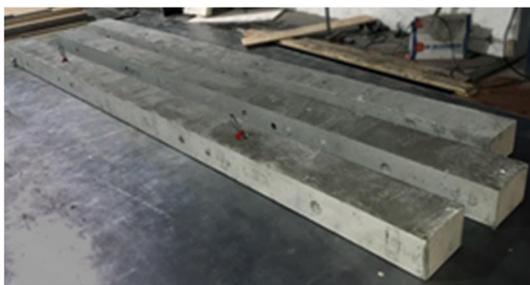


Bild 224. RC-Attika 4, Lagerung



Bild 225. RC-Attika 4, Aussparung

6.4 Errichtung des Rohbaus der RC-Wohneinheit

In diesem Abschnitt werden die einzelnen Schritte der Errichtung der RC-Wohneinheit auf dem Gelände der Firma Mattig & Lindner chronologisch von unten nach oben beschrieben und dokumentiert.

6.4.1 Grundplatte

Die RC-Wohneinheit muss zur Verhinderung der Bodensetzungen ggf. Gefährdung deren Stabilität auf einem stabilen, festen Grund aufgebaut werden. Für die Errichtung der Wohneinheit bei M&L

wurde als Grundlage die auf dem Gelände bereits stehenden Betonplatten ausgewählt, welche einen stabilen Untergrund garantieren (Bild 226, Bild 227). Alternativ dazu könnten die RC-Wohneinheit auf einem verdichteten Boden mit einer planierten Oberfläche aufgestellt werden.

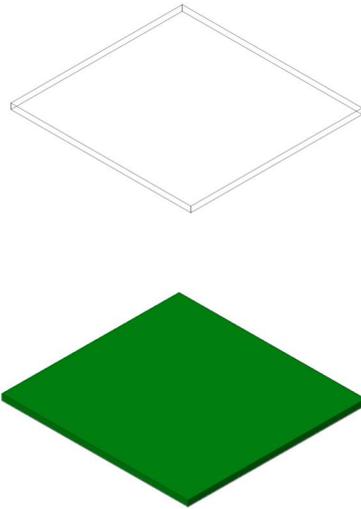
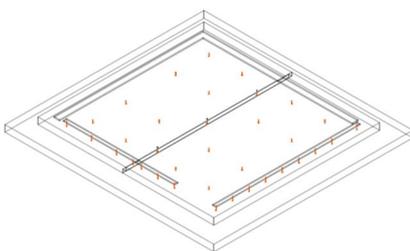


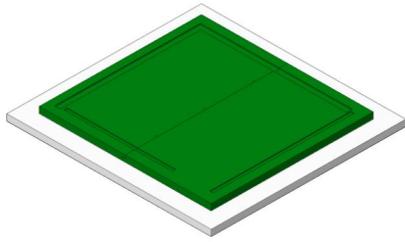
Bild 226. Schritt 1, Grundplat- *Bild 227. Schritt 1, Grundplatte bei Mattig & Lindner*
te/Modell

6.4.2 Verlegen der RC-Bodenplatte

Anschließend werden Bodenplatte 1 und Bodenplatte 2 an der vorgesehenen Nut (Verplattung) miteinander verbunden und stets mit der Wasserwaage horizontal ausgerichtet. In Bodenplatte 1 sind dazu Anker vorgesehen, die durch die passenden Löcher in Bodenplatte 2 miteinander verschraubt werden können. Damit entsteht eine zusammenhängende Platte. Diese wird wiederum mittig auf die Grundplatte verlegt (Bild 228, Bild 229).

Die Arbeitsdauer für diesen Schritt beträgt etwa 1 Stunde.





*Bild 228. Schritt 2,
Bodenplatte/Modell*

RC-Bild 229. Schritt 2, RC-Bodenplatte verlegen

6.4.3 Aufstellung der RC-Wand 1

Zur Stellung der RC-Wände sind in den Bodenplatten passende Rinnen (17,5+0,5 cm) vorgesehen. Die östliche dieser Rinnen dient der Einpassung von RC-Wand 1. Diese wird mit den Powerankern nach oben ausgerichtet gestellt und anschließend mit Schrägstützen abgestemmt. Die Stützen werden dafür jeweils an einer Verankerung in der Bodenplatte und der Wand an sich befestigt. Die RC-Wände werden stets mit der Mauerwaage vertikal in die passende Position ausgerichtet (Bild 230, Bild 231).

Die Arbeitsdauer für diesen Schritt beträgt etwa 30 min.

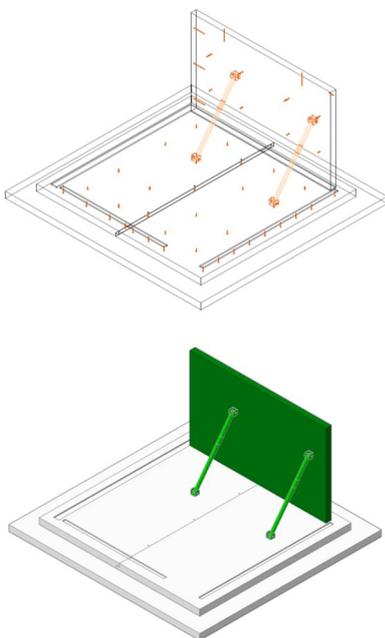


Bild 230. Schritt 3, RC-Wand 1/Modell

Bild 231. Schritt 3, RC-Wand 1 aufstellen

6.4.4 Aufstellung RC-Wandelement 1&2

Die Wandelemente 1 und 2 werden an der Verplattung nach dem gleichen Prinzip wie die beiden Bodenplatten miteinander verschraubt, sodass sie zusammen als Wandscheibe funktionieren. Anschließend werden sie ebenfalls mit den Powerankern nach oben ausgerichtet und in die nördliche Rinne in der Bodenplatte gestellt. Das RC-Wandelement 1 wird als erstes aufgestellt. Dabei stößt RC-Wandelement 1 von außen an den Querschnitt von RC-Wand 1 an, wo sie dann wiederum seitig entlang der Wandhöhe verbunden werden (Bild 232, Bild 233). Zu diesem Zweck sind in RC-Wand 1 die horizontalen Anker vorgesehen, die dann über die passenden Löcher im Wandelement 1 verschraubt werden. Zusätzlich wird jedes RC-Wandelement noch mit zwei Schrägstützen abgestemmt, die sowohl mit der Bodenplatte, als auch den RC-Elementen verbunden sind (Bild 234, Bild 235).

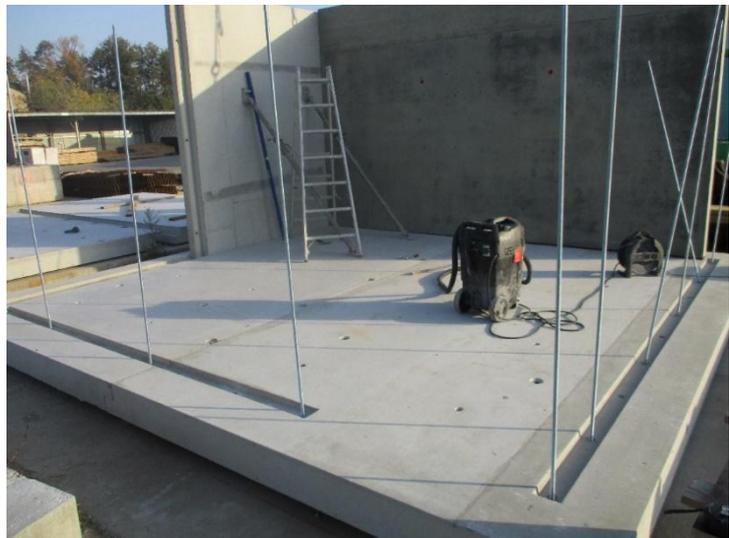
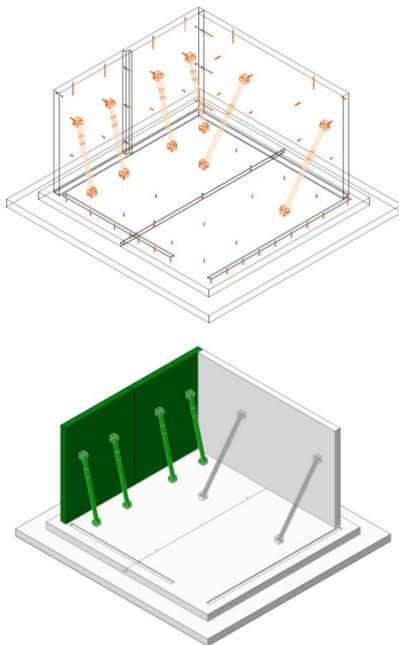


Bild 232. Schritt 4, RC-Wandelemente 1&2 /Modell
 Bild 233. Schritt 4, RC-Wandelement 1 aufstellen

Bei der Aufstellung der RC-Wandelemente 1 und 2 wird die Mauerwaage zur vertikalen Ausrichtung stets angewendet.

Die Arbeitsdauer für diesen Schritt beträgt etwa 1 Stunde.

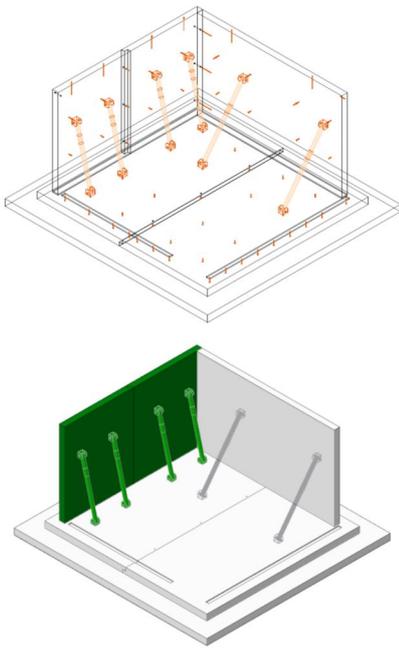


Bild 234. Schritt 5, RC-Bild 235.
 Wandelemente 1 & 2
 /Modell

Schritt 5, RC-Wandelement 2 aufstellen

6.4.5 Aufmauern der RC-Betonsteine

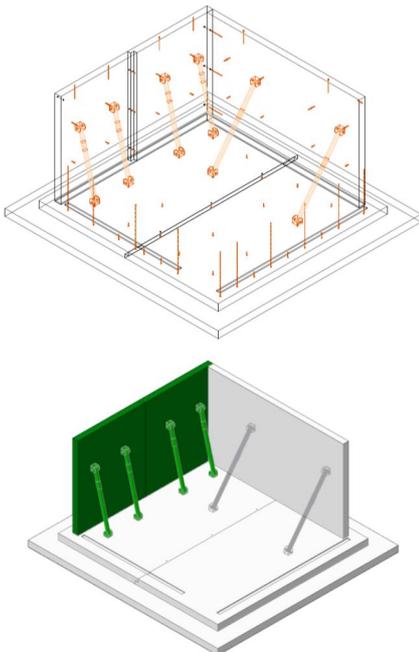
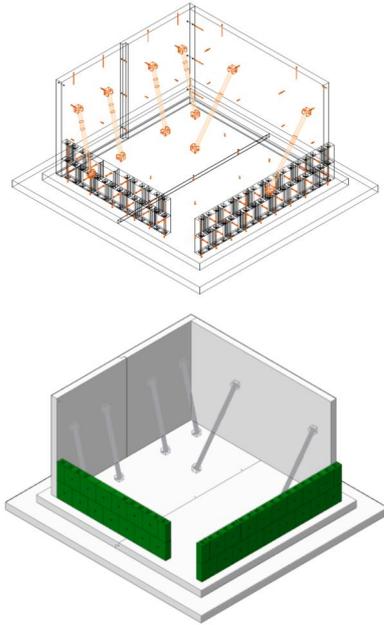


Bild 236. Schritt 6, Spann-
 glieder /Modell

Schritt 6, Spannglieder für die Mauerwände
 einschrauben

Die Positionierung der Hülsenanker und Spannglieder ist auf die Durchführungen in den RC-Betonsteinen abgestimmt. Somit können die Steine einfach in die richtige Position aufgefädelt werden.

Das Setzen der RC-Betonsteine beginnt an den Anschlussstellen mit den bereits stehenden Wänden. Ein an einer Seite abgeflachter Vollstein wird mit der Noppenseite nach unten in die Rinne gesetzt und auf den Stab gefädelt. Die weiteren Steine werden mit der passenden Seite ange-
setzt, sodass kein Luftraum zwischen ihnen entsteht. Beim Mauern werden dabei vorgesehene Türen und Fenster mit Hilfe der abgeflachten Voll- und Halbsteine ausgespart (Bild 238, Bild 239).



*Bild 238. Schritt 7, RC-Bild 239. Schritt 7, RC-Betonsteine Aufmauern
Betonsteine Aufmauern
/Modell*

Die Spannglieder (mit der Länge 2 m) werden mittels Stahlmuffen vertikal verlängert, sodass die nächsten beiden Reihen der RC-Betonsteine gesetzt werden können.

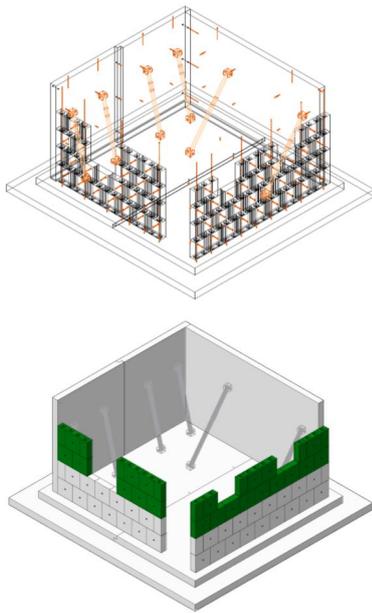


Bild 240. Schritt 8, nächste Bild 241. Schritt 8, nächste Reihen der RC-Betonsteine /Modell

Die letzte Reihe der Stabstähle wird wieder über die Stahlmuffen an den darunterliegenden Stab angeschraubt. Diese sind jedoch nur etwa 75 cm lang, da nur noch eine Reihe der RC-Betonsteine folgt und der darüber liegende Balken über eine Querschnittshöhe von 25 cm verfügt.

Nach dem Aufmauern der letzten Reihe der RC-Betonsteine bleibt eine Resthöhe der Spannglieder von etwa 25 cm nach oben übrig (Bild 240, Bild 241).

Durchschnittlich wird ein RC-Betonstein innerhalb von 3 Min verlegt (Abheben und in die Position bringen). Somit wird fürs Verlegen gesamter RC-Betonsteine etwa 3 Stunden gebraucht.

6.4.6 Aufsetzen der RC-Betonbalken

Um die RC-Mauerwerkswände kraftschlüssig zu verbinden und die Scheibenwirkung zu erzielen, werden diese nach oben hin mit den RC-Balken abgeschlossen. Der RC-Balken 2 wird zuerst auf die westliche Wand aufgesetzt. Dieser besitzt die notwendigen vertikalen Durchführungen genau an den Stellen, an denen die Spannglieder heraus schauen. Der RC-Balken 2 wird gegebenenfalls auf diese Enden aufgefädelt und dockt im Nord-Westen an Wandelement 2 an. Dieses besitzt passend zum sich befindenden horizontalen Hülsenanker in RC-Balken 2 eine Durchführung und wird an dieser Stelle verschraubt. Im Anschluss wird RC-Balken 1 auf die südliche Wand gesetzt. Er setzt von außen an die Enden von RC-Balken 2 und RC-Wand 1 an, wo er wiederum über die vorgesehenen Durchführungen mit den Elementen verschraubt wird. Anschließend werden die beiden Balken mit ihren zugehörigen Wänden bis zur RC-Bodenplatte verbunden. Dazu werden die Enden der Spannglieder, die bis zur Oberkante der RC-Balken reichen, vorgespannt (Bild 242, Bild 243).

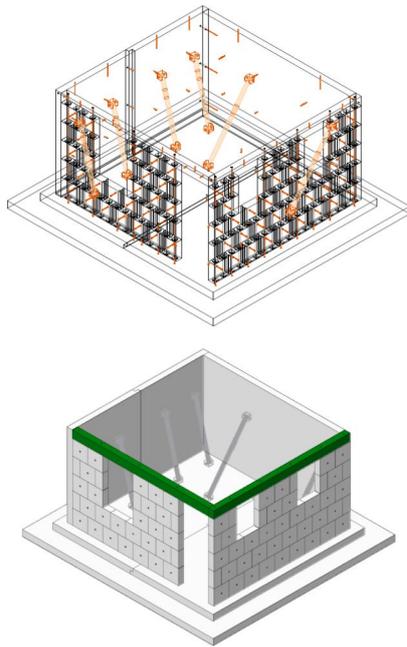


Bild 242. Schritt 9, Balken/Modell

RC-Bild 243.

Schritt 9, Aufsetzen der RC-Balken

Die Arbeitsdauer für diesen Schritt beträgt etwa 1 Stunde.

6.4.7 Aufsetzen der RC-Deckenplatten

Nach Aufsetzung und Befestigung der RC-Balken mit den bereits stehenden RC-Wänden erfolgt das Aufsetzen der RC-Deckenplatten. Die RC-Deckenplatte 1 und RC-Deckenplatte 2 werden nach dem gleichen Prinzip wie die Bodenplatten und Wandelemente miteinander verschraubt (Bild 244, Bild 245). Anschließend werden sie gemeinsam auf die Wände beziehungsweise Balken aufgelegt. In diesen wurden bereits Verankerungen/Gewindestangen vorgesehen, die nun genau unter den vorhandenen Durchführungen in den RC-Deckenplatten liegen (Bild 246, Bild 247).

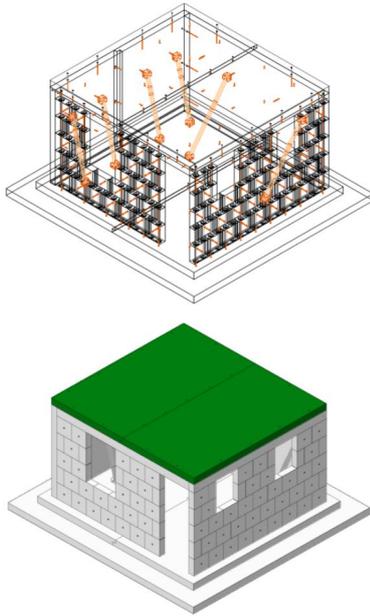


Bild 244. Schritt 10, Deckenplatten/Modell

RC-Bild 245.

Schritt 10, Aufsetzen der RC-Deckenplatten



Bild 246. Schritt 11, Aufsetzen der RC-Deckenplatten 2

RC-Bild 247. Zusammenschrauben der RC-Deckenplatten

Die Arbeitsdauer für diesen Schritt beträgt etwa 1 Stunde.

6.4.8 Aufsetzen der RC-Attiken

Im letzten Schritt beim Errichten des Rohbaus werden die vier Attiken auf die RC-Deckenplatten aufgelegt. Dabei zeigen die horizontalen Hülseanker nach außen und die vertikalen nach oben. Deren Durchführungen passen genau auf die der darunterliegenden RC-Deckenplatte. Um die RC-Attiken 1 bis 4 mit den RC-Deckenplatten und den RC-Wänden sowie den RC-Balken verbinden zu können, werden die in unterster Ebene vorgesehenen Verankerungen/Gewindestangen genutzt und dann an der Oberkante der Attiken verspannt (Bild 248, Bild 249).

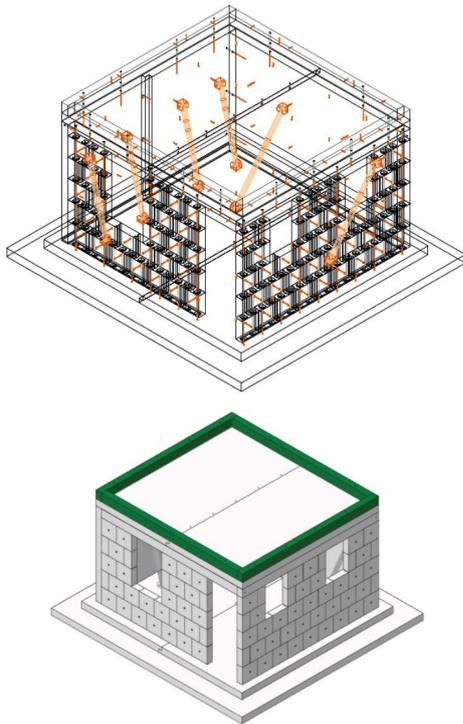


Bild 248. Schritt 12, Attiken/Modell RC-Bild 249. Schritt 12, Aufsetzen der RC-Attiken

Die Arbeitsdauer für diesen Schritt beträgt etwa 1 Stunde.

Nach dem Aufsetzen der RC-Attiken werden nochmal alle Verbindungen mit dem Drehmoment-schlüssel geprüft und festgeschraubt. Im Anschluss werden die Schrägstützen, welche für die Montage der RC-Wände benutzt wurden, abgelöst.

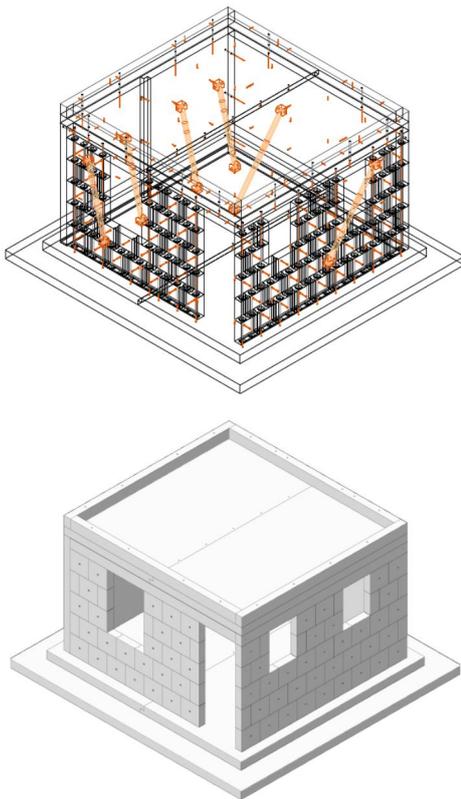


Bild 250. Rohbau der RC-Bild 251. Fertiggestellter Rohbau der RC-Wohneinheit Wohneinheit/Modell

Somit wird der fertiggestellte Rohbau der RC-Wohneinheit in eine komplett demontierbare, massive Bauweisen aufgebaut (Bild 250, Bild 251).

Die Dauer der Errichtung der RC-Wohneinheit beliefen sich auf etwa 8,5 Stunden. Die Montagearbeiten wurden auf drei Tage verteilt. Grund dafür war die begrenzte Verfügbarkeit des Portalkranes im Betonwerk, welcher durch interne Beladungen ausgelastet war.

Die Montage wurde hauptsächlich von zwei Personen (Bauarbeitern) durchgeführt. Damit wurde die schnelle Errichtung der RC-Wohneinheit nachgewiesen.

Im Zuge des Ausbaus werden speziell angefertigte Fassadenplatten von außen an den Rohbau angebracht. Die Befestigung erfolgt mittels der in die RC-Bauteile einbetonierten Hülsenanker und ist somit demontierbar.

Gleich nach der Fertigstellung des Rohbaus wurde die entstehende RC-Wohneinheit mit dem Laser-Scanning eingescannt (Bild 252). Dieses Scanning dient dazu, die relativen Änderungen/Verformungen in der RC-Wohneinheit zu späteren Zeitpunkten zu erfassen und damit die Gesamtstabilität des Modules auszuwerten. Die aufgenommenen Daten aus dem Laser-Scanning werden später bei der Auswertung des vorgeplanten Belastungstestes benutzt.



Bild 252. 3D-Verformungsmessung/ Laser-Scanning nach der Fertigstellung der RC-Wohneinheit

6.5 Prüfung der Stabilität des fertiggestellten Rohbaus der RC-Wohneinheit

6.5.1 Allgemeines

Zur Prüfung der Stabilität des Rohbaus der RC-Wohneinheit wurde ein Belastungstest am fertiggestellten Rohbau der RC-Wohneinheit in situ (auf dem Gelände der Firma M&L) durchgeführt. Mit dem Belastungstest wurden die herkömmlichen Geschosslasten simuliert. Die Gebrauchstauglichkeit der belasteten RC-Bauelemente sowie die Tragsicherheit der demontierbaren Verbindungen wurden durch eine 3D-Verformungsmessung (Laser-Scanning) erfasst und im Nachhinein ausgewertet.

6.5.2 Durchführung des Belastungstestes

Beim Belastungstest wurden flächige Lasten auf die RC-Deckenplatten aufgebracht. Diese Lasten wurden anhand von vier Betonplatten mit den Abmessungen (LxBXH= 3 x 1x 0,2 m) mittels des vor Ort ansässigen Portalkran appliziert (Bild 253, Bild 254). Die angebrachten Lasten betragen etwa 5 kN/m². Zur Durchführungszeit des Belastungstestes waren die RC-Betondecken etwa 21 Tage alt.

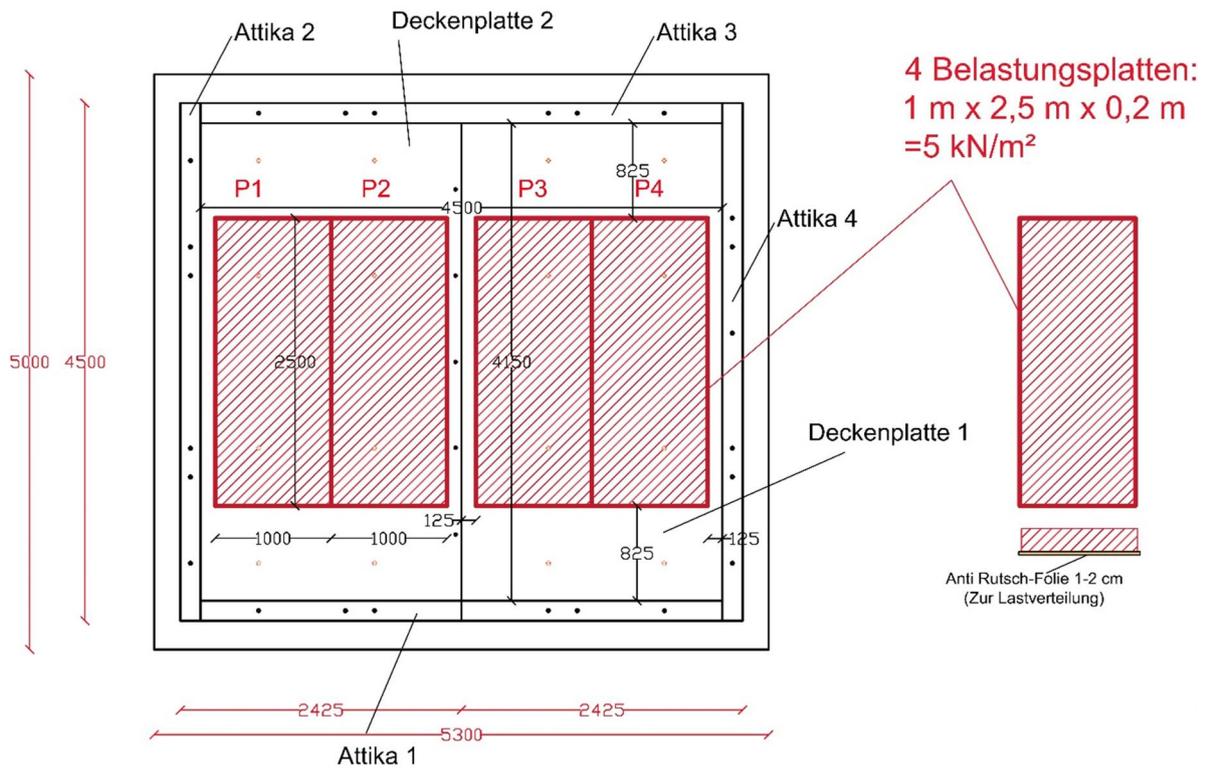


Bild 253. Belastungsskizze auf den Rohbau der RC-Wohneinheit



Bild 254. Durchführung des Belastungs-Bild 255. 3D-Verformungsmessung/ Laser-Scanning vor und nach der Durchführung des Belastungstestes

Gleich nach dem Aufsetzen der Belastungsplatten wurde das zweite Laser-Scanning durchgeführt (Bild 255). Die Auswertung der gewonnenen Daten aus dem Laser-Scanning (nach der Errichtung der RC-Wohneinheit sowie vor und nach der Durchführung des Belastungstestes) hat keine bedeutenden Verformungen in den RC-Bauteilen bzw. Verbindungspunkten aufgezeigt (Bild 256, Bild 257). Die aufgezeigten Verformungen liegen bei 1 mm und sind deutlich unter den zugelassenen Verformungen im Stahlbetonbau. Damit ist die Stabilität der RC-Wohneinheit gegeben. Diesbezüg-

lich eignet sich das RC-Modul für die Übertragung der Geschosslasten sowie bei der Modifizierung zu einem mehrtägigen Modell.

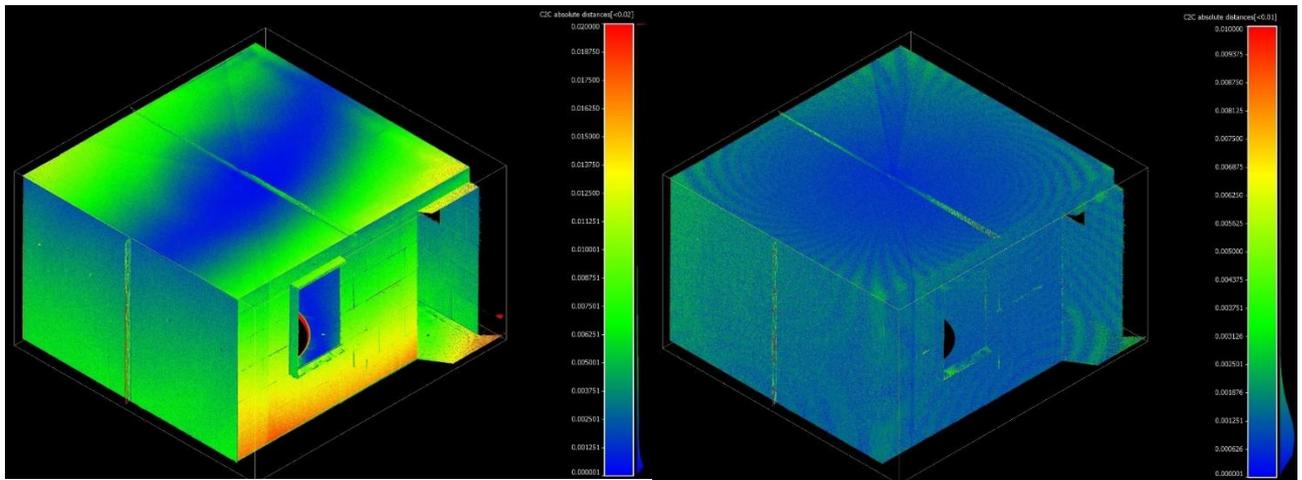


Bild 256. Auswertung der entstehenden Verformungen in der RC-Wohneinheit im Zeitraum nach der Fertigstellung und vor Durchführung des Belastungstestes

Bild 257. Auswertung der entstehenden Verformungen in der RC-Wohneinheit nach der Fertigstellung vor und nach Durchführung des Belastungstestes

6.6 Rückbau des Rohbaus der RC-Wohneinheit

6.6.1 Allgemeines

Der Rückbau der RC-Wohneinheit lässt im Zusammenhang mit dem Aufbau eine wichtige Aussage über die Nutzbarkeit des Einsatzes des entwickelten RC-Moduls als demontierbare, temporäre Unterkunft. In diesem Sinne spielt die Schnelligkeit beim Auf- und Abbau dieser Art der Unterkünfte eine bedeutende Rolle.

Den kompletten Rückbau des RC-Moduls übernahm die Firma ECOSOIL vor Ort. Die Rückbauarbeiten wurden nach der Errichtung des Rohbaus und Durchführung des Belastungstestes durchgeführt.

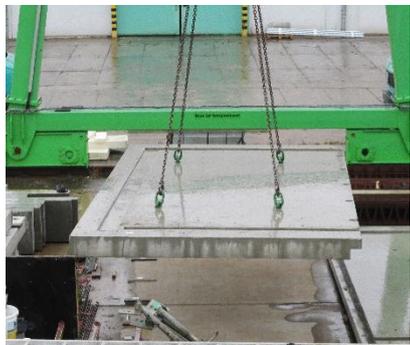
Arbeitsvorgänge des Rückbaus der RC-Wohneinheit

Der fertiggestellte Rohbau der RC-Wohneinheit wird in dieser Reihenfolge (*Tabelle 23*) rückgebaut. Hierbei werden die wichtigsten Maßnahmen beim Rückbau beschrieben sowie die Rückbaudauer ausgewertet.

Tabelle 23: Vorgänge des Rückbau- Rohbau der RC-Wohneinheit

Vorgang	Vorgehen	Vorgangsdauer
<p>1- Rückbau RC-Attiken</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Vor Beginn des Rückbaus werden die benötigten Schrägstützen an die RC-Wände montiert und ein passendes Gerüst aufgebaut. - Die RC-Attiken werden nach Ablösen der festgeschraubten Mutter an den Gewindestangen in einer beliebigen Reihenfolge abgehoben. - Es wird besonders darauf geachtet, die durch die Aussparungen laufenden Verankerungen/Gewindestangen nicht zu beschädigen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Beim Rückbau der Attiken beträgt die Abbauzeit etwa 5 min pro Attika. - Gesamtdauer des Abbaus der Attiken ist 20 min. - Rückbau der RC-Attiken erfolgte zerstörungsfrei.
<p>2- Rückbau RC-Deckenplatten</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Der Abbau der RC-Deckenplatten beginnt mit Ablösung des Verbundes an der Verplattung (5 Schrauben M16). - Als Erstes wird die RC-Deckenplatte 2 aufgehoben und dabei auf die Verankerungen geachtet. Im Anschluss wird die RC-Deckenplatte 1 hochgezogen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Abbau der RC-Deckenplatte 2 beträgt etwa 20 min, wobei dieser bei RC-Deckenplatte etwa 10 min beträgt. - Für den Abbau der RC-Deckenplatten ist mit einer Gesamtdauer von 30 min zu rechnen. - Rückbau der RC-Betondecken erfolgte zerstörungsfrei.
<p>3- Rückbau RC-Balken</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Zum Rückbau der RC-Wände der RC-Wohneinheit wird mit dem Rückbau der RC-Balken begonnen. - Zum Rückbau der RC-Balken 1&2 werden die Verbindungen zu RC-Wand 1 und RC-Wandelement 2 abgelöst. - Das Zubehör der vorgespannten Glieder wird abgeschraubt, damit die Balken frei abgehoben werden können. 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Rückbaudauer für jeden RC-Balken beträgt etwa 15 min. - Die Gesamtdauer für den Rückbau der RC-Balken beträgt 30 min. - Rückbau der RC-Balken erfolgte zerstörungsfrei.

Vorgang	Vorgehen	Vorgangsdauer
<p>4- Rückbau RC-Betonsteine</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Der Rückbau der nummerierten RC-Betonsteine (75 Stück) erfolgt mittels einer Mauerzange. - Die mit den Stahlmuffen, verlängerten Spannglieder werden Schritt für Schritt abgeschraubt. Somit wird das Abheben der RC-Betonsteine schnell und reibungslos durchgeführt. 	<ul style="list-style-type: none"> - Für Abbau jedes Betonsteines wird etwa 1,5 Minuten benötigt. - Das Rückbauen der RC-Betonsteine dauert inklusiv eines sinnvollen Stapelns auf Paletten etwa 2 Stunden. - Rückbau der RC-Betonsteine erfolgte zerstörungsfrei.
<p>5- Rückbau RC-Wandelemente 1&2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Zum Rückbau der RC-Wandelemente 1&2 werden die Verbindungen an der Verplattung zwischen beiden Bauelementen abgelöst. - Das RC-Wandelement 2 wird von der oberen Seite aufgehängt und nach Ablösen der Schrägstütze als erstens abgehoben. - Die Verbindungen zwischen RC-Wandelement 1 und RC-Wand1 werden zunächst abgeschraubt, um das RC-Wandelement 1 abzuheben. 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Gesamtdauer für den Rückbau der RC-Wandelemente 1&2 beträgt 20 min. - Rückbau der RC-Wandelemente 1&2 erfolgte zerstörungsfrei.
<p>6- Rückbau RC-Wand 1</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Die RC-Wand 1 wird zum Rückbau von der oberen Seite aufgehängt. Danach werden die zwei Schrägstützen abgelöst und die Wand abgehoben. 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Rückbaudauer der RC-Wand 1 beträgt etwa 10 min. - Rückbau der RC-Wand 1 erfolgte zerstörungsfrei.

Vorgang	Vorgehen	Vorgangsdauer
<p>7- Rückbau RC-Bodenplatten 1&2</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Der Abbau der RC-Bodenplatten beginnt mit Ablösung der Verbund an der Verplattung (5 Schrauben M16). - Als Erstes wird die RC-Bodenplatte 2 aufgehoben. - Im Anschluss wird die RC-Bodenplatte 1 hochgezogen. 	<ul style="list-style-type: none"> - Der Abbau der RC-Bodenplatte 2 beträgt etwa 20 min, wobei dieser bei RC-Bodenplatte etwa 10 min beträgt. - Für den Abbau der RC-Bodenplatten ist mit einer Gesamtdauer von 30 min zu rechnen. - Rückbau der RC-Bodenplatten erfolgte zerstörungsfrei.
Gesamtdauer		4,5 Stunden

Beim Rückbau der RC-Wohneinheit wurden keinerlei Beschädigungen an den RC-Bauteilen sowie an deren Verbindungen aufgenommen. Die Gesamtdauer des Rückbaues beträgt etwa 4,5 Stunden. Demzufolge hat die RC-Wohneinheit die Anforderungen an komplett demontierbaren Montage und Demontage qualitativ nachgewiesen.

6.7 Re-Montage des Rohbaus der RC-Wohneinheit

Die RC-Wohneinheit wurde zu einem anderen Standort abtransportiert und dort wieder aufgebaut (Bild 263). Bei der Remontage der RC-Wohneinheit wurden die gleichen Schritte, wie bei der ersten Montage, durchgeführt. Die RC-Bauteile waren nach dem Abtransport und während der Remontage komplett unbeschädigt und aufbaufähig. Die Gesamtdauer der Remontage der RC-Wohneinheit betrug, trotz der unterschiedlichen Arbeitsrandbedingungen (z.B. Aufbauen auf einer verdichteten Gründung vs. Betonplatten, Anwendung des Autokrans bei der Remontage vs. Portalkran, Remontage bei -5° Temperatur vs. 10° bei der Montage) etwa 8 Stunden. Demzufolge wird die schnelle Montage des Rohbaus der RC-Wohneinheit nochmal bestätigt.

Im Unterschied zu dem Aufbau in Forst wurde an dem neuen Standort in Meißen das Planum mit einer Tragschicht erforderlich. Auf dieser Tragschicht wurde dann eine dünne Ausgleichsschicht in Feinkies einnivelliert, sodass die Bodenplatten vollkommen eben aufgelegt werden konnten.

Es war vorgesehen, die Re-Montage vom LKW aus durchzuführen. Aufgrund Anlieferung in umgekehrter Reihenfolge mussten die Teile erst einmal abgeladen und am Ort gelagert werden.

Auf Grund der niedrigen Temperaturen waren alle Innengewinde zugefroren und mussten aufgetaut werden.

Geringfügige Toleranzen in den Schraubverbindungen führten zu gewissen Verzögerungen.



Bild 258. *Planum mit abgezogener Feinkieschicht vor dem Verlegen der Bodenplatte*



Bild 259. *Bodenplatte auf dem Planum mit abgezogener Feinkieschicht*

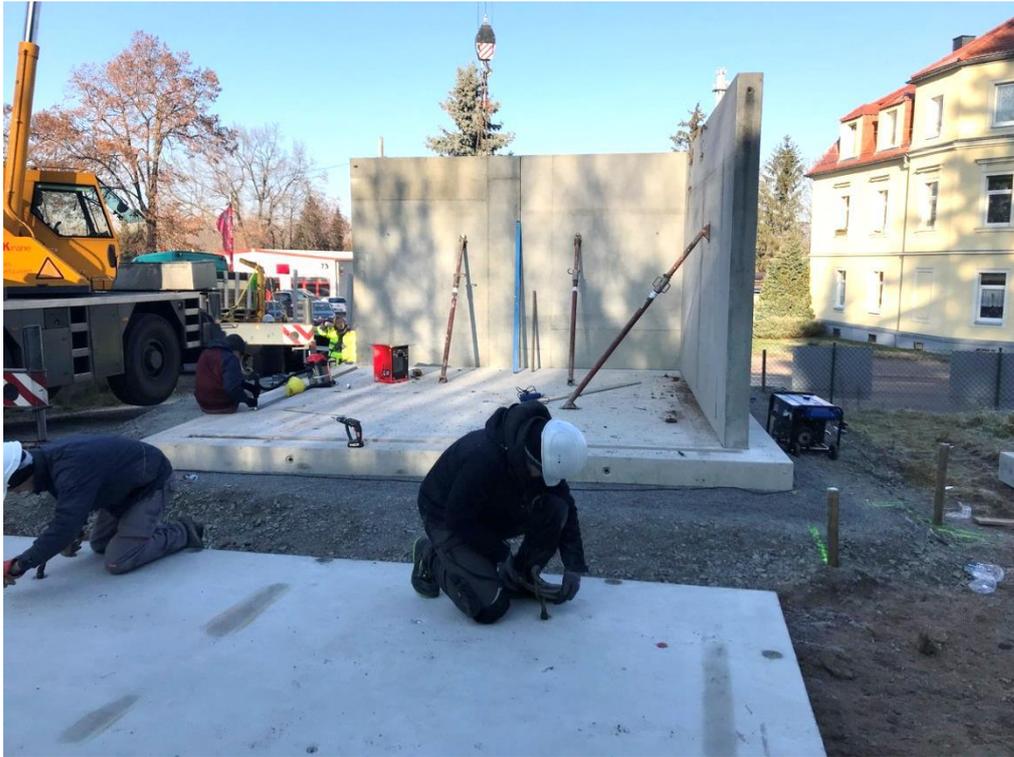


Bild 260. Gesicherte Stahlbetonwände



Bild 261. Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit

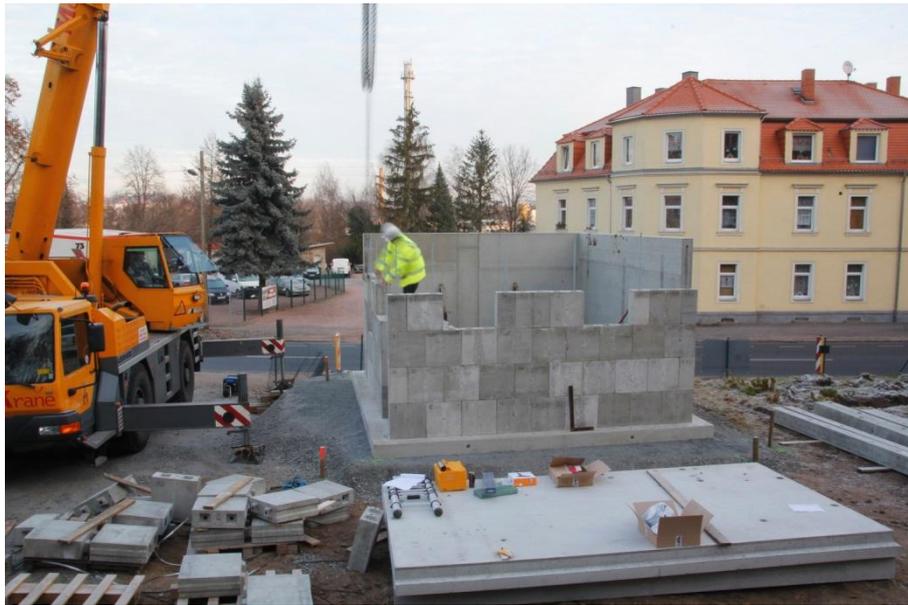


Bild 262. *Versetzen der Beton-Plansteine*



Bild 263. *Fertige Remontage des Rohbaus der RC-Wohneinheit in Meißen*

6.8 Verbesserungsvorschlag für die RC-Mauerwerkswände

Beim Aufbau des Rohbaus der RC-Wohneinheit sind ausreichende Aufbau-Toleranzen vorgesehen.

Bei den Halbsteinen sind jedoch Toleranzen aufgetreten, die für den Ausbau nicht ausgleichbar sind. Die Fertigung der Halbsteine muss daher bei der praktischen Überführung verbessert werden. Die eingetretenen Verformungen der Schalung waren zu groß.

Die RC-Mauerwände in der errichteten RC-Wohneinheit verfügen aufgrund des Feder-Nut-Systems und Lego-Stein-Prinzips über eine ausreichende Luftdichtheit.

Im Falle der Errichtung der RC-Wohneinheit komplett nach der Mauerwerksbauweise wird für eine bessere Luftdichtheit der RC-Mauerwerkswände eine weitere Modifizierung des modularen RC-Steins vorgeschlagen. Der entwickelte RC-Betonstein ermöglicht aufgrund des Feder-Nut-Systems in der Stoß- und Mauerfuge eine bessere Luftdichtheit.

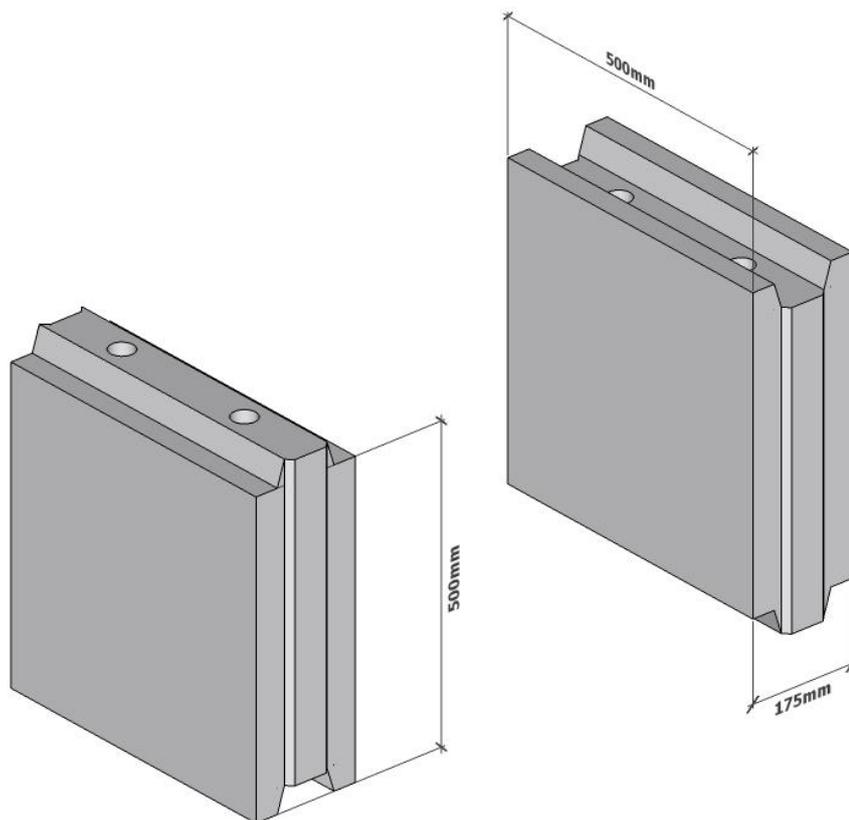


Bild 264. Modifizierung der modularen RC-Betonstein

7 Begleitung der Realisierung

Die praktische Realisierung des Projektes erfolgte im und auf dem Gelände der Fa. Mattig & Lindner GmbH in Forst (nachfolgend kurz „Fa. M & L“). Gemeinsam mit Mitarbeitern der BTU Cottbus-Senftenberg (nachfolgend kurz „BTU C-S“) wurden in der Fa. M & L mehrere Rezepturen zur Betonherstellung mit anteiliger Substitution natürlicher Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen (kurz RC-GK) erprobt und optimiert.

Lieferant der RC-GK ist die Fa. HEIM Deponie und Recycling GmbH (nachfolgend kurz „Fa. HEIM“), Berlin. Die Vorzugsrezeptur (s. Abschn. 7.1.1) wurde zur Herstellung aller Betonbauteile des RC-WE-Moduls eingesetzt. Die Betonteilfertigung erfolgte durch Bearbeiter der TU Dresden, LS Tragwerkslehre und der BTU C-S, AG Bauliches Recycling (Projektbearbeiter im Rahmen dieses Projektes).

Die Montage des RC-WE-Moduls wurde durch Mitarbeiter der Fa. M & L mit Unterstützung der Projektbearbeiter und die Demontage durch Facharbeiter der Fa. Ecosoil Ost GmbH mit Firmensitz in Senftenberg realisiert.

Die Umsetzung nach dem Rückbau in Forst wurde durch die Mitarbeiter des LS Tragwerksplanung mit Unterstützung der Fa. Mattig & Lindner Forst sowie Mentner Krane Meißen realisiert. Die vorbereitenden Maßnahmen zur Herstellung eines Planums und der Einbau einer Tragschicht wurden durch die Fa. Werrmann aus Meißen erledigt.

7.1 Herstellung des RC-Betons

Im Abschn. 4.4.4 dieses Forschungsberichtes sind die entwickelten Rezepturen dargelegt worden.

7.1.1 Rezepturoptimierung, eingesetzte Rezeptur zur RC-Betonproduktion

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden vier Rezepturen hinsichtlich der Zielparameter C 30/37 (Festigkeitsklasse), XC4(WU), XF1, XM1², XA1, WF (Expositionsklassen) untersucht resp. erprobt. Entgegen der ursprünglichen Planung, RC-GK 0/16 einzusetzen, wurde die RC-GK 0/8 verwendet. Hintergrund für diese Entscheidung war der erhöhte Anteil der Feinfraktion RC-GK 0/2 (s. Anlage 9-1). Untersuchungen haben ergeben, dass der Anteil der RC-GK 0/2 in der 0/16 Fraktion 54 M.-% und in der 0/8 41 M.-% beträgt. Da Brechsande ein erhöhtes Wassersaugen aufweisen, wurde für die Durchführung der Betonage die GK 0/8 verwendet. Näheres ist dem Abschn. 4.4 zu entnehmen.

Folgende Tabelle 24 zeigt die Vorzugsrezeptur in der Betonproduktion (aus Mischungsberechnung Beton – Abruf-Nr.: RCM-4; s. 17.4):

Tabelle 24: Gegenüberstellung einer Normalbetonrezeptur mit der RC-Betonrezeptur bezogen auf 1m³ (alle Angaben in kg)³

² Die Expositionsklasse XM1 wurde für den Verschleiß des Fußbodens angesetzt.

³ CEM I 52,5 R (ft): Portlandzement entspr. DIN EN 197-1 zur Herstellung eines frühhochfesten Betons nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, besonders geeignet zur Herstellung von Betonfertigteilen ab C30/37; geringe Nacherhärtung, sehr hohe Hydratationswärme

Zusammensetzung	Normalbeton	Recyclingbeton
Bezeichnung	C30/37 Beton [kg/m ³] (nach Eigenschaften)	C30/37 RC-Beton [kg/m ³] (verwendete Rezeptur)
Sand 0/2	655	301
RC-GK 0/8	-	714
Kiessand 2/8	345	237
Grobkies 8/16	724	334
CEM I 52,5 R (ft) ²	300	320
Frischwasser	196	196
Steinkohleflugasche	80	80
Gesamt	2.300	2.182

CEM I 52,5 R (ft): Portlandzement entspr. DIN EN 197-1 zur Herstellung eines frühhochfesten Betons nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, besonders geeignet zur Herstellung von Betonfertigteilen ab C30/37; geringe Nacherhärtung, sehr hohe Hydratationswärme

Wie bereits in Tabelle 10 dargestellt wurde, liegt der max. zulässige Anteil an RC-GK bei max. 25 Vol.-% aufgrund der Expositionsklasse XA1.

7.1.2 Verarbeitbarkeit des RC-Betons zur Herstellung der Betonelemente

Bei der Verarbeitung des RC-Betons gibt es keinerlei Einschränkungen gegenüber einem herkömmlichen Normalbeton.

Die geforderte Konsistenzklasse F4 nach DIN EN 206-14/DIN 1045-2 (Ausbreitmaß 490 – 550 mm) bedeutet, dass die Konsistenz des Betons „sehr weich“ ist. Der RC-Beton ließ sich demzufolge (Prüfergebnisse s. Bild 265) gut fördern, verarbeiten, einbauen und verdichten.

