

Projekt: DIBT – P 52-5-8.37-2052/20
Schlussbericht zum Forschungsvorhaben
Bewertung der Tragfähigkeit von Befestigungen in Beton
mit rezyklierter Gesteinskörnung

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Florian Wendel

Datum: 30.11.2022


Digital signiert von:
Catherina Maria Thiele
E-Mail: =DE
Datum: 1/17 14:02:57
+01'00'

apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele



Dipl.-Ing. Florian Wendel

Projekt: DIBT – P 52-5-8.37-2052/20
Schlussbericht zum Forschungsvorhaben
Bewertung der Tragfähigkeit von Befestigungen in Beton
mit rezyklierter Gesteinskörnung

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Florian Wendel

Datum: 30.11.2022

apl. Prof. Dr.-Ing. Catherina Thiele

Dipl.-Ing. Florian Wendel

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlegendes zu Beton mit natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen.....	3
2.1	Regelungen für den Einsatz von Recyclingbeton.....	3
2.2	Eigenschaften von Beton.....	5
2.2.1	Zusammensetzung und Herstellung	5
2.2.2	Verhalten von Beton unter Druckbeanspruchung.....	6
2.2.3	Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung.....	8
2.2.4	Vergleich der Festigkeitswerte	11
3	Grundlegendes zu Befestigungsmitteln.....	13
3.1	Tragverhalten und Versagensarten von mechanischen Verankerungssystemen.....	13
3.1.1	Herausziehen (a_1), Durchziehen (a_2)	15
3.1.2	Kegelförmiger und lokaler Betonausbruch (b)	15
3.1.1	Spalten (c).....	16
3.1.2	Stahlversagen (d).....	16
3.2	Tragverhalten von Verbundankersystemen	16
3.2.1	Last-Verformungs-Verhalten unter Zugbeanspruchung	17
3.2.2	Versagensmechanismen von Verbundankersystemen	19
3.2.3	Einflussfaktoren auf die Verbundtragfähigkeit	20
3.3	Prüfung, Bewertung und Bemessung.....	23
3.4	Bisherige Untersuchungen zum Verhalten von Befestigungen in Recyclingbeton	24
4	Auswahl der Betonmischungen und Charakterisierung wesentlicher Eigenschaften.....	26
4.1	Betonmischungen	26
4.2	Gesteinskörnung.....	29
4.3	Festbetoneigenschaften	32
5	Versuchsbeschreibung und Versuchsprogramm.....	35
5.1	Versuchsdurchführung und Wahl der Befestigungssysteme.....	35
5.2	Versuchsprogramm	38
6	Versuchstechnische Überprüfung der Versagenslasten für Betonausbruch und Herausziehen unter zentrischer Zugbelastung.....	49
6.1	Darstellung der Versagenslasten	49
6.2	Diskussion der Referenztragfähigkeiten in ungerissenem Normalbeton	50
6.2.1	Verbundankersystem A.....	50
6.2.2	Verbundankersystem B.....	54

6.2.3	Verbundankersystem D.....	58
6.2.4	Schlussfolgerung über die Referenzen der Verbundankersysteme	61
6.2.5	Bolzenanker F	63
6.2.6	Betonschraube H	67
6.3	Diskussion der Referenztragfähigkeiten in gerissenem Normalbeton	70
6.3.1	Verbundankersystem A.....	70
6.3.2	Verbundankersystem B.....	73
6.3.3	Verbundankersystem D.....	76
6.3.4	Bolzenanker F	78
6.3.5	Betonschraube H	80
6.4	Diskussion der Tragfähigkeit in ungerissenem Recyclingbeton	82
6.4.1	Verbundankersystem A.....	82
6.4.2	Verbundankersystem B.....	90
6.4.3	Verbundankersystem D.....	97
6.4.4	Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Verbundankersysteme ungerissener Beton ...	104
6.4.5	Bolzenanker F	106
6.4.6	Betonschraube H	113
6.4.7	Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Bolzenanker F und Betonschraube H ungerissener Beton	116
6.5	Diskussion der Tragfähigkeit in gerissenem Recyclingbeton	118
6.5.1	Verbundankersystem A.....	119
6.5.2	Verbundankersystem B.....	121
6.5.3	Verbundankersystem D.....	123
6.5.4	Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Verbundankersysteme gerissener Beton	125
6.5.5	Bolzenanker F	127
6.5.6	Betonschraube H	129
6.5.7	Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Bolzenanker F und Betonschraube H gerissener Beton	131
7	Untersuchung lokaler Tragmechanismen	132
7.1	Reinigung und Lagerung	132
7.1.1	Ergebnisse der Versuchsreihe 5 – Montagesicherheit und Lagerungsbedingungen	132
7.1.2	Ergebnisse der Versuchsreihe 7 – Reinigungsverfahren	138
7.2	Untersuchung der Versagensarten.....	142
7.2.1	Verbundankersysteme	142
7.2.2	Bolzenanker F und Betonschraube H.....	144

7.3	Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens	146
7.3.1	Bolzenanker F und Betonschraube	146
7.3.2	Verbundankersysteme	148
7.3.3	Zwischenfazit: Last-Verformungsverhalten	157
8	Weitere Untersuchungen	158
8.1	Risswechselversuche F3	158
8.2	Montageversuche/ Rand- Eck- Achsabstand	161
8.2.1	F11: minimaler Rand- und Achsabstand	161
8.2.2	F12: Eckabstand	164
8.3	Vergleich der Versuchsergebnisse zur rechnerischen Tragfähigkeit für kegelförmigen Betonausbruch nach DIN EN 1992-4:2019-04 [4] mit dem Bolzenanker F	167
8.4	Betonkantenbruch	171
9	Fazit	175
9.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse	175
9.2	Prüfprogramm für eine Bemessung nach DIN EN 1992-4 [4]	179
9.2.1	Verbundankersysteme	180
9.2.2	Mechanische Befestigungssysteme	182
10	Literaturverzeichnis	185
11	Anhang	189
11.1	Versuchsergebnisse Verbundankersystem A, ungerissen (R1)	189
11.2	Versuchsergebnisse Verbundankersystem A, gerissen (B10)	249
11.3	Versuchsergebnisse Verbundankersystem B, ungerissen (R1)	258
11.4	Versuchsergebnisse Verbundankersystem B, gerissen (B10)	313
11.5	Versuchsergebnisse Verbundankersystem D, ungerissen (R1)	332
11.6	Versuchsergebnisse Verbundankersystem D, gerissen (B10)	383
11.7	Versuchsergebnisse Bolzenanker F, ungerissen (A1)	398
11.8	Versuchsergebnisse Bolzenanker F, gerissen (F1)	420
11.9	Versuchsergebnisse Betonschraube H, ungerissen (A1)	430
11.10	Versuchsergebnisse Betonschraube H, gerissen (F1)	441
11.11	Versuchsergebnisse Bolzenanker F, Risswechsel (F3)	447
11.12	Versuchsergebnisse Bolzenanker F, Eckversuche (F12)	450
11.13	Versuchsergebnisse Versuchsreihe 5	464

1 Einleitung

Der Baustoff Recyclingbeton kann nach [1] mehrere Vorteile gegenüber konventionellem Beton mit natürlicher Gesteinskörnung mit sich bringen. Durch den Austausch von natürlichen durch rezyklierte Gesteinskörnungen in Beton kann die Materialentnahme, das Abfallaufkommen und der Flächenbedarf des Abbaulandes reduziert werden. Treibhausgase und Luftschadstoffe lassen sich zwar nicht reduzieren, würden allerdings auch nicht erhöht durch den Einsatz von Recyclingbeton. Der geringfügig höhere Stahl- und Zementbedarf gleicht sich wirtschaftlich gesehen durch die preiswerte rezyklierte Gesteinskörnung aus. Der entscheidende Faktor für die Wirtschaftlichkeit von Recyclingbeton ist der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung. Somit ist neben dem Argument der Ressourcenschonung bei hohen Ersatzraten durch die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Beton auch ein wirtschaftlicher Vorteil möglich.

Bei Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen müssen stets die Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit der Konstruktion wie für Beton mit natürlicher Gesteinskörnung eingehalten sein [2]. Hierfür muss unter anderem auch die Verlässlichkeit des Baustoffs R-Beton als sicherer Ankergrund für Befestigungselemente gezeigt werden. Nach der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [3] aus 2010 dürfen Bauteile aus Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 1992-1-1 bemessen werden, sofern die in der Richtlinie aufgezeigten Bedingungen eingehalten sind. Die derzeitigen Bewertungsdokumente und Bemessungsverfahren für Befestigungen in Beton nach DIN EN 1992-4 [4] beziehen sich auf die Eigenschaften von Beton nach DIN EN 206 [5].

Der Entwurf E DIN 1045-2:2022-07 [6] sieht vor, dass rezyklierte Gesteinskörnungen mit Austauschmengen, die nicht höher als 25 Vol.-% sind, unter Einhaltung bestimmter Bedingungen wie natürliche Gesteinskörnungen behandelt werden dürfen. Ein Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Übertragbarkeit des Bemessungsverfahrens für Befestigungen nach DIN EN 1992-4 auf Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen zu überprüfen.

Bei den Nachweisen werden Versagenslasten unter anderem in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit ermittelt. In weiteren Nachweisen werden Lasten oder Verbundspannungen angesetzt, die individuell für jedes Produkt innerhalb von Zulassungsverfahren ermittelt und in der zugehörigen ETA angegeben werden. Um den Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen auf diese Lasten und Verbundspannungen zu bestimmen, wurden Auszugversuche an unterschiedlichen Befestigungsmitteln durchgeführt und analysiert. Neben den in [6] aufgeführten Betonen mit beschränkten Anteilen von rezyklierter Gesteinskörnung wurden Betone mit 100% rezyklierter Gesteinskörnung und deren Einfluss auf die Tragfähigkeit von Befestigungssystemen untersucht.

Bei Befestigungssystemen müssen lokale Tragmechanismen genauer betrachtet werden. Rezyklierte Gesteinskörnungen haben im Allgemeinen ein zu natürlichen Gesteinskörnungen abweichendes Wasseraufnahmeverhalten. Um die Festbetoneigenschaften dadurch nicht zu beeinflussen, wird eine zusätzliche Menge an Wasser entsprechend des Saugwassers bei der Mischungsberechnung mit einbezogen und dem Beton hinzugefügt. Es muss also untersucht werden, ob eine Erhöhung der Gesamtwassermenge im Beton einen Einfluss auf die lokale Lastübertragung der Befestigungssysteme hat. Um die Thematik der Feuchtigkeit gänzlich zu erfassen, werden Einflüsse der rezyklierten Gesteinskörnung bei wassergesättigtem Beton untersucht.

Weiteres Ziel des Forschungsvorhabens war es zu definieren, welche Bewertungsversuche für die Beurteilung von Befestigungen in R-Beton notwendig sind.

2 Grundlegendes zu Beton mit natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen

2.1 Regelungen für den Einsatz von Recyclingbeton

Grundlegende Voraussetzung für den Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach [7] ist, dass das Verhalten der Konstruktion hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit nicht abweichend zum Verhalten beim Einsatz von Normal- und Leichtbeton ist. [2]

In Deutschland wird bisher die Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen in der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [3] geregelt. Die Richtlinie soll künftig Bestandteil der neuen DIN 1045-2 werden, die sich aktuell noch im Entwurfsstatus befindet. Tabelle 2-1 zeigt die beiden in den genannten Regelwerken dargestellten Gesteinskörnungskategorien. Die Hauptbestandteile der aufgezeigten Typen 1 und 2 sind zum einen „Rc“-Bestandteile (Beton, Betonprodukte, Mörtel und Mauersteine aus Beton) und „Ru“-Bestandteile (ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein und hydraulisch gebundene Gesteinskörnung) und zum anderen „Rb“-Bestandteile (Mauerziegel, Kalksandsteine und nichtschwimmender Porenbeton). Die beiden Typen unterscheiden sich hauptsächlich in den Anteilen an „Rc + Ru“ und „Rb“. Typ 1 enthält maximal 10 M.-% „Rb“ und mindestens 90 M.-% „Rc + Ru“. Typ 2 besteht aus maximal 30 M.-% „Rb“ und enthält dementsprechend weniger „Rc + Ru“-Anteile. Weitere Bestandteile, die bei den Typen 1 und 2 jeweils auf maximal 1 bis 2 M.-% begrenzt sind, können bitumenhaltige Materialien („Ra“), Glas („Rg“), sonstige Materialien („X“) wie Ton und Boden, Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi und Gips sowie nicht weiter definiertes schwimmendes Material im Volumen („FL“) sein.

Der Anteil an natürlichen Gesteinskörnungen, der aktuell in Deutschland nach [3] durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden darf, ist in Tabelle 2-2 dargestellt. Abhängig von den äußeren Einwirkungen und Umgebungsbedingungen dürfen maximal 45 Vol.-% (bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung) natürliche Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 ersetzt werden. Werden rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 2 eingesetzt, darf dieser Anteil maximal 35 Vol.-% betragen. Hierbei handelt es sich um Gesteinskörnung mit einem Korndurchmesser > 2 mm. Der Einsatz von Brechsand ist nach [3] in Deutschland nicht zulässig.

Tabelle 2-1: Rezyklierte Gesteinskörnung nach DIN EN 12620:2008-07, Abschnitt 5.8 [3]

Spalte	1	2	3
Zeile	Bestandteile ^{a)}	Kategorie der Gesteinskörnung	
		Typ 1	Typ 2
1	Rc + Ru	Rc1 ₉₀	Rc1 ₇₀
2	Rb	Rb1 ₃₀	Rb3 ₃₀
3	Ra	Ra1 ₁	Ra1 ₁
4	X + Rg	XRg1 ₁	XRg2 ₁
5	FL	FL2 ₁	FL2 ₁

^{a)} Dabei bedeuten:
 Rc: Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
 Ru: Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung
 Rb: Mauerziegel (d. h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton
 Ra: Bitumenhaltige Materialien
 Rg: Glas
 X: Sonstige Materialien: Bindige Materialien (d. h. Ton und Boden), verschiedene sonstige Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips
 FL: Schwimmendes Material im Volumen

Tabelle 2-2: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung [3]

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

^{a)} zusätzliche Anforderungen s. Abschnitt 1, (3) und (4).

Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen darf bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C 30/37 eingesetzt werden. Für Spannbeton- und Leichtbetonbauteile und -konstruktionen ist der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen nicht erlaubt.

Dem Entwurf von DIN 1045-2 [6] ist zu entnehmen, dass die oben genannten Angaben zu einem großen Teil übernommen werden. Dies gilt für die Betonklasse BK-E, bei der über 25 Vol.-% bis zu den in Tabelle 2-3 gezeigten Austauschmengen möglich sind. Es wird deutlich, dass der Inhalt der beiden Tabellen ähnlich ist, allerdings in der neuen DIN 1045-2 unter anderem die Feuchtigkeitsklasse WA der Alkali-Richtlinie [8] ergänzt wurde. Zudem darf für die Expositionsklassen XC1 und X0 unter Einhaltung der gegebenen Bedingungen rezyklierte Gesteinskörnung ≤ 2 mm eingesetzt werden.

Tabelle 2-3: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung [6]

	1		2		3		4	
	Anwendungsbereich				Kategorie der Gesteinskörnung			
	Alkalirichtlinie ^a	DIN EN 206 und DIN 1045-2		Typ 1		Typ 2		
1	WO	Karbonatisierung XC1		$\leq 45^b$		≤ 35		
2	WF	Kein Korrosionsrisiko X0		≤ 45		≤ 35		
3		Karbonatisierung XC1 bis XC4						
4		Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF und XF3						
5		Beton mit hohem Wassereindringwiderstand nach 5.5.3						
6		Chemischer Angriff XA1 ^d						
7	WA ^c	XD1 und XD2 XS1 und XS2 XF2 und XF4		≤ 30		≤ 20		
<p>^a Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliaktionen im Beton (Alkali Richtlinie) sowie zusätzliche Anforderungen siehe E.2.3.1, (2) und (3).</p> <p>^b Es dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 1 ≤ 2 mm ≤ 20 Vol.-% der austauschbaren rezyklierten Gesteinskörnung eingesetzt werden, sofern sie aus der gleichen Produktion der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnung Typ 1 > 2 mm stammen, für die die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach DIN EN 933-11 nachgewiesen wurde. Das Verhältnis von feiner und grober rezyklierter Gesteinskörnung muss sich dabei an dem entsprechenden Verhältnis von Sand zu grober Gesteinskörnung der Gesamtsieblinie orientieren.</p> <p>^c Die Feuchtigkeitsklasse WA darf nur für rezyklierte Gesteinskörnung mit nachgewiesener Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S nach Alkali-Richtlinie verwendet werden.</p> <p>^d Die Regelung zum chemischen Angriff ist für XA1 durch die Betonklasse BK-N abgedeckt.</p>								

Neben der DAfStb-Richtlinie [3] und dem Entwurf der DIN 1045-2 [6] sind die folgenden Regelwerke hinsichtlich des Einsatzes von rezyklierten Gesteinskörnungen relevant. In DIN EN 206:2017-01 [5] werden die Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität für Beton geregelt. DIN EN 12620:2008 [9] enthält Regelungen für Gesteinskörnungen für Beton. DIN 4226-101:2017-08 [10] zeigt die gefährlichen Substanzen von rezyklierten Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 auf.

In [11] wird die Situation der bauaufsichtlichen Einführung von DIN 4226-101:2017-08 [10] als ein großes Hemmnis für die Verbreitung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen in Deutschland dargestellt. Durch Ersatz von DIN 4226-100:2002-02 [12] durch DIN EN 12620:2008-07 [9] im Zuge der europäischen Harmonisierung fehlten normative Regeln zu Grenzwerten umweltrelevanter Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen. In der Folge konnte die Umweltverträglichkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen nur über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) nachgewiesen werden, die beim Deutschen Institut für Bautechnik beantragt werden musste. Mit dem Urteil C-100/13 vom 16. Oktober 2014 erklärte der Europäische Gerichtshof das Vorgehen als unzulässig, zusätzliche nationale Anforderungen an Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung zu stellen. Das Urteil war bis zum 15. Oktober 2016 umzusetzen. Die Hersteller der Gesteinskörnungen, die eine abZ aus der Zeit vor der Umsetzungsfrist besaßen, durften diese auch weiterhin behalten. Folglich war der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton sehr eingeschränkt. Entweder ging der

Weg über einen der wenigen Hersteller mit gültiger abZ (elf Hersteller in Deutschland in 2018) oder über eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für das bestimmte Bauvorhaben.

2.2 Eigenschaften von Beton

2.2.1 Zusammensetzung und Herstellung

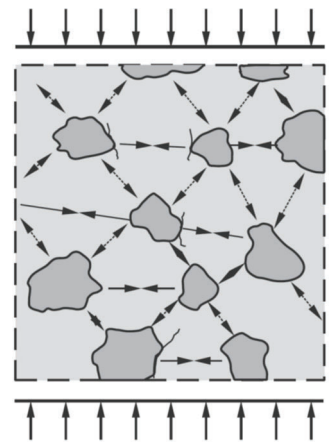
Nach [13] kann Beton als Baustoff aus Bindemittel, Wasser und Zuschlägen bezeichnet werden. In der Regel wird Zement als Bindemittel verwendet. Als Zuschläge können Gesteinskörnungen aus natürlicher Herkunft, aus industriell hergestellten Stoffen oder aufbereitetem mineralischen Abbruchmaterial eingesetzt werden. Um spezielle Eigenschaften des Betons zu beeinflussen, können Betonzusatzmittel und -zusatzstoffe hinzugegeben werden [14]. Je nach geforderten Eigenschaften lässt sich Beton unterschiedlich zusammensetzen und herstellen und kann nach den jeweiligen Merkmalen eingeteilt werden. Diese sind beispielsweise die Gefügeart, Zusammensetzung, Herstellung oder Bewehrung sowie das Anwendungsgebiet oder die Festigkeit.

Bezeichnungen wie Frischbeton, grüner Beton, junger Beton, Festbeton deuten laut [13] darüber hinaus auf den zeitabhängigen Erhärtungszustand hin. Als Frischbeton wird Beton bezeichnet, solange dieser fertig gemischt und noch gut verarbeitbar ist. Sobald der Beton eingebaut, aber noch nicht erhärtet ist, kann er als grüner Beton bezeichnet werden. Im darauffolgenden Zustand kann von jungem Beton gesprochen werden. Dieser Zustand beginnt nach wenigen Stunden und dauert bis zu einigen Tagen. Anschließend folgt der Zustand des Festbetons.

In den nachfolgenden Abschnitten wird Festbeton als Zweiphasengemisch betrachtet. Die Bestandteile sind die Zementmatrix und die Gesteinskörnung. Beide Bestandteile sind für die Eigenschaften des Betons im Einzelnen, aber auch im Zusammenwirken von Bedeutung. Die Angaben zur Bestimmung der Betoneigenschaften basieren auf der Einhaltung der Lagerungsbedingungen nach Norm. Diese sieht in der Regel vor, dass die Probekörper nach einem Tag in der Form nach dem Ausschalen bis zur Prüfung im Wasserbad oder unter speziellen klimatischen Bedingungen gelagert werden. Abweichend hiervon werden in der Befestigungstechnik die Probekörper zur Bestimmung der Betoneigenschaften unter identischen klimatischen Bedingungen bei den Prüfkörpern gelagert, in denen die Versuche an den Befestigungselementen durchgeführt werden. Dies geschieht in der Regel durch Lagerung an der Luft nach dem Ausschalen. Die Methoden zur Bestimmung der Eigenschaften für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen unterscheiden sich nicht zu denen für Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen. Bei den Zusammenhängen der unterschiedlichen Betoneigenschaften wird auf mögliche Unterschiede zwischen Betonen mit natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen eingegangen, sofern diese von Belang sind.

2.2.2 Verhalten von Beton unter Druckbeanspruchung

Bei Betonen mit natürlichen Gesteinskörnungen bis zu einer Druckfestigkeit $f_{cm} = 55 \text{ N/mm}^2$ übersteigt die Festigkeit des Zuschlags grundsätzlich die der Zementmatrix. Wird eine Druckspannung auf einen Betonkörper aufgebracht, wird diese über die Gesteinskörnung übertragen (siehe Abbildung 2-1). Orthogonal zu den Druckspannungen verlaufen Querspannungen. An den Kontaktflächen zwischen Zementmatrix und Zuschlag entwickeln sich Mikrorisse ab einer Belastung von 40 % der Druckfestigkeit. An den Kontaktflächen muss von einer Vorschädigung ausgegangen werden, die durch das Schwinden des Zementsteins hervorgerufen wird. Wird die Belastung weiter gesteigert, erhöht sich die Anzahl und Dichte der Mikrorisse und es kommt letztendlich zum Bruch.



←→ Querspannung

←→ Druckspannung

Abbildung 2-1: Übertragung einer Druckbelastung Beton [9]

Werden Betone mit höherer Festigkeit betrachtet, ist nach [14] zu beobachten, dass die durch Belastung resultierenden Risse in der Regel nicht mehr an den Kontaktflächen entlang, sondern durch die Gesteinskörnungen verlaufen, was mit einer höheren Festigkeit der Zementmatrix zu begründen ist. Zudem sind Betone mit höherer Festigkeit im Vergleich zu Betonen mit niedriger Druckfestigkeit als ein homogenerer Baustoff zu betrachten, was sich zusätzlich darin zeigt, dass die Kontaktflächen mit steigender Festigkeit nicht mehr als Schwachstelle auszumachen sind

Bei Recyclingbeton ist bei den oben dargestellten Überlegungen zum einen darauf zu achten, dass die Festigkeit des rezyklierten Zuschlags geringer sein kann als die bei konventionellem Beton. Dies hätte somit Einfluss auf die Druckfestigkeit des Betons. Zudem ist laut [15] zu beachten, dass bei Recyclingbeton mit Anteilen R_c (siehe Tabelle 2-1) neben der Kontaktfläche zwischen dem rezyklierten Zuschlag und der Zementmatrix des neuen Betons eine weitere Kontaktfläche innerhalb der Gesteinskörnung zwischen der natürlichen Gesteinskörnung und der alten Zementmatrix existiert. Des Weiteren weist Recyclingbeton eine weitere Schwachstelle auf, die aus möglicher Mikrorissbildung durch den Recyclingprozess der Gesteinskörnung resultiert.

In einer Metaanalyse [16] wurden die Ergebnisse aus 119 Veröffentlichungen zwischen 1978 bis 2014 zum Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Betondruckfestigkeit bezüglich des Anteils an der gesamten Gesteinskörnung, der Größe, Herkunft und des Feuchtigkeitsgehalts sowie der Expositionsclassen, dem Beifügen von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen und der Festigkeitsentwicklung zusammenfassend betrachtet. Es wurde festgestellt, dass tendenziell mit steigendem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen mit einer geringeren Druckfestigkeit zu rechnen ist. Wie groß der Unterschied zur Druckfestigkeit des Referenzbetons war, hing hauptsächlich vom Typ, der Größe und der Herkunft der rezyklierten Gesteinskörnung ab. Aus der Analyse der Untersuchungen, in denen die Wasserkompensationsmethode zur Anwendung kam, sei zu erkennen gewesen, dass der Unterschied der Konsistenz und Verarbeitbarkeit sowie der Verlust der Druckfestigkeit gegenüber der Kontrollgruppe am geringsten bzw. nicht vorhanden gewesen sei. Abbildung 2-2 zeigt die Verhältniszahlen von Druckfestigkeiten von Betonen mit variierendem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen zu deren Referenzbetonen mit natürlicher Gesteinskörnung. Die Erkenntnisse wurden in [16] aus 65 Veröffentlichungen zusammengefasst. Es wird deutlich, dass die

Druckfestigkeit von Recyclingbetonen verglichen mit deren Referenzbetonen mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen sowohl niedriger als auch höher sein können. Zudem wurde gezeigt, dass der Einfluss auf die Druckfestigkeit durch Zugabe von Zusatzstoffen oder Zusatzmitteln in Recyclingbeton von dem des Einflusses der Zugabe in Normalbeton nur unwesentlich oder gar nicht abweicht. Es wurde festgehalten, dass trotz geringerer Druckfestigkeit nach 28 Tagen im Vergleich zu Normalbeton die Zunahme der Druckfestigkeit über die Zeit bei Recyclingbeton höher war, was mit den latenten zementären Eigenschaften begründet wurde.

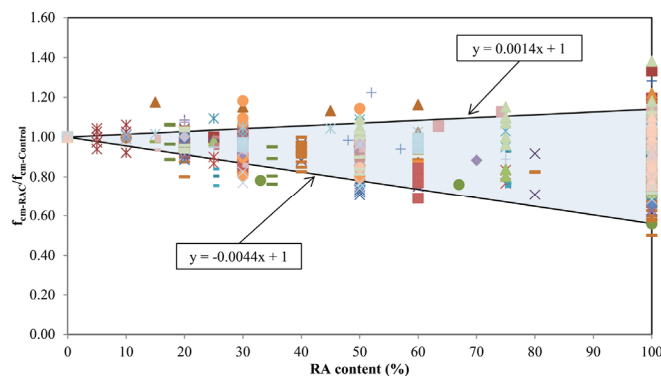


Abbildung 2-2: Verhältnis der Druckfestigkeitswerte von R-Beton mit unterschiedlichem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen und Normalbeton [16]

Für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1 [7] wird Normalbeton in Betonfestigkeitsklassen gegliedert, die sich auf die charakteristische Druckfestigkeit von Zylindern (f_{ck}) mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm und Würfeln ($f_{ck,cube}$) mit einer Kantenlänge von 150 mm beziehen. Die charakteristische Festigkeit beschreibt dabei das untere 5%-Quantil der Grundgesamtheit.

Um die Werte der Druckfestigkeitsprüfungen an Probekörpern unterschiedlicher Geometrien und Abmessungen vergleichen zu können, werden folgende Beziehungen angegeben. Die charakteristische Druckfestigkeit eines Würfels mit der Kantenlänge 200 mm entspricht 95 % charakteristischen Druckfestigkeit eines Würfels mit der Kantenlänge 150 mm (Gl. (1)). Der Umrechnungsfaktor zwischen der charakteristischen Druckfestigkeit eines Würfels mit Kantenlänge 150 mm und eines Zylinders mit der Höhe 300 mm und dem Durchmesser 150 mm variiert je nach Höhe der Druckfestigkeit. Innerhalb dieses Projektes wird der Umrechnungsfaktor vereinfachend zu konstant 0,80 gewählt (Gl. (2)). Die Druckfestigkeit von Bohrkernen mit einem Nenndurchmesser 50 mm, 100 mm und 150 mm kann nach [17, 18] bei einem Verhältnis von Höhe/Durchmesser von 1,0 gleich der Würfeldruckfestigkeit gesetzt werden (Gl. (3)).

$$f_{ck,cube,200} = 0,95 \cdot f_{ck,cube} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$f_{ck} = 0,80 \cdot f_{ck,cube} \quad \text{Gl. (2)}$$

$$f_{c,cube} = f_{c,core} \quad \text{Gl. (3)}$$

Die Normlagerung nach [19] sieht einen Verbleib der Probekörper von mindestens 16 Stunden und maximal 3 Tagen in der Schalung vor. Nach dem Ausschalen sollen die Probekörper bis zur Prüfung

wassergelagert bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ oder in einer Feuchtekammer mit einer relativen Luftfeuchte $\geq 95 \%$ gelagert werden.

Die Betondruckfestigkeit im Alter t kann bei einer mittleren Temperatur von 20°C und einer Lagerung nach [19] mit Gl. (4) und Gl. (5) nach [7] bestimmt werden. Die Entwicklung ist dabei abhängig vom verwendeten Zementtyp, der Temperatur und den Lagerungsbedingungen.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad \text{Gl. (4)}$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{s[1-\sqrt{28/t}]} \quad \text{Gl. (5)}$$

mit:

$f_{cm}(t)$	mittlere Betondruckfestigkeit für ein Alter von t Tagen
f_{cm}	mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen gem. Tab. 3.1 [7]
$\beta_{cc}(t)$	Beiwert abhängig vom Alter des Betons
t	Alter des Betons in Tagen
s	Beiwert abhängig vom Zementtyp: = 0,20 für CEM 42,5 R, CEM 52,5 N, CEM 52,5 R (Klasse R) = 0,25 für CEM 32,5 R, CEM 42,5 N (Klasse N) = 0,38 für CEM 32,5 N (Klasse S)

Die Ermittlung der Druckfestigkeit von Festbeton wird in [20] geregelt und kann nach Gl. (6) berechnet werden.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad \text{Gl. (6)}$$

mit:

f_c	Druckfestigkeit in $[\text{N}/\text{mm}^2]$
F	Höchstkraft beim Bruch in $[\text{N}]$
A_c	Fläche des Probenquerschnitts, auf den die Druckbeanspruchung wirkt in $[\text{mm}^2]$, berechnet aus dem Nennmaß des Probekörpers oder aus Messungen am Probekörper

2.2.3 Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung

Beton verhält sich unter Zugbeanspruchungen bis zu 70 % der Zugfestigkeit f_{ct} annähernd elastisch, wie in Abbildung 2-3b dargestellt. Die Dehnungen sind bis zu dieser Belastung noch gleichmäßig über die Probekörperhöhe verteilt. Das für druckbeanspruchten Beton abgeleitete Tangentenmodul E_{c0m} beschreibt auch für zugbeanspruchten Beton die Steifigkeit. Wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, sind im Beton bereits ohne Belastung Mikrorisse vorhanden. Wird die Last nun über 70 % der Zugfestigkeit gesteigert, wachsen die Mikrorisse weiter an. In der sogenannten Rissprozesszone entwickeln sich die Risse senkrecht zur Belastungsrichtung und sammeln sich, bis sie zu einem Makroriss

anwachsen. Die Dehnungen wachsen in diesem lokalen Bereich überproportional an. Der Begriff Lokalisierung beschreibt diesen Vorgang (siehe Abbildung 2-3a).

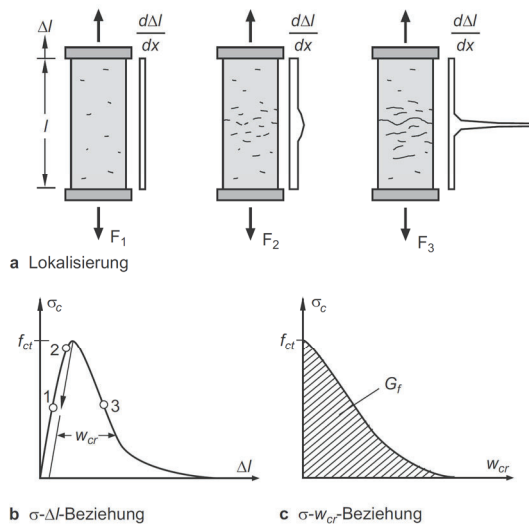


Abbildung 2-3: Lokalisierung der Rissbildung unter Zugbeanspruchung [14]

Abbildung 2-3b zeigt die Zugfestigkeit f_{ct} aufgetragen über der Längenänderung Δl in einem verformungsgesteuerten Zugversuch an Betonprüfkörpern mit einer Druckfestigkeit $f_{cm} < 55 \text{ N/mm}^2$. Nach Überschreiten der maximalen Zugfestigkeit nimmt die Last kontinuierlich ab. Da die Risse in der Regel an den Kontaktflächen der Gesteinskörnungen verlaufen, können über die Verzahnung Zugkräfte bis zur vollständigen Trennung der Rissufer übertragen werden. Wird ein solcher Versuch an Betonprobekörpern mit höherer Druckfestigkeit ($f_{cm} > 55 \text{ N/mm}^2$) durchgeführt, ist ein eher sprödes Versagen zu erwarten. Da die Risse vermehrt durch die Gesteinskörnung verlaufen, ist im Gegensatz zu Beton mit niedriger Festigkeit die Verzahnung der Rissufer schlechter.

Wird die σ - Δl -Beziehung um den Anteil der elastischen Dehnung bereinigt, kann die Zugfestigkeit f_{ct} über der Rissbreite w_{cr} wie in (Abbildung 2-3c) dargestellt werden. Gl. (7) beschreibt den erläuterten Zusammenhang:

$$\Delta l = \frac{\sigma_c}{E_c} \cdot l + w_{cr} \quad \text{Gl. (7)}$$

Die Fläche unter der Funktion (Abbildung 2-3c) entspricht der Bruchenergie G_f , welche als die Energie aufgefasst werden kann, die erforderlich ist, um einen Trennriss über einer gewissen Fläche zu erzeugen. Die Bruchenergie ist abhängig von der Festigkeit des Zementsteins sowie der Sieblinie, der Oberflächenbeschaffenheit und des Größtkorndurchmessers d_g des Zuschlags und wird wie in Gl. (8) bestimmt. [14]

$$G_f = G_{f0} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0,7} \quad \text{Gl. (8)}$$

mit:

$$f_{cm0} = 10 \text{ N/mm}^2$$

G_{f0} in Abhängigkeit des Größtkorndurchmessers d_g

$$= 0,025 \text{ für } d_g = 8 \text{ mm}$$

$$= 0,030 \text{ für } d_g = 16 \text{ mm}$$

$$= 0,038 \text{ für } d_g = 32 \text{ mm}$$

In [21] werden zur Bestimmung der Bruchenergie von Normalbeton (G_F) und Leichtbeton ($G_{F,l}$) die Gleichungen angegeben.

$$G_F = 0,73 \cdot f_{cm}^{0,18} \quad \text{Gl. (9)}$$

$$G_{F,l} = G_{FOA} + 16 \cdot f_{lctm} \quad \text{Gl. (10)}$$

mit:

$$G_{FOA} = 24 \text{ N/m} \quad \text{für Leichtbeton mit normalem Sand}$$

$$G_{FOA} = 0 \text{ N/m} \quad \text{für Leichtbeton mit leichtem Sand}$$

$$f_{cm} \quad \text{Mittelwert der Druckfestigkeit von Normalbeton}$$

$$f_{lctm} \quad \text{Mittelwert der Zugfestigkeit von Leichtbeton}$$

Grundsätzlich bauen die Bemessungsregeln nach [7] und [4] für viele Versagensarten auf der zentrischen Zugfestigkeit f_{ct} auf. Zur Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit ist ein Versuchsaufbau erforderlich, der eine Zugkraft zentrisch ohne Exzentrizität in den Probekörper einleitet. Mit Gl. (11) kann der Wert f_{ct} der zentrischen Zugfestigkeit aus einem Versuch mit dem Aufbau nach Abbildung 2-4 ermittelt werden.

$$f_{ct} = \frac{4 \cdot F}{d^2 \cdot \pi} \quad \text{Gl. (11)}$$

Da die zentrische Lasteinleitung ohne Exzentrizität versuchstechnisch nicht einfach umzusetzen ist, werden in der Praxis in der Regel Spaltzug- oder Biegezugversuche durchgeführt. Diese lassen sich leichter durchführen und die Ergebnisse können anschließend in eine zentrische Zugfestigkeit umgerechnet werden.

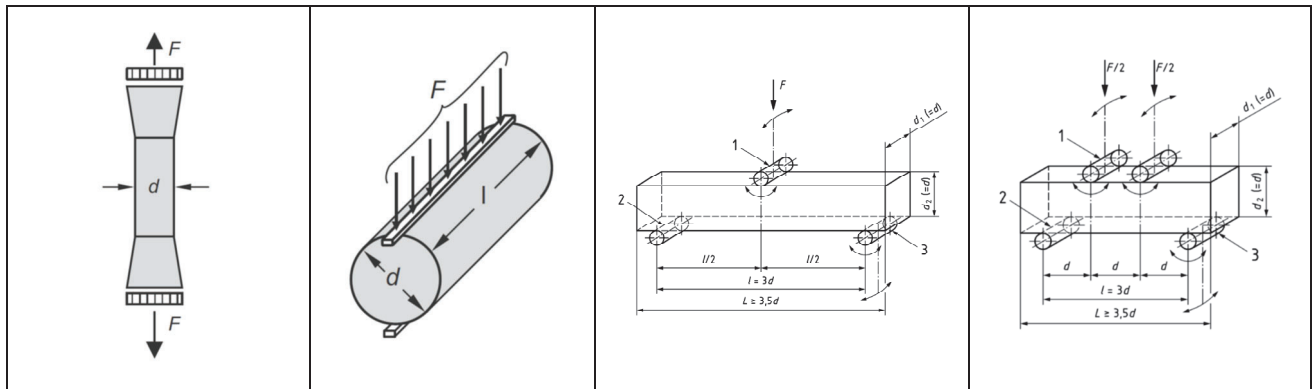


Abbildung 2-4: Versuchsaufbau zentrischer Zugversuch [14]

Abbildung 2-5: Versuchsaufbau Spaltzugversuch [14]

Abbildung 2-6: Versuchsaufbau Biegezugversuch [22]

Abbildung 2-7 Versuchsaufbau 4-Punkt-Biegezugversuch [22]

Die Durchführung der Versuche zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit werden in [23] geregelt. In der Regel werden zylinderförmige Probekörper mit einem Verhältnis der Länge l zum Durchmesser d von $l/d \geq 1,0$ verwendet. Die Spaltzugfestigkeit kann mit Gl. (12) bestimmt werden.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} \quad \text{Gl. (12)}$$

In [22] wird die Durchführung und Auswertung von Biegezugversuchen erläutert. Für die Versuche werden prismatische Probekörper in einem definierten Abstand gelagert und durch einen mittigen (siehe Abbildung 2-6) oder zwei in einem definierten Abstand angreifenden (siehe Abbildung 2-7) Lasten beansprucht. Die Biegezugfestigkeit $f_{ct,fl}$ kann aus den Versuchen mit einem mittigen Lastangriffspunkt mit Gl. (13), aus Versuchen mit zwei Lastangriffspunkten mit Gl. (14) bestimmt werden.

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad \text{Gl. (13)}$$

$$f_{ct,fl} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad \text{Gl. (14)}$$

2.2.4 Vergleich der Festigkeitswerte

2.2.4.1 Zusammenhang Zug- und Druckfestigkeit

Zwischen Zug- und Druckfestigkeit besteht kein linearer Zusammenhang. Mit steigender Druckfestigkeit des Betons ist zwar auch eine steigende Zugfestigkeit zu beobachten, allerdings ist der Anstieg der Zugfestigkeit nicht so stark wie der der Druckfestigkeit. Bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C50/60 wird der auf [24] zurückzuführende Zusammenhang in [7] und [21] mit Gl. (15) beschrieben. Für Betone mit höherer Druckfestigkeit wird Gl. (16) zur Ermittlung der mittleren Zugfestigkeit f_{ctm} angegeben, da der Zusammenhang aus Gl. (15) die mittlere Zugfestigkeit überschätzt.

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad \text{Gl. (15)}$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln\left(1 + \frac{f_{cm}}{10}\right) \quad \text{Gl. (16)}$$

mit:

 f_{cm} = $f_{ck} + 8$, Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons f_{ck} Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen

Die dargestellten Zusammenhänge sind grundsätzlich für Betone im Neubau. Last- oder zeitabhängige Einflüsse wurden in [25] durch Auswertung von an bestehenden Bauwerken entnommenen Proben untersucht. Basierend auf den in [25] durchgeführten experimentellen Untersuchungen wird eine grundsätzliche Übertragbarkeit der in [7] dargestellten Zusammenhänge für Betondruck- und Zugfestigkeit auf Bestandsbetone als möglich erachtet. Allerdings ist zu beachten, dass im Einzelfall erhebliche Streuungen in den Materialkennwerten beobachtet wurden. Deshalb wird für den Fall, dass die Zugfestigkeit eine übergeordnete Rolle spielt wie beispielsweise bei verschiedenen Versagensarten von Befestigungsmitteln, empfohlen, die Zugfestigkeit an am Bauwerk entnommenen Probekörpern zu ermitteln.

2.2.4.2 Zusammenhang der Zugfestigkeitswerte

Um die aus den in Kapitel 2.2.3 beschriebenen Versuchen ermittelten Spalt- und Biegezugfestigkeiten in die zentrische Zugfestigkeit umzurechnen, werden im Folgenden die Zusammenhänge der Messgrößen dargestellt.

Gl. (17) beschreibt den Zusammenhang der mittleren Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$ und der zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} . In [7] wird $\alpha_{sp} = 0,9$ gewählt. Nach [21] sind die Streuungen der in der Vergangenheit erzielten Ergebnisse groß und empfiehlt basierend auf aktuelleren Forschungsergebnissen (z. B. [26]) den Faktor $\alpha_{sp} = 1,0$.

$$f_{ctm} = \alpha_{sp} \cdot f_{ctm,sp} \quad \text{Gl. (17)}$$

Gl. (18) zeigt den Zusammenhang der mittleren Biegezugfestigkeit bewehrter Betonbauteile $f_{ctm,fl}$ aus [7] mit der Bauteilhöhe h und der mittleren zentrischen Zugfestigkeit f_{ctm} . In [21] wird die mittlere zentrische Zugfestigkeit f_{ctm} in Abhängigkeit der Höhe h des Balkens dargestellt (siehe Gl. (19)).

$$f_{ctm,fl} = \left(1,6 - \frac{h}{1000}\right) \cdot f_{ctm} \geq f_{ctm} \quad \text{Gl. (18)}$$

$$f_{ctm} = \frac{0,06 \cdot h_b^{0,7}}{1 + 0,06 \cdot h_b^{0,7}} \cdot f_{ctm,fl} \quad \text{Gl. (19)}$$

3 Grundlegendes zu Befestigungsmitteln

Befestigungssysteme können in unterschiedlichster Weise ausgeführt werden. Abhängig von der Höhe der zu übertragenden Lasten, dem Einsatzgebiet und der vorhandenen Geometrie zur Anordnung können die genannten Befestigungsmittel Vor- und Nachteile aufweisen. Abbildung 3-1 unterscheidet zunächst zwischen Einlegemontage und nachträglicher Montage. Der Einlegemontage können unter anderem Ankerschienen, Gewindehülsen und Kopfbolzen zugewiesen werden. Dabei werden die genannten Elemente vor der Betonage an die Schalung angebracht. Es ist somit eine frühzeitige Festlegung der späteren Befestigungspunkte erforderlich. Eine flexiblere Planung sowie eine Installation an bereits bestehenden Bauteilen werden durch die nachträgliche Montage ermöglicht. Diese kann in die Bohr- und Direktmontage unterteilt werden. Zur letztgenannten können Setzbolzen zugeordnet werden. Der Bohrmontage werden Befestigungsmittel wie Metallspreizdübel, Hinterschnittdübel, Verbunddübel, Verbund-, Verbund-Spreiz-, Verbund-Hinterschnittdübel sowie Betonschrauben zugeordnet.

Der Lastabtrag von Befestigungselementen kann mit den in Abbildung 3-2 schematisch dargestellten Wirkprinzipien Formschluss (a), Kraft-/Reibschluss (b) und Stoffschluss (Verbund (c)) erklärt werden.

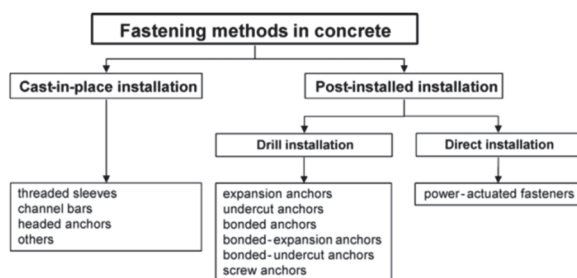


Abbildung 3-1: Befestigungsmethoden in Beton [27]

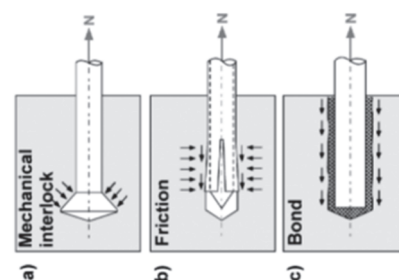
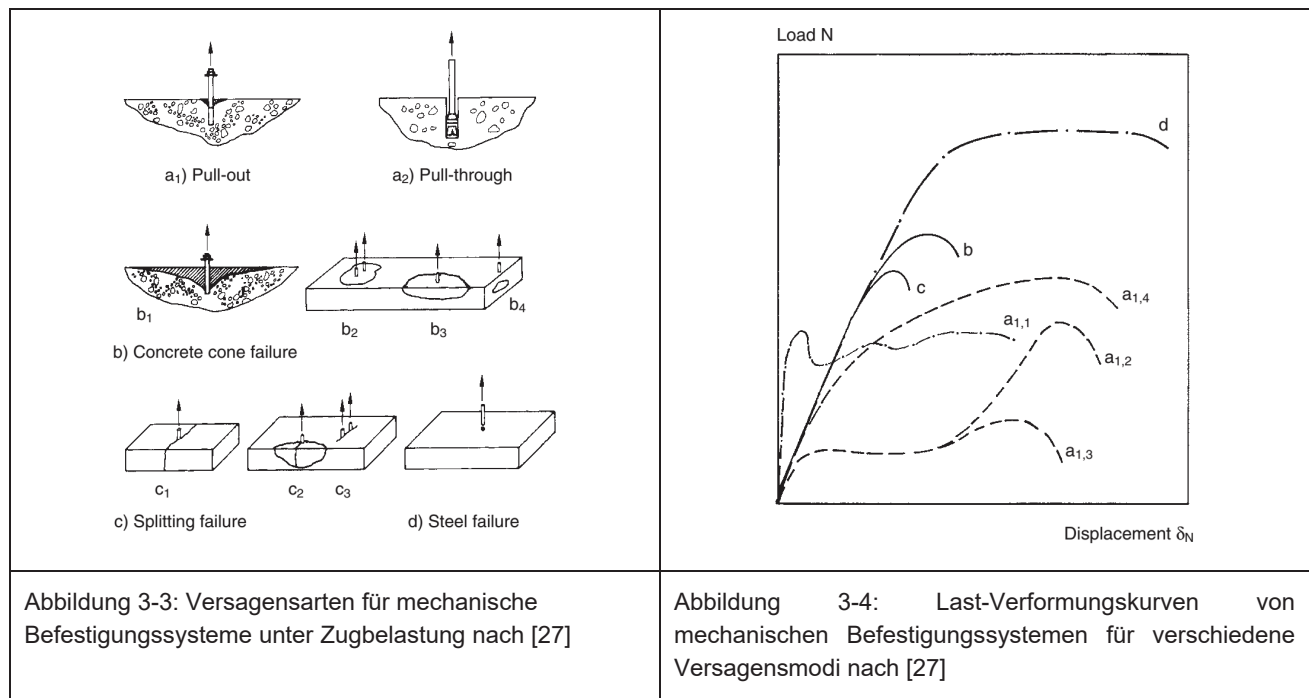


Abbildung 3-2: Lastabtrag von Befestigungselementen [27]

Als Beispiel für Formschluss sind Kopfbolzen zu nennen. Der Lastabtrag des Befestigungselementes über Reibschluss wird beispielsweise bei Bolzenankern beobachtet. [27] Verbundankersysteme übertragen die aufgebracht Lasten über Form- und Stoffschluss in den Verankerungsgrund. [28]

3.1 Tragverhalten und Versagensarten von mechanischen Verankerungssystemen

Werden Befestigungen auf Zug beansprucht, können je nach Belastungshöhe, Befestigungselement, den Eigenschaften des Verankerungsgrunds und geometrischen Anordnung der Befestigungselemente im Bauteil unterschiedliche Versagensarten beobachtet werden. Die in Abbildung 3-3 dargestellten Versagensarten für unter Zug belastete mechanische Befestigungselemente werden im Folgenden beschrieben. Das Last-Verformungsverhalten hängt von der jeweiligen Versagensart ab. Die Gesamtverschiebung setzt sich dabei zusammen aus der Verschiebung des Befestigungselements gegenüber der Bauteiloberfläche, der Verformung des Verankerungsgrunds und der Verformung des Stahlelements und ist beispielhaft für verschiedene Versagensarten in Abbildung 3-4 dargestellt.



Zur Beurteilung des Last-Verformungsverhaltens von mechanischen Verankerungssystemen ist die Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast zu untersuchen. Sofern der Mittelwert der Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast den Wert von 0,4 mm überschreitet, muss nach [29] gezeigt werden, dass die Streuung $cov(\delta(0,5N_u))$ den Grenzwert von 25 % oder 40 % je nach Art des Versuche nicht überschreitet. Zudem soll das Befestigungsmittel unter Zugbelastung eine stetig steigende Last-Verformungskurve aufweisen. Ein Lastabfall oder ein horizontaler Verlauf wie in Abbildung 3-5 kann auf unkontrollierten Schlupf des Befestigungsmittels zurückzuführen zu sein und ist unterhalb eines Grenzwertes nicht akzeptabel. Der Grenzwert N_{Sl} liegt für Versuche in gerissenem Beton bei 70 % und in ungerissenem Beton bei 80 % der maximalen Auszuglast N_{Ru} .

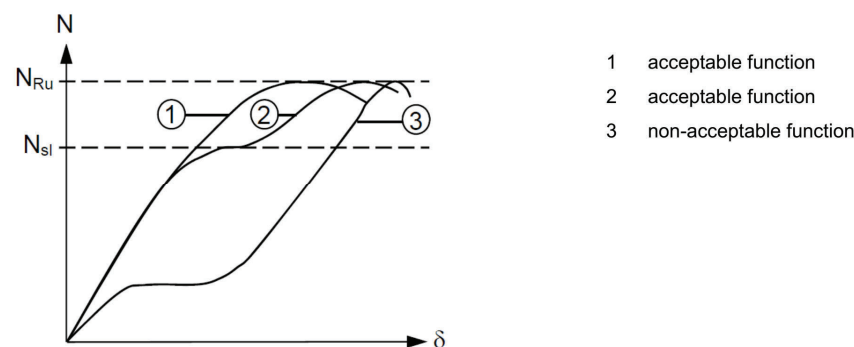


Abbildung 3-5: Beispiele für Last-Verformungskurven von mechanischen Verankerungssystemen unter Zugbelastung

3.1.1 Herausziehen (a_1), Durchziehen (a_2)

Bei der Versagensart Herausziehen wird der Dübel komplett aus dem Bohrloch herausgezogen. Dieser Fall kann nach [27] eintreten, wenn die Spreizkraft nicht ausreichend hoch ist, um die Last in den Verankerungsgrund zu übertragen, bevor die Tragfähigkeit des Untergrunds überschritten wird und es zu einem Versagen des Betons im Sinne von Betonausbruch kommt. Es kann auch zum Herausziehen kommen, wenn das Nachspreizen nicht ausreichend funktioniert. Die Kurven $a_{1,1}$ zeigt beispielhaft das Last-Verformungsverhalten eines Einschlagankers, der auf Herausziehen versagt. Nach Überschreiten des ersten Lastmaximums ist der unregelmäßige Verlauf auffällig, der aus den Unebenheiten der Bohrlochwand resultiert. Die Kurven $a_{1,2}$ und $a_{1,3}$ stellen die Kurven für einen auf Zug belasteten drehmomentkontrollierten Spreizanker dar, dessen Versagensart mit Herausziehen festgestellt wurde. Der Verlauf kann sich wie dargestellt verhalten, wenn das Nachspreizen nicht optimal funktioniert. In Europa ist die Versagensart des Herausziehens des gesamten Befestigungselements für drehmomentkontrollierte Spreizanker nicht erlaubt. Es muss in Versuche gezeigt werden, dass diese Versagensart nicht auftritt. Für Hinterschnittdübel oder Kopfbolzen tritt das Versagen ein, wenn der Formschluss unzureichend ist ($a_{1,4}$). Eine spezielle Form des Herausziehens tritt lediglich bei den genannten drehmomentkontrollierten Spreizankern auf. Das sogenannte Durchziehen beschreibt das Versagen, wenn der Bolzen durch den Spreizklipp gezogen wird und dieser im Bohrloch verbleibt. Nach [30] ist der Widerstand gegen Durchziehen abhängig von der individuellen Geometrie und den Werkstoffeigenschaften des Dübels und somit nicht vorauszusagen bzw. allgemein zu berechnen, weshalb ein Wert für den Widerstand innerhalb des Zulassungsverfahrens durch Versuche ermittelt werden muss.