è Geprüfte Parameter

Im Rahmen der Erstprüfung - sowie der erweiterten Erstprüfung - wurden folgende Parameter bestimmt:

- Frischbetontemperatur
Die Bestimmung der Temperatur des Betons erfolgte mittels Infrarot-Thermometer
- Konsistenzprüfung wurde gemäß DIN EN 12350-5:2009 anhand des Ausbreitmaßes geprüft (s. Bild 265)
- Frischbetonrohddichte gemäß DIN EN 12350-6:2009
Die Bestimmung der „Frischbetonrohddichte“ gibt bei bekannter Sollrohddichte einen Hinweis auf die Vollständigkeit der Verdichtung. Außerdem kann auf die Gleichmäßigkeit der Betonzusammensetzung geschlossen werden.⁵ Die Prüfung erfolgte an Probewürfeln. Dafür wurde die Masse der Würfelform (m_1) vor und nach dem Befüllen mit RC-Beton (m_2) in kg bestimmt. Die Frischbetonrohddichte D [kg/m³] ergibt sich demzufolge aus

$$D = \frac{(m_2 - m_1)}{V}$$
 mit V = Volumen des Behälters [m³]
- Druckfestigkeiten nach 28 Tagen (zusätzlich auch 56 Tage) gemäß DIN EN 12390-3

⁴ [120]

⁵ Nach [121]

Die ermittelten Druckfestigkeiten befinden sich in den Prüfergebnissen in Abschn. 17.5. Festbetonrohddichte gemäß DIN EN 12390-7



Bild 265. Überprüfung des Ausbreitmaßes gemäß DIN EN 12350-5

· Untersuchungsergebnisse

Es wurden, parallel zu den Mischungen, drei Chargen mit je sechs Probewürfeln hergestellt und Untersuchungen durchgeführt. Diese wurden dann entsprechend den bereits genannten Normen ausgewertet und untersucht. Alle Untersuchungsergebnisse befinden sich in 17.5. Das nachstehende Bild 266 gibt einen zusammenfassenden Überblick zu den Prüfergebnissen.

Bei Betrachtung der Prüfergebnisse fällt auf, dass die Frischbetontemperatur 5°C über den Sollwert i.d.R. 15°C bis 25°C liegt. Dies ist auf die Überschreitung der Bedingungen bei der Messung der Frischbetontemperatur zurückzuführen. Zum Zeitpunkt der Messung betrug die Lufttemperatur 35°C . Um dem schnelleren Erhärten entgegen zu wirken, wurde das Fließmittel MasterGlenium ACE 455 (s. 17.9) zur Abbindeverzögerung eingesetzt.

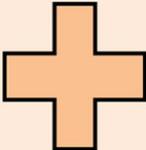
Erstprüfung C30/37 (gemäß DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08)	Parameter	Sollwert nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Istwert DIN EN 206-1 Anhang A.4 (3) Mittelwert	Ergebnis Soll-Ist-Vergleich	
	Prüfbedingung				
	Frischbeton- temperatur [°C]	15 - 22	27		
	Kriterien zur Annahme der Erstprüfung				
	Druckfestigkeit (nach 28 Tagen) [N/mm ²]	$f_{cm} \geq f_{ck} + 6$ (37 + 6)	46	✓	
Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm] nach 10'	F4 490 - 550	550	✓		
	Prüfungen im Rahmen der erweiterten Erstprüfung (nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezykliertes Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 Abschn. 4 und 5 2010-09)	Parameter		Istwert geprüft nach DIN EN 12350-5 und DIN EN 1097-6	
	Konsistenz (Ausbreitmaß) [mm]	nach 10' nach 30' nach 45'	550 480 430		
Weitere geprüfte Parameter	Parameter		Istwert		
	Frischbetonrohddichte [kg/m ³]		2.275		
	Festbetonrohddichte [kg/m ³]	nach 2 d	2.255		
		nach 28 d	2.230		
		nach 56 d	2.245		
Wasser-Zement-Wert w/z		0,55			
Druckfestigkeit [N/mm ²] nach 2 d		33,4			

Bild 266. Qualitätssicherung von RC-Beton^{6,7,8}

- Überprüfung der Alkaliempfindlichkeit der RC-GK

Da die rezyklierte Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit nicht geprüft worden ist, ist sie entsprechend der AKR-Richtlinie⁹ in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S eingestuft worden (vgl. Kap. 4.4.1). D.h., es sind ggf. vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen erforderlich¹⁰. In Abhängigkeit der Feuchtigkeitsklasse (WO, WF oder WA) und des Zementgehaltes wird in der Tab. 6, S. 22 der AKR-Rili geregelt, ob eine vorbeugende Maßnahme zu treffen ist oder nicht. Die Bauteile aus RC-Beton für das WE-Modul sind seitens des Tragwerkplaners

⁶ Geprüft wurde die RCM-(4) Rezeptur (Abschn. 17.4)

⁷ Nicht geprüft wurden nach DIN EN 206-1:2014-07 Anhang A.4 (a): Bestimmung des Trocknungsschwindens, die Kriechzahl sowie der Elastizitätsmodul. Diese werden derzeit an der BTU Cottbus-Senftenberg geprüft.

⁸ Im August 2018 lagen die Außentemperaturen im Mittel bei 35°C Lufttemperatur am Standort Forst (Lautz).

⁹ [122]

¹⁰ vgl. [123]

in WF eingestuft worden. Im RC-Beton sind 320 kg/m^3 Zement enthalten, d.h. es müssen keine Maßnahmen gegen eine schädigende Alkalireaktion im Beton getroffen werden.

- Prüfkörper Normalbeton vs. RC-Beton

Nachstehendes Bild 267 zeigt einen gebrochenen RC-Beton-Prüfkörper, Bild 268 einen weitgehend geschliffenen Normalbetonwürfel. Obwohl die Prüfkörper nicht direkt miteinander verglichen werden können, sind jeweils eine homogene Verteilung der Gesteinskörnung und deren Einbettung in die Zementsteinmatrix erkennbar.



Bild 267. Gebrochener RC-Betonwürfel Bild 268. Geschliffener Normalbetonwürfel

7.2 Ökobilanzielle Betrachtung zum Einsatz von RC-Beton im Vergleich zu Normalbeton

Die Ökobilanz ist laut DIN EN ISO 14040¹¹ „eine Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse [...]“, sowie „[...] ein Werkzeug zur Abschätzung und Bewertung der potenziellen Umweltwirkungen des Produktes im Verlauf seines Lebensweges“. Diese Bewertung soll medienübergreifend und stoffstromintegriert sein. Gemäß dem Ziel der Betrachtung sollen die Systemgrenzen eingesetzt werden.

Die ökologische Betrachtung, die im Rahmen des Projektes für RC-Beton gemacht wurde, basiert auf den folgenden Punkten:

- Rohstoffeinsatz
 - Herstellung
 - Transport
 - Umweltauswirkungen bei den o. g. Prozessen (CO₂-Emissionen).
- } Energieverbrauch → Umweltauswirkungen (CO₂-Emissionen)

¹¹ [124]

7.2.1 Stoffstromanalyse

Die Aufwendungen des Prüfverfahrens zur Bestimmung der Eigenschaften der RC-GK und RC-Beton im Vergleich zu primärer Gesteinskörnung und Normalbeton wurden hierbei nicht mitberücksichtigt.

Wie schon in Kap. 1.7 (ebenfalls in nachfolgendem Bild 269) erwähnt, unterscheidet sich RC-Beton vom Normalbeton nur durch Substituierung der Primär-GK durch die RC-GK. Das betrachtete System für den RC-Beton ist in Bild 269 grün markiert und für den Normalbeton/Primärbeton rot.

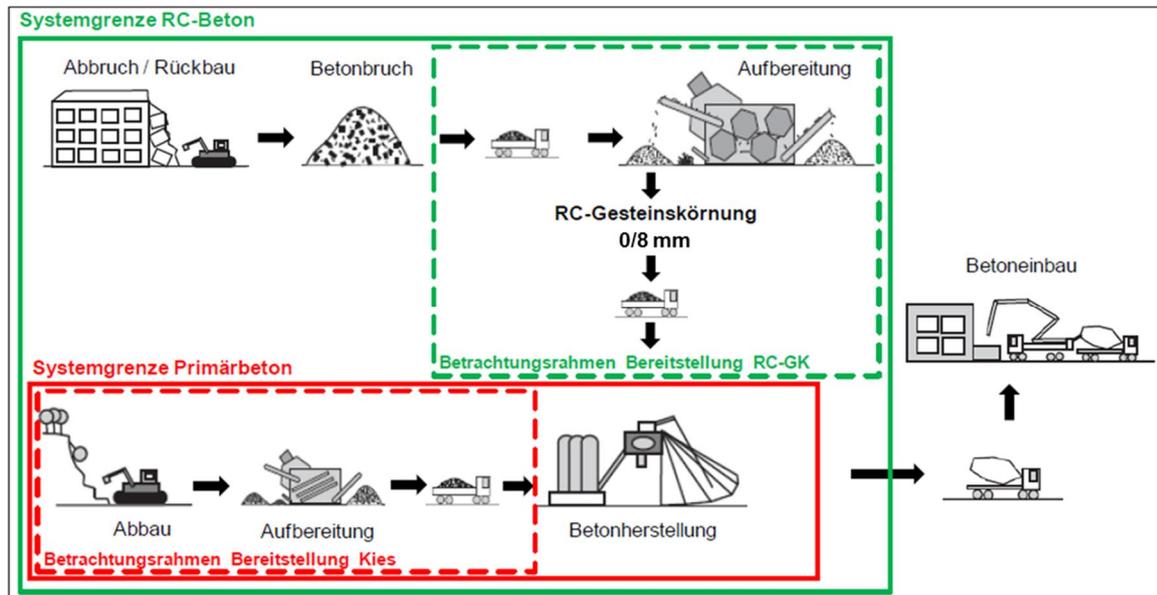


Bild 269. Bild 1 Überblick zur Herstellung von Normalbeton im Vergleich zum RC-Beton [Mettke]

Der Abbruch / Rückbau eines Gebäudes sowie der Transport der Abbruchabfälle wird nicht in den Betrachtungsrahmen zur Bereitstellung der RC-Gesteinskörnung einbezogen. Gebäude werden auf Grund von städtebaulichen und raumplanerischen sowie sozioökonomischen Gründen abgerissen/zurückgebaut. Die Gewinnung von RC-Gesteinskörnungen ist dabei keine Hauptaufgabe. Um ein qualitatives Produkt bei der Aufbereitung zu erhalten, ist jedoch bereits bei der Vorplanung (Phase 2 nach HOAI-Leistungsphasen) des Rückbaus von Gebäuden eine Selektierung der unterschiedlich anfallenden Baumaterialien und -stoffe, mindestens nach §3 GewAbfV¹² zu berücksichtigen. Dies ist für eine ordnungsgemäße Entsorgung und hochwertige Verwertung des anfallenden Bauschutts unabdingbar¹³.

Der Betrachtungsrahmen für die Bereitstellung der rezyklierten Gesteinskörnung umfasst

- è die Anlieferung des Bauschutts (Input) an der Baustoff-RC-Anlage und die Aufbereitung mit dem Ergebnis: RC-GK (Output) anbieten zu können.

Der Betrachtungsrahmen für die Bereitstellung der natürlichen Rohstoffe umfasst

- è bei der Primärrohstoffgewinnung (Abbau und Aufbereitung der Rohstoffe) mit dem Ergebnis: Sand, Kies u./o. Splitt (Output) anbieten zu können.

¹² Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung-GewAbfV) vom 18.04.2017

¹³ [125]

Die Systemgrenze zur Betonherstellung ist bei beiden Betonproduktionen (Normal- und RC-Beton) identisch.

Bereitstellung des Betonbruchs und Aufbereitung zu Betonsplitt

Der Betonbruch stammt aus Abbruchmaßnahmen eines ehemaligen Gewerbegebiets in Berlin, Blockdammweg. Auf dem 13 ha großen Gelände soll ein neues Stadtviertel entstehen. Die Fa. HEIM Industrie und Recycling GmbH transportiert mit LKWs den anfallenden Bau-schutt/Betonbruch seit Juni 2018 von diesem Standort zur eigenen Baustoff-RC-Anlage¹⁴. Von der Abbruchbaustelle bis zur Baustoff-RC-Anlage sind es ca. 23 km.

Die RC-GK 0/8 wurde von der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH für das Projekt bereitgestellt und zum Transportbetonwerk Luckauer Betonwerk GmbH nach Simmersdorf (etwa 3 km vom Betonfertigteilwerk M&L entfernt) durch eine Spedition transportiert. Von der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH bis zum Luckauer Transportbetonwerk in Simmersdorf sind es 184 km.

Die nachstehenden Daten sind für die Darstellung der Stoffströme von der Firma HEIM zur Verfügung gestellt worden. Die Daten für die energetische Betrachtung zur Baustoff-Aufbereitung in der RC-Anlage HEIM wurden im Forschungsprojekt „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ – Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton“¹⁵ durch die Leiterin und MitarbeiterInnen des Arbeitsgebiets Bau-liches Recycling an der BTU C-S erfasst und berechnet.

Gewinnung des Betonsplitts (-sands)

Die Fa. M&L bezieht den Sand und Kies aus dem Ponickau Kieswerk Steine und Erden Lagerstät-tenwirtschaft GmbH, das in etwa 126 km Entfernung vom Betonfertigteilwerk liegt. In der Sieban-lage wird das Kies-Sand-Gemisch in die Fraktionen 0/2, 2/8 und 8/16 getrennt.

7.2.2 Aufwendungen bei der Herstellung der RC-GK im Vergleich zur Kiesgewin-nung

Bereitstellung der RC-GK

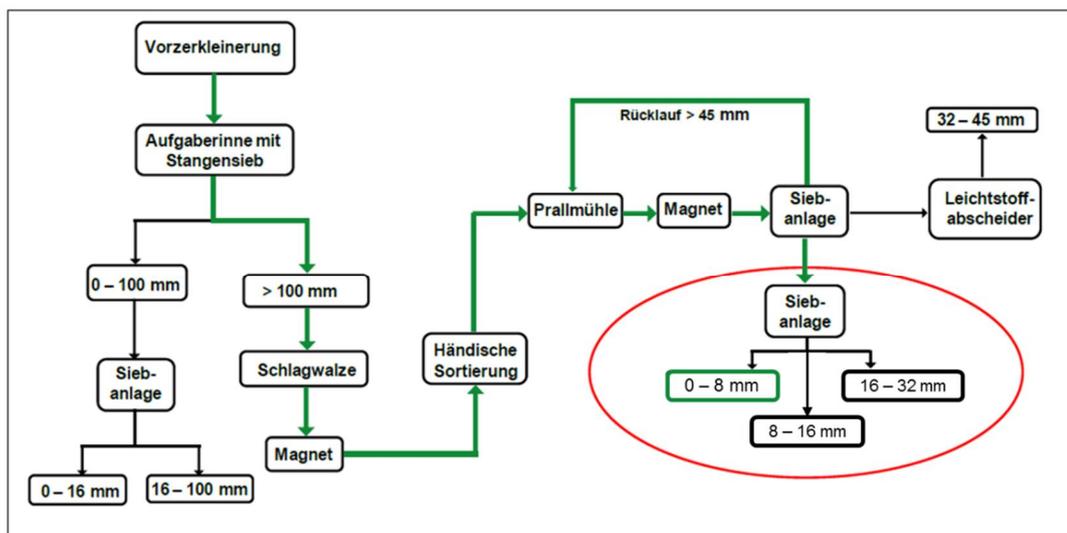


Bild 270. Fließbild der Aufbereitung der Firma HEIM Deponie & Recycling GmbH [Mettke]

¹⁴ Angaben HEIM Deponie & Recycling GmbH

¹⁵ [126]

Das Fließbild des Aufbereitungsprozesses des Betonbruchs der Firma HEIM Deponie & Recycling GmbH in der stationären RC-Anlage ist in Bild 270 schematisch dargestellt

Der Stoffstrom des aufzubereitenden Betonbruchs zur Herstellung der RC-GK 0/8 in der Firma HEIM Deponie & Recycling GmbH ist in dem Bild 271 dargestellt.

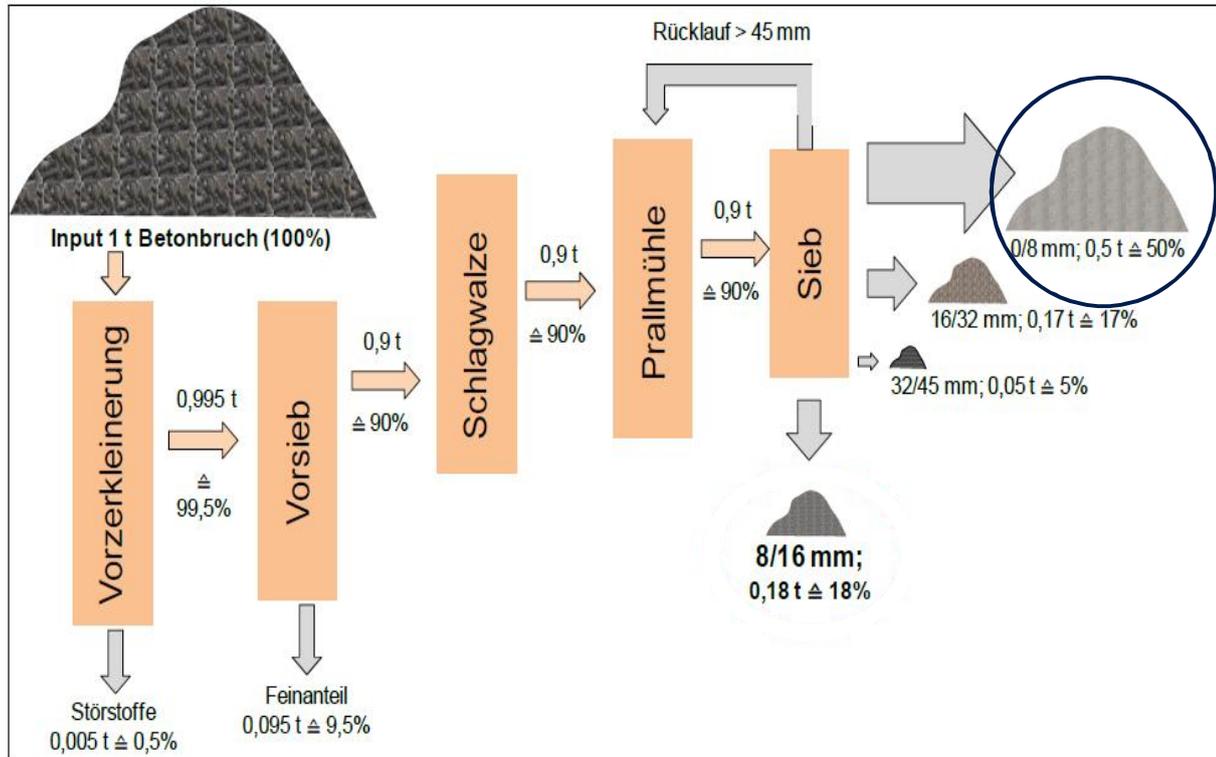


Bild 271. Stoffstrom der Aufbereitung des Betonbruchs der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH [Mettke]

Der Aufgabebunker ist so konzipiert, dass Bauschutt bzw. Betonbruch mit einer maximalen Aufgaben-Kantenlänge von 60 cm aufgegeben werden kann. Betonbruchstücken, die eine Kantenlänge > 60 cm aufweisen, werden vor ihrer Aufgabe in den Aufgabebunker mit der Hilfe eines Vorort eingesetzten Baggers vorzerkleinert.

Die Bestückung der RC-Anlage mit dem Betonbruch (Input-Material) erfolgt mittels Radlader. Üblicherweise wird der Feinanteil 0/2 nach der Aufgabe des Inputs über ein Vorsieb aus dem Stoffstrom abgesiebt. In der hergestellten Körnung 0/16 und der für den RC-Beton zum Einsatz gekommenen Körnung 0/8 verbleibt der Feinanteil im Stoffstrom. Untersuchungen haben – wie o.a. - ergeben, dass der Feinanteil 0/2 in der RC-GK 0/16 ca. 54 M.-% und in der RC-GK 0/8 ca. 41 M.-% beträgt. Das entspricht dem Verhältnis Input-Menge zu Output-Menge von etwa 2:1.

Die in der Baustoff-RC-Anlage installierte Brechereinheit ist bei der Fa. zweistufig ausgelegt: eine Schlagwalze als Vorbrecher und eine Prallmühle als Nachbrecher. Die Klassierung (Trennung in verschiedene Korngrößen) erfolgt über Siebe. Das Überkorn > 45 mm wird der Prallmühle für einen zweiten Durchlauf zurückgeführt.

Entsprechend der verwendeten Betonrezeptur (s. Tabelle 24) im Rahmen des Projektes sind für die Produktion von 1 m³ RC-Beton 714 kg RC-GK 0/8 für die Herstellung eingesetzt worden. Demzufolge wurden ca. 1,5 t Betonbruch aufbereitet. Auf die Gesamtmenge der verbauten Bauteile

des RC WE-Moduls hochgerechnet (20,74 t RC-GK 0/8)¹⁶, wurden ca. 41,5 t Betonbruch (Inputmaterial) zur Erzeugung der 0/8-Fraktion aufbereitet.

Die Prüfzeugnisse (s. Pkt. 7.1.1, 17.5) belegen, dass die Qualität des RC-Materials dem Natursand (-kies) in keinem Punkt nachsteht.

Gewinnung und Aufbereitung von Kies / Sand

Die natürlichen Rohstoffe Sand und Kies für die Produktion von Transportbeton bezieht die Fa. Luckauer Betonwerk GmbH in Simmersdorf – wie o.a. - aus dem Kieswerk Ponickau, Steine und Erden Lagerstättenwirtschaft GmbH. In Kombination der Nass- und Trockengewinnung/aufbereitung werden die Gesteinskörnungen produziert. Nach Angaben des Herstellers ergibt sich für die Bereitstellung des Sand-/Kies-Gemisches 0/8 aus der Fraktion 0/32 folgendes Verhältnis: etwa 3 Teile der Körnung 0/8 sind in 1 t GK 0/32 enthalten, d.h. etwa 70-75 M.-%. Im Umkehrschluss leitet sich daraus ab, dass etwa 25 -30 M.-% auf die 8/32 Körnung entfällt.

7.2.3 Energetische Betrachtung: Bereitstellung der Gesteinskörnungen für die Betonherstellung

Energieverbrauch bei der Aufbereitung von Betonbruch zur Herstellung von RC-GK

In Abhängigkeit der installierten Aggregate und Maschinen, also der technischen Ausrüstung der Anlage, sowie des Aufbereitungsprozesses (z.B. ein- oder zweistufig, nass- u./o. trocken) variiert der Energieverbrauch von Baustoff-RC-Anlage zu Baustoff-RC-Anlage. Aufgrund der unvollständigen Datenlage wurde im Rahmen eines FO-Projektes¹⁷ der Energieverbrauch für die Trockenaufbereitung (wie bei der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH) von 1 Tonne Betonbruch 19,5 MJ berechnet. Die Energieaufwände nach Prozessen gegliedert, ergaben folgende Ergebnisse:

Zerkleinern (Brecher)	6,1 MJ/t (31%)
Klassieren (Siebe)	1,8 MJ/t (9%)
Separieren (Magnetbänder)	0,5 MJ/t (3%)
Transportieren (Transportbänder)	10,9 MJ/T (56%).

Unter Berücksichtigung, dass in der Fa. HEIM bei der Aufgabe von 1 t Betonbruch etwa 0,5 t RC-GK 0/8 produziert werden (~ 50 % vom Input) und den zuvor ermittelten Energieverbrauchsansatz von 19,5 MJ/t, werden für die Herstellung von 1 Tonne 0/8 RC-GK folglich 39 MJ (10,8 kWh) Energie benötigt. Hochgerechnet bedeutet dies für die insgesamt eingesetzte und aufbereitete Menge von ~ 21 t an RC-GK 0/8: ~ 819 MJ (~ 227 kWh) benötigte Energie.

Energieverbrauch zur Gewinnung von Sand / Kies aus natürlichen Vorkommen

Es wird davon ausgegangen, dass für die Bereitstellung von einer Tonne Sand / Kies ca. 35 MJ Energie benötigt werden¹⁸. Der Anteil der Körnung 0/8 in 1 Tonne GK beträgt – wie o.a. - ca. 70 - 75 M.-%. D.h. für die Herstellung von einer Tonne natürlicher Gesteinskörnung 0/8 würde ein

¹⁶ Die Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH hat die Gesamtmenge der Körnung 0/8 als Sachspende geleistet.

¹⁷ [127]

¹⁸ [128]

Energieaufwand i. M. von ca. 48 MJ¹⁹ benötigt werden. Für die entsprechende Gesamtmenge ~ 21 t werden ca. 1.000 MJ (~270 kWh) verbraucht.

Transportaufwendungen RC-GK

In nachstehendem Bild 272 ist der Transportweg von der Baustoff-RC-Anlage HEIM bis zum Transportbetonwerk in Simmersdorf gekennzeichnet.

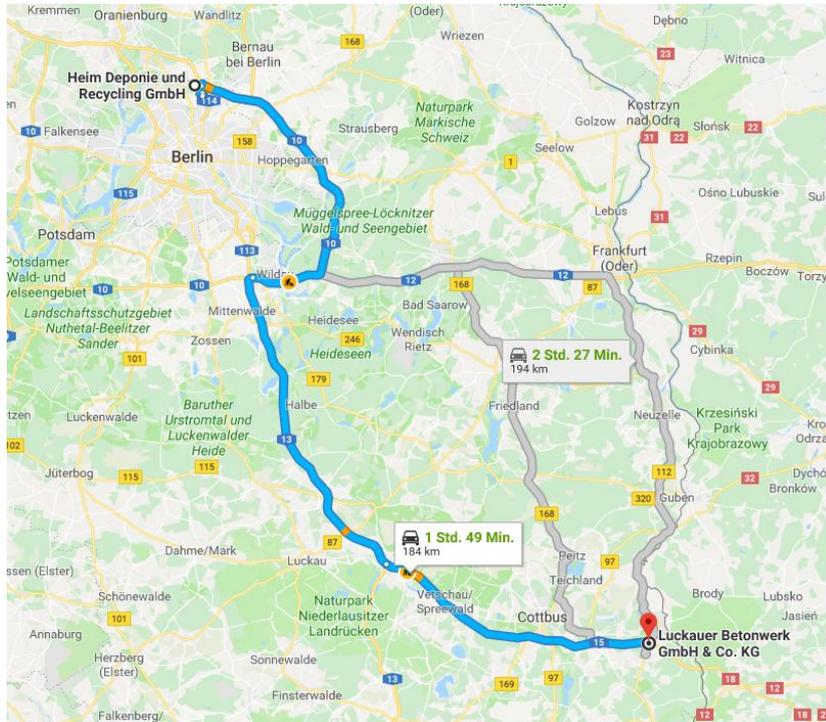


Bild 272. Darstellung des Transportwegs, RC-GK (Google Maps, Aufruf 28.11.2018)

Die Transportentfernung von der FA. HEIM zum Transportbetonwerk nach Simmersdorf beträgt etwa 184 km. Mit Bezug auf die Systemgrenzen (s. Bild 273) wäre die Transportstrecke für den Betonbruch von der Abbruchbaustelle bis zur Fa. HEIM zu berücksichtigen (23 km). Unter dem Ansatz, dass die Baustoff-RC-Anlage quasi einem Steinbruch oder einer Kiesgrube gleichkommt, wird die Transportdistanz von 23 km in der nachfolgenden Berechnung nicht berücksichtigt.

Unberücksichtigt bleibt zudem der Transport des RC-Betons von der Mischanlage in Simmersdorf mittels Transportbetonmischfahrzeug in das ca. 3 km entfernte Fertigteilbetonwerk der Fa. M&L nach Forst. Die Transportkilometer sind in der nachfolgenden Berechnung vernachlässigt worden, da dies keinen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtbewertung hat.

Laut Umweltbundesamt²⁰ ergibt sich für den Transport mit Diesel-LKW ein spezifischer Energieverbrauch von 1,4 MJ/t*km (d.h. ~ 1,4 MJ wird für den Transport von einer Tonne Material mit LKW pro 1 km benötigt). Die Anlieferung der benötigten Menge der RC-GK von der Fa. HEIM Deponie & Recycling GmbH zum Transportbetonwerk nach Simmersdorf (~ 21 t RC-GK), 184 km weit transportiert, ergibt einen Verbrauch an Energie von ~ 5.410 MJ (184 km x 21 t x 1,4 MJ/t*km).

¹⁹ Für 1 t 0/8 GK werden 1,3 t (bei 75 M.-%) bzw. 1,43 t (bei 70 M.-%) Sand-Kies-Aushub benötigt. D.h. für 1,3 t werden 45,5 MJ und für 1,43 insgesamt 50,05 MJ benötigt.

²⁰ [129]

Transportaufwendungen, Sand / Kies

Der Transportweg für das Sand / Kiesgemisch vom Kieswerk Ponickau zum Transportbetonwerk nach Simmersdorf ist in Abb. 9 dargestellt.

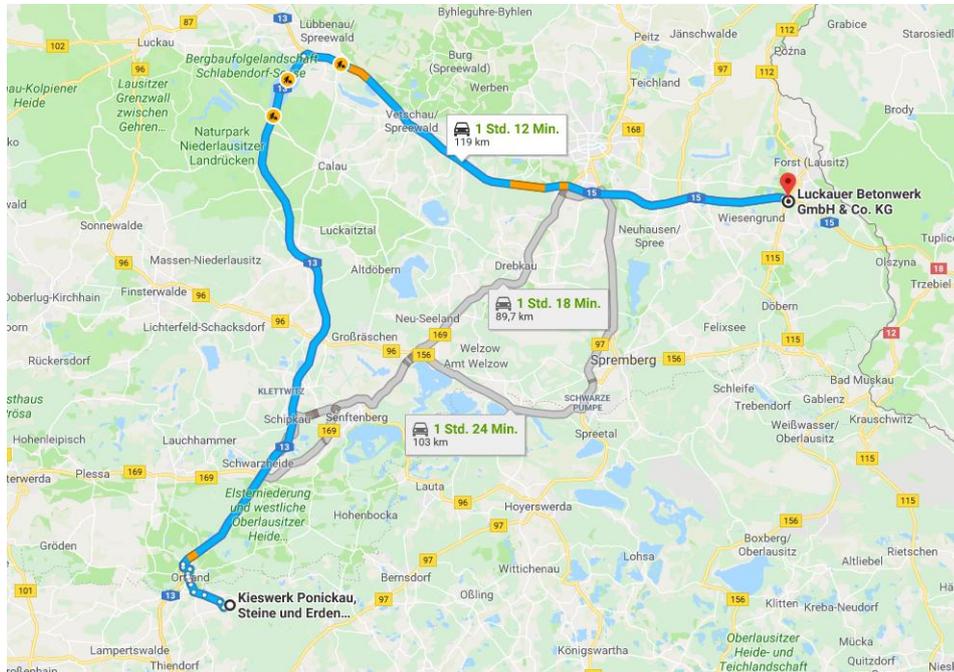


Bild 273. Darstellung des Transportwegs, Sand / Kies

Der Transportweg für das Sand/Kiesgemisch beträgt 119 km via Autobahn. (Im Vergleich zum Antransport der RC-GK von der Fa. HEIM nach Simmersdorf (184 km sind 65 km weniger.) U.o. Ansatz ergibt sich für den Transport der Gesteinskörnung ein Energieverbrauch von 3.499 MJ (119 km x 21 t x 1,4 MJ/t*km). Das sind 1.911 MJ (= 5.410 MJ – 3.499 MJ) weniger, im Vergleich zum Transport der RC-GK.

Gegenüberstellung der energetischen Aufwendungen für die Bereitstellung und den Transport von RC- und Primär-Gesteinskörnungen

In nachstehender Tabelle 25 sind die ermittelten Aufwendungen zusammengefasst bezogen auf eine Tonnen RC-GK bzw. eine Tonne Sand-/Kiesgemisch. Der Gesamtenergieverbrauch ergibt sich aus der Summe der Herstellungenergie (Gewinnungs- und Aufbereitungsprozess) und der Transportenergie (Transportentfernung bis zum Transportbetonwerk und Energieverbrauch des Transportmittels LKW).

Tabelle 25 Übersicht zu den Energieaufwendungen für die Bereitstellung der RC-GK im Vergleich zu Sand / Kies 0/8.

Material	Herstellungenergie [MJ/t]	Entfernung [km]	Transportenergie [MJ/t]	Gesamtenergieverbrauch [MJ/t]
	a	b	b*1,4	a+b
RC-GK (0/8)	39	184	258	297
Sand / Kies (0/8)	48	119	167	215

Im Ergebnis der Betrachtungen zu den Energieaufwendungen für die Bereitstellung der Gesteinskörnungen, zeigt sich ein Vorteil für die RC-GK. Der Energieverbrauch bei der Herstellung von einer Tonne RC-Material ist um 9 MJ geringer gegenüber dem Sand/Kiesgemisch. Einen entscheidenden Einfluss hierauf hat das Input bzw. die Aufgabe des sortenreinen Betonbruchs zur Aufbereitung.

Die nachfolgende Tabelle 26 gibt einen Überblick zu den gesamt angefallenen Energieaufwendungen. Gegenübergestellt werden die ermittelten Energieaufwendungen zur Herstellung und zum Transport der RC- und Primär-Gesteinskörnungen bis zum Transportbetonwerk.

Tabelle 26 Übersicht zu den Energieaufwendungen zur Bereitstellung und Transport des Sandes / Kieses (für die Gesamtmenge der Gesteinskörnung 0/8 21 t)

Material	Herstellungsenergie [MJ]	Transportenergie [MJ]	Gesamtenergieverbrauch [MJ]
	a	b	a+b
RC-GK (0/8)	819	5410	6229
Sand / Kies (0/8)	1008	3499	4507

Deutlich wird hier, dass die Transportkilometer das Gesamtergebnis der Energieaufwendungen signifikant beeinflussen. Es besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Transportentfernung und Energieverbrauch: je länger der Transportweg, desto höher der Energieverbrauch.

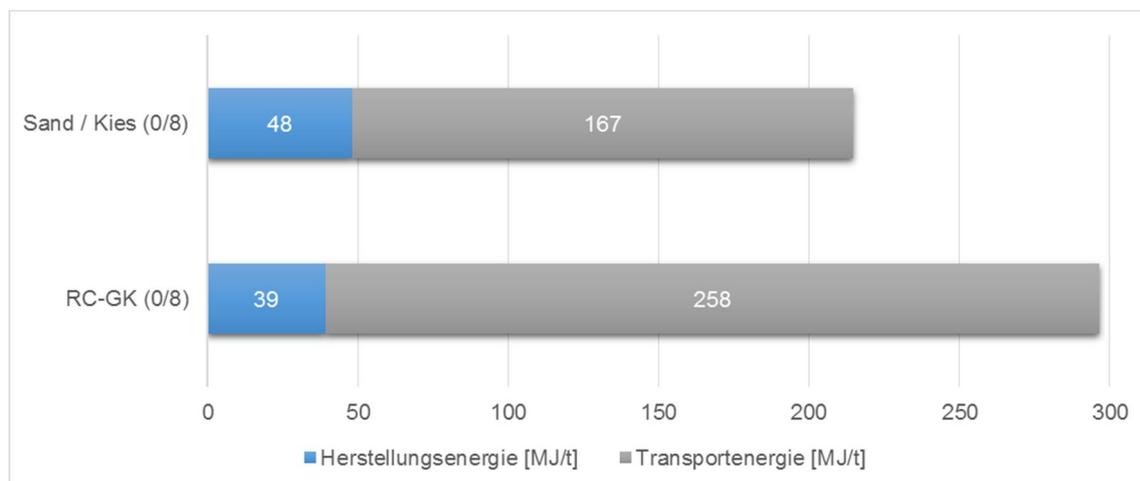


Bild 274. *Energieaufwand zur Herstellung und Transport der RC- und Primär-Gesteinskörnung 0/8 [MJ/t]*

Die Gegenüberstellung der berechneten Daten für den Energieaufwand zeigt, dass dieser für die RC-GK im Vergleich zum Sand/Kiesgemisch identisch wäre, wenn anstelle 184 km (nur) 125 km absolviert hätten werden müssen. Die Fa. HEIM als Lieferant wurde deshalb eingebunden, da die RC-GK 0/8 bereits auf Halde produziert sowie hinsichtlich der Umweltverträglichkeit geprüft war. Die benötigten 21 t RC-GK zur RC-Betonherstellung war somit sichergestellt.

7.2.4 CO₂-Emissionen für die Bereitstellung der RC-GK und des Kiesel

Die CO₂-Emissionen lassen sich aus den energetischen Aufwendungen (Kap. 7.2.3) berechnen. Es wurden folgende Datensätze zu Grunde gelegt:

- für die Trockenaufbereitung der RC-GK 0/8: 39 MJ/t (Ansatz: 52 % Strom RC-Anlage, 48 % Diesel²¹ für den Einsatz des Baggers zum Vorzerkleinern und des Radladers für den innerbetrieblichen Transport) (s. Tabelle 24);
- für die Herstellung von Sand / Kies 0/8: 48 MJ/t (s. Tabelle 24).

Um die CO₂-Emissionen zu berechnen (s. Tabelle 27), wurde die Datenbank ProBas Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme, Hrsg. Umweltbundesamt, abrufbar unter „<http://www.probas.umweltbundesamt.de/>“ verwendet.

Tabelle 27 Berechnung der CO₂-Emissionen bei der Herstellung der RC-GK 0/8

Konventionelle Aufbereitung	Anteil Energieträger: Strom (52 %)		Anteil Energieträger: Diesel (48 %)		Gesamt
Durchsatz		20,3 MJ/t		18,7 MJ/t	39 MJ/t
CO ₂ -Emissionen	140 g/MJ	2.842 g/t	11 g/MJ	206	3.048 g/t

Laut ProBas²² betragen die CO₂-Emissionen bei der Gewinnung von Sand / Kies etwa 7.470 g/t²³.

Die Emissionen für den Transport sind wie folgt berechnet:

$$\text{Energetischer Aufwand des Transports [MJ/t]} \times \text{Emissionswert des Transports [g/t]}$$

Die ermittelten Daten sind in der Tabelle 28 dargestellt. Durch die 65 km längere Transportstrecke der RC-GK gegenüber des Sand/Kiesgemisches fallen die CO₂-Emissionen weitaus höher aus (ca. 715 g/t).

Tabelle 28 Berechnung der CO₂-Emissionen bei dem Transport von RC-GK und Sand / Kies

Material	Transportenergie [MJ/t]	Emissionswert für Transport mit LKW [g/MJ]	CO ₂ -Emissionen [g/t]
RC-GK (0/8)	258	11	2.834
Sand / Kies (0/8)	167		1.833

In Tabelle 29 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 29 Gegenüberstellung CO₂-Emissionen bei der Produktion und dem Transport bis zum Betonwerk von 1 t RC- und 1 t Primär-Gesteinskörnung 0/8

Material	Herstellung [g/t]	Transport [g/t]	Gesamt [g/t]
RC-GK (0/8)	3.048	2.024	5.072
Sand / Kies (0/8)	7.470	1.309	8.779

²¹ [126]

²² Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme, Umweltbundesamt

²³ [130]

Die o.a. Berechnung in der Tabelle 29 zeigt, dass bei der Herstellung einer Tonne RC-GK 0/8 gegenüber einer Tonne Primärstoff (Sand / Kies) eine CO₂-Einsparung von ca. 3.700 g/t (ca. 42 %) erzielt wird. Das Bild 275 verdeutlicht das Ergebnis graphisch.

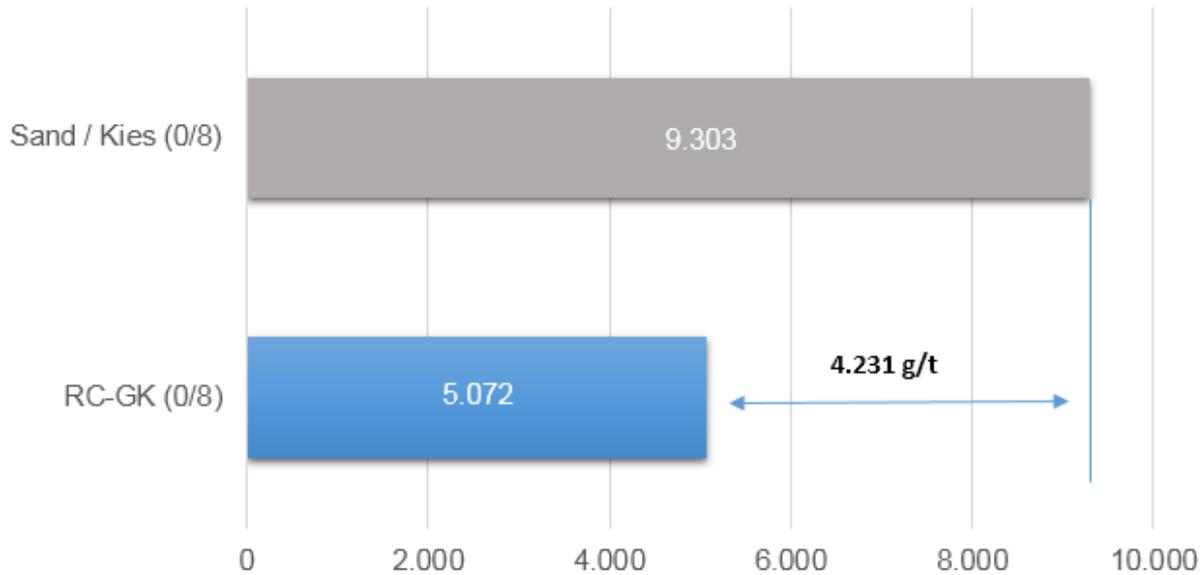


Bild 275. Gegenüberstellung von CO₂-Emissionen bei der Bereitstellung von 1 t RC- und Primär-Gesteinskörnung 0/8

Infolge der Substitution von Kies und Sand durch den Einsatz von ~21 t RC-GK für alle produzierten RC-Betonbauteile, konnten 89 kg CO₂ -Emissionen eingespart werden (0,0042 t x 21 t = 0,077 t).

7.2.5 Synopse des ökologischen Screenings von RC-Beton und Normalbeton

Das Bild 276 zeigt eine Gegenüberstellung der Zusammensetzung vom eingesetzten RC-Beton C 30/37 im Vergleich zum üblichen Normalbeton C30/37, welcher bei der Fa. M & L produziert wird.

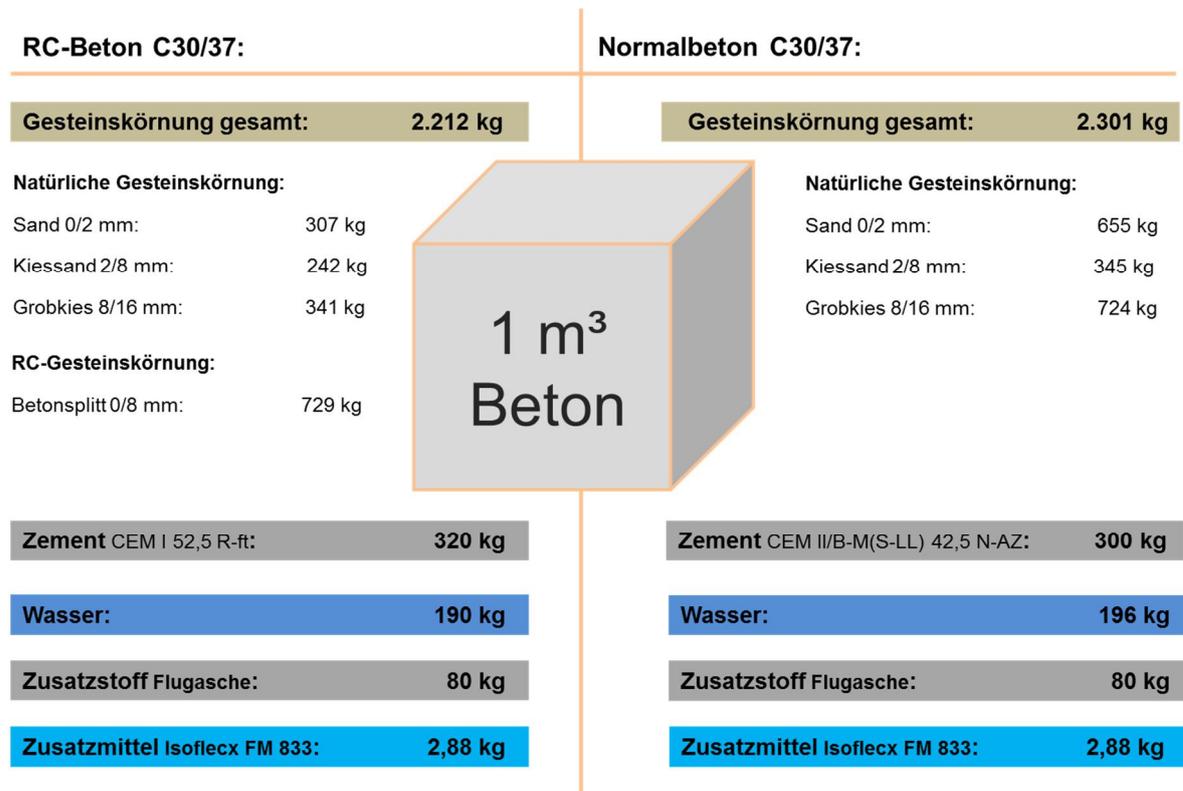


Bild 276. Gegenüberstellung Ausgangsstoffe und deren Mengen von RC- und Normalbeton²⁴

Nachstehende Berechnung des Energieaufwandes für die natürliche Gesteinskörnung 0/8 und RC-GK 0/8 erfolgt auf Basis der ermittelten Werte des Kap. 7.2.3. Die Daten für alle weitere Ausgangsstoffe basieren auf der ÖKOBAUDAT 2017²⁵ (s. Tabelle 30).

²⁴ Rezeptur für Normalbeton: Angabe von der Fa. Mattig & Lindner GmbH; Rezeptur für RC-Beton: im Rahmen dieses Projektes entwickelt und verwendet

²⁵ [131]

Tabelle 30 Bereitstellungsaufwand der Ausgangsstoffe zur Herstellung von Normal- und RC-Beton C30/37

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung		Bereitstellungsaufwand (Gewinnung und Transport) [MJ/t]		Energieaufwand	
	RC-Beton [t pro m ³ Beton]	Normalbeton [t pro m ³ Beton]	Herstellung [MJ/t]	Transport [MJ/t]	RC-Beton [MJ pro m ³ Beton]	Normalbeton [MJ pro m ³ Beton]
	a	b	c	d	a*(c+d)	b*(c+d)
Sand 0/2	0,307	0,655	49,26	167 ²⁷	66	141
Kiessand 2/8	0,242	0,345	49 ²⁸		52	74
Grobkies 8/16	0,341	0,724			74	156
RC-GK 0/8	0,729	-	39	258²⁹	216	0
Zement	0,320	0,300	2.410 ³⁰	28 ³¹	780	731
Flugasche	0,080	0,080	0 ³²	287 ³³	23	23
Zusatzmittel	0,003	0,003	0 ³⁴	104 ³⁵		
Wasser	0,190	0,196	0 ³⁶			
Gesamt:					1.212	1.126

Im Ergebnis der Tabelle 30 ist festzustellen, dass der Energieaufwand für den RC-Beton C30/37 um 85 MJ/m³ (ca. 7 %) gegenüber dem Normalbeton höher ist.

Die folgende

Tabelle 31 stellt den daraus errechneten gesamten Energieaufwand für die Herstellung von einem RC-WE-Modul mit 18,4 m³ dar.

 Tabelle 31 Gesamtenergieaufwand für die Herstellung von RC- und Normalbeton für das entwickelte RC-WE-Modul (18,4 m³ Beton)

Beton	Energieaufwand [MJ/m ³]	Gesamtenergieaufwand [MJ]
RC-Beton	1.212	22.292
Normalbeton	1.126	20.725

²⁶ [132]

²⁷ ermittelt s. Kap. 7.2.3

²⁸ [133]

²⁹ ermittelt s. Kap. 7.2.3

³⁰ [134]

³¹ Transport per LKW über 24 km, Fa. CEMEX Deutschland AG

³² [135]

³³ Transport per LKW über 287 km, Kohlekraftwerk Opolo

³⁴ Keine Angaben in der Datenbank, das Feld bleibt offen

³⁵ Transport per LKW über 104 km, BASF Construction

³⁶ Vernachlässigt

Bei Betrachtung der Gesamtmenge an Beton, der im entwickelten RC-Modul eingesetzt worden ist, ergibt sich ein höherer Energieaufwand für den RC-Betoneinsatz infolge des weiten Antransportes der RC-GK. Ca. 1.600 MJ mehr Energie ist im Vergleich zum Normalbeton verbraucht worden. Im Allgemeinen geht man von einem Transportradius ab Baustoff RC-Anlage von 30 km aus.

Nachfolgend werden die CO₂-Emissionen für den RC- und Normalbeton berechnet und gegenübergestellt.

Tabelle 32 Darstellung der CO₂Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC- und Normalbeton C30/37

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung		CO ₂ -Emissionen		CO ₂ -Emissionen	
	RC-Beton [t pro m ³ Beton]	Normalbeton [t pro m ³ Beton]	Herstellung [gCO ₂ /t]	Transport [gCO ₂ /t]	RC-Beton [gCO ₂ pro m ³ Beton]	Normalbeton [gCO ₂ pro m ³ Beton]
	1	2	3	4	1*(3+4)	2*(3+4)
Sand 0/2	0,307	0,655	7.470	1.309	2.695	5.750
Kiessand 2/8	0,242	0,345	7.470	1.309	2.125	3.029
Grobkies 8/16	0,341	0,724			2.994	6.356
RC-GK 0/8	0,729	-	3.048	2.024	3.697	0
Zement	0,320	0,300	587.000	308	187.939	176.192
Flugasche	0,080	0,080	0	3.157	253	253
Zusatzmittel	0,003	0,003	0	1.144	3	3
Wasser	0,190	0,196	0		0	0
Gesamt:					199.706	191.583

Die Berechnung basiert größtenteils auf Basis der ermittelten Daten in Kap. 6.2.4. Alle weiteren Daten sind der ÖKOBAUDAT Datenbank entnommen.

Tabelle 32 Darstellung der CO₂Emissionen bei der Herstellung von 1 m³ RC- und Normalbeton C30/37

Ausgangsstoffe	Zusammensetzung		CO ₂ -Emissionen		CO ₂ -Emissionen	
	RC-Beton [t pro m ³ Beton]	Normalbeton [t pro m ³ Beton]	Herstellung [gCO ₂ /t]	Transport [gCO ₂ /t]	RC-Beton [gCO ₂ pro m ³ Beton]	Normalbeton [gCO ₂ pro m ³ Beton]
	1	2	3	4	1*(3+4)	2*(3+4)
Sand 0/2	0,307	0,655	7.470 ³⁷	1.309 ³⁸	2.695	5.750
Kiessand 2/8	0,242	0,345	7.470 ³⁹	1.309 ⁴⁰	2.125	3.029
Grobkies 8/16	0,341	0,724			2.994	6.356
RC-GK 0/8	0,729	-	3.048⁴¹	2.024⁴²	3.697	0
Zement	0,320	0,300	587.000 ⁴³	308 ⁴⁴	187.939	176.192
Flugasche	0,080	0,080	0 ⁴⁵	3.157 ⁴⁶	253	253
Zusatzmittel	0,003	0,003	0 ⁴⁷	1.144 ⁴⁸	3	3
Wasser	0,190	0,196	0 ⁴⁹		0	0
Gesamt:					199.706	191.583

Die höheren CO₂-Emissionen (8.123 g CO₂ pro 1 m³ Beton – ca. 4 %), die sich für den verbauten RC-Beton im Vergleich zu Normalbeton ergeben, sind hauptsächlich auf den längeren Transportweg von RC-GK und dem etwas erhöhten Zementgehalt zurückzuführen.

Mit der Hilfe von Auswahlmethoden bei gleichen Rezepturen wurde berechnet, dass der Einsatz von RC-Beton im Rahmen dieses Projektes bei der Verfügbarkeit von RC-GK im Radius von \square 85 km – gemessen am Energieverbrauch - schon effizienter als Normalbeton ist.

Der RC-Beton ist bei gleicher Zusammensetzung und gleicher Transportentfernung ökologischer als der Normalbeton.

Beim Bauvorhaben des Laborgebäudes der HUB in Berlin konnte beim Einsatz des RC-Betons etwa 1,1 kg CO₂/m³⁵⁰ und beim Bau des Mehrfamilienhauses in Ludwigshafen rund 3,7 kg CO₂⁵¹/m³ eingespart werden.