3.1.2 Kegelförmiger und lokaler Betonausbruch (b)

In [27] wird beschrieben, dass es bei Kopfbolzen und Hinterschnittankern mit zu geringem Abstand zum Bauteilrand zu lokalem Betonausbruch kommen kann. Auf diese Versagensart wird in dem vorliegenden Bericht nicht näher eingegangen. Bei der Versagensart kegelförmiger Betonausbruch wird durch die Belastung auf dem Befestigungselement die Zugfestigkeit des Verankerungsgrunds überschritten. Als Beispiel für das Last-Verformungsverhalten ist Kurve b in Abbildung 3-4 dargestellt. Die Verformung hängt stark von dem verwendeten Befestigungsmittel ab.

Der Ausbruchkörper stellt sich nach [30] als kegelförmiger Betonkörper dar und unterscheidet sich für unterschiedliche mechanische Befestigungssysteme in der Regel nicht wesentlich. Der Winkel zwischen dem Ausbruchkegel und der horizontalen Bauteiloberfläche variiert zwischen 25° für geringe und 45° für große Einbindetiefen. In der Bemessung hat sich für den in der Praxis relevanten Bereich der Einbindetiefen von 40 mm bis 500 mm die Annahme eines mittleren Winkels von 35° bewährt. Dementsprechend nimmt der Durchmesser des Ausbruchkegels im Mittel den dreifachen Wert der Einbindetiefe h_{ef} an.

In [27] wird die mittlere Versagenslast bei kegelförmigem Betonausbruch $N_{u,c}^0$ nach Gl. (20) in Abhängigkeit von drei Faktoren beschrieben.

$$N_{u,c}^0 = k_1 \cdot f_{cc,200}^{0,5} \cdot k_2 \cdot h_{ef}^2 \cdot \frac{k_3}{h_{ef}^{0,5}} \quad \text{Gl. (20)}$$

Der Faktor $k_1 \cdot f_{cc,200}^{0,5}$ beschreibt die Zugtragfähigkeit des Betons, $k_2 \cdot h_{ef}^2$ die Oberfläche des Ausbruchkegels und $k_3/h_{ef}^{0,5}$ den Maßstabeffekt. Der Maßstabeffekt berücksichtigt den nicht proportionalen Zusammenhang der Bruchfläche und der Versagenslast bei zugbeanspruchten Betonbauteilen.

3.1.1 Spalten (c)

Zum Spalten des Betonuntergrunds kann es nach [30] im Zusammenhang mit Befestigungen kommen, wenn die Bauteildimensionen des Verankerungsgrunds limitiert sind oder geringe Achsabstände bei Mehrfachbefestigungen gewählt werden oder der Abstand des Befestigungselements zum Bauteilrand zu gering gewählt ist. Das Spalten des Betons kann bei Zugbelastung der Befestigung oder aber auch bereits bei der Montage der Dübel auftreten. Innerhalb des Zulassungsverfahrens werden aus diesen Gründen Versuche mit minimalen Bauteilabmessungen und minimalen Achs- und Randabständen der Befestigungselemente durchgeführt. Diese geometrischen Werte sind für jedes Befestigungssystem in dessen Produktspezifikation angegeben.

3.1.2 Stahlversagen (d)

In [27] wird erläutert, dass die Versagensart Stahlversagen eintritt, wenn die Tragfähigkeit des Stahlelements oder eines der Stahlelemente des Befestigungssystems überschritten wird. Da die Befestigungssysteme für spezielle Verankerungstiefen vorgesehen sind und die Dübel dementsprechend konzipiert werden, dass die Stahltragfähigkeit ausreichend hoch ist, wird in der Praxis in der Regel das Stahlversagen nicht maßgebend.

3.2 Tragverhalten von Verbundankersystemen

Wie bereits in Abbildung 3-2 gezeigt und in [28] erläutert, gibt es die drei Arten der Lastübertragung bei auf Zug beanspruchten Dübeln. Bei Verbundankersystemen wird eine Zugkraft zunächst vom Anbauteil auf die Ankerstange übertragen und von dort aus in den Mörtel. Anschließend wird die Last weitergeleitet in den Verankerungsgrund Beton und breitet sich dort rotationssymmetrisch als Druckkräfte aus. Sowohl Form- als auch Stoffschluss wirken in beiden Grenzschichten. Die jeweiligen Anteile an den beiden Mechanismen hängen insbesondere von den Eigenschaften des Verbundankersystems und der Oberflächenbeschaffenheit der Grenzschichten ab. In der ersten Grenzschicht Ankerstange/Mörtel werden die Kräfte hauptsächlich über die mechanische Verzahnung des Mörtels in den Gewindegängen der Ankerstange übertragen, sofern es sich um eine profilierte Ankerstange handelt. In der zweiten Grenzschicht Mörtel/Beton wirkt die Mikroverzahnung zwischen dem Verbundankersystem und der Bohrlochwandung. Dementsprechend ist der Anteil der Übertragung der Lasten über Formschluss in Form von Mikroverzahnung abhängig von der Beschaffenheit der Bohrlochwandung. Der Anteil der übertragenen Last über Stoffschluss in Form der Klebewirkung des Mörtels wirkt mit größerem Anteil in der Grenzschicht Mörtel/Beton. Abbildung 3-6 veranschaulicht den erläuterten Lastabtrag über beide Grenzschichten.

Zum Vergleich unterschiedlicher Systeme und verschiedener Ankerstangendurchmesser und Verankerungslängen wird aus den übertragenen Zuglasten und der Mantelfläche des Ankers die

Verbundspannung τ nach Gl. (21) bestimmt. Dabei wird vereinfachend eine konstante Verteilung der Verbundspannung über die Verankerungstiefe angenommen.

$$\tau = \frac{N}{\pi \cdot h_{ef} \cdot d} \quad \text{Gl. (21)}$$

mit:

f_c	Auf Verbundanker wirkende Zugkraft [N]
h_{ef}	Verankerungstiefe [mm]
d	Ankerdurchmesser [mm]

In [31] (entnommen aus [32]) wurde die Verbundtragfähigkeit von 20 Verbundankersystemen in eng abgestützten Auszugversuchen untersucht. Die Darstellung in Abbildung 3-7 zeigt deutlich, dass die bei auf Zug belasteten Verbunddübeln maximal übertragbare Verbundspannung abhängig vom jeweiligen Produkt ist.

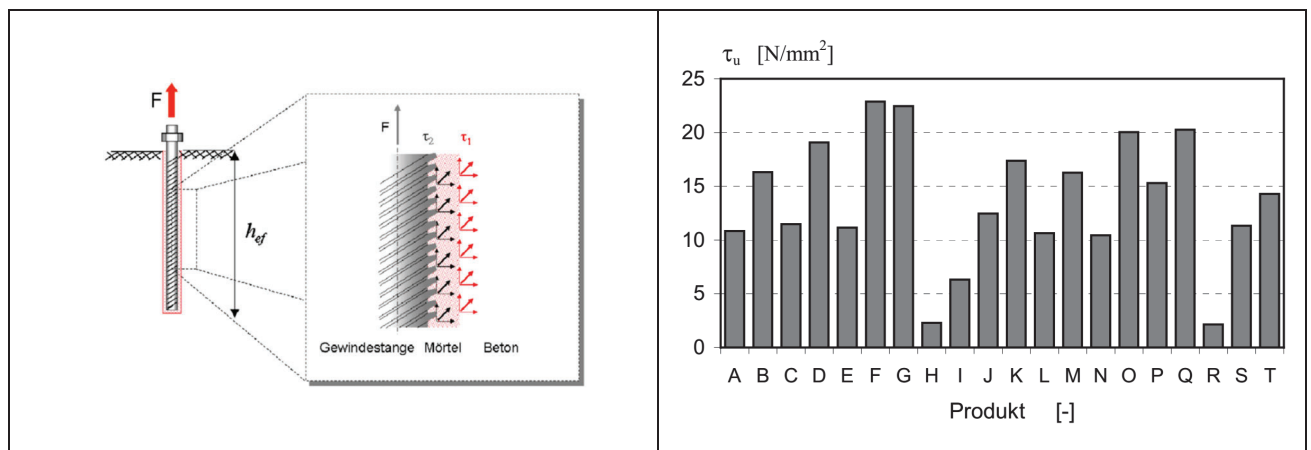


Abbildung 3-6: Lastabtrag eines auf Zug beanspruchten Einzelverbunddübels in Beton, aus [33], entnommen aus [34]

Abbildung 3-7: Verbundspannung nach Mörteltyp, Einzeldübel M16, $h_{ef}=101,6$ mm, enge Abstützung nach [31], entnommen aus [32]

3.2.1 Last-Verformungs-Verhalten unter Zugbeanspruchung

Wie sich ein Verbundankersystem unter zentrischer Zugbelastung verhält, ist abhängig von der Steifigkeit und Haftscherfestigkeit des Mörtels. Abbildung 3-8 zeigt vier typische Last-Verformungsdiagramme für Verbundankersysteme in ungerissenem Beton, die auf Zug belastet wurden und weder durch Feuchtigkeit noch durch schlechte Reinigung beeinflusst wurden. Wie bereits oben beschrieben, kann das Verbundversagen in zwei Grenzschichten auftreten. Versagt das System in der Schicht Anker/Mörtel, so ist grundsätzlich eine schnelle Abnahme der Last zu beobachten (d). Grund für die schnelle Lastabnahme ist die relativ glatte Bruchebene zwischen Ankerstange und Mörtel, in der nach Versagen nur noch wenig Last über Reibung übertragen werden kann. Die Schicht Mörtel/Beton weist größere Unebenheiten auf, über die mehr Reibung übertragen werden kann. Versagt die Verankerung in dieser Schicht, so sind die folgenden Versagensbilder zu

unterscheiden. Sofern die Reibungskraft geringer als die Klebekraft ist, nimmt nach Erreichen der maximalen Last bei relativ geringer Verschiebung die Last langsam ab (a). Die Bilder (b) und (c) zeigen Beispiele für den Fall, wenn die Reibungskraft höher als die Klebekraft ist. Hier wird die maximale Klebekraft überschritten, bevor die maximale Versagenslast des gesamten Systems erreicht wird. Dies hat zur Folge, dass die Last weiter ansteigt und über Reibung zwischen Mörtel und Bohrlochwand übertragen wird. Es ist von einer großen Verschiebung bei maximaler Last auszugehen. Wie groß der Unterschied zwischen Reibungskraft und Klebekraft ist, hängt vom jeweiligen Produkt ab. Form und Rauigkeit des Bohrlochs haben ebenfalls einen Einfluss.

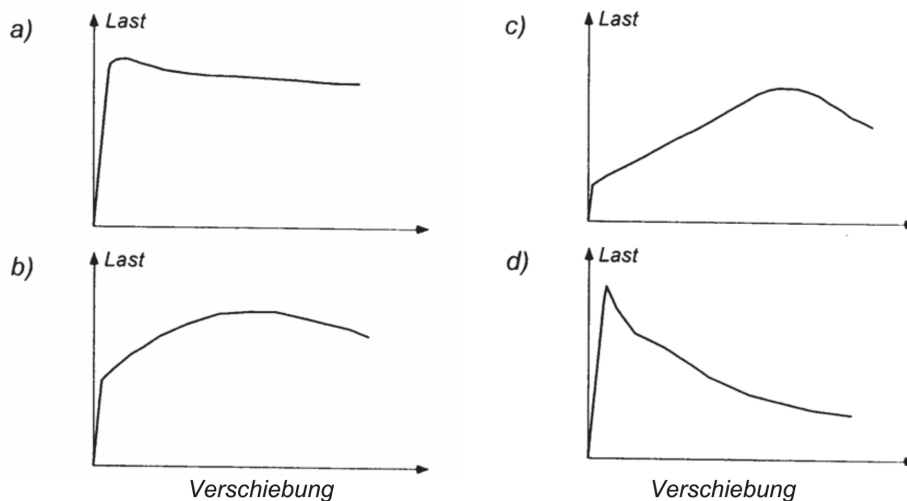


Abbildung 3-8: Typische Last-Verschiebungskurven von Patronen- und Injektionsdübeln in ungerissenem Beton [32]

Bei Verbundankersystemen müssen nach [18] zum einen die Last-Verformungskurven dahingehend untersucht werden, ob unter Zugbelastung unkontrollierter Schlupf auftritt. Dies ist der Fall, wenn das Befestigungselement mit dem Verbundmörtel aus dem Bohrloch gezogen wird und die Last über Reibung zwischen der unregelmäßigen Bohrlochwand und dem Verbundmörtel übertragen wird. Dies ist mit einer deutlichen Änderung der Steifigkeit der Last-Verformungskurve verbunden. Da nicht in allen Last-Verschiebungskurven die Änderung der Steifigkeit deutlich zu erkennen ist, wird zur Beurteilung die Last $N_{u,adh}$ bestimmt. Diese wird nach Gl. (22) dem charakteristischen Widerstand gegen Herausziehen aus der ETA des jeweiligen Produkts gegenübergestellt und ggf. ein Abminderungsfaktor α_1 ermittelt. Sofern das Versagen in der Schicht zwischen Ankerstange und Mörtel auftritt, kann die Untersuchung der Last $N_{u,adh}$ vernachlässigt werden.

$$\alpha_1 = \frac{N_{u,adh}}{N_{Rk,p}} \cdot \frac{1,5}{1,3} \cdot \gamma_{inst} \leq 1,0 \quad \text{Gl. (22)}$$

mit:

$$N_{Rk,p} = \tau_{Rk} \cdot \pi \cdot d \cdot h_{ef}; \text{ char. Widerstand gegen Herausziehen nach ETA}$$

Neben der Untersuchung der Last $N_{u,adh}$ wird zudem noch die Verschiebung in den einzelnen Versuchen bei mittlerer halber Versagenslast ($\delta(0,5N_u)$) der gesamten Versuchsserie betrachtet. Betragen die Werte der Verschiebungen $\delta(0,5N_u) \geq 0,4$ mm in mindestens einem Test der Serie, muss

die Streuung $\text{cov}(\delta(0,5N_u))$ den Grenzwert von 25 % oder 40 % je nach durchgeführter Versuchsserie einhalten.

3.2.2 Versagensmechanismen von Verbundankersystemen

Verbundankersysteme, die auf Zug belastet werden, können unterschiedliche Versagensarten aufweisen, die in Abbildung 3-9 dargestellt sind.

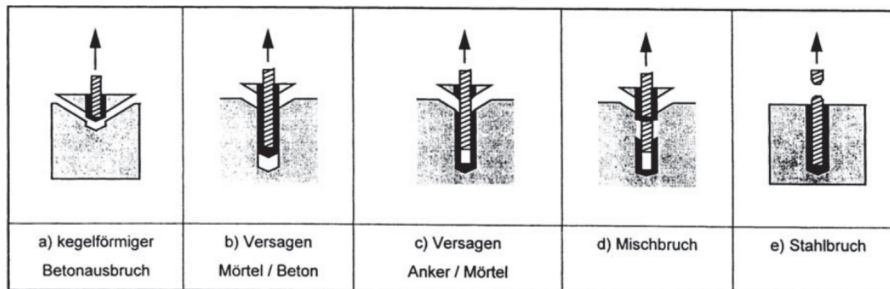


Abbildung 3-9: Versagensarten für Verbundankersysteme unter Zugbelastung nach [35]

Sofern die Verankerungstiefe gering gewählt ist und die Verbundspannung ausreichend hoch, kann es auch bei Verbundankersystemen zu kegelförmigem Betonausbruch (a) kommen, sobald die Zugtragfähigkeit des Betons überschritten wird [35]. Der Ausbruchkegel unterscheidet sich nach [27] dann nicht von dem bei mechanischen Verankerungssystemen. Werden Verbundankersysteme mit größeren Verankerungstiefen belastet, ist kein reiner Betonausbruch mehr zu erwarten, sondern ein kombiniertes Versagen von Betonausbruch und Herausziehen. Dabei stellt sich ein Betonkegel mit der Tiefe vom zwei- bis dreifachen Ankerdurchmesser an der Betonoberfläche ein. Darunter versagt der Verbund wie bereits oben erwähnt an den Grenzschichten Mörtel/Beton oder Ankerstange/Mörtel oder es kommt innerhalb des Verbundversagens zu einem Mischversagen.

Zudem wird in [27] erläutert, dass für Stahlversagen bei Verbundankersystemen kein Unterschied im Vergleich zu mechanischen Verankerungssystemen zu erwarten ist. Ergänzend zu Abbildung 3-9 muss die Versagensart Spalten des Betons auch bei Verbundankersystemen Berücksichtigung finden. Bisher liegt noch kein Modell vor zur Berechnung des Widerstandes gegenüber Spalten bei auf Zug belasteten Verbundankersystemen, weshalb für minimale Achs- und Randabstände sowie minimale Bauteildicken Versuche innerhalb des Zulassungsverfahrens durchgeführt werden müssen.

3.2.3 Einflussfaktoren auf die Verbundtragfähigkeit

In der Vergangenheit durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Parameter Einfluss auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen haben können.

- Geometrische Einflüsse
 - Durchmesser Ankerstange
 - Verankerungslänge
 - Ringspalt Verbundmörtel
- Materialspezifische Einflüsse des Verbundmörtels
 - Mörtelart und -zusammensetzung
 - Aushärtegrad Verbundmörtel
- Herstellungsbedingte Einflüsse
 - Bohrverfahren
 - Bohrlochreinigung
- Betontechnologische Einflüsse
 - Betonfestigkeit
 - Feuchte des Betons
 - Risse
 - Dicke der Betondeckung und Randabstand
- Umwelteinflüsse
- Temperatureinflüsse

Als geometrische Einflussfaktoren wurden unter anderem in [32, 35–39] der Ankerstangendurchmesser, die Verankerungslänge und die Größe des Verbundmörtelringspalts untersucht. Materialspezifische Einflüsse wie die Mörtelart und -zusammensetzung sowie der Aushärtegrad des Verbundmörtels wurden in [32, 37, 40] untersucht. Im aktuell durchgeführten Forschungsvorhaben wurden für den Vergleich der durchgeführten Versuche in Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen und in Recyclingbeton die oben genannten Parameter konstant gehalten. Zwar wurden drei unterschiedliche Verbundankersysteme getestet, jedoch alle in jeder unterschiedlichen Betoncharge.

Auch Umwelteinflüsse wie Chemikalien, Fette oder Öle, die einen Einfluss auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen haben können, wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen. Temperatureinflüsse waren ebenfalls kein Gegenstand der Untersuchung.

Die Untersuchungen innerhalb des Forschungsvorhabens fokussierten sich auf die herstellungsbedingten und betontechnologischen Einflüsse.

3.2.3.1 Herstellungsbedingte Einflüsse

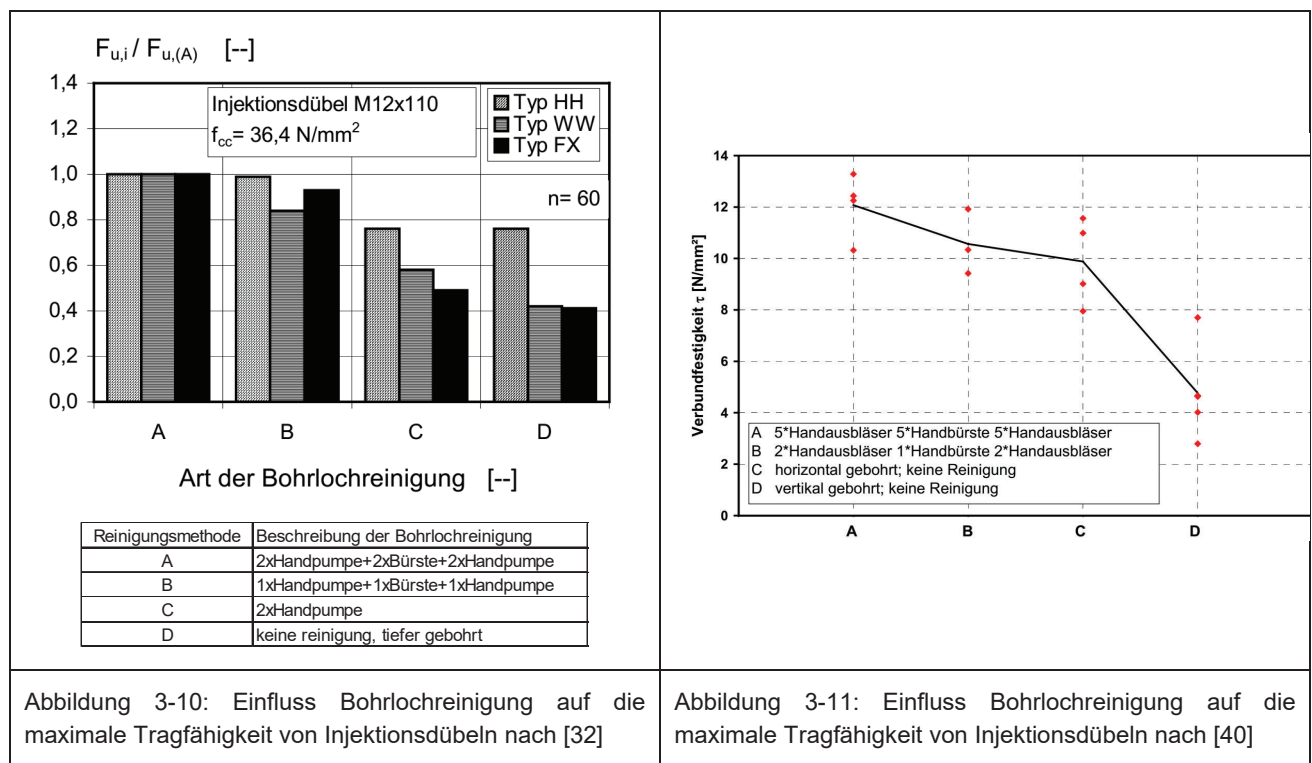
Zur Herstellung von Bohrlöchern können die Bohrverfahren Hammerbohren, Pressluftbohren oder Diamantbohren angewendet werden. Jedes Verfahren wirkt sich unterschiedlich auf die Rauigkeit der Bohrlochwandung aus, was wiederum einen erheblichen Einfluss auf den mechanischen Formschluss zwischen Mörtel und Bohrlochwand und somit auf die Tragfähigkeit des Verbundankersystems hat. Durch das Diamantbohrverfahren werden in der Regel die Bohrlöcher mit der geringsten Rauigkeit der Bohrlochwandung hergestellt. [41] In [41, 42] (entnommen aus [41]) wurden vergleichende Ausziehversuche an Verbundankersystemen durchgeführt. Die Versagenslasten an den Ankern, die

in diamantgebohrten Bohrlöchern installiert wurden, waren geringer als die an Ankern in hammergebohrten Bohrlöchern.

Es ist allerdings zu beachten, dass die Installation beim Hammerbohren und Diamantbohren unterschiedliche Reinigungsschritte zur Folge hat. In der Regel wird beim Diamantbohren zusätzlich mit Wasser gereinigt, da bereits beim Bohrvorgang Wasser zum Einsatz kommt. Es ist davon auszugehen, dass das Bohrloch dadurch besser gereinigt wird, was einen positiven Effekt auf die Tragfähigkeit haben kann. Dem entgegen steht allerdings der negative Einfluss der Feuchtigkeit der Bohrlochwandung.

Die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen hängt maßgeblich von der Reinigung des Bohrlochs ab. Das bei dem Hammerbohren im Bohrloch verbleibende Bohrmehl kann als Trennschicht zwischen dem Verbundankersystem und der Bohrlochwandung wirken. Für Patronensysteme kann erwartet werden, dass der negative Einfluss einer schlechten Bohrlochreinigung nicht so groß ist wie bei Injektionsankersystemen. Durch den schlagend/drehenden Setzvorgang der Ankerstange bei Patronensystemen wird die Bohrmehlschicht an der Bohrlochwand teilweise entfernt. [32]

Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 zeigen den Einfluss der Bohrlochreinigung auf die maximale Tragfähigkeit von Verbundankersystemen. Es wird ein drastischer Abfall der Ausziehlasten bei schlechterer bzw. fehlender Reinigung ersichtlich.



3.2.3.2 Betontechnologische Einflüsse

Das Tragverhalten von Verbundankersystemen kann durch die Betondruckfestigkeit beeinflusst werden. In [40] werden Auszugversuche an Verbundankersystemen in Beton mit unterschiedlicher Druckfestigkeit ausgewertet. Bis zu einer Druckfestigkeit des Betons von ca. 35 bis 40 N/mm² konnte ein Anstieg der maximalen Verbundspannung festgestellt werden. Bei höheren Druckfestigkeiten

ergaben die Versuche keine höheren Versagenslasten mehr. Dies wird mit dem Ort des Versagens begründet. Versagt das System in der Schicht Mörtel/Beton, ist eine Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit zu erkennen. Bei höheren Druckfestigkeiten des Betons wurde ein Versagen in der Schicht Ankerstange/Mörtel festgestellt. Ab welcher Betondruckfestigkeit ein Wechsel der Versagensschicht zu erwarten ist, ist abhängig vom verwendeten Produkt.

In [43] wurde ebenfalls festgestellt, dass der Einfluss der Betondruckfestigkeit auf die Höhe der maximalen Verbundspannung produktabhängig ist. Dieser wird in Gl. (23) durch den Exponenten n berücksichtigt, der zwischen 0 und 0,5 liegen kann.

$$N_{u,bc} = \tau_1 \cdot \pi \cdot D_b \cdot h_{ef} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,low}} \right)^n \quad \text{Gl. (23)}$$

mit:

τ_1	Verbundspannung bei Versagen zwischen Beton und Verbundmasse
D_b	Durchmesser des Bohrlochs
h_{ef}	Einbindetiefe
f_c	Zylinderfestigkeit des Betonuntergrunds
$f_{c,low}$	Referenzbetonfestigkeit
n	Exponent zur Berücksichtigung der Betondruckfestigkeit

Aus numerischen Untersuchungen und der Analyse vorausgegangener experimenteller Untersuchungen wird in [32] ebenfalls ein produktabhängiger Einfluss der Druckfestigkeit auf die Höhe der Verbundspannung erläutert.

Der Einfluss des Betonalters auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen wurde in [32] für ein Injektionsankersystem und ein Patronensystem ausgewertet. Dies war allerdings nicht das ursprüngliche Untersuchungsziel. Es wurde zwischen enger und weiter Abstützung unterschieden.

Mit steigendem Betonalter stieg in den Versuchen bei enger Abstützung die Verbundspannung mit der Potenz 0,03 bis 0,05. Die maximalen Verbundspannungen nahmen bei weiter Abstützung mit der Potenz 0,08 bis 0,12 zu. Versuche mit enger Abstützung wurden über knapp 400 Tage ausgewertet, mit weiter Abstützung über mehr als 600 Tage. Fast keinen Einfluss zeigte das Betonalter bei der Auswertung der Versuche mit dem Patronensystem über ein Betonalter bis 190 Tage. Als möglicher Parameter für den Einfluss auf die Höhe der maximalen Versagenslast wird die Feuchtigkeit im Sinne von nicht gebundenem Mischwasser genannt.

Folgen von Feuchtigkeit an der Bohrlochwandung können nach [32] eine erschwerte Reinigung und die Anbindung von Wassermolekülen an die Mörtelstruktur sein. Beide Folgen können in einem starken Abfall der maximalen Verbundtragfähigkeit resultieren.

Untersuchungen von Mézàros [32] zeigen, dass die Wasseraufnahme von Beton von dessen Porosität und Sättigungsgrad sowie der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur abhängt. Aufgrund des höheren Wasserzementwertes weist Beton mit geringerer Festigkeit eine höhere Porosität auf. Für einen Beton B35 wurde innerhalb einer Woche eine Eindringtiefe von 80 mm festgestellt. Zur Ermittlung des Einflusses der Feuchtigkeit auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen wurden drei Injektionsankersysteme und ein Patronensystem in trockenem und feuchtem Beton in zentrischen Auszugversuchen getestet. Die Feuchtigkeit im Betonuntergrund wurde dadurch erzeugt, dass eine

Wasserschicht sieben Tage auf den Prüfkörpern aufgebracht wurde. Nach Entfernen des Wassers wurden die Bohrlöcher erstellt, gereinigt und die Anker installiert. Die Bohrlochreinigung wurde dabei wie bereits in Abbildung 3-10 dargestellt, variiert. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigte, dass je nach betrachtetem System und Reinigungsart die Lasten im feuchten Beton 65 % bis 167 % der Versagenslasten im trockenen Beton mit jeweils analogem Vorgehen erreichten. Der Einfluss der Feuchtigkeit auf die Tragfähigkeit sowie der Einfluss auf die Reinigung und des damit verbundenen Einflusses auf die Tragfähigkeit wurden als produktspezifisch erklärt.

In [40] wurde ebenfalls der Einfluss von Feuchtigkeit des Betons auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen untersucht. Dabei wurde die Feuchtigkeit im späteren Bohrloch auf verschiedene Arten erzeugt. Es wurden Bohrlöcher im trockenen Beton hergestellt, die eine Woche mit Wasser gefüllt wurden, bevor sie nach Entfernen des Wassers gereinigt und die Systeme installiert wurden. Zudem wurden Bohrlöcher ebenfalls im trockenen Beton hergestellt und vor dem Füllen mit Wasser bereits gereinigt. Teilweise wurden die Verbundankersysteme in mit Wasser gefüllten Bohrlöchern installiert. Als ein Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Verbundankersysteme, die in wassergefüllten Bohrlöchern installiert wurden mit den geringsten Lasten versagten. Die Tragfähigkeit von den im trockenen Beton installierten Verbundankersystemen konnte in wassergesättigtem Beton lediglich mit intensiverer Reinigung erzielt werden.

Risse im Beton können die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen beeinflussen. Nach [7] sind Risse in Stahlbetonbauteilen auf $w_{\max} = 0,3 \text{ mm}$ bis $0,4 \text{ mm}$ zu begrenzen. In durchgeführten Versuchen in [32] wurden zentrische Auszugversuche mit enger und weiter Abstützung an einem Injektionsankersystem und zwei Patronensystemen durchgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigten eine Abnahme der maximalen Auszuglast in gerissenem Beton ($N_{u,\text{gerissen}}$) verglichen mit denen in ungerissenem Beton ($N_{u,\text{ungerissen}}$) ermittelten Traglasten. Bei den Versuchsergebnissen, aus denen sich ein Verhältnis von $N_{u,\text{gerissen}}/N_{u,\text{ungerissen}} = 0,8$ oder höher ergab, wurde angenommen, dass der Riss lediglich durch den oberen Teil des Bohrlochs verlief und nicht komplett über den gesamten Verlauf. Werden diese Versuche vernachlässigt, verweist der Autor auf ein Verhältnis der Auszuglasten für eine Rissbreite von $0,3 \text{ mm}$ bis $0,4 \text{ mm}$ von $25 \% \leq N_{u,\text{gerissen}}/N_{u,\text{ungerissen}} \leq 80 \%$. Im Mittel lagen die Versagenslasten im gerissenen Beton bei ca. 50 % derer im ungerissenen Beton. Zudem wurde festgestellt, dass die Streuung der Versagenslasten im gerissenen Beton deutlich höher lag. Als möglichen Grund hierfür wurde der ungleichmäßige und ebenfalls streuende Verlauf des Risses innerhalb des Bohrlochs genannt. Das Verhältnis der Fraktilwerte lag bei ca. 30 %. In [27] wurde erklärt, dass das Versagen bei Auszugversuchen in gerissenem Beton immer in der Schicht Mörtel/Beton auftritt.

3.3 Prüfung, Bewertung und Bemessung

In Deutschland werden Befestigungen in Beton nach EC2-4 [4] bemessen. Gemäß des Nachweisverfahrens muss für den Grenzzustand der Tragfähigkeit gezeigt werden, dass der Bemessungswert der Einwirkungen (E_d) stets kleiner oder gleich dem Bemessungswert der Widerstände (R_d) ist (siehe Gl. (24)). Die Teilsicherheitsbeiwerte auf der Einwirkungsseite unterscheiden sich nicht von EC0 [44]. Die Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte auf der Widerstandsseite ist nach EC2-4 durchzuführen. Für alle Versagensarten unter Zugbelastung außer Stahlversagen ist der Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mc} nach Gl. (26) zu bestimmen. Er beinhaltet den

Teilsicherheitsbeiwert γ_c von Beton und wird durch den Faktor γ_{inst} ergänzt. Dieser bezieht die Montagesicherheit des verwendeten Systems mit ein. Für Kopfbolzen und Ankerschienen wird nach [30] grundsätzlich der Faktor $\gamma_{inst} = 1,0$ empfohlen. Für nachträglich montierte Befestigungssysteme wird der Faktor γ_{inst} innerhalb des Zulassungsverfahrens des jeweiligen Produkts durch Qualifizierungsversuche bestimmt. In der Bemessung ist der Wert für γ_{inst} aus der Produktspezifikation des jeweiligen Systems anzusetzen. Für Zugbeanspruchungen beträgt dieser Faktor 1,0, 1,2 oder 1,4. Für die Versagensarten unter Querbeanspruchung mit Ausnahme der Versagensart Betonausbruch auf der lastabgewandten Seite kann $\gamma_{inst} = 1,0$ angesetzt werden, da grundsätzlich kein Zusammenhang zwischen der Montage und der Querkrafttragfähigkeit besteht.

$$E_d \leq R_d \quad \text{Gl. (24)}$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad \text{Gl. (25)}$$

$$\gamma_{Mc} = \gamma_c \cdot \gamma_{inst} \quad \text{Gl. (26)}$$

Der charakteristische Widerstand kann zum einen wie beispielsweise bei der Versagensart Betonkantenbruch nach [4] rechnerisch bestimmt werden. Für andere Versagensarten wie Herausziehen oder die kombinierte Versagensart Herausziehen und Betonbruch sind die charakteristischen Widerstände produktabhängig und müssen durch versuchstechnische Untersuchungen ermittelt werden. Die jeweiligen EADs (European Assessment Document) der EOTA (European Organisation for Technical Assessment) geben hierfür Prüfprogramme vor. In diesem Forschungsvorhaben werden Versuche nach EAD 330232-01-0601 [29] sowie EAD 330499-01-0601 [18] durchgeführt. Die genannten EADs enthalten mittlerweile neben der Auswertung der Versuchsergebnisse unter anderem auch die Beschreibung der Versuchsdurchführung. Neben den Versuchen zur Ermittlung der charakteristischen Widerstände in gerissenem und ungerissenem Beton wird unter anderem auch geprüft, welchen Einfluss die Installation mit einer abgeminderten Reinigung des Bohrlochs oder mit einem anderen Bohrverfahren haben oder wie sich Umwelteinflüsse wie Temperatur oder alkalisches und sulfidisches Milieu auf die Tragfähigkeit des Befestigungssystems auswirken.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse und deren Bewertung endet in einer europäisch technischen Produktspezifikation – einer sogenannten ETA (European Technical Approval), die in Deutschland vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) als deutsche Zulassungs-, Genehmigungs- und Bewertungsstelle vergeben wird. Diese enthält neben den genannten charakteristischen Widerständen zunächst die Produktbeschreibung, Anwendungsbedingungen und Installationshinweise sowie Verschiebungen unter verschiedenen Belastungssituationen und Angaben zur geometrischen Anordnung im Bauteil wie Achs- und Randabstände.

3.4 Bisherige Untersuchungen zum Verhalten von Befestigungen in Recyclingbeton

Zur Untersuchung des Tragverhaltens in Beton wurden in der Vergangenheit viele Untersuchungen durchgeführt, die in den vorherigen Kapiteln teilweise aufgegriffen wurden. Zum Verhalten von Befestigungen in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen ist lediglich eine Untersuchung bekannt. In [45] wurden die Ergebnisse einer kleinen Testreihe veröffentlicht. Es wurden vier Befestigungssysteme in zwei Betonen mit unterschiedlichen rezyklierten Gesteinskörnungen in

zentrischen Auszugversuchen geprüft und mit den Ergebnissen von Auszugversuchen in Referenzbetonen mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen verglichen. Da in den Auszugversuchen zweier Befestigungssysteme Stahlversagen dominierte, konnten lediglich die beiden anderen Systeme betrachtet werden zur Beurteilung der Betonversagenslasten. Es wurde berichtet, dass die mittleren Versagenslasten in Recyclingbeton zwar geringer waren als diejenigen im Referenzbeton, allerdings in geringerem Maße die Lasten unterschritten als erwartet. Es konnten in den Recyclingbetonen laut Verfasser 77 – 90 % der Versagenslasten in Normalbeton erreicht werden. Da die Betone allerdings eine unterschiedliche Festigkeit aufwiesen, wurde (nicht von den Verfassern des Artikels) der Bereich auf 69 – 88 % der Referenzlasten ermittelt, sofern die Versagenslasten über die Betondruckfestigkeit normiert werden.

4 Auswahl der Betonmischungen und Charakterisierung wesentlicher Eigenschaften

4.1 Betonmischungen

Um das Tragverhalten von Befestigungen in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen beurteilen zu können, wurden Versuche in Betonprüfkörpern mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen durchgeführt. Zum einen wurden Referenzprüfkörper mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen hergestellt, wie sie auch für Versuche im Zulassungsverfahren von Befestigungsmitteln zur Anwendung kommen. Diese Betone sind mit „NB“ bezeichnet (= Normalbeton). Für die Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen wurden die in Kapitel 2.1 dargestellten Gesteinskörnungstypen 1 und 2 eingesetzt. Innerhalb des Forschungsprojektes wurden Recyclingbetone mit den Recyclinggesteinskörnungstypen 1 und 2 hergestellt. Nach Vorgabe in [6] dürfen in Betonklasse BK-N maximal 25 Vol.-% der groben Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden. Der Einsatz von Brechsand ist dabei nicht erlaubt. Demnach wurden zunächst die innerhalb des Projektes genannten Betone RB1.1 und RB2.1 hergestellt. Der Anteil der Gesteinskörnungstypen Rc+Ru / Rb war bei RB1.1 90/10 und bei RB2.1 70/30.

Neben den genannten Betonmischungen wurde an der TU Kaiserslautern eine Mischung („RB 2.2“) erstellt, bei der der Anteil der natürlichen Gesteinskörnungen > 2 mm vollständig durch rezyklierte Gesteinskörnungen ersetzt wurde.

Um eine allgemeinere Aussage über das Tragverhalten von Befestigungen in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen treffen zu können, wurden zusätzlich extern Versuchskörper hergestellt. Die Gebr. Kaltenbach GmbH & Co. KG hat zur Herstellung der Versuchskörper bei der Beschaffung der rezyklierten Gesteinskörnungen auf einen Lieferanten aus der Region zurückgegriffen. Die Betonmischung „RB2.3“ beinhaltet ausschließlich rezyklierte Gesteinskörnungen inklusive Brechsand. Bei der Mischung RB2.1* der Firma Kaltenbach wurden mit 35 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung durch Recyclinggesteinskörnung > 2 mm ersetzt. Der Anteil ist höher als bei den oben genannten Mischung RB2.1 aus Herstellung an der TU Kaiserslautern. Um die beiden Mischungen mit Typ 2 Gesteinskörnung zu unterscheiden, wurde die Bezeichnungen der Ergebnisse aus den Versuchskörpern von der Firma Kaltenbach durch die Bezeichnung „*“ ergänzt. Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 zeigen einen Überblick über die angestrebten Anteile der Gesteinskörnungen nach Betontyp, hergestellt an der TU Kaiserslautern und von der Gebr. Kaltenbach GmbH & Co. KG.

In wenigen Testreihen wurde auf bestehende, bereits weiter in der Vergangenheit zurückliegend hergestellte Versuchskörper aus Zulassungsverfahren zurückgegriffen. Diese Prüfkörper wurden von der Firma RAU-Betonfertigteile GmbH & Co. KG hergestellt.

Tabelle 4-1: Übersicht über die Gesteinskörnungsanteile nach Betoncharge (hergestellt TUK)

Bezeichnung Beton	Bezeichnung Gesteinskörnung	Anteile innerhalb der Korngruppen (bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung)	Rc+Ru / Rb
[-]	[-]	[Vol.-%]	[M.-%]
NB	GK 0/2	34	-
	GK 2/8	31	-
	GK 8/16	35	-
RB 1.1	GK 0/2	35	-
	GK 2/8	17	-
	RC 2/8	13	90/10
	GK 8/16	20	-
	RC 8/16	15	90/10
RB 2.1	GK 0/2	35	-
	GK 2/8	17	-
	RC 2/8	13	70/30
	GK 8/16	20	-
	RC 8/16	15	70/30
RB 2.2	GK 0/2	37	-
	RC 2/8	29	70/30
	RC 8/16	34	70/30

GK: natürliche Gesteinskörnung (Rundkorn)

Rb und Rc+Ru: rezyklierte Gesteinskörnung nach [3]

RC: rezyklierte Gesteinskörnung, Gemisch hauptsächlich aus Rb und Rc+Ru

Tabelle 4-2: Übersicht über die Gesteinskörnungsanteile nach Betoncharge (hergestellt Kaltenbach)

Bezeichnung Beton	Bezeichnung Gesteinskörnung	Anteile innerhalb der Korngruppen (bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung)	Rc+Ru / Rb
[-]	[-]	[Vol.-%]	[M.-%]
NB	GK 0/2	37	-
	GK 2/8	25	-
	GK 8/16	38	-
RB 2.1*	GK 0/2	34	-
	GK 2/8	10	-
	GK 8/16	21	-
	RC 2/16	35	86/13
RB 2.3	RC 0/4	35	100/0
	RC 2/16	65	86/13

GK: natürliche Gesteinskörnung (Rundkorn)

Rb und Rc+Ru: rezyklierte Gesteinskörnung nach [3]

RC: rezyklierte Gesteinskörnung, Gemisch hauptsächlich aus Rb und Rc+Ru

Bei Herstellung der Betone an der TU Kaiserslautern konnte auf einen Mischer mit maximal 650 bis 700 l Fassungsvermögen zurückgegriffen werden. Demnach war die Anzahl der Versuchskörper aus einer Betoncharge stark begrenzt, weshalb teilweise für gleiche Mischungsansätze zwei unterschiedliche Betonchargen betoniert wurden (z. B. NB_01.10.20/A und NB_01.10.20/B). Die Betonmischungen wurden mithilfe der Stoffraumrechnung zusammengestellt und in Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 dargestellt. Die Aufteilung der Korngruppen sowie der Verteilung der Gesteinskörnung

nach natürlichem und rezykliertem Material wurde in den oben gezeigten Tabellen dargestellt, umgesetzt. Der Wasser-Zement-Wert bewegte sich zwischen ca. 0,68 und 0,75. Dabei ist festzuhalten, dass in den Wasser-Zement-Wert lediglich das Zugabewasser eingerechnet wird. Das Zusatzwasser, das insbesondere bei der rezyklierten Gesteinskörnung zusätzlich hinzugefügt werden muss, ist nicht mit inbegriffen. Als Zement kam CEM I 32,5 R zum Einsatz mit Ausnahme der Betonagen am 18.08.21, 20.08.21 und 23.08.21. Hier wurde CEM I 42,5 N verwendet.

Tabelle 4-3: Betonzusammensetzung TUK

		NB_17.06.20	RB1.1_24.06.20	RB2.1_26.06.20	NB_13.07.20	RB1.1_15.07.20	RB2.1_17.07.20	NB_01.10.20/A	NB_01.10.20/B	RB1.1_14.10.20/A	RB1.1_14.10.20/B	RB2.2_22.10.20/A	RB2.2_22.10.20/B	NB_19.03.21	RB2.2_29.03.21	NB_24.03.21	RB2.1_30.03.21	RB2.2_06.04.21	NB_18.08.21	RB2.1_20.08.21	RB2.2_23.08.2021
Wasser	[l]	116	123	135	136	154	151	142	137	126	221	156	131	106	124	129	149	158	124	136	142
Zement	[kg]	167	167	179	175	175	175	159	159	145	253	161	145	132	137	159	165	165	156	156	161
Fließmittel	[l]	1,7	1,7	1,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GK 0/2	[kg]	439	439	471	460	462	462	438	438	383	670	424	382	363	361	438	438	436	431	432	430
GK 2/8	[kg]	376	207	222	394	218	218	376	376	181	316	-	-	311	-	375	206	-	369	204	-
Rb 2/8	[kg]	-	15	47	-	15	46	-	-	13	22	94	85	-	80	-	44	97	-	43	96
Rc+Ru 2/8	[kg]	-	141	117	-	148	115	-	-	123	215	235	212	-	200	-	109	241	-	108	238
GK 8/16	[kg]	439	241	259	460	254	254	438	438	211	368	-	-	363	-	438	241	-	369	238	-
Rb 8/16	[kg]	-	17	55	-	18	54	-	-	15	26	110	99	-	94	-	51	113	-	51	112
Rc+Ru 8/16	[kg]	-	164	137	-	173	134	-	-	143	250	274	247	-	233	-	127	282	-	126	278

GK: natürliche Gesteinskörnung (Rundkorn)

Rb und Rc+Ru: rezyklierte Gesteinskörnung nach [3]

Tabelle 4-4: Betonzusammensetzung KALT

		NB_02.03.21	RB2.1*_05.03.21	RB2.3_10.03.21
Wasser	[l]	185	190	200
Zement	[kg]	265	255	300
GK 0/2	[kg]	724	665	-
GK 2/8	[kg]	471	188	-
GK 8/16	[kg]	701	378	-
RC 0/4	[kg]	-	-	601
RC 2/16	[kg]	-	566	977

GK: natürliche Gesteinskörnung (Rundkorn)

RC: Gemisch aus Rb und Rc+Ru, rezyklierte Gesteinskörnung nach [3]

4.2 Gesteinskörnung

Zur Gesteinskörnung, die in den Versuchskörpern verwendet werden soll, sind in [18, 29] folgende Angaben vorgegeben. Grundsätzlich soll natürliche Gesteinskörnung eingesetzt werden. Da innerhalb des Forschungsvorhabens der Einfluss der rezyklierten Gesteinskörnung auf das Last-Verformungsverhalten von Befestigungssystemen untersucht werden soll, wird lediglich für die Herstellung der Referenzbetone ausschließlich natürliche Gesteinskörnung verwendet. Für die Recyclingbetone wird in unterschiedlichen Anteilen die natürliche durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt. Genaue Angaben wurden in Kapitel 4.1 gegeben.

Als Größtkorn wird 16 oder 20 mm angegeben. Dies wurde sowohl in den Referenz- als auch in den Recyclingbetonen berücksichtigt. Die Grenzen für die Sieblinie sollen nach Abbildung 4-1 eingehalten werden. Die Sieblinien in Abbildung 4-2 stehen für die verschiedenen Betonmischungen, die an der TUK und der Gebr. Kaltenbach GmbH & Co. KG speziell für das Forschungsprojekt hergestellt wurden. Zu den Betonmischungen und der Gesteinskörnung der Prüfkörper, die von der Firma RAU-Betonfertigteile GmbH & Co. KG hergestellt wurden, liegen keine Informationen vor.

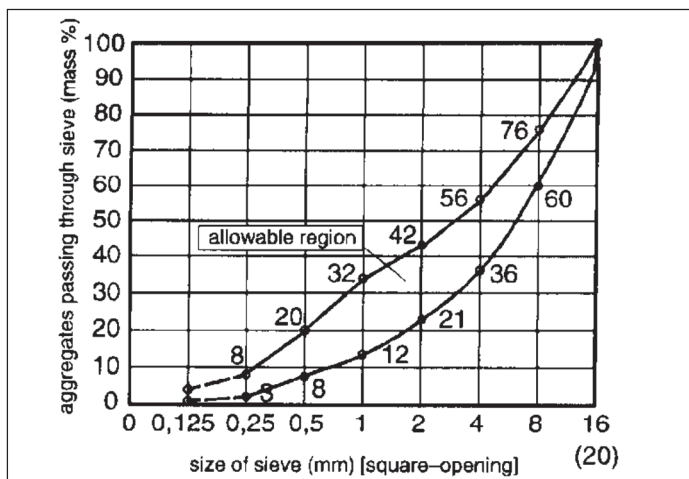


Abbildung 4-1: Sieblinie nach [18, 29]

Die Wasseraufnahme nach Eintauchen für 24 h WA_{24} sowie die Rohdichte auf ofentrockener Basis ρ_{rd} nach [46] wurde für die Gesteinskörnungen der TUK getrennt nach den Bestandteilen GK, Rc + Ru und Rb bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 4-5 dargestellt. Für die Gesteinskörnungen, die für die extern hergestellten Versuchskörper (KALT) verwendet wurden, konnte keine genauere Aufteilung der Korngruppen vorgenommen werden. Es wird deutlich, dass sich die Werte der Gesteinskörnung Rc + Ru nicht signifikant von denen der natürlichen Gesteinskörnung unterscheiden. Für den Mauerwerksabbruch Rb wurde wie erwartet eine geringere Trockenrohichte und eine höhere Wasseraufnahme festgestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Gesteinskörnung der KALT-Betone fällt auf, dass die Rohdichte der rezyklierten Gesteinskörnung RC 2/16 deutlich geringer ist und eine sehr hohe Wasseraufnahme aufweist. Der Brechsand RC 0/4 weist entgegen den Erwartungen eine geringe Wasseraufnahme auf, die mit der der natürlichen Gesteinskörnung vergleichbar ist.

Zusätzlich wurde der Widerstand gegen Zertrümmerung über den Los Angeles-Koeffizient ermittelt. Dieser wurde nicht für die einzelnen Kornfraktionen bestimmt, sondern für die Zusammensetzung der

Gesteinskörnungen, wie sie in der jeweiligen Betonmischung eingesetzt wurde. Für die Betone, die an der TU Kaiserslautern hergestellt wurden, wurden Werte zwischen 24 und 26 % ermittelt. Größere Unterschiede wurden bei den extern von Kaltenbach hergestellten Betonen ermittelt. Der geringste Wert wurde mit 21 % beim Normalbeton und der höchste Wert mit 32 % bei der Mischung RB2.3 ermittelt.

Tabelle 4-5: Rohdichte und Wasseraufnahme Gesteinskörnung

Hersteller	Bezeichnung Gesteinskörnung	Trockenrohichte ρ_{rd}	Wasseraufnahme WA_{24}
[-]	[-]	[Mg/m ³]	[%]
TUK	GK 0/2	2,59	0,6
	GK 2/8	2,46	2,5
	GK 8/16	2,51	1,2
	Rc + Ru 2/8	2,49	2,6
	Rc + Ru 8/16	2,54	2,1
	Rb 2/8	2,30	4,8
	Rb 8/16	2,27	3,6
KALT	GK 0/2	2,50	1,4
	GK 2/8	2,40	2,9
	RC 0/4	2,47	1,2
	RC 2/16	2,03	8,1

Tabelle 4-6: Los Angeles Koeffizient

Hersteller	Betonmischung	LA-Koeffizient
TUK	NB	25%
	RB1.1	26%
	RB2.1	26%
	RB2.2	24%
KALT	NB	21%
	RB2.1*	28%
	RB2.3	32%

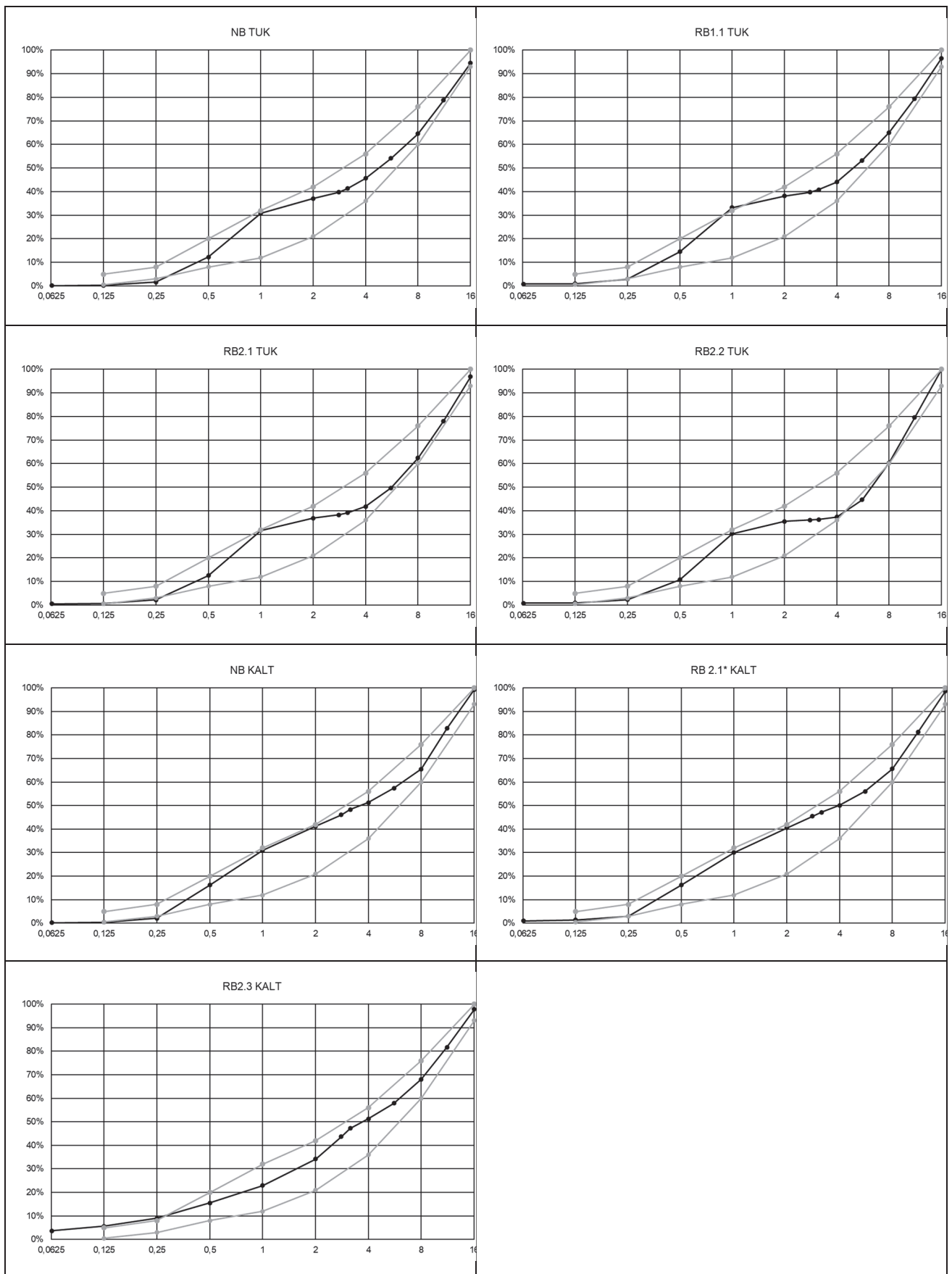


Abbildung 4-2: Sieblinien der Gesteinskörnungen

4.3 Festbetoneigenschaften

An den Betonen, in denen die Befestigungssysteme getestet wurden, wurden die Festbetoneigenschaften Druckfestigkeit $f_{cm,cube}$ an Würfeln der Kantenlänge 150 mm, Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$ an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm und Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ an Balken mit den Abmessungen 150 x 150 x 700 mm bestimmt und in Spalten G bis J in Tabelle 4-7 dargestellt. Die Betoneigenschaften wurden möglichst zeitnah zu den Prüfungen an den Befestigungssystemen durchgeführt. Es standen nicht für jede Betoncharge für jeden Prüfzeitpunkt Zylinder und Biegebalken zur Verfügung, weshalb nicht bei jeder Prüfung die Spaltzug- und Biegezugfestigkeit ermittelt werden konnte.

Die mittlere Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cube}$ aller geprüften Betone lag zwischen 18,6 N/mm² und 47,2 N/mm², die mittlere Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$ zwischen 1,40 N/mm² und 3,40 N/mm² und die mittlere Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ zwischen 2,4 N/mm² und 5,2 N/mm².

Für die Betoncharge RB1.1_24.06.20 waren für den dritten Prüfzeitpunkt keine Probekörper mehr vorhanden, weshalb die Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 100 mm ermittelt wurden. Dies gilt auch für die Betoncharge NB_29.06.18, die nicht an der TUK hergestellt wurde, sondern von der Rau-Betonfertigteile GmbH & Co. KG (RAU) und aus dem Betonbestand der in der Vergangenheit liegenden Zulassungsverfahren stammt. Ebenfalls aus dem Altbestand entnommen wurden die Prüfkörper der Charge NB_29.06.18 sowie NB_06.09.19. Für letztgenannte wurden die Betondruckfestigkeit in der Vergangenheit an der TUK ermittelt und konnte auf den Prüfzeitraum der Auszugversuche an den Befestigungsmitteln hochgerechnet werden. Zu der Betoncharge NB_15.01.20 waren noch Würfel zur Ermittlung der Druckfestigkeit vorhanden.

Zur Einordnung der hergestellten Betone wurden die ermittelten Festbetoneigenschaften aus den genannten Prüfungen mit den in Kapitel 2.2.4 erläuterten Umrechnungsverfahren verglichen. Zunächst wurde die zentrische Zugfestigkeit f_{ctm} zum einen aus der Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp}$ über Gl. (17) (Spalte L) mit einem Umrechnungsfaktor $\alpha_{sp} = 0,9$ und zum andern aus der Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ mit Gl. (18) (Spalte N) und Gl. (19) (Spalte P) bestimmt. Zudem wurde die zentrische Zugfestigkeit aus der Druckfestigkeit mit Gl. (15) und dem vereinfachten Ansatz $f_{cm} = f_{ck} + 8$ bestimmt (Spalte K). Es gilt festzuhalten, dass die gleichen Beziehungen für alle Betone gewählt wurden und somit nicht zwischen Betonen mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen und Betonen mit anteilig enthaltenen rezyklierten Gesteinskörnungen unterschieden wurde. Zudem ist darauf hinzuweisen, dass die Betonprobekörper – wie bereits in Kapitel 2.2.2 erwähnt nicht nach Normlagerung sondern bei den Prüfkörpern bis zum Prüftag aufbewahrt wurden, um gleiche Umgebungsbedingungen zu gewähren.

Tabelle 4-7: Festbetoneigenschaften der geprüften Betone

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	Betonbezeichnung	Versuchskörper	Hersteller	Herstelldatum	Prüfdatum	Alter	f _{ctm,cube}	f _{ctm,sp}	f _{ctm,fl}	f _{ctm,aus} f _{ctm,cube}	f _{ctm} = 0,9x f _{ctm,sp}	K/J	f _{ctm,aus} f _{ctm,fl} (EC)	M/J	f _{ctm,aus} f _{ctm,fl} (MC)	O/J
	[]	[]	[]	[]	[]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[]	[N/mm ²]	[]	[N/mm ²]	[]
1	NB_29.06.18	MP	RAU	29.6.18	14.10.20	838	30,5	2,95	-	1,94	2,66	1,37	-	-	-	-
2	NB_06.09.19	RKP	RAU	6.9.19	01.10.2020	391	34,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	NB_15.01.20	RKP	RAU	15.1.20	25.10.2021	649	34,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	NB_17.06.20	MP	TUK	17.6.20	15.7.20	28	47,2	2,95	4,6	2,88	2,66	0,92	3,15	1,09	3,05	1,06
5	RB1.1_24.06.20	MP	TUK	24.6.20	22.7.20	28	35,3	2,60	3,5	2,23	2,34	1,05	2,42	1,09	2,34	1,05
6	RB1.1_24.06.20_x	MP	TUK	24.6.20	8.1.21	198	42,2	2,90	-	2,62	2,61	1,00	-	-	-	-
7	RB1.1_24.06.20_xy	MP	TUK	24.6.20	10.8.21	412	42,6	2,75	-	2,64	2,48	0,94	-	-	-	-
8	RB2.1_26.06.20	MP	TUK	26.6.20	24.7.20	28	36,8	2,50	4,3	2,32	2,25	0,97	2,98	1,29	2,88	1,24
9	RB2.1_26.06.20_x	MP	TUK	26.6.20	8.1.21	196	40,7	3,05	-	2,53	2,75	1,08	-	-	-	-
10	RB2.1_26.06.20_xy	MP	TUK	26.6.20	12.8.21	412	41,3	3,40	-	2,56	3,06	1,19	-	-	-	-
11	NB_13.07.20	RKP	TUK	13.7.20	10.8.20	28	29,5	2,75	3,8	1,87	2,48	1,32	2,59	1,38	2,50	1,34
12	NB_13.07.20_x	RKP+MP	TUK	13.7.20	22.1.21	193	34,1	2,60	-	2,16	2,34	1,08	-	-	-	-
13	NB_13.07.20_xy	RKP+MP	TUK	13.7.20	11.8.21	394	33,1	2,60	-	2,10	2,34	1,12	-	-	-	-
14	RB1.1_15.07.20	RKP	TUK	15.7.20	13.8.20	29	23,4	2,00	2,8	1,46	1,80	1,23	1,91	1,31	1,85	1,27
15	RB1.1_15.07.20_xy	RKP	TUK	15.7.20	11.8.21	392	26,1	2,10	-	1,65	1,89	1,15	-	-	-	-
16	RB2.1_17.07.20	RKP	TUK	17.7.20	17.8.20	31	23,8	2,10	3,6	1,49	1,89	1,27	2,49	1,67	2,40	1,62
17	RB2.1_17.07.20_xy	RKP+MP	TUK	17.7.20	11.8.21	390	28,1	2,30	-	1,78	2,07	1,16	-	-	-	-
18	NB_01.10.20A	MP	TUK	1.10.20	2.11.20	32	23,1	2,05	2,9	1,44	1,85	1,28	1,97	1,37	1,90	1,32
19	NB_01.10.20B	MP	TUK	1.10.20	2.11.20	32	20,2	1,85	2,9	1,22	1,67	1,37	2,03	1,67	1,96	1,61
20	NB_01.10.20A_xy	MP	TUK	1.10.20	11.10.21	375	27,9	2,20	4,4	1,77	1,98	1,12	3,07	1,73	2,96	1,68
21	NB_01.10.20B_xy	MP	TUK	1.10.20	11.10.21	375	25,1	2,10	-	1,58	1,89	1,20	-	-	-	-
22	RB1.1_14.10.20A	MP	TUK	14.10.20	16.11.20	33	18,6	1,65	2,7	1,09	1,49	1,37	1,84	1,69	1,78	1,64
23	RB1.1_14.10.20B	MP	TUK	14.10.20	16.11.20	33	20,7	1,85	2,5	1,26	1,67	1,33	1,74	1,39	1,88	1,34
24	RB1.1_14.10.20A_xy	MP	TUK	14.10.20	13.10.21	364	24,7	1,75	3,4	1,55	1,58	1,02	2,32	1,49	2,24	1,44
25	RB1.1_14.10.20B_xy	MP	TUK	14.10.20	13.10.21	364	29,1	1,95	3,7	1,85	1,76	0,95	2,55	1,38	2,47	1,34
26	RB2.2_22.10.20A	MP	TUK	22.10.20	19.11.20	28	21,4	1,85	2,4	1,31	1,67	1,27	1,67	1,27	1,61	1,23
27	RB2.2_22.10.20B	MP	TUK	22.10.20	19.11.20	28	21,3	2,05	2,7	1,30	1,85	1,42	1,85	1,42	1,79	1,38
28	RB2.2_22.10.20A_xy	MP	TUK	22.10.20	25.10.21	368	26,4	1,85	3,4	1,67	1,67	1,00	2,35	1,41	2,27	1,36
29	RB2.2_22.10.20B_xy	MP	TUK	22.10.20	25.10.21	368	27,4	2,30	4,0	1,74	2,07	1,19	2,76	1,59	2,67	1,54
30	NB_02.03.21	RKP+MP	KALT	2.3.21	7.4.21	36	26,7	2,15	3,2	1,69	1,94	1,15	2,18	1,29	2,11	1,25
31	NB_02.03.21_xy	RKP+MP	KALT	2.3.21	2.3.22	365	42,0	2,60	5,2	2,61	2,34	0,90	3,57	1,37	3,45	1,32
32	RB2.1*_05.03.21	RKP+MP	KALT	5.3.21	12.4.21	38	27,1	2,10	2,9	1,72	1,89	1,10	2,03	1,18	1,96	1,14
33	RB2.1*_05.03.21_xy	RKP+MP	KALT	5.3.21	8.3.22	368	36,0	2,75	4,4	2,27	2,48	1,09	3,00	1,32	2,91	1,28
34	RB2.3_10.03.21	RKP+MP	KALT	10.3.21	13.4.21	34	27,8	1,95	2,6	1,76	1,76	1,00	1,77	1,00	1,71	0,97
35	RB2.3_10.03.21_xy	RKP+MP	KALT	10.3.21	14.3.22	369	35,5	2,35	4,2	2,24	2,12	0,94	2,92	1,31	2,83	1,26
36	NB_19.03.21-O	stahulumm. Zyl.-O	TUK	19.3.21	5.5.21	47	24,8	1,85	-	1,56	1,67	1,07	-	-	-	-
37	NB_19.03.21-L	stahulumm. Zyl.-L	TUK	19.3.21	5.5.21	47	28,0	2,25	-	1,78	2,03	1,14	-	-	-	-
38	NB_19.03.21-W	stahulumm. Zyl.-W	TUK	19.3.21	5.5.21	47	27,2	2,25	-	1,72	2,03	1,18	-	-	-	-
39	NB_24.03.21	RWK	TUK	24.3.21	18.1.22	300	19,6	1,80	-	1,17	1,62	1,39	-	-	-	-
40	RB2.2_29.03.21-O	stahulumm. Zyl.-O	TUK	29.3.21	12.5.21	44	21,0	1,40	-	1,28	1,26	0,99	-	-	-	-
41	RB2.2_29.03.21-L	stahulumm. Zyl.-L	TUK	29.3.21	12.5.21	44	24,3	2,05	-	1,52	1,85	1,21	-	-	-	-
43	RB2.1_30.03.21	RWK	TUK	30.3.21	8.2.22	315	23,5	1,95	-	1,47	1,76	1,20	-	-	-	-
44	RB2.2_06.04.21	RWK	TUK	6.4.21	8.2.22	308	24,2	1,85	-	1,52	1,67	1,10	-	-	-	-
45	NB_18.08.21	MP	TUK	18.8.21	21.9.21	34	26,0	1,95	-	1,64	1,76	1,07	-	-	-	-
46	RB2.1_20.08.21	MP	TUK	20.8.21	28.9.21	39	27,7	2,20	-	1,76	1,98	1,13	-	-	-	-
47	RB2.2_23.08.21	MP	TUK	23.8.21	30.9.21	38	28,4	2,00	-	1,80	1,80	1,00	-	-	-	-

MP: Montageplatte, RKP: Risskeilplatte, RWK: Risswechsellkörper,

TUK: Technische Universität Kaiserslautern, KALT: Gebr. Kaltenbach GmbH & Co. KG, RAU: RAU-Betonfertigteile GmbH & Co. KG

Der Vergleich der Spalten J und K zeigt, dass die Werte aus den Spaltzugprüfungen zum Großteil höhere zentrische Zugfestigkeiten ergaben als die aus der Berechnung über die Druckfestigkeit. Dennoch wurden bei sechs Betonprüfungen geringere Werte ermittelt mit einer maximalen Abweichung von 10 % unter dem aus der Druckfestigkeit berechneten Wert. Die maximale Abweichung der Ergebnisse aus den Spaltzugversuchen lag bei 42 % über der Umrechnung aus der Druckfestigkeit. Die genannten Verhältniswerte sind in Spalte L dargestellt und in Abbildung 4-3 graphisch verdeutlicht. Analog zum genannten Vorgehen wurden die Ergebnisse aus den Biegezugversuchen mit der Umrechnung der Druckfestigkeit in die zentrische Zugfestigkeit verglichen und für beide Ansätze in den Spalten N und P als Zahlenwerte und in Abbildung 4-3 dargestellt. Aus dem Vergleich der Spalten M und J sowie O und J wird deutlich, dass die Werte der zentrischen Zugfestigkeit aus den Biegezugversuchen je nach Umrechnungsverfahren und Betoncharge 97 % bis 172 % des berechneten Wertes aus der Druckfestigkeit erreichten.

Es wird ersichtlich, dass sich grundsätzlich höhere Werte der zentrischen Zugfestigkeit aus Biegezugversuchen ergeben als aus der Umrechnung der Spaltzugfestigkeit. Ausnahme bilden die Betone RB2.2_22.10.20A und B sowie RB2.3_10.03.21, bei denen die Umrechnung aus Spaltzug- und Biegezugversuchen annähernd gleiche Werte ergeben. Für die gewählten

Probekörperabmessungen liefert der Ansatz zur Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit aus [7] 3 % höhere Werte für die zentrische Zugfestigkeit als der Ansatz aus [21].

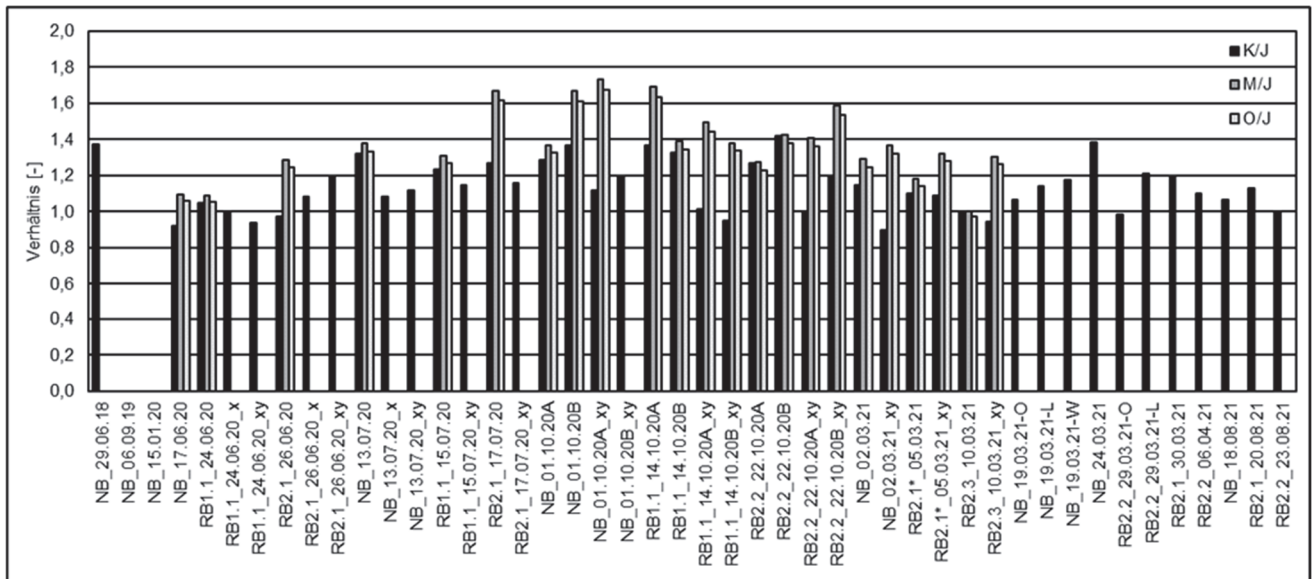


Abbildung 4-3: Vergleich der Zugfestigkeitswerte aus Tabelle 4-7

5 Versuchsbeschreibung und Versuchsprogramm

5.1 Versuchsdurchführung und Wahl der Befestigungssysteme

Zur Durchführung von zentrischen Auszugversuchen an Befestigungssystemen gibt es grundsätzlich zwei Versuchsaufbauten. Abbildung 5-1 zeigt ein Beispiel aus [18] für einen Versuchsaufbau mit enger Abstützung, der grundsätzlich in Versuchen an Verbundankersystemen zum Einsatz kommt. Durch die enge Abstützung wird ein Versagen des Betons im Sinne eines Ausbruchkegels verhindert und ein Verbundversagen provoziert. Soll der Versuchsaufbau einen Betonausbruch nicht verhindern, muss nach [29] der Abstand vom Befestigungselement zu der Abstützung in alle Richtungen mindestens der doppelten Verankerungstiefe des Befestigungselements entsprechen (siehe Abbildung 5-2).

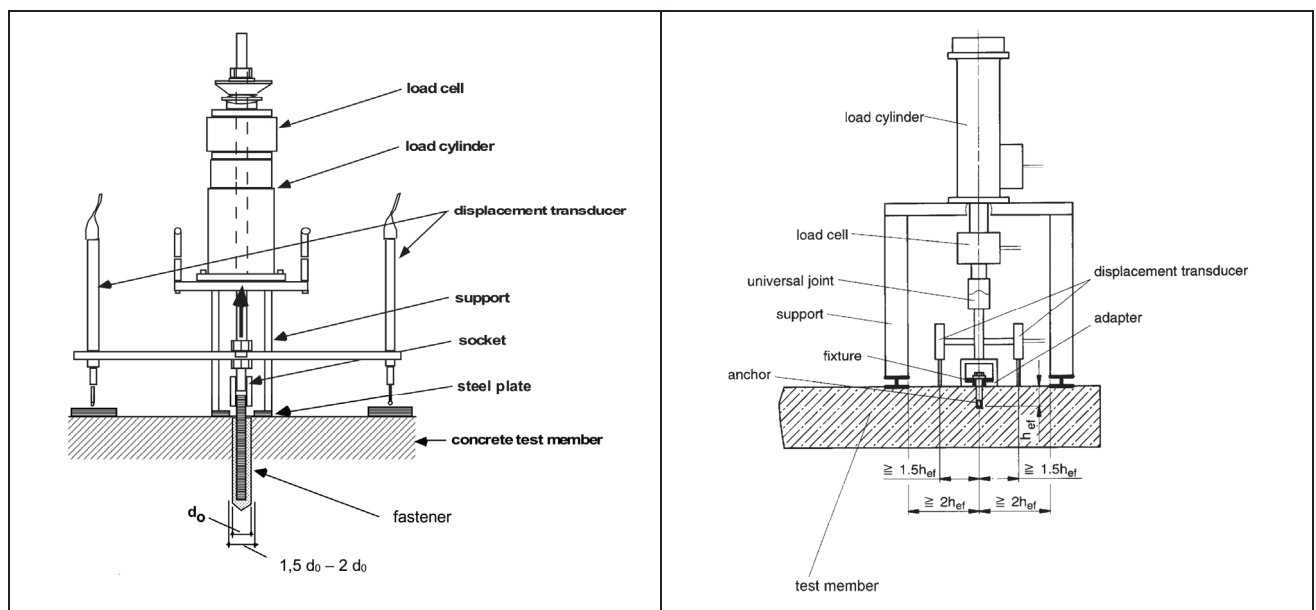


Abbildung 5-1: Beispiel für einen Versuchsaufbau mit enger Abstützung aus [18]

Abbildung 5-2: Beispiel für einen Versuchsaufbau mit weiter Abstützung aus [29]

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens lag der Fokus der Untersuchungen auf dem Einfluss von rezyklierter Gesteinskörnung im Beton auf die Betonversagenslast und das Verbundverhalten von Befestigungssystemen. Um den Einfluss beurteilen zu können, wurden verschiedene Versuche nach Vorgaben der jeweiligen EADs [18, 29] bzw. dem TR048 [47] mit einem drehmomentkontrolliert spreizenden Bolzenanker F, einer Betonschraube H und den Verbundankersystemen A, B und D durchgeführt. Den Großteil der Untersuchung bilden zentrische Auszugversuche mit den oben genannten Versuchsaufbauten. Es wurden unterschiedliche Parameter untersucht, auf die in Kapitel 5.2 näher eingegangen wird.

Der Bolzenanker F und die Betonschraube H wurden insbesondere für Versuche verwendet, bei denen die Betonversagenslasten überprüft werden. Für die zentrischen Auszugversuche wurde demnach ein Versuchsaufbau mit weiter Abstützung nach Abbildung 5-2 verwendet, um einen möglichen Ausbruchkegel bei Betonversagen nicht zu verhindern.

Der Bolzenanker wurde mit der Größe M12 geprüft. In der Regel wurde dieser mit einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 50$ mm installiert. Mit größer werdender Verankerungstiefe wird die

Versagensart Herausziehen/Durchziehen wahrscheinlicher. Es wurde daher eine geringe Verankerungstiefe gewählt, damit die Betonversagenslasten untersucht werden konnten.

Die Versuche, die innerhalb eines Zulassungsverfahrens in den EADs [18, 29] vorgegeben werden, sollen grundsätzlich in Betonen in den Festigkeitsklassen C20/25 und C50/60 durchgeführt werden. Für die beiden genannten Klassen soll die Zylinderdruckfestigkeit des Betons f_{cm} bei Prüfung der Befestigungssysteme 20 N/mm² und 30 N/mm² bzw. 50 N/mm² und 60 N/mm² liegen. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden Versuche in Beton mit einem Alter von ca. vier bis sieben Wochen sowie in denselben Betonchargen mit einem Alter von ca. einem Jahr durchgeführt. Die genannten Grenzen der Festigkeitsklassen konnten daher nicht immer eingehalten werden. Um eine zu hohe Festigkeit zu verhindern, wurde die Zusammensetzung des Betons teilweise auch so gewählt, dass die Druckfestigkeit im früheren Prüfzeitraum unterhalb der Grenzen lag. Zudem ist nach DAfStb-Richtlinie [3] in Deutschland die Betondruckfestigkeit für Recyclingbeton auf die Festigkeitsklasse C30/37 begrenzt.

Für die Benennung der einzelnen Versuche und Versuchsserien innerhalb des Forschungsvorhabens wurde jeweils die Bezeichnung aus den EADs für die niedrigere Betonfestigkeitsklasse verwendet, unabhängig von der tatsächlich getesteten Betondruckfestigkeit. So wurden alle Versuche mit weit abgestütztem Versuchsaufbau in ungerissenem bzw. gerissenem Beton ohne Einfluss von Bauteilrändern oder weiteren in der Nähe befindlichen Dübeln A1 ($\Delta w = 0,0$ mm) bzw. F1 ($\Delta w = 0,5$ mm) bezeichnet, auch wenn die Zylinderdruckfestigkeit des Betons bei Prüfung der Befestigungen außerhalb des Bereichs $20 \text{ N/mm}^2 \leq f_{cm} \leq 30 \text{ N/mm}^2$ lag. Analog wurden für die zentrischen Auszugversuche mit den Verbundankersystemen Bezeichnungen R1 ($\Delta w = 0,0$ mm) und B10 ($\Delta w = 0,5$ mm) verwendet. Die Erläuterung der weiteren Versuche wird in Kapitel 5.2 gegeben.

Zur Bohrerherstellung wurde für die Versuche A1, A3, F11 und F12 mit dem Bolzenanker F jeweils ein Bohrer mit dem Schneidendurchmesser $d_{cut,m}$, für die Versuche F1 und F3 $d_{cut,max}$ (gemäß EAD 330232-01-0601 [29]) verwendet. Anschließend an den Bohrvorgang wurde das Bohrloch lediglich ausgesaugt. Das Installationsdrehmoment betrug 60 Nm und wurde nach einer Wartezeit von mindestens 10 Minuten auf 30 Nm reduziert, bevor der Auszugversuch durchgeführt wurde. Als Ausnahme sind die Versuche F11 zu nennen, da bei diesen Versuchen das Drehmoment beider Dübel einer Doppelbefestigung am Bauteilrand schrittweises bis zum Versagen erhöht wird.

Die Auszugversuche mit der Betonschraube wurden ebenfalls mit weiter Abstützung getestet. Die Betonschraube der Größe 10 wurde mit einer Verankerungstiefe von $h_{ef} = 85$ mm mit einem Schlagschrauber installiert. Bohrerdurchmesser und Bohrlochreinigung entsprechen den Angaben des Bolzenankers.

Als Verbundankersysteme wurden zwei Injektionsankersysteme (A und B) und ein Patronensystem (D) verwendet. Als Ankerstangen wurden handelsübliche Gewindestangen M12 mit der Stahlfestigkeit 12.9 gewählt. Für das Patronensystem waren die Ankerstangen auf einer Seite mit einer Dachspitze versehen. Der Bohrer wurde mit einem Durchmesser $d_{cut,m}$ gewählt. Für die Reinigung wurde grundsätzlich das Standardreinigungsverfahren (St) gewählt, das aus zweimaligem Ausblasen, zweimaligem Bürsten (bü) mit einer Stahlbürste und abschließendem zweimaligen Ausblasen bestand. Für das Ausblasen wurde unterschieden zwischen Druckluftreinigen (cac) bei den Systemen A und B und Reinigung mit einer Handpumpe (hp) für das System D. In verschiedenen Versuchen innerhalb des Zulassungsverfahrens wird der Einfluss einer verminderten Reinigung untersucht. Hierfür wurde jeder Reinigungsschritt lediglich einmal durchgeführt und mit „1/2St“

benannt. Zusätzlich zu den genannten Reinigungsverfahren wurde innerhalb des Forschungsvorhabens ein spezieller Reinigungsvorgang mit erhöhtem Aufwand (Ex) durchgeführt. Hierzu wurden bei allen drei Verbundankersystemen dieselben Schritte durchgeführt: Zunächst wurde zweimal mit Wasser gereinigt, woraufhin die zweifache Reinigung mit einer Stahlbürste folgte. Nach erneutem doppeltem Spülen mit Wasser wurde das Bohrloch mit zweifacher Druckluftreinigung ausgeblasen, erneut doppelt gebürstet und abschließend wieder zweifach mit Druckluft gereinigt. Die Reinigungsschritte für die Verbundankersysteme und unterschiedlichen Reinigungsverfahren werden in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Reinigungsschritte Verbundankersysteme

Reinigungsverfahren	Beschreibung der Bohrlochreinigung	
	System A und B	System D
Standardreinigung (St)	2x Druckluft, 2x Bürsten, 2x Druckluft	2x Handpumpe, 2x Bürsten, 2x Handpumpe
halbe Standardreinigung (1/2St)	1x Druckluft, 1x Bürsten, 2x Druckluft	1x Handpumpe, 1x Bürsten, 2x Handpumpe
Extrareinigung (Ex)	2x Spülen, 2x Bürsten, 2x Spülen, 2x Druckluft, 2x Bürsten, 2x Druckluft	

Nach Reinigung der Bohrlöcher wurden die Systeme A und B von unten beginnend in das Bohrloch gefüllt und anschließend die Gewindestange mit der Hand drückend/drehend in das Bohrloch eingeführt. Für das Patronensystem wurde die Patrone in das Bohrloch eingesetzt und gefolgt von einer drehend/schlagenden Installation der Gewindestange mit einer Bohrmaschine mit der Dachspitze voraus.

Zu den Prüfkörpern wurden je Betoncharge zusätzlich Probekörper zur Bestimmung der Druck- und Zugfestigkeit hergestellt. Entgegen der in [19] vorgegebenen Wasserlagerung oder Lagerung unter feuchten Bedingungen wurden die Probekörper mit Ausnahme von Versuchsreihe 5 (siehe Kapitel 5.2) nach den Vorgaben aus [47] direkt bei den Prüfkörpern nach dem Ausschalen an der Luft aufbewahrt, um die Eigenschaften des Betons der Prüfkörper möglichst genau widerzuspiegeln.

5.2 Versuchsprogramm

In den nachfolgenden Tabellen wird ein Überblick über die Versuchsserien gegeben, die innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden. Es wird dabei in acht Versuchsreihen unterteilt. Diese wurden zunächst nach den Betonchargen gegliedert. Mit Ausnahme der Versuchsreihen 5 und 8 wurden jeweils ein Normalbeton als Referenz sowie zwei Recyclingbetonchargen mit unterschiedlicher Aufteilung der rezyklierten Gesteinskörnung hergestellt.

Die Bezeichnung der Versuchsserien ist wie folgt aufgebaut. An erster Stelle wird der Test genannt. Die Benennung der Versuche nach [18, 29] wurde in Kapitel 5.1 erläutert. Anschließend folgt die Bezeichnung für die Betonmischung nach Kapitel 4.1 mit zugehörigem Datum der Betonage. Daraufhin wird das Befestigungssystem genannt, das getestet wurde, gefolgt von der Lagerung und der Reinigung. Sofern Lagerung und Reinigungsart nicht genannt werden, ist von einer Lagerung an der Luft und dem Standardreinigungsverfahren nach Kapitel 5.1 auszugehen. In gewissen Betonchargen wurden Versuchsserien mit gleichem Befestigungssystem zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt. In diesen Fällen wurde die Endung „_x“ oder „_xy“ angefügt. Genauere Informationen werden bei den jeweiligen Beschreibungen der Versuchsreihen gegeben.

Ein Beispiel für die Benennung einer Versuchsserie ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

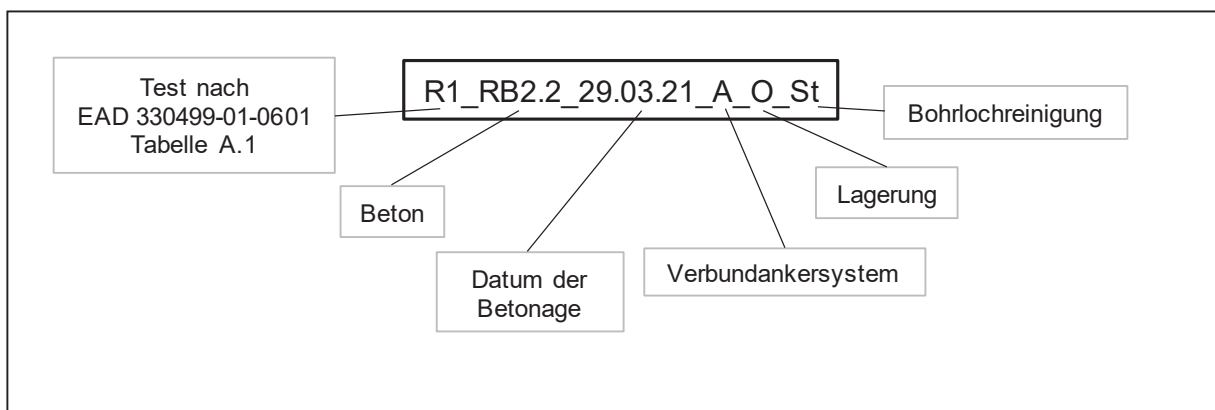


Abbildung 5-3: Beispiel für die Bezeichnung der Versuchsserien

Für Versuchsreihe 1, deren einzelne Versuchsserien in Tabelle 5-2 dargestellt sind, wurden zwei Recyclingbetone nach Kapitel 4.1 hergestellt. Zudem wurden Versuchskörper mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung betoniert. Mit dem Bolzenanker F wurden zentrische Auszugversuche mit weiter Abstützung ohne Randeinfluss (A1) sowie in Bauteilecken (F12) in ungerissenem Beton durchgeführt. Für die Versuche in der Bauteilecke wurde der Abstand zu den Bauteilrändern zwischen 75, 90 und 100 mm variiert. Zudem wurden Installationsversuche mit variierendem Achs- und Randabstand (F11) durchgeführt. Ziel war jeweils, Betonversagen zu erreichen, um einen möglichen Einfluss der unterschiedlichen Gesteinskörnung zu untersuchen.

Um das Verhalten von Verbundankersystemen bezüglich unterschiedlicher Zusammensetzung der Gesteinskörnung im Beton beurteilen zu können, wurden in den drei Betonchargen zentrische Auszugversuche R1 mit enger Abstützung in ungerissenem Beton mit zwei Injektionsankersystemen (A und B) und einem Patronensystem (D) durchgeführt. Um ein Verbundversagen zu provozieren, wurde ein Versuchsaufbau mit enger Abstützung gewählt.

Die zuletzt genannten Auszugversuche an den Verbundankersystemen wurden in den Versuchskörpern RB1.1_24.06.20 und RB2.1_26.06.20 zu drei Zeitpunkten durchgeführt. Die ersten Versuche fanden nach 28 Tagen statt. Weitere Versuche wurden in den Versuchskörpern nach ca. 200 Tagen („_x“) und ca. 400 Tagen („_xy“) durchgeführt, um einen Einfluss des Betonalters auf die Verbundtragfähigkeit zu ermitteln.

Tabelle 5-2: Versuchsübersicht Reihe 1

Beton-charge	Befestigungs-system	Versuch	Serienbezeichnung
NB_17.06.20	Bolzenanker F	A1	F1 NB 17.06.20 F
		F11	F11 NB 17.06.20 F
		F12	F12 NB 17.06.20 F 75
	F12 NB 17.06.20 F 90		
	F12 NB 17.06.20 F 100		
	Injektionssystem A	R1	R1 NB 17.06.20 A
Injektionssystem B	R1	R1 NB 17.06.20 B	
RB1.1_24.06.20	Bolzenanker F	A1	F1 RB1.1 24.06.20 F
		F11	F11 RB1.1 24.06.20 F
		F12	F12 RB1.1 24.06.20 F 75
			F12 RB1.1 24.06.20 F 90
	F12 RB1.1 24.06.20 F 100		
	Injektionssystem A	R1	R1 RB1.1 24.06.20 A
			R1 RB1.1 24.06.20 A x
			R1 RB1.1 24.06.20 A xy
	Injektionssystem B	R1	R1 RB1.1 24.06.20 B
			R1 RB1.1 24.06.20 B x
			R1 RB1.1 24.06.20 B xy
	Patronensystem D	R1	R1 RB1.1 24.06.20 D
			R1 RB1.1 24.06.20 D x
			R1 RB1.1 24.06.20 D xy
	RB2.1_26.06.20	Bolzenanker F	A1
F11			F11 RB2.1 26.06.20 F
F12			F12 RB2.1 26.06.20 F 75
			F12 RB2.1 26.06.20 F 90
		F12 RB2.1 26.06.20 F 100	
Injektionssystem A		R1	R1 RB2.1 26.06.20 A
			R1 RB2.1 26.06.20 A x
			R1 RB2.1 26.06.20 A xy
Injektionssystem B		R1	R1 RB2.1 26.06.20 B
			R1 RB2.1 26.06.20 B x
			R1 RB2.1 26.06.20 B xy
Patronensystem D		R1	R1 RB2.1 26.06.20 D
			R1 RB2.1 26.06.20 D x
			R1 RB2.1 26.06.20 D xy

In Versuchsreihe 2 (Tabelle 5-3) wurden ebenfalls wie in der ersten Versuchsreihe zwei Recyclingbetone nach Kapitel 4.1 und ein Referenzbeton hergestellt. Im Vergleich zur Versuchsreihe 1 wurden keine A1 Versuche an Bolzenanker F in ungerissenem Beton durchgeführt. Stattdessen wurde das Tragverhalten in F1 Versuchen untersucht. Hierbei wurden zentrische Auszugversuche mit weiterer Abstützung in gerissenem Beton ($\Delta w = 0,5$ mm) durchgeführt. Ebenfalls in gerissenem Beton wurden die drei Verbundankersysteme A, B und D mit einem Versuchsaufbau mit enger Abstützung in allen drei Betonchargen geprüft (B10). Für Eckversuche (F12) wurden je Betoncharge zwei Serien durchgeführt, wobei der Abstand zu den beiden Bauteilrändern zwischen 75 und 100 mm variierte. In F11 Versuchen wurden auch in dieser Reihe ergänzend zu Versuchsreihe 1 Installationsversuche mit variierenden Achs- und Randabständen durchgeführt.

Das Tragverhalten der drei Verbundankersysteme bei einem Versuchsaufbau mit enger Abstützung wurde analog zur ersten Versuchsreihe an drei Zeitpunkten ermittelt.

Tabelle 5-3: Versuchsübersicht Reihe 2

Betoncharge	Befestigungssystem	Test	Serienbezeichnung	
NB_13.07.20	Bolzenanker F	F1	F1 NB 13.07.20 F	
		F11	F11 NB 13.07.20 F	
		F12	F12 NB 13.07.20 F 75 F12 NB 13.07.20 F 100	
	Injektionssystem A	R1	R1 NB 13.07.20 A	
			R1 NB 13.07.20 A x R1 NB 13.07.20 A xy	
		B10	B10 NB 13.07.20 A	
	Injektionssystem B	R1	R1 NB 13.07.20 B R1 NB 13.07.20 B x R1 NB 13.07.20 B xy	
			B10	B10 NB 13.07.20 B B10 NB 13.07.20 B B
		B10	B10 NB 13.07.20 B	
	Patronensystem D	R1	R1 NB 13.07.20 D R1 NB 13.07.20 D x R1 NB 13.07.20 D xy	
			B10	B10 NB 13.07.20 D
		B10	B10 NB 13.07.20 D	
	RB1.1_15.07.20	Bolzenanker F	F1	F1 RB1.1 15.07.20 F
			F11	F11 RB1.1 15.07.20 F
			F12	F12 RB1.1 15.07.20 F 75 F12 RB1.1 15.07.20 F 100
Injektionssystem A		R1	R1 RB1.1 15.07.20 A R1 RB1.1 15.07.20 A xy	
		B10	B10 RB1.1 15.07.20 A	
Injektionssystem B		R1	R1 RB1.1 15.07.20 B R1 RB1.1 15.07.20 B xy	
		B10	B10 RB1.1 15.07.20 B	
Patronensystem D		R1	R1 RB1.1 15.07.20 D R1 RB1.1 15.07.20 D xy	
		B10	B10 RB1.1 15.07.20 D	
RB2.1_17.07.20		Bolzenanker F	F1	F1 RB2.1 17.07.20 F
			F11	F11 RB2.1 17.07.20 F
			F12	F12 RB2.1 17.07.20 F 75 F12 RB2.1 17.07.20 F 100
		Injektionssystem A	R1	R1 RB2.1 17.07.20 A R1 RB2.1 17.07.20 A xy
			B10	B10 RB2.1 17.07.20 A
		Injektionssystem B	R1	R1 RB2.1 17.07.20 B R1 RB2.1 17.07.20 B xy
	B10		B10 RB2.1 17.07.20 B	
	Patronensystem D	R1	R1 RB2.1 17.07.20 D R1 RB2.1 17.07.20 D xy	
		B10	B10 RB2.1 17.07.20 D	

Versuchsreihe 3, deren Serien in Tabelle 5-4 dargestellt werden, sollte die Möglichkeit bieten, neben den Versuche in den Versuchskörpern nach 28 Tagen, auch Versuche mit dem Bolzenanker F in Beton zu testen, der ca. ein Jahr alt ist. Dementsprechend wurden je Zusammensetzung der Gesteinskörnung zwei Betonchargen hergestellt. Es ist dabei zu erwähnen, dass aufgrund der Begrenzung des Mischervolumens jede Betoncharge getrennt hergestellt wurde. In allen sechs Betonchargen wurden A1 Versuche ($\Delta w = 0,5$ mm, weite Abstützung, ungerissener Beton) mit dem

Bolzenanker durchgeführt. In den Betonkörpern mit der Endung „/A“ wurden auch nach ca. einem Jahr erneut Auszugversuche A1 mit dem Bolzenanker F durchgeführt.

Zusätzlich zum Bolzenanker F wurden die Betonschraube H mit weiter Abstützung des Versuchsaufbaus in ungerissenem Beton (A1) in den ca. ein Jahr alten Betonen geprüft.

Die Auswahl der drei unterschiedlichen Betonchargen wurde zudem im Vergleich der beiden ersten Versuchsreihen abgeändert. Neben dem Normalbeton und dem Recyclingbeton RB1.1 sollte das Tragverhalten des Bolzenankers F, der Betonschraube H und der drei Verbundankersysteme A, B und D in Beton untersucht werden, dessen Gesteinskörnung > 2 mm aus ausschließlich rezykliertem Material (RB2.2) bestand.

Analog zur zweiten Versuchsreihe wurden die Verbundankersysteme in R1 Versuchen ($\Delta w = 0,0$ mm, enge Abstützung, ungerissener Beton) zu zwei Zeitpunkten getestet – zunächst in den Betonen nach 32 bis 34 Tagen nach Betonage und in den Betonen nach 365 bis 376 Tagen nach Betonage.

Tabelle 5-4: Versuchsübersicht Reihe 3

Betoncharge	Befestigungssystem	Test	Serienbezeichnung
NB_01.10.20/A	Bolzenanker F	A1	A1_NB_01.10.20A_F
			A1_NB_01.10.20A_F_xy
	Betonschraube H	A1	A1_NB_01.10.20A_H_xy
	Injektionssystem A	R1	R1_NB_01.10.20A_A
			R1_NB_01.10.20A_A_xy *
	Injektionssystem B	R1	R1_NB_01.10.20A_B
R1_NB_01.10.20A_B_xy			
Patronensystem D	R1	R1_NB_01.10.20A_D	
		R1_NB_01.10.20A_D_xy	
NB_01.10.20/B	Bolzenanker F	A1	A1_NB_01.10.20B_F
			A1_NB_01.10.20B_F_xy
	Betonschraube H	A1	A1_NB_01.10.20B_H_xy
	Injektionssystem A	R1	R1_NB_01.10.20B_A
	Injektionssystem B	R1	R1_NB_01.10.20B_B
Patronensystem D	R1	R1_NB_01.10.20B_D	
RB1.1_14.10.20/A	Bolzenanker F	A1	A1_RB1.1_14.10.20A_F
			A1_RB1.1_14.10.20A_F_xy
	Betonschraube H	A1	A1_RB1.1_14.10.20A_H_xy
	Injektionssystem A	R1	R1_RB1.1_14.10.20A_A
			R1_RB1.1_14.10.20A_A_xy
	Injektionssystem B	R1	R1_RB1.1_14.10.20A_B
R1_RB1.1_14.10.20A_B_xy			
Patronensystem D	R1	R1_RB1.1_14.10.20A_D	
		R1_RB1.1_14.10.20A_D_xy	
RB1.1_14.10.20/B	Bolzenanker F	A1	A1_RB1.1_14.10.20B_F
			A1_RB1.1_14.10.20B_F_xy
	Betonschraube H	A1	A1_RB1.1_14.10.20B_H_xy
	Injektionssystem A	R1	R1_RB1.1_14.10.20B_A
	Injektionssystem B	R1	R1_RB1.1_14.10.20B_B
Patronensystem D	R1	R1_RB1.1_14.10.20B_D	
RB2.2_22.10.20/A	Bolzenanker F	A1	A1_RB2.2_22.10.20A_F
			A1_RB2.2_22.10.20A_F_xy
	Injektionssystem A	R1	R1_RB2.2_22.10.20A_A
			R1_RB2.2_22.10.20A_A_xy
	Injektionssystem B	R1	R1_RB2.2_22.10.20A_B
			R1_RB2.2_22.10.20A_B_xy_ch*
Patronensystem D	R1	R1_RB2.2_22.10.20A_D	
		R1_RB2.2_22.10.20A_D_xy	
RB2.2_22.10.20/B	Bolzenanker F	A1	A1_RB2.2_22.10.20B_F
			A1_RB2.2_22.10.20B_F_xy
	Betonschraube H	A1	A1_RB2.2_22.10.20B_H_xy
	Injektionssystem A	R1	R1_RB2.2_22.10.20B_A
	Injektionssystem B	R1	R1_RB2.2_22.10.20B_B
Patronensystem D	R1	R1_RB2.2_22.10.20B_D	

* Serie auch in Versuchsreihe 7 enthalten

In Versuchsreihe 4 sollten die Versuche mit Ausnahme der F11 und F12 Versuche wiederholt werden, die bereits in den vorangegangenen Versuchsreihen dargestellt wurden. Es wurden der Bolzenanker F und die Betonschraube H mit weiter Abstützung und die Verbundankersysteme A, B und D in mit enger Abstützung in gerissenem (F1, B10) und ungerissenem (A1, R1) Beton geprüft. Dies geschah analog zu den Versuchsreihen oben in Beton mit einem Alter von 36 bis 39 Tagen und in einem Alter von ca. einem Jahr.

Die drei Betonchargen wurden von einem externen Betonwerk bezogen. Wie in allen Versuchsreihen wurde eine Referenzcharge mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen und zwei Betonchargen mit Recyclinggesteinskörnung hergestellt. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnung wurde in Kapitel 4.1 erläutert. Neben der Betoncharge, die sich an den Angaben der

DAfStb-Richtlinie orientierte, wurde zusätzlich eine Betoncharge mit ausschließlich Recyclinggesteinskörnung hergestellt. Es ist zu erwähnen, dass bei der Betoncharge RB2.3_10.03.21 nicht nur der natürliche Kies komplett durch rezykliertes Material, sondern auch der natürliche Sand komplett durch Brechsand ersetzt wurde.

Ergänzend zu den dargestellten Versuchen wurden in Reihe 4 Versuche mit Belastung quer zur Dübelachse durchgeführt. Um Betonkantenbruch (BK) zu provozieren, wurden Einzel- oder Doppelbefestigungen senkrecht zum Bauteilrand belastet. Diese Versuche wurden ausschließlich in Prüfkörpern durchgeführt, die ca. ein Jahr zuvor betoniert wurden.

Tabelle 5-5: Versuchsübersicht Reihe 4

Betoncharge	Befestigungssystem	Test	Serienbezeichnung
NB_02.03.21	Bolzenanker F	A1	A1 RB2.3 02.03.21 F
			A1_RB2.3 02.03.21 F_xy
		F1	F1 RB2.3 02.03.21 F
			F1_RB2.3 02.03.21 F_xy
		BK	BK RB2.3 02.03.21 F 1
			BK RB2.3 02.03.21 F 2
	BK RB2.3 02.03.21 F 3		
	Betonschraube H	A1	A1 RB2.3 02.03.21 H
			A1_RB2.3 02.03.21 H_xy
		F1	F1 RB2.3 02.03.21 H
			F1_RB2.3 02.03.21 H_xy
	Injektionssystem A	R1	R1 RB2.3 02.03.21 A
			R1_RB2.3 02.03.21 A_xy
		B10	B10 RB2.3 02.03.21 A
			B10_RB2.3 02.03.21 A_xy
	Injektionssystem B	R1	R1 RB2.3 02.03.21 B
			R1_RB2.3 02.03.21 B_xy
		B10	B10 RB2.3 02.03.21 B
			B10_RB2.3 02.03.21 B_xy
	Patronensystem D	R1	R1 RB2.3 02.03.21 D
			R1_RB2.3 02.03.21 D_xy_ch
		B10	B10 RB2.3 02.03.21 D
			B10_RB2.3 02.03.21 D_xy_ch
	RB2.1_05.03.21	Bolzenanker F	A1
A1_RB2.1 05.03.21 F_xy			
F1			F1 RB2.1 05.03.21 F
			F1_RB2.1 05.03.21 F_xy
BK			BK RB2.1 05.03.21 F 1
			BK RB2.1 05.03.21 F 2
		BK RB2.1 05.03.21 F 3	
Betonschraube H		A1	A1 RB2.1 05.03.21 H
			A1_RB2.1 05.03.21 H_xy
		F1	F1 RB2.1 05.03.21 H
			F1_RB2.1 05.03.21 H_xy
Injektionssystem A		R1	R1 RB2.1 05.03.21 A
			R1_RB2.1 05.03.21 A_xy
		B10	B10 RB2.1 05.03.21 A
			B10_RB2.1 05.03.21 A_xy
Injektionssystem B		R1	R1 RB2.1 05.03.21 B
			R1_RB2.1 05.03.21 B_xy
		B10	B10 RB2.1 05.03.21 B
			B10_RB2.1 05.03.21 B_xy
Patronensystem D		R1	R1 RB2.1 05.03.21 D
			R1_RB2.1 05.03.21 D_xy_ch
		B10	B10 RB2.1 05.03.21 D
			B10_RB2.1 05.03.21 D_xy_ch

RB2.3_10.03.21	Bolzenanker F	A1	A1_RB2.3_10.03.21_F
			A1_RB2.3_10.03.21_F_xy
		F1	F1_RB2.3_10.03.21_F
			F1_RB2.3_10.03.21_F_xy
		BK	BK_RB2.3_10.03.21_F_1
			BK_RB2.3_10.03.21_F_2
	BK_RB2.3_10.03.21_F_3		
	Betonschraube H	A1	A1_RB2.3_10.03.21_H
			A1_RB2.3_10.03.21_H_xy
		F1	F1_RB2.3_10.03.21_H
			F1_RB2.3_10.03.21_H_xy
	Injektionssystem A	R1	R1_RB2.3_10.03.21_A
			R1_RB2.3_10.03.21_A_xy
		B10	B10_RB2.3_10.03.21_A
			B10_RB2.3_10.03.21_A_xy
	Injektionssystem B	R1	R1_RB2.3_10.03.21_B
			R1_RB2.3_10.03.21_B_xy
		B10	B10_RB2.3_10.03.21_B
			B10_RB2.3_10.03.21_B_xy
	Patronensystem D	R1	R1_RB2.3_10.03.21_D
			R1_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch
B10		B10_RB2.3_10.03.21_D	
		B10_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch	

In Versuchsreihe 5 (Tabelle 5-6) stand die Untersuchung des Einflusses der Lagerung und Reinigung auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen im Fokus. Hierfür wurden Prüfkörper hergestellt, die sich deutlich zu denen aus den Versuchsreihen 1 bis 4 unterscheiden. Statt Betonplatten wurden stahlummantelte Betonzylinder mit einem Durchmesser von 15 cm und einer Höhe von 12 cm hergestellt. Die kleinen Abmessungen der Versuchskörper sollten neben der Lagerung an der Luft eine Lagerung in einem Wasserbad und einem Ofen ermöglichen. Der Stahlmantel diente dazu, ein Spalten des Betonkörpers zu verhindern. Es wurden zwei Betonchargen hergestellt. Die Referenzcharge beinhaltete ausschließlich natürliche Gesteinskörnungen. Als Recyclingbeton wurde ein RB2.2 nach Kapitel 4.1 mit ausschließlich Recyclingmaterial > 2 mm gewählt.

Die Lagerungs- bzw. Umgebungsbedingungen stellten sich wie folgt dar. Für die Luftlagerung wurde keine abweichende Vorgehensweise zu den Versuchskörpern der bisher dargestellten Versuche gewählt. Nach dem Ausschalen wurden die Prüfkörper an der Luft gelagert. Es ist dabei zu erwähnen, dass der Stahlmantel bereits als Schalung diente und um den Betonkörpern bis nach der Durchführung der Versuche verblieb. Die Betonierunterseite, in der später die Anker installiert wurden, wurden allerdings von der Schalung befreit.

Für die Ofenlagerung wurden die Versuchskörper nach 28 Tagen an der Luft für 14 bzw. 17 Tage im Ofen bei 80°C bis zur Massekonstanz gelagert. Vor Installation der Verbundankersysteme wurden die Versuchskörper ein bis zwei Tage unter Raumtemperatur gelagert, um einen negativen Einfluss einer erhöhten Temperatur auf die Verbundankersysteme zu verhindern.