³⁷ Berechnet in Kap. 7.2.3

³⁸ Energieaufwand für Transport berechnet in Kap. 7.2.3, 1 MJ Transport per LKW ergibt 11 g CO₂-Emissionen (s. Kap. 7.2.4)

³⁹ Eb.

⁴⁰ Eb.

⁴¹ Energieaufwand für Transport berechnet in Kap. 7.2.3, 1 MJ Transport per LKW ergibt 11 g CO₂-Emissionen (s. Kap. 7.2.4)

⁴² Eb.

⁴³ [136]

⁴⁴ Energieaufwand für Transport berechnet in Kap. 7.2.3, 1 MJ Transport per LKW ergibt 11 g CO₂-Emissionen (s. Kap. 7.2.4)

⁴⁵ [137]

⁴⁶ Energieaufwand für Transport berechnet in Kap. 7.2.3, 1 MJ Transport per LKW ergibt 11 g CO₂-Emissionen (s. Kap. 7.2.4)

⁴⁷ Keine Angaben im Datenbank, das Feld bleibt offen

⁴⁸ Energieaufwand für Transport berechnet in Kap. 7.2.3, 1 MJ Transport per LKW ergibt 11 g CO₂-Emissionen (s. Kap. 7.2.4)

⁴⁹ Vernachlässigt

⁵⁰ [138]

⁵¹ [139]

Beim Bau der Umweltstation in Würzburg sind rund $1,5 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$ höhere Emissionen zu verzeichnen. Jedoch ergäbe sich ohne „Sicherheitszulage“ von $10 \text{ kg Zement} / \text{m}^3$ Beton eine Einsparung von rund $2,2 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$.

7.2.6 Effekte des Ressourcenschutzes

Für den RC-Betoneinsatz sprechen vor allem nicht nur die Effekte der Energie- und CO_2 -Emissionen-Einsparung, sondern auch bspw. die Nichtinanspruchnahme von Landschaft für die Gewinnung natürlicher Gesteinskörnungen, die Schonung natürlicher Rohstoffe und damit die Sicherung ihrer längeren Verfügbarkeit.

Für die Ermittlung der Flächeninanspruchnahme werden die Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) zugrunde gelegt. Als Zuschlagstoffe zur Betonherstellung kommen Kiese u./o. gebrochene Natursteine zum Einsatz. In unserem untersuchten Fall sind Kiese und Sande zum Einsatz gekommen. Die mit dem Kiesabbau bedingte Flächeninanspruchnahme hängt von der Abbaumächtigkeit ab. Nach Angaben des Bundesverbands der deutschen Sand- und Kiesindustrie liegt bei durchschnittlicher flächenmäßiger Betrachtung für den Kiesabbau die Abbautiefe bei rund 8 m und damit bei einer Ausbeute von 15 t/m^2 . Im Einzelfall können jedoch bei einigen Abbaugebieten auch Abbautiefen von über 40 m erreicht werden. Die Kiesausbeute nach BGR von 27 t/m^2 entspricht einer Abbaumächtigkeit von 15 Metern .

Unter Berücksichtigung des Ansatzes der Kiesausbeute von $27 \text{ t Kies pro m}^2$ und unter Beachtung, dass der Anteil der Fraktion $0/8$ bei natürlichen Kiessandvorkommen $70 - 75 \%$ ausmacht, ergibt sich für das Projekt folgende Berechnung:

Der Anteil der Fraktion $0/8$ beläuft sich auf rund $18,9 \text{ t/m}^2$ (entspricht 70% von 27 t/m^2).

Bei der Errichtung des RC-WE-Moduls kamen insgesamt ca. $21 \text{ t RC-GK } 0/8$ zum Einsatz (Wert siehe Kap. 7.2.3). Daraus ergibt sich insgesamt eine Flächeneinsparnis in Höhe von ca. 1 m^2 ($21 \text{ t RC-GK } 0/8$ dividiert durch $18,9 \text{ t/m}^2$). Dieser Wert ist nur für die substituierte Menge Kiessand durch RC-GK berechnet und für eine Wohneinheit mit der Wohnfläche von ca. 20 m^2 (RC-WE-Modul).

Der andere Vorteil des Einsatzes der RC-GK $0/8$ (Innovation des Projektes) ist Verwendung des sonst nicht gebrauchten Materials. Diese Gesteinskörnung wird meistens bei den RC-Anlagen abgesiebt und kaum nachgefragt. Der Feinanteil $0/2$ wird zum Einsatz normengemäß noch gar nicht zugelassen. Im Rahmen des Projektes hat es sich aber ergeben, dass bei dem Einsatz von NA-Zement (AKR-Reaktion ausgeschlossen) die Verwendung vom Feinanteil (ca. 49 V.-% der RC-GK $0/8$) keine Hindernisse und/oder Schwierigkeiten bringen. Der RC-Beton lässt sich problemlos überarbeiten und die Fertigteile entsprechen allen Anforderungen.

8 Materialkosten für die Herstellung der Betone (Normal- vs. RC-Beton)

Im Rahmen der ökonomischen Betrachtung werden die Materialkosten, welche für die Herstellung der Betonteile und -steine anfallen, mit der Herstellung eines Normalbetons bzw. konventionell hergestellten Betons gegenüber gestellt. (s. Tabelle 33)

Für eine Auswertung der Kosten wurden zunächst die benötigten Materialien (je m^3 Beton) verglichen.

Tabelle 33 Kostenanalyse zwischen Normalbeton und RC-Beton⁵²

Materialien	Kosten [€/t]	Normalbeton			RC-Beton		
		Menge [kg]	Kosten [€]	Kosten [%]	Menge [kg]	Kosten [€]	Kosten [%]
Betonrecycling 0/8 mm	5,29 €	-	€	0%	729	3,86 €	5%
Sand 0/2 mm	12,35 €	655	8,09 €	10%	307	3,79 €	5%
Kiessand 2/8 mm	16,40 €	345	5,66 €	7%	242	3,97 €	5%
Kiessand 8/16 mm	18,40 €	724	13,32 €	17%	341	6,27 €	8%
CEM I R-(ft)	137,55 €	300	41,27 €	54%	320	44,02 €	57%
Frischwasser	1,40 €	196	0,27 €	0%	190	0,27 €	0%
Fließmittel	1.750,00 €	3	5,04 €	7%	3	5,04 €	7%
Steinkohlenflugasche	43,50 €	80	3,48 €	5%	80	3,48 €	5%
Gesamtkosten:		(Netto)	77,13 €	100%		70,69 €	92%

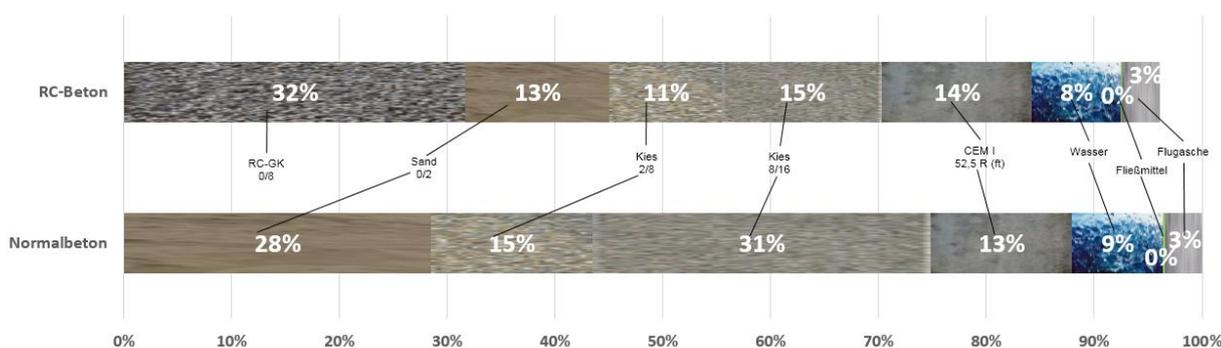


Bild 277. Gegenüberstellung der Zusammensetzungen von Normalbeton zu RC-Beton in %

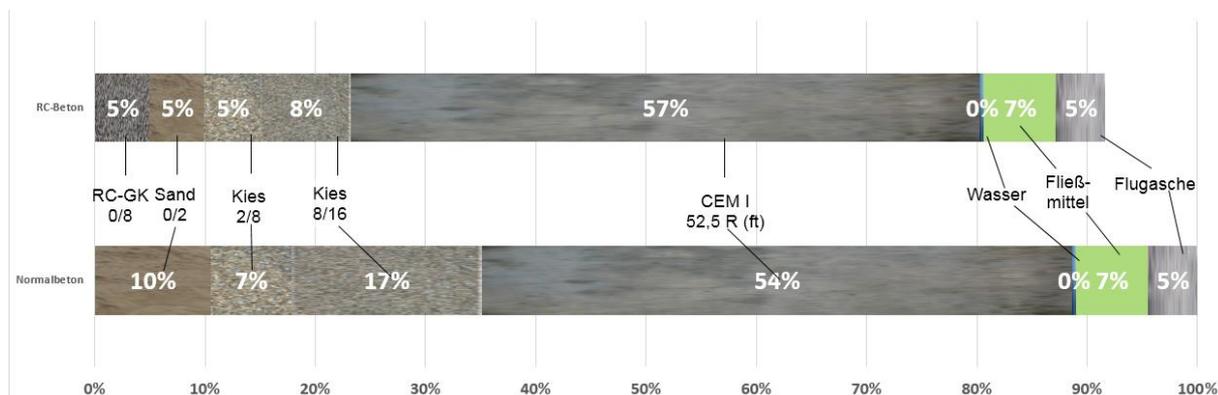


Bild 278. Kostengegenüberstellung von Normalbeton zu RC- Beton in %

9 Allgemeines zur Herstellung der einzelnen Bauteile

- Schalungen

Für die Herstellung der einzelnen Bauteile war es erforderlich, gesonderte Schalungen auf der Grundlage der erarbeiteten Ausführungspläne der TU Dresden anzufertigen. Für die großformatigen Betonbauteile (Boden-, Wand-, Deckenplatten und Balken) erfolgte dies entsprechend dem

⁵² Aktuelle Preise der Fa. M&L (Stand: 03.12.2018) sowie der Heim Deponie GmbH für RC-GK (Stand: 31.10.2018)

üblichen Schalungsbau. Auf einem im Betonwerk vorhandenen langen Vibrationstisch wurden die Schalungen für die Betonsteine, Balken und Attiken vorbereitet und anschließend mit Beton aufgefüllt. Alle weiteren Betonteile, wie Decken, Wände und Fußboden wurden im Außenbereich unterhalb des Portalkrans auf einem Metalltisch betoniert. Dort ist die Schalung schon zuvor vorbereitet worden und es fehlten lediglich die Bewehrung und der Beton. Nach jedem Mischdurchgang wurden die flächigen Bauteile mit Folien abgedeckt, um Umwelteinflüssen von außen auf den Beton entgegen zu wirken. Eine Besonderheit stellen allerdings die Betonsteine mit Noppen und Vertiefungen nach dem Lego-System-Prinzip dar – dem flexiblen Bausystem für Betonblöcke zum Bau von Schüttgutboxen, Stützwänden und dgl. Für die Noppenausbildung bzw. Vertiefungen sind in den Seitenwänden des Schalungskörpers entsprechende Vorkehrungen getroffen worden (s. Bild 279). Auf der Bild ist die Anordnung der Rohrhülse erkennbar. Sie dient der späteren Verbindung der einzelnen Steine.



Bild 279. Rohrverbindung für die Gewindeverankerung zwischen den Schalungswänden

- Herstellung der Betonsteine und Betonelemente

In nachstehender Tabelle 34 sind die Betonmengen aufgeführt, die für die Herstellung aller Bauteile erforderlich war.

Tabelle 34 Auflistung der Gesamtmasse sowie Volumina aller Bauteile (Dichte p des Betons: 2,5)

Position	Bauteil	Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]	Anzahl	Volumen		Gewicht	
						L x B x H [m ³]	m = p x V [t]		
1	Wand 1	4,50	0,175	2,78	1	2,19	5,47		
2	Wandelement 1	2,35	0,175	2,78	1	1,14	2,86		
3	Wandelement 2	2,25	0,175	2,78	1	1,09	2,74		
4	Bodenplatte 1	5,00	2,75	0,20	1	2,75	6,88		
5	Bodenplatte 2	5,00	2,65	0,20	1	2,65	6,63		
6	Deckenplatte 1	4,50	2,425	0,20	1	2,18	5,46		
7	Deckenplatte 2	4,50	2,525	0,20	1	2,27	5,68		
8	RC-Balken 1+2	4,50	0,175	0,25	2	0,39	0,98		
9	RC-Attiken 1-4	4,50	0,175	0,25	4	0,79	1,97		
10	RC-Beton Vollsteine	0,50	0,175	0,50	61	2,67	6,67		
11	RC-Beton Halbsteine	0,25	0,175	0,50	14	0,31	0,77		
Gesamt:						18,44	46,10		

Entsprechend der Abmaße der Betonblocksteine (0,50 m x 0,50 m x 0,175 m) und dem zum Zeitpunkt der Betonierung zur Verfügung stehenden Kapazitäten der FA M&L, wurde ein Schalungskörper mit fünf Sektionen für fünf Betonblocksteine konzipiert. Die Befüllung der Schalungen erfolgte mit Hilfe eines Freifallmischers mit einem Fassungsvermögen von 145 Litern (0,145 m³ Beton). Der Schalungskörper umfasste fünf Sektionen mit je 0,04 m³ RC-Beton Fassungsvermögen. Die Maschinenmischung erfolgte chargenweise (s. Bild 280). Die Mischdauer betrug ca. 90 s. Bei

insgesamt 75 benötigten Steinen für die Erstellung der Wände des RC-WE-Moduls waren insgesamt 15 Maschinenmischungen erforderlich. Da nur ein Schalungskörper verfügbar war, wurden demzufolge an 15 Tagen die Betonsteine produziert.

Während Boden-, Wand- und Deckenplatten sowie Betonbalken in Stahlbetonbauweise konstruiert wurden, wurden die Betonsteine unbewehrt ausgeführt. In allen Bauteilen wurden Abhebeanker verbaut. Dies geschah in Vorbereitung der Re- und Montage sowie der späteren (De-)Montage.

Für die Herstellung der Boden-, Wand-, und Deckenplatten wurde ein Betonmischfahrzeug mit einer Füllmenge von mind. 2,0 m³ Beton genutzt. Hergestellt wurde der RC-Beton in der Außenstelle der Fa. M&L in Simmersdorf im Transportbetonwerk (ca. 5 km vom Betonfertigteilwerk in Forst entfernt). Die großformatigen Betonteile (ausgenommen die Balken) wurden im Außenbereich der Fa. M & L auf einem Plattentisch hergestellt (s. Bild 281). Insgesamt wurden hierfür fünf Mischtage benötigt.



Bild 280. Bild links: Vorbereitete Schalung im Außenbereich der Fa. M&L Bild, rechts: Verarbeiten des Betons

Die Balken wurden – genau wie die Betonsteine - im Fertigteilwerk auf dem Rütteltisch gefertigt (s. Bild 281).



Bild 281. Herstellung RC-Balken sowie RC-Steine im Betonfertigteilwerk der Fa. M&L

Verdichtung

RC-Beton ist wie Normalbeton zu verdichten. Damit die beim Einbringen des Betons vorhandene Luft entweichen kann, der Beton die Bewehrung dicht umhüllt und dicht an der Schalung anliegt, wurden die großformatigen Betonelemente sowie die Betonsteine mittels Rüttelflasche verdichtet. Dies wirkt auch der Entstehung von Lunkern (Lufteinschlüsse an der Betonoberfläche) entgegen.

Arbeitskräfteeinsatz

Zur Herstellung der Steine und Balken kamen zwei Facharbeiter zum Einsatz. Zur Produktion der großflächigen Bauteile sind vier Arbeitskräfte (AK) notwendig gewesen. Zwei AK für die Vorbereitung der Bewehrung und dem Einsetzen der Nagelteller für die Abhebeanker und die zwei AK brachten den Beton ein und verdichteten und glätteten die Betonoberfläche.

Ausschalung

Jedes Bauteil wurde nach einem Tag Erhärtung ausgeschalt, da die erforderliche Abhebefestigkeit C12/15 gewährleistet war. Durch die verwendete Zementart CEM I 52,5 R-ft wurde ein schneller Aushärtungsprozess gewährleistet.⁵³

Zwischenlagerung der Betonbauteile

Die Betonsteine wurden auf Paletten (s. Bild 282) im Außenbereich der Firma M & L zwischengelagert. Der Transport erfolgte mittels Gabelstapler. Die restlichen Bauteile wurden unter dem Portalkran im Außenbereich zwischengelagert.



Bild 282. Palettierung der Steine für den Transport

10 Bewertung Montage des RC-WE-Moduls

10.1 Wissenschaftliche Begleitung

Die Wissenschaftliche Begleitung erfolgte durch den Projektbearbeiter der TU-Dresden, LS Tragwerkslehre sowie die Leiterin und Projektbearbeiter der BTU C-S, AG Bauliches Recycling. Grundlage dafür bildeten die Zeichnungen des entwickelten RC-WE-Moduls.

10.2 Erläuterung zum Montageablauf

- Arbeitskräfte und Arbeitsmittel

Der Aufbau des RC-WE Moduls wurde durch zwei Arbeitskräfte realisiert.

⁵³ Eine Nachbehandlung, um frühes Schwinden und damit frühzeitigen Rissbildungen im Beton entgegen zu wirken, hat nicht stattgefunden.

Als Hebezeug kam der auf dem Außengelände der Fa. M & L vorhandene Portalkran zum Einsatz. Für die Ausführung der Verbindungen wurden Werkzeuge, wie bspw. der Maulschlüssel verwendet. Ein Trennschleifer kam zum Einsatz, um die Gewindestangen (Verbindungsstäbe) zu kürzen oder um die Betonsteine aus Passgenauigkeitsgründen nachträglich oberflächlich zu bearbeiten.

- Durchführung der Montage

- Anschlagen und Versetzen der Bodenplatten

Als Lastaufnahmemittel kam ein Vierseilkettengehänge mit Hakengeschirr zum Einsatz (s. Bild 283- Bild rechts), welches am Portalkran befestigt wurde. Angeschlagen wurden die Ketten über einen Anschlagwirbel (s. Bild 283- Bild links) an den jeweiligen, im Betonelement eingelassenen Abhebeankern (s. Bild 277- Bild rechts).



Bild 283. Bild links: Anschlagwirbel Bild rechts: angeschlagene Ketten an Anschlagwirbel welche mit Bauteil verbunden sind

Nachdem die Bodenplatte höhennivelliert war, wurde das Kettengehänge vom Anschlagwirbel gelöst. Danach sind die Anschlagwirbel vom Betonbauteil entfernt worden. Nach der Montage der zwei Bodenplatten folgte die Wandmontage. Als erstes wurde die 4,50 m lange Betonwand in die dafür vorgesehene Aussparung in der Bodenplatte (s. Bild 284- Bild links) versetzt. Die Montagestreben dienen zur vertikalen Justierung der jeweiligen Wandelemente. Die Verbindung der Wandelemente untereinander erfolgte über eine dreifache Verschraubung (s. Bild 284-Bild rechts). Damit wurde einem Kippen der Wandelemente entgegen gewirkt bzw. die Einbaulage der Wandelemente gesichert.



Bild 284. Aufbau Bodenplatte sowie Wände; einsetzen der Gewindestangen für die Verankerung

Nach dem Aufstellen und der Sicherung der Wandelemente folgte die Montage der Betonsteine. Das Anschlagen der Betonsteine erfolgte mit Hilfe von Schlaufen (s. Bild 285- Bild links).



Bild 285. Bild links: Schlaufe welche in Bild Mitte befestigt wird um dann Bild rechts: den Stein aufzustellen

Die Schlaufen wurden mit dem im Betonstein eingelassenen Abhebeanker verschraubt.

Insgesamt wurden 61 Voll-RC-Betonsteine sowie 14 Halb-RC-Betonsteine verbaut. Mithilfe des Portalkrans wurden die Steine montiert (s. Bild 286).

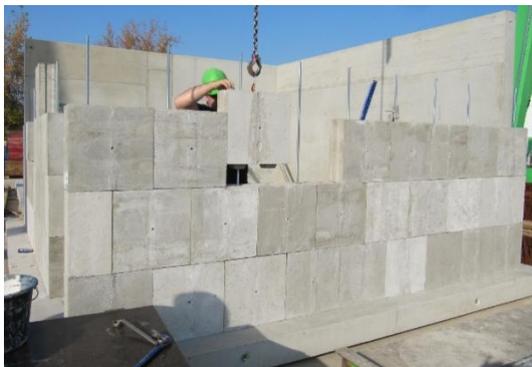


Bild 286. Montage und Aufstellen der RC-Vollsteine mit einer zusätzliche Verankerung mittels Gewindestangen

Nachdem die einzelnen Steine montiert und die Gewindestangen der Bauteilhöhe angepasst waren, wurde der Ringbalken montiert und verschraubt (s. Bild 287)



Bild 287. Montage des Ringbalkens und Einschrauben der Gewindestangen zur sicheren Verbindung mit der Deckenplatte

Den Abschluss der Montage bildeten die zwei Deckenplatten und das Attikaelement. Die Deckenplatten wurden miteinander verschraubt und liegen komplett auf den Wänden auf (s. Bild 288). Nachdem die Attikaelemente montiert waren, wurden diese mittels Verschraubungen mit der Decke gesichert. Auch an dieser Stelle war die Passgenauigkeit der einzelnen Bauteile relevant, da durch die Bewehrung in der Deckenplatte eine Nachbohrung von zusätzlichen Bauteilöffnungen nur mit erheblichem Aufwand realisierbar gewesen wäre.



Bild 288. Montage Deckenplatte 1 oben links (Deckenplatte 2 analog Deckenplatte 1)

Nach Abschluss der Montage (s. Bild 289) folgte ein Belastungstest durch den Bearbeiter der TU Dresden mit einer simulierten statischen Dachlast.



Bild 289. fertig montierte RC-Wohneinheit

Die gesamte Montagezeit belief sich auf ca. 7 h. Die gemessenen Zeiten für die einzelnen Bauteile sind der folgenden Tabelle 35 zu entnehmen.

Tabelle 35 Montagedauer [h] der Wohneinheit⁵⁴

Position	Bauteil	Anzahl	Aufbau [hh:mm:ss]	Gesamtauf- bauzeit [hh:mm:ss]
1	Wand 1	1	00:07:30	00:07:30
2	Wandelement 1	1	00:12:00	00:12:00
3	Wandelement 2	1	00:12:00	00:12:00
4	Bodenplatte 1	1	00:10:30	00:10:30
5	Bodenplatte 2	1	00:10:30	00:10:30
6	Deckenplatte 1	1	00:15:00	00:15:00
7	Deckenplatte 2	1	00:15:00	00:15:00
8	RC-Balken 1+2	2	00:24:00	00:48:00
9	RC-Attiken 1-4	4	00:11:00	00:44:00
10	RC-Beton Vollsteine	61	00:03:00	03:03:00
11	RC-Beton Halbsteine	14	00:03:00	00:42:00
		Gesamt:		06:39:30

10.3 Bewertung der entwickelten Verbindungen

Grundsätzlich wird von einer kraftschlüssigen Verbindung gesprochen da keine stoffliche Verbindung mit Mörtel vorhanden ist.

Das Stapeln und Verschrauben der Betonsteine erfolgte vollkommen problemlos. Überlange Gewindestangen wurden vor Ort gekürzt, so dass ein müheloses Verschrauben möglich war.

10.4 Schlussfolgerungen für die praktische Umsetzung

Die Erfahrungen sowie Erkenntnisse, welche bei dem ersten wichtigen Schritt - der Montage - gesammelt wurden, lassen positive Schlussfolgerungen für eine weiterführende Entwicklung der Bauweise dar. Eine aus insgesamt 75 kraftschlüssig verbauten RC-Betonblocksteinen, einer Bodenplatte, drei Wandelementen, zwei Deckenplatten sowie Attiken und Betonbalken konstruierte Wohneinheit konnte im ersten Versuch der Montage innerhalb von knapp 6 ½ h errichtet werden.

Die Vorteile bei der Montage bestehen darin, dass keine technologischen Pausen für Mörtelbett-auflagen nötig werden, wie es sonst bei einem klassischen Mauerwerkbau der Fall wäre. Somit entsteht kein zusätzlicher Aufwand zur Herstellung und Verarbeitung von Mörtelmassen bei der Bauzeitplanung.

Herausforderungen liegen insbesondere bei der Herstellung passgenauer Betonfertigteile, sowohl bei der Bodenplatte und den integrierten Schraubfassungen für die späteren Gewindestangen, als auch die vertikalen Rohraussparungen für die Gewindestangen in den Betonblocksteinen.

11 Bewertung der Demontage des RC-WE-Moduls

Die Demontage erfolgte im Prinzip in umgekehrter Reihenfolge zur Montage.

Nachstehend werden lediglich Besonderheiten oder Unterschiede erläutert, die gegenüber der Montage zu verzeichnen sind.

⁵⁴ Für die Montage wurde die dreifache Zeit gegenüber der Demontage angesetzt. Dies ist in der Aufstellung und Ausrichtung der einzelnen Bauteile begründet.

Wesentlich ist, dass die Betonbauteile im eingebauten Zustand zu kennzeichnen sind hinsichtlich ihrer Einbauposition. Somit kann die (Re-)Montage mit entsprechender Passgenauigkeit durchgeführt werden.

Die Demontage erfolgte mit zwei Arbeitskräften der Fa. Ecosoil.

11.1 Wissenschaftliche Begleitung der Demontage

Bei der Demontage kamen zwei verschiedene Abbautechniken bzw. Hebezeuge zum Einsatz: Ein Portalkran und ein Gabelstapler. Der Portalkran kann zwar Lasten bis 16 t aufnehmen, agiert dafür aber deutlich langsamer als der Gabelstapler.

Die Zeitersparnis von ca. 40 Minuten ist im Zeitprotokoll der der Tabelle 36 nachvollziehbar.

Tabelle 36 Abbauzeit [h] der Wohneinheit

Position	Bauteil	Anzahl	Abbau- technik 1 [hh:mm:ss]	Gesamtab- bauzeit 1 [hh:mm:ss]	Abbau- technik 2 [hh:mm:ss]	Gesamtab- bauzeit 2 [hh:mm:ss]
1	Wand 1	1	00:02:30	00:02:30	00:02:30	00:02:30
2	Wandelement 1	1	00:04:00	00:04:00	00:04:00	00:04:00
3	Wandelement 2	1	00:04:00	00:04:00	00:04:00	00:04:00
4	Bodenplatte 1	1	00:03:30	00:03:30	00:03:30	00:03:30
5	Bodenplatte 2	1	00:03:30	00:03:30	00:03:30	00:03:30
6	Deckenplatte 1	1	00:05:00	00:05:00	00:05:00	00:05:00
7	Deckenplatte 2	1	00:05:00	00:05:00	00:05:00	00:05:00
8	RC-Balken 1+2	2	00:08:00	00:16:00	00:08:00	00:16:00
9	RC-Attiken 1-4	4	00:03:40	00:14:40	00:03:40	00:14:40
10	RC-Beton Vollsteine	61	00:01:00	01:01:00	00:00:30	00:30:30
11	RC-Beton Halbsteine	14	00:01:00	00:14:00	00:00:30	00:07:00
		Gesamt:		02:13:10		01:35:40

- Lastaufnahmemittel

Es hat sich gezeigt, dass die bei der Demontage der kleinteiligen RC-Bauteile (für die Wandsteine) eingesetzte Winkelelementzange⁵⁵ (s. Bild 290) von Vorteil ist, da Zeit eingespart werden konnte.

⁵⁵ Eine Winkelelementzange dient dem Versetzen von Steinen und anderen winklig gestalteten Bauteilen. Bevor die Winkelelementzange zum Einsatz kommt, ist sie hinsichtlich ihrer Funktionstüchtigkeit seitens der Rückbaufirma zu prüfen



Bild 290. Demontage eines RC-Betonsteines mit der Winkелеlementzange

11.2 Bewertung der entwickelten Verbindungen hinsichtlich ihrer Lösbarkeit

Das Lösen der Schraubverbindungen verlief im Prinzip ohne Komplikationen. Allerdings ist anzumerken, dass 14 Tage nach der Montage einige Schraubverbindungen nur schwer gelöst werden konnten, da Schutzmaßnahmen (Abdeckkappen o.ä.) für Schrauben und Gewindestangen nicht erfolgten.

11.3 Schlussfolgerungen für die praktische Umsetzung

Ergänzend zu der Schlussfolgerung aus Punkt 9.4, lässt sich feststellen, dass eine Demontage sowie eine spätere (Re-)Montage komplikationsfrei abläuft und somit die Mehrfachnutzung der RC-Betonblocksteine sichergestellt und bewiesen wurde.

Die Demontage der Rohbaukonstruktion des entwickelten RC WE-Moduls ist vorteilhaft, weil Schraubverbindungen leicht und schnell, sowie unkompliziert lösbar sind und die Betonbauteile nicht beschädigt werden. Somit sind ideale Voraussetzungen für Wiederverwendungsmaßnahmen geschaffen worden. Trenn- und Sägearbeiten entfallen; auch die Verbindungsteile können wiederverwendet werden.

12 Bewertung der Re-Montage

Nach der Demontage und Zwischenlagerung bei der Fa. Mattig & Lindner in Forst erfolgten die Umsetzung und der Wiederaufbau an einem anderen Standort. Da das Versuchsgelände des Lehrstuhls Stadtgutstr. nur noch befristet zur Verfügung steht und ein neuer Standort in der TU Dresden dem Lehrstuhl noch nicht zugewiesen worden ist, musste ein anderer Standort gefunden werden. In verkehrsgünstiger Lage zu Dresden bot sich ein Grundstück in Meißen an, wo das Modul als Demonstrator und für weitere Lehr- und Forschungszwecke zu Verfügung steht.

Aufgeladen wurden die Teile im Betonwerk der Fa. Mattig & Lindner in Forst mittels Portalkran. Die RE-Montage sollte vom LKW aus mittels Autodrehkran erfolgen.

12.1 Wissenschaftliche Begleitung

Der gesamte Umsetzungsprozess ist durch Mitarbeiter des Lehrstuhls wissenschaftlich begleitet worden.

12.2 Erläuterungen zum Ablauf

Bei der Re-Montage waren entsprechend realen Bedingungen erst eine Tragschicht und ein Planum herzustellen. Das erfolgte bereits einen Tag vor der eigentlichen Umsetzung. Das Planum war ein wesentlicher Punkt für die Re-Montage, da es hier auf die Oberflächenqualität des Planums ankam. Geringe Neigungen hätten sich sofort in Schiefstellungen der Wände und Toleranzen an den Verbindungsstellen ausgewirkt. Auf der entsprechenden Tragschicht ist dann eine dünne Feinschicht aufgebracht und mit Lehren abgezogen worden. Durch das Einwiegen der Lehren wird die erforderliche Oberflächenqualität und horizontale Ausrichtung gewährleistet.

Für die Umsetzung ist zu beachten, dass bei einem Aufladen vom Lager die Teile in der falschen Reihenfolge liegen können. Beim Re-Montieren vom LKW müssen die Teile in der Reihenfolge von der Bodenplatte bis zum Fundament vom LKW genommen werden können. Eine andere Reihenfolge erfordert zuerst ein Abladen und die Re-Montage dann vom Baustellenlager aus durchführen zu müssen und verzögert den Re-Montageprozess und führt zu zusätzlichen Kosten z.B. für Abspernungen und Kraneinsätze.

Erschwerend wirkte sich aus, dass am Tage der Remontage Minusgrade herrschten und die Schraubverbindungen alle eingefroren waren. Sie konnten mit einem Heißluftgerät in kurzer Zeit aufgetaut werden, was aber trotzdem zu Verzögerungen und Kosten führte.

Die Re-Montage erfolgt dann analog der Montage.

12.3 Bewertung der Qualität der Elemente und Verbindungen nach einmaligem Gebrauch

Die Oberflächen- und Kantenqualität nach einmaligem Gebrauch kann als bestens eingeschätzt werden.

Die Toleranzen der großflächigen Bauelemente waren äußerst gering, während die der Planelemente bei zukünftigen Anwendungen verbessert werden sollte.

12.4 Bewertung der Re-Montage

Die Re-Montage war problemlos möglich. Die Bodenplatte muss in absolut ebener Lage liegen. Einfache Möglichkeiten der Nachjustierung können genutzt werden.

Um Toleranzen bei den Schraubverbindungen in der Achse abfangen zu können, sind noch Ausgleichsmöglichkeiten zu entwickeln, um ein schnelleres Re-Montieren zu erreichen.

Für die Remontage wurden insgesamt 7:55 Std. benötigt, wobei die Umlagerung der Teile nicht mit gerechnet worden ist. Die Mehrzeit kommt durch das notwendige Einjustieren der Bodenplatte und die genannten Toleranzen in den Schraubverbindungen zustande.

12.5 Schlussfolgerungen für die praktische Umsetzung

Mit der Umsetzung der Einheit konnte die Wiederverwendbarkeit auf gleicher Stufe nachgewiesen werden. Eine spätere (Re-)Montage einer demontierten Einheit läuft komplikationsfrei ab und somit ist die Mehrfachnutzung der RC-Betonblocksteine und -elemente sichergestellt.

Vorhandene geringfügige Toleranzen erfordern Vorkehrungen um eine zügige Re-Montage zu ermöglichen.

13 Optimierungspotenziale

Hinsichtlich der Optimierung muss in verschiedene Bereiche differenziert werden. Insgesamt sind drei Abschnitte zu betrachten, die in den folgenden Unterpunkten 13.1 bis 13.3 erläutert werden.

13.1 Produktion/Herstellung

Bei der Herstellung der Betonsteine, sowie bei allen anderen Bauteilen auch, musste auf die Passgenauigkeit geachtet werden. Das war insbesondere bei der Metallschalung nicht einfach, da sich die Schalung bei der kleinsten Bewegung verschoben hatte. Daher wurden für das Betonieren entlang der Schalung zusätzliche Magnete verwendet, um die Verschiebungen so gering wie möglich zu halten. Um die Verschiebungen (Ecken nicht rechtwinklig) der Schalung gering zu halten, sind zusätzliche Winkel erforderlich. Somit könnte die Passgenauigkeit der Steine garantiert werden.

Des Weiteren haben sich die Feingewindestangen, welche unter anderem bei den Schalungen für die Steine (Vgl. Bild 289) sowie für die Balkenherstellung verwendet wurden, als anfällig erwiesen. Schon nach zehn Betonagen konnten die Schrauben auf den Feingewindestangen⁵⁶, welche am Schalkörper angebracht wurden, schwer gelöst werden, da sie durch den Beton verschmutzt wurden. Den Beanspruchungen haben die Feingewindestangen bedingt standgehalten und haben sich mit der Zeit verbogen. Praktikabel wäre es auf Feingewindestangen zu verzichten und dafür Grob- gewindestangen mit einem größeren Durchmesser zu setzen, da diese weniger anfällig sind.

Das Lösen der Stäbe über den einzelnen Steinen hat sich als sehr zeitaufwendig erwiesen. Schnellspannverschlüsse würden den Zeitaufwand deutlich reduzieren. Generell würde der Einsatz von Schnellspannverschlüssen einen zeitlichen Vorteil geben.

Die flächigen Elemente zeigten eine gute Passgenauigkeit.

13.2 Nachbearbeitung

Bei der Herstellung hat sich gezeigt, dass jeder Stein nachbearbeitet werden musste, da für das Aufstellen der Wände die Verbindungen sonst nicht gepasst hätten. Einfacher wäre es die Schalung dahingehend zu verändern, dass die einzelnen Rohre auf einen Flansch aufgesteckt werden, um somit den Zeitaufwand zu reduzieren.

Die Nachbearbeitung kann bei Einsatz einer robusteren Schalung vermieden werden.

⁵⁶ Gemäß DIN 976-1

13.3 Montage, Demontage, Re-Montage

- Montage

Bei der ersten Steinreihe sollte zusätzlich ein Dichtband eingefügt werden, welches gegen aufsteigende Feuchte absperrt. Beispielsweise ist hierfür eine Moosgummidichtung empfehlenswert. Diese sind wetterfest und bieten eine hohe Verformbarkeit und Flexibilität. Bei der Demontage hatte sich gezeigt, dass in die vorgesehenen Aussparungen von den Steinen, Wasser eingetreten ist und die Gewindebefestigungen bereits nach kürzester Zeit angefangen haben zu korrodieren (s. Bild 291). Vertiefungen in den Platten und anderen Elementen erweisen sich diesbezüglich als nachteilig.



Bild 291. Korrosion der Gewindebefestigungen

Bei der Montage der trocken versetzten Steine ist immer wieder auf ausreichende Standsicherheit zu achten, da wegen der fehlenden Auflast keine Biegebeanspruchungen abgefangen oder exzentrischen Druckkräfte übertragen werden können. Zwischenverschraubungen sind vorzusehen.

- Demontage

Im Bereich des Abbaus gab es kein weiteres Optimierungspotential, da durch die Fa. Ecosoil ein zügiger und problemloser Rückbau stattgefunden hat.

Ein Einfetten der Schraubverbindungen beim Abbau erscheint sinnvoll, um Korrosion zu vermeiden. Schraubhülsen sollten mit Kappen verschlossen werden.

- Re-Montage

Optimierungspotenzial wurde bereits hinsichtlich der Toleranzen der Steine und der Verbindungsstellen und –mittel angesprochen. Vertiefungen in Lagerflächen sollte vermieden werden. Das kann durch Umkehr des Nut- und Feder- bzw. Noppenprinzips erreicht werden.

14 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Forschungsvorhaben RC-WE-Modul wurde die erstmalige Anwendung des modularen massiven Bauens mit RC-Beton zur Verringerung des Verbrauchs an natürlichen Rohstoffen und Materialien erforscht. Im Laufe des Projektes wurden die wesentlichen theoretischen Grundlagen zum Entwurf der RC-Wohneinheit geschaffen und die Anforderungen für demontierbare Gebäude ermittelt.

Parallel dazu ist eine Recherche zum Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (RC-Beton) zur Herstellung von Fertigbetonteilen durchgeführt worden. Betonfertigteile mit rezyklierten Gesteinskörnungen sind bisher weder erprobt noch in der Praxis nachgefragt. Die Verwendung von RC-Beton ist in Deutschland – bis auf einige „Leuchtturmprojekt“ – unbekannt. Um diese Anwendungslücke für den Einsatz von RC-Beton in der Betonfertigteileproduktion zu schließen, sind mehrere Rezepturen nach den aktuell geltenden normativen Vorgaben und Regelwerken entwickelt und geprüft worden. Getestet und eingesetzt wurde – und das ist innovativ – eine rezyklierte Gesteinskörnung 0/8 vom Typ 1. Damit wird der nach Richtlinien ausgenommene Einsatz von Brechsanden ≤ 2 mm zur Herstellung von Konstruktionsbeton begegnet bzw. ein neues Anwendungsfeld für diese Fraktion erschlossen.

Die gesamten Beton-Bauteile wurden aus RC-Beton C30/37 nach einer entwickelten Vorzugsrezeptur hergestellt. Die eingesetzte RC-Gesteinskörnung hat alle Anforderungen hinsichtlich der baustofflichen, bau- und umwelttechnischen Vorgaben erfüllt. Im Herstellungsprozess wurden sämtliche herstellungsbedingten Anforderungen eingehalten. Der RC-Beton hat sich einwandfrei verarbeiten lassen. Nachgewiesen wurde, dass die Qualität des RC-Betons dem Normalbeton in keinem Punkt nachsteht. Es gibt folglich keinen Grund, bau- und umwelttechnisch geprüfte Brechsande nicht zur Herstellung von Beton einzusetzen.

Hinsichtlich der Materialkosten hat es sich gezeigt, dass die RC-Gesteinskörnung 0/8 gegenüber einer natürlichen Gesteinskörnung gleicher Körnungsgröße um mehr als das Doppelte günstiger ist.

Die Substitution von natürlichen Gesteinskörnungen durch RC-Gesteinskörnung 0/8 hat „Win-Win-Effekte“: Einerseits wird die Verfügbarkeit von wertvollen Primärrohstoffen geschont und die Landschaftszerstörung durch Verminderung von Abbaugebieten eingedämmt. Andererseits wird wertvoller Deponieraum nicht in Anspruch genommen. Der Einsatz von RC-Gesteinskörnungen leistet somit einen wichtigen Beitrag zu einer effizienten Kreislaufwirtschaft.

Für die Gewährleistung der Demontierbarkeit wurde ein Gewinde-System in den Bauteilen der RC-Wohneinheit eingebaut. Zur Herstellung der RC-Bauteile wurden speziell Schalungen angefertigt. Diese sollten bei einer Serienmäßigen Anwendung noch robuster gestaltet werden, als es hier im Projekt möglich war, um Toleranzprobleme zu minimieren. Trotzdem muss nach einer Möglichkeit des Toleranzausgleichs in den Schraubverbindungen gesucht werden.

Im Rahmen des Projektes war es möglich, den Rohbau einer modularen demontierbaren RC-Wohneinheit unter Verwendung der bereits entwickelten RC-Beton-Rezeptur zu errichten. Aufgrund der Zeit- und Kosteneinschränkungen ließ sich nur ein erstes kleines RC-Modul errichten. Der gebaute Demonstrator ist als etwa 20 m² großes Anschauungsobjekt für „zwei Bewohner“ vorgesehen.

Bei der Vorplanung der demontierbaren RC-Wohneinheit wurden Vorschläge für die verschiedenen massiven modifizierbaren Bauprinzipien gezeigt (Beispielweise: RC-Wohneinheit in Plattenbauweise/ Mauerwerksbauweise oder zusammengebaut aus Bauteilelementen). Demzufolge wurde entschieden, das RC-Modul aus unterschiedlichen Bauelementen zur Demonstration und Kopplung verschiedener Bauprinzipien zu errichten. Hierbei wurden folgende Bauteile je nach Bauprinzip

gewählt: Eine große RC-Wand zur Realisierung der Plattenbauweise/RC-Wandelemente, RC-Bodenplatten und RC-Deckenplatten fürs Bauen mit Bauteilelementen/ Zwei vorgespannte Wände bestehend aus modularen RC-Betonsteinen und RC-Balken zur Realisierung der Mauerwerksbauweise.

Der tragende Rohbau dieses Demonstrators wurde komplett aus RC-Beton hergestellt. Das Hauptziel war, die Aufbauqualität der RC-Bauteile, deren Herstellung aus der entwickelten RC-Beton-Rezeptur erfolgte, zu prüfen. Zu diesem Zweck wurde die RC-Wohneinheit aus verschiedenen RC-Bauteilen in einer demontierbaren Bauweise entworfen und umgesetzt. In diesem Sinne wurde der Rohbau der RC-Wohneinheit aus RC-Platten, RC-Bauelementen, RC-Betonbalken sowie RC-Betonsteinen aufgebaut. Es konnte damit eine gewisse Vielfalt gezeigt werden, die sowohl von der Gestaltung als auch der wirtschaftlichen Umsetzung interessant ist.

Alle Bauteile des Wohnmoduls erfüllen die Anforderung an der Demontierbarkeit, Rückführbarkeit und die Wiederverwendbarkeit. Für die Gewährleistung der Demontierbarkeit wurde ein Gewindefsystem in den Bauteilen der RC-Wohneinheit vorgesehen. Zur Sicherstellung einer bausicheren Lasteinleitung zwischen den Einzelbauteilen wurde für die RC-Wohneinheit eine statische Berechnung mittels eines 3D-FEM-Programms durchgeführt.

Der Rohbau der RC-Wohneinheit wurde auf dem Gelände der Firma Mattig & Lindner komplett errichtet und später durch die Firma ECOSOIL rückgebaut. Die Montage- (bei Mattig & Lindner) sowie die Re-Montagearbeiten (in Meißen) des Rohbaus beliefen sich auf etwa maximal 9 Stunden. Damit wurde die schnelle Errichtung der RC-Wohneinheit nachgewiesen. Beim Aufbau, Rückbau und Wiederaufbau der RC-Wohneinheit wurden keinerlei Beschädigungen an den RC-Bauteilen sowie an deren Verbindungen aufgenommen. Alle RC-Bauteile haben den angesetzten Qualitätsstandard beim Aufbau der Wohneinheit bewiesen.

Zur Prüfung der Stabilität des Rohbaus der RC-Wohneinheit wurde im Anschluss der ersten Montage ein Belastungstest in situ (auf dem Gelände der Firma M&L) durchgeführt. Mit dem Belastungstest wurden Geschosslasten appliziert. Die aufgezeigten Verformungen lagen deutlich unter den zugelassenen Verformungen im Stahlbetonbau. Somit wurde die Eignung des Rohbaus zur Übertragung der Geschosslasten erfolgreich geprüft.

Im Zuge des Ausbaus wurden speziell angefertigte Fassadenplatten von außen an den Rohbau tastweise angebracht. Die Befestigung erfolgte mittels der in die RC-Bauteile einbetonierten Hülseanker und ist somit demontierbar. Der erste Entwurf des Ausbaus wurde von der Firma mCon beigesteuert.

Als Hauptergebnis des Forschungsvorhabens lässt die Errichtung des demontierbaren Demonstrators eine positive Aussage über die Nutzbarkeit des Einsatzes des RC-Betons zur Bereitstellung demontierbarer, temporärer Bauten zu. Durch Anwendung des RC-Betons sind die im Rahmen des Forschungsvorhabens angestrebten Umweltvorteile sowie die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Ziele erfüllt worden.

Mit der am Ende noch durchgeführten Re-Montage konnte die Mehrfachverwendung demonstriert und erfolgreich realisiert werden. Die Einheit steht als Demonstrator für weitere Lehr- und Forschungszwecke zur Verfügung.

Das Forschungsvorhaben markiert einen Meilenstein auf dem Weg zu vollständig rückbaubaren Gebäuden der Zukunft.

15 Normenverzeichnis

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

DIN 1045-2: 2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

DIN EN 206: 2017-01 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016

DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009

DIN EN 12350-6:2011-03 Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:2009

DIN EN 12390-3 Berichtigung 1: 2011-11 Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009, Berichtigung zu DIN EN 12390-3:2009-07; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009/AC:2011

DIN EN 12390-7: 2009-07 Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton; Deutsche Fassung EN 12390-7:2009

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

DIN 976-1:2016-09 Mechanische Verbindungselemente – Gewindebolzen – Teil 1: Metrisches Gewinde

DIN EN 1097-6: 2013-09 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2013

DIN EN ISO 14040:2009-11 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006

Merkblätter und Richtlinien:

Zement-Merkblatt Betontechnik, B 4 3.2013 – Frischbeton Eigenschaften und Prüfungen

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

DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ (Alkali-Richtlinie)

16 Quellen

- [1] Abschlussbericht zum Forschungsprojekt REMOMAB (Entwicklung von Grundprinzipien für vollrezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis) vom 22.2.2013. Forschungsprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung/ Institut für Leichtbau, Entwurf und Konstruktion der Universität Stuttgart/ Werner Sobek Green Technology Stuttgart.
- [2] Entwicklung eines großformatigen Betonsteins unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen sowie Brech- und Schneidsanden, [Mettke, A.; Schmidt, S.] Auftraggeber BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (AIF/ZIM KF 3039901K12), Laufzeit 11/2012 – 01/2015.
- [3] Fachliche Beratung und Unterstützung für ein Pilotprojekt zum Einsatz von RC-Gesteinskörnungen zur Herstellung von Konstruktionsbeton am konkreten Bauvorhaben: Forschungs- und Laborgebäude für Lebenswissenschaften in Berlin-Mitte, [Mettke, A.] im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin, Laufzeit 09/2012 – 03/2013 sowie 09/2013 – 12/2013.
- [4] Hegner, Hans-Dieter: Nachhaltiges Bauen in Deutschland – Bewertungssystem des Bundes für Büro- und Verwaltungsbauten. In Stahlbau. Ernst & Sohn, Ausgabe 6, 2010, S. 408.
- [5] DIN 4226-100:2002-02: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. Produkt Bild - DIN 4226-100.
- [6] DIN EN 933-1:2012-03: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012
- [7] DIN EN 1097-6:2013-09: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Deutsche Fassung EN 1097-6:2013
- [8] DIN EN 933-4:2015-01: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl; Deutsche Fassung EN 933-4:2008
- [9] DIN EN 12620:2008-0: Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008
- [10] DIN EN 1367-1:2007-06: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel; Deutsche Fassung EN 1367-1:2007
- [11] DIN EN 1744-1:2013-03: Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Chemische Analyse; Deutsche Fassung EN 1744-1:2009+A1:2012
- [12] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton, Teil 3: Gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnungen. Ausgabe 2007.
- [13] DIN 52170-4:1980-02: Bestimmung der Zusammensetzung von erhärtetem Beton; Salzsäurelöslicher und/oder -unlöslicher Zuschlag, Ausgangsstoffe vollständig oder teilweise verfügbar.
- [14] DIN EN 206:2014-07: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013.
- [15] DIN 1045-2:2014-08 - Entwurf: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206

- [16] DIN EN 12350-6:2011: Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohndichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:2009
- [17] DIN EN 12350-5:2009-08: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:2009
- [18] DIN EN 12350-7:2009-08: Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2009
- [19] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009
- [20] DIN EN 12390-7:2009-07: Prüfung von Festbeton - Teil 7: Dichte von Festbeton; Deutsche Fassung EN 12390-7:2009
- [21] DIN EN 12390-8:2009-07: Prüfung von Festbeton - Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck; Deutsche Fassung EN 12390-8:2009
- [22] DIN EN 12390-2:2009-08: Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009
- [23] Deplazes, A.: Architektur Konstruieren: Vom Rohmaterial zum Bauwerk. Ein Handbuch. 3. erweiterte Auflage, Birkhäuser Basel, Boston, Berlin 2008.
- [24] Schultze, L.: Arbeitsmaterial zur Vorlesung Produktentwicklung, TU Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design
- [25] www.fgt.ieb.kit.edu/downloads/EB-Einfuehrung_WS_2011_12.pdf, Stand 12.01.2012
- [26] Goris, A.; Heisel J.P.: Schneider Bautabellen für Architekten, 19. (2010) Auflage, Werner Verlag
- [27] Staib, G.; Dörrhöfer, A.; Rosenthal, M.: Elemente und Systeme. Basel: Birkhäuser, 2008.
- [28] www.atkingroup.co.uk/atkin_trade_specialists/steel_framing.html, Stand 12.01.2012
- [29] Rickenstorff, G.; Berndt, E.: Tragwerke für Hochbauten, Dritte, überarbeitete Auflage, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1998
- [30] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.: Die neue Bauprodukte-Verordnung. Hinweise für Baustoffhersteller, http://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/bauprodukteverordnung.pdf
- [31] Dageförde, Angela; Meetz, Michael; Mettke, Angelika: Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Abbruchabfällen, Leitfaden „Ausschreibungen“, i.A. des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, 2017, S. 10 [Download unter: <http://www.mlul.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.3310.de/Bauabfall-Leitfaden-Ausschreibungen.pdf>]
- [32] Bauproduktenverordnung (BauPVO): Verordnung (EU) Nr.305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 09. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates, ABI. EU L 88/5 ff., Anhang I, Grundanforderungen an Bauwerke, unter 7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen.
- [33] Dageförde, Angela; Meetz, Michael; Mettke, Angelika: Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Abbruchabfällen, Leitfaden „Ausschreibungen“, i.A. des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, 2017, S. 27

- [34] Brandenburgisches Abfall- und Bodenschutzgesetz (BbgAbfBodG) vom 6.6.1997 (GVBl. I/97, (Nr. 05), S. 40, zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 7 des Gesetzes vom 25.1.2016 (GVBl. I/16, (Nr. 5).
- [35] Dageförde, Angela; Meetz, Michael; Mettke, Angelika: Steigerung der Ressourceneffizienz des Recyclings von mineralischen Abbruchabfällen, Leitfaden „Ausschreibungen“, i.A. des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Landwirtschaft des Landes Brandenburg, 2017, S. 10 ff.
- [36] DIN EN 206:2017-01 „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“, S. 7
- [37] Vgl. DIN EN 206:2017-01 „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“, Tabelle 1, S. 22
- [38] DIN EN 206:2017-01 „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“, Anhang E.3, Tabelle E.2, S. 82
- [39] Vgl. DIN EN 206-1:2001-07 „Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“, S. 23
- [40] Auszug aus DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010, Abschnitt 4 und 5
- [41] DAfStb Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Ausgabe 2010-09, Punkt 6
- [42] DIN EN 12620:2008-07 „Gesteinskörnung für Beton“, S. 7
- [43] Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung Land Brandenburg. Rundschreiben betreffend den bauaufsichtlichen Vollzug bei der Verwendung harmonisierter Bauprodukte nach der Verordnung (EU) Nr. 305/2011 seit dem 16.10.2016. Potsdam. 27.10.2016
- [44] Vgl. DIN 4226-100 Anhang G
- [45] Vgl. Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20 – Anforderung an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln, Stand 6. November 2003, S. 78 f.
- [46] Die Novelle der Gewerbeabfallverordnung regelt die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bauabfällen in dergestalt, dass diese getrennt nach Stoffen zu erfassen sind in Vorbereitung ihrer Wiederverwendung und der Aufbereitung in RC-Anlagen.
- [47] Vgl. G. Neroth; D. Vollenschaar (2011): Wendehorst Baustoffkunde „Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz“; S. 157 ff.; Scholz, Yvonne: Dauerhaftigkeit von Beton – Wirkungsweisen von Betonzusatzstoffen zur Vermeidung einer AKR, Diss. 2016, BTU C-S, S. 3
- [48] Vgl. S. Röhling, H. Eifert, M. Jablinski (2012): Betonbau „Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit – Frischbeton“; S. 65 ff.
- [49] Vgl. G. Neroth; D. Vollenschaar (2011): Wendehorst Baustoffkunde „Grundlagen – Baustoffe – Oberflächenschutz“; S. 157 ff.
- [50] Nach DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“
- [51] Mettke, A.: Material- und Produktrecycling – am Beispiel von Plattenbauten, Habilitationsschrift, BTU Cottbus, 2010, S. 288 ff.

- [52] Österreichischer Baustoff Verband: „Rezykliertes gebrochenes Mischgranulat aus Asphalt, Beton und natürlichen Gesteinskörnungen“; www.sbr.at; 07.06.2010
- [53] IFEU Institut Heidelberg, BTU Cottbus Fachgruppe Bauliches Recycling: „Einsatz von RC-Material aus mineralischen Baustoffen als Zuschlag in der Betonherstellung am Beispiel einer Wohnbebauung an der Rheinallee in Ludwigshafen“, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU, AZ: 26101-23), in Kooperation mit TBS Mannheim, Scherer & Kohl Ludwigshafen, 2009 – 2011; Teilberichte Fachgruppe Bauliches Recycling:
- Mettke, A.; Heyn, S.: Untersuchungsergebnisse zu den Eigenschaften der entwickelten RC-Betonrezepturen, 30.11.2009.
 - Mettke, A.; Heyn, S.: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), 27.08.2010.
- [54] Peter, Norbert (2000): Lexikon der Bautechnik. 10.000 Begriffsbestimmungen, Erläuterungen und Abkürzungen, S. 310
- [55] Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II, BMUB, Nov. 2016, S. 65f.
- [56] Vgl. Becke, A.; Hierlein, E.: Nachhaltiges Bauen mit Betonfertigteilen. aus: Begleitende Informationen z Podium 3 – Konstruktiver Fertigteilbau 1 – 58. BetonTage am 18.02.2014
- [57] Nationaler Anhang –National festgelegte Parameter –Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
- [58] DIN EN 1991-1-3/NA: Nationaler Anhang –National festgelegte Parameter –Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten
- [59] DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen -Windlasten, Ausgabe 2010-12
- [60] DIN EN 1990:2010-12: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Ausgabe 2010-12
- [61] Schneider, Bautabellen für Ingenieure, 19. Auflage, Wernerverlag, Siegen ,2010
- [62] <https://schraube-mutter.de/gewindestangen/>, Stand 02.06.2017.
- [63] Fermacell focus Energetische Modernisierung, Stand Juli 2014.
- [64] EnEV2014: Energieeinsparverordnung 2014.
- [65] <https://www.u-wert.net/u-wert-rechner/index.php>, Stand Juni 2017.
- [66] Mauerisolierfolien und Dichtungsbahnen ThyssenKrupp Plastics, „ThyssenKrupp Plastics,“ Thyssen Krupp, [Online]. Available: www.thyssenkrupp-plastics.de/fileadmin/inhalte/03_Produnkte/00_NEU_Ablage_Bilder_Medien/Zwischenseiten/BBaufolie/PI_5501_Produnktinformation_Mauerisolierfolien_und_Dichtungsbahnen.pdf. [Zugriff am 29.06.2017].
- [67] T. Wegner, „Doyma GmbH & Co,“ [Online]. Available: www.fhrk.de/grundlagen; „Grundlagen für nachhaltige und fachgerechte Gebäudedurchdringungen für Versorgungsleitungen“; Hrsg. FHRK. [Zugriff am 29.06.2017].
- [68] DIN 18195-4: Bauwerksabdichtungen- Abdichtungen gegen Bodenfeuchte (Kapillarwasser, Haftwasser) und nichtstauendes Sickerwasser an Bodenplatten und Wänden, Bemessung und Ausführung, 2011
- [69] DIN 18195-10: Bauwerksabdichtungen-Schutzschichten und Schutzmaßnahmen, 2011

- [70] DIN 18195-9: Bauwerksabdichtungen- Durchdringungen, Übergänge, An- und Abschlüsse, 2011
- [71] ThyssenKrupp Plastics, „Dampfbremssfolien ThyssenKrupp Plastics,“ [Online]. Available: www.thyssenkruppplastics.de/fileadmin/inhalte/03_Produnkte/00_NEU_Ablage_Bilder_Medien/Eigenmarken/OwOwol_Dampfbremssfolie/PI_5502_Produnktinformation_OWOLEN_Dampfbremssfolien_und_ZubZubeh.pdf. [Zugriff am 29 06 2017]
- [72] DIN 4108-7:2011-01: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 7: Luftdichtheit von Gebäuden - Anforderungen, Planungs- und Ausführungsempfehlungen sowie -beispiele
- [73] DIN 18807-2: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Durchführung und Auswertung von Tragfähigkeitsversuchen, 2001
- [74] Hoesch GmbH, [Online]. Available: www.hoesch-bau.com/dach/einschalig/hoeschR-trapezprofil.html. [Zugriff am 29 06 2017].
- [75] HALFEN GmbH, [Online]. Available: www.downloads.halfen.com/catalogues/de/media/catalogues/fixingsystems/DEMU-FIX_16.pdf. [Zugriff am 09 05 2017].
- [76] Lindab GmbH, „<http://www.lindab.com>,“ [Online] Available: <http://www.lindab.com/de/Documents/Building%20Components%20Global/DE%20RL%20Tek.pdf>. [Zugriff am 20 06 2017].
- [77] GmbH & Co. KG, „www.rockwool.de,“ [Online]. Available: <http://static.rockwool.com/globalassets/rockwool-de/downloads/datenblaetter-aussenwand-vhf/db-fixrock-035-rockwool.pdf>. [Zugriff am 17 07 2017].
- [78] GmbH & Co. KG, „www.rockwool.de“ [Online]. Available: <http://static.rockwool.com/globalassets/rockwool-de/downloads/broschueren-wand/br-daemmung-in-der-vorgehaengten-hinterluefteten-fassade-rockwool.pdf>. [Zugriff am 17 07 2017].
- [79] Resopal GmbH, „www.resopal.de,“ [Online]. Available: http://static.wilsonart.com.cdnga.net/sites/resopal/files/docs/resources/resopal_facade_verarbeitungshinweise.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].
- [80] Trespa Deutschland GmbH, „<http://www.trespa.com>,“ [Online]. Available: http://www.trespa.com/sites/trespa.com/files/G2405_Trespa_Meteor_022017-ilovepdf-compressed.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].
- [81] Eternit GmbH, „<http://www.eternit.de>,“ [Online]. Available: http://www.eternit.de/downloads/downloads/dl/file/id/1136/eternit_planung_anwendung_fassadentafel_equitone_02_2017.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].
- [82] Sto SE & Co. KGaA, „www.sto.de,“ [Online]. Available: http://www.sto.de/media/documents/download_broschuere/kategorie_fassade/09661-312de_UK-Broschuere_final_02_02-13_72dpi.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].
- [83] Systea Pohl GmbH, „<http://systea.systems/>,“ [Online]. Available: http://systea.systems/fileadmin/systea/downloads/161115_SYSTEA_Lieferuebersicht_RZ_WEB.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].
- [84] Hilti Deutschland AG, „www.hilti.de/,“ [Online]. Available: https://www.hilti.de/content/dam/documents/pdf/e3/mo-de/engineering/VHF_-_Produkt-_und_Serviceubersicht_Technische_Information_ASSET_DOC_LOC_7621187.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].

- [85] DIN 18516-1: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet - Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze, 2010
- [86] fischerwerke GmbH & Co. KG, „[www.fischer.de,](https://content.ugfischer.com/cbfiles/fischer/verkaufsunterlagen/vku_fazii_f_%23sde_%23aip_%23v2.pdf)“ [Online]. Available: https://content.ugfischer.com/cbfiles/fischer/verkaufsunterlagen/vku_fazii_f_%23sde_%23aip_%23v2.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].
- [87] ANCOTECH AG, „[http://ch.ancotech.com,](http://ch.ancotech.com)“ [Online]. Available: <http://ch.ancotech.com/wp-content/uploads/sites/8/2017-MKT.pdf>. [Zugriff am 17 07 2017].
- [88] VVG-Befestigungstechnik GmbH & Co, „[https://www.vvg.info/,](https://www.vvg.info/)“ [Online]. Available: https://www.vvg.info/fileadmin/user_upload/product_extension/datenblaetter/blindnietmutter_hexatop-e-klsk-g_serie10805.pdf. [Zugriff am 17 07 2017].
- [89] Schraubenhandel Machholz GmbH, „[www.schraubenhandel24.de,](http://www.schraubenhandel24.de)“ [Online]. Available: <https://www.schraubenhandel24.de/iso-7380-flachrundkopfschrauben-form-mf-edelstahl-a4-m6x30-200st/>. [Zugriff am 17 07 2017].
- [90] DIN 1055-4: Einwirkung auf Tragwerke- Teil 4: Windlasten, 2005
- [91] DIN 18055: Kriterien für die Anwendung von Fenstern und Außentüren nach DIN EN 14351-1, 2014
- [92] i. R. GmbH, „ift-Richtlinie FE-05/2, Richtlinie zur Ermittlung der Mindestklassifizierungen in Abhängigkeit der Beanspruchung“.
- [93] J. Küenzlen und E. Scheller, „Bemessen, Bewehren, Befestigen,“ Ernst & Sohn, Berlin, Mauerwerk-Kalender 2014, Hrsg. von Wolfram Jäger.
- [94] RAL-Gütegemeinschaft Fenster und Haustüren e.V, „Leitfaden zur Planung und Ausführung der Montage von Fenstern und Haustüren,“ Frankfurt am Main, 2010.
- [95] tremco illbruck Group GmbH, [Online]. Available: http://www.illbruck.com/de_DE/produkte/produktfinder/product/tp021-illmod-duo-rk/. [Zugriff am 19 07 2017].
- [96] http://www.bosig.de/images/stories/downloads/fasatan/de/Fasatan_Fasatyl_Broschuere.pdf, „[www.bosig.de,](http://www.bosig.de)“ [Online]. Available: http://www.bosig.de/images/stories/downloads/fasatan/de/Fasatan_Fasatyl_Broschuere.pdf. [Zugriff am 19 07 2017].
- [97] LUDWIG Kunststoffe GmbH, „Schutzvliesstoffe,“ www.geotextilien.net/hp490/Schutzvliesstoffe.htm?ITServ=C30d59982X15d03b648b7XY6e42, 02.07.2017.
- [98] BAUHAUS E-Business GmbH & Co. KG, „[https://www.logoclic.info,](https://www.logoclic.info/)“ [Online]. Available: <https://www.logoclic.info/de/laminatboden-vinto-242>. [Zugriff am 19 07 2017].
- [99] U. W. U. H. L. R. Dietrich Neumann, Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1, Wiesbaden: Teubner Verlag, 2006.
- [100] Faay Vianen B.V., „[https://www.faay.de,](https://www.faay.de)“ [Online]. Available: <https://www.faay.de/dateien/Brochures/faay-02-de.pdf>. [Zugriff am 19 07 2017].
- [101] Goldbach Kirchner raumconcepte GmbH, „[http://www.goldbachkirchner.de,](http://www.goldbachkirchner.de)“ [Online]. Available: http://www.goldbachkirchner.de/fileadmin/Bilder/Produkte/2016_06/Produktbeschreibung_T10_06-2016.pdf. [Zugriff am 19 07 2017].
- [102] Lehnert GmbH, „[https://www.lehnert-buerowelten.de/,](https://www.lehnert-buerowelten.de/)“ [Online]. Available: <https://www.lehnert-buerowelten.de/planungstools/download-prospekte>. [Zugriff am 19 07 2017].

- [103] Keisinger Ausbau GmbH, „<http://www.keisinger.de/>,“ [Online]. [Zugriff am 19 07 2017].
- [104] WERZALIT Vertriebs-GmbH, „<https://www.werzalit.com/>,“ [Online]. Available: https://werzalit.com/img/downloads/dat/produkte/fensterbank/MA_Fensterbank_DE.pdf. [Zugriff am 19 07 2017].
- [105] Odenwald Faserplattenwerk GmbH, „<http://www.owa.de/>,“ [Online]. Available: <http://www.owa.de/de/produkte/owaconstruct-systeme/sichtbare-systeme/s-3/>. [Zugriff am 19 07 2017].
- [106] Knauf Gips KG, „<https://www.knauf.de/>,“ [Online]. Available: https://www.knauf.de/profi/sortiment/produkte/knauf-danoline-plaza.html#showtab-tab_3844_4. [Zugriff am 20 07 2017].
- [107] Nagelstutz und Eichler GmbH & Co. KG, „<http://www.ne-paneeldecken.de/>,“ [Online]. Available: <http://www.ne-paneeldecken.de/wp/systemuberblick/>. [Zugriff am 20 07 2017].
- [108] Fenix Group a.s., „<http://www.fenix.sk/>,“ [Online]. Available: <http://www.fenix.sk/sites/default/files/n163.pdf>. [Zugriff am 20 07 2017].
- [109] Marley Deutschland GmbH, „<http://www.marley.de/>,“ [Online]. Available: http://www.marley.de/fileadmin/redaktion_de/service/prospekte/Prospekt_DreMa.pdf. [Zugriff am 20 07 2017].
- [110] Bosch Thermotechnik GmbH, „<https://www.junkers.com/>,“ [Online]. Available: https://junkers-de.resource.bosch.com/media/de_nj/fachkunde/05_dokumentation/02_broschueren_und_flyer/02_broschueren/01_gesamtbroschueren_1/pr14949_--_junkers_--_broschuere_--_heizwert_--_rz~1.pdf. [Zugriff am 20 07 2017].
- [111] Dipl.-Ing. Michael Wigge, „<http://www.varis-fertigbad.de/>,“ [Online]. Available: http://www.varis-fertigbad.de/fileadmin/user_upload/varis/Dokumente/1220000_120919_Grundriss_18040_1_R.pdf. [Zugriff am 20 07 2017].
- [112] Hautmann, Daniel: Beton aus Wüstensand soll die Welt verändern. vom 10.08.2017. in: <https://www.tagesanzeiger.ch/wissen/technik/Beton-aus-Wuestensand-soll-die-Welt-veraendern/story/11392560>, Zugriff am: 30.04.2018.
- [113] Hautmann, Daniel: Beton aus Wüstensand soll die Welt verändern. Gerhard Dust und Gunther Plötner erstellen Unterkünfte aus einem Material, das gemeinhin als unbrauchbar gilt: Wüstensand. Daraus fertigen sie stapelbare Steine – wie bei Lego. vom 10.08.2017. in: <https://www.tagesanzeiger.ch/wissen/technik/aus-sand-gebaut/story/11392560>, Zugriff am 12.05.2018.
- [114] Stoller, Detlef: Dieses Haus besteht aus Lego-Steinen aus Wüstensand. vom 16.11.2016. in: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/umwelt/dieses-haus-lego-steinen-wuestensand/>, Zugriff am 30.04.2018.
- [115] Becker, Nicole: Ressourcenschonung durch Beton mit Recyclinggesteinskörnungen. in: VDI Zentrum für Ressourceneffizienz GmbH (2013) Nr. 2, S. 12-15.
- [116] Brugger, Veronika: Kreislauf aus Beton. vom 29.04.2015. in: <http://dabonline.de/2015/04/29/kreislauf-aus-beton-recycling-greenbuilding-hochbau-wiederverwertung-recyclingbeton-r-beton-energieeffizienz-nachhaltigkeit/>, Zugriff am 05.05.2018.

- [117] Häuser aus Recyclingbeton schonen die Umwelt. in: [W] wie Wissen. (Fernsehsendung), ARD, Samstag, 26.08.2017, 16.00 (6:08). in: <http://www.daserste.de/information/wissen-kultur/w-wie-wissen/videos/recyclingbeton-video-100.html>.
- [118] Mettke, Angelika: Leuchtturmprojekt aus Recyclingbeton. Wissenschaftler begleiten den Hochbau in Ludwigshafen und untersuchten den Einsatz von RC-Beton – mit erstaunlichen Ergebnissen. in: RECYCLING magazin (2010) Nr. 4, S. 26-29.
- [119] Jäger, W.; Youssef, H.; Kroll, S.: Bereitstellung einer komplett demontierbaren Wohneinheit aus recyclingbeton (RC-WE-Modul). Wissenschaftliche Arbeit im Rahmen des Forschungsvorhabens, 2018.
- [120] DIN EN 206-1:2000 - Kapitel 4.2.1, S. 20, Konsistenzklassen Tabelle 6 – Ausbreitmaßklassen
- [121] Zement-Merkblatt Betontechnik, B 4 3.2013, Frischbeton , Eigenschaften und Prüfungen, Pkt. 7
- [122] AKR-Richtlinie (kurz AKR-Rili) „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“, Ausgabe 2013
- [123] AKR-Rili „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“, S. 40, Tab. 3-3
- [124] DIN EN ISO 14040:2009-11 „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung“, S. 7
- [125] MLUL: Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden, S. 8 f.
- [126] Mettke A., Schmidt S., Jacob S.: Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ – Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton, Berlin, 2015. S. 37 ff.
- [127] Mettke A., Schmidt S., Jacob S.: Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ – Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton, Berlin, 2015. S. 43.
- [128] Eyer, P., Reinhardt, H.-W.: Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zur ganzheitlichen Bilanzierung, Birkhäuser Basel, 2000. S. 56
- [129] Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs im Güterverkehr, Umweltbundesamt, Daten und Rechenmodell TREMOD, Version 5.81 (08/2018), unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/endenergieverbrauch-energieeffizienz-des-verkehrs#textpart-5>, zuletzt aufgerufen am 13.12.2018
- [130] ProBas, Xtra-AbbauKies-DE-2020 : <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id={805A535E-0242-4306-8B6C-A6BBEC27101E}> aufgerufen am 28.11.2018
- [131] Digitale Datenbank vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Stand 27.11.2017
- [132] ÖKOBAUDAT (Datensatz Sand 0/2): https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=61655387-edd4-4800-ba3e-67bc15f2f096&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 27.11.2018
- [133] ÖKOBAUDAT (Datensatz Kies 2/32): https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3ce61a4e-4d91-4b1d-b675-276be05b9225&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 27.11.2018
- [134] ÖKOBAUDAT (Datensatz Durchschnittlicher Zement): https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d2e01b0a-bfdf-412a-996e-20d592df0d5f&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 27.11.2018

- [135] ÖKOBAUDAT (Datensatz Steinkohleflugasche):
https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 27.11.2018
- [136] ÖKOBAUDAT (Datensatz Durchschnittlicher Zement):
https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d2e01b0a-bfdf-412a-996e-20d592df0d5f&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 27.11.2018
- [137] ÖKOBAUDAT (Datensatz Steinkohleflugasche):
https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=a8640bfd-5ae3-4893-bfe8-d5ab59ec8134&stock=OBD_2017_I&lang=de aufgerufen am 27.11.2018
- [138] Mettke, A.; Schmidt, S.; Jacob, S.: Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin Mitte, 2015
- [139] Mettke, A.; Heyn, S.: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), 2010, S. 70

17 Anlagen

17.1 Datenblätter Folien und Dichtungsbahnen

Datenblatt OWOLEN

OWOLEN® Dampfbremsfolien und Zubehör

OWOLEN® DB-PE

PRODUKTINFORMATION

Anwendungen

- Dampfbremse

Vorteile

- Normgerecht und sicher, entsprechen den Richtlinien der Wärmeschutzverordnung
- Flammhemmend B2; gemäß DIN 4102
- Langjährig bewährt, langanhaltenden Schutz der Dachdämmung vor Umwelteinflüssen
- Sehr guter sd-Wert

Technische Daten

- Material: Polyethylen (PE)
- Farbe: blau
- Dicke: 0,2, 0,25 oder 0,4 mm (± 5 %), andere Dicken auf Anfrage
- Wasserdampfdurchlässigkeit: sd ≥ 150 m
- Reißfestigkeit (gemäß DIN 53455): längs ≥ 17 N/mm² (250 % Dehnung), quer ≥ 16 N/mm² (400% Dehnung)
- Brandverhalten: B2 gemäß DIN 4102, normal entflammbar
- Temperaturbeständigkeit: -20°C bis +70°C
- Rollenformat: 4,0 x 25 m
- Rollengewicht: ca. 22,30 kg

Zubehör

	OWOCRAL® Klebeband	OWOSAN® Universalklebeband	OWOLEN® Klebeband	Dichtungsband VR SK	Folienkleber
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Spezialpapier-Klebeband • Zum luftdichten Überkleben von Überlappungen bei OWOLEN® Dampfbremsen 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyethylen-Klebeband mit Polyamid-fadengelege • Zum luftdichten Überkleben von OWOLEN® Dampfbremsen bei Überlappungen und an Durchdringungen • Zur Reparatur kleiner Risse 	<ul style="list-style-type: none"> • Butyl-Kautschuk Dicht- und Klebeband • Luftdichte Überklebung von OWOLEN Dampfbremsfolie bei waagerechten oder senkrechten Folienüberlappungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Acrylatharz imprägniertes Schaumstoffdichtungsband • Normgerechte Herstellung von luftdichten Anschlüssen gem. DIN 18055 mit OWOLEN® Dampfbremsfolie • Vorkomprimiert auf 1/5 der Dicke • Imprägniert • Einseitig selbstklebend 	<ul style="list-style-type: none"> • Lösemittelfreier Kleber • Luftdichtes Überkleben von OWOLEN® Dampfbremsen auf Mauerwerk, Beton, Putz, Holz und Metall
Verarbeitungstemperatur	Ab -10 °C		> 4 °C	Ab +5 °C	
Temperaturbeständigkeit	-40 °C bis +100 °C		-40 °C bis +90 °C	-70 °C bis +100 °C	-25 °C bis +80 °C
Lagerungsbeständigkeit	ca. 18 Monate		ca. 12 Monate	ca. 12 Monate	ca. 12 Monate
Gesamtdicke	0,34 mm	0,3 mm	1,5 mm	20 mm	–
Klebekraft	≥ 30 N / 25 mm		–	–	–
Reisskraft	≥ 200 N / 25 mm	≥ 50 N / 25 mm	–	–	–
Klebstofftyp	Reinacrylat	Reinpolyacrylat	Butyl-Kautschuk	–	Frei von Lösungsmitteln
Rollenformat	60 mm x 40 m	60 mm x 25 m	15 mm x 30 m	20 mm x 6 m	–

Hinweis: Eine Haftung auf Grundlage der Aussagen dieses Datenblatts ist, sofern nicht zwingende gesetzliche Haftungsbestände greifen, ausdrücklich ausgeschlossen. Alle Angaben nach bester Prüfung, jedoch ohne Gewähr. Technische Änderungen vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Herausgebers.
Bitte stimmen Sie die Verfügbarkeit bzw. Lieferzeit der gewünschten Produkte mit der für Sie zuständigen Niederlassung ab.

Datenblatt Mauerisolierfolien und Dichtungsbahnen

Mauerisolierfolien und Dichtungsbahnen
PRODUKTINFORMATION

OWOLUX® PVC Dichtungsfolie

Anwendungen

- Bodenisolierung

Vorteile

- Einfaches verschweißen: Nicht bitumenverträgliche PVC-Weichbahnen können mit Quellschweißmittel verschweißt werden
- Eignung beim Fügen: Die Bahn lässt sich durch Quellschweißen (gebräuchliche Füge-technik), Warmgas- oder Heizkeilschweißen (siehe DIN 1910 Teil 3) wasserdicht fügen
- Brandsicherheit, gemäß DIN 4102 normal entflammbar B2
- OWOLUX® Dichtungsbahnen mit einer Dicke von 1,2 mm entsprechen der DIN EN 13967 und DIN V 20000-202 und sind somit für Abdichtungen nach DIN 18195 geeignet
- Ohne Farbzusatz, gemäß DIN 16938 nicht schwarz eingefärbt
- System-Zubehör: Außen- und Innenecken für optimalen Schutz gegen Feuchtigkeit

Technische Daten

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ Material: Weich-PVC ■ Farbe: anthrazit ■ Dicke: 0,3, 0,5, 0,8, 1,0 oder 1,2 mm nach DIN EN 1849-2 ■ Rollenbreite: 1,5 oder 1,8 m ■ Rollenlänge: bis 0,5 mm Dicke: 30 m / ab 0,8 mm Dicke: 20 m | <ul style="list-style-type: none"> ■ Zertifikate: PVC 1,2 mm nach DIN V 20000-202 CE-zertifiziert, nach DIN EN 14909 für Mauerisolierfolie und CE-zertifiziert nach DIN EN 13967 für Dichtungsfolie. Geeignet für Abdichtungen nach DIN 18195 ■ Leistungserklärung nach BauPVO unter www.thyssenkrupp-plastics.de/downloads |
|--|---|

17.2 mCon Systemlösung RC-WE-Modul



Suche Los

Kontakt
Daten
löschen
Impressum
Datenschutz
AGB

Unternehmen VHFplus Dialog Aktuelles



Systematik
Baukasten
Lieferprogramme
Referenzen

Die andere Unterkonstruktion für hinterlüftete Fassaden

Die, in den 70er Jahren für geringe Dämmdicken, entwickelten Fassaden-Unterkonstruktionen aus Aluminium weisen erhebliche Wärmebrücken auf. Sie entsprechen nicht mehr den aktuellen energetischen Forderungen. Die EnEV 2009/ 2013 sowie der Passivhausstandard erfordern Fassaden-Dämmdicken von 140 bis > 300 mm bei minimierten Wärmebrücken.

Stetig steigende Primärenergiekosten (Öl, Gas etc.) haben zur Folge, dass das Thema Energie-Effizienz beim Planen, Bauen und Sanieren in den Mittelpunkt rückt. Laut Expertenmeinung kommt dem Thema „qualifizierte Dämmung“ dabei eine zentrale Rolle zu.

Die VHFplus Fassaden-Systematik wird diesem aktuellen Thema erstmalig in vollem Umfang gerecht. Durch konsequente Vermeidung von Wärmebrücken und großdimensionierte Dämmung lassen sich nachhaltig nennenswerte Energieeinsparungen erzielen.

Nicht nur die Wärmebrückenfrei-Zertifizierung beim Passivhaus Institut Dr. Feist in Darmstadt, auch die Kostenoptimierung über wenige industriell hergestellte Kombinationselemente, sowie die einfache Planung und Montage der dreidimensionalen UK-Netze dokumentieren den zukunftsweisenden mCon Fassaden-Standard und den neuen VHFplus Qualitätsanspruch bei Neubau- und Sanierung aller Gebäudearten und Gebäudegrößen.

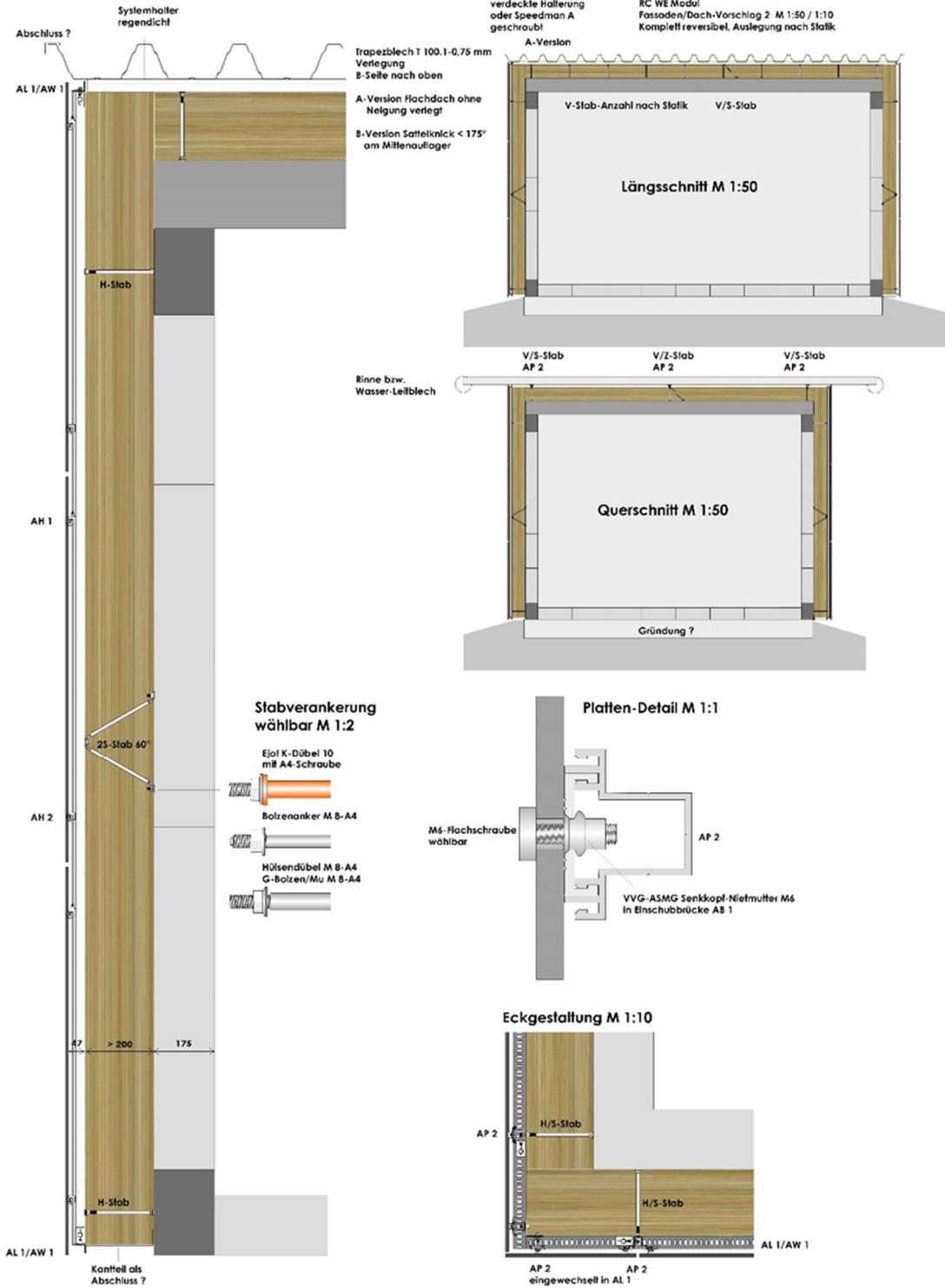
Individuelles Gestalten durch den Architekten mit verblüffend einfachen Details bekommt eine neue Bedeutung. Die Langlebigkeit und Vielseitigkeit der Fassaden ist werthaltig und bezahlbar und am Ende der Lebensdauer können alle VHFplus-Teile beinahe zu 100 % getrennt und damit in die Stoffkreisläufe zurückgeführt werden.

Dem Fassadenmarkt wird mit VHFplus insgesamt eine vielgestaltige und rationelle Alternative zu den üblichen VHF- und den WDV-Fassadensystemen geboten.

Quelle: <https://www.mconag.com/vhfplus.html>

mCon[®]

modular Construction GmbH Programm Projekt Planung Produktion Marketing Stand 14.7.2017



mCon GmbH D 57258 Freudenberg, In der Schläde 1 fon 02734 20672 fax 02734 47434 www.mconog.com mcon@mconog.com

mCon®

modular Construction GmbH

Programm Projekt

Planung

Produktion

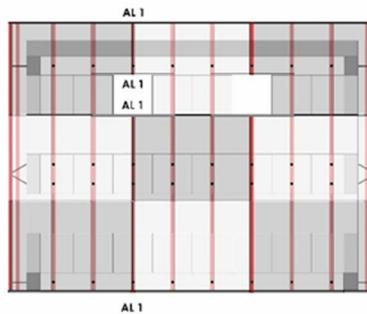
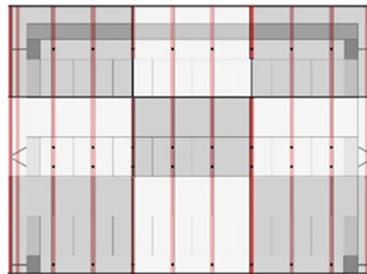
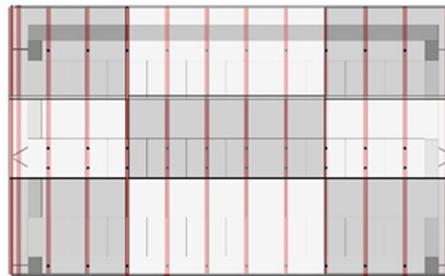
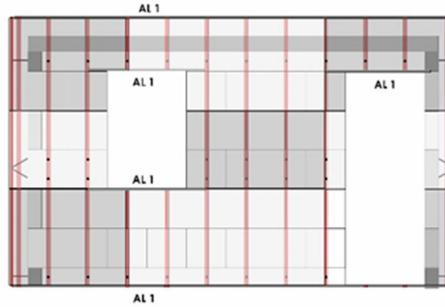
Marketing

Stand 14.7.2017

IQF_Ugh Speedman B
 verdeckte Halterung
 oder Speedman A
 geschraubt

TU Dresden
 RC WE Modul
 Fassaden/Dach-Vorschlag 2 M 1:50 / 1:10
 Komplett reversibel. Auslegung nach Statik

Platenaufteilung
 im UK-Raster veränderbar
 AL 1-Fenster und Tür-Abfangung
 nach Statik und Detail-Planung



17.3 U-Werte

Haustür

Schueco Digital GmbH

1

SchueCal basic
Version 2016 R2 SP13

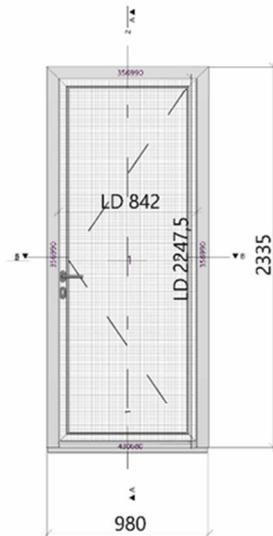
07.07.2017
09:38:48

U-Wert-Protokoll - Kurzform

(2017/060717-00)/01/02/03



Pietsch Metallbau GmbH
Industriepark 8 / 03253 Tröbitz



Projektnummer: 2017/060717-00
Positionsnummer: 01
Erstellungsdatum: 19.08.2013 (Administrator)

Projektbezeichnung: Forschung
Positionsbezeichnung: Haustür
Letzte Änderung: 07.07.2017 (Administrator)

Stück	Beschreibung	Maße	System
1	Aluminiumelement	980,0 mm x 2.365,0 mm	Schüco AWS/ADS 112.IC
1	1-flg. Tür DIN links	980,0 mm x 2.335,0 mm	Schüco AWS/ADS 112.IC

Profile / Kombinationen	Uf W/(m²K)	Rahmenfläche m² Ansichtsbreite * Länge	Isolationsabstand / Isolierstege
2 284752 / 356990 / 439170 / 446020	1,3#	0,700	PA
1 284752 / 430680 / 439170	1,9#	0,080	PT,PA
Profile / Kombinationen gesamt	1,4	0,780	

Panel	Up (W/m²K)	Paneelfläche (m²)
AUFSATZFÜLLUNG beidseitig	0,29	1,520
Panel gesamt	0,29	1,520

Panelrandverbund	Psi W/(mK)	Länge m
AUFSATZFÜLLUNG beidseitig	0,00	5,662
Panelrandverbund gesamt	0,00	5,662

Gesamtfläche m²	2,300
Rahmenanteil	33,90 %

Nennwert Uw 0,65 W/(m²K)

Schueco Digital GmbH

2

SchueCal basic
Version 2016 R2 SP13

07.07.2017
09:38:50

U-Wert-Protokoll - Kurzform
(2017/060717-00)/01/02/03

Ermittlung des Nennwertes des Wärmedurchgangskoeffizienten U_w für Fenster / UD für Türen nach EN ISO 10077-1:2009. Der Bemessungswert U_w, BW / UD, BW des Wärmedurchgangskoeffizienten ist gleich dem Nennwert.

Die Verwendung eines Psi-Wertes von 0,00 (W/mK) für Paneele ist in den in EN ISO 10077-1:2009, Abschnitt 5.4.2, genannten Fällen zulässig.

= entgegen der Auswahl in den technischen Einstellungen werden Polyamid-Stege ermittelt.

Die Eingangsdaten der vorliegenden Berechnung sind vom ift Rosenheim nicht geprüft worden und sind durch einen entsprechenden Nachweis als mitgeltende Dokumente zu verwenden. Die Verantwortung für die Richtigkeit der einzugebenden Daten und für die damit ermittelten Berechnungsergebnisse liegt beim Benutzer.

Die U-Wert-Berechnung in SchüCal mit dem Berechnungsmodul vom 20.06.2013 wurde durch das ift Rosenheim auf Plausibilität nach ift Richtlinie WA-05/2 geprüft.



Berechnungskern calculation engine
EN ISO 10077-1:2009
EN ISO 12631:2012
13-000693-PR01 (PB-A01-06-de-05)
ROSENHEIM ift WA-05/2

U-Wert Fenster 1000 x 1500

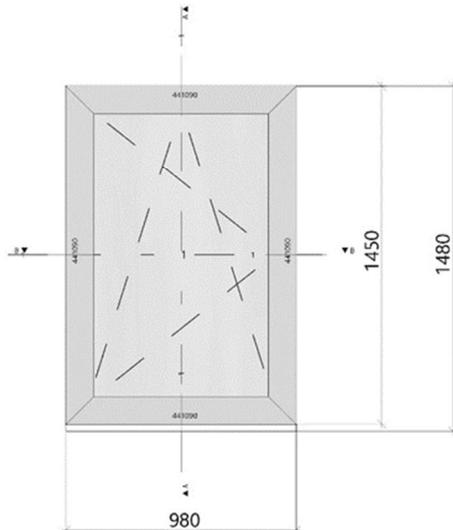
Schueco Digital GmbH

3

SchueCal basic
Version 2016 R2 SP13

07.07.2017
09:38:50

U-Wert-Protokoll - Kurzform
(2017/060717-00)/01/02/03



Projektnummer: 2017/060717-00
Positionsnummer: 02
Erstellungsdatum: 06.07.2017 (Administrator)

Projektbezeichnung: Forschung
Positionsbezeichnung: DK-Fenster
Letzte Änderung: 07.07.2017 (Administrator)

Stück	Beschreibung	Maße	System
1	Aluminiumelement	980,0 mm x 1.480,0 mm	Schüco AWS/ADS 112.IC
1	Fenster DK DIN rechts	980,0 mm x 1.450,0 mm	Schüco AWS/ADS 112.IC
Profile / Kombinationen		U _f W/(m ² K)	Rahmenfläche m ² Ansichtsbreite * Länge
1 197950 / 441090 / 445810		0,80#	0,528
Profile / Kombinationen gesamt		0,80	0,528
Verglasung		U _g W/(m ² K)	Glasfläche m ² Abstandhalter
3-fach ISO FL4/12/FL6/12/FL4		0,4	0,903 Aluminium/Kunststoff
Verglasung gesamt		0,4	0,903
Glasrandverbund		Psi W/(mK)	Länge m
3-fach ISO FL4/12/FL6/12/FL4		0,042	4,044
Glasrandverbund gesamt		0,042	4,044
Gesamtfläche m²			1,431
Rahmenanteil			36,87 %
Nennwert U_w			0,67 W/(m²K)
Ermittlung des Nennwertes des Wärmedurchgangskoeffizienten U _w für Fenster / UD für Türen nach EN ISO 10077-1:2009. Der Bemessungswert U _{w,BW} / UD,BW des Wärmedurchgangskoeffizienten ist gleich dem Nennwert.			
Die Verwendung eines Psi-Wertes von 0,00 (W/mK) für Paneele ist in den in EN ISO 10077-1:2009, Abschnitt 5.4.2, genannten Fällen zulässig.			

Schueco Digital GmbH

4

SchueCal basic
Version 2016 R2 SP13

07.07.2017
09:38:51

U-Wert-Protokoll - Kurzform
(2017/060717-00)/01/02/03

= entgegen der Auswahl in den technischen Einstellungen werden Polyamid-Stege ermittelt.

Die Eingangsdaten der vorliegenden Berechnung sind vom ift Rosenheim nicht geprüft worden und sind durch einen entsprechenden Nachweis als mitgeltende Dokumente zu verwenden. Die Verantwortung für die Richtigkeit der einzugebenden Daten und für die damit ermittelten Berechnungsergebnisse liegt beim Benutzer.

Die U-Wert-Berechnung in SchüCal mit dem Berechnungsmodul vom 20.06.2013 wurde durch das ift Rosenheim auf Plausibilität nach ift Richtlinie WA-05/2 geprüft.

 Berechnungskern calculation engine
EN ISO 10077-1:2009
EN ISO 12631:2012
13-000693-PR01 (PB-A01-06-de-05)
ROSENHEIM ift WA-05/2

U-Wert Fenster 500 x 1000

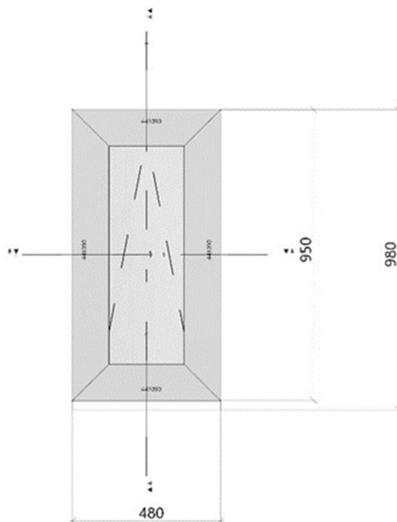
Schueco Digital GmbH

5

SchueCal basic
Version 2016 R2 SP13

07.07.2017
09:38:51

U-Wert-Protokoll - Kurzform
(2017/060717-00)/01/02/03



Projektnummer: 2017/060717-00
Positionsnummer: 03
Erstellungsdatum: 06.07.2017 (Administrator)

Projektbezeichnung: Forschung
Positionsbezeichnung: Kipp-Fenster
Letzte Änderung: 07.07.2017 (Administrator)

Stück	Beschreibung	Maße	System
1	Aluminiumelement	480,0 mm x 980,0 mm	Schüco AWS/ADS 112.IC
1	Kippflügel-Fenster (Griff rechts)	480,0 mm x 950,0 mm	Schüco AWS/ADS 112.IC

Profile / Kombinationen	Uf W/(m²K)	Rahmenfläche m² Ansichtsbreite * Länge	Isolationsabstand / Isolierstege
1 197950 / 441090 / 445810	0,80#	0,288	PA
Profile / Kombinationen gesamt	0,80	0,288	

Verglasung	Ug W/(m²K)	Glasfläche m²	Abstandhalter
3-fach ISO FL4/12/FL6/12/FL4	0,4	0,174	Aluminium/Kunststoff
Verglasung gesamt	0,4	0,174	

Glasrandverbund	Psi W/(mK)	Länge m
3-fach ISO FL4/12/FL6/12/FL4	0,042	2,044
Glasrandverbund gesamt	0,042	2,044

Gesamtfläche m²	0,462
Rahmenanteil	62,27 %

Nennwert Uw	0,84 W/(m²K)
--------------------	---------------------

Ermittlung des Nennwertes des Wärmedurchgangskoeffizienten Uw für Fenster / UD für Türen nach EN ISO 10077-1:2009.
Der Bemessungswert Uw,BW / UD,BW des Wärmedurchgangskoeffizienten ist gleich dem Nennwert.
Die Verwendung eines Psi-Wertes von 0,00 (W/mK) für Paneele ist in den in EN ISO 10077-1:2009, Abschnitt 5.4.2,
genannten Fällen zulässig.

Schueco Digital GmbH

6

SchueCal basic
Version 2016 R2 SP13

07.07.2017
09:38:52

U-Wert-Protokoll - Kurzform
(2017/060717-00)/01/02/03

= entgegen der Auswahl in den technischen Einstellungen werden Polyamid-Stege ermittelt.

Die Eingangsdaten der vorliegenden Berechnung sind vom ift Rosenheim nicht geprüft worden und sind durch einen entsprechenden Nachweis als mitgeltende Dokumente zu verwenden. Die Verantwortung für die Richtigkeit der einzugebenden Daten und für die damit ermittelten Berechnungsergebnisse liegt beim Benutzer.

Die U-Wert-Berechnung in SchüCal mit dem Berechnungsmodul vom 20.06.2013 wurde durch das ift Rosenheim auf Plausibilität nach ift Richtlinie WA-05/2 geprüft.



U-Wert Zusammenfassung Fenster/ Tür

Schueco Digital GmbH

7

SchueCal basic
Version 2016 R2 SP13

07.07.2017
09:38:52

U-Wert-Protokoll - Kurzform
(2017/060717-00)/01/02/03

Projekt: 2017/060717-00

Position	Stück	Elementfläche (m ²)	Elementfläche gesamt (m ²)	U-Wert (W/m ² K)	Flächenanteil
01	1	2,300	2,300	0,65	54,86 %
02	1	1,431	1,431	0,67	34,13 %
03	1	0,462	0,462	0,84	11,01 %
Gesamt	3		4,192	0,68	100,00 %

Rahmenfläche (m ²)	1,595	38,04 %
Glasfläche (m ²)	1,077	25,70 %
Paneelfläche (m ²)	1,520	36,26 %

Die U-Wert-Berechnung in SchüCal mit dem Berechnungsmodul vom 20.06.2013 wurde durch das ift Rosenheim auf Plausibilität nach ift Richtlinie WA-05/2 geprüft.



Die vom Programm ermittelten Angaben auf dieser Ausgabeliste sind auf Richtigkeit zu überprüfen!

Bitte beachten Sie die zugehörigen Hinweis- oder Fehlerlisten.

17.4 Beton Mischungsberechnung - Abruf-Nr.: RCM-4

MATTIG & LINDNER GmbH Betonfertigteilterwerk C.-A-Groeschke Str.15 03149 Forst(Lausitz) Tel.: 03562/9703-0 Fax:	<h2 style="margin: 0;">Beton</h2> <h3 style="margin: 0;">Mischungsberechnung</h3>									
Fertigteilterwerk Mattig & Lindner			Rezept-Nr. : Forschung-RC Sorten-Nr. : 6016152R Abruf-Nr. : RCM-4 Betontyp : Beton nach Eigenschaften Änderungsdatum : 08:50 / 06.09.2018							
Anforderungen										
Projekt / Bauteil : RC-Forschungsprojekt WE-Modul Ergänzung Anwendung : Anwendung / E-Klasse : XC4(WU), XF1, XM1, XA1 Weitere Anforderungen : Norm : EN 206-1/DIN 1045-2										
Festigkeitsklasse : C 30/37 Konsistenz [Herstellung] : F2 Konsistenz [Baustelle] : Rohdichteklasse : Größtkorn [D, max] : 16 Sieblinien-Nr. : Forschung-RC	f_c , cube, 150 nach 28 d = 47 N/mm ² Ausbreitmaß [mm] nach 10 min = 410 mm Zementgehalt [Min] = 320 kg/m ³ Luftporengehalt [Min] = Vol.-% w/(z + k*f) [Max] = 0,55	Bewehrung : StB Chloridklasse : Cl 0.40 Expos.-Gruppe : Überw.-Klasse : UK 2 Feuchteklasse : WF								
Zusammensetzung Beton										
							trocken	feucht		
Bezeichnung	d/D	V.-%	M.-%	Herkunft	V [dm ³]	[kg/dm ³]	M [kg]	F [%]	F [kg]	M [kg]
Sand	0/2	17,7	19,0	Ponickau	114,5	2,63	301			301
Recycling	0/8	48,8	45,0	Heim Deponie RC GmbH	314,5	2,27	714			714
Kiessand	2/8	14,0	15,0	Ponickau	90,6	2,62	237			238
Grobkies	8/16	19,6	21,0	Ponickau	126,8	2,63	334			333
CEM I 52,5 R-ft				CEMEX	103,2	3,10	320			320
Frischwasser					196,0	1,00	196			196
Steinkohleflugasche				Kraftwerk Opole	37,0	2,16	80,0			80,0
Luftporen					19,0					
Gesamt					999,4		2182			2182
w/z-Wasser					193,6		194			
Saugwasseranteil					2,37		2,37			
Kennwerte (Rezeptur mit trockenen Gesteinskörnungen)										
Komponenten	Stoffraum		Mörtel <2mm		Leim <0,125mm		Mehlkorn <0,125mm		(w/z) eq	
	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³	(w/z)	
Gesteinskörnung	1588	647	699	287	23	10	23	10		: 0,55
Zement	320	103	320	103	320	103	320	103		: 0,61
Wasser	196	194	194	194	194	194			Luftporen	[Vol.-%] : 1,9
Zusatzstoff (trocken)	80	37	80	37	80	37	80	37	Flugasche k(f) - Wert	: 0,4
Zusatzmittel									Festigkeitsentwicklung	: schnell (r = 0.63)
Luftporen		19		19		19			Nachbehandlung (20°C)	[d] : 1
Summe	2182	999	1293	640	617	363	423	150		
Erweiterte Kennwerte										
Kennwert	Einheit		Norm		Wert					
<div style="text-align: right; margin-top: 10px;"> Datum _____ </div>										

17.5 Prüfergebnisse Betonrezepturen

Betonprüfung

10.05.2018

Rezeptur: 6016152R



Expositonsklasse : XC4(WU),XF1,XA1,

Grund der Prüfung : Forschung

erstellt: Remo Meinz

 Firma : Mattig & Lindner GmbH
 C.-A.-Groeschke-Str.15
 03149 Forst/L.