Ein Teil der Versuchskörper wurde nach dem Ausschalen in einem Wasserbad bis zur Installation und Prüfung der Verbundankersysteme gelagert.

Neben den unterschiedlichen Lagerungsbedingungen im Ofen, an der Luft und im Wasserbad wurde auch die Reinigung variiert. In den bisherigen Versuchsreihen 1 bis 4 wurde das Standardverfahren zur Reinigung nach Herstellerangaben angewendet. In Anlehnung an [18] wurden in Reihe 5 Versuche durchgeführt, in denen der Einfluss eines verminderten Reinigungsaufwands in trockenem

Beton (B6) und in wassergesättigtem Beton (B7) ermittelt werden soll. Die genannten Versuchsserien werden bei maximaler Verankerungstiefe durchgeführt und mit der Referenz (R5) verglichen. Die Versuche wurden ausschließlich mit dem Verbundankersystem B durchgeführt. Für dieses System gibt die zugehörige ETA für einen Ankerdurchmesser M12 240 mm als maximale Verankerungstiefe an. Aus versuchstechnischen Gründen wurde in den in Tabelle 5-6 dargestellten Versuche die Reinigung für eine Verankerungstiefe von 220 mm durchgeführt. Dies wurde in beiden Betonchargen gleich durchgeführt.

Neben den Versuchen B6, B7 und R5 wurden Versuche durchgeführt, die nicht für große Verankerungstiefen gereinigt wurden. Diese R1 Versuche wurden für alle Lagerungsbedingungen nach Standard- und Extrareinigung durchgeführt. Hintergrund der zuletzt genannten Versuche war die Untersuchung, ob ein erhöhter Reinigungsaufwand in den Prüfkörpern mit unterschiedlichen Feuchtigkeitszuständen zu einem abweichenden Tragverhalten führt. Zudem sollte überprüft werden, ob für Beton mit Recyclinggesteinskörnung ein erhöhter Reinigungsaufwand erforderlich ist, um die Tragfähigkeit zu erhöhen. Es ist zu erwähnen, dass die Versuchskörper, die im Ofen oder an der Luft gelagert wurden, in Versuchsreihe 5 nach der Extrareinigung für ca. 2 Stunden bei 80° C im Ofen gelagert wurden, um einen Einfluss der nassen Reinigung auf die Tragfähigkeit zu verhindern.

Tabelle 5-6: Versuchsübersicht Reihe 5

Beton-charge	Befestigungs-system	Lagerung	Test	Reinigung	Serienbezeichnung	
NB_19.03.21	Injektionssystem A	Ofen	R1	St	R1_NB_19.03.21_A_O_St	
		Luft		St	R1_NB_19.03.21_A_L_St	
	Injektionssystem B	Ofen	B6	1/2 St	B6_NB_19.03.21_B_O_1-2_St	
			R5	St	R5_NB_19.03.21_B_O_St	
			R1	St	R1_NB_19.03.21_B_O_St	
			R1	Ex	R1_NB_19.03.21_B_O_Ex	
		Luft	B6	1/2 St	B6_NB_19.03.21_B_L_1-2_St	
			R5	St	R5_NB_19.03.21_B_L_St	
			R1	St	R1_NB_19.03.21_B_L_St	
		Wasser	B7	1/2 St	B7_NB_19.03.21_B_W_1-2_St	
				St	R1_NB_19.03.21_B_W_St	
			R1	Ex	R1_NB_19.03.21_B_W_Ex	
	RB2.2_29.03.21	Injektionssystem A	Ofen	R1	St	R1_RB2.2_29.03.21_A_O_St
			Luft		St	R1_RB2.2_29.03.21_A_L_St
Injektionssystem B		Ofen	B6	1/2 St	B6_RB2.2_29.03.21_B_O_1-2_St	
			R5	St	R5_RB2.2_29.03.21_B_O_St	
			R1	St	R1_RB2.2_29.03.21_B_O_St	
			R1	Ex	R1_RB2.2_29.03.21_B_O_Ex	
		Luft	B6	1/2 St	B6_RB2.2_29.03.21_B_L_1-2_St	
			R5	St	R5_RB2.2_29.03.21_B_L_St	
			R1	St	R1_RB2.2_29.03.21_B_L_St	
		Wasser	B7	1/2 St	B7_RB2.2_29.03.21_B_W_1-2_St	
				St	R1_RB2.2_29.03.21_B_W_St	
			R1	Ex	R1_RB2.2_29.03.21_B_W_Ex	

Für Versuchsreihe 6 wurden spezielle Versuchskörper hergestellt, die für Risswechselversuche verwendet werden können. Ziel war die Untersuchung des Bolzenankers F in F3 Versuche, also in Beton mit zyklischem Risswechsel unter einer Dauerlast. Als Referenz dient der A3 Versuch, in dem

die Tragfähigkeit des Bolzenankers in statischem Riss ($\Delta w = 0,3 \text{ mm}$) mit einem Versuchsaufbau mit weiter Abstützung überprüft wird.

Als Betone standen ein Referenzbeton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen sowie die Recyclingbetone RB2.1 und Recyclingbeton RB2.2 zur Verfügung.

Tabelle 5-7: Versuchsübersicht Reihe 6

Beton-charge	Befestigungs-system	Test	Serienbezeichnung
NB_24.03.21	Bolzenanker F	A3	A3 NB 24.03.21 F
		F3	F3 NB 24.03.21 F
RB2.1_30.03.21	Bolzenanker F	A3	A3 RB2.1 30.03.21 F
		F3	F3 RB2.1 30.03.21 F
RB2.2_06.04.21	Bolzenanker F	A3	A3 RB2.2 06.04.21 F
		F3	F3 RB2.2 06.04.21 F

Tabelle 5-8 zeigt die Übersicht der Versuche aus Versuchsreihe 7, in der die Auswirkungen der Reinigungsverfahren des Bohrlochs auf das Tragverhalten untersucht wurden. Im Vergleich zu Versuchsreihe 5, in der unter anderem ebenfalls der Einfluss eines unterschiedlichen Reinigungsaufwandes auf die Tragfähigkeit der Verbundankersysteme untersucht wurde, wurden in Versuchsreihe 7 Versuche in sechs Betonchargen durchgeführt. Dabei wurde neben den speziell für Versuchsreihe 7 hergestellten Prüfkörpern (08/2021) auf drei ca. ein Jahr alte Prüfkörper aus diesem Forschungsprojekt zurückgegriffen (10/2020). Somit waren jeweils zwei Prüfkörper mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung, zwei Prüfkörper mit Recyclinggesteinskörnung RB1.1 und RB2.1 und zwei Prüfkörper mit ausschließlich Recyclingmaterial > 2 mm Gegenstand der Untersuchung. Die Prüfkörper aus 08/2021 hatten bei Durchführung der Versuche ein Alter von 35 bis 40 Tage.

Das Standardreinigungsverfahren wurde als Referenz verwendet. Verglichen werden sollten Auszugversuche an den Verbundankersystemen A, B und D, bei deren Installation ein erhöhter Reinigungsaufwand (Ex) der Bohrlöcher betrieben wurde. Zudem wurden für weitere Versuche Bohrlöcher mit einem an einen Staubsauger angeschlossenen Hohlbohrer (HDB) hergestellt. Da kein weiterer Reinigungsschritt bei diesem Verfahren erfolgt, wird die Untersuchung an mit Hohlbohrern hergestellten Bohrlöchern zur Untersuchung des Einflusses zur Bohrlochreinigung eingeordnet.

Wie bereits erwähnt, wird bei der Reinigung mit erhöhtem Aufwand (Ex) Wasser zur Spülung und Reinigung des Bohrlochs eingesetzt. Im Vergleich zu Versuchsreihe 5 konnten die Prüfkörper (mit Ausnahme der wassergelagerten Prüfkörper) nach Wasserreinigung aufgrund ihrer Abmessungen nicht in den Ofen gestellt werden. Es wurde nach Entfernen des Wassers aus dem Bohrloch gründlich mit Druckluft gereinigt und ca. 2 Stunden bis zur Installation der Verbundankersysteme gewartet.

Tabelle 5-8: Versuchsübersicht Reihe 7

Beton-charge	Befestigungs-system	Test	Reinigung	Serienbezeichnung
NB_01.10.20/A	Injektionssystem A	R1	St	R1 NB 01.10.20A A xy *
			Ex	R1 NB 01.10.20A A xy Ex
			HDB	R1 NB 01.10.20A A xy HDB
	Injektionssystem B	R1	St	R1 NB 01.10.20A B xy ch
			Ex	R1 NB 01.10.20A B xy ch Ex
			HDB	R1 NB 01.10.20A B xy ch HDB
	Patronensystem D	R1	St	R1 NB 01.10.20A D xy
			Ex	R1 NB 01.10.20A D xy Ex
			HDB	R1 NB 01.10.20A D xy HDB
RB1.1_14.10.20/A	Injektionssystem A	R1	St	R1 RB1.1 14.10.20A A xy *
			Ex	R1 RB1.1 14.10.20A A xy Ex
			HDB	R1 RB1.1 14.10.20A A xy HDB
	Injektionssystem B	R1	St	R1 RB1.1 14.10.20A B xy ch
			Ex	R1 RB1.1 14.10.20A B xy Ex ch
			HDB	R1 RB1.1 14.10.20A B xy HDB ch
	Patronensystem D	R1	St	R1 RB1.1 14.10.20A D xy
			Ex	R1 RB1.1 14.10.20A D xy Ex
			HDB	R1 RB1.1 14.10.20A D xy HDB
RB2.2_22.10.20/A	Injektionssystem A	R1	St	R1 RB2.2 22.10.20A A xy *
			Ex	R1 RB2.2 22.10.20A A xy Ex
			HDB	R1 RB2.2 22.10.20A A xy HDB
	Injektionssystem B	R1	St	R1 RB2.2 22.10.20A B xy ch *
			Ex	R1 RB2.2 22.10.20A B xy Ex ch
			HDB	R1 RB2.2 22.10.20A B xy HDB ch
	Patronensystem D	R1	St	R1 RB2.2 22.10.20A D xy
			Ex	R1 RB2.2 22.10.20A D xy Ex
			HDB	R1 RB2.2 22.10.20A D xy HDB
NB_18.08.21	Injektionssystem A	R1	St	R1 NB 18.08.21 A
			Ex	R1 NB 18.08.21 A Ex
			HDB	R1 NB 18.08.21 A HDB
	Injektionssystem B	R1	St	R1 NB 18.08.21 B
			Ex	R1 NB 18.08.21 B Ex
			HDB	R1 NB 18.08.21 B HDB
	Patronensystem D	R1	St	R1 NB 18.08.21 D
			Ex	R1 NB 18.08.21 D Ex
			HDB	R1 NB 18.08.21 D HDB
RB2.1_20.08.21	Injektionssystem A	R1	St	R1 RB2.1 20.08.21 A
			Ex	R1 RB2.1 20.08.21 A Ex
			HDB	R1 RB2.1 20.08.21 A HDB
	Injektionssystem B	R1	St	R1 RB2.1 20.08.21 B
			Ex	R1 RB2.1 20.08.21 B Ex
			HDB	R1 RB2.1 20.08.21 B HDB
	Patronensystem D	R1	St	R1 RB2.1 20.08.21 D
			Ex	R1 RB2.1 20.08.21 D Ex
			HDB	R1 RB2.1 20.08.21 D HDB
RB2.2_23.08.21	Injektionssystem A	R1	St	R1 RB2.2 23.08.21 A
			Ex	R1 RB2.2 23.08.21 A Ex
			HDB	R1 RB2.2 23.08.21 A HDB
	Injektionssystem B	R1	St	R1 RB2.2 23.08.21 B ch
			Ex	R1 RB2.2 23.08.21 B Ex ch
			HDB	R1 RB2.2 23.08.21 B HDB ch
	Patronensystem D	R1	St	R1 RB2.2 23.08.21 D
			Ex	R1 RB2.2 23.08.21 D Ex
			HDB	R1 RB2.2 23.08.21 D HDB

* Serie auch in Versuchsreihe 3 enthalten

Für die in dem Forschungsvorhaben geprüften Befestigungssysteme existiert jeweils eine ETA. Um diese zu erlangen, wurden Versuche innerhalb eines Zulassungsverfahrens für das jeweilige Produkt durchgeführt. In den oben genannten Versuchsreihen wurden in der Regel immer Vergleichsversuche

in Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen durchgeführt. Diese dienten zum einen als Referenz für die Versuche, die in der jeweiligen Versuchsreihe in Recyclingbeton durchgeführt wurden, aber auch als Vergleich zu den Versuchen innerhalb der Zulassungsverfahren.

Zusätzlich zu den genannten Versuchen wurden in Versuchsreihe 8 die in Tabelle 5-9 aufgelisteten Versuchsserien durchgeführt. Die Befestigungssysteme wurden in Prüfkörpern aus vergangenen Zulassungsverfahren geprüft, der noch im Bestand der TUK war. Hersteller der Versuchskörper war die Firma Rau-Betonfertigteile GmbH & Co. KG, von der in der Regel die Versuchskörper innerhalb der Zulassungsverfahren geordert werden.

In der Betoncharge vom 29.06.18 wurden jeweils in ungerissenem Beton der Bolzenanker F in weit abgestützten Auszugversuchen (A1) und die Verbundankersysteme A und D in eng abgestützten Auszugversuchen (R1) geprüft. In den beiden anderen Betonchargen wurden für die drei Verbundankersysteme A, B und D jeweils eine Versuchsserie R1 Versuche durchgeführt.

Tabelle 5-9: Versuchsübersicht Reihe 8

Beton-charge	Befestigungssystem	Test	Serienbezeichnung
NB_29.06.18	Bolzenanker F	A1	A1_NB_29.06.18_F
	Injektionssystem A	R1	R1_NB_29.06.18_A
	Patronensystem D	R1	R1_NB_29.06.18_D
NB_06.09.19	Injektionssystem A	R1	R1_NB_06.09.19_A
	Injektionssystem B	R1	R1_NB_06.09.19_B
	Patronensystem D	R1	R1_NB_06.09.19_D
NB_15.01.20	Injektionssystem A	R1	R1_NB_15.01.20_A
	Injektionssystem B	R1	R1_NB_15.01.20_B_ch
	Patronensystem D	R1	R1_NB_15.01.20_D_ch

6 Versuchstechnische Überprüfung der Versagenslasten für Betonausbruch und Herausziehen unter zentrischer Zugbelastung

6.1 Darstellung der Versagenslasten

Die Versuchskörper, in denen Versuche innerhalb von Zulassungsverfahren durchgeführt werden, können nicht immer exakt die erforderliche Betondruckfestigkeit von $f_{c,m} = 20 \text{ N/mm}^2$ oder $f_{c,m} = 50 \text{ N/mm}^2$ aufweisen. Zudem wurden innerhalb dieses Forschungsvorhabens Befestigungsmittel in Betonen zu unterschiedlichen Zeitpunkten geprüft. Daher werden die Versagenslasten bzw. Verbundspannungen auf eine Nennfestigkeit von $f_c = 20 \text{ N/mm}^2$ nach [18, 29] normiert wie in Gl. (27) und Gl. (28) dargestellt. Da die Druckfestigkeit innerhalb des Forschungsvorhabens an Betonwürfeln ermittelt wurde, erfolgt die Normierung auf $f_{c,m,cube} = 25 \text{ N/mm}^2$. Der Exponent m ist für das Versagen Herausziehen produktabhängig und wurde innerhalb des Zulassungsverfahrens des jeweiligen Produktes ermittelt. Die Werte aus Tabelle 6-1 werden für das jeweilige Produkt für alle Betone gleich angesetzt. Für Betonversagen ist ein Exponent $m = 0,5$ anzusetzen. Grundsätzlich darf nach [18, 29] innerhalb eines Zulassungsverfahrens eine Normierung nur durchgeführt werden, wenn die Betondruckfestigkeit am Prüftag des Befestigungssystems größer war als die Nenndruckfestigkeit, auf die normiert werden soll. Durch die Normierung werden die Versagenslasten kleiner als im Test ermittelt, sofern $m > 0$. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurden auch Versuche in Prüfkörpern durchgeführt, deren Druckfestigkeit kleiner war als die Nenndruckfestigkeit. Diese Versagenslasten wurden entgegen der oben genannten Regelung innerhalb des Forschungsvorhabens ebenfalls auf die Nenndruckfestigkeit normiert. Dadurch wurden diese Lasten durch den Vorgang des Normierens erhöht.

$$N_{u,20} = N_{u,t} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,t}} \right)^m \quad \text{Gl. (27)}$$

$$\tau_{u,20} = \tau_{u,t} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,t}} \right)^m \quad \text{Gl. (28)}$$

mit:

$N_{u,t}$	Versagenslast im Test [kN]
$\tau_{u,t}$	Verbundspannung bei Versagenslast im Test [N/mm ²]
f_c	Nenndruckfestigkeit in [N/mm ²]
$f_{c,t}$	Druckfestigkeit am Tag der Prüfung des Befestigungssystems [N/mm ²]
m	Exponent zur Berücksichtigung der Druckfestigkeit auf die Versagenslast [-]

Tabelle 6-1: Exponent m zur Berücksichtigung der Druckfestigkeit auf die Versagenslast

Verbundanker-system	ungerissen	gerissen
A	0,17	0,10
B	0,10	0,20
D	0,13	0,13

Sofern die Prüfung der Betondruckfestigkeit nicht am Tag der Prüfung der Befestigungsmittel durchgeführt wurde, wurde diese auf den Prüftag in Anlehnung an [48] nach Gl. (29) hochgerechnet.

$$f_{c,t} = f_{ct,0} \cdot e^{\frac{1,49}{t_0^{0,55}} - \frac{1,49}{t^{0,55}}} \quad \text{Gl. (29)}$$

mit:

$f_{ct,0}$	Ermittelte Druckfestigkeit des Betons [N/mm ²]
t_0	Alter des Betons bei Druckprüfung [d]
t	Alter des Betons bei Prüfung des Befestigungsmittels [d]

6.2 Diskussion der Referenztragfähigkeiten in ungerissenem Normalbeton

Um den Einfluss der Gesteinskörnung auf das Tragverhalten von Befestigungssystemen bestimmen zu können, muss zunächst diskutiert werden, welche Ergebnisse als Referenz für einen Vergleich der Versagenslasten bzw. -verbundspannungen und des Last-Verformungsverhaltens herangezogen werden können. Als Referenz sollen grundsätzlich die Ergebnisse dienen, die in Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen ermittelt wurden. Zum einen können hierfür Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren des jeweiligen Produktes als Vergleich herangezogen werden, da innerhalb eines Zulassungsverfahrens in Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen geprüft wird. Zum anderen können Ergebnisse von Versuchen herangezogen werden, die innerhalb des Forschungsprojektes in Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen durchgeführt wurden.

Für die Verbundankersysteme A und B liegen aus dem Zulassungsverfahren nicht für alle Tests direkte Vergleichsversuche vor. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde grundsätzlich die Größe M12 getestet. Für das Verbundankersystem B liegen hauptsächlich Daten vor, die an Ankern mit imperialen Durchmesserformaten geprüft wurden. Die imperiale Größe 1/2" ist mit 12,7 mm sehr nahe an dem metrischen Gewinde M12. Für die Versuche im gerissenen und ungerissenen Beton liegen allerdings nur wenige Versuchsserien vor, in der die Größe 1/2" geprüft wurden. Daher wurden die Versuche über alle Größen zusammengefasst und über eine Trendlinie ausgewertet. Da die Auswertung bei Verbundankersystemen nicht über die Versagenslast sondern über die Verbundspannung erfolgt, ist die Vorgehensweise über eine Trendlinie nicht ungewöhnlich. Dennoch ist anzumerken, dass der Durchmesser des Befestigungsmittels einen Einfluss auf die Versagenslast haben kann.

6.2.1 Verbundankersystem A

6.2.1.1 Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren

Abbildung 6-1 fasst die Ergebnisse der Auszugversuche mit enger Abstützung in ungerissenem Beton zusammen, die innerhalb des Zulassungsverfahrens von Produkt A mit der Größe M12 durchgeführt wurden. Die Versagenslasten wurden normiert auf eine Würfeldruckfestigkeit von 25 N/mm² bzw. eine Zylinderdruckfestigkeit von 25 N/mm² und Verbundspannungen berechnet, die in Abbildung 6-1 dargestellt sind. Die Chargen Referenzen wurden in jeweils unterschiedlichen Betonchargen geprüft. Die Serien ChRef 0005 und ChRef 0006 wurden in Beton mit einer mittleren Würfeldruckfestigkeit von 70 N/mm² und 82,9 N/mm² geprüft. Die mittlere Würfeldruckfestigkeit des Betons bei Serie ChRef 0011 lag bei 19,6 N/mm². Bei allen weiteren Serien wurde eine mittlere Würfeldruckfestigkeit des Betons zwischen 26,6 N/mm² und 32,3 N/mm² ermittelt. ChRef=Zul_A fasst alle Ergebnisse der Chargenreferenzen aus dem Zulassungsverfahren des Produktes A zusammen. Der Mittelwert der

normierten Verbundspannungen aller genannten Serien beträgt $Zul_A = 33,9 \text{ N/mm}^2$ mit einem minimalen Wert von $27,1 \text{ N/mm}^2$ und einem maximalen Wert von $39,1 \text{ N/mm}^2$.

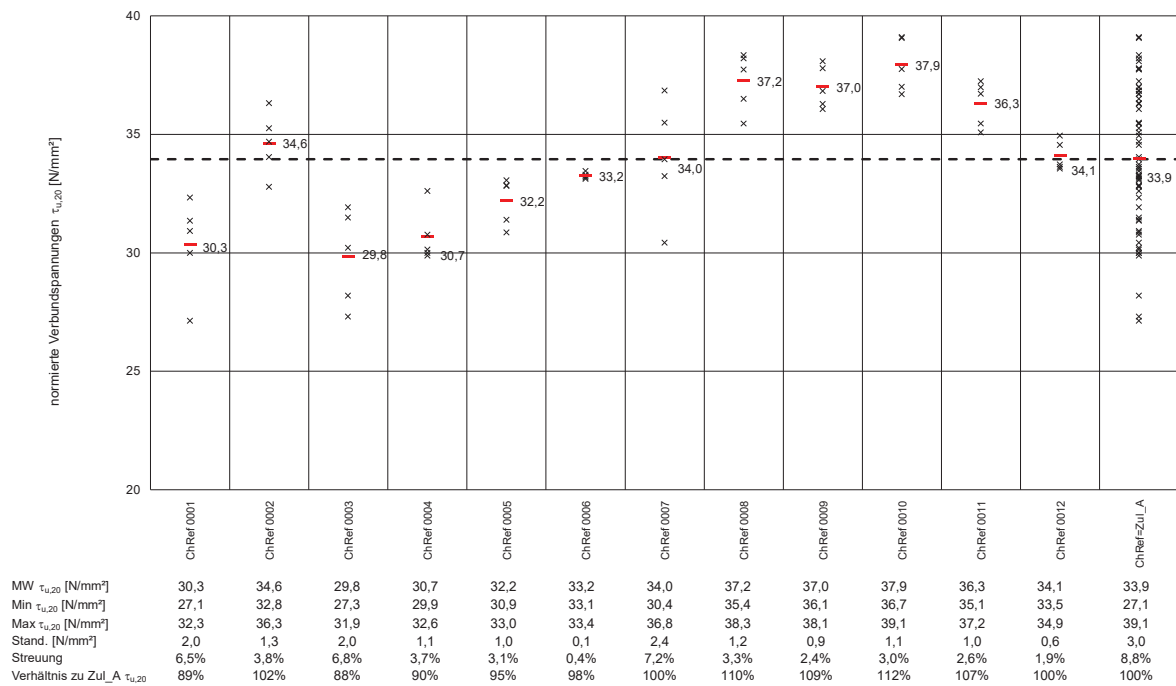


Abbildung 6-1: Übersicht normierte Verbundspannungen mit Verbundankersystem A in NB aus Zulassungsverfahren (ungerissener Beton) [49]

6.2.1.2 Ergebnisse der Versuche innerhalb des Forschungsprojektes

Die Ergebnisse, die innerhalb des Forschungsvorhabens mit dem Verbundankersystem A in Normalbeton in zentrischen Auszugversuchen mit enger Abstützung ermittelt wurden, sind in Tabelle 6-2 dargestellt. Neben der Betondruckfestigkeit, die in der Regel an Betonwürfeln ermittelt wurden, ist das Alter des Betons am Tag der Prüfung des Befestigungssystems, die normierten Verbundspannungen und die jeweiligen mittleren normierten Verbundspannungen einer Versuchsserie, die Streuung der normierten Verbundspannungen sowie der charakteristische Wert der normierten Verbundspannung der Versuchsserie dargestellt.

Die geringste mittlere normierte Verbundspannung wurde in Versuchsserie R1_NB_02.03.21_A mit $26,22 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Der maximale Wert von $35,59 \text{ N/mm}^2$ folgte aus den Versuchen der Serie R1_NB_15.01.20_A. Die Streuungen der Einzelversuche innerhalb einer Versuchsserie liegen zwischen 1,3 % und 5,6 % in einem zu erwartenden Bereich bzw. darunter.

Abbildung 6-2 stellt die erzielten Ergebnisse graphisch dar. Die normierten Verbundspannungen der Versuchsserien werden über dem Betonalter aufgetragen. Es wird deutlich, dass die Ergebnisse in Prüfkörpern mit einem Betonalter von $t < 40 \text{ d}$ (t_1) tendenziell geringere normierte Verbundspannungen aufwiesen als in den älteren Betonprüfkörpern. Die Serie R1_NB_13.07.20_A_x wurde zum Zeitpunkt t_2 193 Tage nach Betonage des Prüfkörpers durchgeführt. In einem Betonalter von 366 bis 394 Tagen (t_3) wurden Ergebnisse in drei weiteren Versuchsserien erzielt. Aus dem Altbestand aus zurückliegenden Zulassungsversuchen wurden Prüfkörper hinzugezogen, um Versuche in Prüfkörpern mit noch höherem Alter (504 bis 798 Tage (t_4)) durchzuführen. Der Trend

verdeutlicht die Steigerung der normierten Verbundspannungen von Zeitpunkt t1 zu t3. Zwischen t3 und t4 ist keine deutliche Steigerung der normierten Verbundspannungen mehr zu verzeichnen.

Tabelle 6-2: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem A, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
1	R1_NB_17.06.20_A	47,0	27	31,96	31,20	2,5%	28,59
			27	31,98			
			27	31,17			
			27	30,36			
			27	30,53			
2	R1_NB_13.07.20_A	30,0	32	28,80	29,72	3,1%	26,54
			32	30,88			
			32	28,82			
			32	30,43			
			32	29,68			
3	R1_NB_01.10.20/A_A	23,2	33	27,29	27,08	3,9%	23,45
			33	26,78			
			33	28,52			
			33	27,24			
			33	25,56			
3	R1_NB_01.10.20/B_A	20,3	33	27,64	27,39	5,6%	22,21
			33	26,00			
			33	25,96			
			33	29,67			
			33	27,69			
4	R1_NB_02.03.21_A	26,8	37	24,54	26,22	4,2%	22,52
			37	26,66			
			37	25,85			
			37	26,68			
			37	27,39			
2	R1_NB_13.07.20_A_x	34,1	193	31,07	32,81	3,2%	29,22
			193	32,53			
			193	33,46			
			193	33,38			
			193	33,59			
4	R1_NB_02.03.21_A_xy	42,0	366	34,47	32,24	5,0%	26,72
			366	33,19			
			366	31,91			
			366	31,33			
			366	30,31			
3/7	R1_NB_01.10.20/A_A_xy	27,9	376	33,62	33,15	2,3%	30,60
			376	33,01			
			376	32,22			
			376	34,14			
			376	32,75			
2	R1_NB_13.07.20_A_xy	33,1	394	32,61	32,34	3,9%	28,07
			394	30,58			
			394	34,04			
			394	31,92			
			394	32,55			
8	R1_NB_06.09.19_A	35,0	504	34,50	34,50	2,4%	31,69
			504	34,78			
			504	35,32			
			504	33,12			
			504	34,79			
8	R1_NB_15.01.20_A	34,7	650	35,09	35,59	1,3%	34,04
			650	35,71			
			650	35,75			
			650	35,19			
			650	36,21			
8	R1_NB_29.06.18_A	30,5	798	31,83	33,13	4,5%	28,03
			798	35,58			
			798	33,06			
			798	32,00			
			798	33,16			

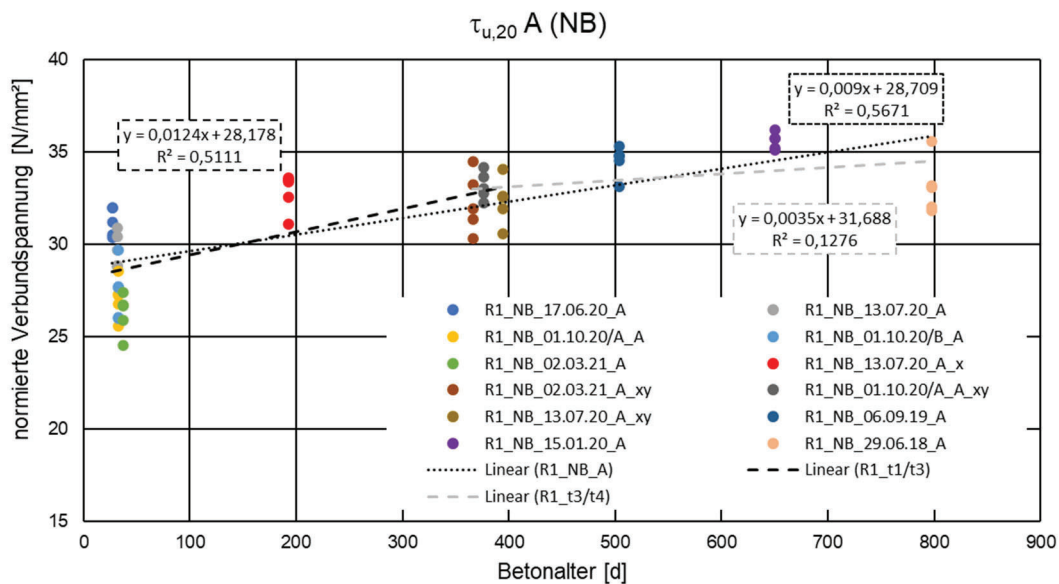


Abbildung 6-2: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, R1, Forschungsvorhaben

6.2.1.3 Vergleich und Schlussfolgerung

Die oben erläuterten Ergebnisse zeigen einen deutlichen Trend der Verbundspannungen über das Betonalter der Prüfkörper. Für einen späteren Vergleich der Verbundspannungen, die in Recyclingbeton ermittelt wurden, wird es als erforderlich angesehen, dass der Faktor des Betonalters weitestgehend ausgeschlossen wird. Daher wird die Unterteilung der Verbundspannungen bezüglich des Alters der Betonprüfkörper eingeführt.

Tabelle 6-3 fasst die mittleren normierten Verbundspannungen aus den oben genannten Versuchen zusammen. Durch Anwendung der gezeigten Trendfunktion, die aus den Ergebnissen des Zulassungsverfahrens ermittelt wurde, lässt sich eine mittlere normierte Verbundspannung von $\tau_{u,m,20,A,Zul,Trend} = 33,2 \text{ N/mm}^2$ bestimmen. Dies entspricht 98 % der mittleren normierten Verbundspannungen aus den Chargenreferenzversuchen mit der Größe M12 aus dem Zulassungsverfahren ($\tau_{u,m,20,A,Zul,ChRef} = 33,9 \text{ N/mm}^2$). Die normierten Verbundspannungen, die innerhalb des Forschungsvorhabens zum Zeitpunkt t1 in Beton mit einem maximalen Alter von 37 Tagen ermittelt wurden, erreichen im Mittel $\tau_{u,m,20,NB,R1,A,t1} = 28,3 \text{ N/mm}^2$, was 84 % der Chargenreferenzversuche aus dem Zulassungsverfahren entspricht. Werden die Testergebnisse aus dem Forschungsvorhaben zusammengefasst, die in Prüfkörpern mit einem Alter von 366 Tagen und mehr erzielt wurden, ergibt sich eine mittlere normierte Verbundspannung von $\tau_{u,m,20,NB,R1,A,t3/4} = 33,5 \text{ N/mm}^2$, was 99 % der Chargenreferenzversuche entspricht.

Tabelle 6-3: Zusammenfassung Referenzen Verbundankersystem A, NB, R1

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,A,Zul,ChRef}$	Bemerkungen
$\tau_{u,m,20,A,Zul,ChRef}$	33,9	100%	MW aus 12 ChRef Serien
$\tau_{u,m,20,NB,R1,A,t3/4}$	33,5	99%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t3 und t4
$\tau_{u,m,20,NB,R1,A,t3}$	32,6	96%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t3
$\tau_{u,m,20,NB,R1,A,t1}$	28,3	84%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t1

6.2.2 Verbundankersystem B

6.2.2.1 Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren

Für das Verbundankersystem B liegen keine Versuchsergebnisse mit der Größe M12 für ungerissenen Beton vor. Daher wurden die normierten Verbundspannungen aus Versuchen mit unterschiedlichen Ankerdurchmessern in Anlehnung an [50] über eine Trendlinie ausgewertet. Die Bezeichnung „1a“ der Versuche aus [51] stammt aus dem amerikanischen Bewertungsdokument [52] und entspricht den Versuche R1 aus [18]. Für einen Durchmesser von 12 mm kann über die angegebene Funktion eine mittlere normierte Verbundspannung $\tau_{u,m,20,B,Zul,Trend} = 30,0 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden.

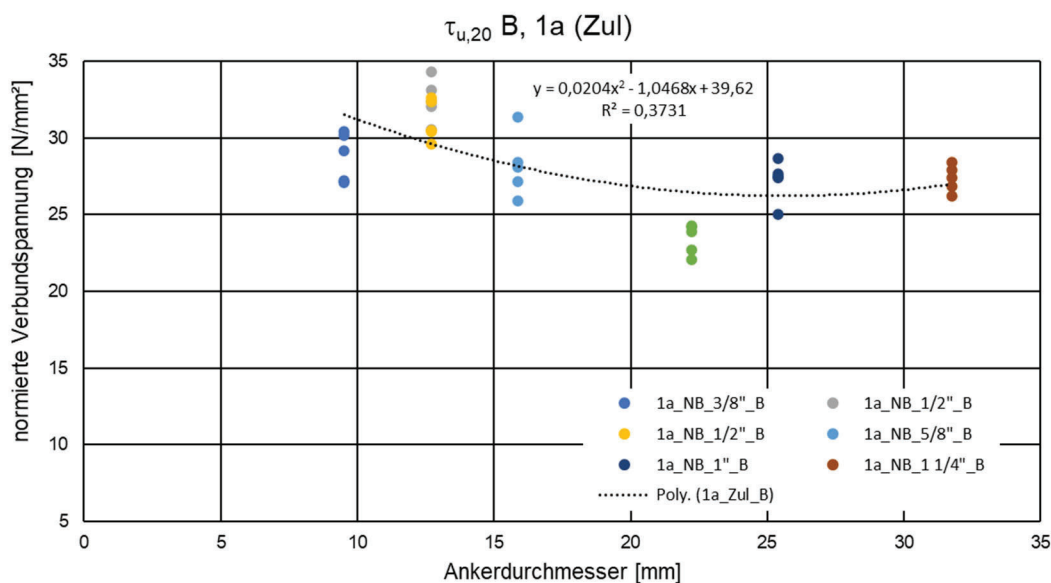


Abbildung 6-3: normierte Verbundspannungen in Abhängigkeit des Ankerdurchmesser, Verbundankersystem B, Zulassungsverfahren, Ergebnisse aus [51]

6.2.2.2 Ergebnisse der Versuche innerhalb des Forschungsprojektes R-Beton

Abbildung 6-4 stellt die normierten Verbundspannungen aus den an der TUK innerhalb des Forschungsprojektes durchgeführten Auszugversuchen mit enger Abstützung mit dem Verbundankersystem B über dem Betonalter dar. Die Zahlenwerte sind in Tabelle 6-4 zusammengefasst.

Der minimale Einzelwert wurde in Serie R1_NB_01.10.20/A_B mit $19,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt, der maximale Einzelwert in Serie R1_NB_15.01.20_B_ch mit $34,1 \text{ N/mm}^2$. Die Mittelwerte der jeweiligen Serien streuen zwischen $22,2 \text{ N/mm}^2$ und $31,7 \text{ N/mm}^2$. Die Streuung der Versuche innerhalb einer Versuchsserie liegt zwischen 2,4 % und 12,3 %. Die Streuungen sind etwas höher als die, die in den Versuchen an Verbundankersystem A festgestellt wurden, allerdings entspricht dies den Erwartungen.

Die graphische Darstellung in Abbildung 6-4 zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen den normierten Verbundspannungen und dem Betonalter der Prüfkörper. Mit steigendem Betonalter wurden höhere normierte Verbundspannungen festgestellt. Abweichend zu den Ergebnissen an

Verbundankersystem A ist kein Abflachen des Trends zu erkennen, wenn eine Trendline zwischen den Zeitpunkten t1 (27 – 37 d) und t3 (366 – 394 d) sowie zwischen t3 und t4 (504 – 650 d) unterteilt wird. Allerdings sind die Ergebnisse der Versuchsserie R1_NB_15.01.20_B_ch in höher als für dieses Produkt erwartet.

Tabelle 6-4: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem B, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
1	R1_NB_17.06.20_B	47,0	27	28,42	26,83	10,4%	17,32
			27	23,97			
			27	23,65			
			27	29,61			
			27	28,47			
2	R1_NB_13.07.20_B	30,0	32	24,91	26,44	7,7%	19,47
			32	28,64			
			32	28,29			
			32	26,38			
			32	23,96			
3	R1_NB_01.10.20/A_B	23,2	33	19,52	22,94	9,5%	15,56
			33	22,89			
			33	24,45			
			33	22,70			
			33	25,13			
3	R1_NB_01.10.20/B_B	20,3	33	22,22	24,00	5,3%	19,70
			33	23,71			
			33	25,02			
			33	23,66			
			33	25,42			
4	R1_NB_02.03.21_B	26,8	37	19,56	22,19	12,3%	12,88
			37	22,02			
			37	19,57			
			37	25,76			
			37	24,05			
2	R1_NB_13.07.20_B_x	34,1	193	26,45	28,22	4,7%	23,67
			193	28,57			
			193	29,04			
			193	27,27			
			193	29,75			
4	R1_NB_02.03.21_B_xy_ch	42,0	366	27,09	28,97	5,4%	23,62
			366	30,69			
			366	30,12			
			366	27,58			
			366	29,38			
3	R1_NB_01.10.20/A_B_xy	27,9	376	29,16	29,66	4,5%	25,14
			376	27,71			
			376	31,28			
			376	29,99			
			376	30,15			
2	R1_NB_13.07.20_B_xy	33,1	394	25,48	25,97	5,0%	21,59
			394	27,12			
			394	27,40			
			394	24,26			
			394	25,62			
8	R1_NB_06.09.19_B	35,0	504	30,49	30,87	2,4%	28,32
			504	30,96			
			504	31,61			
			504	29,79			
			504	31,48			
8	R1_NB_15.01.20_B_ch	34,7	650	28,82	31,67	6,3%	24,85
			650	34,14			
			650	30,74			
			650	32,59			
			650	32,08			

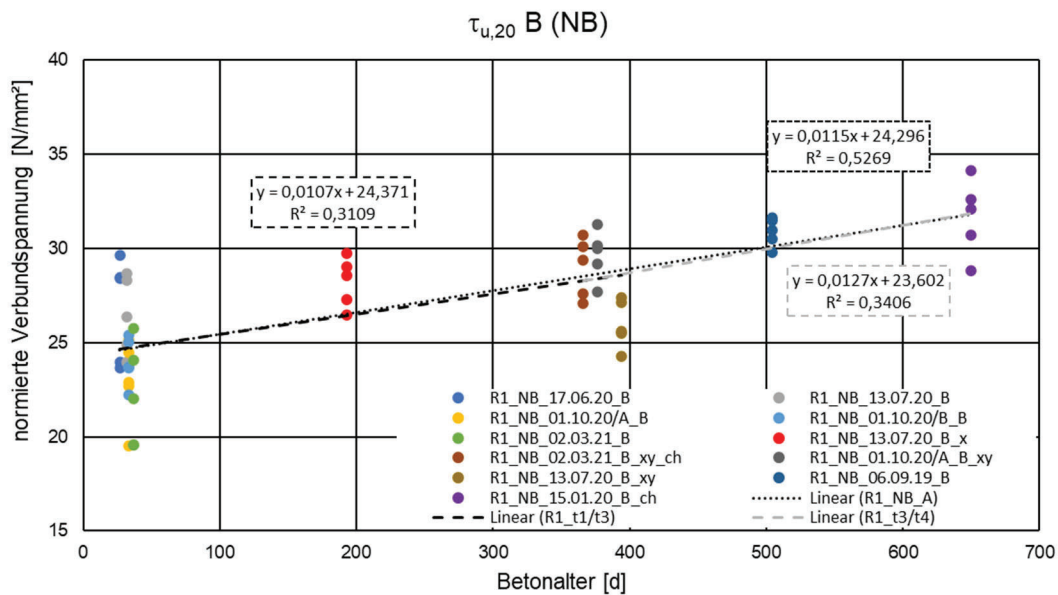


Abbildung 6-4: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, R1, Forschungsvorhaben

6.2.2.3 Vergleich und Schlussfolgerung

Auch für Verbundankersystem B wurde ein deutlicher Zusammenhang der normierten Verbundspannungen, die in eng abgestützten zentrischen Auszugversuchen ermittelt wurden, zum Alter der Betonprüfkörper gezeigt. Um die Werte für den späteren Vergleich mit den Verbundspannungen aus den Versuchen in Recyclingbeton festzulegen, werden auch für Verbundankersystem B die Testergebnisse für die unterschiedlichen Prüfzeitpunkte zusammengefasst. Analog zu der Vorgehensweise in Kapitel 6.2.1 wird der Prüfzeitpunkt t1 für alle Ergebnisse festgelegt, die in Beton mit einem Alter zwischen 27 und 37 Tagen ermittelt wurden. Für Verbundspannungen in älterem Beton werden die Ergebnisse aus den Versuchen in Beton zum Zeitpunkt t3 und t4 angesetzt.

Werden nur die Ergebnisse betrachtet, die in Beton mit einem maximalen Alter von 37 Tagen ermittelt wurden, ergibt sich eine mittlere normierte Verbundspannung von $\tau_{u,m,20,NB,R1,B,t1} = 24,5 \text{ N/mm}^2$. Dies entspricht 85 % der mittleren Verbundspannung aus dem Zulassungsverfahren, die über die oben gegebene Trendlinie ermittelt wurde. Für die Ergebnisse aus den Betonprüfkörpern, die im Zeitraum t3 ermittelt wurden, lässt sich eine mittlere normierte Verbundspannung von $\tau_{u,m,20,NB,R1,B,t3} = 28,2 \text{ N/mm}^2$ (94 % der mittleren normierten Verbundspannung aus dem Zulassungsverfahren) bestimmen. Für den Zeitraum t3/4 (366 d bis 650 d) wurde im Mittel $\tau_{u,m,20,NB,R1,B,t3/4} = 29,4 \text{ N/mm}^2$ erzielt. Dies entspricht dem Wert, der aufgrund der Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren zu erwarten war (98 %).

Tabelle 6-5: Zusammenfassung Referenzen Verbundankersystem B, NB, R1

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,B_Zul,Trend}$	Bemerkungen
$\tau_{u,m,20,B_Zul,Trend}$	30,0	100%	Trendlinie aus 7 Versuchsserien
$\tau_{u,m,20,NB_B_R1_t3/4}$	29,4	98%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t3 und t4
$\tau_{u,m,20,NB_B_R1_t3}$	28,2	94%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t3
$\tau_{u,m,20,NB_B_R1_t1}$	24,5	82%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t1

6.2.3 Verbundankersystem D

6.2.3.1 Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren

Abbildung 6-5 zeigt die normierten Verbundspannungen der Chargenreferenzen aus dem Zulassungsverfahren des Produktes D [53]. Die mittlere Würfeldruckfestigkeit der zugehörigen Betone lag zum Testzeitpunkt des Verbundankersystems zwischen 26,0 N/mm² und 34,7 N/mm². ChRef=Zul_D fasst alle acht dargestellten Versuchsserien zusammen. Die geringste normierte Verbundspannung im Einzeltest wurde in ChRef0007 mit 23,6 N/mm², die größte normierte Verbundspannung im Einzeltest in ChRef0006 mit 33,7 N/mm² ermittelt. Die mittlere normierte Verbundspannung über alle dargestellten Serien liegt bei 28,9 N/mm² mit einer Streuung von 6,6 %. Die Mittelwerte der acht Serien streuen zwischen 27,8 N/mm² und 30,3 N/mm².

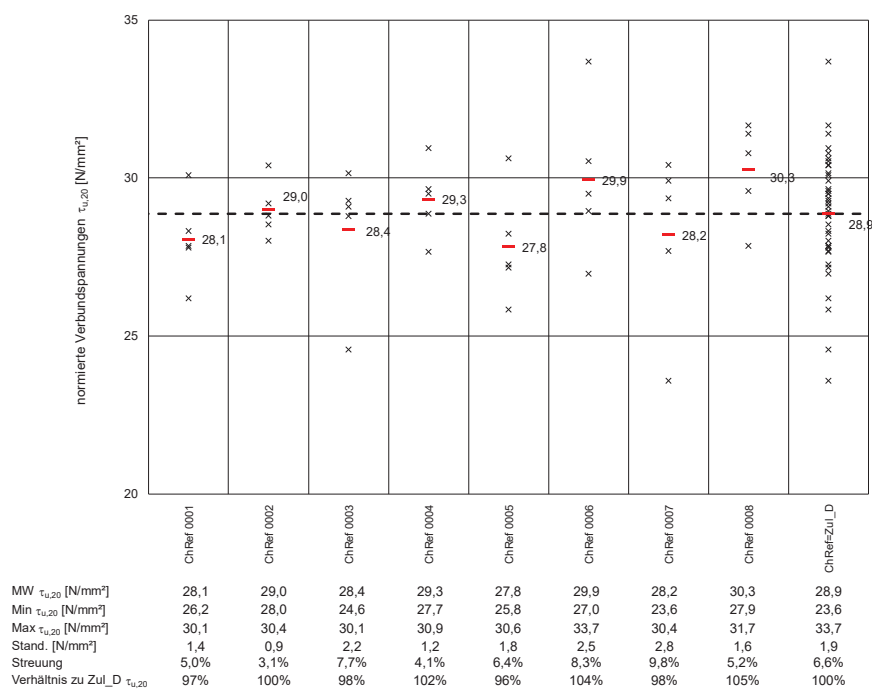


Abbildung 6-5: Übersicht normierte Verbundspannungen mit Verbundankersystem D in NB aus Zulassungsverfahren, R1

6.2.3.2 Ergebnisse der Versuche innerhalb des Forschungsprojektes R-Beton

Die Ergebnisse der an der TUK innerhalb des Forschungsprojektes durchgeführten Versuchsserien mit dem Verbundankersystem D in eng abgestützten Auszugversuchen (R1) werden in Tabelle 6-6 zusammengefasst. Der Minimalwert der normierten Verbundspannung aller Einzelversuche wurde in Serie R1_NB_13.07.20_D mit 20,05 N/mm², der Maximalwert von 33,88 N/mm² in Serie R1_NB_15.01.20_D_ch ermittelt. Die Werte der mittleren normierten Verbundspannung der Versuchsserien liegen zwischen 22,48 N/mm² aus Serie R1_NB_02.03.21_D und 31,40 N/mm² aus Serie R1_NB_15.01.20_D_ch. Die Streuungen innerhalb der betrachteten Versuchsserien liegen mit 3,0 % bis 9,3 % im erwarteten Bereich.

In Abbildung 6-6 werden die normierten Verbundspannungen über dem Betonalter der Prüfkörper dargestellt. Es ist ein deutlicher Trend der normierten Verbundspannungen zu erkennen. Mit steigendem Alter der Prüfkörper ist eine höhere normierte Verbundspannung zu erwarten. Werden die Zeitpunkte t1 (30 d – 37 d), t3 (366 d – 394 d) und t4 (504 d – 797 d) betrachtet, wird noch

ersichtlich, dass die normierten Verbundspannungen im Zeitraum t1 – t3 deutlich steigen. Für den Zeitraum t3 – t4 ist keine signifikante Erhöhung der normierten Verbundspannungen zu erkennen.

Tabelle 6-6: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem D, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
2	R1_NB_13.07.20_D	29,8	30	25,40	23,23	8,6%	16,41
			30	24,36			
			30	23,22			
			30	20,05			
			30	23,13			
3	R1_NB_01.10.20/A_D	23,1	32	21,86	22,72	4,4%	19,29
			32	22,99			
			32	22,53			
			32	21,90			
			32	24,31			
3	R1_NB_01.10.20/B_D	20,2	32	23,57	22,80	3,5%	20,08
			32	22,69			
			32	22,79			
			32	23,42			
			32	21,54			
4	R1_NB_02.03.21_D	26,8	37	22,07	22,48	4,4%	19,12
			37	23,77			
			37	21,78			
			37	23,28			
			37	21,51			
2	R1_NB_13.07.20_D_x	34,1	193	24,50	24,84	4,8%	20,76
			193	23,77			
			193	25,22			
			193	26,74			
			193	23,99			
4	R1_NB_02.03.21_D_xy_ch	42,0	366	28,00	28,00	3,0%	25,13
			366	28,01			
			366	27,21			
			366	29,37			
			366	27,40			
3	R1_NB_01.10.20/A_D_xy	27,9	376	27,54	29,32	4,0%	25,29
			376	29,80			
			376	29,89			
			376	28,78			
			376	30,58			
2	R1_NB_13.07.20_D_xy	33,1	394	30,33	29,13	6,0%	23,21
			394	31,31			
			394	29,08			
			394	26,99			
			394	27,96			
8	R1_NB_06.09.19_D	35,0	504	30,81	28,48	6,9%	21,80
			504	30,21			
			504	27,01			
			504	28,07			
			504	26,31			
8	R1_NB_15.01.20_D_ch	34,7	650	33,88	31,40	7,7%	23,13
			650	32,95			
			650	31,30			
			650	31,34			
			650	27,52			
8	R1_NB_29.06.18_D	30,5	797	26,01	28,64	9,3%	19,58
			797	29,65			
			797	31,67			
			797	30,18			
			797	25,66			

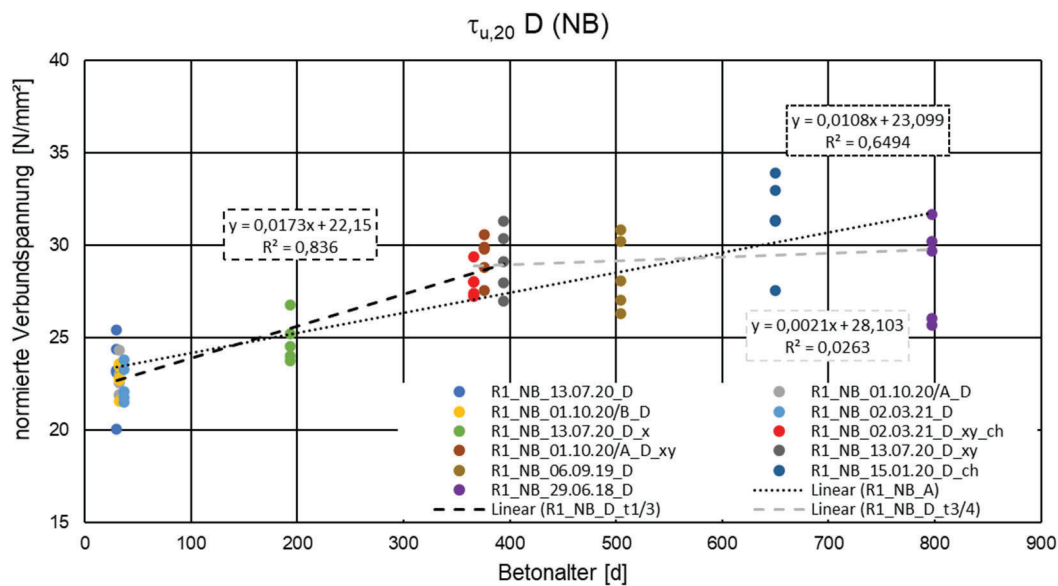


Abbildung 6-6: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, R1, Forschungsvorhaben

6.2.3.3 Vergleich und Schlussfolgerung

Die oben gezeigten Ergebnisse machen deutlich, dass auch für Verbundankersystem D eine Unterscheidung der Verbundspannungen bezüglich des Alters der Prüfkörper vorgenommen werden muss. Für einen späteren Vergleich der dargestellten Verbundspannungen mit den Ergebnissen aus den Versuchen in Recyclingbeton werden die Ergebnisse für den Zeitpunkt t1 ebenso wie für den Zeitraum t3 in Tabelle 6-7 zusammengefasst. Die mittlere normierte Verbundspannung $\tau_{u,m,20,D,Zul,ChRef} = 28,9 \text{ N/mm}^2$ aus den Chargenreferenzversuchen aus dem Zulassungsverfahren stellen dabei die Referenz zu den Versuchen innerhalb des Forschungsvorhabens dar. In den Versuchen in Beton mit einem Alter zwischen 30 und 37 Tagen konnte in vier Versuchsserien eine mittlere normierte Verbundspannung von $22,8 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden. Dies entspricht 79 % des Mittelwerts der Chargenreferenzversuche aus dem Zulassungsverfahren. Werden die Ergebnisse der Versuche in den Betonen mit einem Alter von 366 bis 394 Tagen zusammengefasst ($\tau_{u,m,20,NB_D_R1_t3}$), erreichen diese im Mittel 100 % der Chargenreferenzversuche. Der Mittelwert der normierten Verbundspannungen aus den drei Versuchsserien in Betonkörpern mit einem Alter > 400 Tage betrug 102 % des Mittelwertes der Chargenreferenzversuche.