Betonfertigteilerwerk

1.Allgemein						
Probekörper-Nr.	W1	W2	W3	W4	W5	W6
Druckfestigkeitsklasse	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37
Sorten-Nr.	6016152R	6016152R	6016152R	6016152R	6016152R	6016152R
Hersteller-Datum	12.04.2018	12.04.2018	12.04.2018	12.04.2018	12.04.2018	12.04.2018
Uhrzeit	9.25Uhr	9.25Uhr	9.25Uhr	9.25Uhr	9.25Uhr	9.25Uhr
Entnahmestelle	Labormischer					
Bauteil						
2.Frischbeton						
Temp.-Luft °C / Beton°C	13/20					
W/Z equ gedarrt	0,51					
Konsistenz	F3					
Ausbreitmaß mm	470					
Form+Beton kg	10,05	10,19	10,16	10,15	10,17	10,30
Form kg	2,04	2,08	2,03	2,08	2,05	2,13
Beton kg	8,01	8,11	8,13	8,07	8,12	8,11
Volumen (Form) dm ³	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375
Rohdichte D=m/V kg/m ³	2370	2400	2410	2390	2410	2400
LP-Gehalt V%	1,8					
Korrekturfaktor G V%						
3.Festbeton						
Prüftag	14.04.2018	16.04.2018	19.04.2018	10.05.2018	10.05.2018	10.05.2018
Prüfalter d	2	4	7	28	28	28
Länge a mm	150	150	150	150	150	150
Breite b mm	150	150	150	150	150	150
Höhe h mm	150	149	150	151	150	150
Masse kg	7,980	8,091	8,096	7,986	8,049	8,045
Volumen dm ³	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375	3,375
Rohdichte kg/m ³	2360	2400	2400	2370	2380	2380
Bruchlast KN	741	789	1198	1364	1428	1398
Fläche mm ²	22500	22500	22500	22500	22500	22500
Druckfestigkeit N/mm ²	32,93	35,06	53,24	60,62	63,46	62,13
Lagerungsfaktor	Wasserlagerung			0,92	0,92	0,92
Druckfestigkeit N/mm ²	32,9	35,1	53,2	55,8	58,4	57,2

 Krit.1 $f_{cm} > f_{ck} + 4$ 57,1N/mm² > 41N/mm²

 Krit.2 $f_{cmin} > f_{ck} - 4$ 55,8N/mm² > 33N/mm²

 Forst,10.05.2018
 Ort;Datum

 Meinz
 Prüfer

Stempel, Unterschrift

17.6 Beton Mischungsberechnung, Vergleichsrezeptur -
 Abruf-Nr.: 30 600

MATTIG & LINDNER GmbH Betonfertigteilwerk C.-A.-Groeschke Str.15 03149 Forst(Lausitz) Tel.: 03562/9703-0 Fax:	<h2 style="margin: 0;">Beton</h2> <h3 style="margin: 0;">Mischungsberechnung</h3>																																																																																																																																		
Fertigteilwerk Mattig & Lindner		Rezept-Nr. : Fertigteilwerk Sorten-Nr. : 6016152R Abruf-Nr. : 30 600 Betontyp : Beton nach Eigenschaften Änderungsdatum : 09:34 / 30.05.2018																																																																																																																																	
Anforderungen																																																																																																																																			
Projekt / Bauteil : Sichtbeton, Treppen, Podeste Ergänzung Anwendung : Innen-u. Aussenbauteile Anwendung / E-Klasse : XC4(WU), XF1, XA1 Weitere Anforderungen : Norm : EN 206-1/DIN 1045-2																																																																																																																																			
Festigkeitsklasse : C 30/37 Konsistenz [Herstellung] : F2 Konsistenz [Baustelle] : Rohdichteklasse : Größtkorn [D, max] : 16 Sieblinien-Nr. : ML-SL006-18	fc, cube, 150 nach 28 d = 47 N/mm ² Ausbreitmaß [mm] nach 10 min = 410 mm Zementgehalt [Min] = 300 kg/m ³ Luftporengehalt [Min] = Vol.-% w/(z + k*f) [Max] = 0,60	Bewehrung : StB Chloridklasse : Cl 0.40 Expos.-Gruppe : Überw.-Klasse : UK 2 Feuchteklasse : WF																																																																																																																																	
Zusammensetzung Beton																																																																																																																																			
		trocken	feucht																																																																																																																																
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;">Bezeichnung</th> <th style="width: 5%;">d/D</th> <th style="width: 5%;">V.-%</th> <th style="width: 5%;">M.-%</th> <th style="width: 15%;">Herkunft</th> <th style="width: 5%;">V [dm³]</th> <th style="width: 5%;">[kg/dm³]</th> <th style="width: 5%;">M [kg]</th> <th style="width: 5%;">F [%]</th> <th style="width: 5%;">F [kg]</th> <th style="width: 5%;">M [kg]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sand</td> <td>0/2</td> <td>38,0</td> <td>38,0</td> <td>Ponickau</td> <td>249,1</td> <td>2,63</td> <td>655</td> <td></td> <td></td> <td>655</td> </tr> <tr> <td>Kiessand</td> <td>2/8</td> <td>20,1</td> <td>20,0</td> <td>Ponickau</td> <td>131,8</td> <td>2,62</td> <td>345</td> <td></td> <td></td> <td>345</td> </tr> <tr> <td>Grobkies</td> <td>8/16</td> <td>42,0</td> <td>42,0</td> <td>Ponickau</td> <td>275,4</td> <td>2,63</td> <td>724</td> <td></td> <td></td> <td>724</td> </tr> <tr> <td>CEM I 52,5 R-ft</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>CEMEX</td> <td>96,8</td> <td>3,10</td> <td>300</td> <td></td> <td></td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>Frischwasser</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>196,0</td> <td>1,00</td> <td>196</td> <td></td> <td></td> <td>196</td> </tr> <tr> <td>Steinkohleflugasche</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Kraftwerk Opole</td> <td>37,0</td> <td>2,16</td> <td>80,0</td> <td></td> <td></td> <td>80,0</td> </tr> <tr> <td>Luftporen</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>18,0</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Gesamt</td> <td>1001</td> <td></td> <td>2301</td> <td></td> <td></td> <td>2301</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>w/z-Wasser</td> <td>192,5</td> <td></td> <td>193</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>Saugwasseranteil</td> <td>3,45</td> <td></td> <td>3,45</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Bezeichnung	d/D	V.-%	M.-%	Herkunft	V [dm ³]	[kg/dm ³]	M [kg]	F [%]	F [kg]	M [kg]	Sand	0/2	38,0	38,0	Ponickau	249,1	2,63	655			655	Kiessand	2/8	20,1	20,0	Ponickau	131,8	2,62	345			345	Grobkies	8/16	42,0	42,0	Ponickau	275,4	2,63	724			724	CEM I 52,5 R-ft				CEMEX	96,8	3,10	300			300	Frischwasser					196,0	1,00	196			196	Steinkohleflugasche				Kraftwerk Opole	37,0	2,16	80,0			80,0	Luftporen					18,0										Gesamt	1001		2301			2301					w/z-Wasser	192,5		193								Saugwasseranteil	3,45		3,45													
Bezeichnung	d/D	V.-%	M.-%	Herkunft	V [dm ³]	[kg/dm ³]	M [kg]	F [%]	F [kg]	M [kg]																																																																																																																									
Sand	0/2	38,0	38,0	Ponickau	249,1	2,63	655			655																																																																																																																									
Kiessand	2/8	20,1	20,0	Ponickau	131,8	2,62	345			345																																																																																																																									
Grobkies	8/16	42,0	42,0	Ponickau	275,4	2,63	724			724																																																																																																																									
CEM I 52,5 R-ft				CEMEX	96,8	3,10	300			300																																																																																																																									
Frischwasser					196,0	1,00	196			196																																																																																																																									
Steinkohleflugasche				Kraftwerk Opole	37,0	2,16	80,0			80,0																																																																																																																									
Luftporen					18,0																																																																																																																														
				Gesamt	1001		2301			2301																																																																																																																									
				w/z-Wasser	192,5		193																																																																																																																												
				Saugwasseranteil	3,45		3,45																																																																																																																												
Kennwerte (Rezeptur mit trockenen Gesteinskörnungen)																																																																																																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Komponenten</th> <th colspan="2">Stoffraum</th> <th colspan="2">Mörtel <2mm</th> <th colspan="2">Leim <0,125mm</th> <th colspan="2">Mehlkorn <0,125mm</th> <th rowspan="2">(w/z) eq</th> <th rowspan="2">(w/z)</th> <th rowspan="2">Luftporen [Vol.-%]</th> <th rowspan="2">Flugasche k(f) - Wert</th> <th rowspan="2">Festigkeitsentwicklung : schnell (r = 0,63)</th> <th rowspan="2">Nachbehandlung (20°C) [d]</th> </tr> <tr> <th>kg</th> <th>dm³</th> <th>kg</th> <th>dm³</th> <th>kg</th> <th>dm³</th> <th>kg</th> <th>dm³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gesteinskörnung</td> <td>1725</td> <td>656</td> <td>706</td> <td>269</td> <td>7</td> <td>3</td> <td>7</td> <td>3</td> <td></td> <td></td> <td>1,8</td> <td>0,4</td> <td></td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>Zement</td> <td>300</td> <td>97</td> <td>300</td> <td>97</td> <td>300</td> <td>97</td> <td>300</td> <td>97</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Wasser</td> <td>196</td> <td>193</td> <td>193</td> <td>193</td> <td>193</td> <td>193</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zusatzstoff (trocken)</td> <td>80</td> <td>37</td> <td>80</td> <td>37</td> <td>80</td> <td>37</td> <td>80</td> <td>37</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Zusatzmittel</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Luftporen</td> <td></td> <td>18</td> <td></td> <td>18</td> <td></td> <td>18</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Summe</td> <td>2301</td> <td>1001</td> <td>1279</td> <td>614</td> <td>580</td> <td>348</td> <td>387</td> <td>137</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Komponenten	Stoffraum		Mörtel <2mm		Leim <0,125mm		Mehlkorn <0,125mm		(w/z) eq	(w/z)	Luftporen [Vol.-%]	Flugasche k(f) - Wert	Festigkeitsentwicklung : schnell (r = 0,63)	Nachbehandlung (20°C) [d]	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³	Gesteinskörnung	1725	656	706	269	7	3	7	3			1,8	0,4		1	Zement	300	97	300	97	300	97	300	97							Wasser	196	193	193	193	193	193									Zusatzstoff (trocken)	80	37	80	37	80	37	80	37							Zusatzmittel															Luftporen		18		18		18									Summe	2301	1001	1279	614	580	348	387	137									
Komponenten		Stoffraum		Mörtel <2mm		Leim <0,125mm		Mehlkorn <0,125mm								(w/z) eq	(w/z)	Luftporen [Vol.-%]	Flugasche k(f) - Wert	Festigkeitsentwicklung : schnell (r = 0,63)	Nachbehandlung (20°C) [d]																																																																																																														
	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³																																																																																																																											
Gesteinskörnung	1725	656	706	269	7	3	7	3			1,8	0,4		1																																																																																																																					
Zement	300	97	300	97	300	97	300	97																																																																																																																											
Wasser	196	193	193	193	193	193																																																																																																																													
Zusatzstoff (trocken)	80	37	80	37	80	37	80	37																																																																																																																											
Zusatzmittel																																																																																																																																			
Luftporen		18		18		18																																																																																																																													
Summe	2301	1001	1279	614	580	348	387	137																																																																																																																											
Erweiterte Kennwerte																																																																																																																																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">Kennwert</th> <th style="width: 20%;">Einheit</th> <th style="width: 20%;">Norm</th> <th style="width: 30%;">Wert</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </tbody> </table>	Kennwert	Einheit	Norm	Wert																																																																																																																															
Kennwert	Einheit	Norm	Wert																																																																																																																																
Datum _____																																																																																																																																			

17.7 Prüfbericht - Umweltverträglichkeit RC-GK 0-8



Ingenieurgesellschaft mbH
Baugrunduntersuchungen, Boden- und
Baustoffprüfungen für Berlin/Brandenburg
Umweltanalytik, Betonprüfung

BOLAB Analytik Ingenieurgesellschaft mbH · Herzbergstr. 124 · 10365 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)

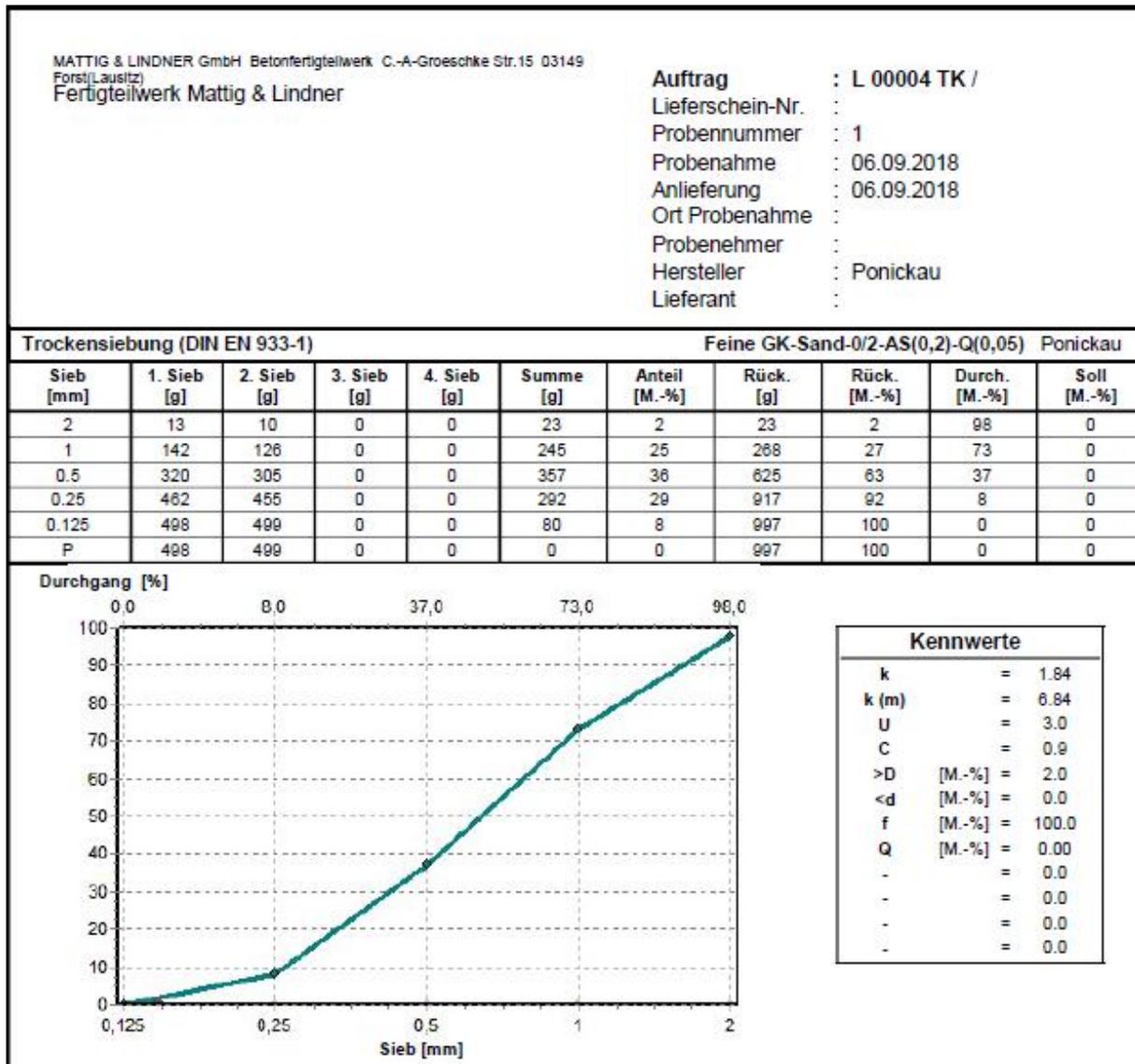
Ergebnisse: Analytikbericht (siehe Anlage 2)

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.

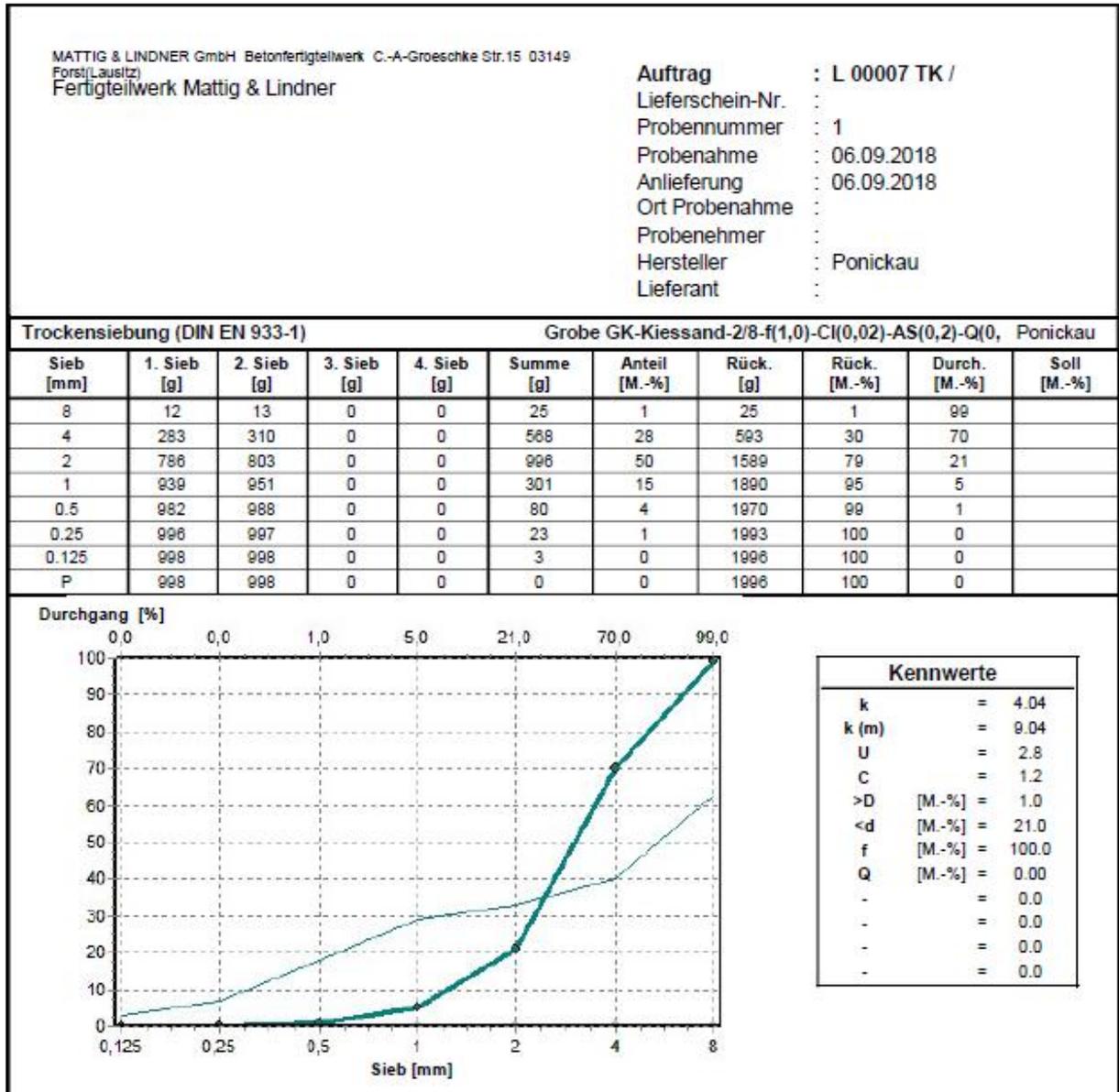
Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium.

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.

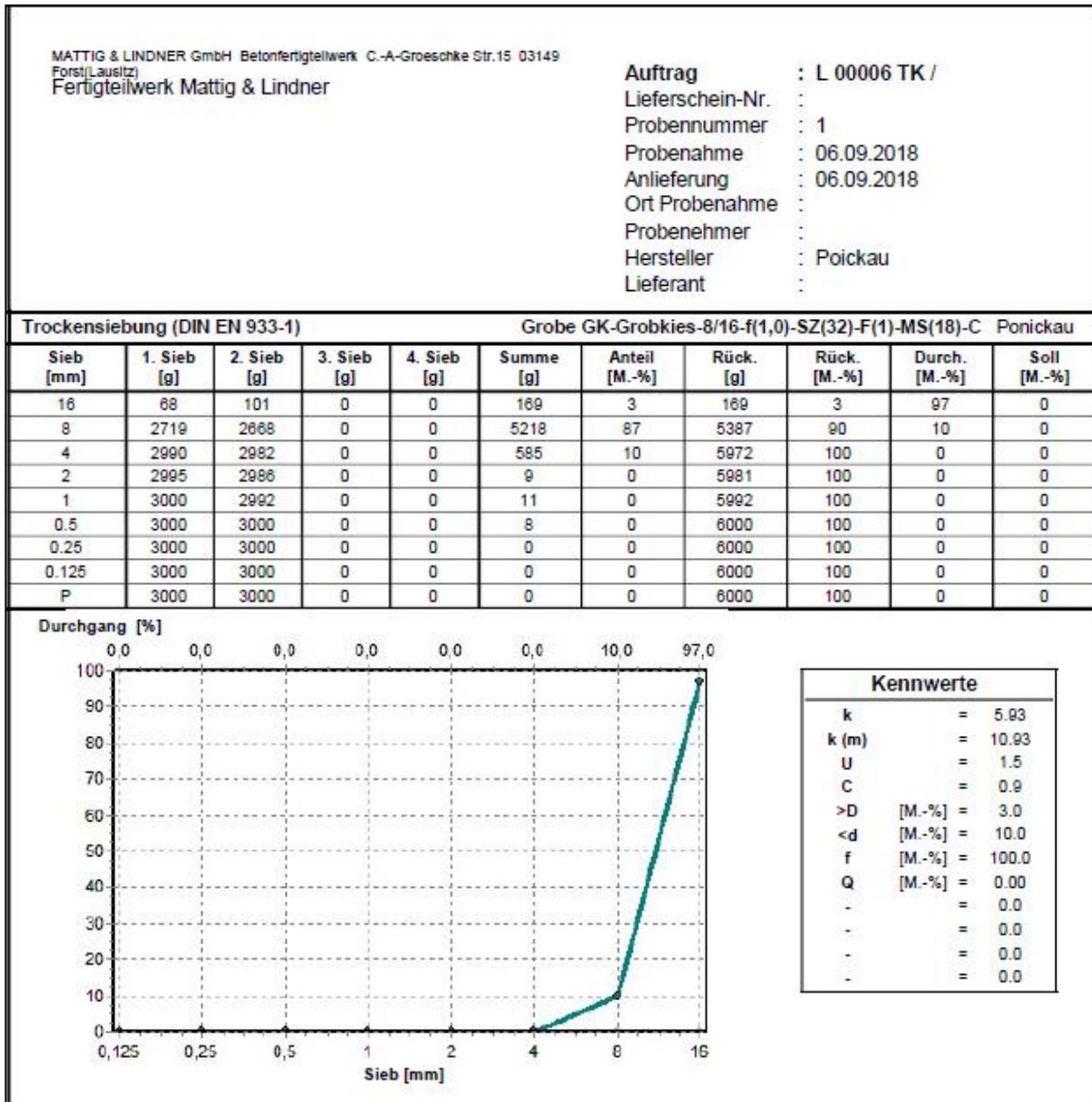
17.8 Sieblinien
GK 0/2



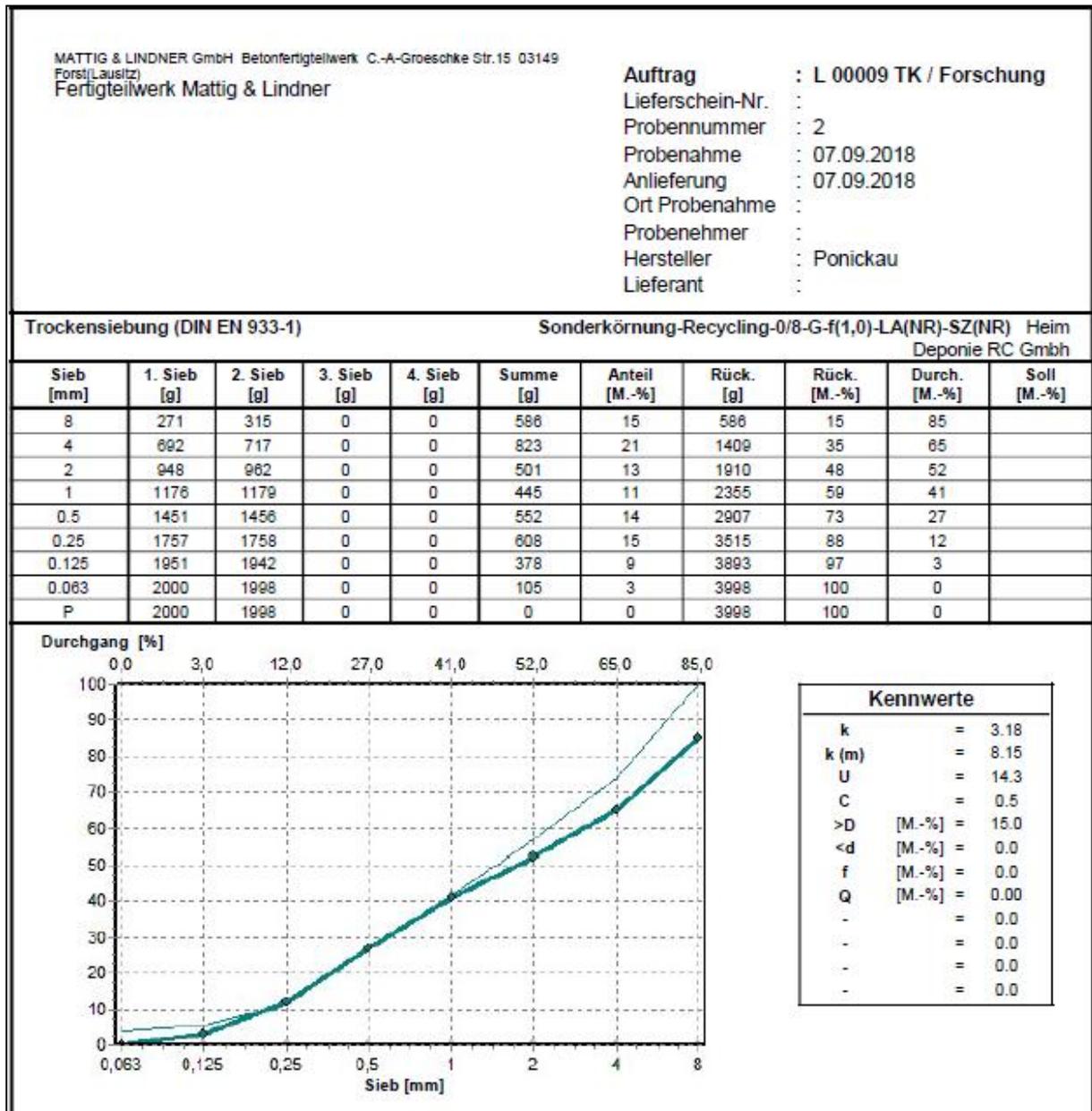
GK 2/8



GK 8/16



RC-GK 0/8



Ist-Sieblinie B16

MATTIG & LINDNER GmbH Betonfertigteilwerk C.-A.-Groeschke Str.15 03149 Forst(Lausitz) Tel.: 03562/9703-0 Fax:		<h2 style="margin: 0;">Gesteinskörnung</h2> <h3 style="margin: 0;">Ist-Sieblinie</h3> <p style="margin: 0;">(Angaben in M.-%)</p>																																
Fertigteilwerk Mattig & Lindner		Sieblinien-Nr. : Forschung-RC Datum : 07.06.2018 Bezeichnung : 2018																																
Kennzeichnung und Anteile der Körnungen																																		
d/D	M.-%	Bezeichnung	Herkunft	Hersteller	Lieferant	Nummer																												
0/2	19,0	Sand	Ponickau			GSK 0/2																												
0/8	45,0	Recycling	Heim Deponie RC GmbH			RC 0/8																												
2/8	15,0	Kiessand	Ponickau			GSK 2/8																												
8/16	21,0	Grobkies	Ponickau			GSK 8/16																												
Siebdurchgang der Körnung [M.-%]																																		
d/D	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16							k-Wert																		
0/2	0,4	1,0	8,0	32,0	71,0	97,0										1,92																		
0/8		2,7	12,1	27,1	41,1	50,2	64,8	85,3								3,19																		
2/8		0,2	0,4	3,9	5,0	20,0	62,0	95,0	100,0							4,14																		
8/16	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	1,0	85,0							6,14																		
Siebdurchgang der Sieblinie [M.-%]																																		
d/D	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16								k-Wert																		
Ist	1,4	7,0	18,9	32,7	44,1	57,5	71,8	96,8								3,71																		
Soll	4,0	8,0	20,0	32,0	42,0	56,0	76,0	100,0								3,66																		
+/-	-2,6	-1,0	-1,1	0,7	2,1	1,5	-4,2	-3,2								0,05																		
<div style="display: flex; align-items: flex-start;"> <div style="margin-right: 20px;"> <p>Durchgang [M.-%]</p> </div> <table border="1" style="margin-left: 20px; font-size: small;"> <caption>Data points for the sieve curve graph</caption> <thead> <tr> <th>Siebe [mm]</th> <th>Durchgang [M.-%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,125</td><td>1,4</td></tr> <tr><td>0,25</td><td>7,0</td></tr> <tr><td>0,5</td><td>18,9</td></tr> <tr><td>1</td><td>32,7</td></tr> <tr><td>2</td><td>44,1</td></tr> <tr><td>4</td><td>57,5</td></tr> <tr><td>8</td><td>71,8</td></tr> <tr><td>16</td><td>96,8</td></tr> </tbody> </table> </div>																	Siebe [mm]	Durchgang [M.-%]	0,125	1,4	0,25	7,0	0,5	18,9	1	32,7	2	44,1	4	57,5	8	71,8	16	96,8
Siebe [mm]	Durchgang [M.-%]																																	
0,125	1,4																																	
0,25	7,0																																	
0,5	18,9																																	
1	32,7																																	
2	44,1																																	
4	57,5																																	
8	71,8																																	
16	96,8																																	

17.9 Produktinformationsblatt Fließmittel MasterGlenium ACE 455



We create chemistry

MasterGlenium ACE 455

Fließmittel für die Fertigteilanwendung auf Basis Polycarboxylatether (PCE) mit optimierten Verarbeitungseigenschaften

ANWENDUNGSGEBIET

MasterGlenium ACE 455 ist ein ideales Zusatzmittel für Fertigteilwerke, die Stahl- und Spannbeton herstellen. Das Produkt ist flexibel einsetzbar und besonders für Betone im Bereich der Konsistenzklassen F2 bis F6 geeignet. Betone mit MasterGlenium ACE 455 zeichnen sich durch geringe Viskosität bzw. Klebrigkeit und verbesserte Glättbarkeit aus. Die ausgezeichneten Verarbeitungseigenschaften sowie die sehr gute Glättbarkeit der mit MasterGlenium ACE 455 hergestellten Betone können z.B. bei der Herstellung von flächigen bzw. liegend betonierten Wand- und Deckenelementen effizient genutzt werden. Das Fließmittel ist für LP-Beton geeignet.

PRÜFUNG / ZERTIFIKATE

Fließmittel für Beton nach DIN EN 934-2:T3.1/3.2. Verwendung in Beton mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung entsprechend Alkali-Richtlinie 7.1.3 (2) (Alkaligehalt $\leq 8,5$ M%). Entspricht den Anforderungen der ZTV-ING und der ZTV Beton-StB 07.

WIRKUNG

MasterGlenium ACE 455 ist ein Fließmittel auf Polycarboxylatether (PCE) Basis. MasterGlenium ACE 455 schließt sehr schnell auf und erzielt einen hohen Dispergiereffekt. Durch die Polymercharakteristik sind relativ kurze Mischzeiten realisierbar. Es entsteht ein weicher, fließfähiger und verarbeitungsfreundlicher Beton mit hoher Stabilität. Das Zusatzmittel beeinflusst die Zementhydratation nur geringfügig und führt zu guten Früh- und Endfestigkeiten. Mit MasterGlenium ACE 455 hergestellte Betone sind niedrigviskos, zeigen eine ausgezeichnete Verarbeitbarkeit und lassen sich in der Regel sehr gut glätten. Aufgrund seiner Eigenschaften ist MasterGlenium ACE 455 eine optimale Alternative zu Fließmitteln auf Naphthalin- und Melaminbasis.

DOSIERUNG

Empfohlener Dosierbereich: 0,2 – 2,5 M% vom Zementgewicht. Die im Einzelfall erforderliche Zugabemenge richtet sich nach den geforderten Betoneigenschaften und ist in einer Erstprüfung festzulegen.

VERARBEITUNG

Das Zusatzmittel sollte der Betonmischung nach dem Anmachwasser oder mit dem Anmachwasser, vorzugsweise mit dem letzten Drittel, zugegeben werden. Für eine ausreichende Mischzeit, nach Zugabe des Zusatzmittels, muss in jedem Fall gesorgt werden. Die Anforderungen der DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 zur Verwendung von Betonzusatzmitteln sind zu beachten.

LAGERBEDINGUNGEN

Vor Frost und Verunreinigungen schützen. Bei normaler Lagerung (verschlossen, 20 °C) beträgt die Mindesthaltbarkeit 1 Jahr. Es sind die gesetzlichen Vorgaben zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe zu beachten.

ARBEITSSCHUTZ / UMWELTVERHALTEN

Bei sachgemäßer Verwendung sind keine Nachteile bekannt. Beim Umgang mit dem Produkt sind die allgemeinen Vorschriften für Arbeitsschutz und -hygiene einzuhalten. Wegen der Alkalität sollte ein Augen- und Hautschutz verwendet werden. Bei Unfällen benetzte Kleidung entfernen, bei Haut- und Schleimhautkontakt mit viel Wasser spülen. Sicherheitsdatenblatt beachten.

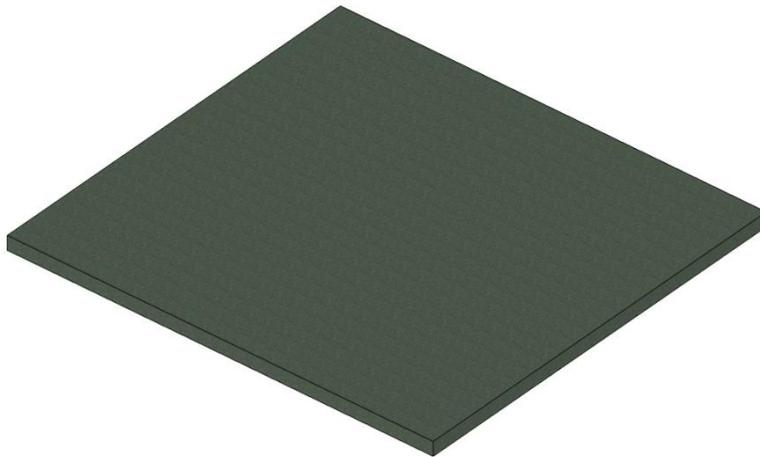
LIEFERUNG

Tankwagen, Container 1.000 kg, Fässer 200 kg, Kanister 20 kg

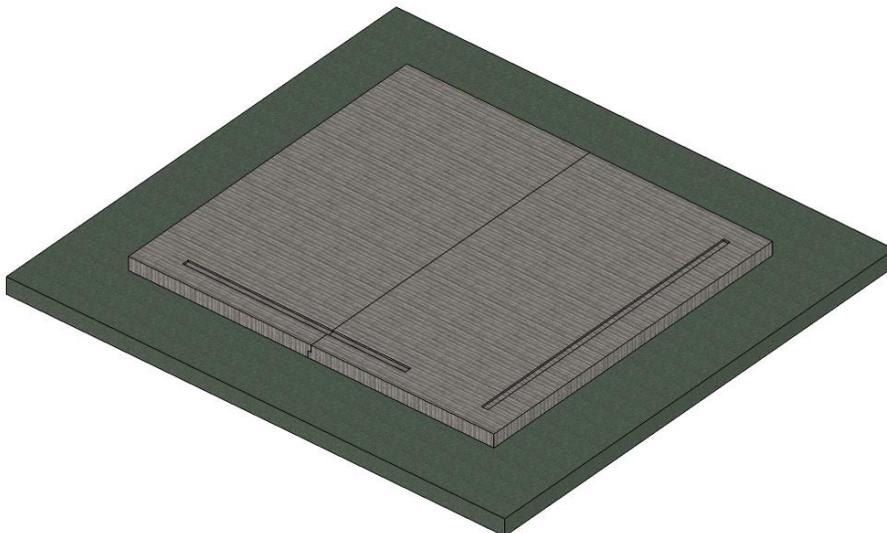
18 Anhänge

18.1 Anhang 1 - Aufbaupläne der RC-Wohneinheit

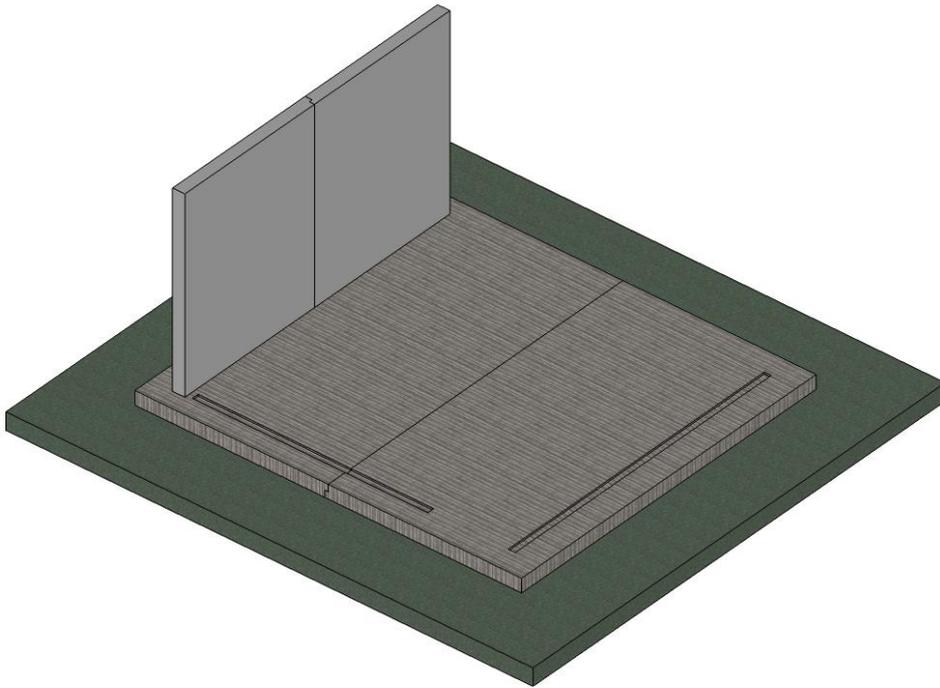
Stand der RC-Wohneinheit



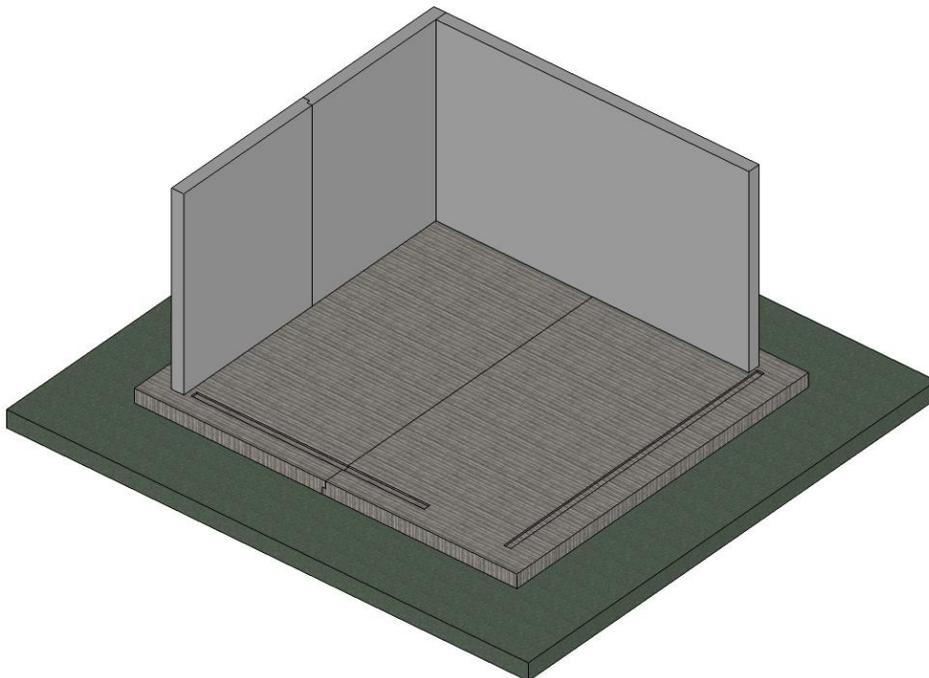
RC-Bodenplatten



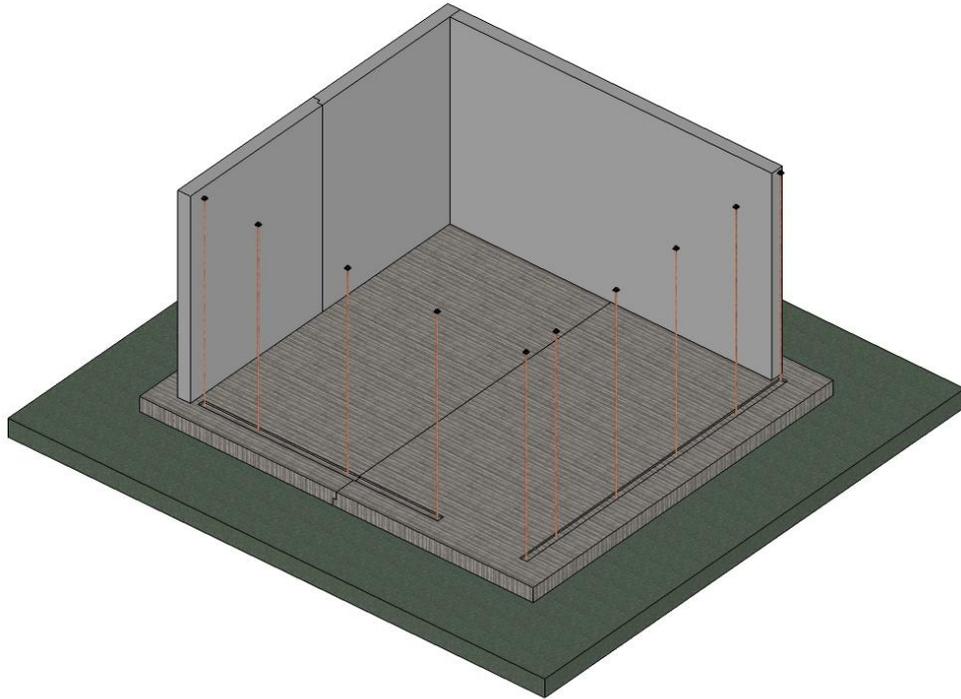
RC-Wandelemente



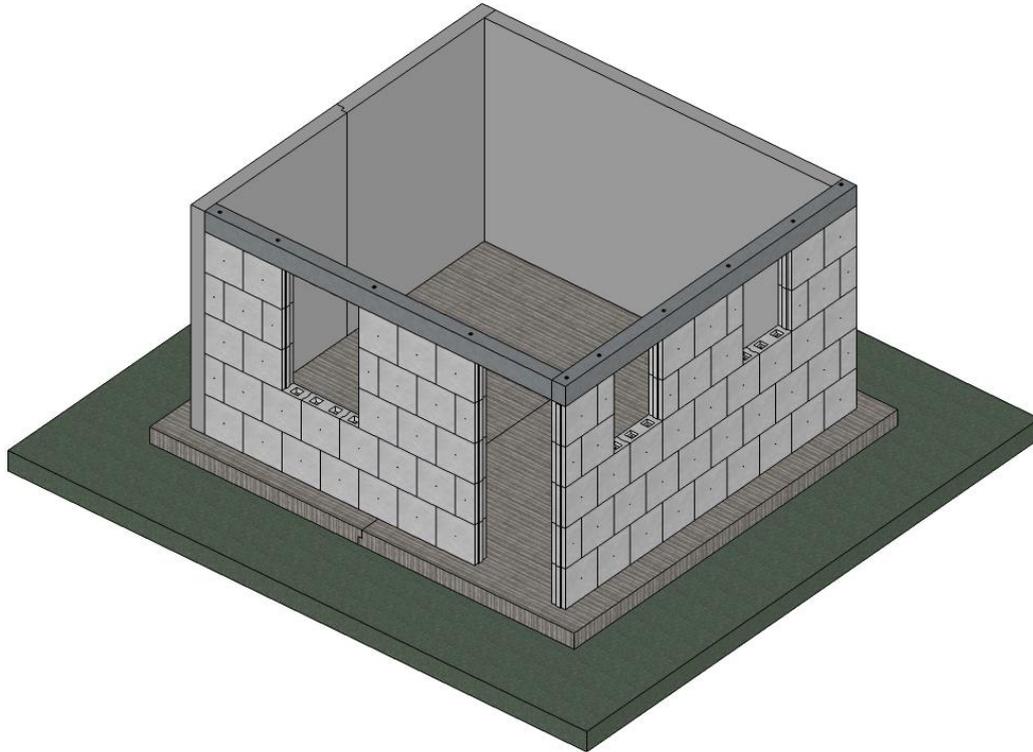
RC-Wand



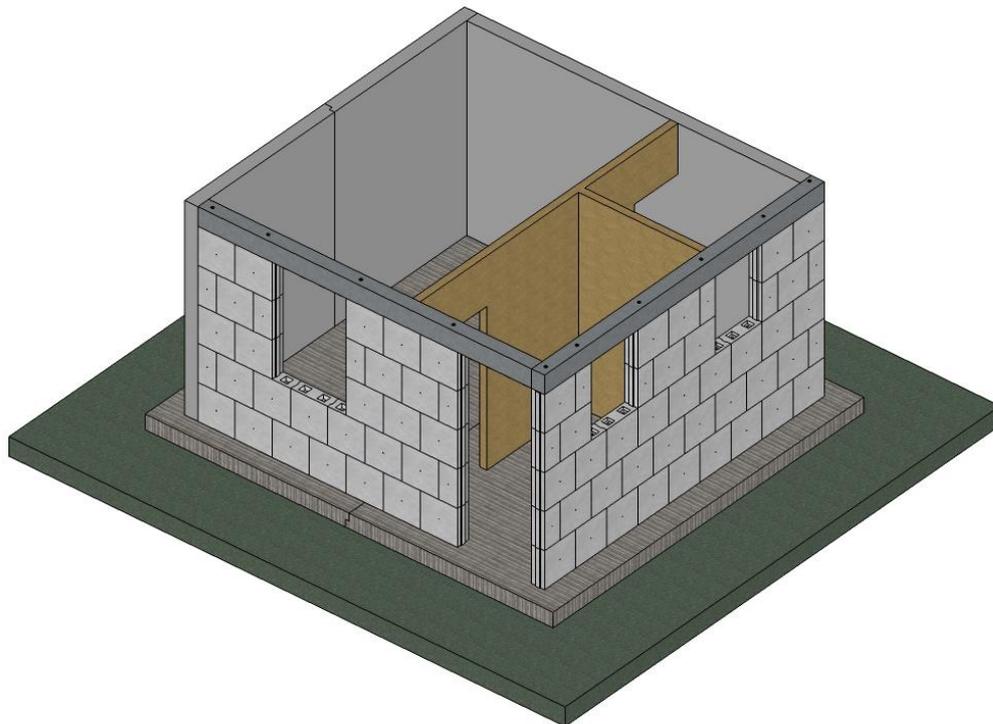
Spannglieder



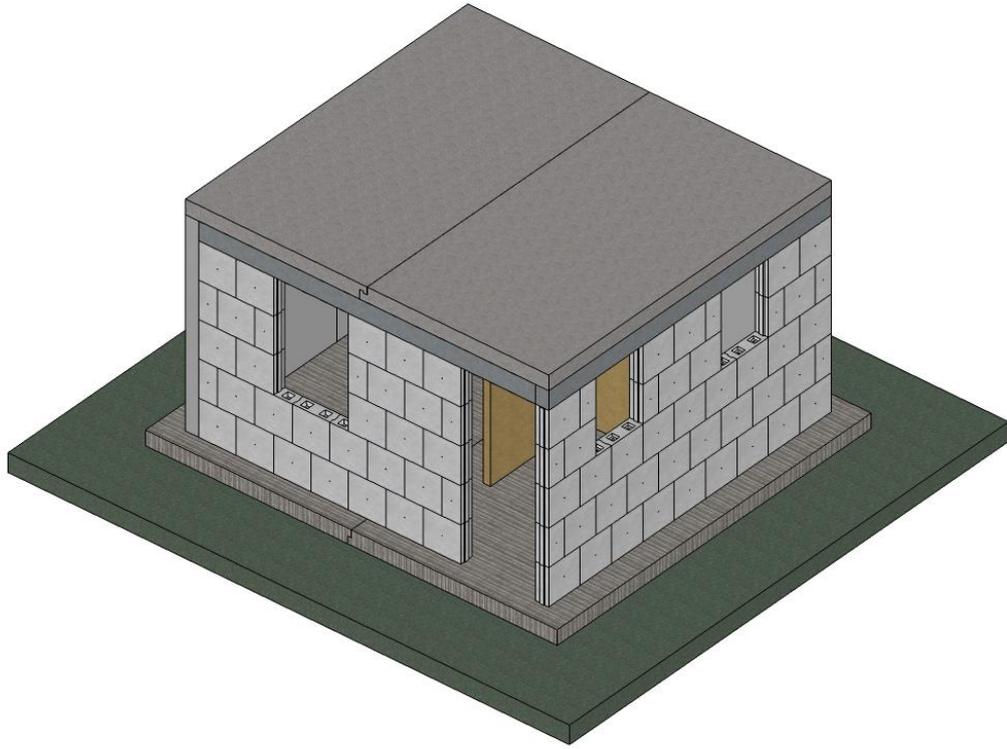
RC-Betonsteine + RC-Balken



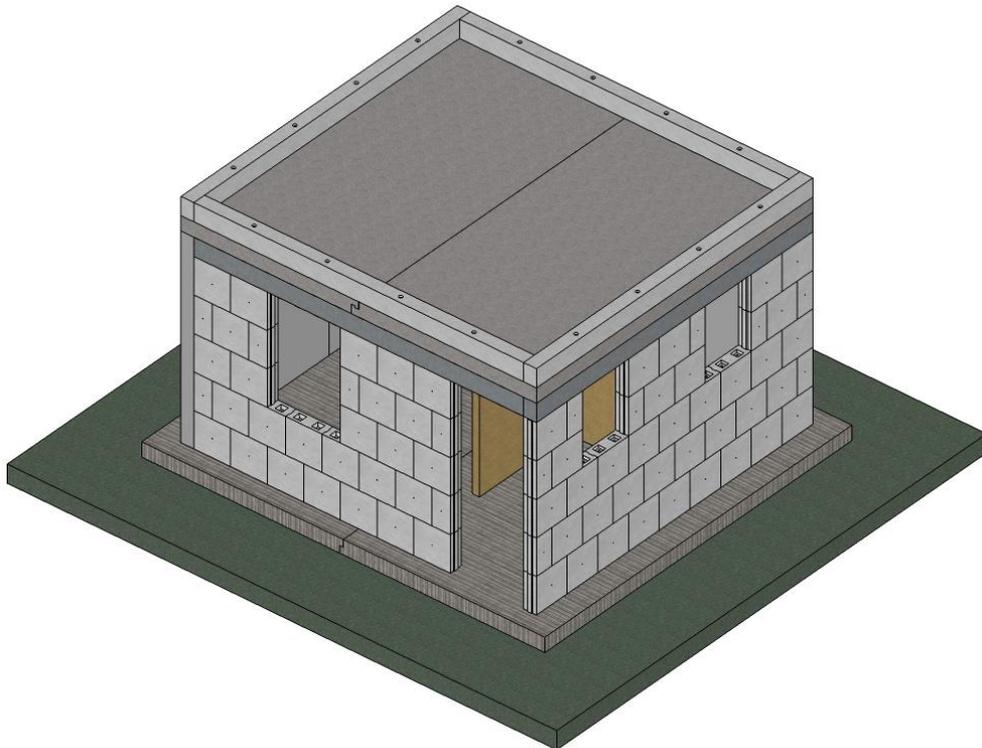
Demontierbare Trennwand



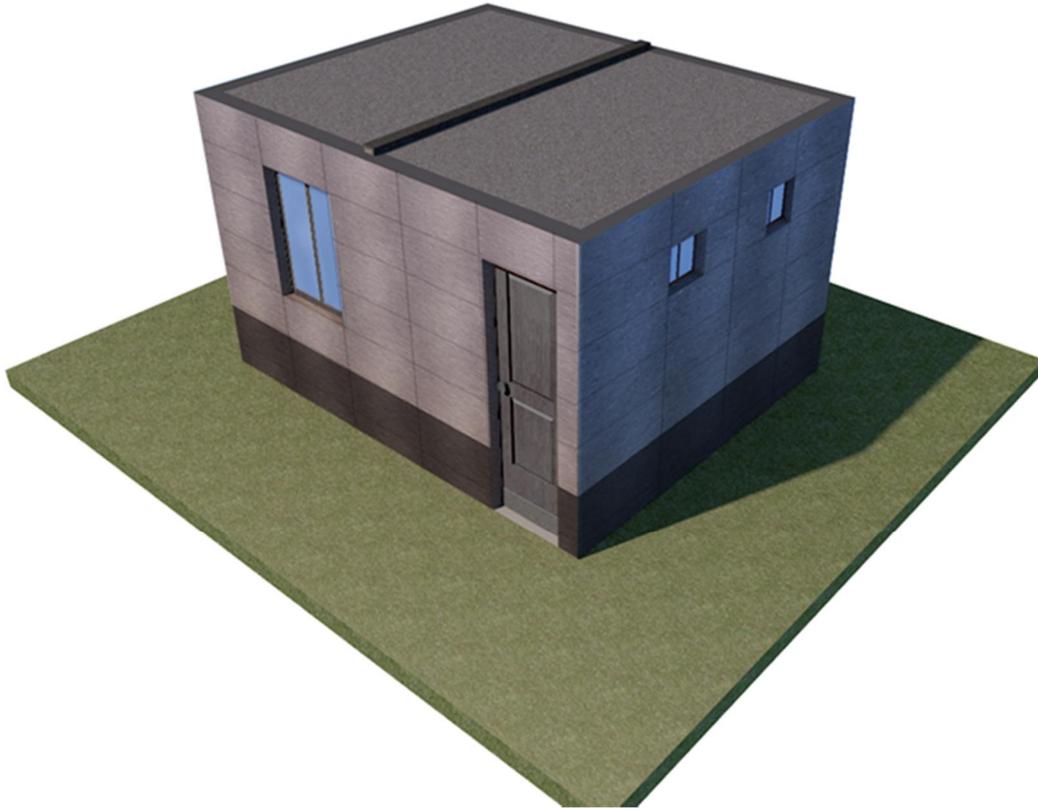
RC-Deckenplatten



RC-Attiken



Ausbau

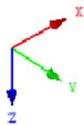
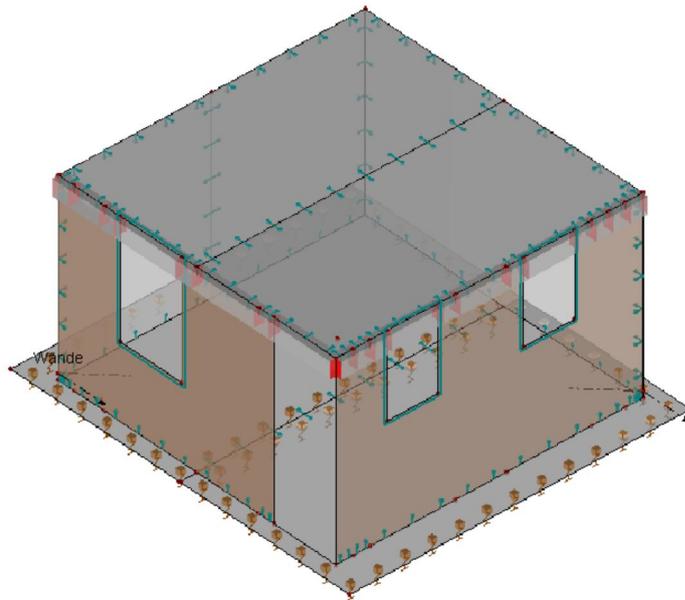