Es kann festgehalten werden, dass die mittleren normierten Verbundspannungen aus dem Zulassungsverfahren innerhalb des Forschungsvorhabens in Beton mit dem Alter 366 d bis 797 d bestätigt werden konnten.

Tabelle 6-7: Zusammenfassung Referenzen Verbundankersystem D, NB, R1

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,D_Zul,ChRef}$	Bemerkungen
$\tau_{u,m,20,D_Zul,ChRef}$	28,9	100%	MW aus 8 ChRef Serien
$\tau_{u,m,20,NB_D_R1_t3/4t}$	29,2	101%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t3 und t4
$\tau_{u,m,20,NB_D_R1_t3}$	28,8	100%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t3
$\tau_{u,m,20,NB_D_R1_t1}$	22,8	79%	Ergebnisse aus Beton zum Zeitpunkt t1

6.2.4 Schlussfolgerung über die Referenzen der Verbundankersysteme

Die Ergebnisse der Referenzversuche mit den Verbundankersystemen A, B und D haben gezeigt, dass die Verbundspannungen neben der Betondruckfestigkeit von weiteren Parametern abhängen. Abbildung 6-7 fasst die Ergebnisse zusammen. Dabei werden die normierten Verbundspannungen, die in Versuchen innerhalb des Forschungsvorhabens in Normalbeton ermittelt wurden, in die Prüfzeiträume t1, t3 und t3/4 unterteilt. Es wird deutlich, dass für alle geprüften Verbundankersysteme in den Versuchen in Beton mit einem Alter zwischen 27 und 37 Tagen (t1) die mittlere normierte Verbundspannung aus dem Zulassungsverfahren des jeweiligen Produkts nicht bestätigt werden konnte. Die Mittelwerte aus vier bzw. fünf Versuchsserien mit je fünf Einzelversuchen erreichten lediglich 79 % bis 84 % der mittleren normierten Verbundspannung aus dem Zulassungsverfahren.

Aufgrund der deutlichen Abweichung der Testergebnisse des Forschungsvorhabens zu denen des jeweiligen Zulassungsverfahrens wurden je Verbundankersystem fünf bzw. sechs weitere Versuchsserien durchgeführt. Dabei wurden die Verbundankersysteme in Beton mit einem Alter von 366 bis 394 Tagen (t3) installiert und Auszugversuche durchgeführt. Zusätzlich wurden diese Testergebnisse ergänzt durch Versuche in Beton mit einem Alter bis zu 797 Tagen (t3/4). Für den Zeitraum t3 konnten die Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren mit 94 % bis 100 % bestätigt werden. Durch die Ergänzung und Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Zeitraum t3/4 konnten im Mittel 99 % bis 101 % der Referenzlasten aus dem Zulassungsverfahren erreicht werden.

Die Ergebnisse, die in den Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.3 erläutert wurden, sollen als Referenz dienen, um einen Einfluss von Recyclingbeton auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen zu untersuchen. Aufgrund des dargestellten Einflusses des Betonalters auf die normierten Verbundspannungen ist für den späteren Vergleich der Versuche, die in Recyclingbeton durchgeführt wurden, weiterhin auf den Prüfzeitraum und das Betonalter der jeweiligen Versuchskörper zu achten. Da in den Betonkörpern ab einem gewissen Alter die Zulassungsversuche bestätigt werden konnten, werden in den weiteren Kapiteln die Ergebnisse aus den Zulassungsversuchen für ungerissenen Beton nicht weiter betrachtet. Als Referenzwerte dienen die dargestellten Ergebnisse, die innerhalb des Forschungsvorhabens ermittelt wurden.

6.2.5 Bolzenanker F

6.2.5.1 Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren

Abbildung 6-8 stellt die normierten Versagenslasten der Auszugversuche mit weiter Abstützung dar, die vom Hersteller des Produktes zur Verfügung gestellt wurden. Die Serie F_12_A1_C wurde im Zuge des Zulassungsverfahrens des Produktes F durchgeführt [54]. Die beiden Serien F_12_A1_E und F_12_A1_F wurden zusätzlich durchgeführt.

Die mittlere normierte Würfeldruckfestigkeit betrug am Prüftag der Befestigungsmittel bei Serie F_12_A1_C 32,3 N/mm² und bei F_12_A1_E und F_12_A1_F 30,8 N/mm². Der minimale Wert der normierten Auszuglast kann mit 20,5 kN, der maximale Wert mit 26,5 kN festgehalten werden. Der Mittelwert aller dargestellten normierten Versagenslasten beträgt 23,9 kN.

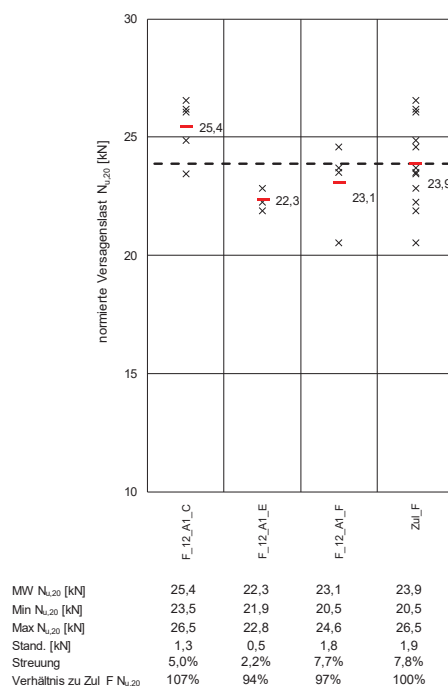


Abbildung 6-8: Übersicht normierte Versagenslasten mit Bolzenanker F in NB aus Zulassungsverfahren, A1

6.2.5.2 Ergebnisse der Versuche des Forschungsprojektes R-Beton

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden acht Serien zentrischer Auszugversuche mit weiter Abstützung in ungerissenem Normalbeton mit dem Bolzenanker F durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-8 zusammengefasst. Die Betondruckfestigkeit der Versuchskörper am Tag der Auszugversuche lag zwischen 20,2 N/mm² und 43,4 N/mm². In zwei Serien wurden lediglich drei Versuche durchgeführt. Die weiteren sechs Serien bestehen jeweils aus fünf Einzelversuche. Alle Prüfkörper wurden an der TUK hergestellt mit Ausnahme des Körpers der Charge NB_29.06.18. Dieser stammt aus dem Altbestand und diente dazu, Ergebnisse in Beton mit höherem Alter zu gewinnen.

Die geringste normierte Versagenslast wurde in einem Test der Serie A1_NB_02.03.21_F mit 16,80 kN ermittelt, der maximale Wert in der Serie A1_NB_29.06.18_F mit 25,49 kN. Die Streuung innerhalb jeder der acht Versuchsserien liegt mit 3,3 % bis 7,5 % im erwarteten Bereich.

Tabelle 6-8: Testergebnisse Forschungsvorhaben: A1 - Bolzenanker F, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]
1	A1_NB_17.06.20_F	43,4	23	19,57	19,45	7,1%	14,73
			23	19,78			
			23	18,44			
			23	17,94			
			23	21,52			
3	A1_NB_01.10.20/A_F	23,1	32	20,07	19,69	7,0%	12,36
			32	20,85			
			32	18,16			
			32				
3	A1_NB_01.10.20/B_F	20,2	32	18,55	19,01	3,3%	15,70
			32	18,77			
			32	19,72			
			32				
4	A1_NB_02.03.21_F	26,8	37	18,36	17,89	6,0%	14,25
			37	17,57			
			37	16,80			
			37	17,19			
			37	19,50			
4	A1_NB_02.03.21_F_xy	42,0	366	21,97	19,97	6,3%	15,67
			366	20,08			
			366	19,30			
			366	19,92			
			366	18,58			
3	A1_NB_01.10.20/A_F_xy	27,9	375	19,70	21,74	7,5%	16,22
			375	21,93			
			375	23,38			
			375	20,50			
			375	23,20			
3	A1_NB_01.10.20/B_F_xy	25,1	375	21,41	21,48	4,1%	18,48
			375	22,40			
			375	20,32			
			375	22,29			
			375	20,98			
8	A1_NB_29.06.18_F	30,5	797	24,24	23,68	7,1%	17,93
			797	25,49			
			797	23,75			
			797	24,01			
			797	20,90			

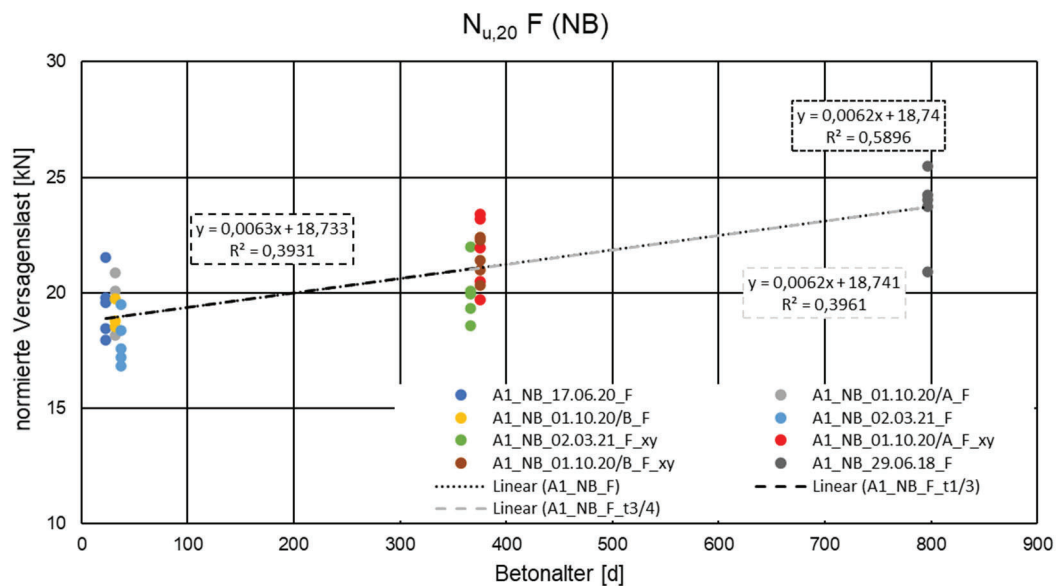


Abbildung 6-9: normierte Versagenslasten über Betonalter, Bolzenanker F, A1, Forschungsvorhaben

6.2.5.3 Vergleich und Schlussfolgerung

Die dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass eine nähere Betrachtung des Betonalters vorgenommen werden muss, wenn ein Referenzwert zum Vergleich der Ergebnisse aus Betonprüfkörpern mit Recyclingmaterial festgelegt wird. Analog zu der oben dargestellten Vorgehensweise für die Ergebnisse der Verbundankersysteme werden auch für den Bolzenanker unterschiedliche Prüfzeiträume festgelegt. Der Prüfzeitraum t_2 bei ungefähr 200 d wurde mit dem Bolzenanker nicht geprüft. Dennoch werden die Bezeichnungen aus den vergangenen Kapiteln beibehalten. Die Versagenslasten wurden zusammengefasst für Versuche in den Prüfzeiträumen t_1 mit 23 bis 37 Tage, t_3 mit 366 bis 375 Tage und t_4 mit 797 Tage. Aus Abbildung 6-9 geht hervor, dass sich der Trend einer steigenden normierten Versagenslast mit steigendem Betonalter über den Zeitraum t_3 hinaus bestätigt. Daher wurden in Tabelle 6-9 ergänzend zur bisherigen Betrachtung die Ergebnisse aus den Zeiträumen t_3 und t_4 zum einen getrennt betrachtet, aber zum anderen wie bereits bei den Verbundankersystemen auch zusammengefasst ($t_3/4$).

Die Ergebnisse, die innerhalb des Forschungsvorhabens erzielt wurden, konnten die Ergebnisse, die vom Hersteller des Produkts geliefert wurden (Kapitel 6.2.5.1) nur zum Teil bestätigen. Tabelle 6-9 fasst die normierten mittleren Versagenslasten für die unterschiedlichen Prüfzeiträume zusammen. Als Referenz dienen die Ergebnisse, die vom Hersteller geliefert wurden. Die Ergebnisse aus dem Prüfzeitraum t_1 erreichten im Mittel nur 79 % des Referenzwertes. Bis zum Zeitraum t_3 konnte eine Erhöhung der Versagenslasten festgestellt werden, allerdings nur bis zu 88 % des Referenzwertes. Mit der Serie im Zeitraum t_4 konnte der Referenzwert bestätigt werden (99 %). Es ist dabei anzumerken, dass im Zeitraum t_4 innerhalb des Forschungsvorhabens lediglich eine Serie durchgeführt wurde. Zudem wurde diese Serie in einem Versuchskörper durchgeführt, der extern hergestellt wurde.

Tabelle 6-9: Zusammenfassung Referenzen Bolzenanker F, NB, A1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältnswert zu $N_{u,m,20,F_Zul}$	Bemerkungen
$N_{u,m,20,F_Zul}$	23,9	100%	MW aus 3 Serien
$N_{u,m,20,NB_F_A1_t3}$	21,1	88%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3
$N_{u,m,20,NB_F_A1_t4}$	23,7	99%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t4
$N_{u,m,20,NB_F_A1_t3/4}$	21,7	91%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3 und t4
$N_{u,m,20,NB_F_A1_t1}$	18,9	79%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t1

6.2.6 Betonschraube H

Innerhalb des Forschungsvorhabens lag der Fokus auf der Untersuchung des Verbundverhaltens und des Verhaltens des Bolzenankers. Dennoch sollte in wenigen Versuchen gezeigt werden, ob eine weitere Untersuchung zum Tragverhalten von Betonschrauben in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen zielführend sein kann.

6.2.6.1 Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren

Aus dem Zulassungsverfahren liegt eine Versuchsserie mit acht Einzelversuchen vor [55]. Die normierten Versagenslasten im weit abgestützten Auszugsversuch werden in Abbildung 6-10 gezeigt. Der Mittelwert der Datenreihe liegt bei 40,4 kN. Es wurde eine minimale Versagenslast von 37,0 kN und eine maximale normierte Versagenslast von 43,1 kN ermittelt.

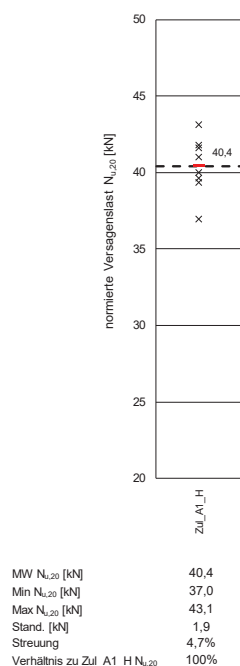


Abbildung 6-10: Übersicht normierte Versagenslasten Betonschraube H in NB aus Zulassungsverfahren, A1

6.2.6.2 Ergebnisse der Versuche innerhalb des Forschungsprojektes

Zentrische Auszugversuche mit weiter Abstützung in Normalbeton wurden mit der Betonschraube in vier Versuchsserien mit je fünf Versuchen durchgeführt. Die Druckfestigkeit der Prüfkörper lag zum Zeitpunkt der Prüfung der Betonschraube zwischen 25,1 N/mm² und 42,0 N/mm². Der kleinste Wert der normierten Versagenslast wurde in Serie A1_NB_02.03.21_H mit 28,11 kN ermittelt. Der maximale Wert der normierten Versagenslast beträgt 45,90 kN und stammt aus Serie A1_NB_01.10.20B_H_xy. Die Streuungen der vier Versuchsserien liegen zwischen 4,5 % und 11,9 % im erwarteten Bereich.

Es liegt lediglich eine Serie in Beton mit einem Alter von wenigen Wochen vor (t₁). Um die Vorgehensweise der oben besprochenen Befestigungsmittel weiterzuführen, werden auch die normierten Versagenslasten der Auszugversuche an der Betonschraube über das Alter dargestellt. Für die Normierung wurde der Exponent $m = 0,5$ gewählt. Aus dem Zeitraum t₂ liegen keine

Ergebnisse vor, ebenso aus t4. In Beton mit einem Alter von 366 bis 375 Tagen (t3) wurden drei Versuchsserien durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst. Die Darstellung der normierten Versagenslasten über dem Betonalter der Versuchskörper in Abbildung 6-11 zeigt deutlich, dass mit steigendem Alter eine höhere normierte Auszuglast zu erwarten ist.

Tabelle 6-10: Testergebnisse Forschungsvorhaben: A1 - Betonschraube H, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$ [N/mm ²]	Betonalter [d]	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	Streuung [-]	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$ [kN]
4	A1_NB_02.03.21_H	26,8	37	37,71	34,29	11,9%	20,47
			37	37,62			
			37	35,56			
			37	32,44			
			37	28,11			
4	A1_NB_02.03.21_H_xy	42,0	366	40,21	38,52	9,0%	26,76
			366	33,33			
			366	38,86			
			366	42,64			
			366	37,56			
3	A1_NB_01.10.20A_H_xy	27,9	375	45,06	42,17	4,5%	35,69
			375	42,23			
			375	41,70			
			375	39,72			
			375	42,13			
3	A1_NB_01.10.20B_H_xy	25,1	375	45,90	41,91	7,9%	30,61
			375	40,56			
			375	37,60			
			375	44,54			
			375	40,97			

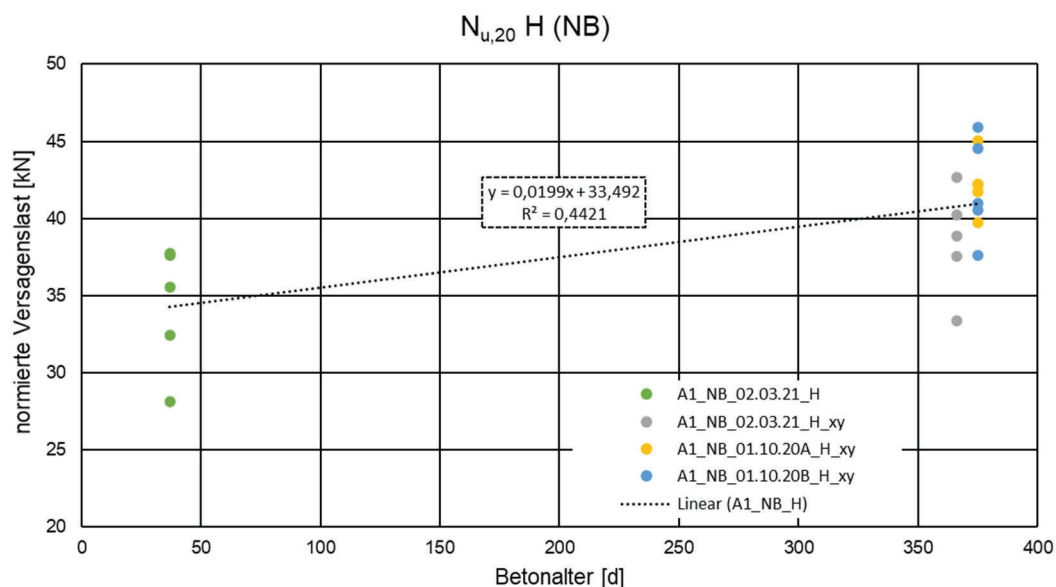


Abbildung 6-11: normierte Versagenslasten über Betonalter, Betonschraube, A1, Forschungsvorhaben

6.2.6.3 Vergleich und Schlussfolgerung

Die oben dargestellten Versuchsergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss des Betonalters auf die normierte Versagenslast. Um die Referenz zu wählen für den späteren Vergleich mit den Versuchsergebnissen, die in Recyclingbeton ermittelt wurden, werden die Ergebnisse für die

Zeiträume t1 und t3 jeweils zusammengefasst. In der Serie, die in einem Betonprüfkörper mit einem Alter von 37 Tagen durchgeführt wurde, konnte eine mittlere normierte Versagenslast von 34,3 kN ermittelt werden. Verglichen mit den Werten aus dem Zulassungsverfahren entspricht dies 85 %. Die normierte mittlere Versagenslast der drei Versuchsserien im Prüfzeitraum t3 beträgt 40,9 kN und konnte die Ergebnisse aus dem Zulassungsverfahren bestätigen (101 %).

Tabelle 6-11: Zusammenfassung Referenzen Betonschraube H, NB, A1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,F_Zul}$	Bemerkungen
$N_{u,m,20,H_Zul}$	40,4	100%	MW aus 8 Einzelversuche
$N_{u,m,20,NB_H_A1_t3}$	40,9	101%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3
$N_{u,m,20,NB_H_A1_t1}$	34,3	85%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t1

6.3 Diskussion der Referenztragfähigkeiten in gerissenem Normalbeton

Neben den in Kapitel 6.2 diskutierten Testergebnissen in ungerissenem Beton wurden innerhalb des Forschungsvorhabens in den Versuchsreihen 2 und 4 zusätzlich zentrische Auszugversuche in gerissenem Beton durchgeführt. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse dargestellt, die in Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen ermittelt wurden. Bei einer statischen Rissbreite von $\Delta w = 0,5$ mm wurden Versuche mit enger Abstützung mit den Verbundankersystemen A, B und D (B10) nach [18] und mit weiter Abstützung mit dem Bolzenanker F und der Betonschraube H (F1) nach [29] durchgeführt.

Auch für gerissenen Beton wurden Versuche in einer Betoncharge zu unterschiedlichen Prüfzeitpunkten durchgeführt. Daher konnten die Grenzen für die Betondruckfestigkeit, die in den Regelwerken angegeben sind ($25 \text{ N/mm}^2 \leq f_{c,cube} \leq 35 \text{ N/mm}^2$), nicht immer eingehalten werden. Dennoch wurden alle Versuchsserien mit Verbundankersystemen und einer Rissbreite von $\Delta w = 0,5$ mm weiterhin mit B10 und alle Versuchsserien mit dem Bolzenanker und der Betonschraube mit F1 bezeichnet.

Zusätzlich zu den Versuchsserien im statischen Riss wurden mit dem Bolzenanker F Versuche im bewegten Riss (F3) und den zugehörigen Referenzversuche A3 im statischen Riss mit einer Rissbreite von $\Delta w = 0,3$ mm nach [29] untersucht. Die Ergebnisse der F3 und A3 Versuche werden in Kapitel 8.1 besprochen.

6.3.1 Verbundankersystem A

Für das Produkt A liegen aus dem Zulassungsverfahren keine Versuchsergebnisse für die Versuche B10 mit der Größe M12 vor. Zur Einordnung der erzielten Ergebnisse innerhalb des Forschungsvorhabens werden aus dem Zulassungsverfahren vergleichbaren Versuchen nach [52] („3“) in Beton mit einer Würfeldruckfestigkeit zwischen 25 N/mm^2 und 35 N/mm^2 herangezogen. Die normierten Verbundspannungen wurden in Anlehnung an [56] über geprüften Ankergrößen ausgewertet. Über die angegebene Funktion der Trendlinie kann für den Ankerdurchmesser von 12 mm eine mittlere normierte Verbundspannung $\tau_{u,m,20,3_A_Zul,Trend} = 26,9 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden.

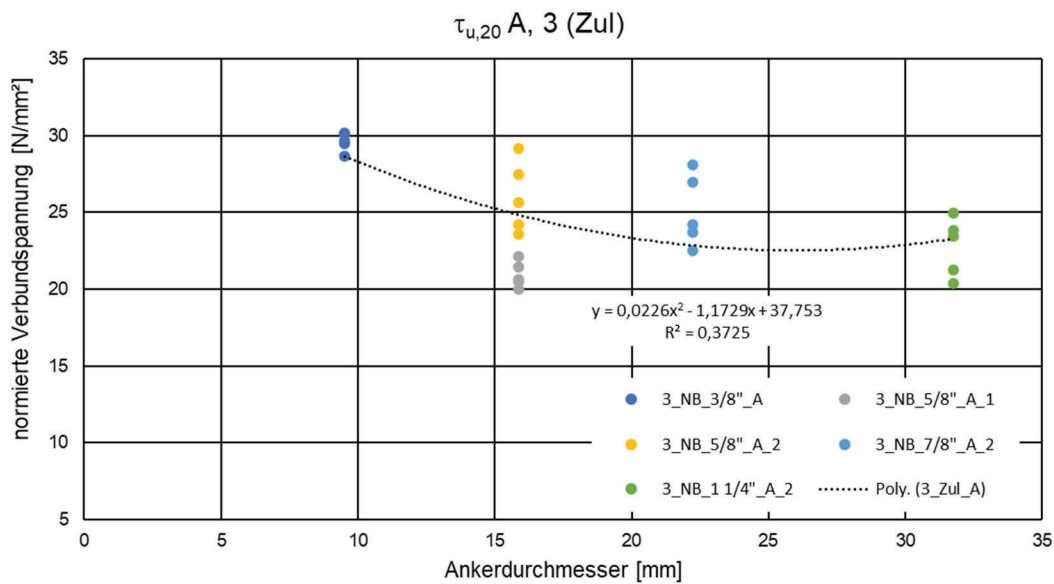


Abbildung 6-12: normierte Verbundspannungen in Abhängigkeit des Ankerdurchmesser, Verbundankersystem A, Zulassungsverfahren, gerissener Beton $\Delta w=0,5\text{mm}$, Ergebnisse aus [49]

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden drei Serien mit je fünf Versuchen in gerissenem Beton ($\Delta w = 0,5 \text{ mm}$) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-12 zusammengefasst. Im Zeitraum t1 zwischen 31 und 37 Tagen wurden die ersten beiden Serien durchgeführt. Bei Durchführung der Serie B10_NB_02.03.21_A_xy war der Beton in einem Alter von 366 Tagen (t_3). In Serie B10_NB_02.03.21_A wurde die geringste normierte Verbundspannung von 15,69 N/mm² festgestellt. Die maximale normierte Verbundspannung von 27,43 N/mm² wurde in Serie B10_NB_02.03.21_A_xy ermittelt. Die Streuungen der drei Versuchsserien bewegen sich in einem erwarteten Bereich von 6,9 % bis 13,7 %.

Tabelle 6-12: Testergebnisse Forschungsvorhaben: B10 - Verbundankersystem A, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton-druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$ [N/mm ²]	Betonalter [d]	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$ [N/mm ²]	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$ [N/mm ²]	Streuung [-]	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$ [N/mm ²]
2	B10_NB_13.07.20_A	29,9	31	18,19	19,65	6,9%	15,01
			31	19,66			
			31	18,65			
			31	21,68			
			31	20,05			
4	B10_NB_02.03.21_A	26,8	37	20,56	18,39	13,7%	9,81
			37	15,94			
			37	18,65			
			37	15,69			
			37	21,11			
4	B10_NB_02.03.21_A_xy	42,0	366	21,18	23,66	12,4%	13,67
			366	21,34			
			366	27,43			
			366	26,20			
			366	22,13			

Abbildung 6-13 macht den Zusammenhang der normierten Verbundspannung zum Betonalter des Prüfkörpers deutlich. Ebenso wie in ungerissenem Beton ist auch bei den hier dargestellten Versuchsergebnissen bei steigendem Betonalter höhere normierte Verbundspannung zu erwarten.

Für den späteren Vergleich der Versuchsergebnisse in Recyclingbeton werden die normierten Verbundspannungen in

Tabelle 6-13 in den beiden Prüfzeiträumen t1 und t3 zusammengefasst und der Referenz aus dem Zulassungsverfahren gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die mittlere normierte Verbundspannung, die aus den Versuchen innerhalb des Zulassungsverfahrens ermittelt wurde, durch die Versuche innerhalb des Forschungsvorhabens nicht bestätigt werden konnten. Mit den Ergebnissen aus dem Prüfzeitraum t3 konnten mit 23,7 N/mm² 88 % und aus dem Prüfzeitraum t1 mit 19,0 N/mm² lediglich 71 % des Wertes aus dem Zulassungsverfahren erreicht werden. Es ist allerdings anzumerken, dass mit einer oder zwei Versuchsserien je Prüfzeitraum die Anzahl der Testergebnisse gering ist.

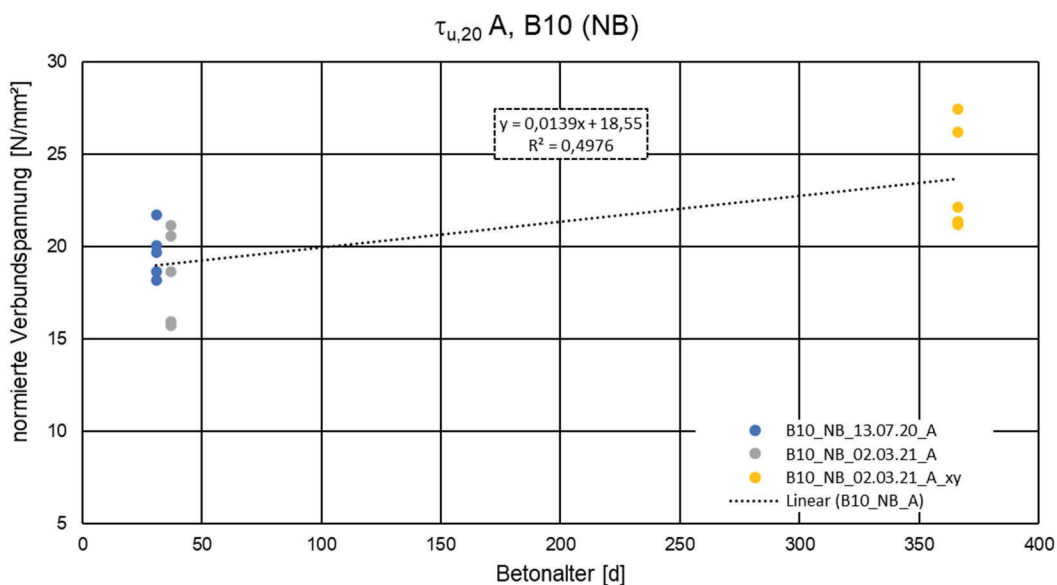


Abbildung 6-13: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, B10, Forschungsvorhaben

Tabelle 6-13: Zusammenfassung Referenzen Verbundankersystem A, NB, B10

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,3_A_Zul,Trend}$	Bemerkungen
$\tau_{u,m,20,3_A_Zul,Trend}$	26,9	100%	Trendlinie aus 5 Versuchsserien
$\tau_{u,m,20,NB_A_B10_t3}$	23,7	88%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3
$\tau_{u,m,20,NB_A_B10_t1}$	19,0	71%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t1

6.3.2 Verbundankersystem B

Ebenso wie für Produkt A liegen auch für Produkt B aus dem Zulassungsverfahren keine Testergebnisse für die Versuche B10 mit der Größe M12 vor. Das Vorgehen erfolgt analog zu dem in Kapitel 6.3.1. Die normierten Verbundspannungen aus vergleichbaren Versuchen zu B10 mit einer Rissbreite von $\Delta w = 0,5 \text{ mm}$ und der entsprechenden Betondruckfestigkeit aus dem Zulassungsverfahren [49] sind in Abbildung 6-14 über die zugehörige Ankergröße dargestellt. Mit der angegebenen Funktion der Trendlinie kann eine mittlere normierte Verbundspannung

$\tau_{u,m,20,F3_B_Zul,Trend} = 17,1 \text{ N/mm}^2$ bestimmt werden.

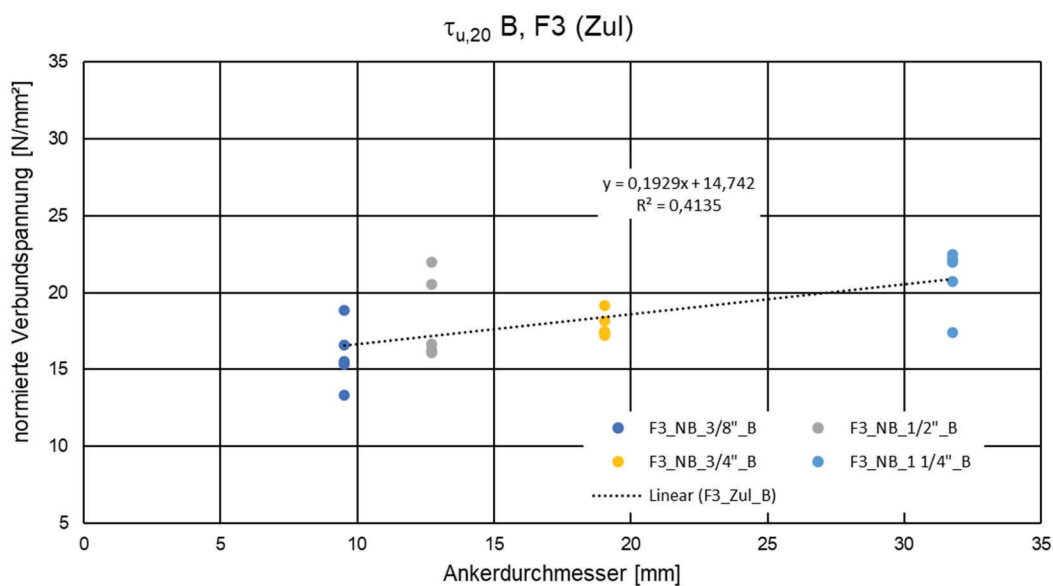


Abbildung 6-14: normierte Verbundspannungen in Abhängigkeit des Ankerdurchmesser, Verbundankersystem B, Zulassungsverfahren, gerissener Beton $\Delta w = 0,5 \text{ mm}$, Ergebnisse aus [51]

Tabelle 6-14 fasst die Versuchsergebnisse der zentrischen Auszugversuche mit enger Abstützung in gerissenem Beton ($\Delta w = 0,5 \text{ mm}$) mit dem Verbundankersystem B zusammen. Insgesamt liegen Ergebnisse aus vier Serien vor.

Die minimale normierte Verbundspannung von $8,24 \text{ N/mm}^2$ wurde in Serie B10_NB_13.07.20_B erzielt. Die maximale normierte Verbundspannung von $15,13 \text{ N/mm}^2$ stammt aus Versuchsserie B10_NB_02.03.21_B. Die Streuung der Ergebnisse liegt zwischen $8,8 \%$ und $20,8 \%$. Serie B10_NB_02.03.21_B weist die höchste Streuung auf. Dies ist durch Test 1 dieser Versuchsserie zu begründen. Innerhalb eines Zulassungsverfahrens würden an dieser Stelle zusätzliche Versuche angesetzt werden, um eine Streuung von unter 20% zu erreichen und somit auf eine Abminderung der Last zu verzichten. Dies wurde im Zuge des Forschungsvorhabens allerdings nicht weiter verfolgt.

Tabelle 6-14: Testergebnisse Forschungsvorhaben: B10 - Verbundankersystem B, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
2	B10_NB_13.07.20_B	29,9	31	8,51	8,77	5,6%	6,82
			31	8,24			
			31	8,96			
			31	9,35			
2	B10_NB_13.07.20_B_B	29,9	31	8,34	9,43	9,5%	5,87
			31	9,11			
			31	10,39			
			31	9,88			
4	B10_NB_02.03.21_B	26,8	37	15,13	11,34	20,8%	3,32
			37	8,84			
			37	11,10			
			37	10,10			
4	B10_NB_02.03.21_B_xy_ch	42,0	366	11,26	12,81	9,2%	8,79
			366	13,20			
			366	11,93			
			366	13,47			
			366	14,17			

Abbildung 6-15 illustriert die oben erläuterten Versuchsergebnisse. Die normierten Verbundspannungen der vier Versuchsserien werden über dem Betonalter aufgetragen. Wie bereits für ungerissenen Beton festgehalten wurde, ist auch bei gerissenem Beton mit höherem Betonalter eine höhere normierte Verbundspannung zu verzeichnen. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass für den Prüfzeitraum t3 lediglich eine Versuchsserie zur Verfügung stand. Für den späteren Vergleich mit den Versuchsergebnissen aus den Versuchen in Recyclingbeton werden die besprochenen normierten Verbundspannungen für die Prüfzeiträume t1 und t3 in Abbildung 6-15 zusammengefasst.

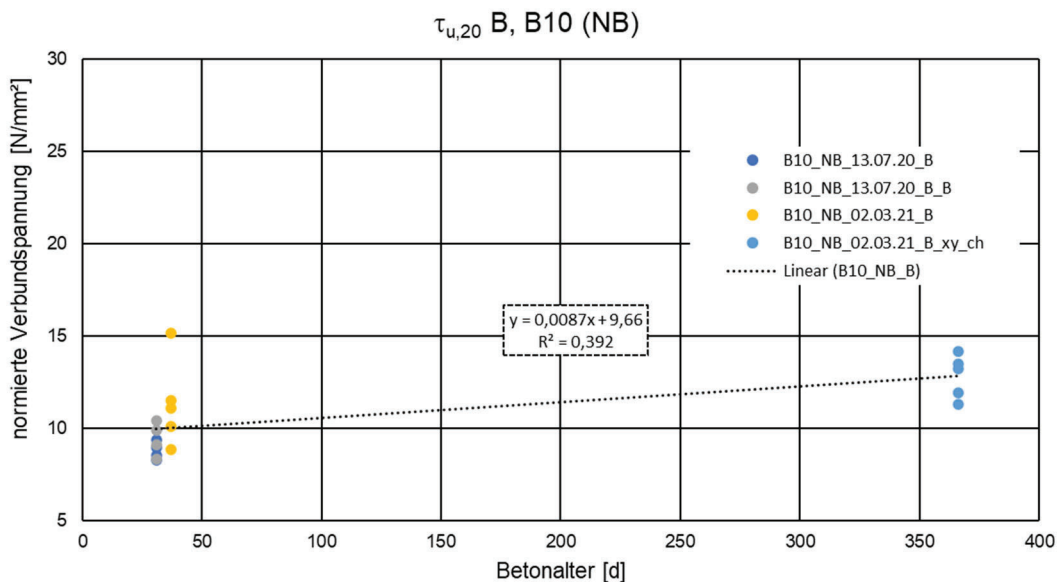
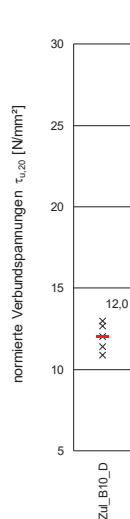


Abbildung 6-15: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, B10, Forschungsvorhaben

Tabelle 6-15: Zusammenfassung Referenzen Verbundankersystem B, NB, B10

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältnswert zu $\tau_{u,m,20,F3_B_Zul,Trend}$	Bemerkungen
$\tau_{u,m,20,F3_B_Zul,Trend}$	17,1	100%	Trendlinie aus 4 Versuchsserien
$\tau_{u,m,20,NB_B_B10_t3}$	12,8	75%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3
$\tau_{u,m,20,NB_B_B10_t1}$	10,0	58%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t1

6.3.3 Verbundankersystem D



Innerhalb des Zulassungsverfahrens des Produkts D [53] wurde eine Serie B10 mit fünf Einzelversuchen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-16 dargestellt. Eine mittlere normierte Verbundspannung von 12,0 N/mm² sowie eine minimale normierte Verbundspannung von 10,9 N/mm² und eine maximale normierte Verbundspannung von 13,0 N/mm² wurden beobachtet. Die Streuung der Ergebnisse lag bei 7,3 %. Für die Betrachtung innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurde der Exponent in Gl. (28) zu $m = 0,13$ gewählt. Dieser Wert kann abweichen zu den innerhalb des Zulassungsverfahrens gewählten Exponenten, da dort ggf. ein gemittelter Wert für alle Dübelgrößen gewählt wurde. Da innerhalb des Forschungsvorhabens lediglich die Größe M12 getestet wurde, wurde der Exponent gewählt, der innerhalb des Zulassungsverfahrens für die Größe M12 bestimmt wurde.

MW $\tau_{u,20}$ [N/mm ²]	12,0
Min $\tau_{u,20}$ [N/mm ²]	10,9
Max $\tau_{u,20}$ [N/mm ²]	13,0
Stand. [N/mm ²]	0,9
Streuung	7,3%

Abbildung 6-16: Übersicht normierte Verbundspannungen mit Verbundankersystem D in NB, Zulassungsverfahren, B10

Tabelle 6-16: Testergebnisse Forschungsvorhaben: B10 - Verbundankersystem D, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
2	B10_NB_13.07.20_D	29,8	30	11,30	11,37	0,8%	11,07
			30	11,30			
			30	11,43			
			30	11,50			
			30	11,33			
4	B10_NB_02.03.21_D	26,8	37	9,99	9,92	7,4%	7,43
			37	11,11			
			37	9,59			
			37	9,15			
			37	9,78			
4	B10_NB_02.03.21_D_xy_ch	42,0	366	12,99	13,35	4,7%	11,23
			366	12,79			
			366	12,91			
			366	14,00			
			366	14,06			

Tabelle 6-16 zeigt die Ergebnisse der zentrischen Auszugversuche mit enger Abstützung bei einer Rissweite von $\Delta w = 0,5$ mm. Es wurden drei Versuchsserien mit je fünf Versuche durchgeführt. Die minimale normierte Verbundspannung von 9,15 N/mm² wurde in Serie B10_NB_02.03.21_D erzielt. Die maximale normierte Verbundspannung von 14,97 N/mm² konnte in Serie B10_NB_02.03.21_D_xy_ch beobachtet werden. Analog zu der Vorgehensweise bei der Betrachtung der Ergebnisse in ungerissenem Beton wurden auch die normierten Verbundspannungen, die in gerissenem Beton ermittelt wurden, über das Betonalter der Prüfkörper aufgetragen (Abbildung 6-17). Es ist die Tendenz erkennbar, dass mit steigendem Betonalter auch die normierte Verbundspannung steigt. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Datenmenge deutlich geringer ist als für die Untersuchung

in ungerissem Beton. Weiterhin werden die normierten Verbundspannungen für die beiden Prüfzeiträume zusammengefasst und in Tabelle 6-17 dargestellt. Verglichen mit den Versuchen aus den Zulassungsversuchen wurden im ersten Prüfzeitraum t1 89 % und im Prüfzeitraum t3 111 % der mittleren normierten Verbundspannung erreicht.

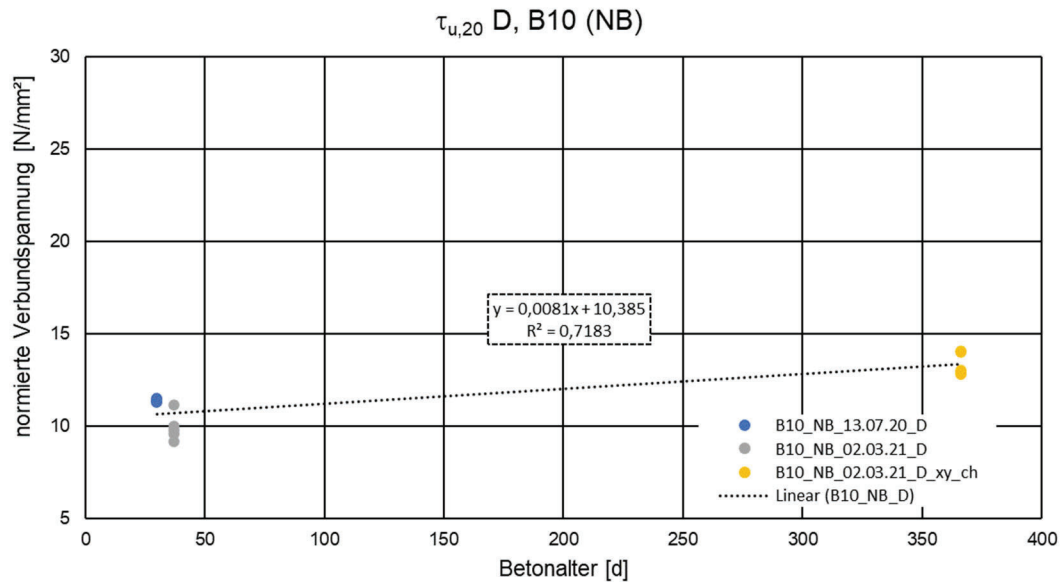
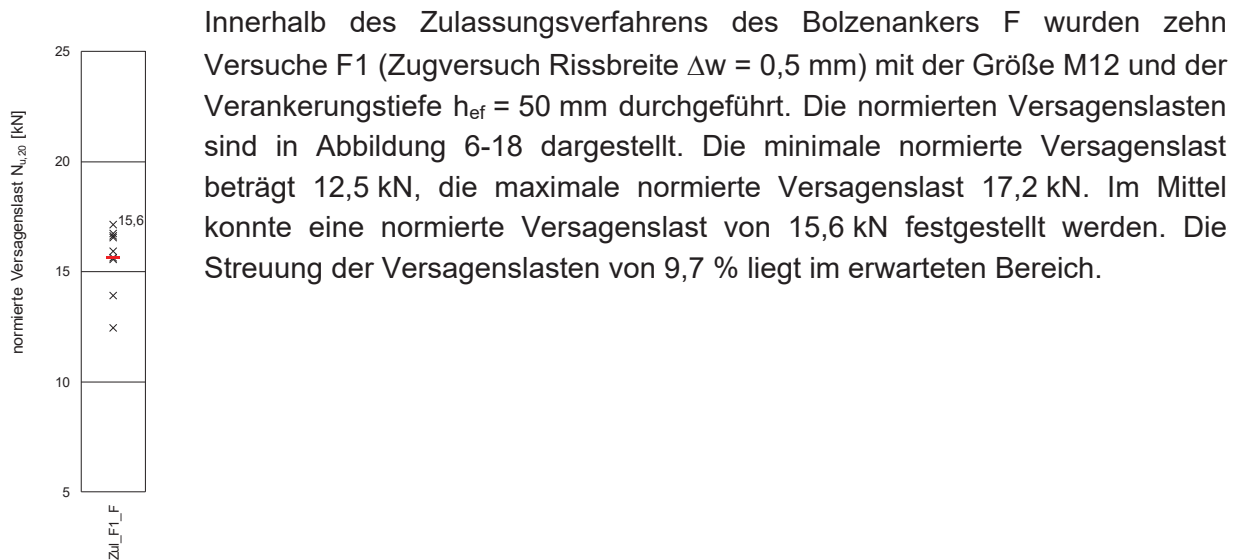


Abbildung 6-17: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, B10, Forschungsvorhaben

Tabelle 6-17: Zusammenfassung Referenzen Verbundankersystem D, NB, B10

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,D_Zul,ChRef}$	Bemerkungen
$\tau_{u,m,20,B10_D_Zul}$	12,0	100%	MW aus 8 ChRef Serien
$\tau_{u,m,20,NB_D_B10_t3}$	13,3	111%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3
$\tau_{u,m,20,NB_D_B10_t1}$	10,6	89%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t1

6.3.4 Bolzenanker F



MW $N_{u,20}$ [kN]	15,6
Min $N_{u,20}$ [kN]	12,5
Max $N_{u,20}$ [kN]	17,2
Stand. [N/mm^2]	1,5
Streuung	9,7%

Abbildung 6-18: Übersicht normierte Versagenslasten mit Bolzenanker F in NB, Zulassungsverfahren, F1

Die Testergebnisse der Auszugversuche in gerissenem Normalbeton mit $\Delta w = 0,5$ mm mit dem Bolzenanker F aus dem Forschungsvorhaben sind in Tabelle 6-18 zusammengefasst und in Abbildung 6-19 graphisch dargestellt. Es wurden insgesamt drei Serien mit je fünf Versuchen durchgeführt. Der minimale und maximale Wert der normierten Versagenslast betragen 11,46 kN und 15,66 kN. Die Streuungen der normierten Versagenslasten innerhalb der Versuchsserien liegen zwischen 8,2 % und 10,9 % und somit im erwarteten Bereich.

Tabelle 6-18: Testergebnisse Forschungsvorhaben: F1 – Bolzenanker F, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton-druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$ [N/mm^2]	Betonalter [d]	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	Streuung [-]	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$ [kN]
2	F1_NB_13.07.20_F	29,8	30	14,71	13,90	8,2%	10,01
			30	12,77			
			30	15,48			
			30	13,39			
			30	13,15			
4	F1_NB_02.03.21_F	26,6	35	11,57	12,21	9,2%	8,40
			35	11,66			
			35	12,23			
			35	11,46			
4	F1_NB_02.03.21_F_xy	42,0	365	14,07	13,89	10,9%	8,75
			365	14,25			
			365	13,99			
			365	15,66			
			365	11,48			

Werden die normierten Versagenslasten für die beiden Prüfzeiträume t1 mit 30 bis 35 Tagen und t3 mit 365 Tagen getrennt betrachtet, ist kein deutlicher Trend zu erkennen. Entgegen der Erkenntnisse aus Kapitel 6.2.5 ist für die in Abbildung 6-19 dargestellten Ergebnisse kein deutlicher Trend zu

erkennen, dass mit steigendem Betonalter die normierte Versagenslast steigt. Für den Prüfzeitraum t1 lässt sich aus den Ergebnissen der beiden Serien eine normierte Versagenslast $N_{u,m,20,NB_F_F1_t1/3} = 13,1$ kN bestimmen. Im Prüfzeitraum t3 wurde lediglich eine Versuchsserie durchgeführt. Verglichen zu der mittleren normierten Versagenslast aus dem Zulassungsverfahren wurden in den dargestellten Versuchen innerhalb des Forschungsvorhabens 89 % bzw. 84 % erreicht (siehe Tabelle 6-19).

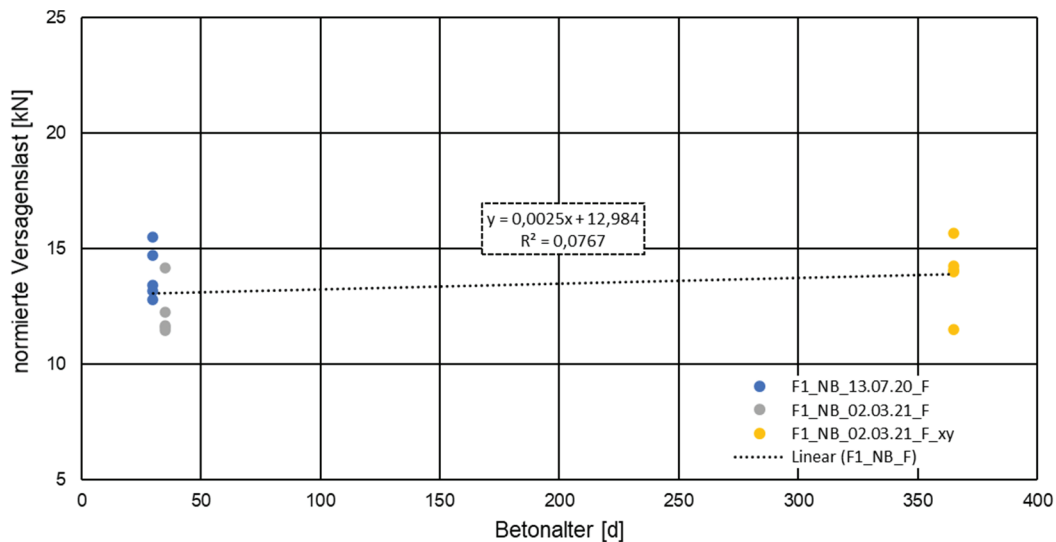


Abbildung 6-19: normierte Versagenslasten über Betonalter, Bolzenanker F, F1, Forschungsvorhaben

Tabelle 6-19: Zusammenfassung Referenzen Bolzenanker F, NB, F1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältnisswert zu $N_{u,m,20,F_Zul_F1}$	Bemerkungen
$N_{u,m,20,F_Zul_F1}$	15,6	100%	MW aus 10 Versuchen
$N_{u,m,20,NB_F_F1_t3}$	13,9	89%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3 (1 Serie)
$N_{u,m,20,NB_F_F1_t1}$	13,1	84%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t1 (2 Serien)

6.3.5 Betonschraube H

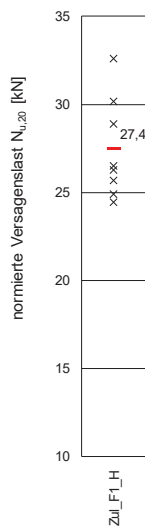


Abbildung 6-20 stellt die normierten Versagenslasten aus zentrischen Auszugversuchen mit weiter Abstützung und Rissbreite von $\Delta w = 0,5$ mm in Normalbeton (F1) mit der der Betonschraube H aus dem Zulassungsverfahren [55] dar. Die normierten Versagenslasten lagen im Bereich zwischen 24,4 kN und 32,6 kN. Der Mittelwert der normierten Versagenslasten aus den acht Versuchen beträgt 27,4 kN. Die Streuung von 10,4 % liegt im erwarteten Bereich.

MW $N_{u,20}$ [kN]	27,4
Min $N_{u,20}$ [kN]	24,4
Max $N_{u,20}$ [kN]	32,6
Stand. [N/mm ²]	2,8
Streuung	10,4%

Abbildung 6-20: Übersicht normierte Versagenslasten mit Bolzenanker H in NB, Zulassungsverfahren, F1

In Versuchsreihe 4 wurden innerhalb des Forschungsvorhabens zwei Versuchsserien F1 mit der Betonschraube H durchgeführt. Es wurden normierte Versagenslasten zwischen 19,16 kN und 30,47 kN ermittelt. Die beiden Versuchsserien wurden in der Betoncharge NB_02.03.21 in einem Betonalter von 36 und 365 Tagen durchgeführt. Die Streuung der Versagenslasten in Versuchsserie F1_NB_02.03.21_H_xy beträgt 18,6 %. Analog zu der bisherigen Vorgehensweise werden auch für die in Tabelle 6-20 dargestellten Versuche die normierten Versagenslasten über das Betonalter aufgetragen. Die Darstellung der beiden Versuchsserien in Abbildung 6-21 zeigt keinen deutlichen Anstieg der normierten Versagenslasten mit steigendem Betonalter. Allerdings ist die Datenmenge sehr gering und die Streuung in der Versuchsserie in älterem Beton mit über 18 % deutlich höher als die der ersten Versuchsserie, was eine allgemeine Aussage nicht zulässt.

Tabelle 6-20: Testergebnisse Forschungsvorhaben: F1 – Betonschraube H, NB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton-druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$ [N/mm ²]	Betonalter [d]	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	Streuung	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$ [kN]
4	F1_NB_02.03.21_H	26,7	36	25,71	25,33	8,6%	17,96
			36	28,02			
			36	22,32			
			36	26,37			
			36	24,20			
4	F1_NB_02.03.21_H_xy	42,0	365	30,42	25,98	18,6%	9,53
			365	23,34			
			365	30,47			
			365	26,50			
			365	19,16			

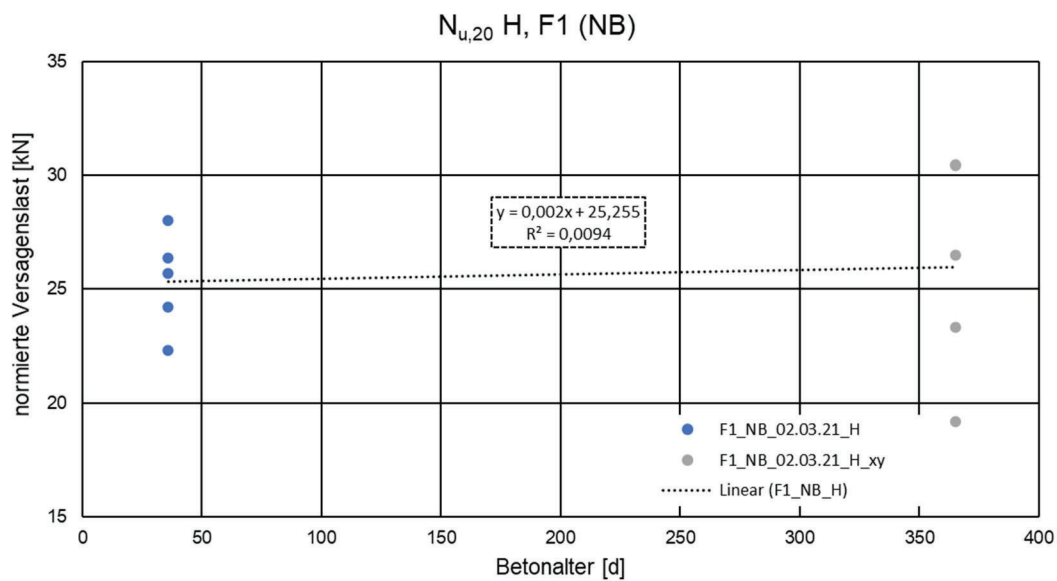


Abbildung 6-21: normierte Versagenslasten über Betonalter, Betonschraube H, F1, Forschungsvorhaben

Tabelle 6-21 zeigt den Vergleich der mittleren normierten Versagenslasten der Versuchsserien, die innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden zu dem erläuterten Referenzwert aus dem Zulassungsverfahren. In den Auszugversuchen innerhalb des Forschungsvorhabens konnten im Mittel 95 % bzw. 92 % der normierten Versagenslasten aus den Versuchen des Zulassungsverfahrens erreicht werden.

Tabelle 6-21: Zusammenfassung Referenzen Bolzenanker H, NB, F1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,H,Zul,F1}$	Bemerkungen
$N_{u,m,20,H,Zul,F1}$	27,4	100%	MW aus 8 Versuchen
$N_{u,m,20,NB,H,F1,t3}$	26,0	95%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t3 (1 Serie)
$N_{u,m,20,NB,H,F1,t1}$	25,3	92%	Ergebnisse aus Beton im Zeitraum t1 (1 Serien)

6.4 Diskussion der Tragfähigkeit in ungerissenem Recyclingbeton

Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt, die in zentrischen Auszugversuchen mit enger Abstützung in Recyclingbetonen mit unterschiedlichen Anteilen an rezyklierten Gesteinskörnungen (siehe Kapitel 4.1) ermittelt wurden. Für die Normierung der Verbundspannungen auf eine Vergleichsdruckfestigkeit des Betons wurde der Exponent angesetzt, der im Zulassungsverfahren des jeweiligen Produkts ermittelt wurde.

Der in Kapitel 6.2 dargestellte Trend einer steigenden normierten Verbundspannung mit steigendem Alter der Prüfkörper konnte auch für die Ergebnisse der Versuche in Recyclingbeton erkannt werden. Daher werden auch in diesem Kapitel die normierten Verbundspannungen ebenfalls über dem Betonalter aufgetragen dargestellt.

Zunächst erfolgt die Darstellung der Testergebnisse aus den Versuchsreihen 1, 2 und 3 getrennt nach den Betonzusammensetzungen RB1.1, RB2.1 und RB2.2 für jedes Befestigungselement. Zudem werden die Ergebnisse verglichen mit den Ergebnissen aus den Auszugversuchen in Normalbeton. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der Versuche aus Versuchsreihe 4 untersucht und eingeordnet. Es wird untersucht, ob sich die gewonnenen Erkenntnisse in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen, die extern hergestellt wurden und somit die Gesteinskörnung eine abweichende Herkunft besitzt, auch bestätigen lassen. In Versuchsreihe 4 wurden zusätzlich Auszugversuche in Beton mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen (RB2.3) durchgeführt.

6.4.1 Verbundankersystem A

6.4.1.1 RB1.1

Mit dem Verbundankersystem A wurden acht Serien R1-Versuche in Beton R1.1 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-22. Die geringste normierte Verbundspannung ($24,35 \text{ N/mm}^2$) wurde in Serie R1_RB1.1_15.07.20_A ermittelt, die höchste normierte Verbundspannung ($35,56 \text{ N/mm}^2$) in Serie R1_R1_RB1.1_15.07.20_A_xy. In Serie R1_RB1.1_24.06.20_A_x wurden zwei Versuche nicht gewertet, da unerwartet Stahlversagen auftrat. Die Streuung der normierten Verbundspannungen innerhalb der Versuchsserien liegt mit 3,1 % bis 7,4 % im erwarteten Bereich.

Die normierten Verbundspannungen sind in Abbildung 6-22 graphisch dargestellt. Mit steigendem Alter der Prüfkörper wurden tendenziell höhere normierte Verbundspannungen ermittelt. Für einen Prüfzeitraum t_1 , in dem die Betonprüfkörper ein Alter von 29 bis 34 Tagen hatten, kann über vier Versuchsserien im Mittel eine normierte Verbundspannung von $28,3 \text{ N/mm}^2$ festgestellt werden. Im Prüfzeitraum t_3 (Betonalter: 365 – 412 Tage) wurden drei Versuchsserien durchgeführt und eine mittlere normierte Verbundspannung $33,7 \text{ N/mm}^2$ ermittelt.

Tabelle 6-22: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem A, RB1.1

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
1	R1_RB1.1_24.06.20_A	35,5	29	26,29	27,53	7,4%	20,60
			29	25,16			
			29	28,12			
			29	30,55			
			29	27,52			
2	R1_RB1.1_15.07.20_A	23,5	30	25,76	26,79	6,7%	20,67
			30	24,35			
			30	26,82			
			30	28,39			
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_A	18,7	34	29,07	29,01	7,4%	21,71
			34	27,28			
			34	29,39			
			34	26,98			
3	R1_RB1.1_14.10.20/B_A	20,8	34	32,36	29,90	3,7%	26,17
			34	30,74			
			34	28,66			
			34	29,95			
1	R1_RB1.1_24.06.20_A_x	42,2	198	31,21	31,26	3,1%	26,17
			198	30,21			
			198	32,09			
			198	31,47			
3/7	R1_RB1.1_14.10.20/A_A_xy	24,7	365	34,27	33,30	6,0%	26,48
			365	32,70			
			365	33,91			
			365	30,17			
			365	35,46			
2	R1_RB1.1_15.07.20_A_xy	26,1	392	34,88	34,00	4,7%	28,55
			392	35,56			
			392	34,96			
			392	32,66			
1	R1_RB1.1_24.06.20_A_xy	42,6	412	31,92	33,94	3,2%	30,21
			412	35,14			
			412	33,20			
			412	35,09			
			412	33,42			
			412	32,83			

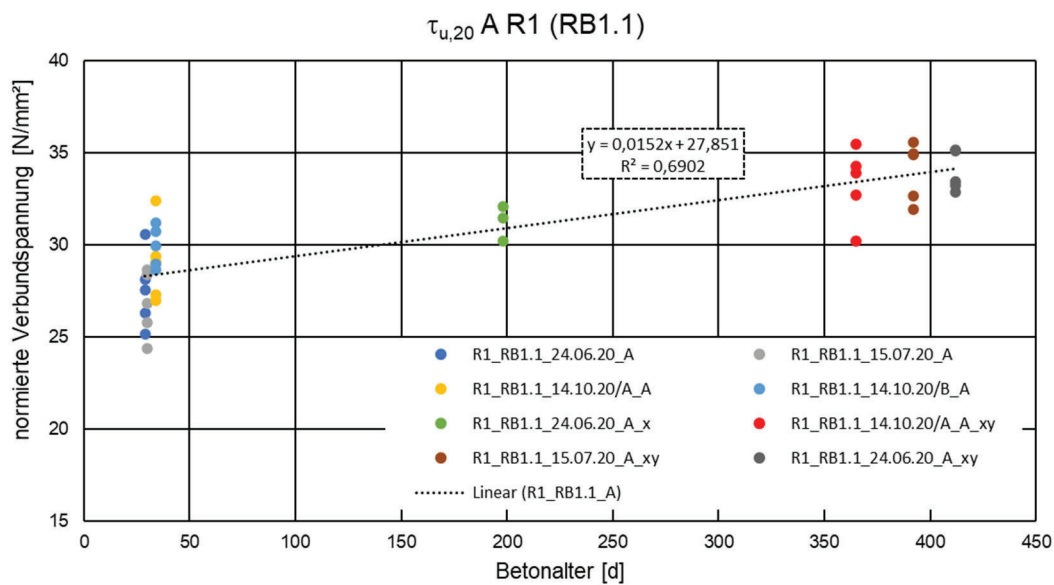


Abbildung 6-22: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, R1, Forschungsvorhaben, RB1.1

6.4.1.2 RB2.1

In Versuchskörpern mit RB2.1 aus eigener Herstellung an der TUK wurden in den Versuchsreihen 1 und 2 fünf Versuchsserien R1 mit dem Verbundankersystem durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-23 zusammengefasst. Innerhalb der Serie R1_RB2.1_17.07.20_A wurde die geringste normierte Verbundspannung mit 24,74 N/mm², innerhalb der Serie R1_RB2.1_26.06.20_A_xy die höchste normierte Verbundspannung mit 35,26 N/mm² ermittelt. Die Streuung der normierten Verbundspannungen innerhalb der 5 Versuchsserien bewegt sich in einem Rahmen zwischen 3,0 % und 8,2 % und liegt im erwarteten Bereich.

In den beiden Betonchargen wurden jeweils in einem frühen Zeitraum t1 (32 Tage) und einem späteren Zeitraum t3 (390 bis 410 Tage) Versuche durchgeführt. Für die Betoncharge RB2.1_26.06.20 wurde eine Serie im mittleren Zeitraum t2 geprüft, als die Prüfkörper ein Alter von 196 Tagen besaßen. Abbildung 6-23 stellt die Ergebnisse graphisch dar. Die normierten Verbundspannungen aus den fünf Versuchsserien werden über dem Betonalter der Prüfkörper aufgetragen. Mit steigendem Betonalter ist ein klarer Trend einer steigenden normierten Verbundspannung zu erkennen.

Tabelle 6-23: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem A, RB2.1

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
1	R1_RB2.1_26.06.20_A	37,4	32	28,81	29,25	3,0%	26,24
			32	30,43			
			32	28,25			
			32	28,87			
			32	29,91			
2	R1_RB2.1_17.07.20_A	23,9	32	30,36	28,29	8,2%	20,41
			32	29,47			
			32	29,72			
			32	27,18			
			32	24,74			
1	R1_RB2.1_26.06.20_A_x	40,7	196	33,10	32,73	3,4%	28,95
			196	33,95			
			196	31,34			
			196	33,43			
			196	31,80			
2	R1_RB2.1_17.07.20_A_xy	28,1	390	34,79	33,54	7,2%	25,31
			390	35,06			
			390	35,26			
			390	33,09			
			390	29,49			
1	R1_RB2.1_26.06.20_A_xy	41,3	410	35,26	34,16	3,5%	30,43
			410	32,64			
			410	34,47			
			410	35,06			
			410	34,89			
4	R1_RB2.1*_05.03.21_A	27,2	39	24,15	23,07	3,6%	20,23
			39	23,26			
			39	22,86			
			39	23,24			
			39	21,84			
4	R1_RB2.1*_05.03.21_A_xy	36,0	371	31,84	30,90	4,1%	26,58
			371	32,34			
			371	29,61			
			371	29,57			
			371	31,13			

In extern hergestellten Versuchskörpern der Betoncharge RB2.1*_05.03.21 wurden in Versuchsreihe 4 jeweils eine Versuchsserie im Prüfzeitraum t1 und t3 durchgeführt. In Abbildung 6-23 wurden diese zwar dargestellt, allerdings nicht in die Datenreihe zur Erstellung der Trendlinie

hinzugefügt. Es ist deutlich erkennbar, dass in dieser Betoncharge insbesondere im frühen Prüfzeitraum geringere normierte Verbundspannungen ermittelt wurden als in den anderen Versuchsserien. Die weitere Einordnung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.4.1.5.

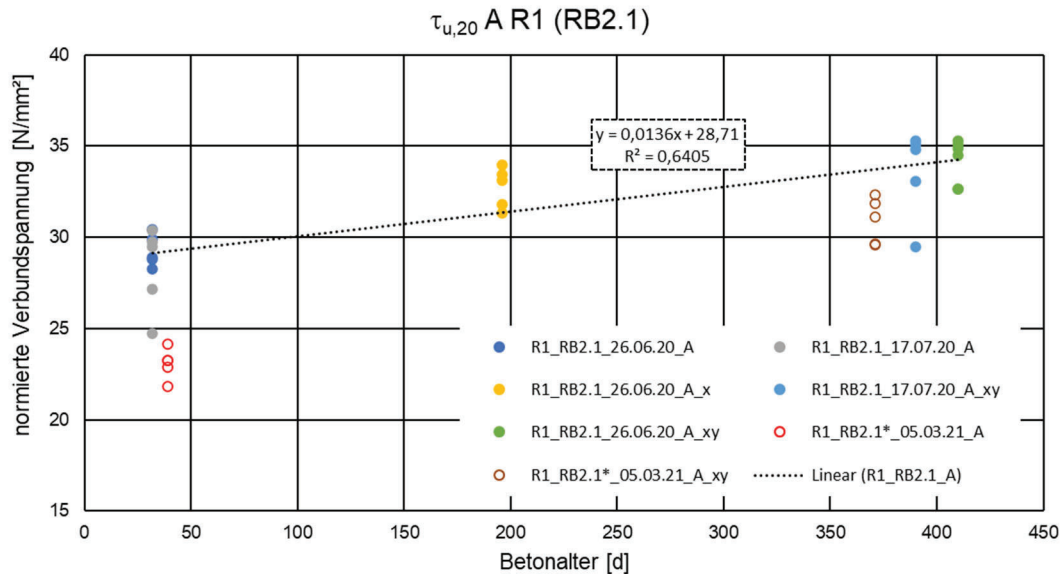


Abbildung 6-23: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, R1, Forschungsvorhaben, RB2.1

6.4.1.3 RB2.2

Tabelle 6-24 zeigt die Ergebnisse der R1 Versuche mit dem Verbundankersystem A in Beton RB2.2, somit in Beton mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen größer 2 mm. Für die Versuche wurden innerhalb der Versuchsreihe 3 zwei Betonchargen hergestellt. Es liegen Ergebnisse aus drei Versuchsserien vor. Im frühen Prüfzeitraum t_1 wurden zwei Versuchsserien durchgeführt, jeweils 29 Tage nach Betonage der Versuchskörper. In einem Versuchskörper der Charge RB2.2_22.10.20/A wurde 369 Tage (t_3) nach Betonage erneut eine Versuchsserie durchgeführt. In der Versuchsserie R1_RB2.2_22.10.20/A wurde die geringste normierte Verbundspannung von 24,72 N/mm², in Versuchsserie R1_RB2.2_22.10.20/A_xy die höchste normierte Verbundspannung von 32,15 N/mm² ermittelt. Die Streuung der normierten Verbundspannungen innerhalb der einzelnen Versuchsserien bewegte sich zwischen 2,6 % und 5,9 %.

Bei Betrachtung der Abbildung 6-24 lässt sich für das Verbundankersystem A in Recyclingbeton RB2.2 der Trend der steigenden normierten Verbundspannung mit steigendem Betonalter bestätigen. Dieser sollte aufgrund der geringen Datenbasis allerdings durch weitere Versuchsergebnisse bestätigt werden.

Tabelle 6-24: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem A, RB2.2

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_A	21,5	29	27,18	26,21	5,9%	20,93
			29	25,47			
			29	24,72			
			29	28,45			
			29	25,26			
3	R1_RB2.2_22.10.20/B_A	21,4	29	27,24	27,09	2,6%	24,69
			29	26,80			
			29	28,05			
			29	27,23			
			29	26,12			
3/7	R1_RB2.2_22.10.20/A_A_xy	26,4	369	30,90	30,89	4,4%	26,27
			369	31,76			
			369	31,02			
			369	32,15			
			369	28,64			

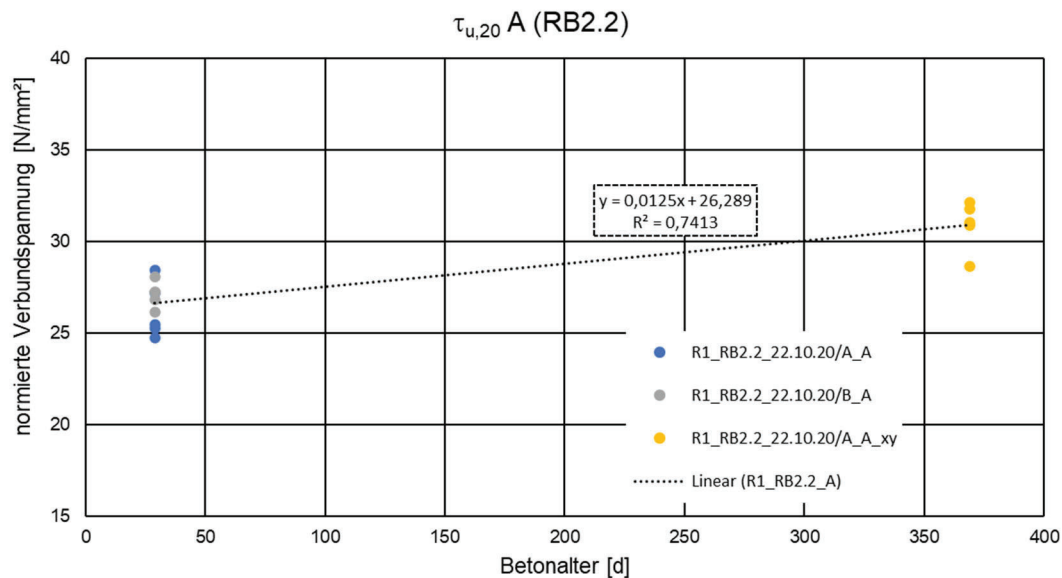


Abbildung 6-24: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, R1, Forschungsvorhaben, RB2.2

6.4.1.4 RB2.3

Die Ergebnisse, die mit dem Verbundankersystem A in extern hergestellten Versuchskörpern RB2.3 mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen in R1 Versuche durchgeführt wurden, sind in Tabelle 6-25 und Abbildung 6-25 dargestellt. Es wurden zwei Versuchsserien durchgeführt. Um die Ergebnisse mit den oben dargestellten Ergebnissen vergleichen zu können, wurde eine Serie 36 Tage (t_1) und eine Serie 372 Tage (t_3) nach Betonage der Versuchskörper durchgeführt. Die graphische Darstellung zeigt den deutlichen Trend einer steigenden normierten Verbundspannung bei steigendem Alter des Prüfkörpers. Die geringste normierte Verbundspannung wurde in der Versuchsserie R1_RB2.3_10.03.21_A mit 17,74 N/mm² erreicht. Die maximale normierte Verbundspannung wurde in Serie R1_RB2.3_10.03.21_A_xy mit 26,31 N/mm² erreicht. Die Streuung der jeweils fünf Testergebnisse innerhalb einer Serie lag bei 2,4 % und 8,0 %.

Tabelle 6-25: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem A, RB2.3

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
4	R1_RB2.3_10.03.21_A	28,0	36	17,74	19,35	8,0%	14,11
			36	19,46			
			36	17,83			
			36	20,99			
			36	20,72			
4	R1_RB2.3_10.03.21_A_xy	35,5	372	26,31	25,54	2,4%	23,50
			372	25,54			
			372	25,36			
			372	24,68			
			372	25,83			

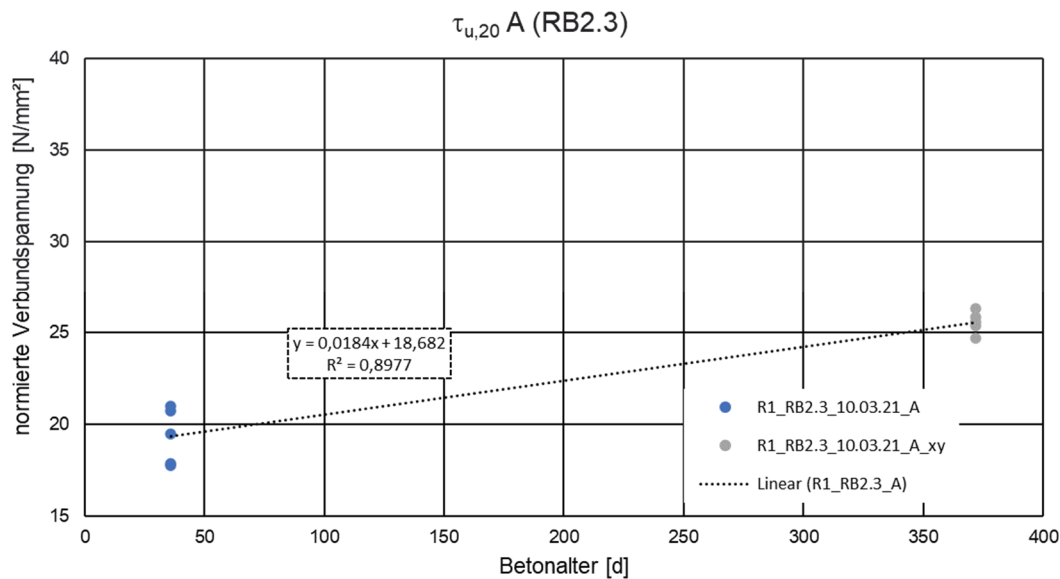


Abbildung 6-25: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, R1, Forschungsvorhaben, RB2.3

6.4.1.5 Einfluss Recyclingbeton – Verbundankersystem A

Abbildung 6-26 stellt die normierten Verbundspannungen aus den zuvor diskutierten Versuchen graphisch dar. Abweichend zu den Darstellungen zuvor werden alle Versuchsserien zusammengefasst, die in einer Betonmischung durchgeführt wurden. Um den Vergleich zu den Versuchen in Normalbeton zu verdeutlichen, werden die Ergebnisse aus Kapitel 6.2.1 ebenfalls eingefügt. Die Ergebnisse aus den Versuchen in Normalbeton im Prüfzeitraum t_4 werden vernachlässigt, da in Recyclingbeton lediglich bis zum Prüfzeitraum t_3 getestet werden konnte. Die Versuche in Recyclingbeton RB2.1* aus externer Herstellung wird getrennt von den Versuchen in RB2.1 aus eigener Herstellung betrachtet.

Es wird deutlich, dass sich die normierten Verbundspannungen, die in den Betonen RB1.1 und RB2.1 nicht signifikant von denen in Normalbeton ermittelten Verbundspannungen unterscheiden. Die normierten Verbundspannungen, die in Versuchen in Versuchskörpern mit der Zusammensetzung RB2.2 erzielt wurden, setzen sich leicht ab von den Referenzen in Normalbeton. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Datenmenge geringer ist. Dies gilt ebenfalls für die Ergebnisse aus den Versuchen an Probekörpern aus Beton RB2.3. In diesen Versuchskörpern wurden lediglich zwei

Versuchsserien durchgeführt. Es ist allerdings eine deutlich geringere normierte Verbundspannung festzustellen.

Auffällig ist, dass der Trend, der bereits in den Kapiteln zuvor erläutert wurde, für alle Betonchargen deutlich zu erkennen ist. Mit steigendem Alter der Prüfkörper ist eine deutliche Erhöhung der normierten Verbundspannungen zu erwarten.

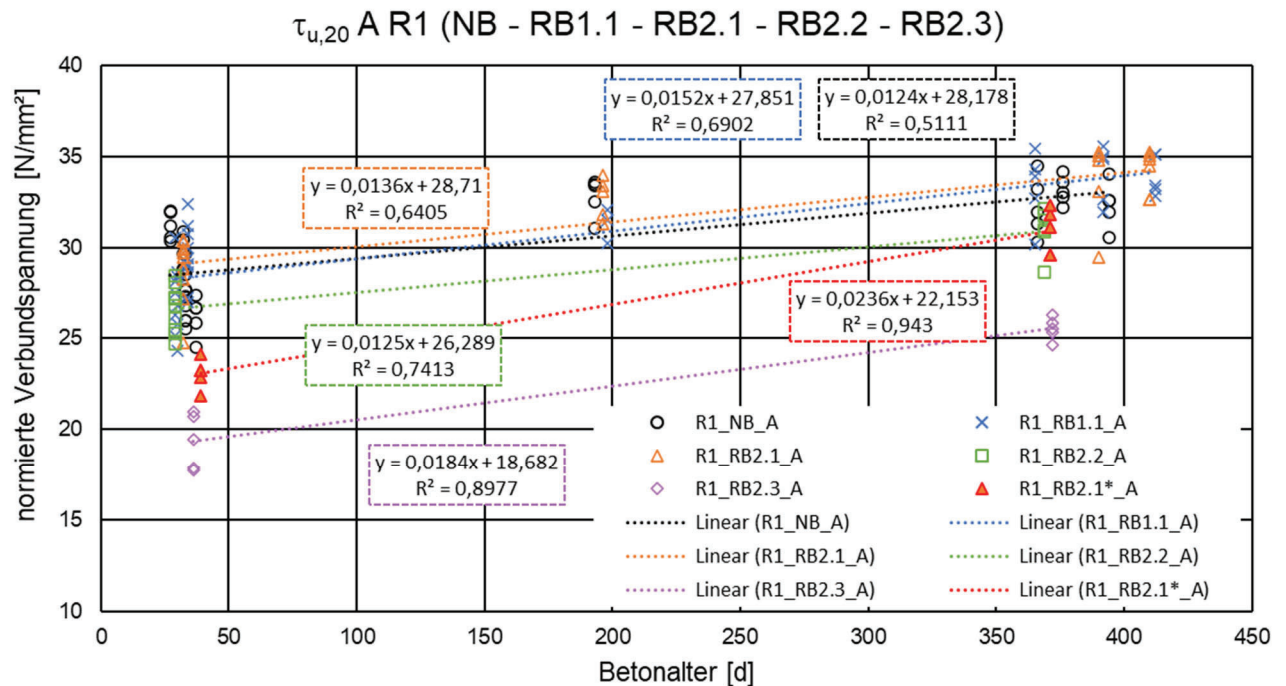


Abbildung 6-26: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, R1, Vergleich NB – RB

Die zuvor erläuterten Ergebnisse werden in Tabelle 6-26 zusammengefasst. Für die diskutierten normierten Verbundspannungen aus den zentrischen Auszugversuchen in Betonen mit unterschiedlicher Zusammensetzung der Gesteinskörnung werden jeweils Mittelwerte für die Prüfzeiträume t1 und t3 gebildet. Diese werden den in Kapitel 6.2.1 besprochenen Referenzen aus den Versuchen in Normalbeton gegenübergestellt. Für den Prüfzeitraum t3 wird der Wert $\tau_{u,m,20,NB_R1_A_t3} = 32,6$ N/mm², für t1 der Wert $\tau_{u,m,20,NB_R1_A_t1} = 28,3$ N/mm² aus Tabelle 6-3 übernommen.

Tabelle 6-26: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Verbundspannungen, System A, R1

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,NB_R1_A_t3}$	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,NB_R1_A_t1}$
$\tau_{u,m,20,NB_R1_A_t3}$	32,6	100%	115%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_R1_A_t3}$	33,7	104%	119%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_R1_A_t3}$	33,9	104%	120%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_R1_A_t3}$	30,9	95%	109%
$\tau_{u,m,20,RB2.2_R1_A_t3}$	30,9	95%	109%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_R1_A_t3}$	25,5	78%	90%
$\tau_{u,m,20,NB_R1_A_t1}$	28,3	87%	100%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_R1_A_t1}$	28,3	87%	100%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_R1_A_t1}$	28,8	88%	102%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_R1_A_t1}$	23,1	71%	81%
$\tau_{u,m,20,RB2.2_R1_A_t1}$	26,7	82%	94%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_R1_A_t1}$	19,3	59%	68%

Die Vergleiche der normierten mittleren Verbundspannungen bestätigen die Erkenntnisse aus der graphischen Betrachtung. Die normierten Verbundspannungen aus den Versuchen in den Betonen RB1.1 und RB2.1 erreichten im Prüfzeitraum t3 im Mittel 104 % der Referenzlasten ermittelt in Normalbeton. In der extern hergestellten Betoncharge RB2.1* konnten ebenso wie in den Prüfkörpern mit der Zusammensetzung RB2.2 mit 30,9 N/mm² im Mittel 95 % des Referenzwertes erreicht werden. Deutlich geringer zeigten sich die Ergebnisse in RB2.3. Mit einer normierten mittleren Verbundspannung von 25,5 N/mm² wurden lediglich 78 % des Referenzwertes erreicht.

Wird der Prüfzeitraum t1 betrachtet, also die Verbundspannungen, die in Prüfkörpern aus Recyclingbeton in einem Alter zwischen 27 - 39 Tagen ermittelt wurden, so zeigt sich ein vergleichbares Bild wie für die Betrachtung im Prüfzeitraum t3. In den Betonen RB1.1 und RB2.1 konnten die mittleren normierten Verbundspannungen aus den Versuchen in Normalbeton mit 100 % und 102 % im Mittel bestätigt werden. Die mittlere normierte Verbundspannung aus den Versuchen in Recyclingbeton RB2.2 erreichte im Mittel 94 % des Referenzwertes.

Die Abweichung der normierten mittleren Verbundspannung, die aus den Auszugversuchen in Prüfkörpern mit RB2.3 resultiert, scheint im Prüfzeitraum t1 noch größer zu sein. Es wurden lediglich 58 % des Referenzwertes erreicht. Allerdings liegen Ergebnisse aus lediglich einer Versuchsserie vor. Dies gilt ebenfalls für die Betoncharge RB2.1*. Im frühen Prüfzeitraum wurden mit der durchgeführten Serie im Mittel lediglich 71 % des Referenzwertes erreicht. Auffällig hingegen ist die deutlich abweichende Erhöhung der normierten Verbundspannungen in RB2.1*. Es ist nicht auszuschließen, dass zu einem späteren Zeitpunkt t4 die Verbundspannungen im Mittel die Werte aus RB1.1 und RB2.1 erreichen könnten.

6.4.2 Verbundankersystem B

6.4.2.1 RB1.1

Tabelle 6-27 enthält die Ergebnisse der R1 Versuche mit dem Verbundankersystem B in Versuchskörpern aus Recyclingbeton RB1.1. Insgesamt wurden acht Versuchsserien mit je fünf Versuche durchgeführt. Dabei wurden vier Serien im Zeitraum t1 in Betonen mit einem Alter zwischen 29 und 34 Tagen geprüft und drei Versuchsserien im Zeitraum t3 (365 – 412 Tage). Für den Testzeitraum t2 liegen Ergebnisse aus einer Versuchsserie aus der Betoncharge RB1.1_24.06.20 vor. Innerhalb der acht Versuchsserien kann eine minimale normierte Verbundspannung von 17,97 N/mm² in Serie R1_RB1.1_15.07.20_B und eine maximale normierte Verbundspannung von 30,34 N/mm² in Serie R1_RB1.1_14.10.20/A_B_xy_ch festgehalten werden. Die normierten Verbundspannungen aus Serie R1_RB1.1_14.10.20/B_B weisen mit 11,6 % die größte Streuung auf. Der Einfluss des Betonalters auf die normierten Verbundspannungen wird in Abbildung 6-27 graphisch dargestellt. Mit steigendem Betonalter wurden tendenziell höhere normierte Verbundspannungen ermittelt.

Tabelle 6-27: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem B, RB1.1

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
1	R1_RB1.1_24.06.20_B	35,5	29	25,83	25,39	5,9%	20,31
			29	26,77			
			29	23,56			
			29	24,08			
			29	26,71			
2	R1_RB1.1_15.07.20_B	23,5	30	17,97	20,30	9,4%	13,82
			30	22,38			
			30	20,79			
			30	18,68			
			30	21,67			
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_B	18,7	34	21,70	23,00	5,3%	18,85
			34	22,22			
			34	23,96			
			34	24,60			
			34	22,54			
3	R1_RB1.1_14.10.20/B_B	20,8	34	18,58	20,86	11,6%	12,66
			34	22,07			
			34	23,63			
			34	18,08			
			34	21,95			
1	R1_RB1.1_24.06.20_B_x	42,2	198	28,11	27,36	7,9%	19,99
			198	24,93			
			198	30,00			
			198	25,32			
			198	28,44			
3/7	R1_RB1.1_14.10.20/A_B_xy_ch	24,7	365	25,87	28,80	6,3%	22,67
			365	29,57			
			365	29,89			
			365	28,33			
			365	30,34			
2	R1_RB1.1_15.07.20_B_xy	26,1	392	26,99	26,54	2,8%	24,04
			392	27,04			
			392	25,86			
			392	27,17			
			392	25,62			
1	R1_RB1.1_24.06.20_B_xy	42,6	412	27,64	28,25	5,3%	23,16
			412	29,44			
			412	30,22			
			412	26,82			
			412	27,13			

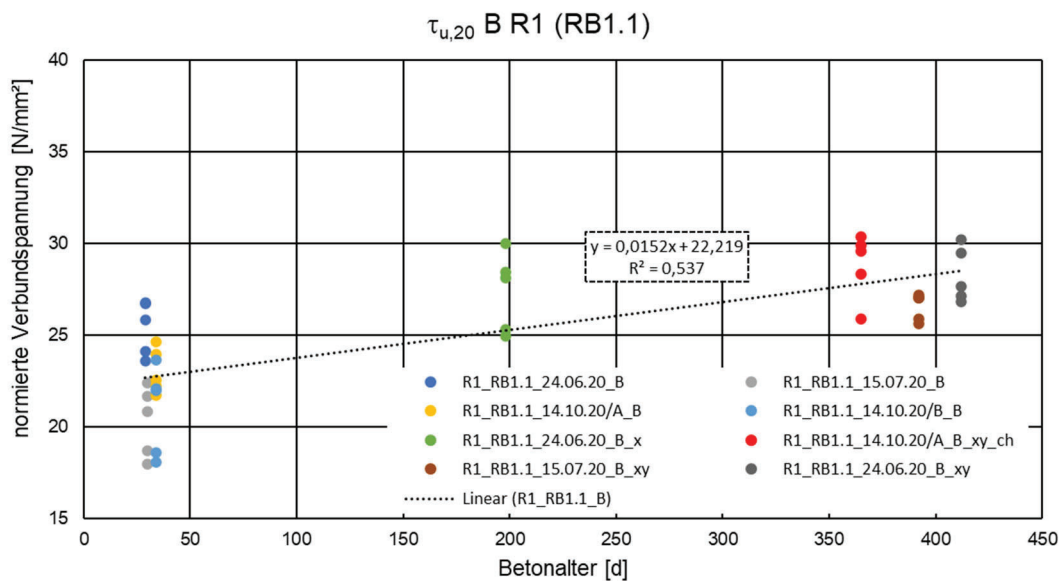


Abbildung 6-27: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, R1, Forschungsvorhaben, RB1.1

6.4.2.2 RB2.1

Tabelle 6-28 und Abbildung 6-28 zeigen die Ergebnisse der fünf R1 Versuche in Recyclingbeton RB2.1 mit Verbundankersystem B in den selbst hergestellten Versuchskörpern. Zwei der Versuchsserien wurden im Zeitraum t1 (hier 32 Tage), zwei Serien im Zeitraum t3 in Beton mit dem Alter von 390 und 410 Tagen und eine Serie 196 Tage nach Betonage (t2) durchgeführt. Es wurden normierte Verbundspannungen zwischen 20,06 N/mm² und 29,63 N/mm² ermittelt. Die Streuung der normierten Verbundspannungen innerhalb der einzelnen Versuchsserien bewegte sich zwischen 3,1 % und 9,8 %.

Zudem werden die Ergebnisse dargestellt, die in den extern hergestellten Versuchskörpern (RB2.1*) ermittelt wurden. Es liegen Ergebnisse aus jeweils einer Versuchsserie für den Prüfzeitraum t1 und t3 vor. Insbesondere die normierten Verbundspannungen, die in 39 Tage altem Beton ermittelt wurden, weichen deutlich von denen der beiden anderen Serien in diesem Prüfzeitraum ab. Die Ergebnisse aus den Versuchen in der Betoncharge RB2.1* wurden nicht in der Trendlinie berücksichtigt. Eine nähere Einordnung der Ergebnisse wird in Kapitel 6.4.2.5 gegeben.

Allgemein kann auch für Recyclingbeton RB2.1 für das System B der Trend einer steigenden normierten Verbundspannung mit steigendem Betonalter der Prüfkörper festgestellt werden.

Tabelle 6-28: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem B, RB2.1

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
1	R1_RB2.1_26.06.20_B	37,4	32	22,95	22,77	9,8%	15,17
			32	22,40			
			32	22,20			
			32	20,06			
			32	26,25			
2	R1_RB2.1_17.07.20_B	23,9	32	25,15	25,61	8,7%	18,00
			32	24,17			
			32	24,50			
			32	29,57			
1	R1_RB2.1_26.06.20_B_x	40,7	196	26,50	27,20	4,7%	22,81
			196	25,47			
			196	27,68			
			196	27,46			
2	R1_RB2.1_17.07.20_B_xy	28,1	390	28,05	28,06	5,5%	22,78
			390	29,63			
			390	25,86			
			390	27,35			
1	R1_RB2.1_26.06.20_B_xy	41,3	410	29,15	28,77	3,1%	25,76
			410	29,43			
			410	28,20			
			410	29,57			
4	R1_RB2.1*_05.03.21_B	27,2	39	20,55	20,36	2,2%	18,82
			39	20,86			
			39	20,27			
			39	20,51			
4	R1_RB2.1*_05.03.21_B_xy_ch	36,0	371	29,09	27,33	3,7%	23,87
			371	26,57			
			371	27,12			
			371	26,72			
			371	27,14			

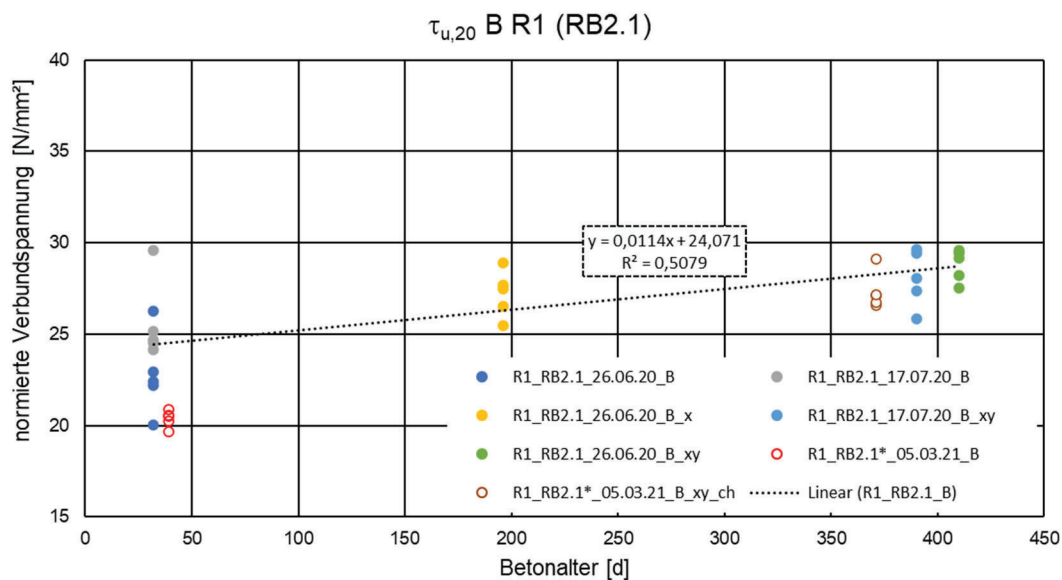


Abbildung 6-28: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, R1, Forschungsvorhaben, RB2.1

6.4.2.3 RB2.2

Zur Bewertung der normierten Verbundspannung in Beton mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm (RB2.2) liegen Ergebnisse aus drei Versuchsserien vor. Tabelle 6-29 zeigt die Ergebnisse. Es wurden zwei Serien im früheren Zeitraum t1 29 Tage nach Betonage und eine Serie 369 Tage nach Betonage durchgeführt. Die minimale normierte Verbundspannung von 19,18 N/mm² wurde in Serie R1_RB2.2_22.10.20/B_B und die maximale normierte Verbundspannung von 27,69 N/mm² wurde in Serie R1_RB2.2_22.10.20/A_B_xy_ch ermittelt. Die Streuung der normierten Verbundspannungen innerhalb der einzelnen Serien bewegte sich zwischen 3,1 % und 6,6 % im erwarteten Bereich.

Der Einfluss des Alters der Versuchskörper wird in Abbildung 6-29 verdeutlicht. Es wurden zwar lediglich drei Versuchsserien durchgeführt, allerdings ist ein deutlicher Anstieg der normierten Verbundspannung mit steigendem Betonalter zu verzeichnen.

Tabelle 6-29: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem B, RB2.2

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton-druckfestigkeit f _{c,m,cube} [N/mm ²]	Betonalter [d]	norm. Verbundspannung τ _{u,i,20} [N/mm ²]	mittlere norm. Verbundspannung τ _{u,i,20} [N/mm ²]	Streuung [-]	char. norm. Verbundspannung τ _{u,5%} [N/mm ²]
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_B	21,5	29	21,93	21,50	3,1%	19,22
			29	21,07			
			29	21,14			
			29	20,90			
			29	22,48			
3	R1_RB2.2_22.10.20/B_B	21,4	29	21,01	21,06	6,6%	16,34
			29	22,89			
			29	20,47			
			29	19,18			
			29	21,73			
3/7	R1_RB2.2_22.10.20/A_B_xy_ch	26,4	369	27,34	26,85	3,2%	23,89
			369	27,69			
			369	26,29			
			369	25,61			
			369	27,34			

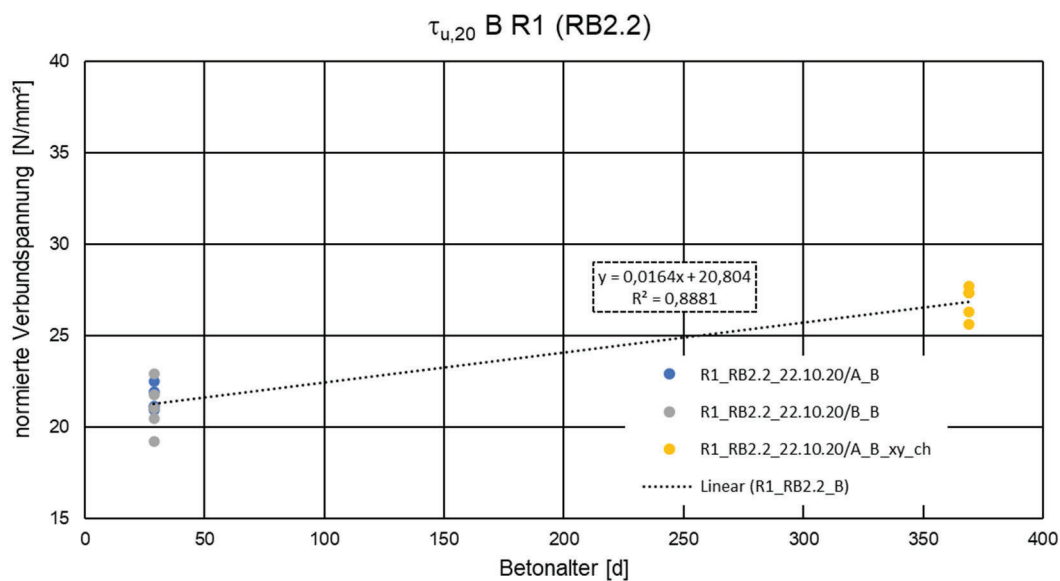


Abbildung 6-29: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, R1, Forschungsvorhaben, RB2.2

6.4.2.4 RB2.3

Für die Untersuchung der Verbundspannung in Recyclingbeton mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen inklusive rezykliertem Brechsand (RB2.3) stand innerhalb des Forschungsvorhabens lediglich die Betoncharge RB2.3_10.03.21 zur Verfügung. Die Prüfkörper wurden extern hergestellt. Es wurden fünf R1 Versuche sowohl 36 Tage als auch fünf R1 Versuche 372 Tage nach Betonage durchgeführt. Tabelle 6-30 fasst die Ergebnisse der beiden Versuchsserien zusammen. Es wurden normierte Verbundspannungen zwischen 14,52 N/mm² und 21,66 N/mm² ermittelt. Die Streuung der Ergebnisse innerhalb der beiden Serien lag mit 1,4 % und 5,6 % im erwarteten Bereich für dieses System.

Abbildung 6-30 verdeutlicht den Einfluss des Alters der Prüfkörper auf die normierten Verbundspannungen. In der Versuchsserie, die im Alter des Versuchskörpers von 372 Tagen durchgeführt wurde, konnte mit 20,46 N/mm² eine deutlich höhere mittlere normierte Verbundspannung ermittelt werden als in einem Versuchskörper der Charge im Alter von 36 Tagen (14,83 N/mm²).

Tabelle 6-30: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem B, RB2.3

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
4	R1_RB2.3_10.03.21_B	28,0	36	14,87	14,83	1,4%	14,13
			36	14,52			
			36	14,99			
			36	14,75			
			36	15,03			
4	R1_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch	35,5	372	21,66	20,46	5,6%	16,54
			372	19,76			
			372	20,67			
			372	21,35			
			372	18,86			

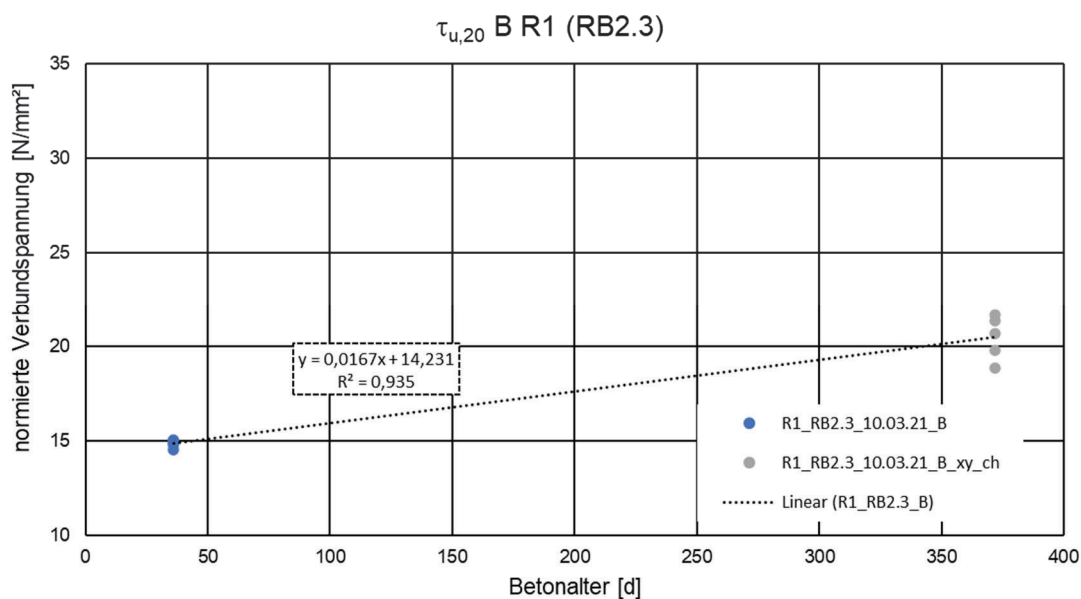


Abbildung 6-30: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, R1, Forschungsvorhaben, RB2.3

6.4.2.5 Einfluss Recyclingbeton – Verbundankersystem B

Die zuvor erläuterten normierten Verbundspannungen der durchgeführten Versuchsserien R1 mit dem System B werden Abbildung 6-31 in Abhängigkeit des Betonalters der Prüfkörper dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse zusammengefasst, die in Versuchsserien in Beton mit gleicher Zusammensetzung der Gesteinskörnung ermittelt wurden. Ausnahme bildet RB2.1, für die die Ergebnisse aus den extern hergestellten Prüfkörpern (RB2.1*) getrennt betrachtet werden.

Zunächst kann festgehalten werden, dass sich der Trend einer steigenden normierten Verbundspannung mit steigendem Alter der Versuchskörper in allen Betonzusammensetzungen im Mittel zeigen lässt.

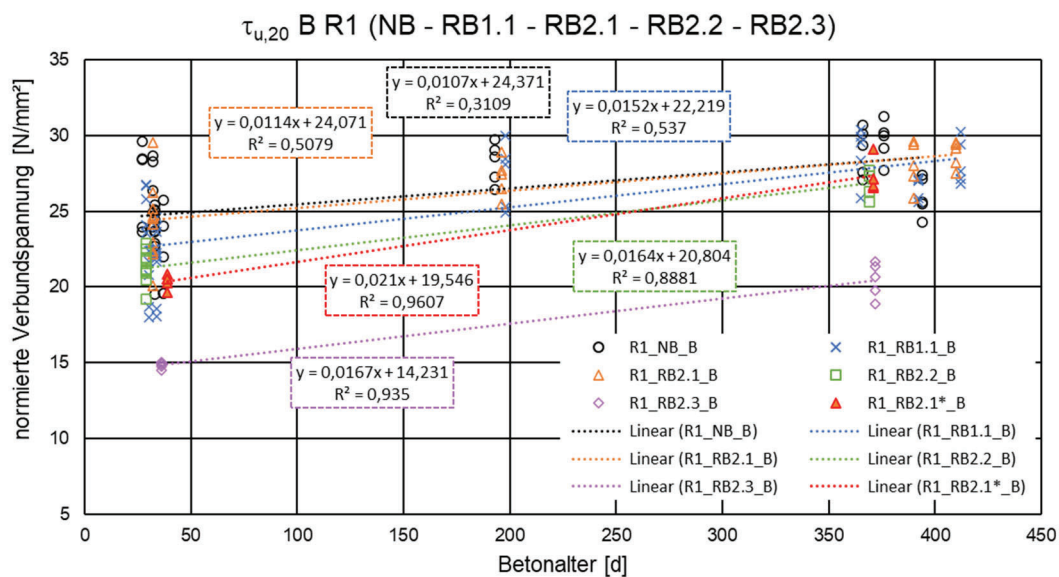


Abbildung 6-31: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, R1, Vergleich NB – RB

Die Mittelwerte der normierten Verbundspannungen werden für alle besprochenen Betonzusammensetzungen für den Prüfzeitraum t_1 und t_3 in Tabelle 6-31 zusammengefasst. Um den Einfluss der rezyklierten Gesteinskörnungen auf die normierten Verbundspannungen zu erfassen, wurden als Referenzen die mittleren normierten Verbundspannungen $\tau_{u,m,20,NB,R1,B,t_3} = 28,2 \text{ N/mm}^2$, für t_1 der Wert $\tau_{u,m,20,NB,R1,B,t_1} = 24,5 \text{ N/mm}^2$ aus Kapitel 6.2.2 übernommen. Bei Betrachtung der Ergebnisse aus dem Zeitraum t_3 wird deutlich, dass die normierten Verbundspannungen – ermittelt aus Versuchen in Versuchskörpern mit RB1.1 und RB2.1 – im Mittel mit denen aus den Versuchen in Normalbeton übereinstimmen (99 % und 101 %). In Recyclingbeton 2.2 konnten 95 % der Referenzen erreicht werden. Eine deutlich geringere normierte mittlere Verbundspannung wurde in Beton RB2.3 (73 %) ermittelt. Die Ergebnisse in Recyclingbeton RB2.1* (externe Herstellung) konnten die der Referenzversuche mit 97 % im Mittel bestätigen und passen somit ebenfalls zu den Ergebnissen aus Versuchen in RB2.1 aus eigener Herstellung.