18.2 Anhang 2 - Statische Berechnung der RC-Wohneinheit

Modell

EK 1: 1.35*LF1/s + 1.5*LF2 + 1.5*LF3 + 1.5*LF4 oder bis LF6
 Ergebniskombinationen: Max- und Min-Werte

Isometrie



Modell-Basisangaben

Allgemein	Modellname : Modell+ Bewehrung, t15 cm Projektname : RC WE Mod Modelltyp : 3D Positive Richtung der globalen Z-Achse : Nach unten Klassifizierung der Lastfälle und Kombinationen : Nach Norm: EN 1990 Nationaler Anhang: DIN - Deutschland
Optionen	<ul style="list-style-type: none"> - RF-FORMFINDUNG - Ermittlung von Ausgangs-Gleichgewichtsformen für Membran- und Seilkonstruktionen <hr/> - RF-ZUSCHNITT <hr/> - Rohrleitungsanalyse <hr/> - CQC-Regel anwenden <hr/> - CAD/BIM-Modell ermöglichen <hr/> Erdbeschleunigung

Modell-Basisangaben

g

 : 10.00 m/s²

FE-Netz-Einstellungen

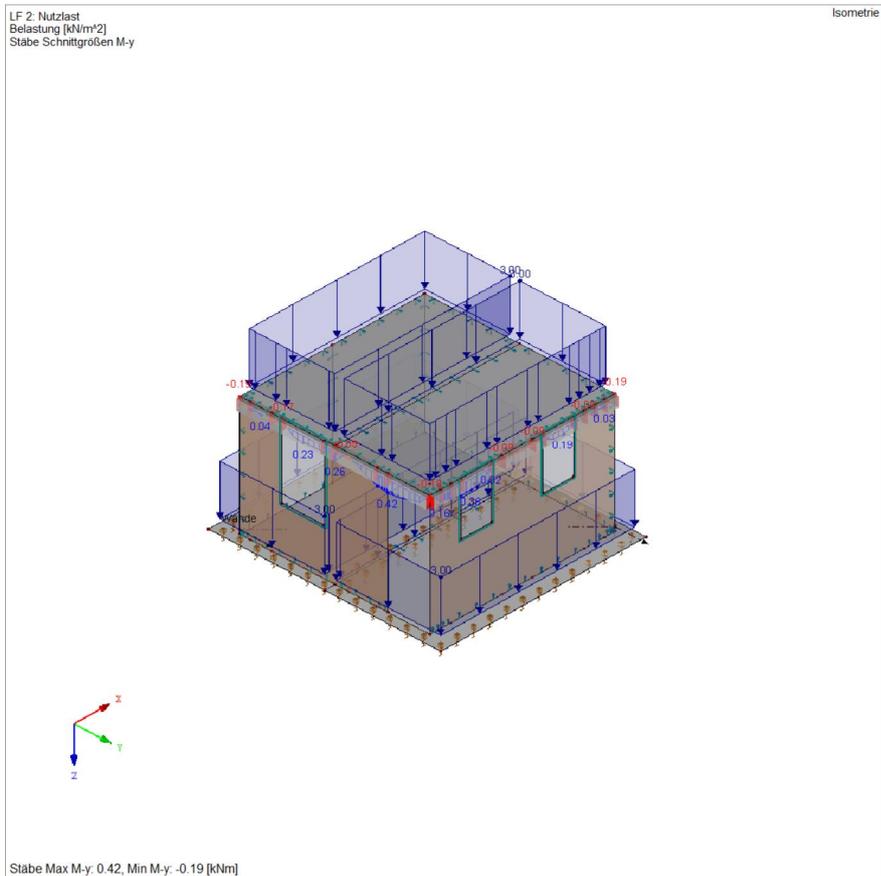
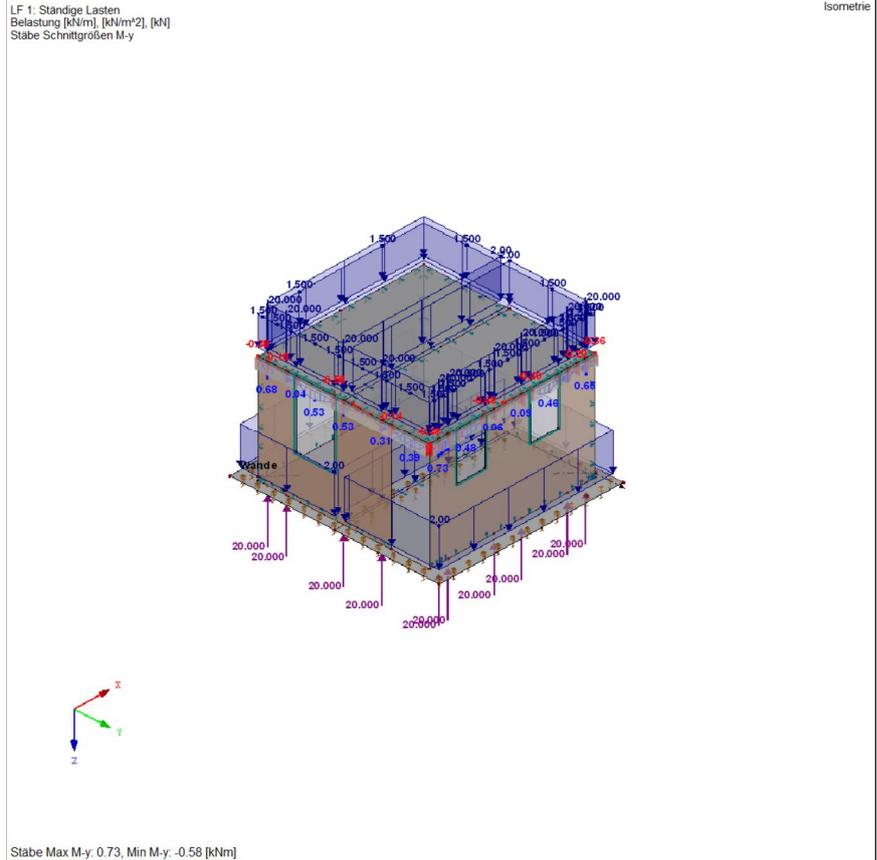
Allgemein	Angestrebte Länge der Finiten Elemente	l_{FE}	: 0.3 m
	Maximaler Abstand zwischen Knoten und Linie um in die Linie zu integrieren	e	: 0.0 m
	Maximale Anzahl der FE-Netz-Knoten (in Tausenden)		: 500
Stäbe	Anzahl Teilungen von Stäben mit Seil, Bettung, Voute oder plastischer Charakteristik		: 10
	x Stäbe bei Theorie III. Ordnung bzw. Durchschlagproblem intern teilen x Teilung der Stäbe durch den Knoten, der auf den Stäben liegt		
Flächen	Maximales Verhältnis der FE-Viereck-Diagonalen	D_D	: 1.800
	Maximale Neigung von zwei Finiten Elementen aus der Ebene	a	: 0.50 °
	Form der Finiten Elemente:		: Drei- und Vierecke x Gleiche Quadrate generieren, wo möglich

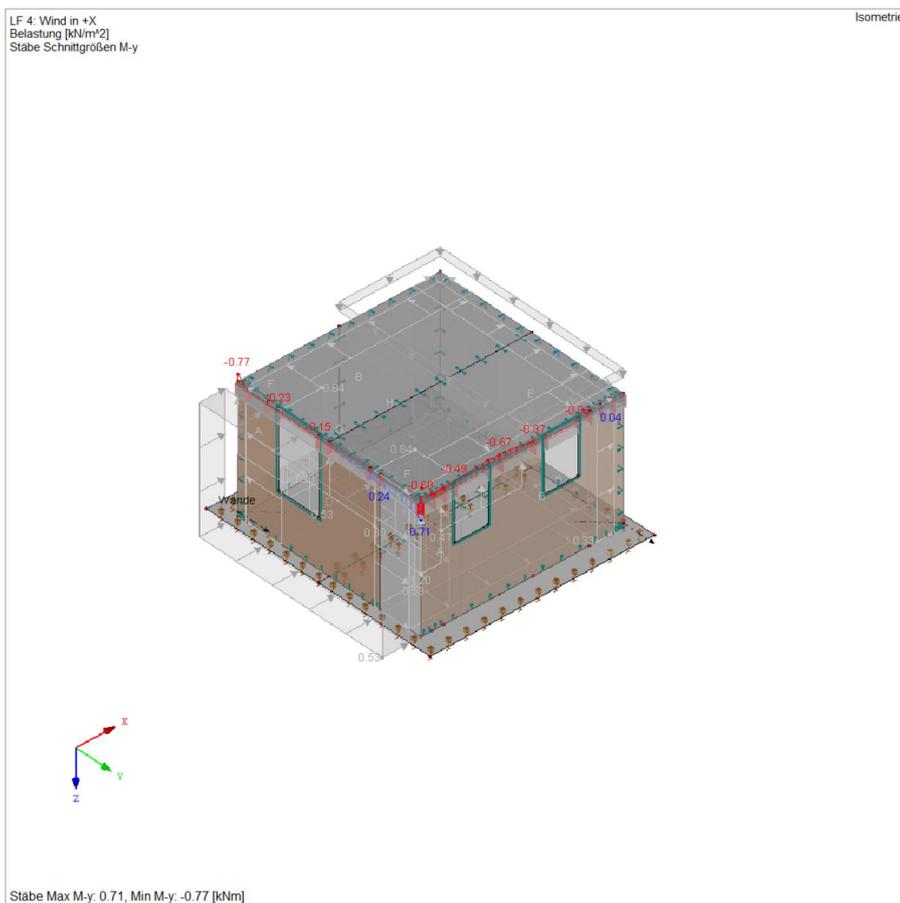
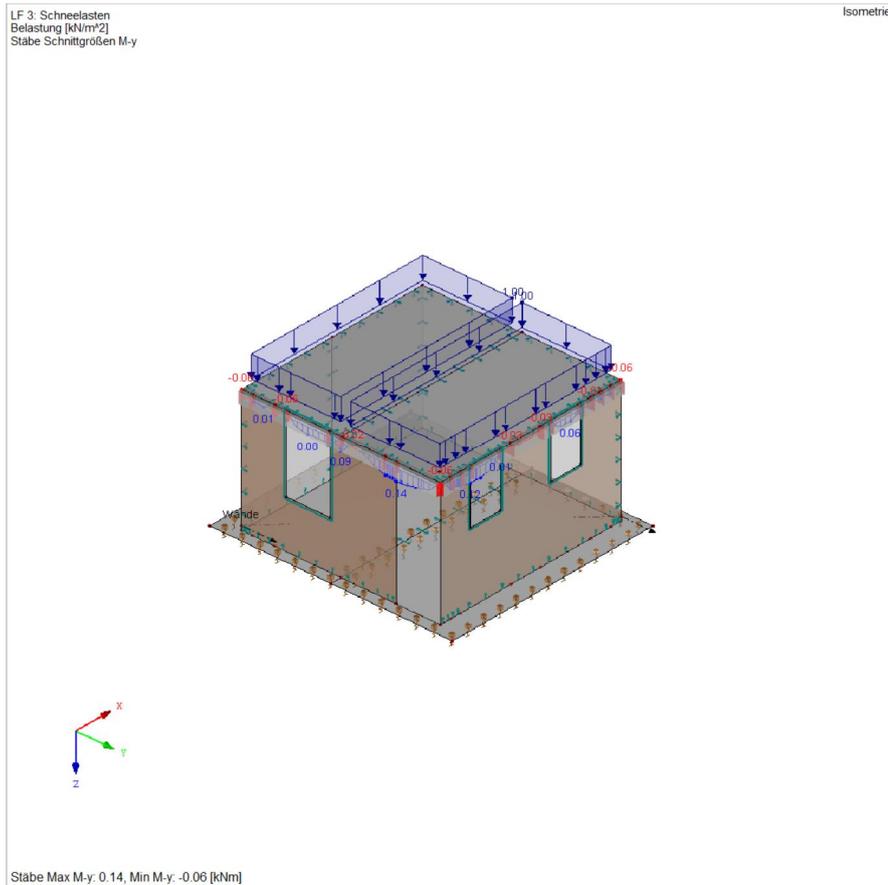
1.3 Materialien

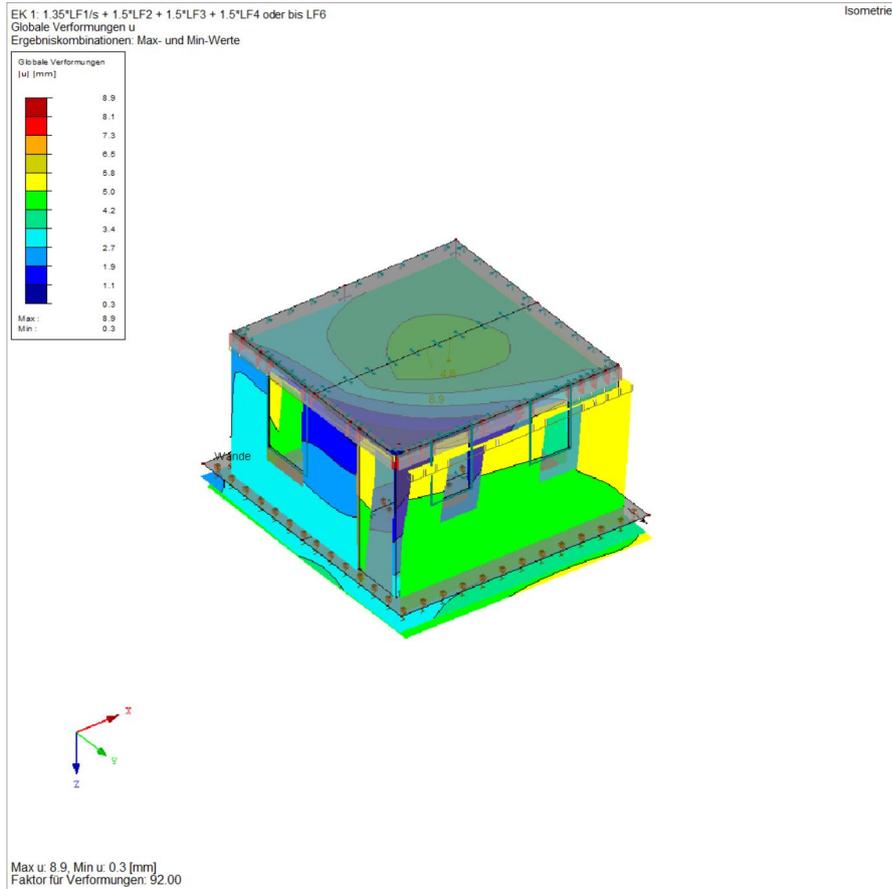
Mat. Nr.	Modul E [kN/cm ²]	Modul G [kN/cm ²]	Querdehnzahl n [-]	Spez. Gewicht g [kN/m ³]	Wärmedehnz. a [1/°C]	Teilsich.-Beiwert g_M [-]	Material-Modell
1	Beton C30/37 EN 1992-1-1:2004/A1:2014 3300.00	1375.00	0.200	25.00	1.00E-05	1.00	Isotrop linear elastisch
2	Baustahl S 235 EN 1993-1-1:2005-05 21000.00	8076.92	0.300	78.50	1.20E-05	1.00	Isotrop linear elastisch
3	Wand aus Betonsteinen DIN 1053-100 2784.00 Benutzerdefiniertes Material	1160.00	0.200	23.54	1.00E-05	1.25	Isotropes & Mauerwerk 2D...

1.3.11 Materialien - Materialmodell - Isotropes Mauerwerk 2D

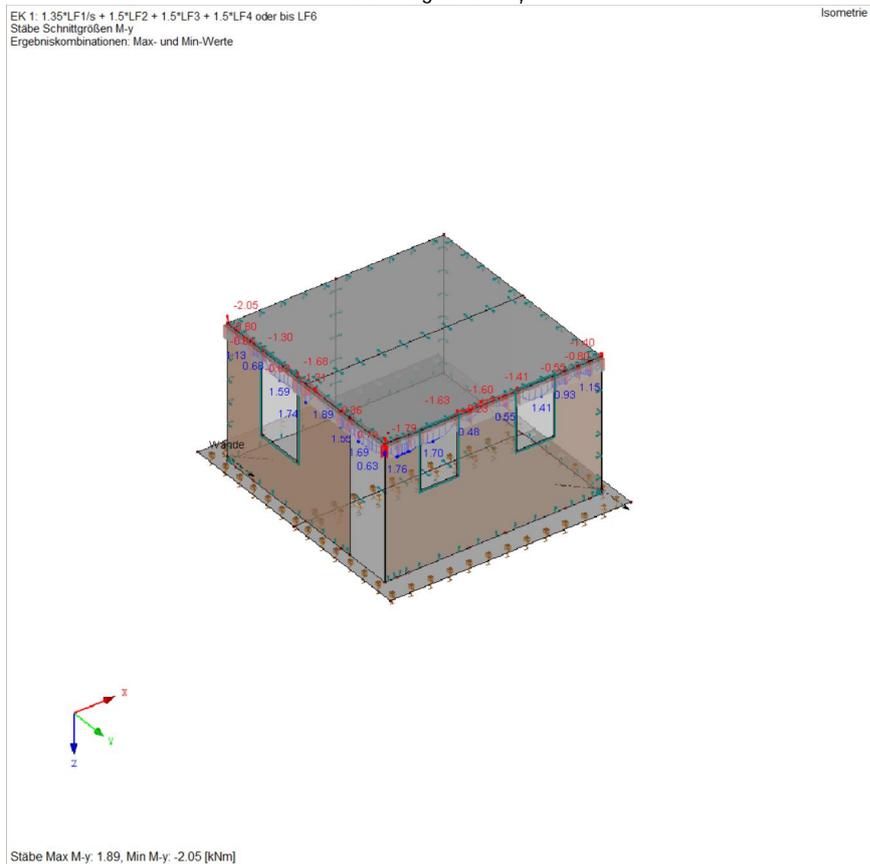
Mat. Nr.	Grenzzugspannungen [kN/cm ²]		Versteifungsfaktor C_H [-]
	$s_{x, \text{limit}}$	$s_{y, \text{limit}}$	
3	Wand aus Betonsteinen DIN 1053-100 - Nur linear elastisch 0.04		1.00E-04



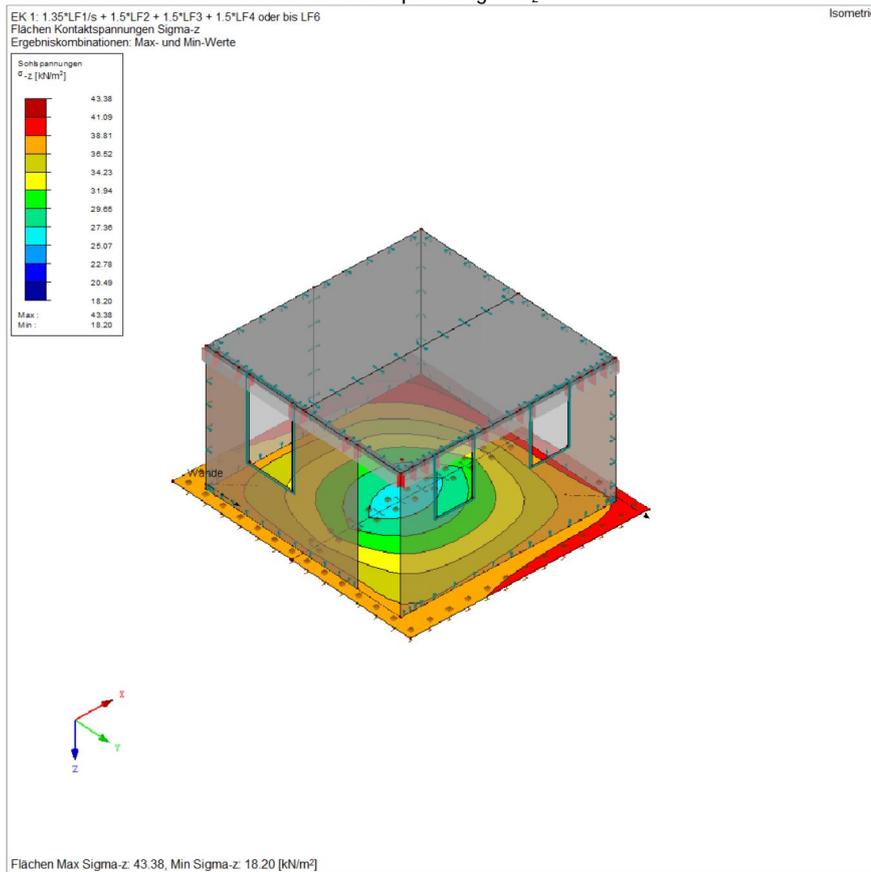




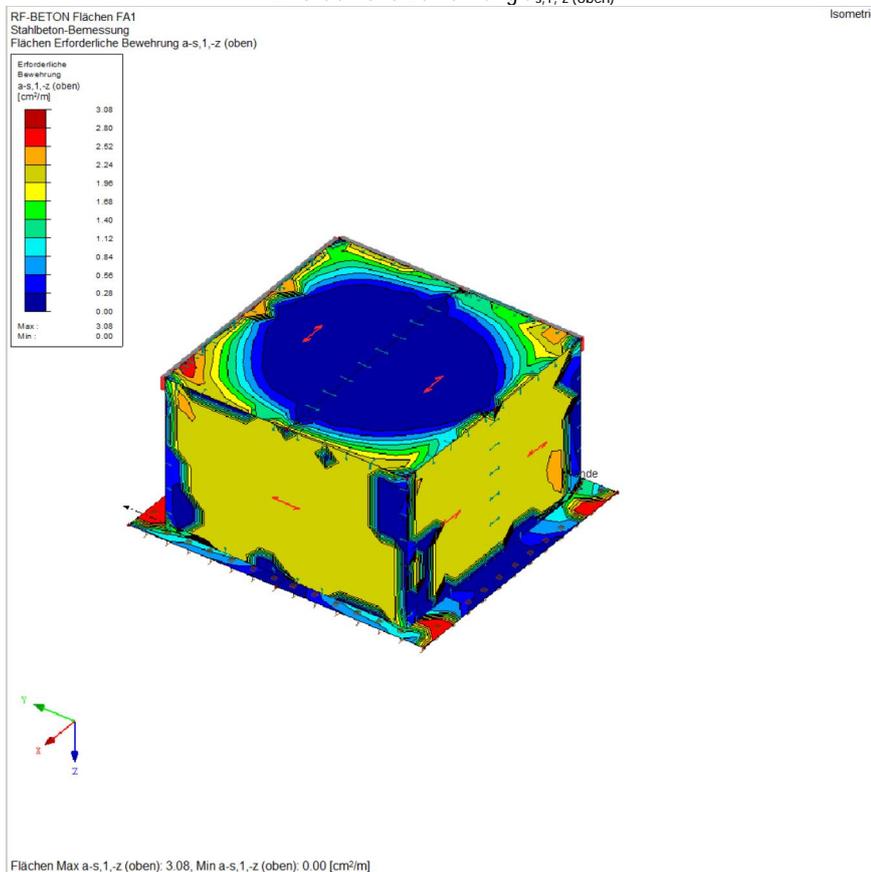
Schnittgrößen M_y



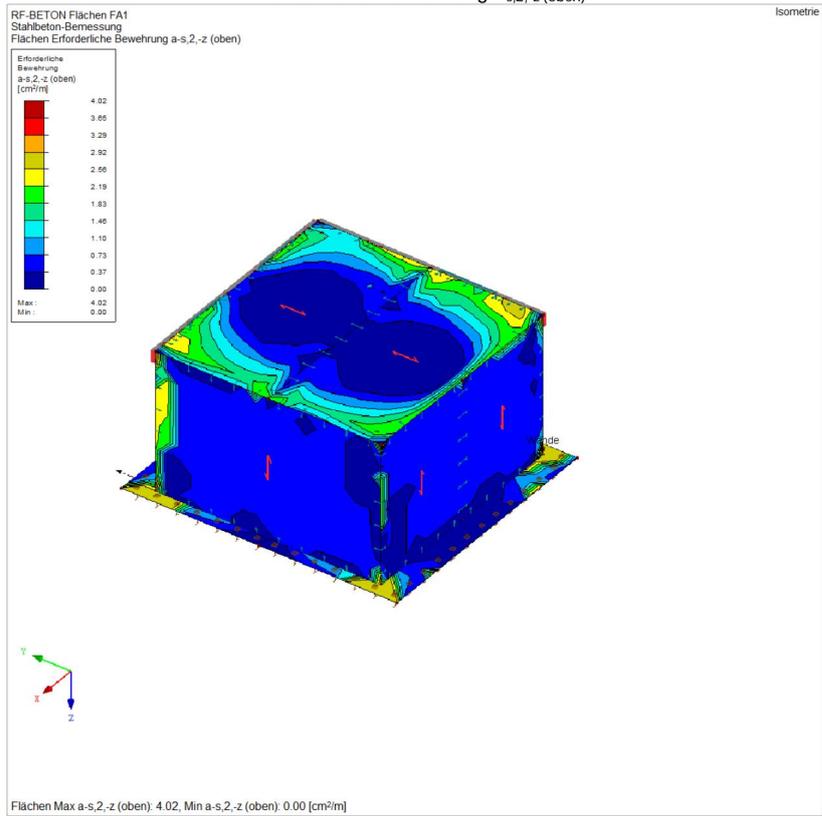
Sohlspannungen s_z



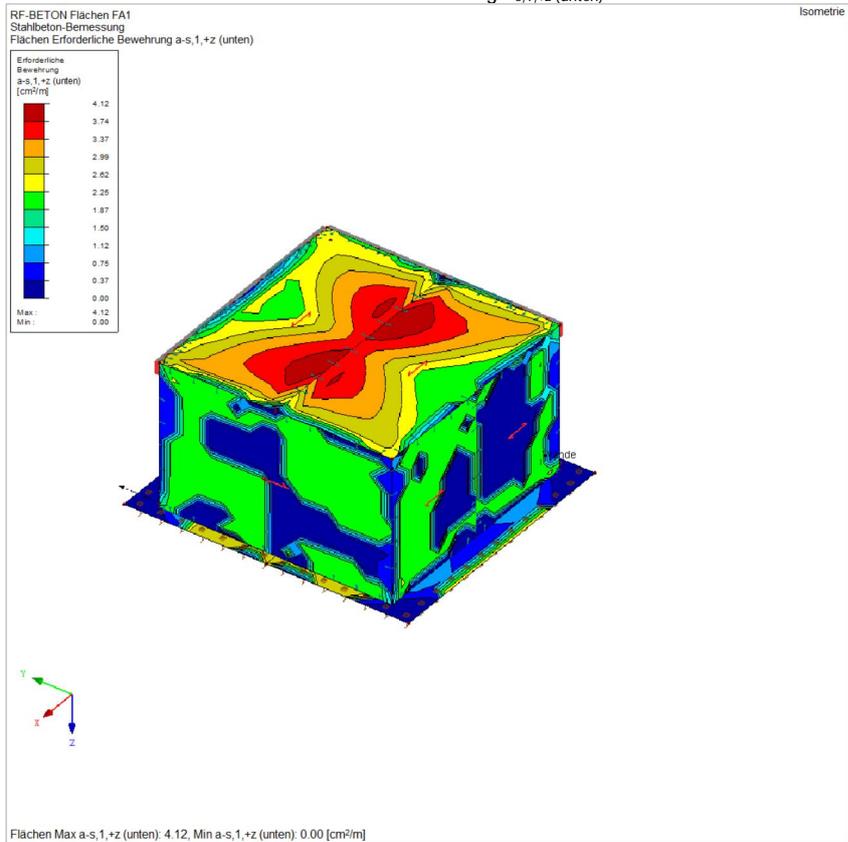
Erforderliche Bewehrung $a_{s,1,-z}$ (oben)



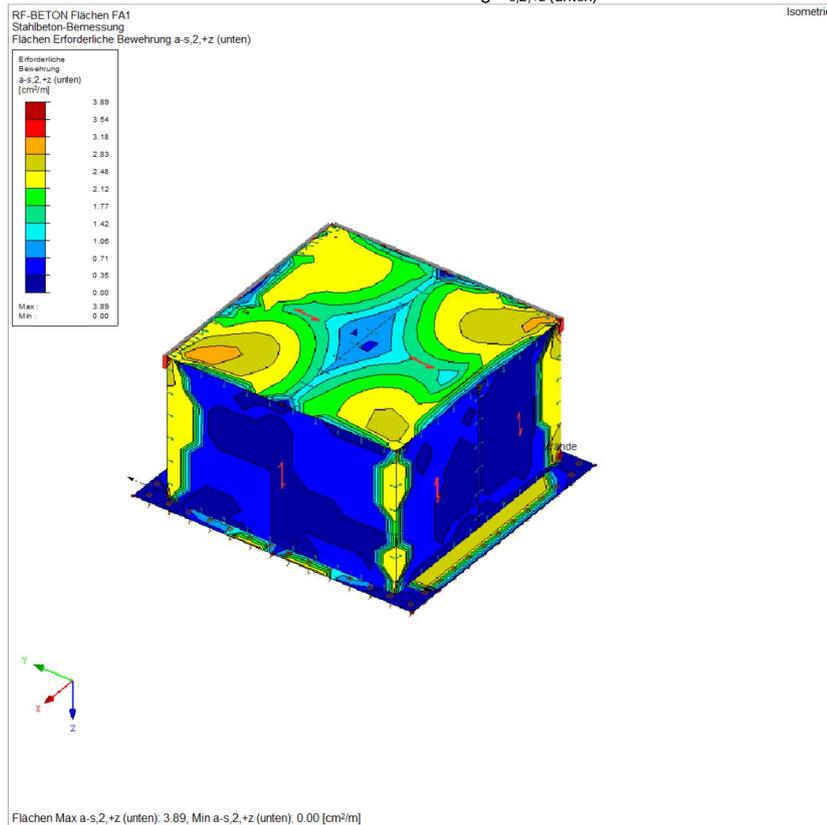
Erforderliche Bewehrung $a_{s,2,-z}$ (oben)



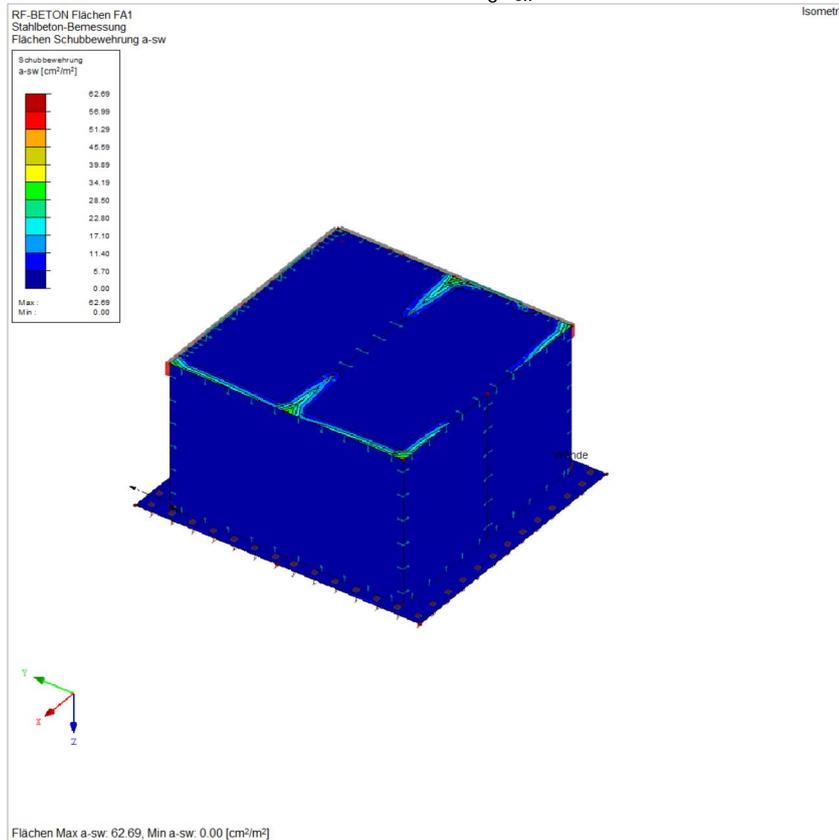
Erforderliche Bewehrung $a_{s,1,+z}$ (unten)

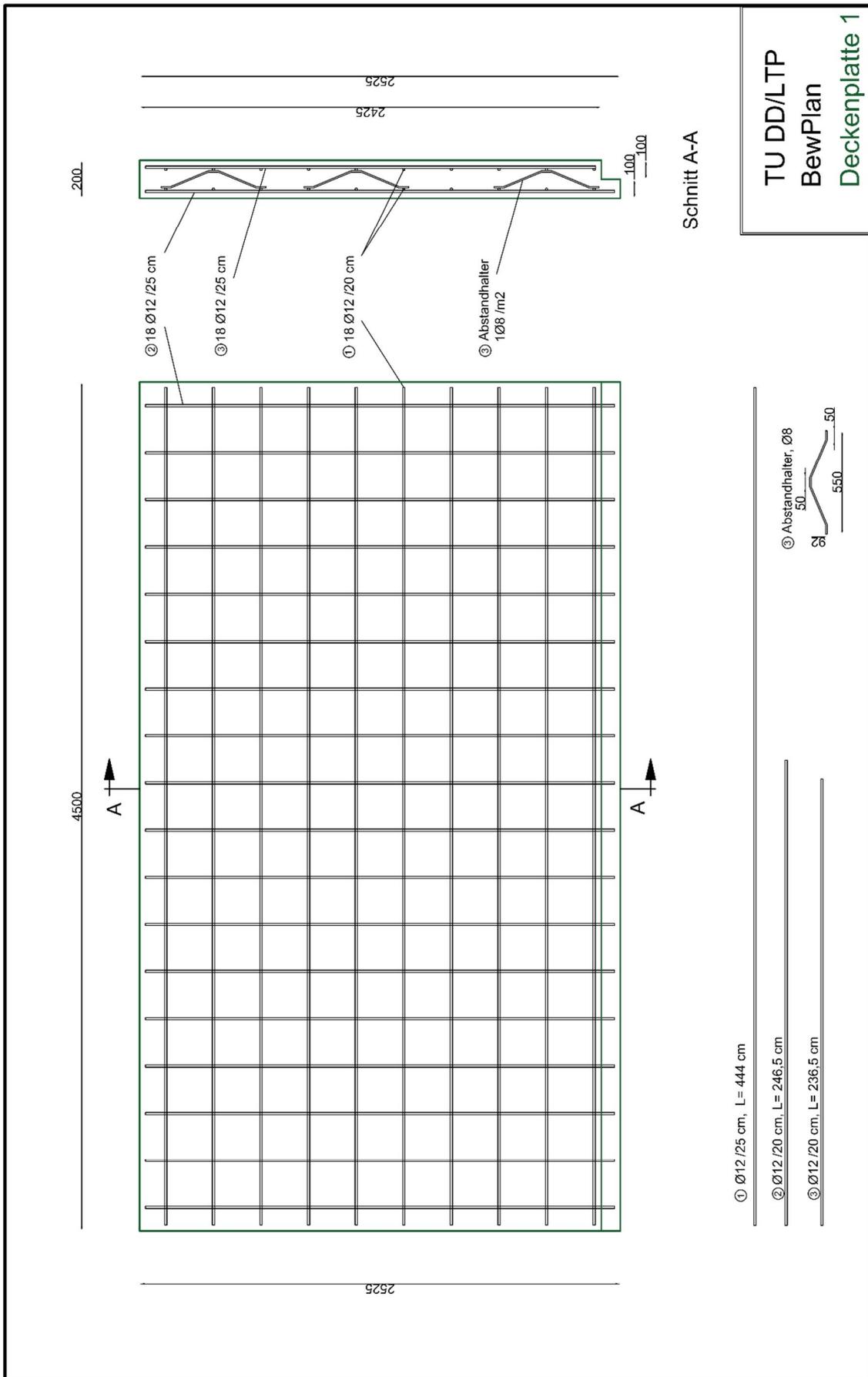


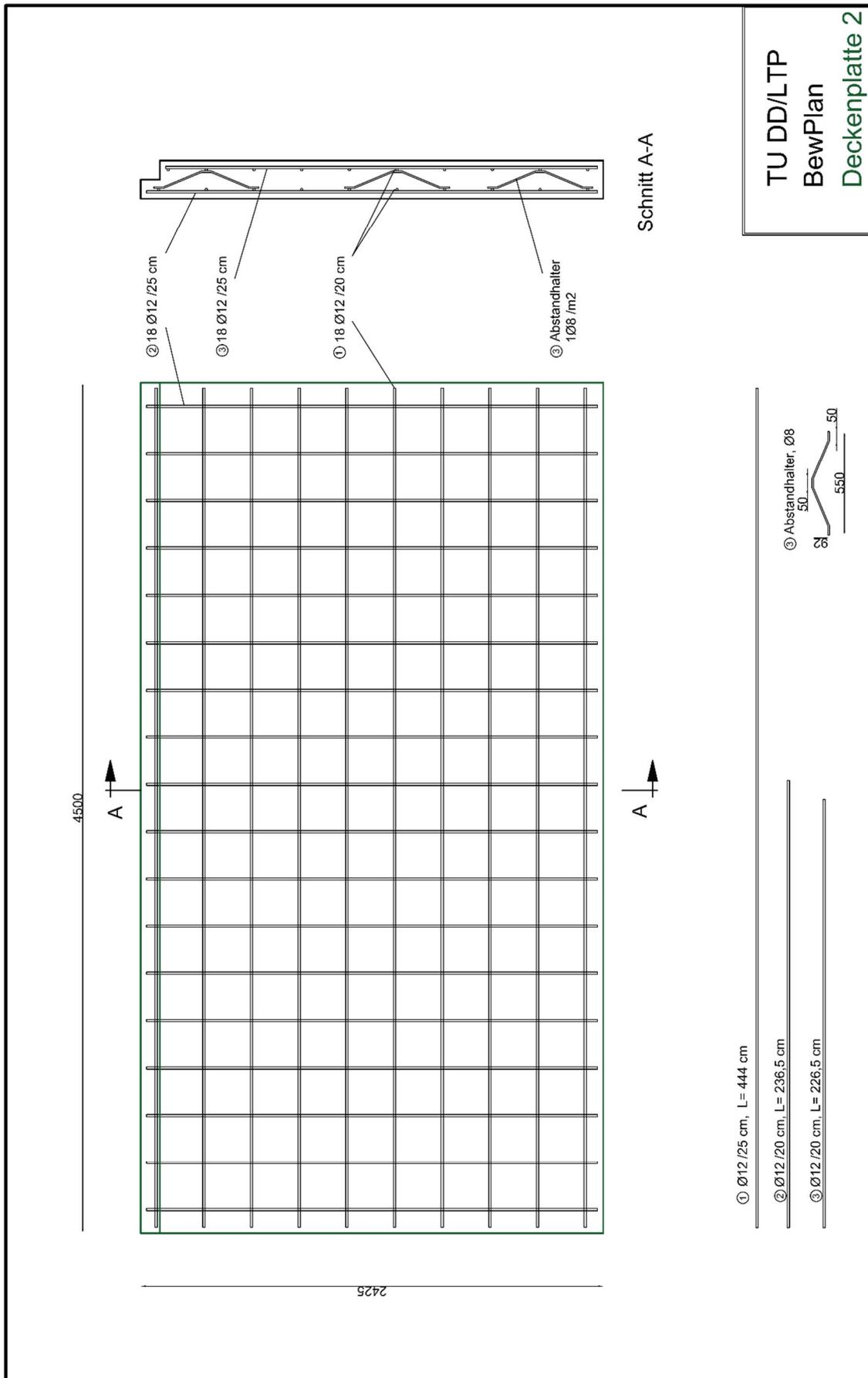
Erforderliche Bewehrung $a_{s,2,+z}$ (unten)

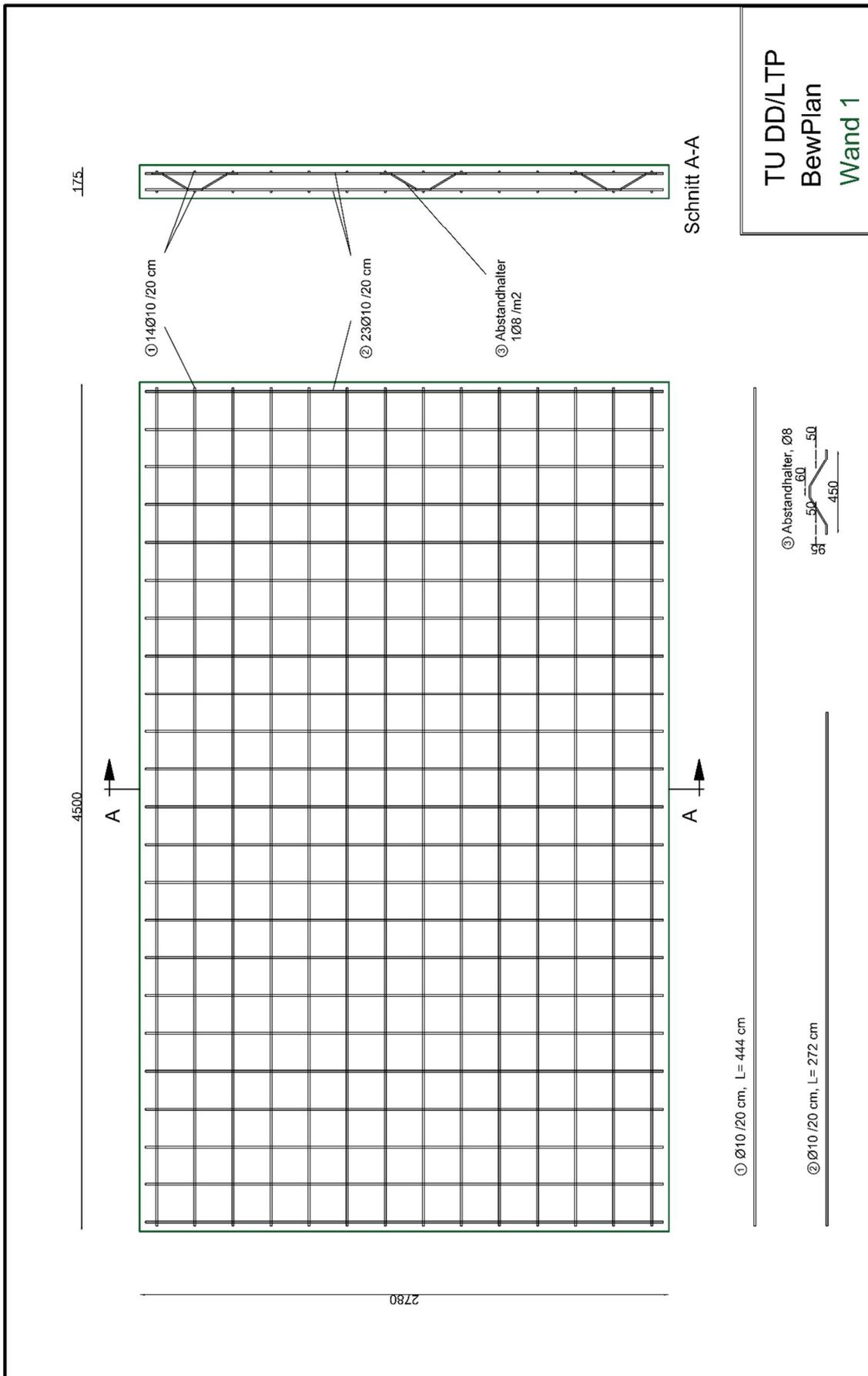


Schubbewehrung a_{sw}

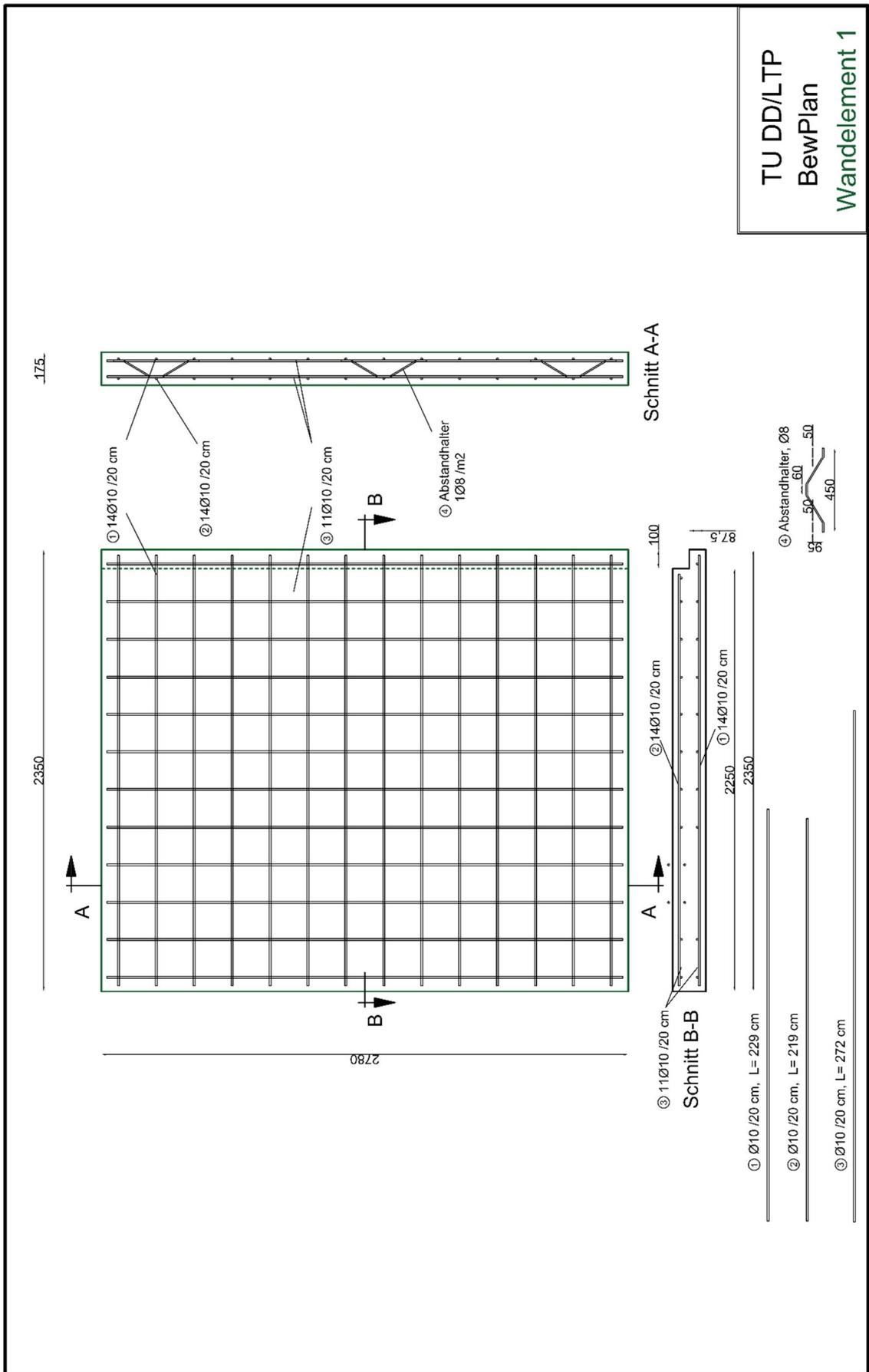




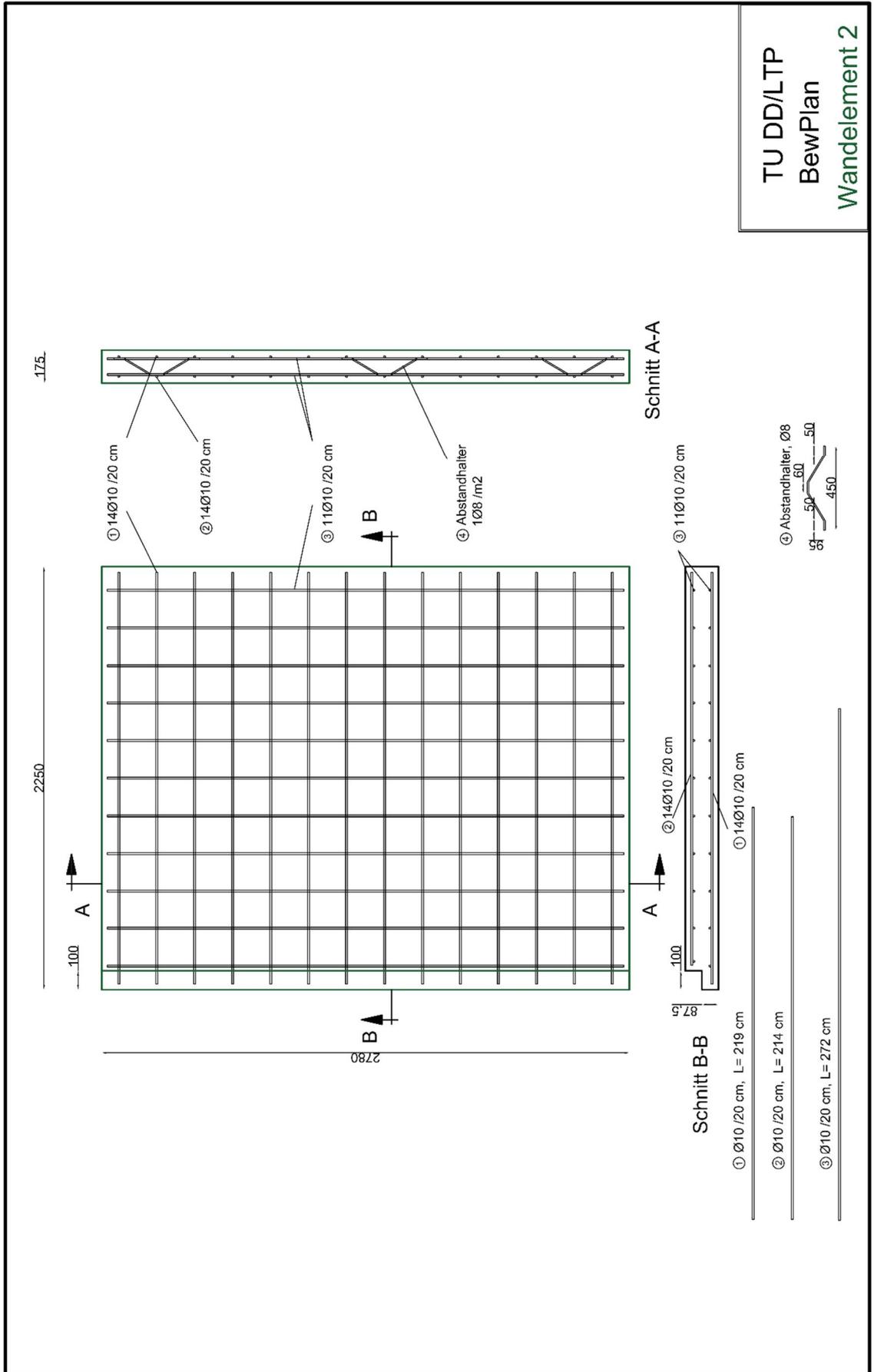


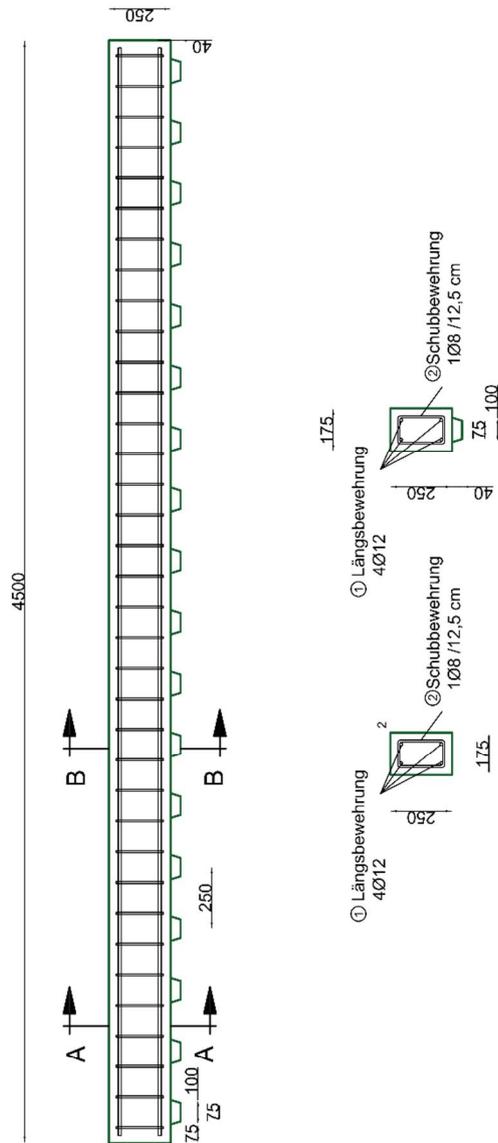


TU DD/LTP
BewPlan
Wandelement 1



TU DD/LTP
BewPlan
 Wandelement 2

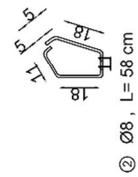




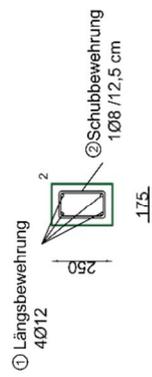
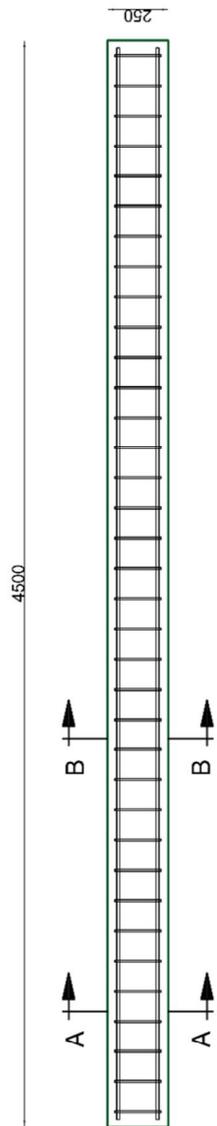
Schnitt B-B