Wird der Prüfzeitraum t_1 betrachtet, kann dies nicht bestätigt werden. Die mittlere normierte Verbundspannung resultierend aus den Versuchen in RB2.1* erreichten lediglich 83 % der Referenzen in Normalbeton in t_1 . In den Versuchskörpern RB2.1 aus eigener Herstellung konnten zum frühen Prüfzeitraum t_1 99 % der Referenzen erreicht werden. Die mittleren normierten Verbundspannungen aus den Versuchen in RB1.1 und RB2.2 spiegelten die Ergebnisse aus den

Referenzversuchen im Mittel nur zu 91 % und 87 % wider. Die deutlichste Abweichung zeigten die Ergebnisse aus den Versuchen in RB2.3 im frühen Prüfzeitraum t1 mit lediglich im Mittel 61 % der Referenzlasten.

Auffällig ist insbesondere die erhöhte Zunahme der normierten Verbundspannungen in RB2.1* über das Betonalter. Es ist allerdings zu erwähnen, dass die Datenmenge der Versuche in RB2.3 und RB2.1* mit jeweils einer Versuchsserie in den Prüfzeiträumen t1 und t3 relativ gering ist.

Tabelle 6-31: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Verbundspannungen, System B, R1

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältnswert zu $\tau_{u,m,20,NB_R1_B_t3}$	Verhältnswert zu $\tau_{u,m,20,NB_R1_B_t1}$
$\tau_{u,m,20,NB_R1_B_t3}$	28,2	100%	115%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_R1_B_t3}$	27,9	99%	114%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_R1_B_t3}$	28,4	101%	116%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_R1_B_t3}$	27,3	97%	112%
$\tau_{u,m,20,RB2.2_R1_B_t3}$	26,9	95%	110%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_R1_B_t3}$	20,5	73%	84%
$\tau_{u,m,20,NB_R1_B_t1}$	24,5	87%	100%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_R1_B_t1}$	22,4	79%	91%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_R1_B_t1}$	24,2	86%	99%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_R1_B_t1}$	20,4	72%	83%
$\tau_{u,m,20,RB2.2_R1_B_t1}$	21,3	75%	87%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_R1_B_t1}$	14,8	53%	61%

6.4.3 Verbundankersystem D

6.4.3.1 RB1.1

Die Ergebnisse aus den R1 Versuche in RB1.1 mit dem Verbundankersystem D sind in Tabelle 6-32 dargestellt. Es wurden vier Versuchsserien im Prüfzeitraum t1 29 bis 35 Tage nach Betonage und drei Serien im Prüfzeitraum t3 365 bis 412 Tage nach Betonage durchgeführt. Zudem liegen aus der Charge RB1.1_24.06.20 Ergebnisse einer Serie in 198 Tage altem Beton vor. Die minimale normierte Verbundspannung von 21,43 N/mm² wurde in einem Test innerhalb der Serie R1_RB1.1_14.10.20/A_D gemessen. Die maximale normierte Verbundspannung von 33,95 N/mm² wurde innerhalb der Versuchsserie R1_RB1.1_24.06.20_D_xy festgestellt. Die Streuung der normierten Verbundspannungen innerhalb jeder Serie liegt mit Werten zwischen 2,4 % und 6,0 % im erwarteten Bereich.

Tabelle 6-32: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem D, RB1.1

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung τ_{u,i,t_0}	mittlere norm. Verbundspannung τ_{u,i,t_0}	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
1	R1_RB1.1_24.06.20_D	35,5	29	21,91	22,55	6,0%	17,98
			29	24,90			
			29	21,63			
			29	21,87			
			29	22,46			
2	R1_RB1.1_15.07.20_D	23,9	35	25,69	24,57	3,9%	21,32
			35	24,48			
			35	25,31			
			35	24,07			
			35	23,31			
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_D	18,6	33	22,83	22,45	4,2%	19,22
			33	22,06			
			33	23,91			
			33	22,05			
			33	21,43			
3	R1_RB1.1_14.10.20/B_D	20,7	33	24,53	23,74	4,1%	20,42
			33	23,32			
			33	22,49			
			33	24,91			
			33	23,46			
1	R1_RB1.1_24.06.20_D_x	42,2	198	25,16	25,53	6,0%	20,28
			198	28,16			
			198	24,75			
			198	24,17			
			198	25,42			
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_D_xy	24,7	365	29,38	29,24	2,4%	26,81
			365	29,47			
			365	28,58			
			365	28,52			
			365	30,25			
2	R1_RB1.1_15.07.20_D_xy	26,1	392	30,17	30,07	4,7%	25,22
			392	30,40			
			392	28,17			
			392	29,51			
			392	32,09			
1	R1_RB1.1_24.06.20_D_xy	42,6	412	32,25	32,38	5,2%	26,64
			412	29,80			
			412	33,95			
			412	33,84			
			412	32,06			

Die Darstellung der normierten Verbundspannungen über das Betonalter der Prüfkörper in Abbildung 6-32 verdeutlicht, dass auch für das System D in RB1.1 mit steigendem Betonalter tendenziell eine höhere normierte Verbundspannung erwartet werden kann.

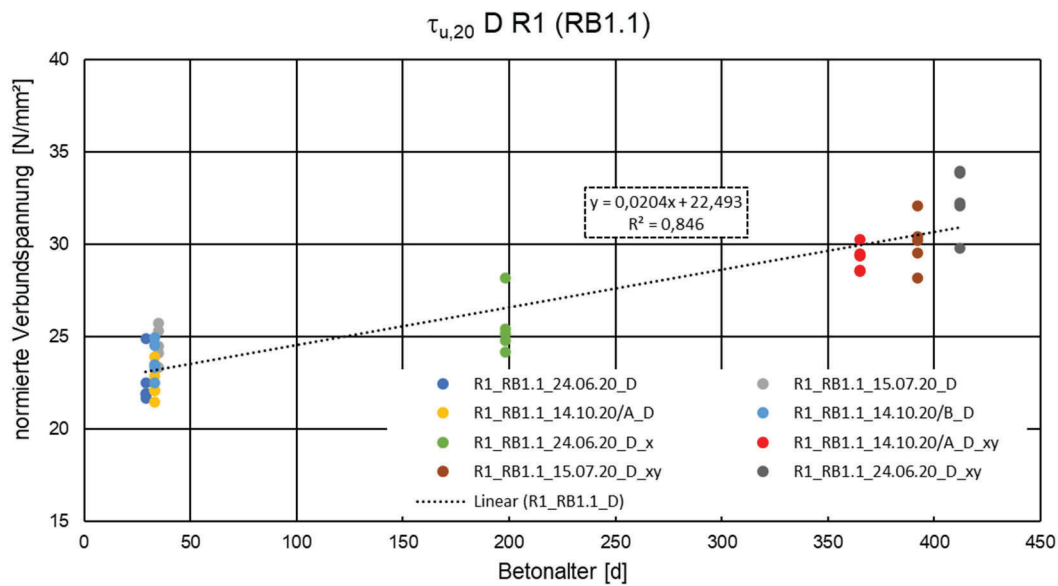


Abbildung 6-32: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, R1, Forschungsvorhaben, RB1.1

6.4.3.2 RB2.1

Aus den fünf Versuchsserien R1 mit dem System D in Recyclingbeton RB2.1 aus eigener Herstellung resultieren eine minimale normierte Verbundspannung von 21,21 N/mm² und eine maximale normierte Verbundspannung von 32,43 N/mm². Die Streuung der Einzelwerte innerhalb jeder Versuchsserie liegt mit 3,0 % bis 7,6 % im erwarteten Bereich. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-33 zusammengefasst. Die graphische Darstellung in Abbildung 6-33 bestätigt die zuvor bereits festgestellten Erkenntnisse einer steigenden normierten Verbundspannung mit steigendem Alter der Versuchskörper.

Die erläuterten Versuche wurden ergänzt durch jeweils eine Versuchsserie in RB2.1* aus externer Herstellung für den Prüfzeiträume t1 und t3. Die normierten Verbundspannungen wurden nicht in die Datenreihe zur Erstellung der Trendlinie aufgenommen. Es wird erkennbar, dass insbesondere im Prüfzeitraum t1 eine deutlich niedrigere normierte Verbundspannung erreicht wurde. Die Abweichung zu den Ergebnissen aus den anderen Versuchen wurde in Prüfzeitraum t3 geringer. Die Werte werden in Kapitel 6.4.3.5 genauer eingeordnet.

Tabelle 6-33: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem D, RB2.1

Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
R1_RB2.1_26.06.20_D	37,4	32	23,82	23,41	6,7%	17,21
		32	23,69			
		32	24,91			
		32	21,21			
		32				
R1_RB2.1_17.07.20_D	24,0	33	24,33	23,33	5,8%	18,70
		33	23,30			
		33	21,35			
		33	24,83			
		33	22,85			
R1_RB2.1_26.06.20_D_x	40,7	196	24,15	24,84	4,8%	20,76
		196	24,48			
		196	23,91			
		196	26,91			
		196	24,73			
R1_RB2.1_17.07.20_D_xy	28,1	390	30,61	30,66	3,0%	27,50
		390	31,86			
		390	29,58			
		390	29,99			
		390	31,29			
R1_RB2.1_26.06.20_D_xy	41,3	410	27,58	29,77	7,6%	22,11
		410	32,43			
		410	31,87			
		410	29,07			
		410	27,90			
R1_RB2.1*_05.03.21_D	27,2	39	18,62	18,46	3,7%	16,16
		39	19,26			
		39	17,45			
		39	18,21			
		39	18,75			
R1_RB2.1*_05.03.21_D_xy_ch	36,0	371	26,61	26,74	2,5%	24,45
		371	25,86			
		371	26,73			
		371	27,75			
		371	26,74			

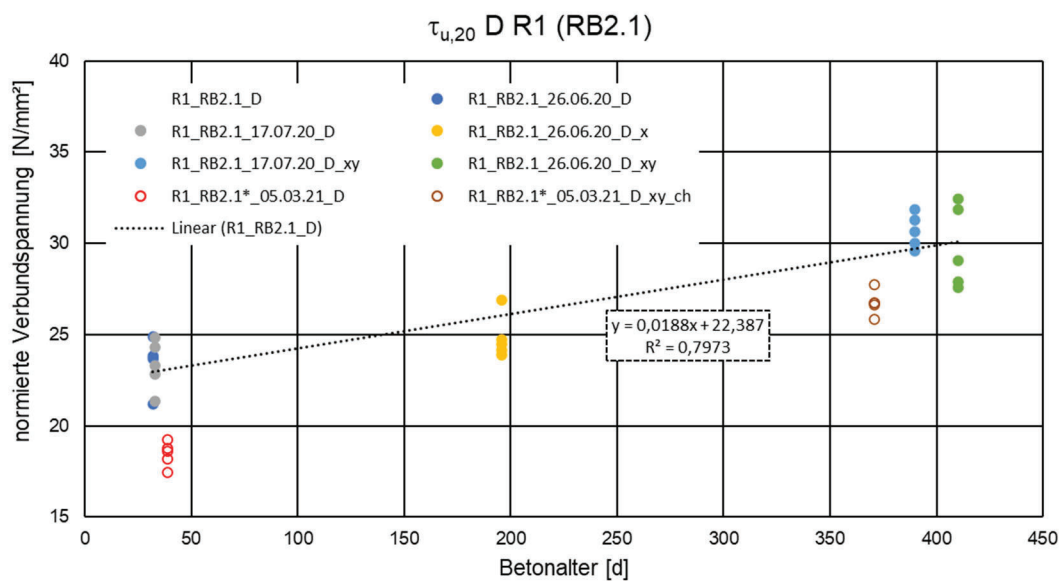


Abbildung 6-33: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, R1, Forschungsvorhaben, RB2.1

6.4.3.3 RB2.2

In Beton mit ausschließlich Recyclinggesteinskörnung > 2 mm wurden zwei Serien im Prüfzeitraum t1 28 Tage nach Betonage und eine Serie im Prüfzeitraum t3 369 Tage nach Betonage durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-34 und Abbildung 6-34 dargestellt. Die minimale normierte Verbundspannung wurde innerhalb einer Serie im Prüfzeitraum t1 mit 17,33 N/mm² festgestellt. Im Prüfzeitraum t3 wurde in Serie R1_RB2.2_22.10.20/A_D_xy die maximale normierte Verbundspannung von 27,10 N/mm² festgestellt. Die Darstellung der normierten Verbundspannungen über das Betonalter verdeutlicht trotz der recht geringen Datenmenge den Anstieg der normierten Verbundspannung mit steigendem Betonalter.

Tabelle 6-34: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem D, RB2.2

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit f _{c,m,cube}	Betonalter	norm. Verbundspannung τ _{u,i,20}	mittlere norm. Verbundspannung τ _{u,i,20}	Streuung	char. norm. Verbundspannung τ _{u,5%}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_D	21,4	28	17,33	20,16	8,8%	14,15
			28	19,55			
			28	21,42			
			28	21,48			
			28	21,05			
3	R1_RB2.2_22.10.20/B_D	21,3	28	22,54	20,94	5,7%	16,86
			28	19,92			
			28	20,51			
			28	19,87			
			28	21,86			
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_D_xy	26,4	369	27,10	24,14	9,8%	16,13
			369	23,17			
			369	25,51			
			369	20,88			
			369	24,06			

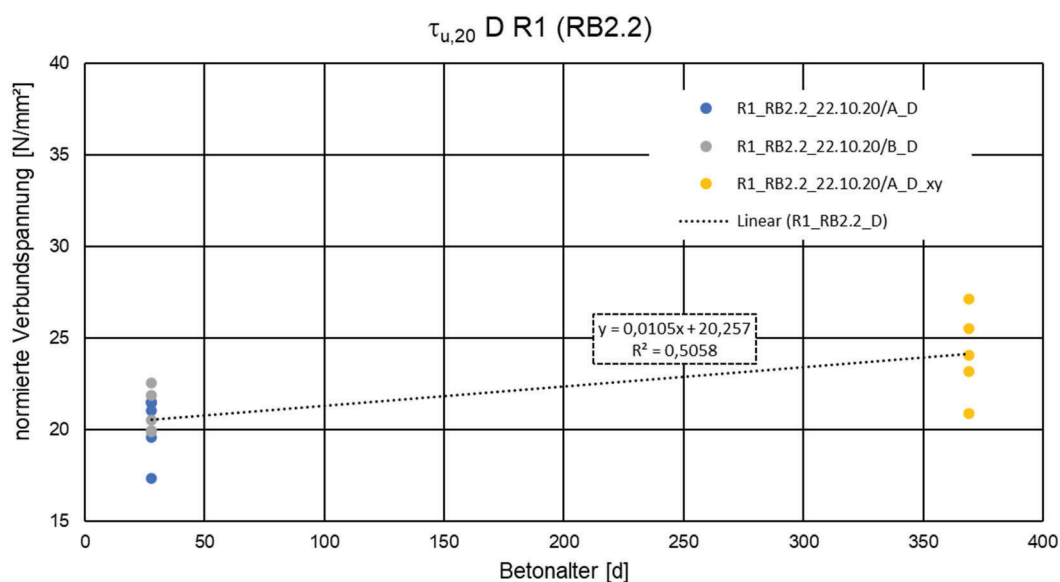


Abbildung 6-34: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, R1, Forschungsvorhaben, RB2.2

6.4.3.4 RB2.3

In Versuchsreihe 4 wurden zwei Serien R1 mit dem System D in Beton mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen inklusive Brechsand (RB2.3) aus externer Herstellung geprüft. Die Streuung der normierten Verbundspannungen in der Versuchsserie im Prüfzeitraum t1 ist mit 15,2 % relativ hoch. Der geringste Wert der normierten Verbundspannung (11,41 N/mm²) wurde ebenfalls in dieser Serie festgehalten. Die maximale normierte Verbundspannung wurde in der Serie in Prüfzeitraum t3 mit 20,51 N/mm² bestimmt. Trotz der geringen Datenmenge von insgesamt 10 Versuche wird der Trend der steigenden normierten Verbundspannung auch mit dem System D in RB2.3 deutlich erkennbar.

Tabelle 6-35: Testergebnisse Forschungsvorhaben: R1 - Verbundankersystem D, RB2.3

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
4	R1_RB2.3_10.03.21_D	28,0	36	16,66	14,97	15,2%	7,22
			36	13,96			
			36	16,60			
			36	16,21			
			36	11,41			
4	R1_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch	35,5	372	19,33	19,39	4,4%	16,51
			372	19,52			
			372	18,13			
			372	19,47			
			372	20,51			

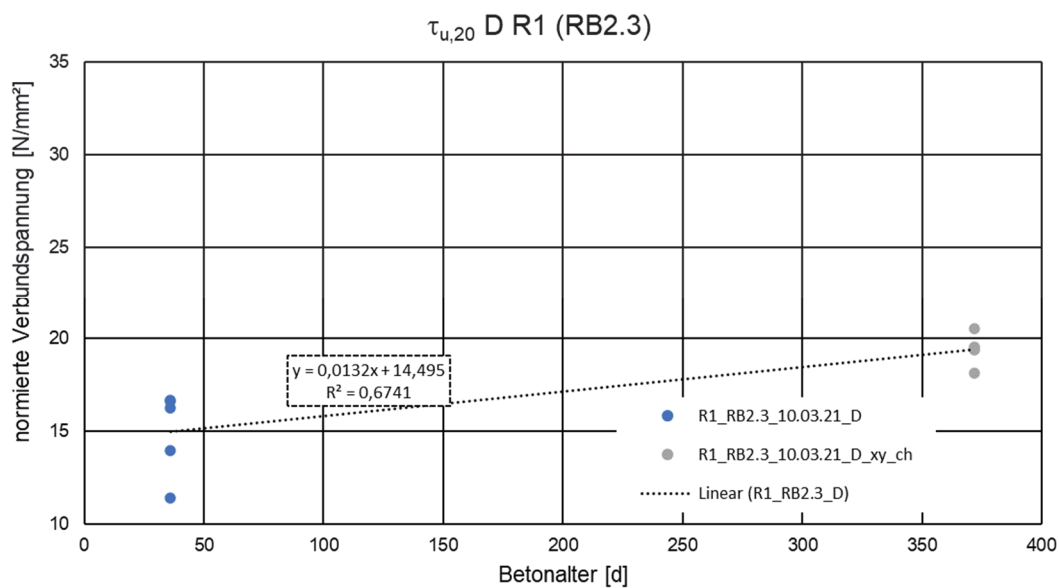


Abbildung 6-35: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, R1, Forschungsvorhaben, RB2.3

6.4.3.5 Einfluss Recyclingbeton – Verbundankersystem D

Die zuvor diskutierten Versuchsergebnisse aus den R1 Versuche mit Verbundankersystem D in allen geprüften Recyclingbetonen werden in Abbildung 6-36 zusammenfassend dargestellt. Die Ergebnisse aus den Versuchen in Versuchskörpern RB2.1* aus externer Herstellung werden getrennt betrachtet von den Ergebnissen, die aus den Versuchen in Versuchskörpern des Betons RB2.1 aus eigener Herstellung resultieren. Die mittleren normierten Verbundspannungen werden in Tabelle 6-36 ins Verhältnis zu den Ergebnissen aus Kapitel 6.2.3 gesetzt, um den Einfluss der Recyclinggesteinskörnung auf die normierte Verbundspannung bewerten zu können. Für den Vergleich der Verbundspannungen wird als Referenz für den Prüfzeitraum t1 $\tau_{u,m,20,NB_R1_D_t1} = 22,8 \text{ N/mm}^2$ und für den Prüfzeitraum t3 $\tau_{u,m,20,NB_R1_D_t3} = 28,8 \text{ N/mm}^2$ gewählt.

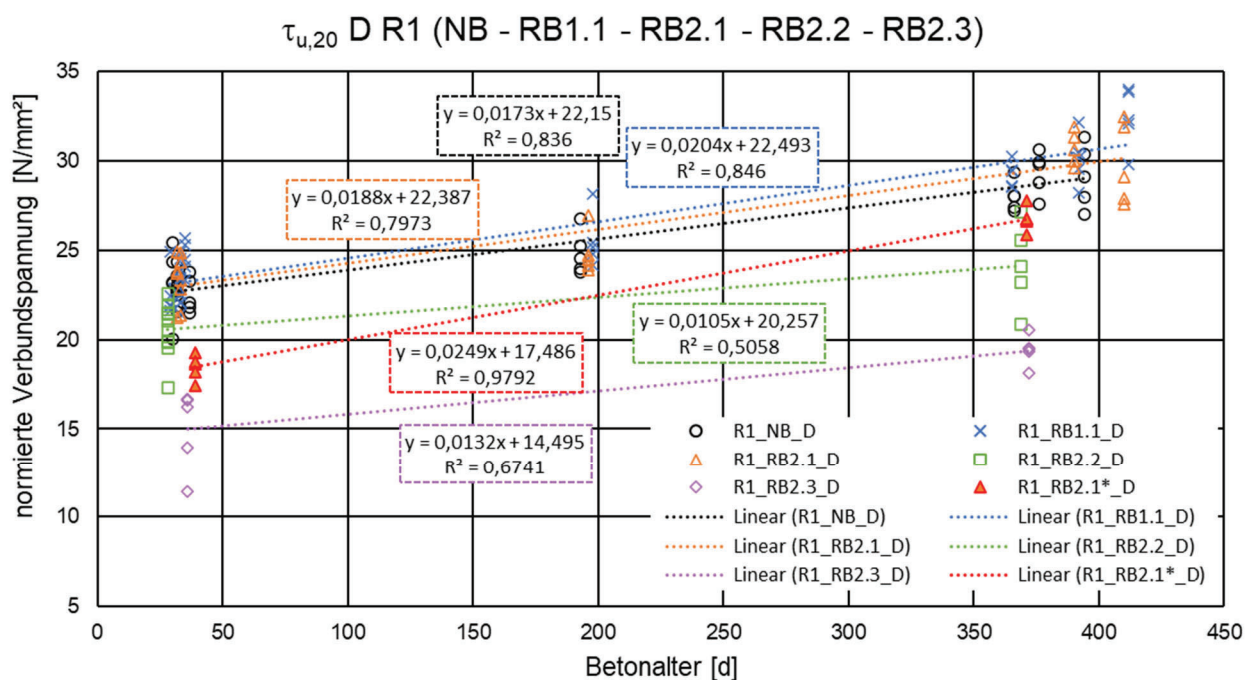


Abbildung 6-36: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, R1, Vergleich NB – RB

Die Ergebnisse aus dem Prüfzeitraum t3 in RB1.1 und RB2.1 bestätigen die Ergebnisse der Referenzversuche mit 106 % und 105 %. In der Versuchsserie in RB2.1* in extern hergestelltem Beton konnten im Mittel 93 % des Referenzwertes erreicht werden. Die Ergebnisse in RB2.2 erreichten 84 % der Ergebnisse in Normalbeton. Lediglich 67 % der mittleren normierten Verbundspannung aus den Referenzversuchen konnten in Beton mit ausschließlich Recyclinggesteinskörnung inklusive Brechsand (RB2.3) ermittelt werden.

Ein vergleichbares Bild lieferten die Ergebnisse im Prüfzeitraum t1. Wie bereits bei den Verbundankersystemen A und B gezeigt, wird auch für das Verbundankersystem D der Trend einer steigenden normierten Verbundspannung mit steigendem Betonalter der Prüfkörper deutlich. Der größte Anstieg der normierten Verbundspannungen resultiert aus den Versuchen in den extern hergestellten Versuchskörpern der Betoncharge RB2.1*. Es wird als möglich angesehen, dass bei Versuchen zu einem späteren Zeitpunkt im Mittel die normierte Verbundspannung aus den Referenzversuchen erreicht werden könnte.

Tabelle 6-36: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Verbundspannungen, System D, R1

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,NB_R1_D_t3}$	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,NB_R1_D_t1}$
$\tau_{u,m,20,NB_R1_D_t3}$	28,8	100%	126%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_R1_D_t3}$	30,6	106%	134%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_R1_D_t3}$	30,2	105%	132%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_R1_D_t3}$	26,7	93%	117%
$\tau_{u,m,20,RB2.2_R1_D_t3}$	24,1	84%	106%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_R1_D_t3}$	19,4	67%	85%
$\tau_{u,m,20,NB_R1_D_t1}$	22,8	79%	100%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_R1_D_t1}$	23,3	81%	102%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_R1_D_t1}$	23,4	81%	102%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_R1_D_t1}$	18,5	64%	81%
$\tau_{u,m,20,RB2.2_R1_D_t1}$	20,6	71%	90%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_R1_D_t1}$	15,0	52%	66%

6.4.4 Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Verbundankersysteme ungerissener Beton

In den Kapiteln 6.4.1 bis 6.4.3 wurden die Ergebnisse aus den zentrischen Auszugversuchen mit enger Abstützung (R1) in Recyclingbetonen mit unterschiedlichen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung für die Verbundankersysteme A, B und D erläutert. Dabei wurden die normierten Verbundspannungen zum einen sortiert nach der jeweiligen Zusammensetzung der Gesteinskörnung der Betonversuchskörper betrachtet. Bei der Betrachtung der Verbundspannungen erschien das Alter der Versuchskörper einen Einfluss auf die maximalen normierten Verbundspannungen zu haben. Daher wurden die Ergebnisse zusätzlich zur Betonzusammensetzung auch in die Prüfzeiträume t1, t2 und t3 geclustert. In t1 wurden die Ergebnisse eingeordnet, die in Versuchskörpern bis 39 Tage nach Betonage ermittelt wurden. Dem Zeitraum t3 wurden die Ergebnisse zugeordnet, die aus Versuchen in ca. 1 Jahr alten Versuchskörpern resultieren. Für den Zeitraum t2 (ca. 200 Tage) wurde keine genauere Analyse durchgeführt. Die den genannten Clustern zugeordneten normierten Verbundspannungen wurden als Mittelwert den mittleren normierten Verbundspannungen aus den Referenzversuchen mit dem jeweiligen Verbundankersystem und für die beiden Prüfzeiträumen aus Kapitel 6.2 gegenübergestellt. Die Verhältniszahlen sind in Tabelle 6-37 und Abbildung 6-38 dargestellt.

Es wird deutlich, dass für die Recyclingbetone aus eigener Herstellung RB1.1 und RB2.1 grundsätzlich keine Abminderung der mittleren normierten Verbundspannungen zu erwarten ist, sofern der Beton ein Alter von ca. einem Jahr hat und Versuche mit enger Abstützung in ungerissenem Beton betrachtet werden. Die Verhältnisse zu den Ergebnissen liegen je im Mittel zwischen 0,99 und 1,06. Für den Prüfzeitraum t1, also Betone mit einem Alter von ca. 28 bis 39 Tagen konnten die Ergebnisse aus den Versuchen in Recyclingbeton ebenfalls die Referenzwerte erreichen. Eine Ausnahme zeigt das System B, das im Mittel nur 91 % der Referenztragfähigkeit erreichte.

Die Versuche in den Versuchskörpern aus externer Herstellung RB2.1* zeigen im Prüfzeitraum t3 eine Bestätigung mit 93 % bis 97 % der Referenzwerte. Es ist zu erwähnen, dass je Verbundankersystem und Prüfzeitraum lediglich eine Versuchsserie durchgeführt wurde und somit die Datenmenge relativ gering ist. Auffällig ist jedoch, dass in den Versuchen mit den drei Verbundankersystemen im Prüfzeitraum t1 lediglich 81 % bis 83 % der Referenzen in Normalbeton und Prüfzeitraum t1 erreicht werden konnten.

In Recyclingbeton mit ausschließlich rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm (RB2.2) wurden ebenfalls Auszugversuche durchgeführt. Jeweils zwei Versuchsserien im Prüfzeitraum t1 und eine Versuchsserie in Prüfzeitraum t3. In Versuchen in 369 Tage alten Versuchskörpern zeigte sich mit den Systemen A und B, dass mit jeweils 95 % nahezu die mittleren normierten Verbundspannungen aus den Referenzversuchen in Normalbeton erreicht werden konnten. Mit System D wurden lediglich 84 % erreicht. Aus den Versuchen in den Versuchskörpern in jüngerem Alter (28 Tage nach Betonage) konnten 94 %, 87 % und 90 % der mittleren normierten Verbundspannungen aus den Referenzversuchen mit den Verbundankersystemen A, B und D erreicht werden.

Die mittleren normierten Verbundspannungen, die aus Versuchen in Beton mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen inklusive Brechsand (RB2.3) resultierten, konnten mit den untersuchten Verbundankersystemen A, B und D weder im Prüfzeitraum t1 (68 %, 61 % und 66 %) noch im Prüfzeitraum t3 (78 %, 73 % und 67 %) die Werte aus den Referenzversuchen für t1 und t2 erreichen.

Die Steigerung der mittleren normierten Verbundspannungen resultierend aus den Versuchen in den extern hergestellten Versuchskörpern erscheint verglichen mit dem in den Versuchskörpern aus eigener Herstellung höher. Insbesondere für die Versuchsergebnisse in RB2.1* wird dies deutlich. Es könnte eine weitere Annäherung der mittleren normierten Verbundspannungen vermutete werden, wenn weitere Versuche in einem noch späteren Prüfzeitraum t4 durchgeführt würden.

Tabelle 6-37: Verhältniswerte der Verbundspannungen aus R1: RB/NB für die Verbundankersysteme A, B, D

Beton	Bezeichnung	$\tau_{u,m,20,RB_R1_t3} / \tau_{u,m,20,NB_R1_t3}$	$\tau_{u,m,20,RB_R1_t1} / \tau_{u,m,20,NB_R1_t1}$
[-]	[-]	[-]	[-]
RB1.1	$\tau_{u,m,20,RB1.1_A_R1}$	1,04	1,00
	$\tau_{u,m,20,RB1.1_B_R1}$	0,99	0,91
	$\tau_{u,m,20,RB1.1_D_R1}$	1,06	1,02
RB2.1	$\tau_{u,m,20,RB2.1_A_R1}$	1,04	1,02
	$\tau_{u,m,20,RB2.1_B_R1}$	1,01	0,99
	$\tau_{u,m,20,RB2.1_D_R1}$	1,05	1,02
RB2.1*	$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_A_R1}$	0,95	0,81
	$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_B_R1}$	0,97	0,83
	$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_D_R1}$	0,93	0,81
RB2.2	$\tau_{u,m,20,RB2.2_A_R1}$	0,95	0,94
	$\tau_{u,m,20,RB2.2_B_R1}$	0,95	0,87
	$\tau_{u,m,20,RB2.2_D_R1}$	0,84	0,90
RB2.3	$\tau_{u,m,20,RB2.3_A_R1}$	0,78	0,68
	$\tau_{u,m,20,RB2.3_B_R1}$	0,73	0,61
	$\tau_{u,m,20,RB2.3_D_R1}$	0,67	0,66

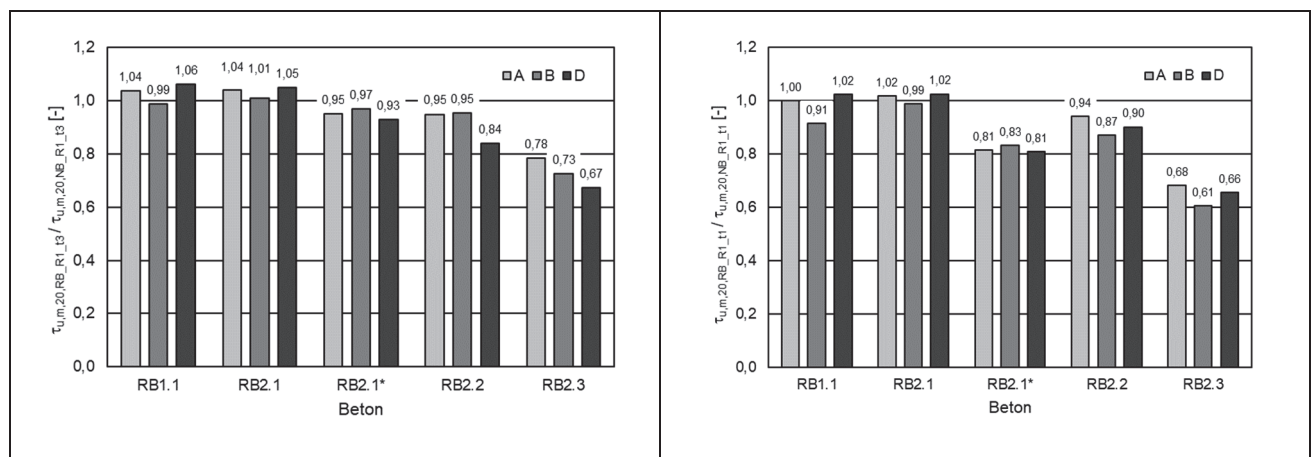


Abbildung 6-37: Verhältnis der mittleren normierten Verbundspannungen aus R1 RB/NB nach Betonmischung, links: Prüfzeitraum t3, rechts: Prüfzeitraum t1

6.4.5 Bolzenanker F

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zentrischen Auszugversuche in Beton mit unterschiedlichen Anteilen der rezyklierten Gesteinskörnungen erläutert. Die Versuchskörper mit RB1.1 und RB2.2 stammen aus eigener Herstellung. Der Einfluss des Betonalters auf die maximale Auszuglast bei den Versuchen A1 mit dem Bolzenanker sollte auch geprüft werden. Da eine deutlich geringere Anzahl an Versuchen mit weiter Abstützung in einem Versuchskörper erfolgen kann, wurden im Prüfzeitraum t1 lediglich drei Versuche innerhalb einer Serie durchgeführt. Für die Versuche in RB2.1 und RB2.3 wurden Versuchskörper aus externer Herstellung verwendet. Da ausreichend Versuchskörper zur Verfügung standen, wurden jeweils fünf Einzelversuche innerhalb einer Versuchsserie durchgeführt.

6.4.5.1 RB1.1

In Tabelle 6-38 und Abbildung 6-38 sind die Versuchsergebnisse aus den zentrischen Auszugversuchen mit weiter Abstützung A1 mit dem Bolzenanker F in Recyclingbeton RB1.1 aus eigener Herstellung zusammengefasst. Es wurden zwei Versuchskörper am 14.10.20 hergestellt. Die Auszugversuche wurden im Prüfzeitraum t1 (hier: 33 Tage nach Betonage) und t3 (hier: 364 Tage nach Betonage) durchgeführt. Die minimale normierte Versagenslast von 18,80 kN resultierte aus den Versuchen in Serie A1_RB1.1_14.10.20/A_F. Die maximale Versagenslast von 27,12 kN wurde in Versuchsserie A1_RB1.1_14.10.20/A_F_xy festgestellt. Werden die Ergebnisse aus den Prüfzeiträumen t1 und t3 jeweils zusammengefasst, wird eine Erhöhung der normierten Versagenslast über das Betonalter deutlich. Es ist allerdings anzumerken, dass im Versuchskörper RB1.1_14.10.20/B die normierte Versagenslast nicht anstieg (20,62 kN → 20,40 kN). Es ist jedoch festzuhalten, dass die Datenmenge relativ gering ist.

Tabelle 6-38: Testergebnisse Forschungsvorhaben: A1 – Bolzenanker F, RB1.1

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]
3	A1_RB1.1_14.10.20/A_F	18,6	33	21,09	19,89	5,8%	13,80
			33	18,80			
			33	19,78			
			33				
			33				
3	A1_RB1.1_14.10.20/B_F	20,7	33	19,91	20,62	3,1%	17,20
			33	21,17			
			33	20,78			
			33				
			33				
3	A1_RB1.1_14.10.20/A_F_xy	24,7	364	27,12	25,08	5,8%	20,17
			364	23,97			
			364	24,10			
			364	26,09			
			364	24,10			
3	A1_RB1.1_14.10.20/B_F_xy	29,1	364	21,36	20,40	3,2%	18,17
			364	20,81			
			364	19,90			
			364	20,02			
			364	19,92			

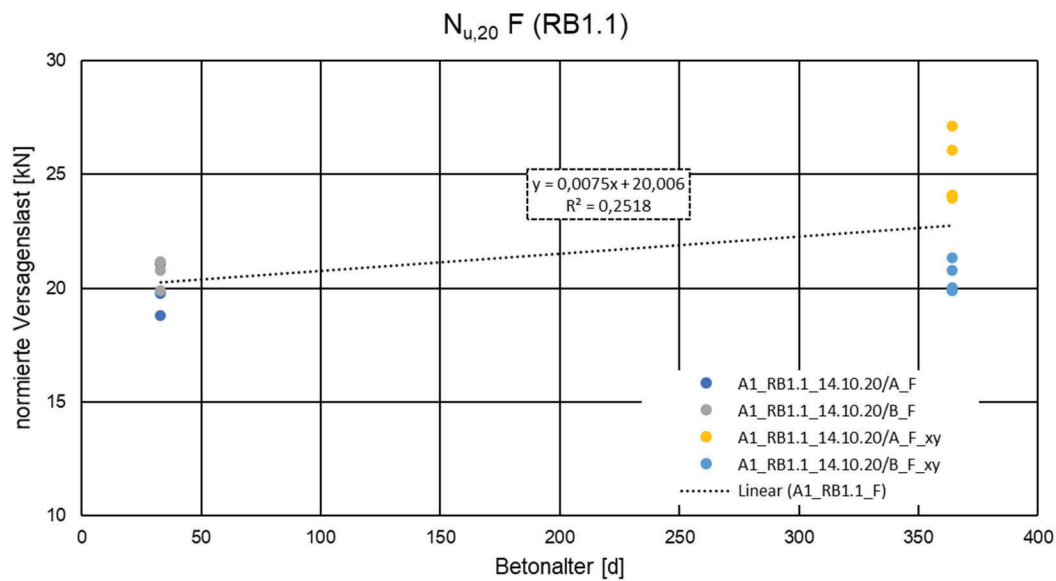


Abbildung 6-38: normierte Versagenslast über Betonalter, Bolzenanker F, A1, Forschungsvorhaben, RB1.1

6.4.5.2 RB2.1

Für Versuche in RB2.1 standen lediglich Versuchskörper aus externer Herstellung zur Verfügung, was mit der Bezeichnung RB2.1* erkennbar gemacht werden soll. Innerhalb der Versuchsserie im frühen Prüfzeitraum t1 wurde die geringste normierte Versagenslast von 14,87 kN ermittelt. Die maximale normierte Versagenslast von 19,02 kN resultiert aus der Serie A1_RB2.1*_05.03.21_F_xy in Beton mit dem Alter von 369 Tagen. Im Mittel sind die Versagenslasten zum späteren Zeitpunkt ca. 14 % höher. Die Testergebnisse sind in Tabelle 6-39 und Abbildung 6-39 zusammengefasst.

Tabelle 6-39: Testergebnisse Forschungsvorhaben: A1 – Bolzenanker F, RB2.1*

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$ [N/mm ²]	Betonalter [d]	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	Streuung [-]	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$ [kN]
4	A1_RB2.1*_05.03.21_F	27,2	39	14,93	15,44	4,5%	13,09
			39	15,01			
			39	14,87			
			39	16,25			
			39	16,15			
4	A1_RB2.1*_05.03.21_F_xy	36,0	369	15,97	17,66	6,9%	13,50
			369	17,41			
			369	17,24			
			369	19,02			
			369	18,67			

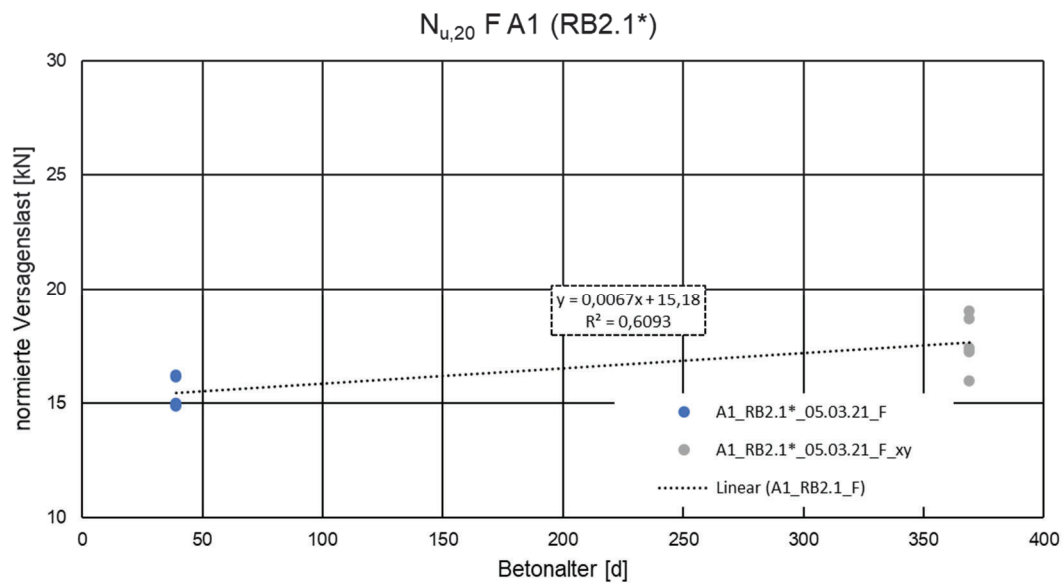


Abbildung 6-39: normierte Versagenslast über Betonalter, Bolzenanker F, A1, Forschungsvorhaben, RB2.1*

6.4.5.3 RB2.2

Ebenso wie die Versuche in RB1.1 wurden auch für die Versuche in RB2.2 zwei Prüfkörper hergestellt. Die Auszugversuche wurden zu zwei Zeitpunkten durchgeführt: 28 Tage nach Betonage (t_1) und 368 Tage nach Betonage (t_3). Die Ergebnisse sind in Tabelle 6-40 und Abbildung 6-40 zusammengefasst. Die minimale normierte Versagenslast von 15,61 kN wurde innerhalb der Versuchsserie A1_RB2.2_22.10.20/A_F zum frühen Prüfzeitpunkt ermittelt. Die maximale normierte Versagenslast von 21,74 kN resultiert aus den Versuchen der Serie A1_RB2.2_22.10.20/B_F_xy. Werden die Versuche aus den beiden Prüfzeiträumen jeweils zusammengefasst, wird ein leichter Trend einer steigenden normierten Versagenslast mit steigendem Betonalter der Prüfkörper deutlich. Auch im Vergleich der Testergebnisse, die in einem Versuchskörper durchgeführt wurden, ist jeweils eine geringe Erhöhung von 6 % - 7 % erkennbar (17,07 kN \rightarrow 18,26 kN, 19,01 kN \rightarrow 20,56 kN). Es ist allerdings anzumerken, dass die Datenmenge relativ gering ist.

Tabelle 6-40: Testergebnisse Forschungsvorhaben: A1 – Bolzenanker F, RB2.2

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]
3	A1_RB2.2_22.10.20/A_F	21,4	28	16,87	17,07	9,2%	8,72
			28	18,74			
			28	15,61			
			28				
			28				
3	A1_RB2.2_22.10.20/B_F	21,3	28	18,80	19,01	1,3%	17,73
			28	19,28			
			28	18,95			
			28				
			28				
3	A1_RB2.2_22.10.20/A_F_xy	26,4	368	19,05	18,26	8,0%	13,32
			368	19,18			
			368	19,58			
			368	16,14			
			368	17,38			
3	A1_RB2.2_22.10.20/B_F_xy	27,4	368	20,48	20,56	4,1%	17,67
			368	19,84			
			368	21,74			
			368	21,03			
			368	19,70			

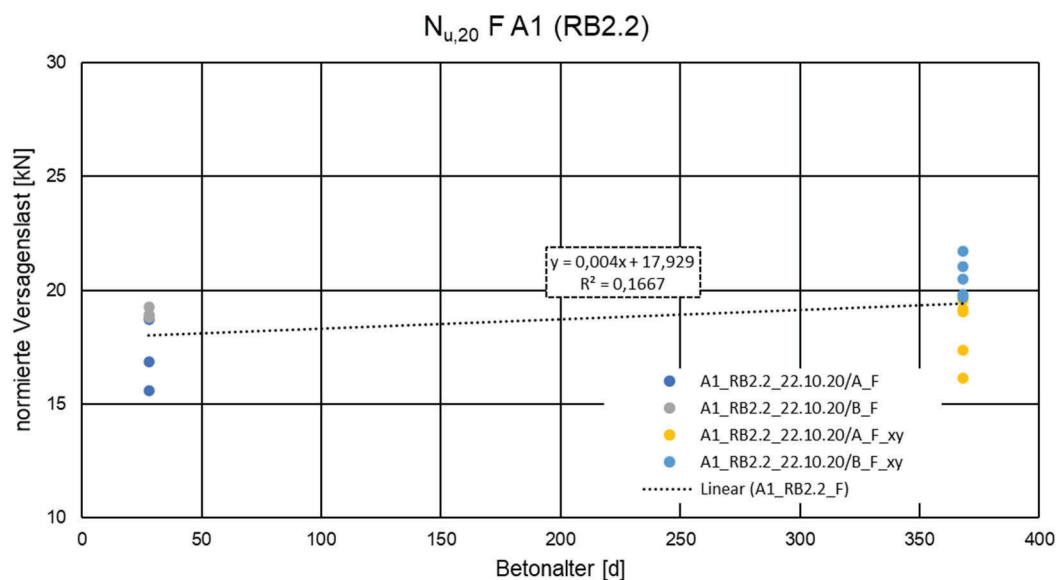


Abbildung 6-40: normierte Versagenslast über Betonalter, Bolzenanker F, A1, Forschungsvorhaben, RB2.2

6.4.5.4 RB2.3

Für die Versuche in Recyclingbeton RB2.3 standen Versuchskörper aus externer Herstellung zur Verfügung. Es wurde jeweils eine Versuchsserie mit je fünf Versuchen 35 und 370 Tage nach Betonage der Versuchskörper durchgeführt. Die Testergebnisse werden in Tabelle 6-41 und Abbildung 6-41 zusammengefasst. Die geringste normierte Versagenslast wurde im ersten Prüfzeitraum t1 mit 9,61 kN ermittelt. Die höchste normierte Versagenslast von 17,58 kN resultierte aus den Versuchen in Versuchsserie A1_RB2.3_10.03.21_F_xy zum späteren Prüfzeitpunkt t3. Aus den Ergebnissen der beiden Versuchsserien wird eine deutliche Steigerung der mittleren normierten Versagenslasten von 64 % erkennbar (10,12 kN → 16,57 kN).

Tabelle 6-41: Testergebnisse Forschungsvorhaben: A1 – Bolzenanker F, RB2.3

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]
4	A1_RB2.3_10.03.21_F	27,9	35	10,43	10,12	4,9%	8,44
			35	10,20			
			35	9,62			
			35	9,61			
			35	10,72			
4	A1_RB2.3_10.03.21_F_xy	35,5	370	16,66	16,57	5,2%	13,62
			370	15,18			
			370	16,69			
			370	17,58			
			370	16,73			

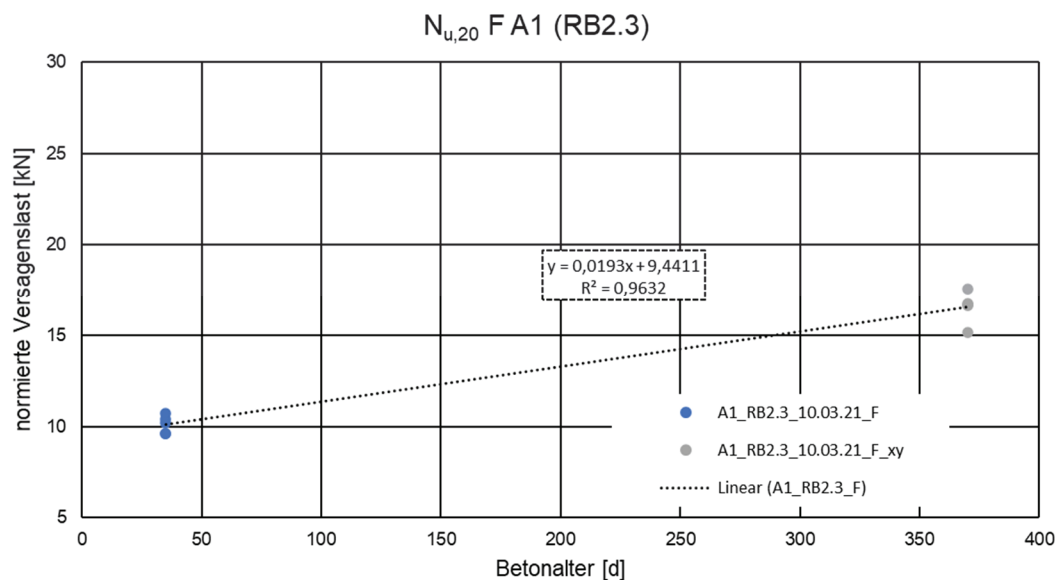


Abbildung 6-41: normierte Versagenslast über Betonalter, Bolzenanker F, A1, Forschungsvorhaben, RB2.3

6.4.5.5 Einfluss Recyclingbeton – Bolzenanker F

Die Ergebnisse, die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt wurden, werden in Abbildung 6-42 und Tabelle 6-42 zusammenfassend betrachtet. Zunächst wird deutlich, dass die normierten Versagenslasten unabhängig von der Zusammensetzung der Gesteinskörnung des Betons für die Prüfkörper über das Betonalter im Mittel steigen. Aufgrund der zeitlichen Begrenzung konnten Versuche in Prüfkörpern mit Recyclingbeton lediglich bis zum Prüfzeitraum t3 (maximales Alter: 370 Tage) durchgeführt werden. Für den Vergleich der normierten Versagenslasten wurden die oben diskutierten Ergebnisse denen aus Kapitel 6.2.5 gegenübergestellt. Für die Referenzwerte aus den Versuchen in Normalbeton wurden die normierten Versagenslasten für den Zeitraum t1 $N_{u,m,20,NB_A1_F,t1} = 18,9$ kN und für den Zeitraum t3 $N_{u,m,20,NB_A1_F,t3} = 21,1$ kN gewählt. Wie aus Kapitel 6.2.5 zu erkennen ist, liegen auch Ergebnisse aus Versuchen in Beton mit höherem Alter vor, allerdings lässt die Darstellung in Abbildung 6-9 darauf schließen, dass nach t3 eine weitere Steigerung der normierten Versagenslasten möglich erscheint. Um die normierten Versagenslasten aus Versuchen in Recycling- und Normalbeton möglichst vergleichbar zu machen, werden wie bereits erwähnt, die Lasten für t1 (maximal bis 39 Tage) und t3 (364 bis 375 Tage) gegenübergestellt.

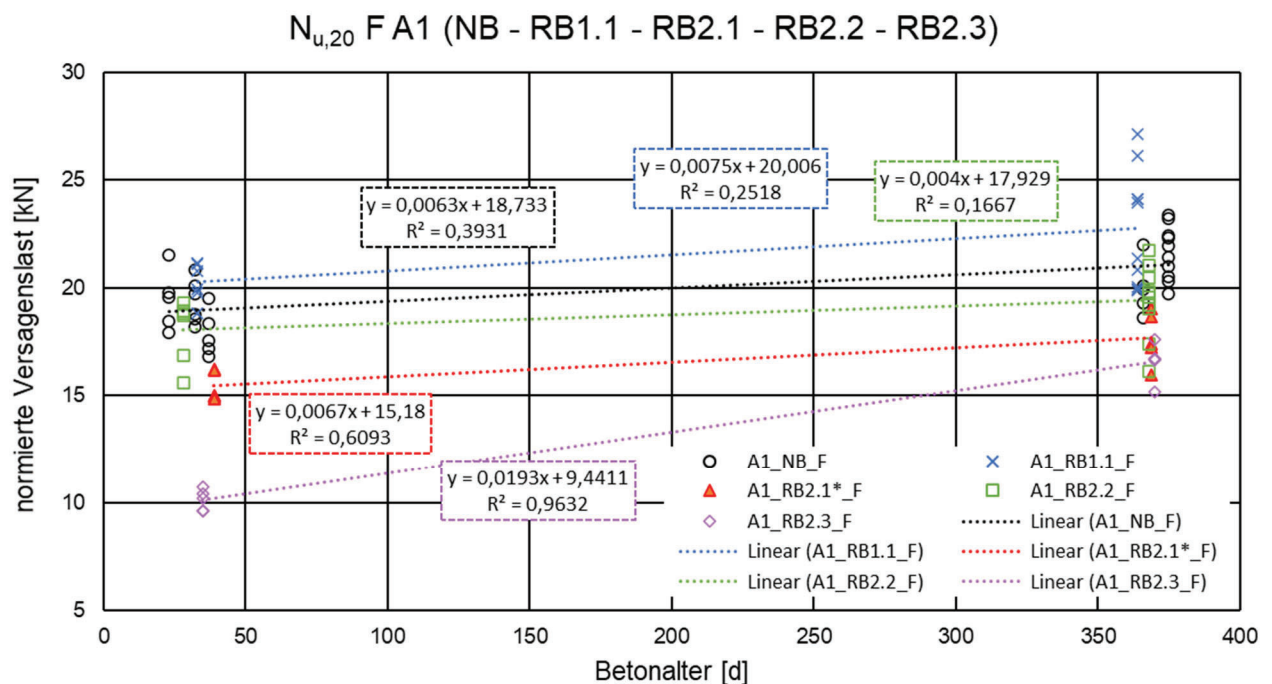


Abbildung 6-42: normierte Versagenslast über Betonalter, Bolzenanker F, A1, Vergleich NB – RB

Der Vergleich der mittleren normierten Versagenslasten zeigt für t1 und t3 eine ähnliche Tendenz. Die Lasten, die in RB1.1 ermittelt wurden, konnten die Referenzen sowohl im frühen als auch im späteren Prüfzeitraum bestätigen (108 % und 107 %). In den Versuchen in RB2.2 konnten in t1 im Mittel 95 % und in t3 92 % der Referenzlasten erzielt werden.