Schnitt A-A

① Ø12, L = 444 cm

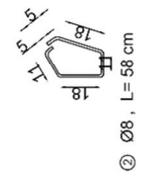


TU DD/LTP
 BewPlan
 Attiken

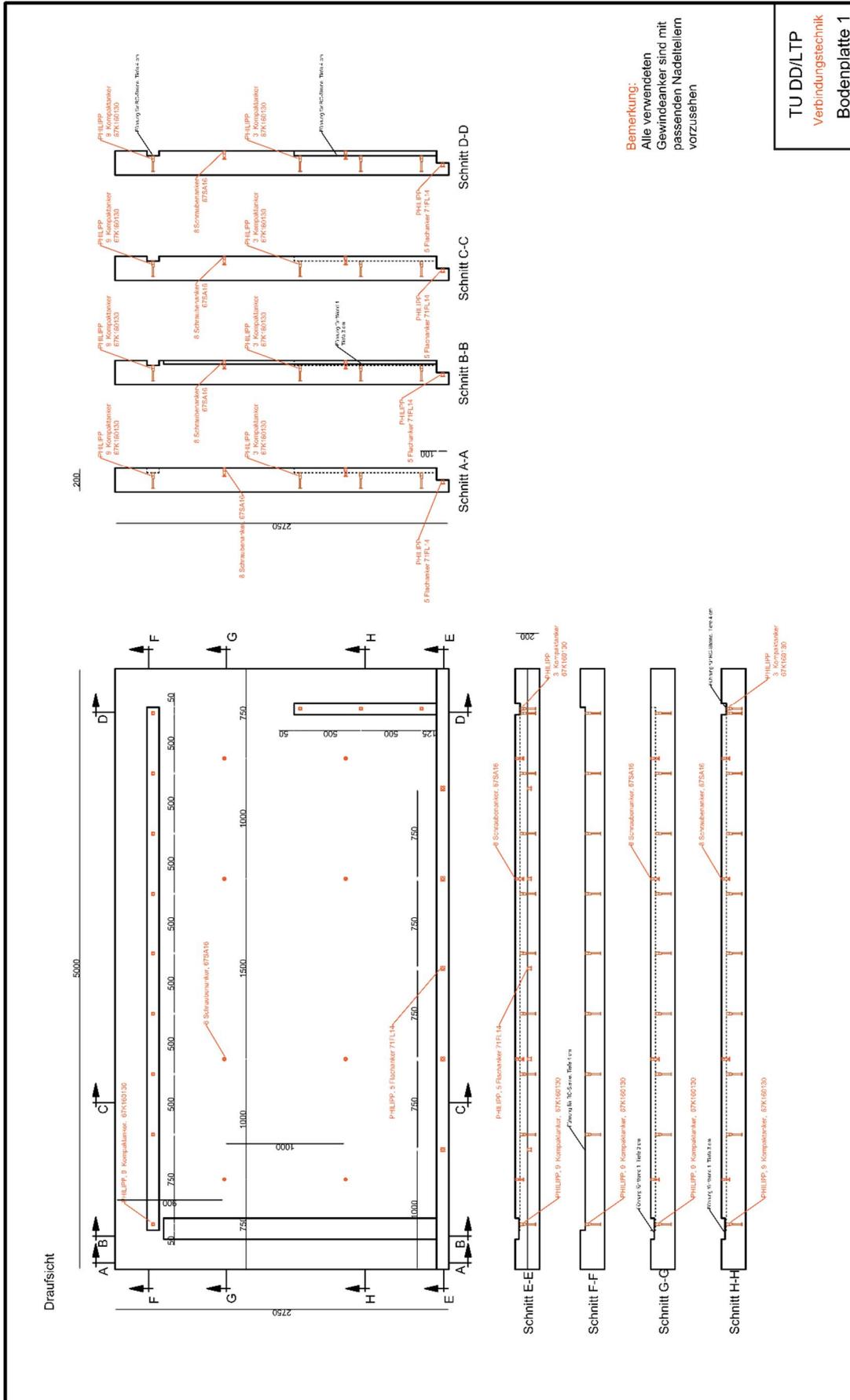


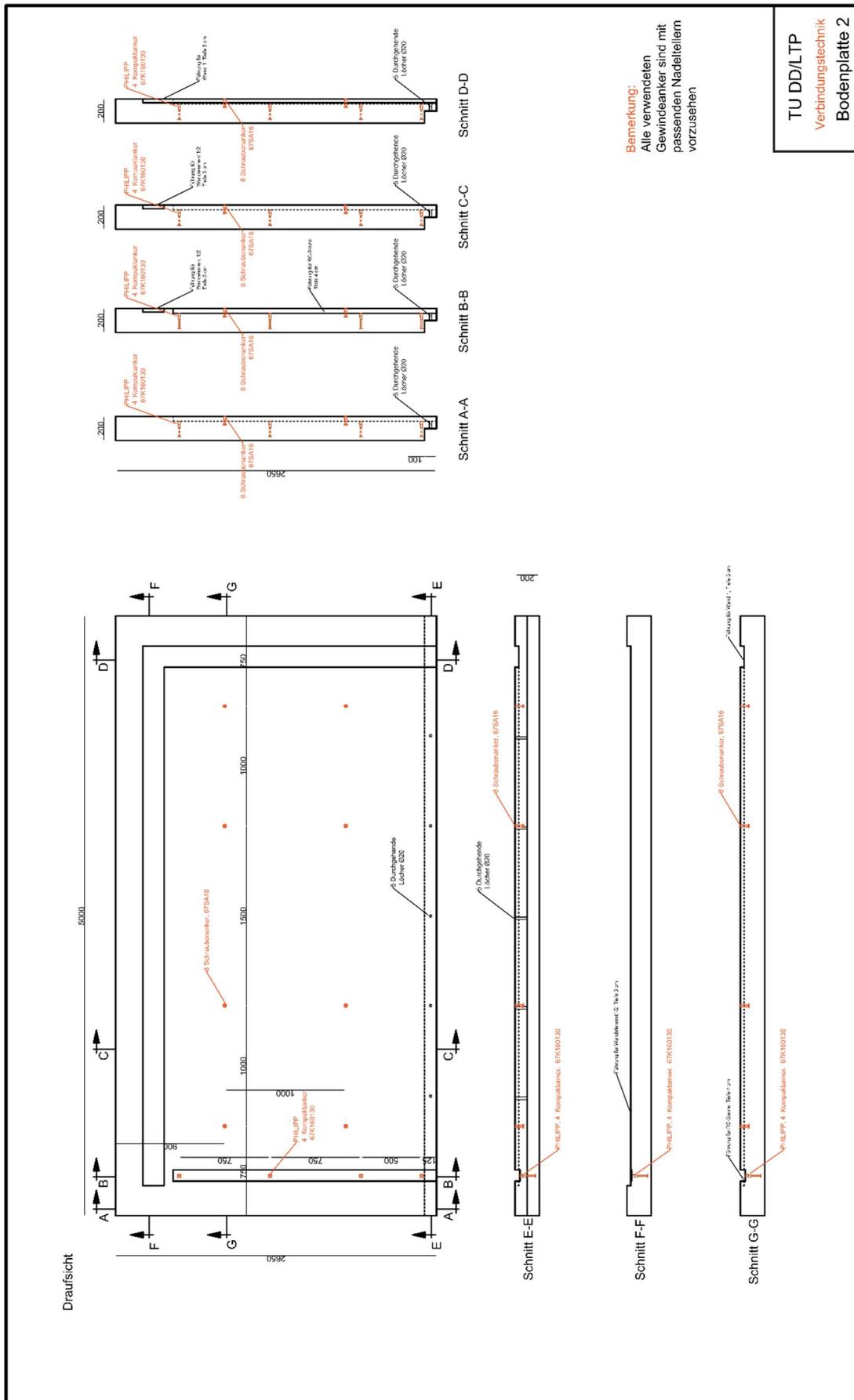
Schnitt A-A

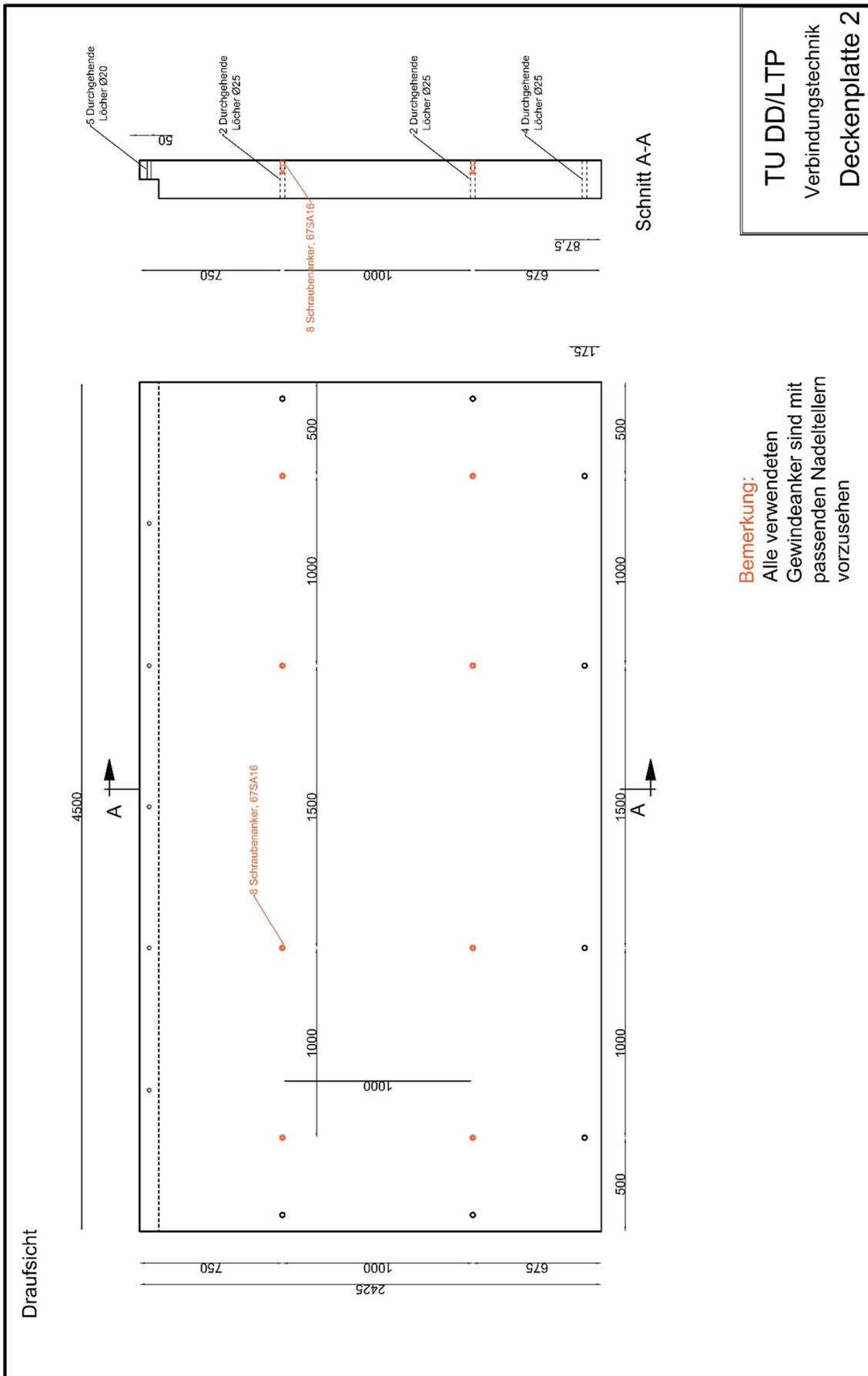
① Ø12, L = 444 cm

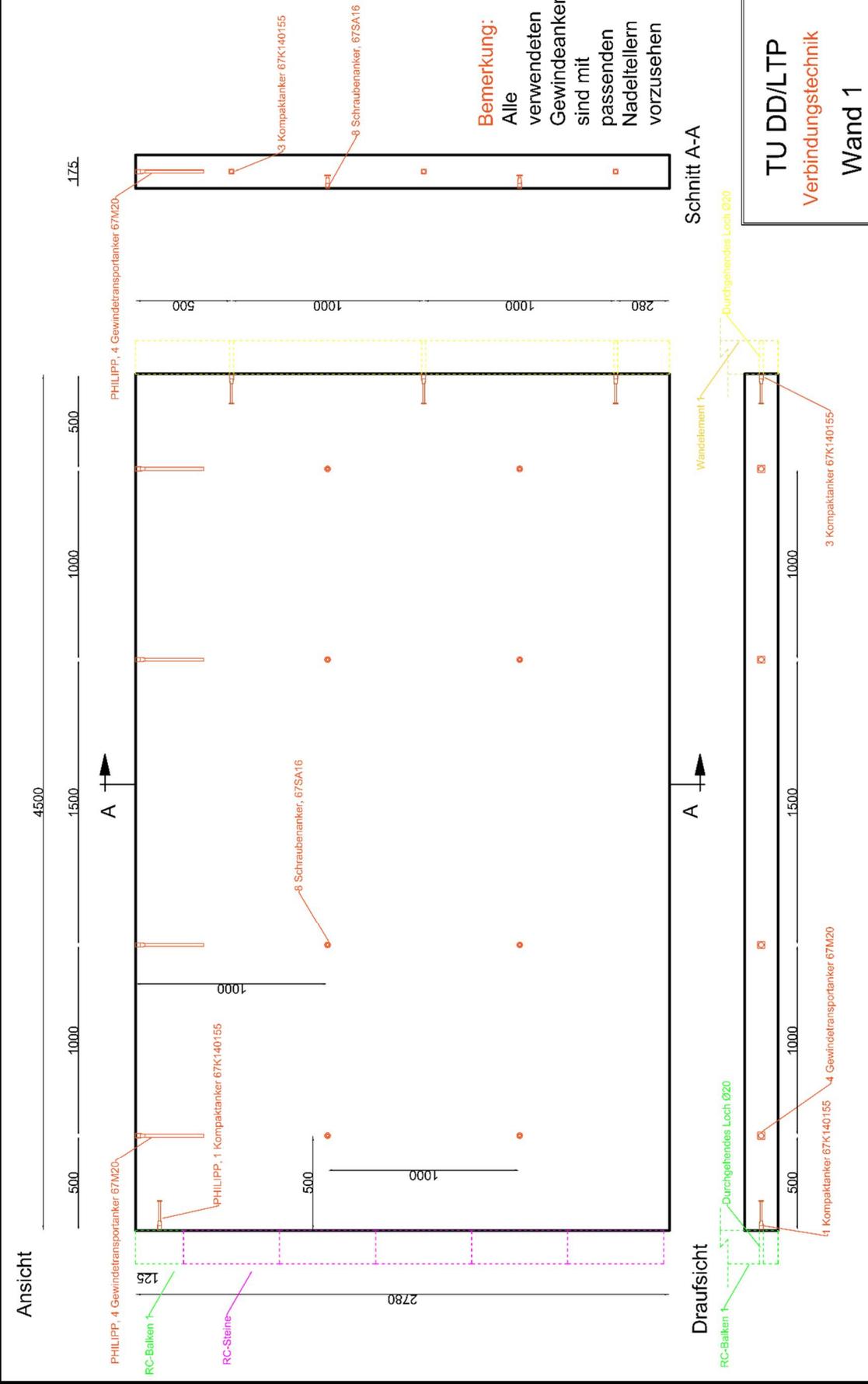


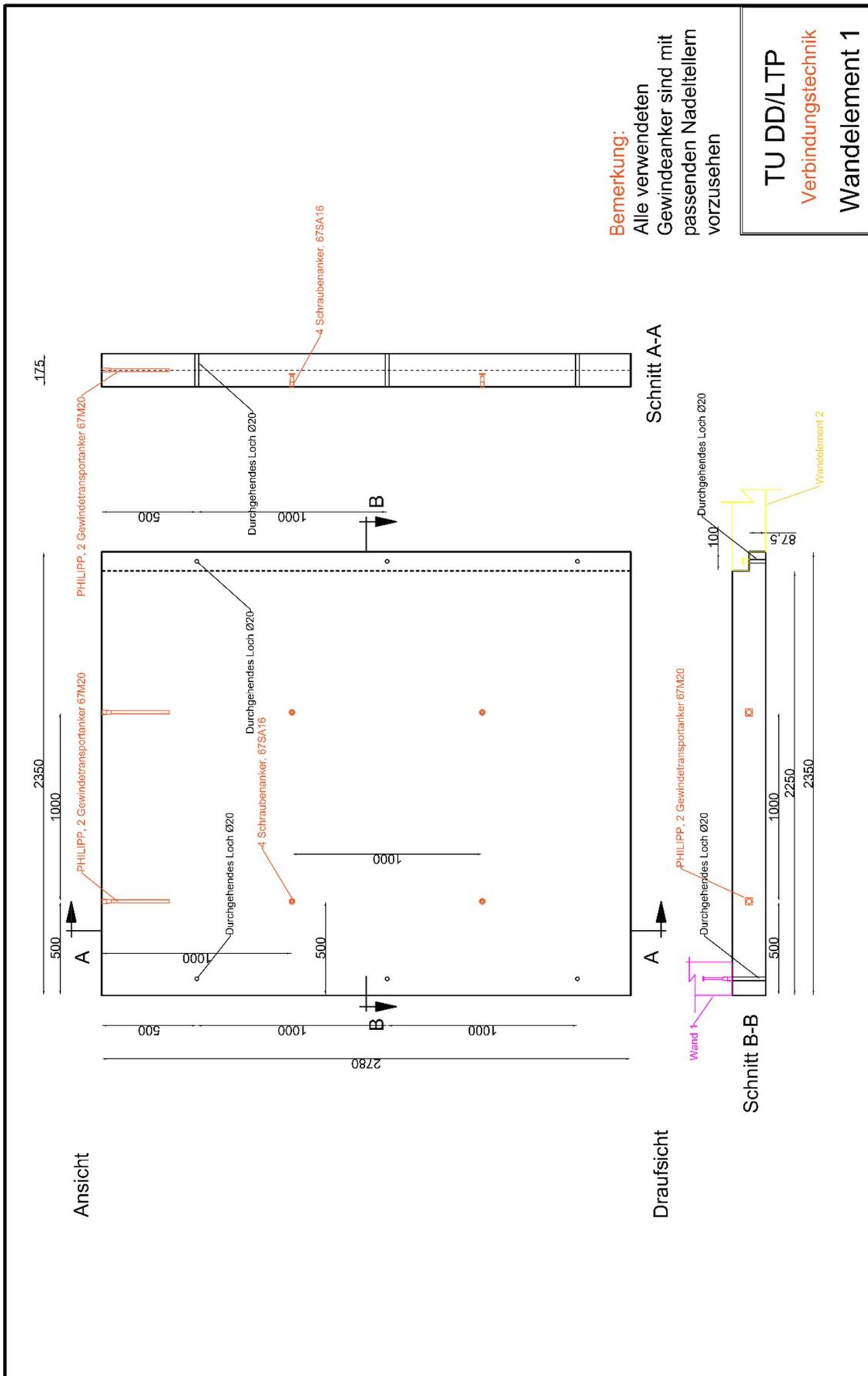
② Ø8, L = 58 cm

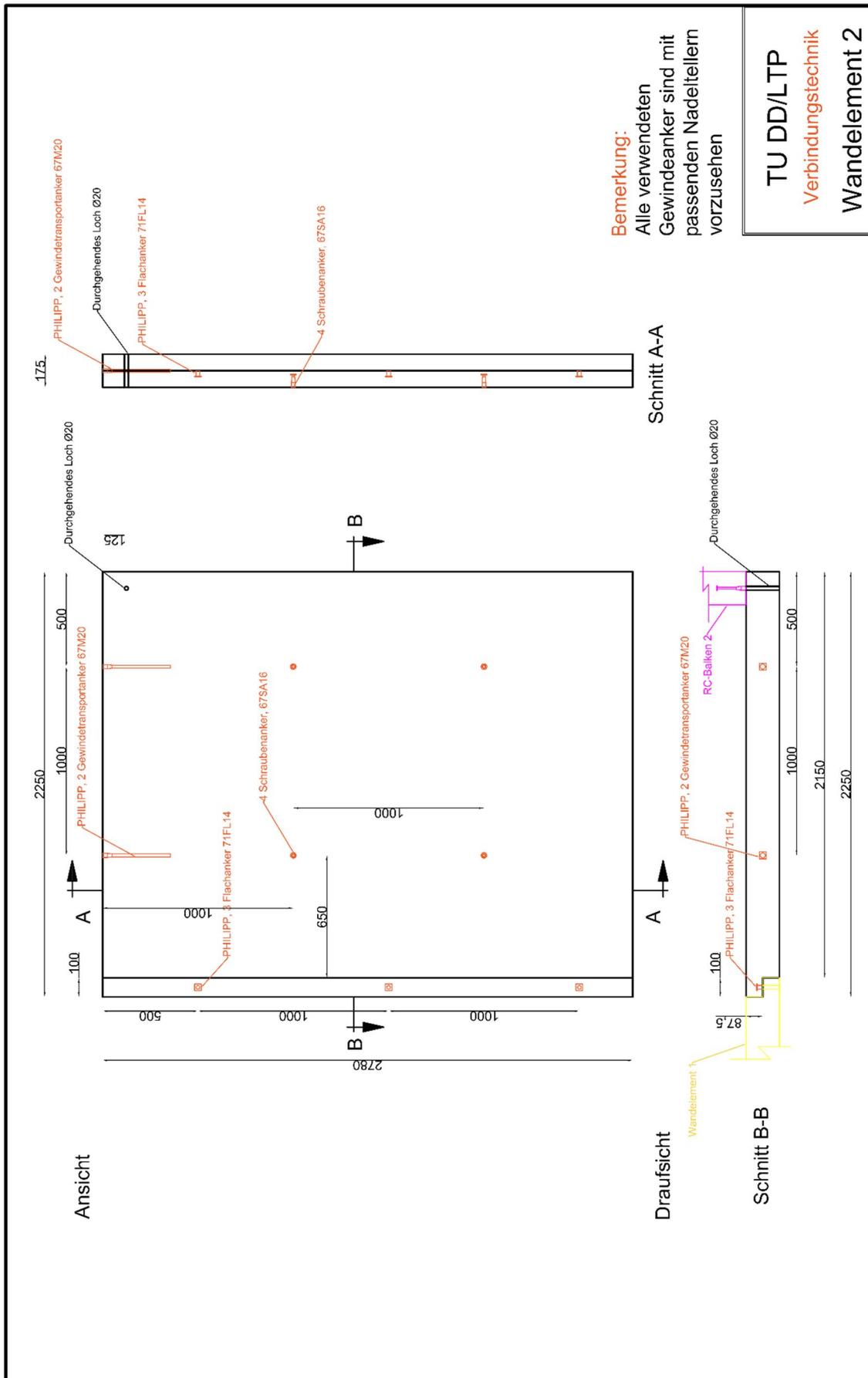


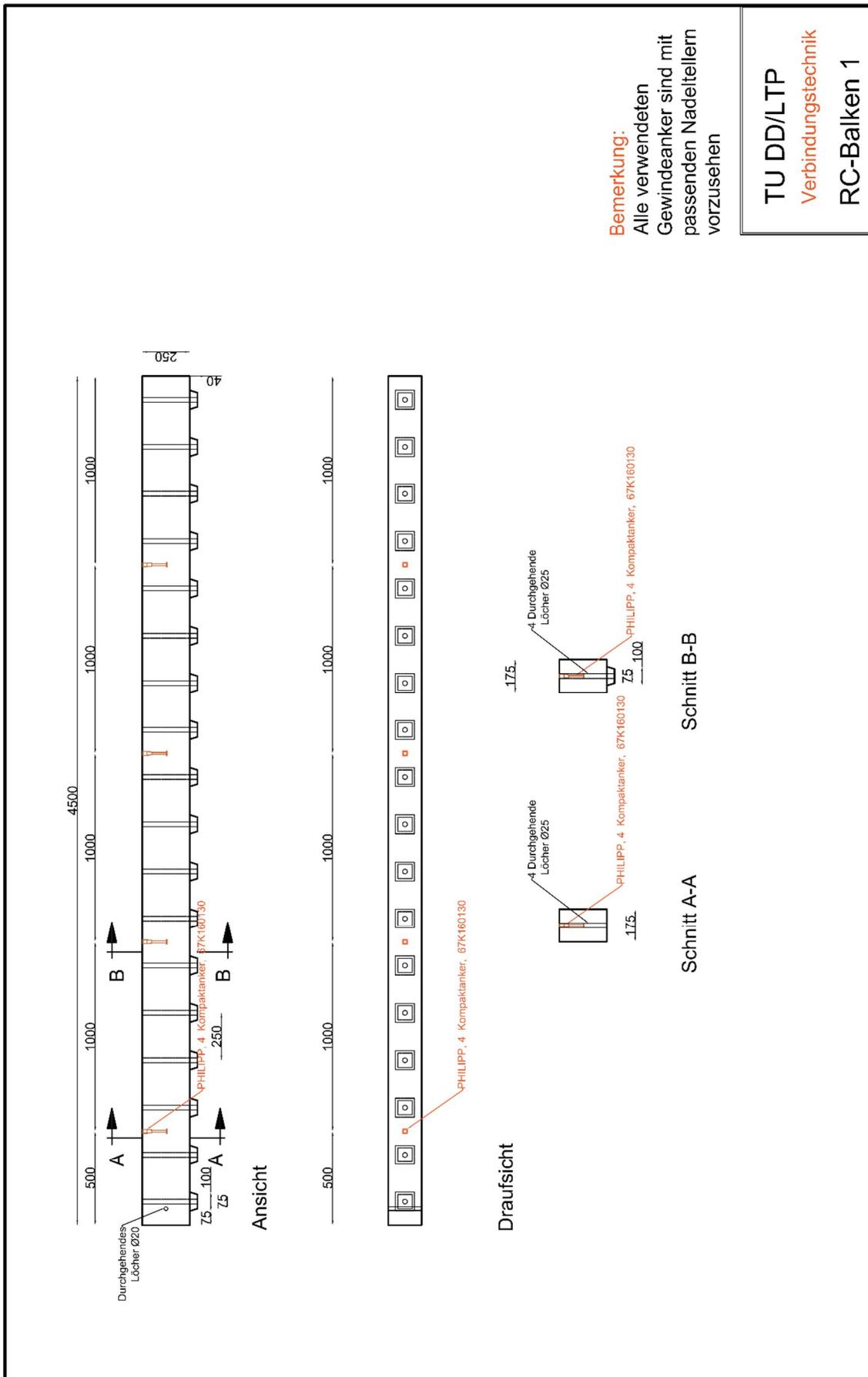


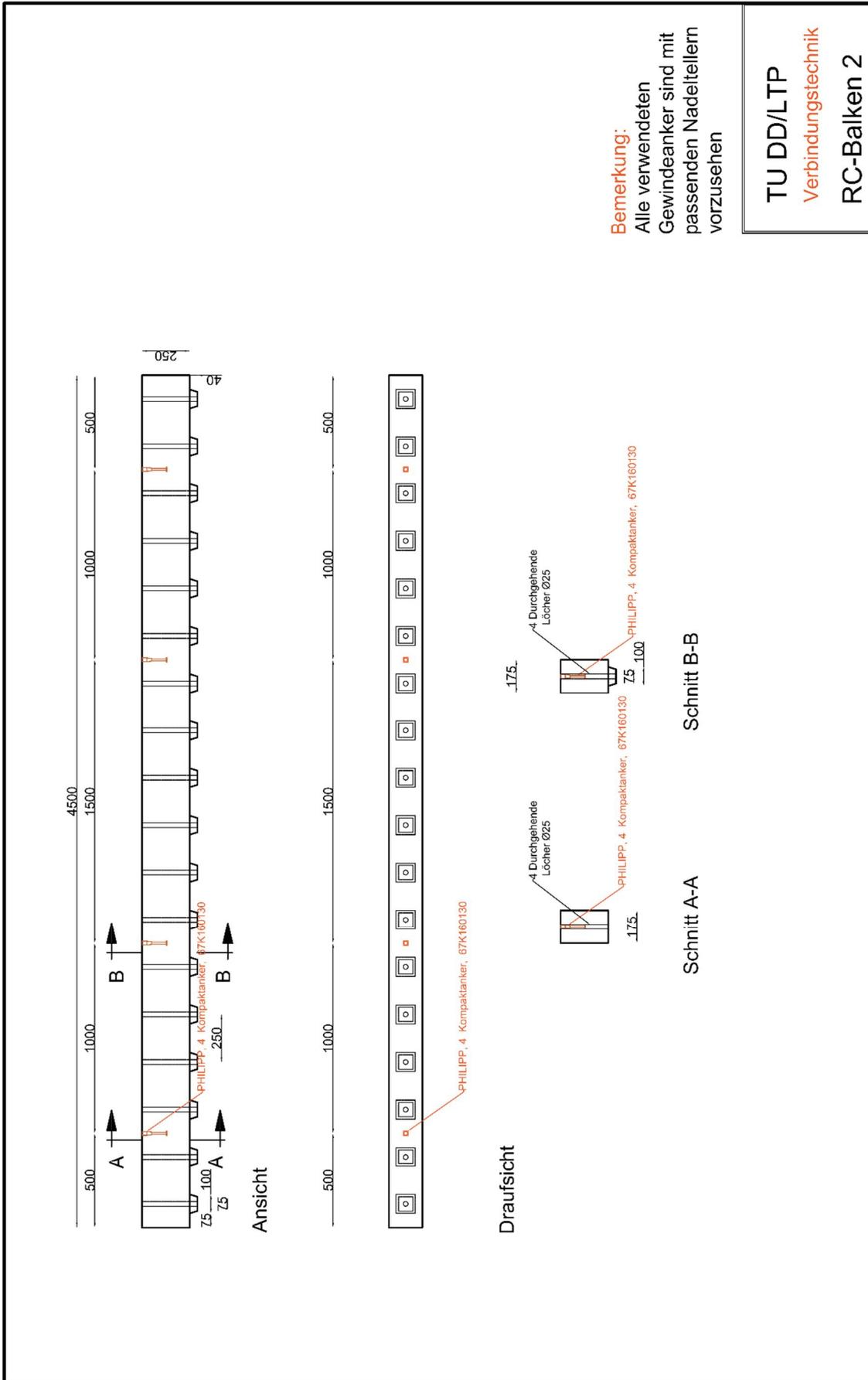


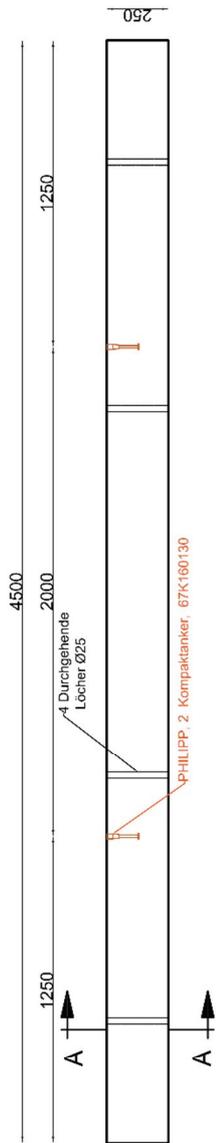




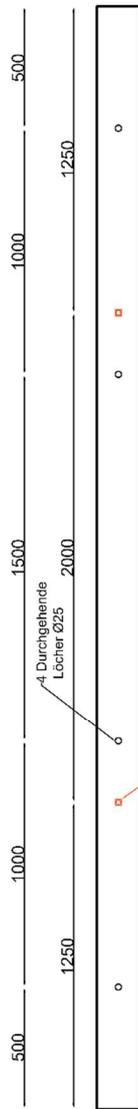








Ansicht



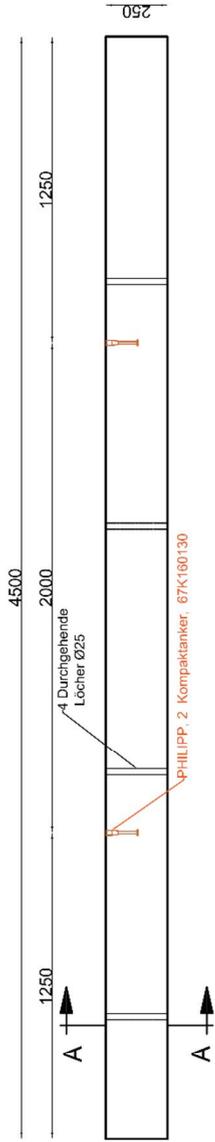
Draufsicht



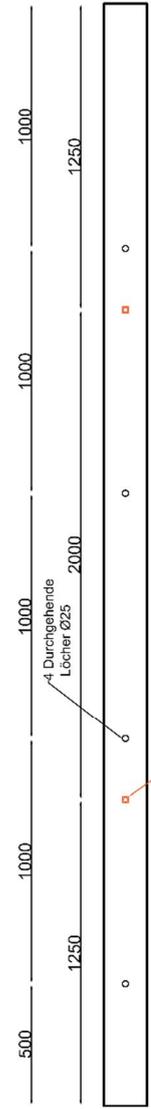
Schnitt A-A

Bemerkung:
 Alle verwendeten
 Gewindeanker sind mit
 passenden Nadeteilern
 vorzusehen

TU DD/LTP
 Verbindungstechnik
 Attiken 1/3/4



Ansicht



Draufsicht

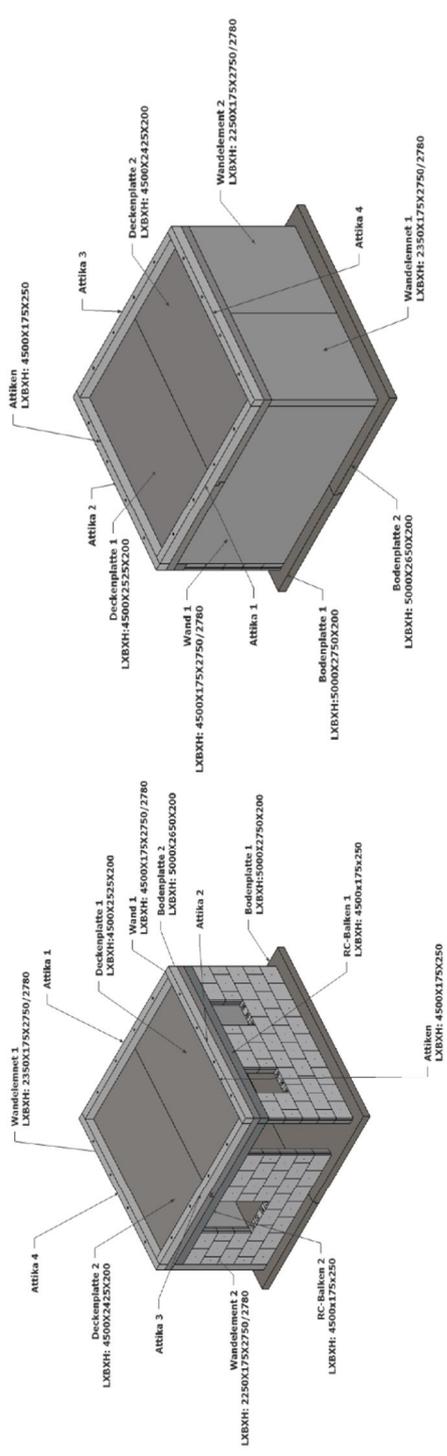


Schnitt A-A

Bemerkung:
 Alle verwendeten
 Gewindeanker sind mit
 passenden Nadelteilern
 vorzusehen

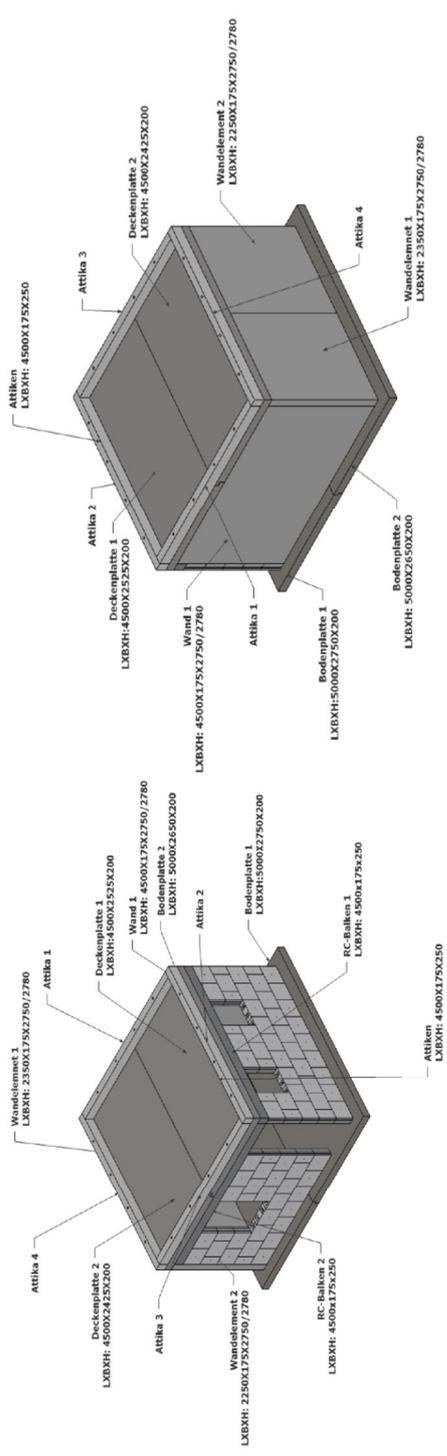
18.4 Anhang 4 - Mengenermittlung

RC WE Modul- Mengen/RC-Beton



Ansicht 1

Ansicht 2

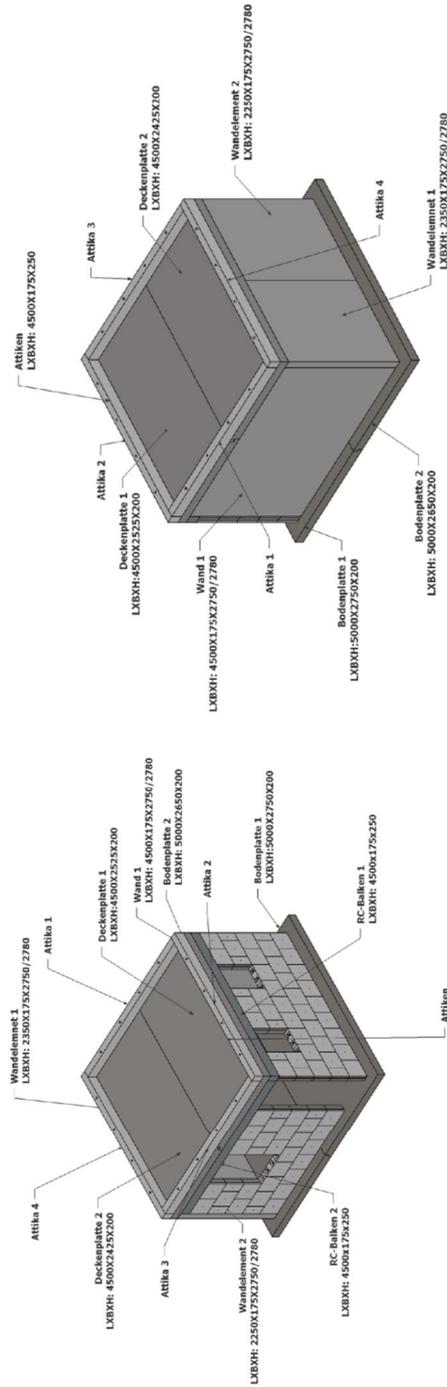


Ansicht 2

Pos	Bauteil	Abmessungen [mm]			Anzahl	Volumen/Stück [m³]	Gewicht/Stück [kg]	Gesamtvolumen [m³]	Gesamtgewicht [kg]
		L	B	H					
1	Wand1	4500	175	2780	1	2,19	5035	2,19	5035
2	Wandelement1	2350	175	2780	1	1,14	2630	1,14	2630
3	Wandelement2	2250	175	2780	1	1,09	2518	1,09	2518
4	Bodenplatte 1	5000	2750	200	1	2,75	6325	2,75	6325
5	Bodenplatte 2	5000	2650	200	1	2,65	6095	2,65	6095
6	Deckenplatte 1	4500	2425	200	1	2,18	5020	2,18	5020
7	Deckenplatte 2	4500	2525	200	1	2,27	5227	2,27	5227
8	RC Balken1+2	4500	175	250	2	0,20	453	0,39	906
9	RC Attiken 1-4	4500	175	500	4	0,20	453	0,79	1811
10	RC-Betonsteine	500	175	500	61	0,04	101	2,67	6138
11	RC-Betonsteine	250	175	500	14	0,02	50	0,31	704
Summe								18	42408

TU Dresden
 Fakultät Architektur
 Lehrstuhl Tragwerksplanung

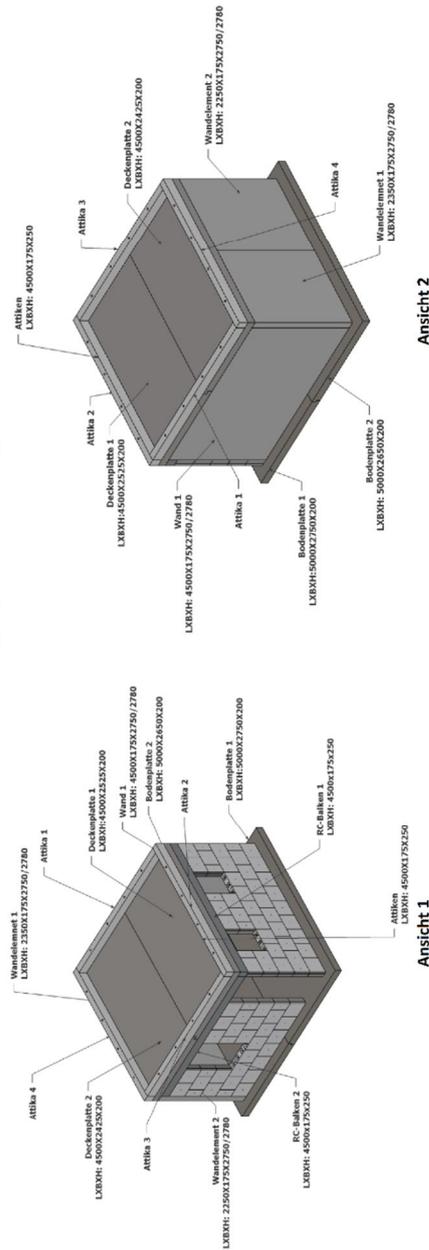
RC WE Modul- Mengen/Bewehrungsstahl



Pos	Bauteil	Abmessungen [mm]			Anzahl	Bewehrungsmengen [kg]			Gewicht Bewehrung Ø12 [kg]	
		L	B	H		Ø 8	Ø 10	Ø 12		
1	Wand1	4500	175	2780	1	6	155			
2	Wandelement1	2350	175	2780	1	3	78			
3	Wandelement2	2250	175	2780	1	3	78			
4	Bodenplatte 1	5000	2750	200	1	6	207		207	
5	Bodenplatte 2	5000	2650	200	1	6	207		207	
6	Deckenplatte 1	4500	2425	200	1	6	160		160	
7	Deckenplatte 2	4500	2525	200	1	6	160		160	
8	RC Balken1+2	4500	175	250	2	9	16		32	
9	RC Attiken 1-4	4500	175	250	4	9	16		64	
10	RC-Betonsteine	500	175	500	61					
11	RC-Betonsteine	250	175	500	14					
Summe [kg]								90	311	830

TU Dresden
 Fakultät Architektur
 Lehrstuhl Tragwerksplanung

RC WE Modul- Mengen/ Verbindungstechnik

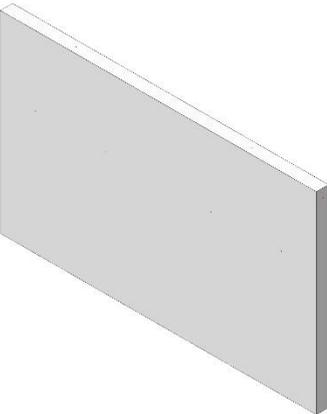
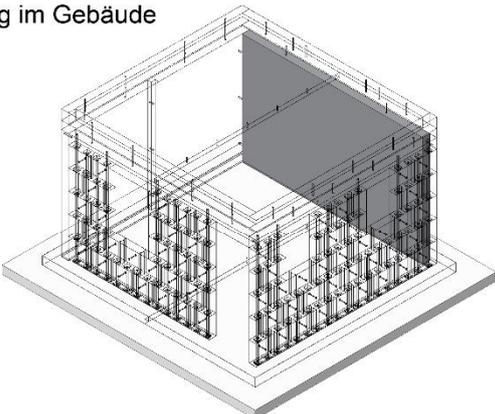
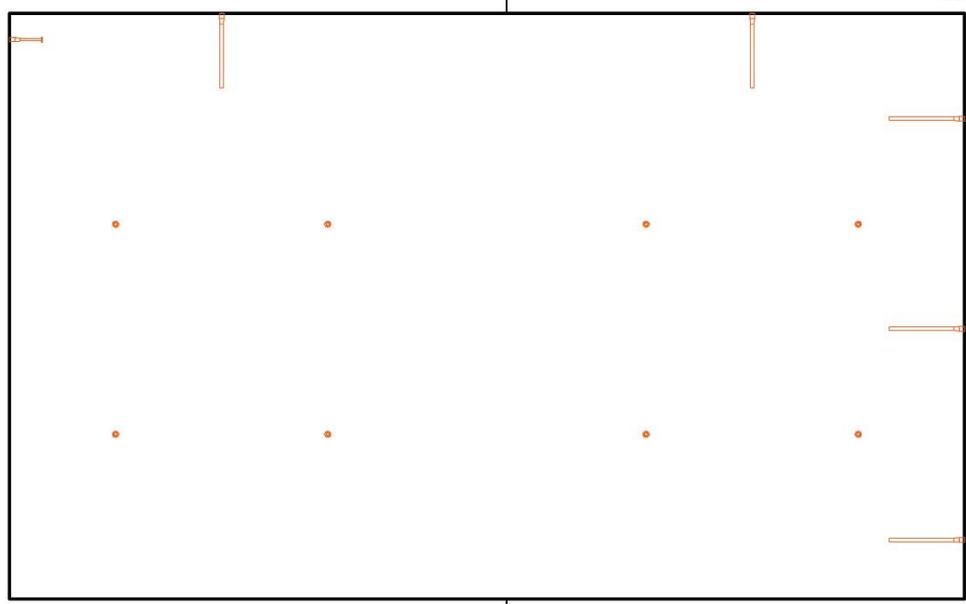
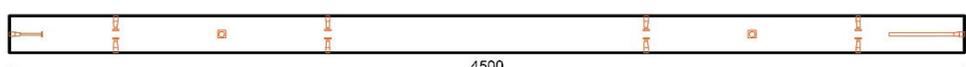


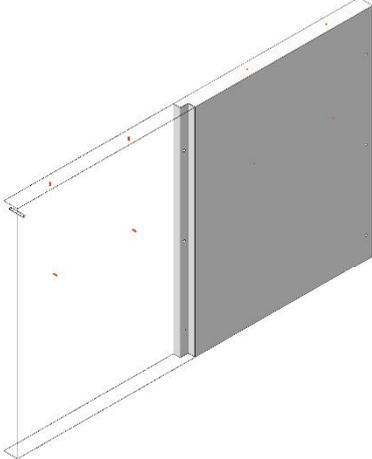
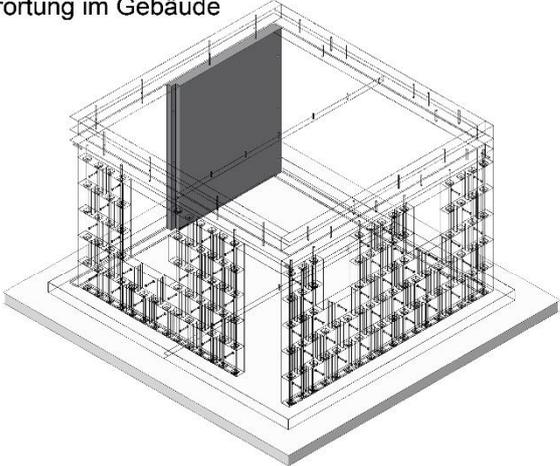
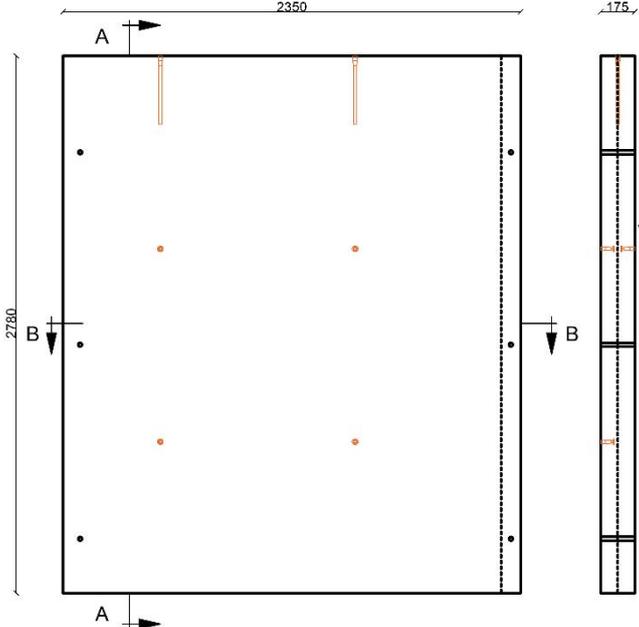
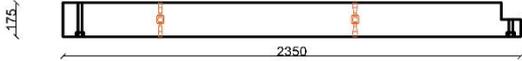
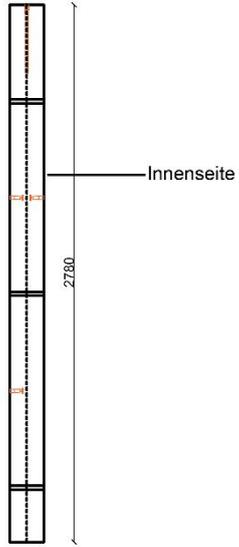
Bemerkung:

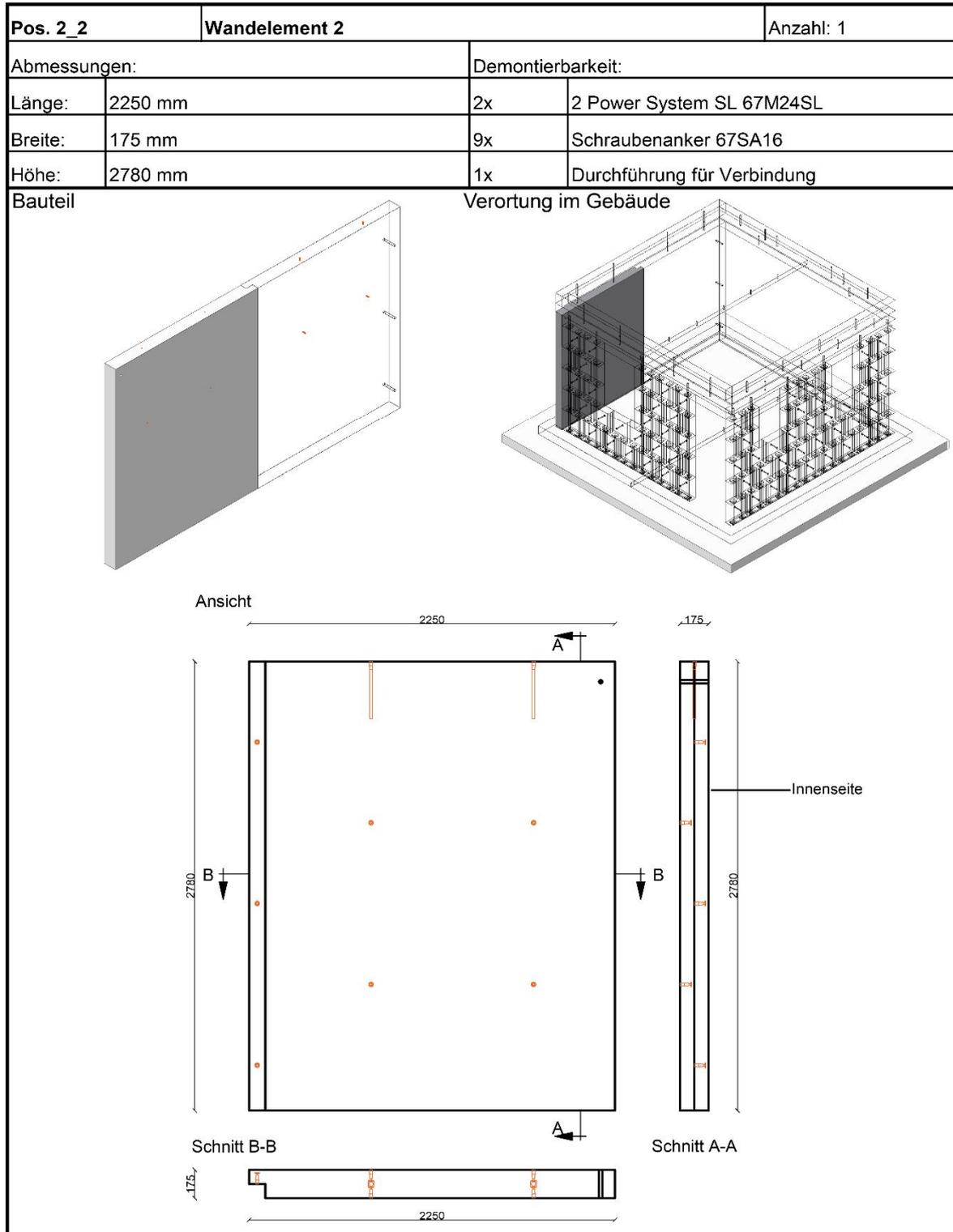
Alle verwendeten Gewindeanker sind mit passenden Nadeiteilern vorzusehen und entsprechend deren Einbauanleitungen durchzuführen

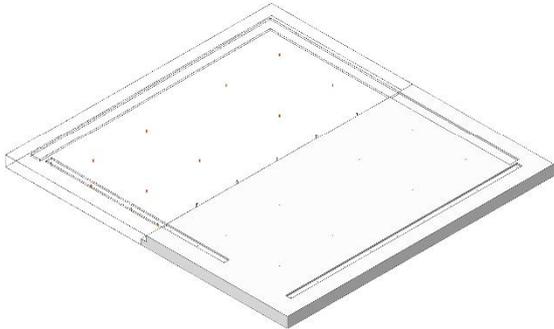
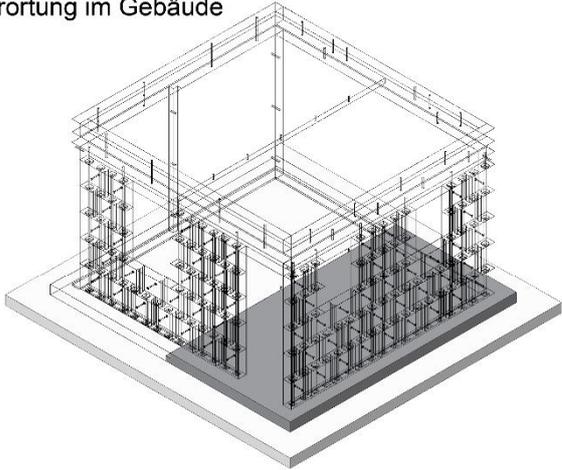
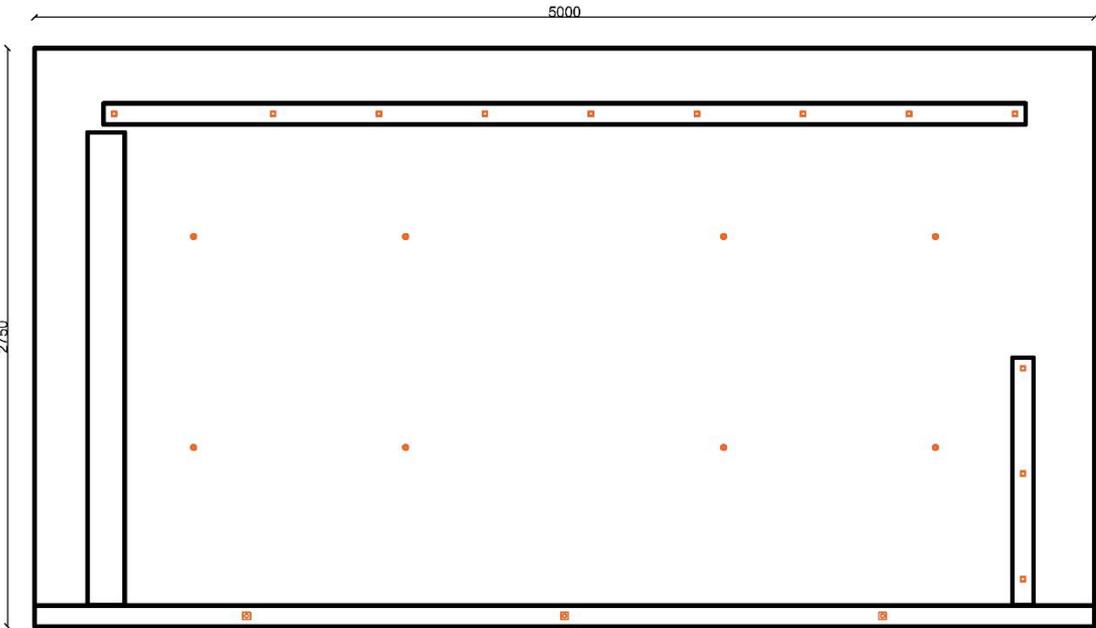
Pos	Bauteil	Abmessungen [mm]			Verbindungstechnik				
		L	B	H	Flachstahlanker 71FL14	Kompaktanker 67K140155	Kompaktanker 67K160130	Schraubenanker 67SA16	Gewindetransportanker 67M20
1	Wand1	4500	175	2780		4		8	4
2	Wandelement1	2350	175	2780				4	2
3	Wandelement2	2250	175	2780	3			4	2
4	Bodenplatte 1	5000	2750	200	5		12	8	
5	Bodenplatte 2	5000	2650	200			4	8	
6	Deckenplatte 1	4500	2425	200	5			8	
7	Deckenplatte 2	4500	2525	200				8	
8	RC Balken1+2	4500	175	250			8		
9	RC Attiken 1-4	4500	175	250			8		
10	RC-Betonsteine	500	175	500					
11	RC-Betonsteine	250	175	500					
Summe					13	4	32	48	8

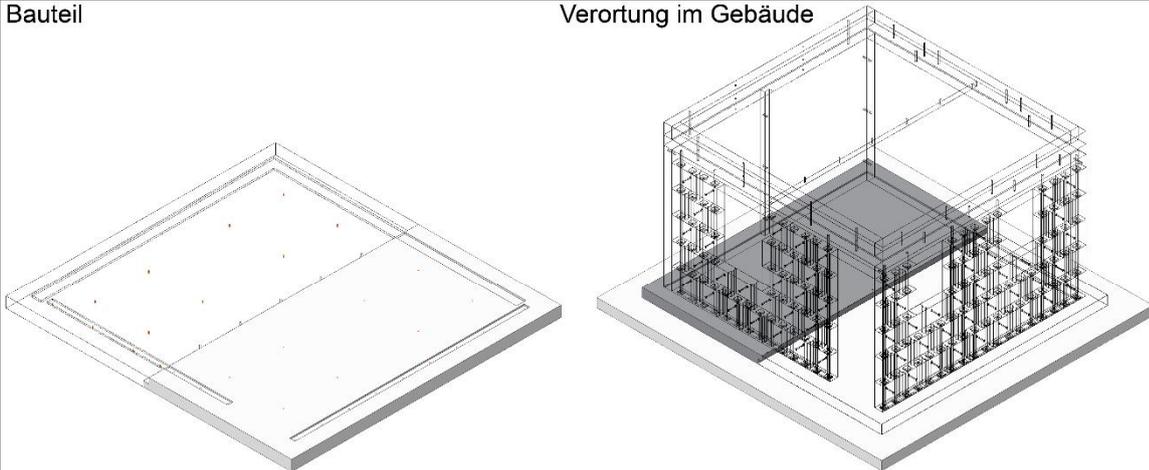
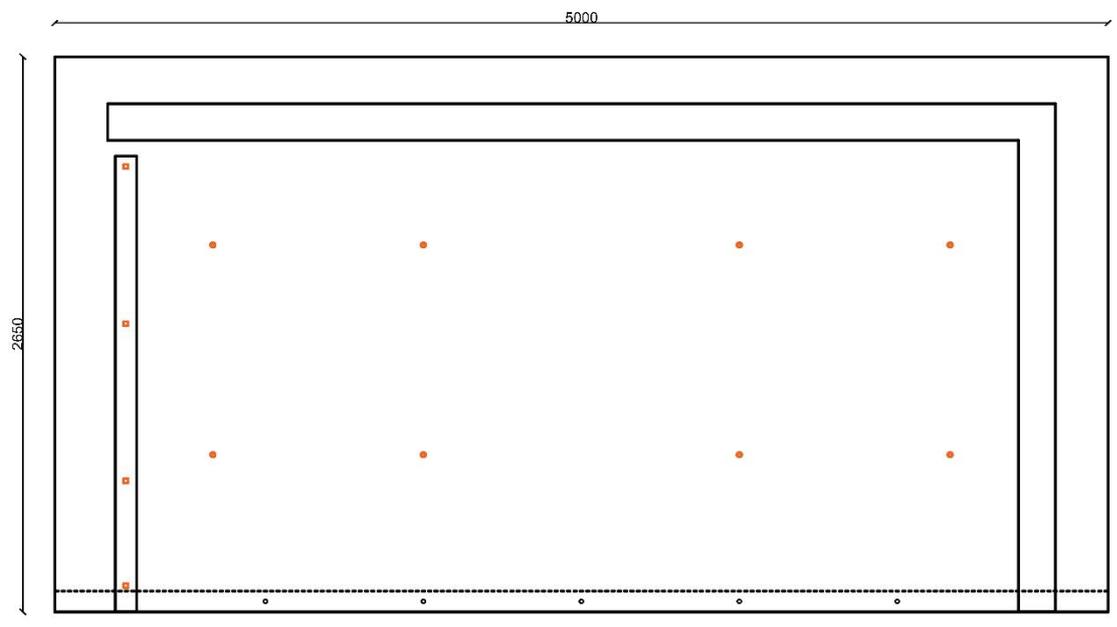
18.5 Anhang 5 - Bauteilkatalog der RC-WE

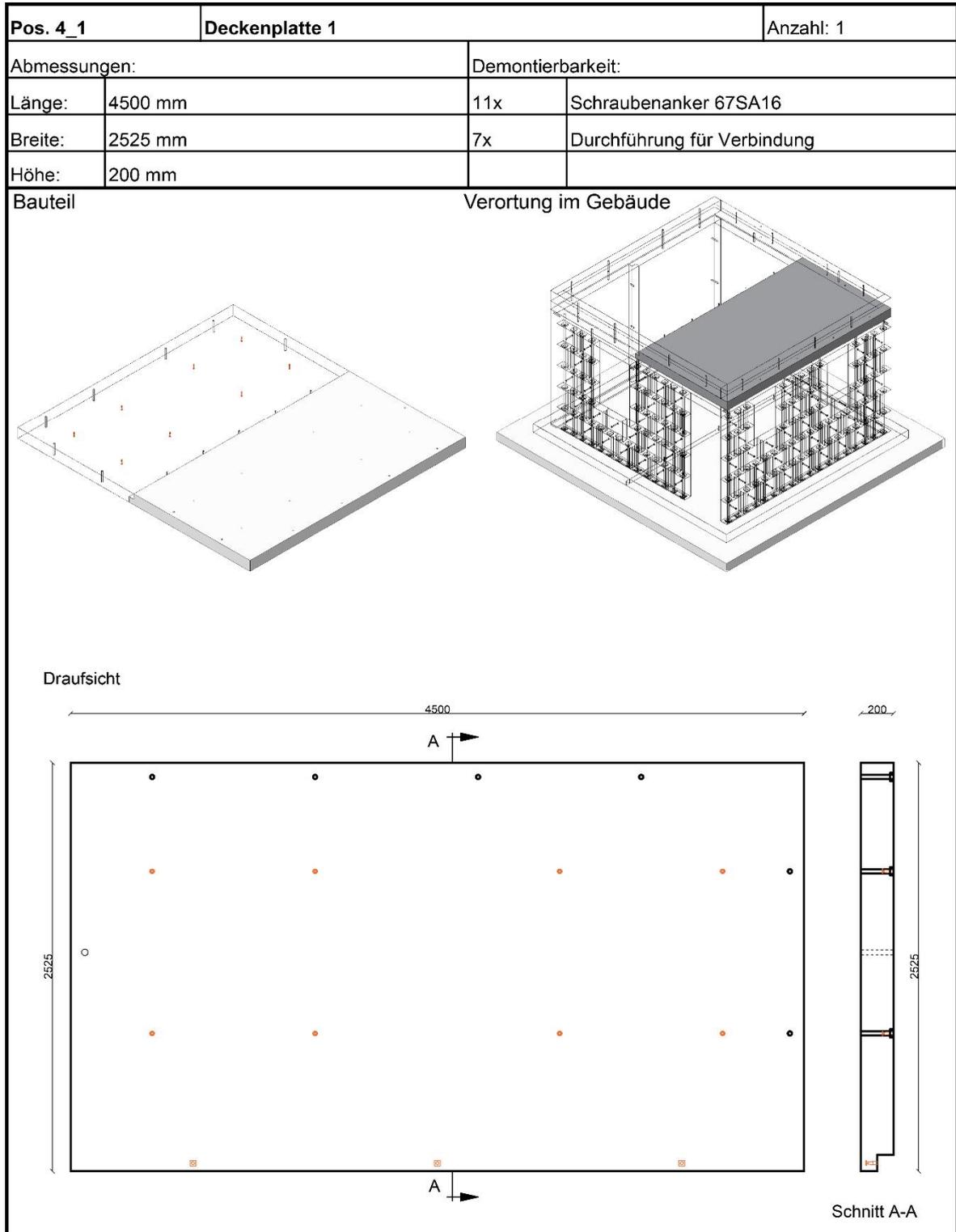
Pos. 1		Wand 1		Anzahl: 1	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	4500 mm	2x	2 Power System SL 67M24SL		
Breite:	175 mm	3x	3 Power System SL 67M24SL		
Höhe:	2780 mm	12x	Schraubenanker 67SA16		
		1x	Kompaktanker 67K140155		
Bauteil		Verortung im Gebäude			
					
Ansicht					
		4500			175
		A			Außenseite
					
2780					2780
Draufsicht					
		A			
					
175	4500				
Schnitt A-A					

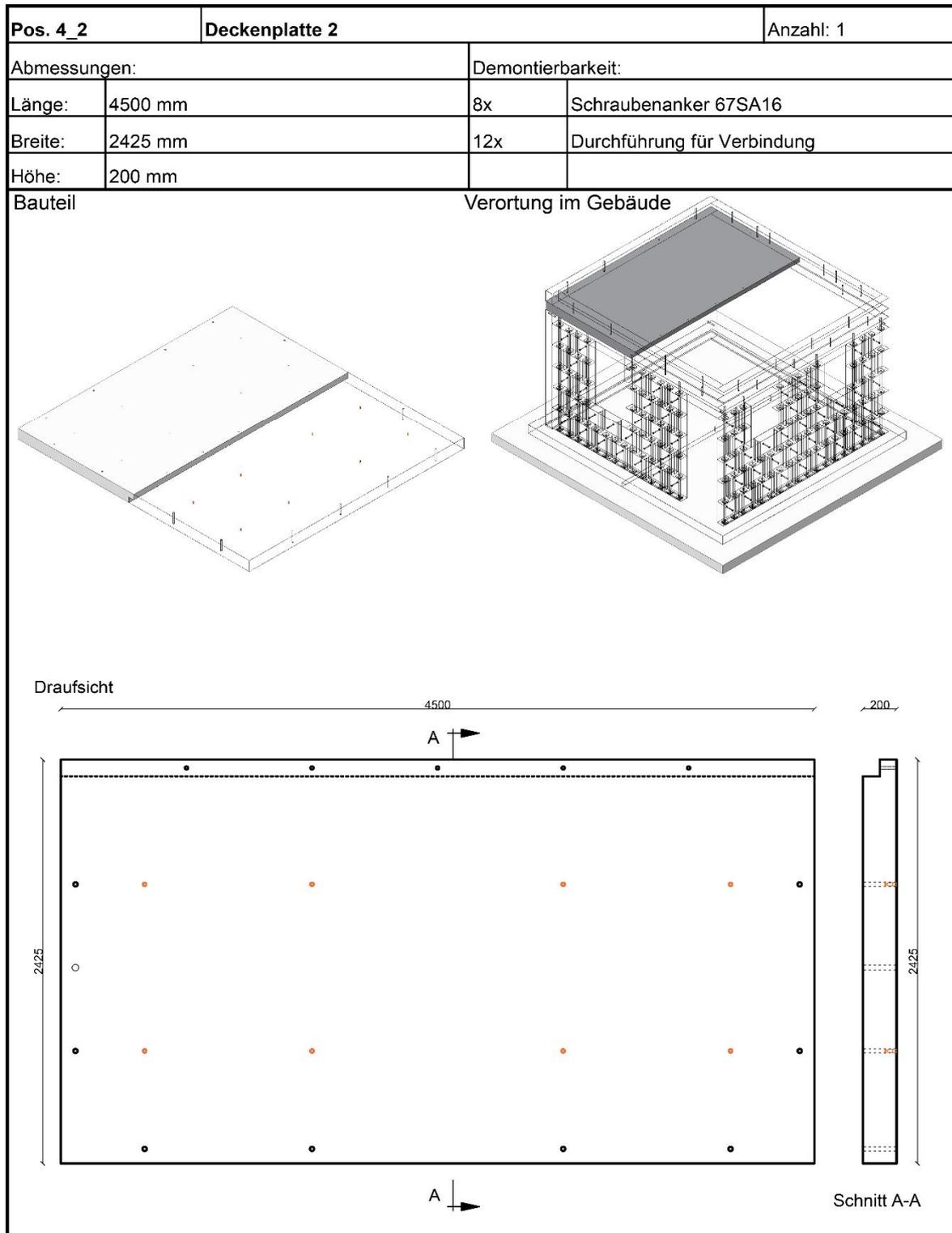
Pos. 2_1	Wandelement 1	Anzahl: 1
Abmessungen:		Demontierbarkeit:
Länge:	2350 mm	2x 2 Power System SL 67M24SL
Breite:	175 mm	6x Schraubenanker 67SA16
Höhe:	2780 mm	6x Durchführung für Verbindung
Bauteil		Verortung im Gebäude
		
<p>Ansicht</p> 		
<p>Schnitt B-B</p> 		<p>Schnitt A-A</p> 

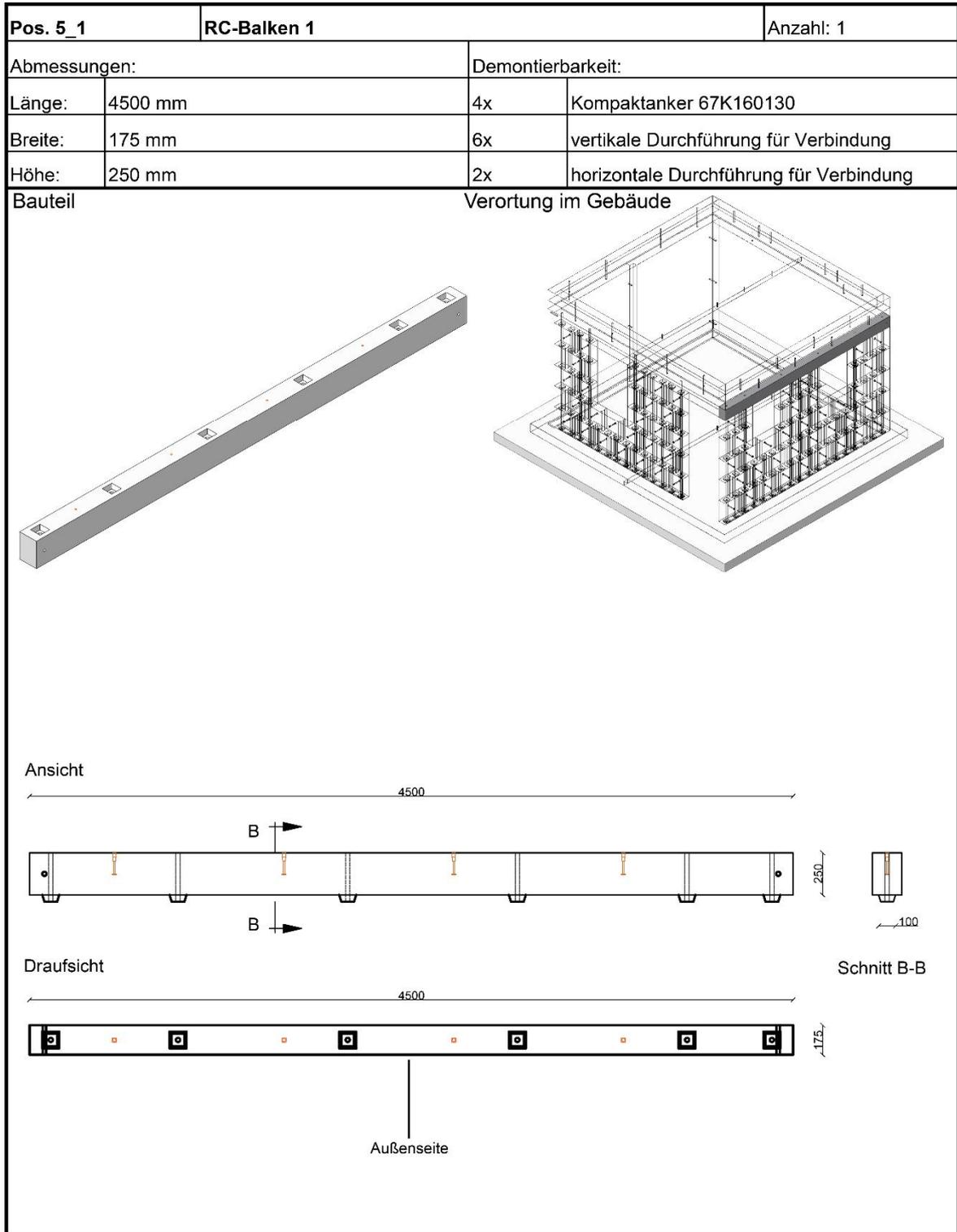


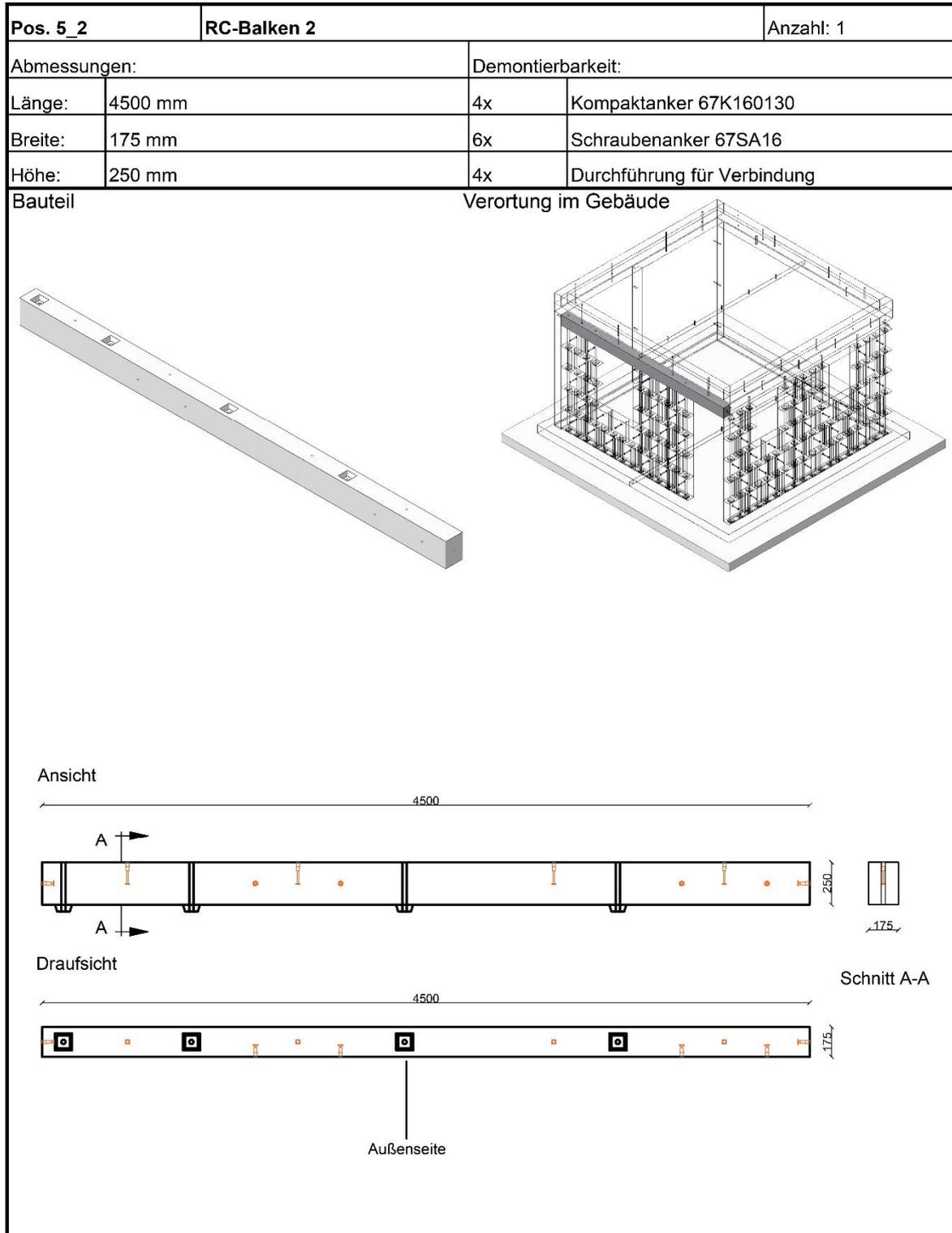
Pos. 3_1		Bodenplatte 1		Anzahl: 1	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	5000 mm	12x	Kompaktanker 67K160130		
Breite:	2750 mm	11x	Schraubenanker 67SA16		
Höhe:	200 mm				
<p>Bauteil</p> 			<p>Verortung im Gebäude</p> 		
<p>Draufsicht</p> 					

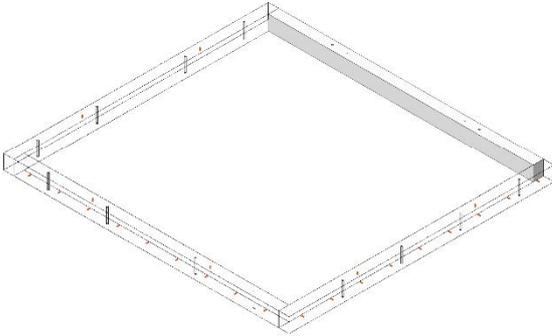
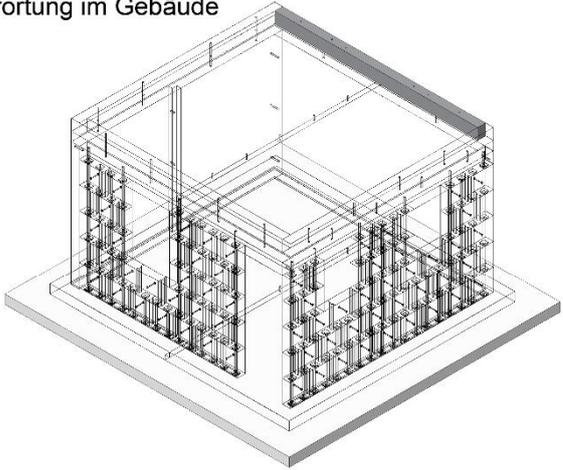
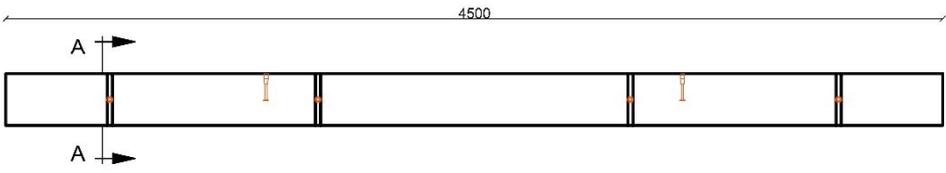
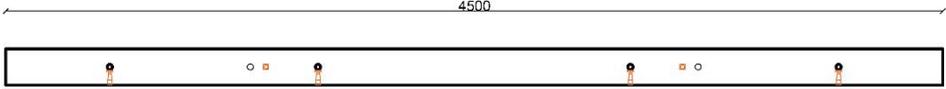
Pos. 3_2	Bodenplatte 2	Anzahl: 1
Abmessungen:		Demontierbarkeit:
Länge:	5000 mm	4x Kompaktanker 67K160130
Breite:	2650 mm	8x Schraubenanker 67SA16
Höhe:	200 mm	5x Durchführung für Verbindung
Bauteil	Verortung im Gebäude	
		
Draufsicht		
		

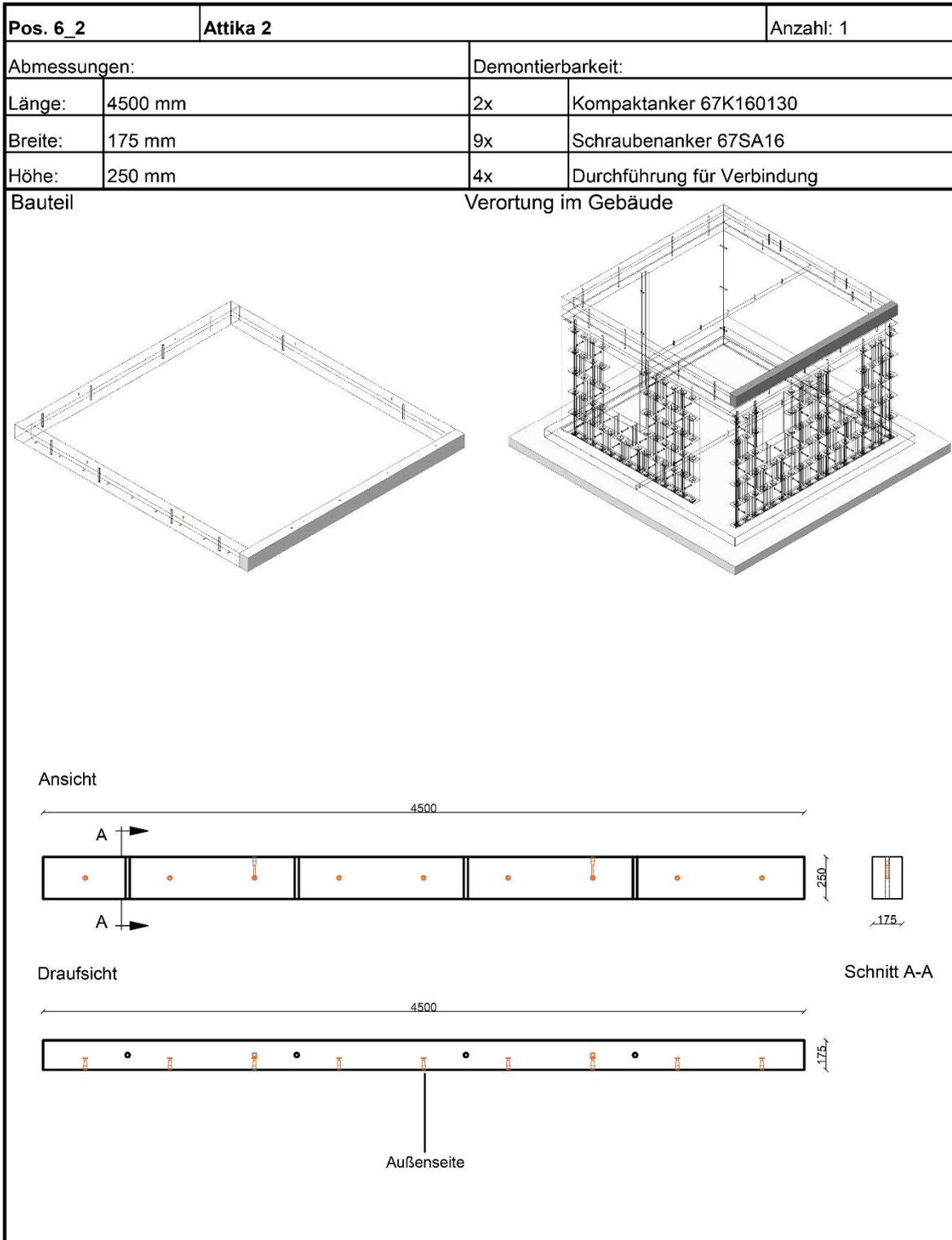


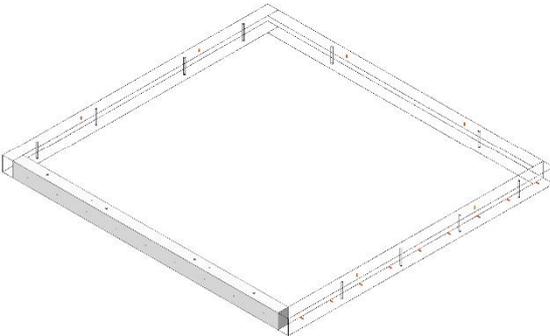
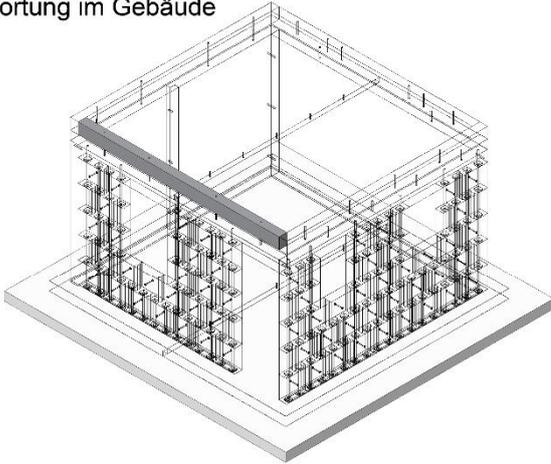
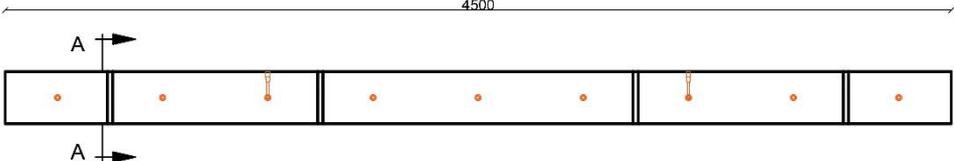
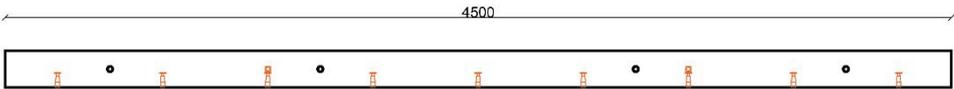


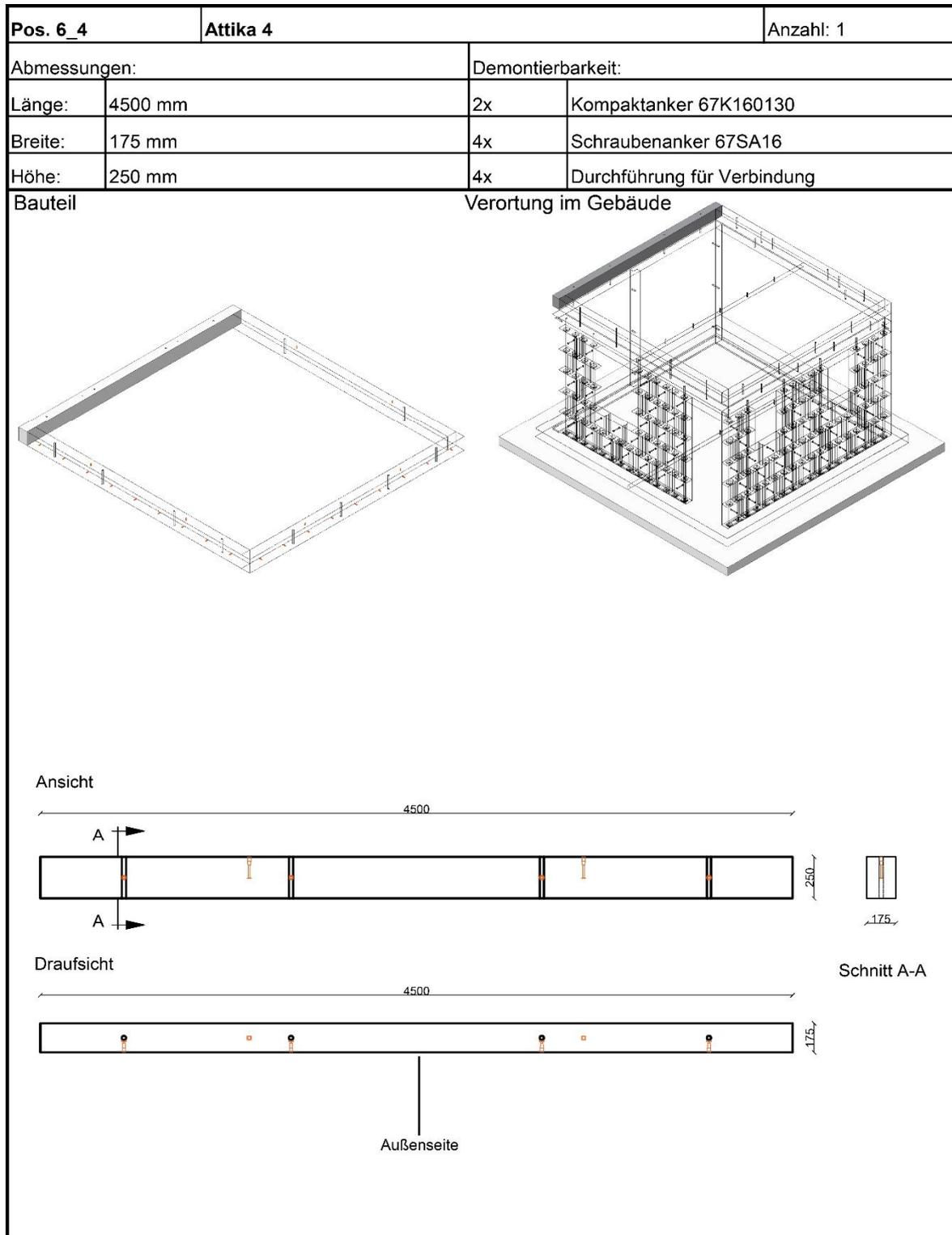


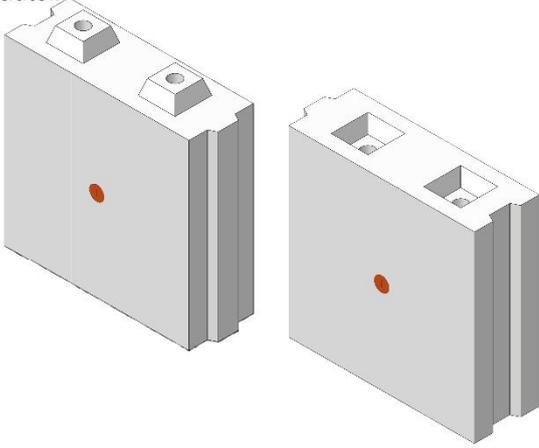
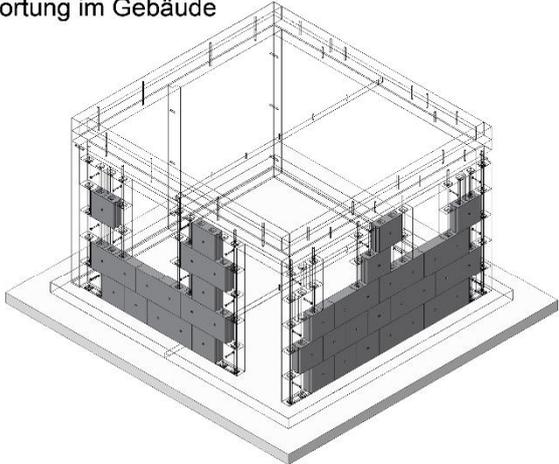
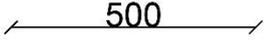
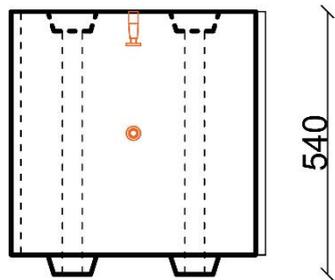
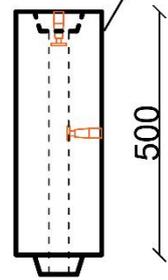


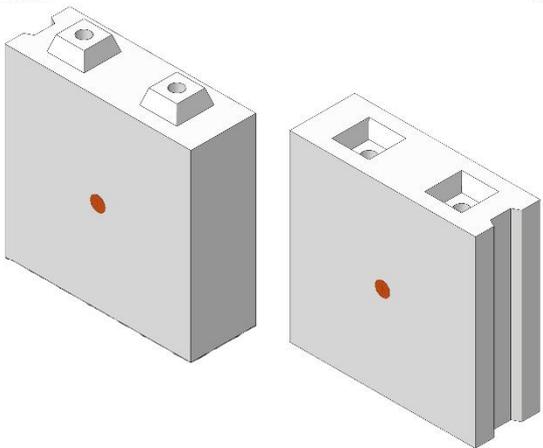
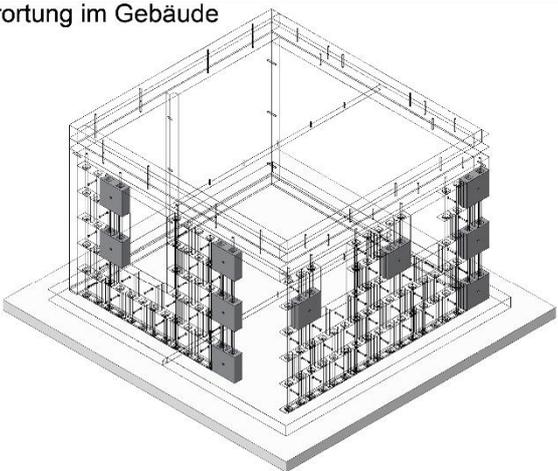
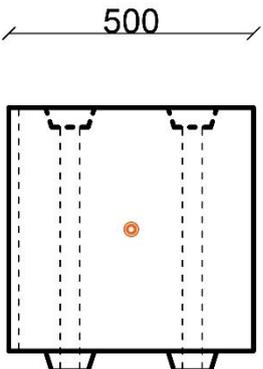
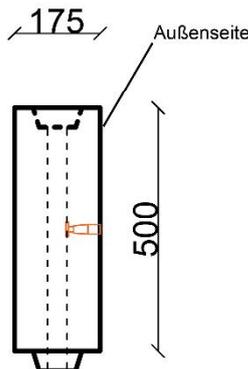
Pos. 6_1		Attika 1		Anzahl: 1	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	4500 mm	2x	Kompaktanker 67K160130		
Breite:	175 mm	4x	Schraubenanker 67SA16		
Höhe:	250 mm	2x	Durchführung für Verbindung		
Bauteil			Verortung im Gebäude		
					
Ansicht					
					
Draufsicht					
					
Schnitt A-A					

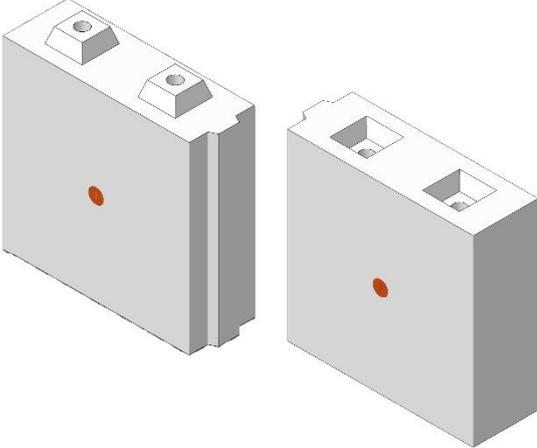
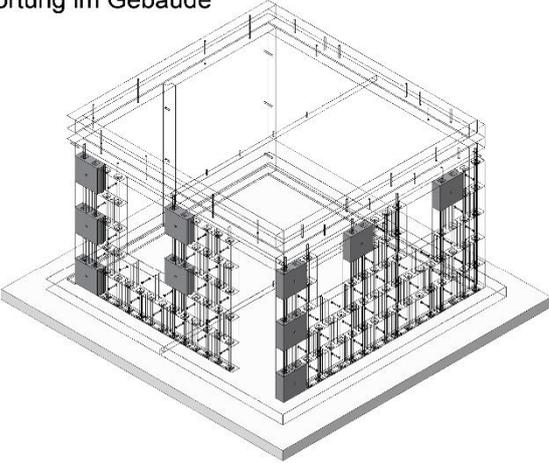
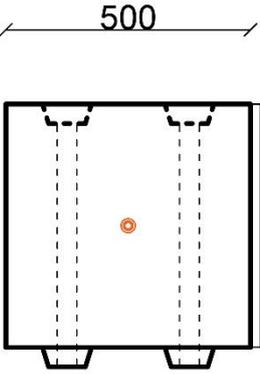
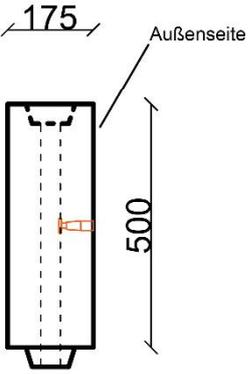


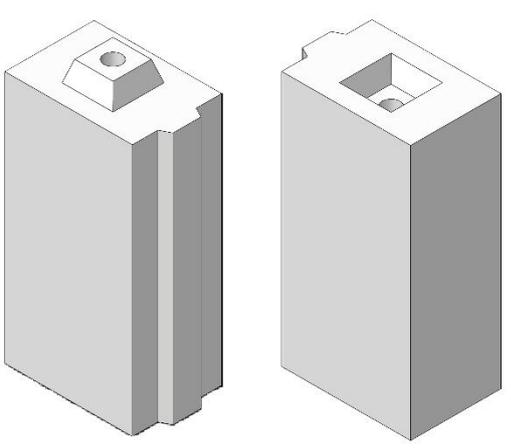
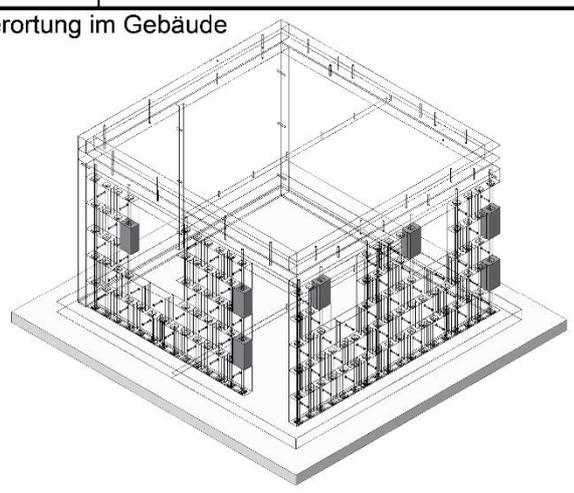
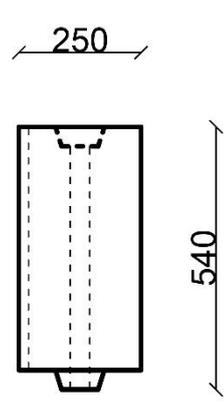
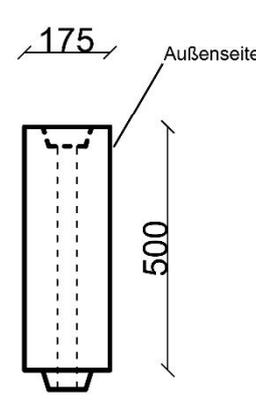
Pos. 6_3		Attika 3		Anzahl: 1	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	4500 mm	2x	Kompaktanker 67K160130		
Breite:	175 mm	9x	Schraubenanker 67SA16		
Höhe:	250 mm	4x	Durchführung für Verbindung		
Bauteil			Verortung im Gebäude		
					
Ansicht					
					
					
Schnitt A-A					



Pos. 7_1		RC-Betonstein 1		Anzahl: 44	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	500 mm	1x	Schraubenanker 67SA12		
Breite:	175 mm	2x	Durchführung für Verbindung		
Höhe:	500 mm				
Bauteil		Verortung im Gebäude			
					
					
					

Pos. 7_2		RC-Betonstein 2		Anzahl: 10	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	500 mm	1x	Schraubenanker 67SA12		
Breite:	175 mm	2x	Durchführung für Verbindung		
Höhe:	500 mm				
Bauteil		Verortung im Gebäude			
					
					

Pos. 7_3		RC-Betonstein 3		Anzahl: 10	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	500 mm	1x	Schraubenanker 67SA12		
Breite:	175 mm	2x	Durchführung für Verbindung		
Höhe:	500 mm				
Bauteil		Verortung im Gebäude			
					
					

Pos. 7_4		RC-Betonstein 4		Anzahl: 7	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	250 mm	1x	Durchführung für Verbindung		
Breite:	175 mm				
Höhe:	500 mm				
Bauteil		Verortung im Gebäude			
					
					

Pos. 7_5		RC-Betonstein 5		Anzahl: 7	
Abmessungen:			Demontierbarkeit:		
Länge:	250 mm	1x	Durchführung für Verbindung		
Breite:	175 mm				
Höhe:	500 mm				
Bauteil		Verortung im Gebäude			