In den extern hergestellten Prüfkörpern konnten die Versagenslasten aus den Referenzversuchen nicht erreicht werden. In RB2.1* wurden im Mittel 82 % und 84 % erreicht. In RB2.3 waren es lediglich 53 % und 79 %. Zudem lassen die Ergebnisse der zwei Versuchsserien auf eine weitere Erhöhung der normierten Versagenslasten mit weiter steigendem Betonalter schließen. Für RB2.1* lässt die Darstellung in Abbildung 6-42 nicht darauf schließen. Da allerdings zum einen die Datenmenge sehr gering ist und bei der Analyse der Versuche an den Verbundankersystemen in RB2.1* neben denen in RB2.3 das größte Steigerungspotential der maximalen Versagenslasten erkannt wurde, sollte dies für die Auszugversuche mit dem Bolzenanker F nicht ausgeschlossen werden.

Die Streuungen der normierten Versagenslasten innerhalb einer Versuchsserie lag bei den Versuchen in allen Recyclingbetonen bei maximal 9,2 %. Dies stellt keine signifikante Abweichung zu den Ergebnissen in Normalbeton (max. 7,5 %) dar.

Tabelle 6-42: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Versagenslasten, Bolzenanker F, A1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,NB_A1_F_t3}$	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,NB_A1_F_t1}$
$N_{u,m,20,NB_A1_F_t3}$	21,1	100%	111%
$N_{u,m,20,RB1.1_A1_F_t3}$	22,7	108%	120%
$N_{u,m,20,RB2.1^*_A1_F_t3}$	17,7	84%	93%
$N_{u,m,20,RB2.2_A1_F_t3}$	19,4	92%	103%
$N_{u,m,20,RB2.3_A1_F_t3}$	16,6	79%	88%
$N_{u,m,20,NB_A1_F_t1}$	18,9	90%	100%
$N_{u,m,20,RB1.1_A1_F_t1}$	20,3	96%	107%
$N_{u,m,20,RB2.1^*_A1_F_t1}$	15,4	73%	82%
$N_{u,m,20,RB2.2_A1_F_t1}$	18,0	86%	95%
$N_{u,m,20,RB2.3_A1_F_t1}$	10,1	48%	53%

6.4.6 Betonschraube H

Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden sieben Versuchsserien A1 mit der Betonschraube H in Recyclingbeton durchgeführt. Aufgrund der geringen Datenmenge werden alle Ergebnisse zusammenfassend in Tabelle 6-43 und Abbildung 6-43 dargestellt. Analog zu den Versuchen mit dem Bolzenanker F wurden die Versuche mit der Betonschraube in RB1.1 und RB2.2 in Versuchskörpern aus eigener und in Betonen RB2.1* und RB2.3 in Versuchskörpern aus externer Herstellung durchgeführt.

In Recyclingbeton RB1.1 wurden zwei Versuchsserien im Prüfzeitraum t3 364 Tage nach Betonage der Prüfkörper durchgeführt. Es wurden normierte Versagenslasten zwischen 41,49 kN und 46,14 kN ermittelt. Die Streuung innerhalb der Versuchsserien lag bei 1,3 % und 4,6 %. Es liegen keine Ergebnisse aus dem Prüfzeitraum t1 vor.

In Recyclingbeton RB2.1* wurde jeweils eine Versuchsserie im Prüfzeitraum t1 und t3 durchgeführt. Aus den Versuchen resultierten normierte Versagenslasten zwischen 28,45 kN und 37,41 kN. Der maximale Wert wurde in der Versuchsserie im späteren Prüfzeitraum t3, der minimale Wert in der Versuchsserie im früheren Zeitraum t1 ermittelt.

In Beton mit ausschließlich Recyclinggesteinskörnung > 2mm RB2.2 wurde lediglich eine Versuchsserie durchgeführt. Aus Platzgründen im Prüfkörper waren lediglich vier Einzelversuche in diesem Versuchskörper möglich. Die normierten Versagenslasten streuten zwischen 39,49 kN und 40,40 kN.

In den Versuchskörpern aus externer Herstellung mit der Mischung RB2.3 wurde 35 Tage und 370 Tage nach Betonage der Prüfkörper jeweils eine Versuchsserie mit fünf Einzelversuchen durchgeführt. Im frühen Prüfzeitraum wurden normierte Versagenslasten zwischen 23,94 kN und 26,57 kN, im Mittel 25,47 kN, im späteren Prüfzeitraum normierte Versagenslasten zwischen 27,12 kN und 35,87 kN, im Mittel 31,16 kN erzielt. Die Streuung der Versuchsergebnisse innerhalb der jeweiligen Serie lag bei 4,5 % und 11,1 %.

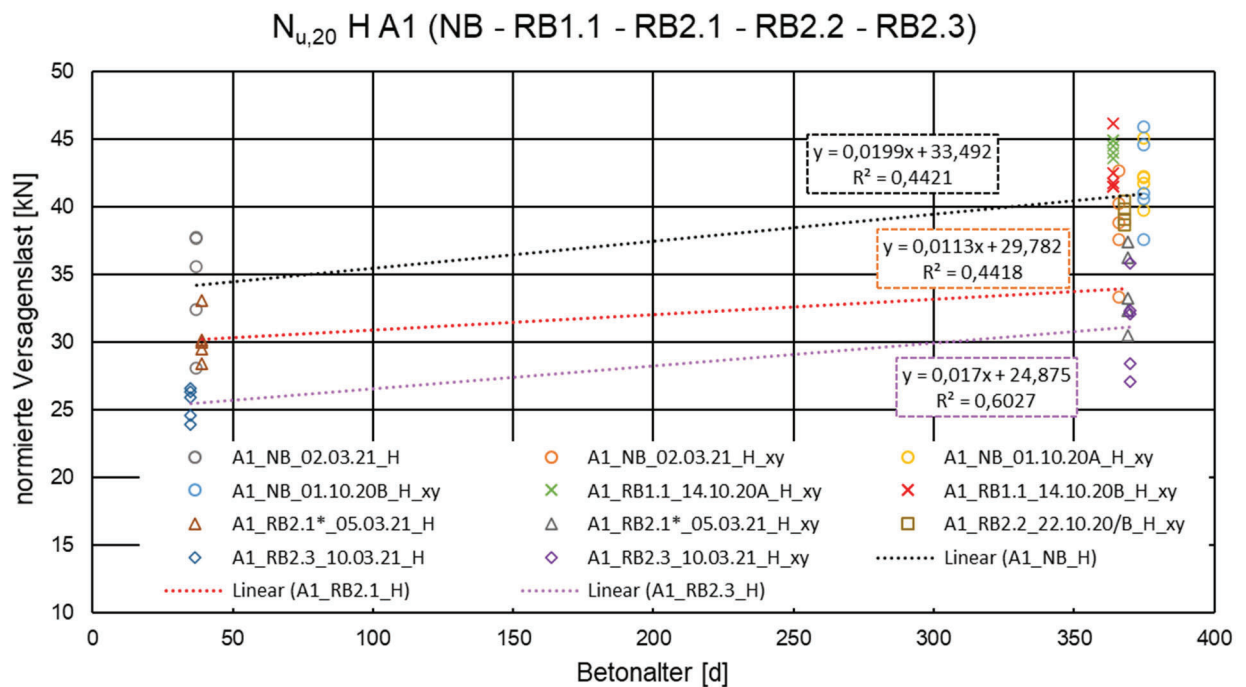


Abbildung 6-43: normierte Versagenslast über Betonalter, Betonschraube H, A1, Vergleich NB – RB

Tabelle 6-43: Testergebnisse Forschungsvorhaben: A1 – Betonschraube H, RB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$ [N/mm ²]	Betonalter [d]	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	Streuung [-]	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$ [kN]
3	A1_RB1.1_14.10.20A_H_xy	24,7	364	44,87	44,37	1,3%	42,41
			364	44,90			
			364	43,55			
			364	44,03			
			364	44,50			
3	A1_RB1.1_14.10.20B_H_xy	29,1	364	41,76	42,68	4,6%	35,95
			364	46,14			
			364	41,49			
			364	41,51			
4	A1_RB2.1*_05.03.21_H	27,2	39	28,45	30,22	5,7%	24,38
			39	29,98			
			39	33,06			
			39	29,48			
			39	30,15			
4	A1_RB2.1*_05.03.21_H_xy	36,0	369	33,22	33,96	8,4%	24,30
			369	32,37			
			369	36,28			
			369	30,51			
			369	37,41			
3	A1_RB2.2_22.10.20/B_H_xy	27,4	368	39,85	39,49	2,0%	36,38
			368	38,65			
			368	40,40			
			368	39,05			
4	A1_RB2.3_10.03.21_H	27,9	35	24,59	25,47	4,5%	21,56
			35	26,57			
			35	25,91			
			35	26,34			
			35	23,94			
4	A1_RB2.3_10.03.21_H_xy	35,5	370	28,43	31,16	11,1%	19,38
			370	35,87			
			370	32,05			
			370	32,31			
			370	27,12			

Tabelle 6-44 enthält die mittleren normierten Versagenslasten aus den oben dargestellten Versuchsserien sortiert nach Prüfzeitraum und Betonmischung. Als Referenz werden die in Kapitel 6.2.6 diskutierten Versagenslasten aus Versuchen in Normalbeton $N_{u,m,20,NB_A1_H_t1} = 34,3$ kN und $N_{u,m,20,NB_A1_H_t3} = 40,9$ kN.

Der Vergleich der normierten mittleren Versagenslasten zeigt, dass die Auszugversuche in RB1.1 und RB2.2 die Referenzwerte im Mittel mit 107 % bzw. 97 % bestätigen konnten. Die Ergebnisse, die aus den Versuchen in den extern hergestellten Versuchskörpern RB2.1* und RB2.3 resultieren, zeigen sowohl für den Prüfzeitraum t3 (83 % und 76 %) als auch für den Prüfzeitraum t1 (88 % und 74 %), dass die mittleren normierten Versagenslasten der Referenzversuche nicht erreicht werden konnten.

Tabelle 6-44: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Versagenslasten, Betonschraube H, A1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,NB_A1_H_t3}$	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,NB_A1_H_t1}$
$N_{u,m,20,NB_A1_H_t3}$	40,9	100%	119%
$N_{u,m,20,RB1.1_A1_H_t3}$	43,5	107%	127%
$N_{u,m,20,RB2.1^*_A1_H_t3}$	34,0	83%	99%
$N_{u,m,20,RB2.2_A1_H_t3}$	39,5	97%	115%
$N_{u,m,20,RB2.3_A1_H_t3}$	31,2	76%	91%
<hr/>			
$N_{u,m,20,NB_A1_H_t1}$	34,3	84%	100%
$N_{u,m,20,RB1.1_A1_H_t1}$	-	-	-
$N_{u,m,20,RB2.1^*_A1_H_t1}$	30,2	74%	88%
$N_{u,m,20,RB2.2_A1_H_t1}$	-	-	-
$N_{u,m,20,RB2.3_A1_H_t1}$	25,5	62%	74%

6.4.7 Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Bolzenanker F und Betonschraube H ungerissener Beton

In den Kapitel 6.4.5 und 6.4.6 wurden die Ergebnisse aus den zentrischen Auszugversuchen mit weiter Abstützung in ungerissenem Recyclingbeton mit dem Bolzenanker F und der Betonschraube H dargestellt. Es standen Versuchskörper aus eigener Herstellung RB1.1 und RB2.2 sowie aus externer Herstellung RB2.1* und RB2.3 zur Verfügung. Da die Betonschraube erst zu einem späteren Zeitpunkt in das Versuchsprogramm aufgenommen wurde, konnten nicht in jedem Prüfzeitraum Versuche durchgeführt werden. Für die Beurteilung des Einflusses des Recyclingbetons auf die normierte Versagenslast wurden die Ergebnisse aus Kapitel 6.2 als Referenz angesetzt. Hierbei handelt es sich um normierte Auszuglasten aus Versuchen in Normalbeton, die innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden. Da sowohl in Normalbeton als auch in Recyclingbeton ein Einfluss des Betonalters auf die Höhe der normierten Versagenslast erkannt wurde, werden die Testergebnisse für beide Befestigungsmittel in Tabelle 6-45 und Abbildung 6-44 unterteilt für die Prüfzeiträume t1 und t3 betrachtet. Zudem werden die Ergebnisse getrennt betrachtet für die vier Betone.

In allen Versuchen wurde ein Betonversagen beobachtet. Auf die Versagensarten wird in Kapitel 7.2 näher eingegangen.

Tabelle 6-45: Verhältniswerte der Versagenslasten aus A1: RB/NB für Bolzenanker F und Betonschraube H

Beton	Bezeichnung	$N_{u,m,20,RB_A1_t3} / N_{u,m,20,NB_A1_t3}$	$N_{u,m,20,RB_A1_t1} / N_{u,m,20,NB_A1_t1}$
[-]	[-]	[-]	[-]
RB1.1	$N_{u,m,20,RB1.1_A1_F}$	1,08	1,07
	$N_{u,m,20,RB1.1_A1_H}$	1,07	-
RB2.1*	$N_{u,m,20,RB2.1^*_A1_F}$	0,84	0,82
	$N_{u,m,20,RB2.1^*_A1_H}$	0,83	0,88
RB2.2	$N_{u,m,20,RB2.2_A1_F}$	0,92	0,95
	$N_{u,m,20,RB2.2_A1_H}$	0,97	-
RB2.3	$N_{u,m,20,RB2.3_A1_F}$	0,79	0,53
	$N_{u,m,20,RB2.3_A1_H}$	0,76	0,74

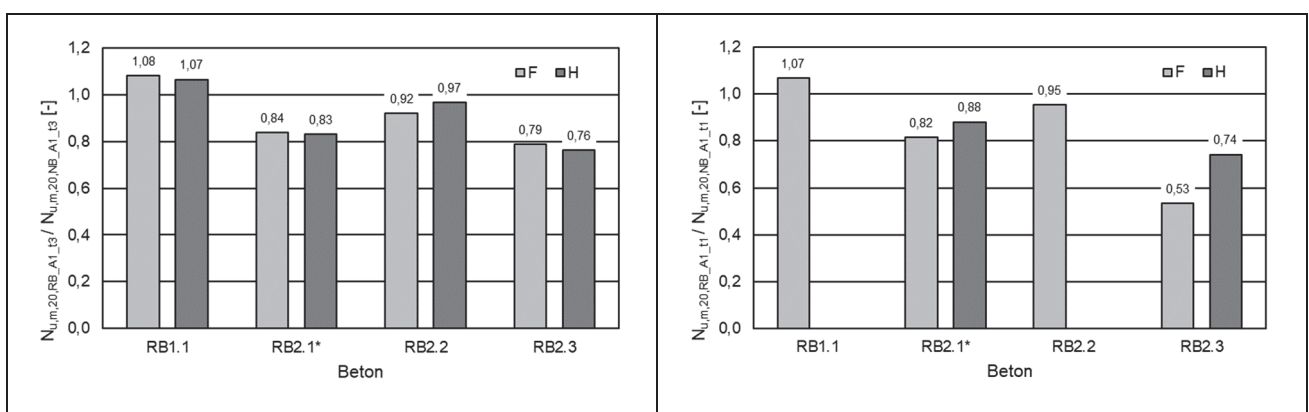


Abbildung 6-44: Verhältnis der mittleren normierten Versagenslasten (F und G) aus A1 RB/NB nach Betonmischung, links Prüfzeitraum t3, rechts: Prüfzeitraum t1

Die normierten Versagenslasten, die in den Versuchen in RB1.1 im Prüfzeitraum t3 ermittelt wurden, konnten im Mittel 107 % und 108 % der normierten Versagenslasten aus den Referenzversuche mit dem Bolzenanker und der Betonschraube erreichen. Für den Prüfzeitraum t1 wurden lediglich Versuche mit dem Bolzenanker durchgeführt. Auch hier konnten die zugehörigen Referenzwerte

bestätigt werden (107 %). Mit dem Bolzenanker wurden in beiden Prüfzeiträumen je zwei Versuchsserien, mit der Betonschraube ebenfalls zwei Versuchsserien in t3 durchgeführt.

In Versuchskörpern RB2.1* aus externer Herstellung wurden mit dem Bolzenanker und der Betonschraube in beiden Prüfzeiträumen jeweils eine Versuchsserie durchgeführt. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Referenzversuchen zeigt ein vergleichbares Bild für beide Befestigungsmittel. In t3 wurden 84 % und 83 %, in t1 82 % und 88 % der jeweils zugehörigen Referenzwerte erreicht. Die deutliche Abweichung zu den normierten Versagenslasten aus den Versuchen in Normalbeton sind zum frühen Zeitpunkt t1 aus den Versuchen mit den Verbundankersystemen aufgefallen, allerdings konnten mit den Verbundankersystemen im späteren Prüfzeitraum die Referenzwerte nahezu erreicht werden. Dies konnte durch die Versuche mit dem Bolzenanker und der Betonschraube nicht gezeigt werden.

Die Betonmischung RB2.1* enthält zwar einen höheren Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung als die Mischungen RB1.1 und RB2.1, allerdings wurde erwartet, dass diese geringe Abweichung sich nicht so deutlich in den Versagenslasten ausschlägt. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Datenmenge sehr gering ist. Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass zu einem noch späteren Prüfzeitpunkt t4 die normierten Versagenslasten in RB2.1* deutlicher steigen würden als die zugehörigen Werte in den Referenzbetonen und somit der Verhältniswert der Versagenslasten gegen 1,0 streben könnte. Um dies zu untersuchen und die Datenmenge zu vergrößern, sollten weitere Versuche durchgeführt werden.

Bei Betrachtung der Verhältniswerte der normierten Versagenslasten aus den Versuchen in RB2.2 und den zugehörigen Referenzwerten zeigt sich ein vergleichbares Bild wie bei den Verbundankersystemen. Die normierten Versagenslasten konnten nahezu erreicht werden. Für den Bolzenanker konnten 92 % und 95 % der Referenzen in t3 und t1 erreicht werden. Die Betonschraube wurde nur in Versuchskörpern zu einem späteren Zeitpunkt getestet und konnte 97 % der Referenzen erreichen.

In Beton mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen inklusive Brechsand (RB2.3) wurden die normierten Versagenslasten aus den Referenzversuche sowohl mit dem Bolzenanker als auch mit der Betonschraube deutlich unterschritten. Im Prüfzeitraum t3 konnten in RB2.3 lediglich 79 % und 76 % der normierten Versagenslasten aus den Versuchen in Normalbeton erzielt werden. Im Prüfzeitraum t1 war die Abweichung noch deutlicher. Es wurden nur 53 % und 74 % erreicht.

6.5 Diskussion der Tragfähigkeit in gerissenem Recyclingbeton

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der zentrischen Auszugversuche in gerissenem Beton ($\Delta w = 0,5 \text{ mm}$) mit rezyklierten Gesteinskörnungen vorgestellt. Es werden zu jeder Versuchsserie die Betondruckfestigkeit und das Betonalter am Tag der Prüfung des Befestigungssystems sowie die normierten Versagenslasten aus den Versuchen am Bolzenanker und der Betonschraube und die normierten Verbundspannungen aus den Versuchen mit den Verbundankersystemen A, B und D aufgeführt sowie deren Mittelwerte, die Streuung und die 5 %-Fraktilwerte angegeben.

Aufgrund der geringeren Anzahl der Versuchsserien ist es möglich, die Testergebnisse aus allen Betonchargen zusammenfassend und dennoch übersichtlich in einem Diagramm je Verankerungsmittel darzustellen. Die Ergebnisse aus den Referenzversuchen in Normalbeton (Kapitel 6.3) werden zum Vergleich in den Diagrammen hinzugefügt.

In Versuchskörpern mit RB1.1 und RB2.1 aus eigener Herstellung wurden lediglich Versuche im Zeitraum t1 in einem Betonalter zwischen 29 und 35 Tagen durchgeführt. In den Betonchargen RB2.1* und RB2.3 aus externer Herstellung wurden jeweils im Zeitraum t1 und t3 Versuche mit dem Bolzenanker und den Verbundankersystemen durchgeführt. Die extern hergestellten Prüfkörper mit den Betonchargen RB2.1* und RB2.3 wurden in dem Umfang geplant, dass ausreichend Setzstellen für jeweils eine zweite Versuchsserie im Prüfzeitraum t3 vorhanden waren.

6.5.1 Verbundankersystem A

In Tabelle 6-46 und Abbildung 6-45 werden die Ergebnisse der zentrischen Auszugversuche mit enger Abstützung mit Verbundankersystem A in gerissenem Recyclingbeton dargestellt. Die grafische Darstellung beinhaltet zudem die Ergebnisse aus den Referenzversuchen in Normalbeton. Wie bereits in den vorherigen Kapiteln vorgestellt, ist auch bei Betrachtung der vorliegenden Ergebnisse eine Erhöhung der normierten Verbundspannungen mit steigendem Alter der Versuchskörper erkennbar.

Tabelle 6-46: Testergebnisse Forschungsvorhaben: B10 – Verbundankersystem A, RB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
2	B10_RB1.1_15.07.20_A	23,5	30	15,85	15,61	8,4%	11,14
			30	17,80			
			30	15,02			
			30	14,58			
			30	14,80			
4	B10_RB2.1*_05.03.21_A	27,2	39	15,97	15,43	2,5%	14,15
			39	15,11			
			39	15,60			
			39	15,43			
			39	15,05			
4	B10_RB2.1*_05.03.21_A_xy	36,0	371	18,67	19,46	9,3%	13,30
			371	16,99			
			371	21,69			
			371	19,31			
			371	20,65			
2	B10_RB2.1_17.07.20_A	23,9	32	15,11	16,30	9,1%	11,23
			32	18,46			
			32	15,03			
			32	15,69			
			32	17,21			
4	B10_RB2.3_10.03.21_A	28,0	36	12,18	10,69	11,8%	6,39
			36	11,09			
			36	9,72			
			36	9,07			
			36	11,37			
4	B10_RB2.3_10.03.21_A_xy	35,5	372	10,52	12,61	10,2%	8,22
			372	12,31			
			372	13,34			
			372	13,81			
			372	13,07			

Tabelle 6-47 zeigt den Vergleich der mittleren normierten Verbundspannungen aus den Versuchen in Recyclingbeton mit den Ergebnissen der Referenzversuche. Für den späteren Prüfzeitraum t3 liegen lediglich Ergebnisse aus den Versuchen in extern hergestellten Prüfkörpern vor. Im Mittel konnten in der Versuchsserie B10_RB2.1*_05.03.21_A_xy 82 % und in B10_RB2.3_10.03.21_A_xy lediglich 53 % der normierten Verbundspannungen der Referenzversuche erreicht werden.

Im Prüfzeitraum t1 zeigt sich ein vergleichbares Bild für die Betonchargen aus externer Herstellung. In RB2.1* wurden 81% und in RB2.3 56 % der mittleren normierten Verbundspannung aus den Referenzversuche ermittelt. Für den Prüfzeitraum t1 liegen zusätzlich Ergebnisse aus den Betonchargen RB1.1 und RB2.1 aus eigener Herstellung vor. Mit 15,6 N/mm² und 16,3 N/mm² konnten jedoch ebenfalls nur 66 % und 69 % der entsprechenden Referenzversuche erreicht werden.

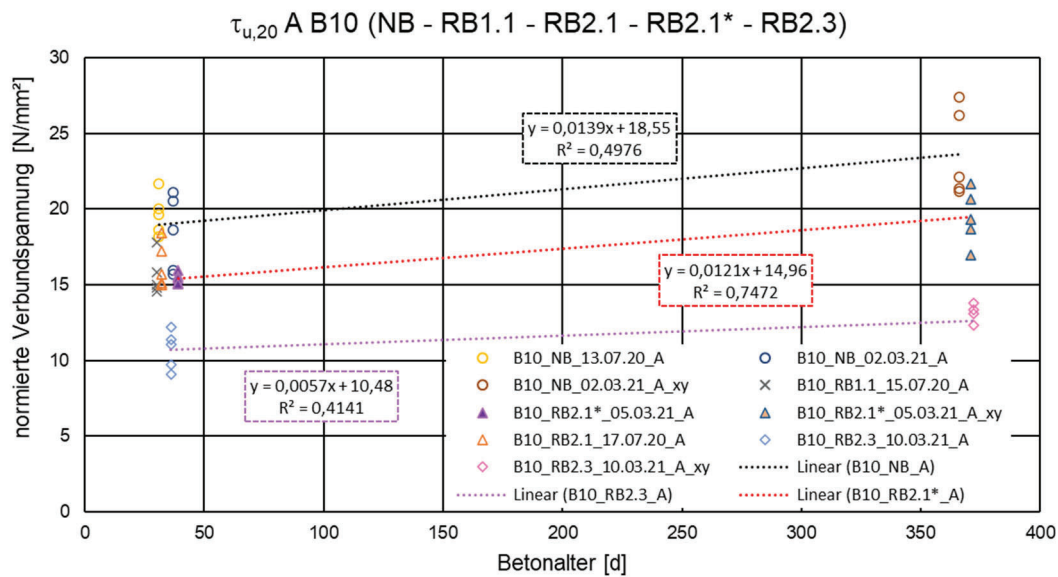


Abbildung 6-45: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System A, B10, Vergleich NB – RB

Tabelle 6-47: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Verbundspannungen, System A, B10

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm²]	Verhältnisswert zu $\tau_{u,m,20,NB_B10_A_t3}$	Verhältnisswert zu $\tau_{u,m,20,NB_B10_A_t1}$
$\tau_{u,m,20,NB_B10_A_t3}$	23,7	100%	124%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_B10_A_t3}$	-	-	-
$\tau_{u,m,20,RB2.1_B10_A_t3}$	-	-	-
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_B10_A_t3}$	19,5	82%	102%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_B10_A_t3}$	12,6	53%	66%
$\tau_{u,m,20,NB_B10_A_t1}$	19,0	80%	100%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_B10_A_t1}$	15,6	66%	82%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_B10_A_t1}$	16,3	69%	86%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_B10_A_t1}$	15,4	65%	81%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_B10_A_t1}$	10,7	45%	56%

6.5.2 Verbundankersystem B

Tabelle 6-48 fasst die Ergebnisse aus den Auszugversuchen in gerissenem Recyclingbeton mit dem Verbundankersystem B zusammen.

Tabelle 6-48: Testergebnisse Forschungsvorhaben: B10 – Verbundankersystem B, RB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
2	B10_RB1.1_15.07.20_B	23,5	30	10,24	12,43	17,9%	4,87
			30	10,48			
			30	15,70			
			30	13,08			
			30	12,67			
4	B10_RB2.1*_05.03.21_B	27,2	39	10,56	11,42	16,0%	5,20
			39	12,55			
			39	14,08			
			39	9,95			
			39	9,96			
4	B10_RB2.1*_05.03.21_B_xy_ch	36,0	371	11,38	11,09	4,8%	9,30
			371	11,39			
			371	10,19			
			371	11,05			
			371	11,45			
2	B10_RB2.1_17.07.20_B	23,9	32	11,54	10,96	12,2%	6,43
			32	10,36			
			32	10,91			
			32	9,21			
			32	12,79			
4	B10_RB2.3_10.03.21_B	28,0	36	5,97	5,85	9,2%	4,01
			36	5,78			
			36	5,00			
			36	6,01			
			36	6,49			
4	B10_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch	35,5	372	9,17	7,99	11,7%	4,82
			372	8,04			
			372	8,29			
			372	7,88			
			372	6,58			

Die Darstellung der normierten Verbundspannungen über das Betonalter in Abbildung 6-46 beinhaltet zusätzlich die Ergebnisse der Versuche in Normalbeton aus Kapitel 6.3. Für Normalbeton und die extern hergestellten Betone wurden Versuche in t1 und t3 durchgeführt. Versuchsergebnisse aus t1 liegen lediglich aus den Versuchen in den Versuchskörpern aus eigener Herstellung vor. Der Vergleich der mittleren normierten Verbundspannungen in Tabelle 6-49 zeigt, dass die im Prüfzeitraum ermittelten normierten Verbundspannungen in RB2.1* im Mittel 87 % und in RB2.3 im Mittel lediglich 62 % der Referenzwerte erreichten.

Im Prüfzeitraum t1 – hier 30 bis 36 Tage nach Betonage der Versuchskörper – wurde die mittlere normierte Verbundspannung aus den Versuchen in Normalbeton mit den Versuchsserien in den Betonen RB1.1, RB2.1 und RB2.1* deutlich überschritten (125 %, 110 % und 115 %). Mit einer mittleren normierten Verbundspannung von 5,8 N/mm² aus den Versuchen in RB2.3 konnten nur 59 % der normierten mittleren Verbundspannung aus den Referenzversuchen erreicht werden.

Die normierten Verbundspannungen, die aus den Versuchen in den Versuchskörpern der Charge RB2.3 und den Referenzversuchen resultieren, steigen tendenziell mit steigendem Alter der Versuchskörper. Dies war zu erwarten aufgrund der bisher vorgestellten Ergebnisse. Es ist zu erwähnen, dass dies für die Versuche in RB2.1* nicht gezeigt werden konnte. Eine mittlere normierte Verbundspannung in den Versuchskörpern im Alter von 39 Tagen von 11,4 N/mm² und im Alter von

371 Tagen von 11,1 N/mm² wurde ermittelt. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Anzahl der durchgeführten Versuche deutlich geringer ist als in ungerissenem Beton.

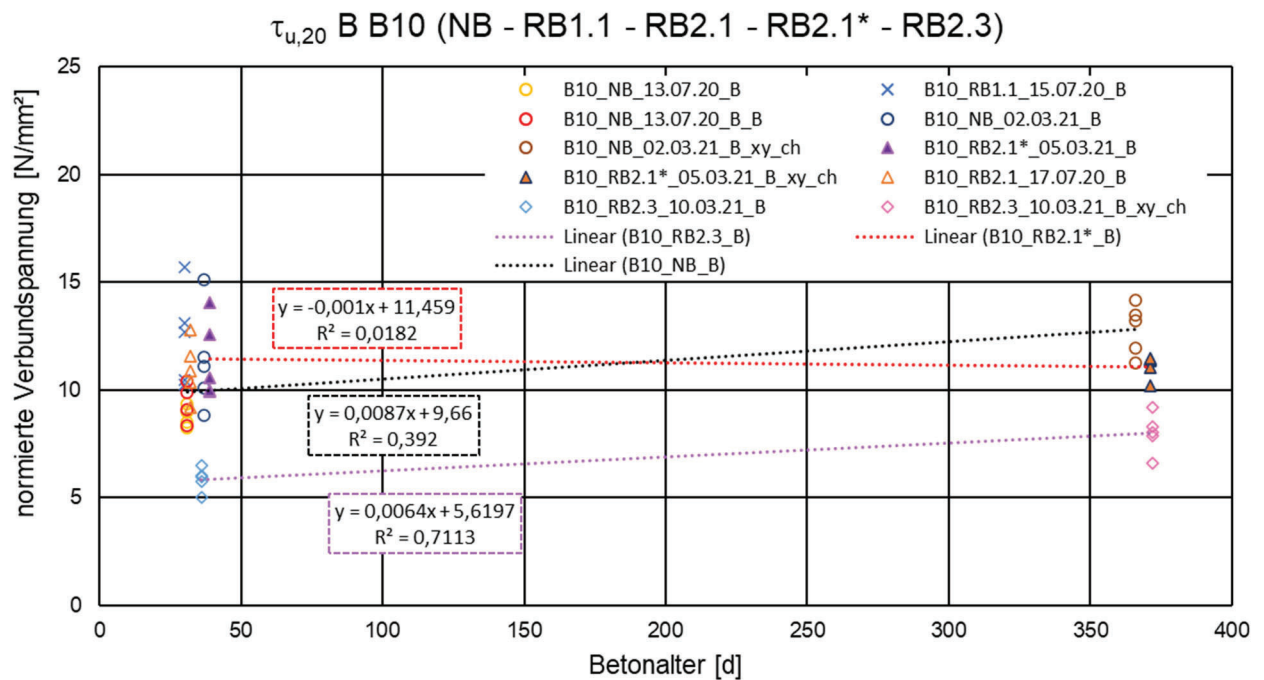


Abbildung 6-46: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System B, B10, Vergleich NB – RB

Tabelle 6-49: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Verbundspannungen, System B, B10

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm ²]	Verhältnswert zu $\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t3}$	Verhältnswert zu $\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t1}$
$\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t3}$	12,8	100%	129%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_B10_D_t3}$	-	-	-
$\tau_{u,m,20,RB2.1_B10_D_t3}$	-	-	-
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_B10_D_t3}$	11,1	87%	111%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_B10_D_t3}$	8,0	62%	80%
$\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t1}$	10,0	78%	100%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_B10_D_t1}$	12,4	97%	125%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_B10_D_t1}$	11,0	86%	110%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_B10_D_t1}$	11,4	89%	115%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_B10_D_t1}$	5,8	46%	59%

6.5.3 Verbundankersystem D

Tabelle 6-50 und Abbildung 6-47 fassen die Ergebnisse der Auszugversuche in gerissenem Recyclingbeton mit Verbundankersystem D zusammen. Der Trend einer steigenden normierten Verbundspannung mit steigendem Betonalter der Prüfkörper aus den Referenzversuchen in Normalbeton und aus den Versuchen in ungerissenem Beton konnte ebenfalls in den Versuchen in RB2.1* gezeigt werden. Die Ergebnisse der Versuche in RB2.3 zeigen keine signifikante Steigerung der normierten Verbundspannungen über das Betonalter, die aus den bisher vorgestellten Versuchsergebnissen zu erwarten war.

Tabelle 6-50: Testergebnisse Forschungsvorhaben: B10 – Verbundankersystem D, RB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
2	B10_RB1.1_15.07.20_D	23,9	35	8,92	8,12	10,7%	5,15
			35	7,61			
			35	7,01			
			35	9,06			
			35	7,98			
4	B10_RB2.1*_05.03.21_D	27,2	39	8,28	8,09	12,5%	4,66
			39	6,80			
			39	7,36			
			39	9,31			
			39	8,69			
4	B10_RB2.1*_05.03.21_D_xy_ch	36,0	371	10,13	11,91	16,7%	5,13
			371	9,71			
			371	12,39			
			371	14,54			
			371	12,77			
2	B10_RB2.1_17.07.20_D	24,0	33	12,25	9,25	20,2%	2,90
			33	9,80			
			33	7,58			
			33	8,19			
			33	8,41			
4	B10_RB2.3_10.03.21_D	28,0	36	4,88	6,13	12,2%	3,60
			36	6,75			
			36	6,07			
			36	6,59			
			36	6,38			
4	B10_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch	35,5	372	7,21	6,65	9,0%	4,61
			372	6,56			
			372	5,67			
			372	7,02			
			372	6,80			

Der Vergleich der dargestellten Testergebnisse mit den Referenzversuchen zeigt, dass in den Auszugversuchen in Recyclingbeton – unabhängig von der Zusammensetzung der Gesteinskörnung – die normierten Verbundspannungen nicht bestätigt werden konnten. Im Prüfzeitraum t3, in dem lediglich Versuche in den extern hergestellten Prüfkörpern der Charge RB2.1* und RB2.3 durchgeführt wurden, wurden 89 % und 50 % der mittleren normierten Verbundspannungen aus den Referenzversuchen ermittelt. Im Prüfzeitraum t1 konnten in diesen Chargen 76 % und 58 % erreicht werden.

In den Betonchargen RB1.1 und RB2.1 aus eigener Herstellung konnten mit 8,1 N/mm² und 9,2 N/mm² lediglich 76 % und 87 % der Referenz $\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t1} = 10,6$ N/mm² erreicht werden.

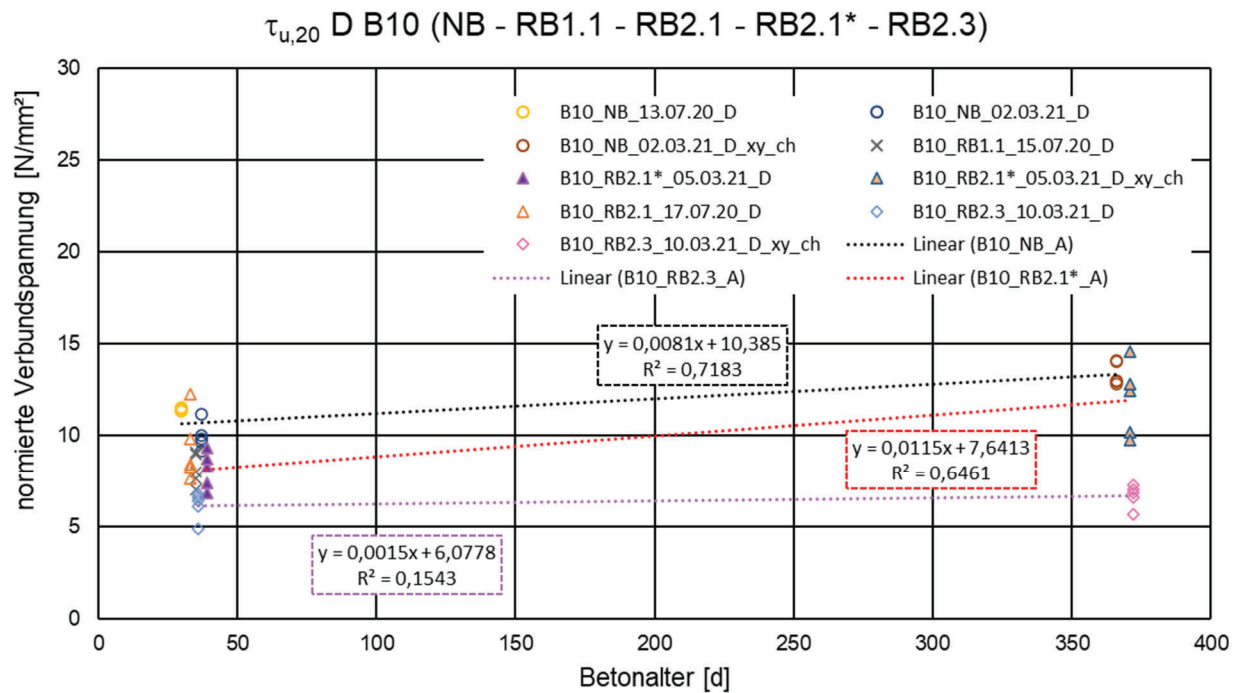


Abbildung 6-47: normierte Verbundspannungen über Betonalter, System D, B10, Vergleich NB – RB

Tabelle 6-51: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Verbundspannungen, System D, B10

Bezeichnung	norm. mittlere Verbundspannung [N/mm²]	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t3}$	Verhältniswert zu $\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t1}$
$\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t3}$	13,3	100%	125%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_B10_D_t3}$	-	-	-
$\tau_{u,m,20,RB2.1_B10_D_t3}$	-	-	-
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_B10_D_t3}$	11,9	89%	112%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_B10_D_t3}$	6,7	50%	62%
$\tau_{u,m,20,NB_B10_D_t1}$	10,6	80%	100%
$\tau_{u,m,20,RB1.1_B10_D_t1}$	8,1	61%	76%
$\tau_{u,m,20,RB2.1_B10_D_t1}$	9,2	69%	87%
$\tau_{u,m,20,RB2.1^*_B10_D_t1}$	8,1	61%	76%
$\tau_{u,m,20,RB2.3_B10_D_t1}$	6,1	46%	58%

6.5.4 Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Verbundankersysteme gerissener Beton

Tabelle 6-52 und Abbildung 6-48 fasst die oben erläuterten Verhältniswerte zusammen. Dabei wurden die erzielten Versuchsergebnisse aus den zentrischen Auszugversuchen mit enger Abstützung (hier alle B10 benannt) in Prüfkörpern aus Recyclingbeton mit unterschiedlichen Zusammensetzungen der Gesteinskörnung den Ergebnissen aus den Referenzversuchen aus Kapitel 6.3 gegenübergestellt. Es wurden mittlere normierte Verbundspannungen verglichen und dabei zwischen den drei Verbundankersystemen A, B und D unterschieden.

Die Prüfkörper wurden mit unterschiedlichen Anteilen an Recyclinggesteinskörnung hergestellt. Die Chargen RB1.1 und RB2.1 stammen aus eigener Herstellung, die Chargen RB2.1* und RB2.3 aus externer. In den Prüfkörpern aus eigener Herstellung wurden lediglich Versuche im Prüfzeitraum t1 durchgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse aus den Versuchen in ungerissenem Beton, wurden die Anzahl der Prüfkörper mit den Betonen RB2.1* und RB2.3 so festgelegt, dass ausreichend Setzstellen vorhanden sind, um sowohl in t1 als auch in t3 Versuche zu ermöglichen.

Tabelle 6-52: Verhältniswerte der Verbundspannungen aus B10: RB/NB für die Verbundankersysteme A, B, D

Beton	Bezeichnung	$\tau_{u,m,20,RB_B10_t3} / \tau_{u,m,20,NB_B10_t3}$	$\tau_{u,m,20,RB_B10_t1} / \tau_{u,m,20,NB_B10_t1}$
[-]	[-]	[-]	[-]
RB1.1	$\tau_{u,m,20,RB1.1_A_B10}$	-	0,82
	$\tau_{u,m,20,RB1.1_B_B10}$	-	1,25
	$\tau_{u,m,20,RB1.1_D_B10}$	-	0,76
RB2.1	$\tau_{u,m,20,RB2.1_A_B10}$	-	0,86
	$\tau_{u,m,20,RB2.1_B_B10}$	-	1,10
	$\tau_{u,m,20,RB2.1_D_B10}$	-	0,87
RB2.1*	$\tau_{u,m,20,RB2.1*_A_B10}$	0,82	0,81
	$\tau_{u,m,20,RB2.1*_B_B10}$	0,87	1,15
	$\tau_{u,m,20,RB2.1*_D_B10}$	0,89	0,76
RB2.3	$\tau_{u,m,20,RB2.3_A_B10}$	0,53	0,56
	$\tau_{u,m,20,RB2.3_B_B10}$	0,62	0,59
	$\tau_{u,m,20,RB2.3_D_B10}$	0,50	0,58

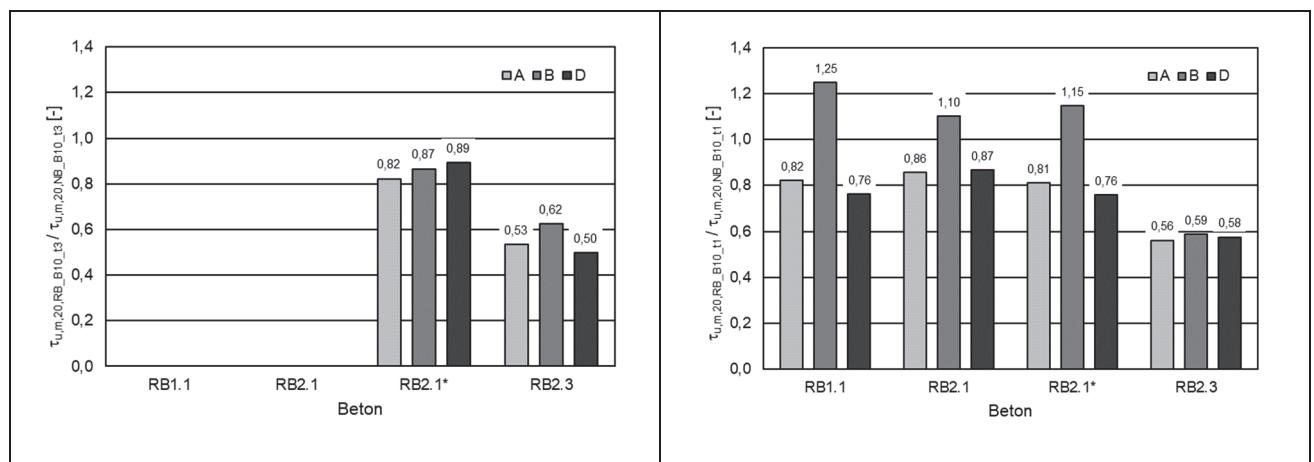


Abbildung 6-48: Verhältnis der mittleren normierten Verbundspannungen aus B10 RB/NB nach Betonmischung, links: Prüfzeitraum t3, rechts: Prüfzeitraum t1

Bei der Betrachtung der Vergleichswerte im Prüfzeitraum t3 wird deutlich, dass für gerissenen Beton keines der Produkte die Referenzwerte bestätigen konnte. In RB2.1* konnten zwischen 82 % und 89 % der mittleren normierten Verbundspannungen aus den Referenzversuchen erreicht werden.

Im Prüfzeitraum t1 wurden zu den Versuchen in RB2.1* und RB2.3 zusätzlich Versuche in RB1.1 und RB2.1 durchgeführt. Für die Betone RB1.1, RB2.1 und RB2.1* ergibt sich ein einheitliches Bild. Mit den Systemen A und D wurden 76 % bis 87 % der Referenzen erreicht. Mit dem System B wurden deutlich höhere mittlere normierte Verbundspannungen in den genannten Recyclingbetonen ermittelt als in den Referenzbetonen. In dem Recyclingbeton RB2.3 mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen inklusive Brechsand wurden 56 % bis 59 % der Referenzwerte ermittelt.

6.5.5 Bolzenanker F

Tabelle 6-53 und Abbildung 6-49 zeigen die Versuchsergebnisse, die in gerissenem Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit dem Bolzenanker F ermittelt wurden. Die in den extern hergestellten Versuchskörpern ermittelten Versagenslasten zeigen den leichten Trend einer Steigerung mit steigendem Betonalter, wobei dieser in RB2.3 nicht signifikant ist.

Verglichen mit den Referenzen, die in Kapitel 6.2 erläutert wurden, konnten mit den Versuchen in den extern hergestellten Versuchskörpern RB2.1* und RB2.3 im Prüfzeitraum t3 97 % und 76 % und im Zeitraum t1 92 % und 77 % erreicht werden. Für die Chargen RB1.1 und RB2.1 aus eigener Herstellung liegen nur Versuchsergebnisse aus dem Prüfzeitraum t1 vor. Die Auszuglasten aus den Referenzserien konnten mit 107 % und 103 % bestätigt werden.

Tabelle 6-53: Testergebnisse Forschungsvorhaben: F1 – Bolzenanker F, RB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$ [N/mm ²]	Betonalter [d]	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$ [kN]	Streuung	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$ [kN]
2	F1_RB1.1_15.07.20_F	23,4	29	14,02	14,03	8,0%	10,21
			29	15,15			
			29	14,36			
			29	14,47			
			29	12,16			
4	F1_RB2.1*_05.03.21_F	27,1	38	12,40	11,98	5,1%	9,89
			38	11,39			
			38	11,23			
			38	12,43			
			38	12,45			
4	F1_RB2.1*_05.03.21_F_xy	36	368	11,66	13,47	7,7%	9,92
			368	14,25			
			368	13,56			
			368	13,99			
			368	13,90			
2	F1_RB2.1_17.07.20_F	23,8	31	14,02	13,42	7,1%	10,17
			31	12,03			
			31	13,70			
			31	12,91			
			31	14,42			
4	F1_RB2.3_10.03.21_F	27,9	35	10,43	10,12	4,9%	8,44
			35	10,20			
			35	9,62			
			35	9,61			
			35	10,72			
4	F1_RB2.3_10.03.21_F_xy	35,5	374	9,86	10,58	12,1%	6,24
			374	10,11			
			374	9,58			
			374	10,58			
			374	12,77			

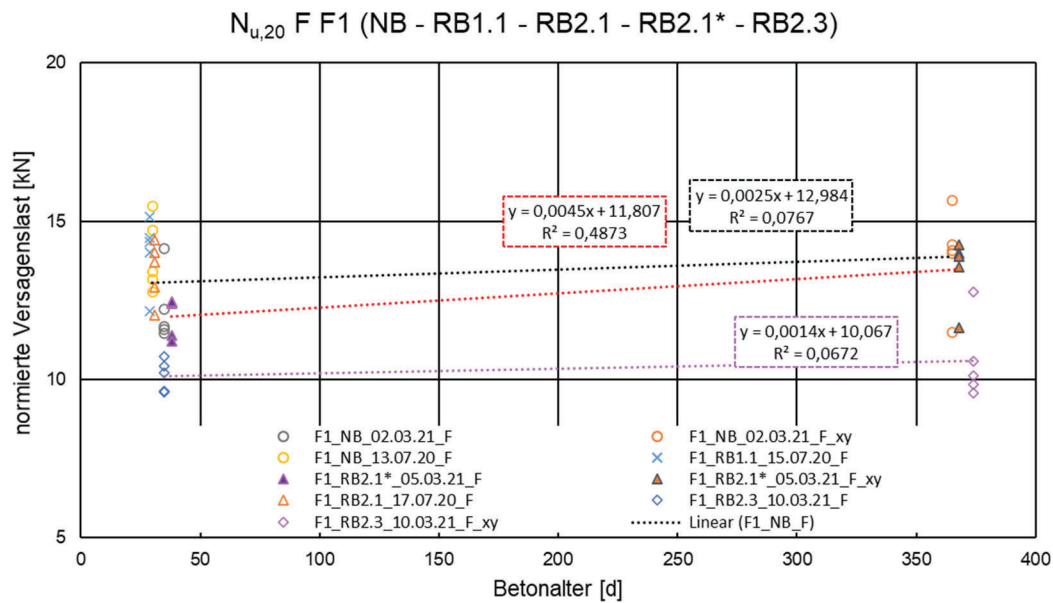


Abbildung 6-49: normierte Versagenslast über Betonalter, Bolzenanker F, F1, Vergleich NB – RB

Tabelle 6-54: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Versagenslasten, Bolzenanker F, F1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältnswert zu $N_{u,m,20,NB_F1_F_{t3}}$	Verhältnswert zu $N_{u,m,20,NB_F1_F_{t1}}$
$N_{u,m,20,NB_F1_F_{t3}}$	13,9	100%	111%
$N_{u,m,20,RB1.1_F1_F_{t3}}$	-	-	-
$N_{u,m,20,RB2.1^*_F1_F_{t3}}$	13,5	97%	103%
$N_{u,m,20,RB2.1_F1_F_{t3}}$	-	-	-
$N_{u,m,20,RB2.3_F1_F_{t3}}$	10,6	76%	81%
$N_{u,m,20,NB_F1_F_{t1}}$	13,1	94%	100%
$N_{u,m,20,RB1.1_F1_F_{t1}}$	14,0	101%	107%
$N_{u,m,20,RB2.1^*_F1_F_{t1}}$	12,0	86%	92%
$N_{u,m,20,RB2.1_F1_F_{t1}}$	13,4	97%	103%
$N_{u,m,20,RB2.3_F1_F_{t1}}$	10,1	73%	77%

6.5.6 Betonschraube H

Mit der Betonschraube H wurden ausschließlich in extern hergestellten Versuchskörpern der Charge RB2.1* und RB2.3 Auszugversuche in gerissenem Recyclingbeton durchgeführt. Es liegen Ergebnisse aus je einer Versuchsserie vor, die in Tabelle 6-55 zusammengefasst sind. In Abbildung 6-50 sind zusätzlich die Ergebnisse aus den Referenzversuchen dargestellt. Die Versuchsergebnisse, die in den Versuchskörpern RB2.1* gewonnen wurden, lassen nicht auf einen Einfluss des Betonalters auf die Höhe der normierten Versagenslast schließen. In RB2.3 konnte im Prüfzeitraum t3 (369 Tage nach Betonage) eine deutlich höhere normierte Versagenslast erreicht werden als in t1 nach 35 Tagen.

Werden die dargestellten Ergebnisse den Ergebnissen der Referenzversuche gegenübergestellt (siehe Tabelle 6-56), wird deutlich, dass die Ergebnisse aus den Prüfkörpern aus Recyclingbeton in beiden Prüfzeiträumen die Ergebnisse aus den Referenzversuchen nicht bestätigen konnten. So wurden in t3 71 % und 70 % und in t1 74 % und 58 % der normierten Versagenslasten der Referenzen erreicht.

Tabelle 6-55: Testergebnisse Forschungsvorhaben: F1 – Betonschraube H, RB

Versuchsreihe	Serienbezeichnung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Betonalter	norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	mittlere norm. Versagenslast $N_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Versagenslast $N_{u,5\%}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[d]	[kN]	[kN]	[-]	[kN]
4	F1_RB2.1*_05.03.21_H	27,1	38	18,85	18,77	12,8%	10,63
			38	19,45			
			38	22,29			
			38	15,96			
			38	17,29			
4	F1_RB2.1*_05.03.21_H_xy	36,0	369	20,25	18,52	5,8%	14,85
			369	17,57			
			369	17,92			
			369	18,88			
			369	18,00			
4	F1_RB2.3_10.03.21_H	27,9	35	15,75	14,81	10,3%	9,65
			35	14,49			
			35	12,58			
			35	14,62			
			35	16,61			
4	F1_RB2.3_10.03.21_H_xy	35,5	369	16,92	18,23	11,6%	11,05
			369	15,45			
			369	19,80			
			369	18,32			
			369	20,67			

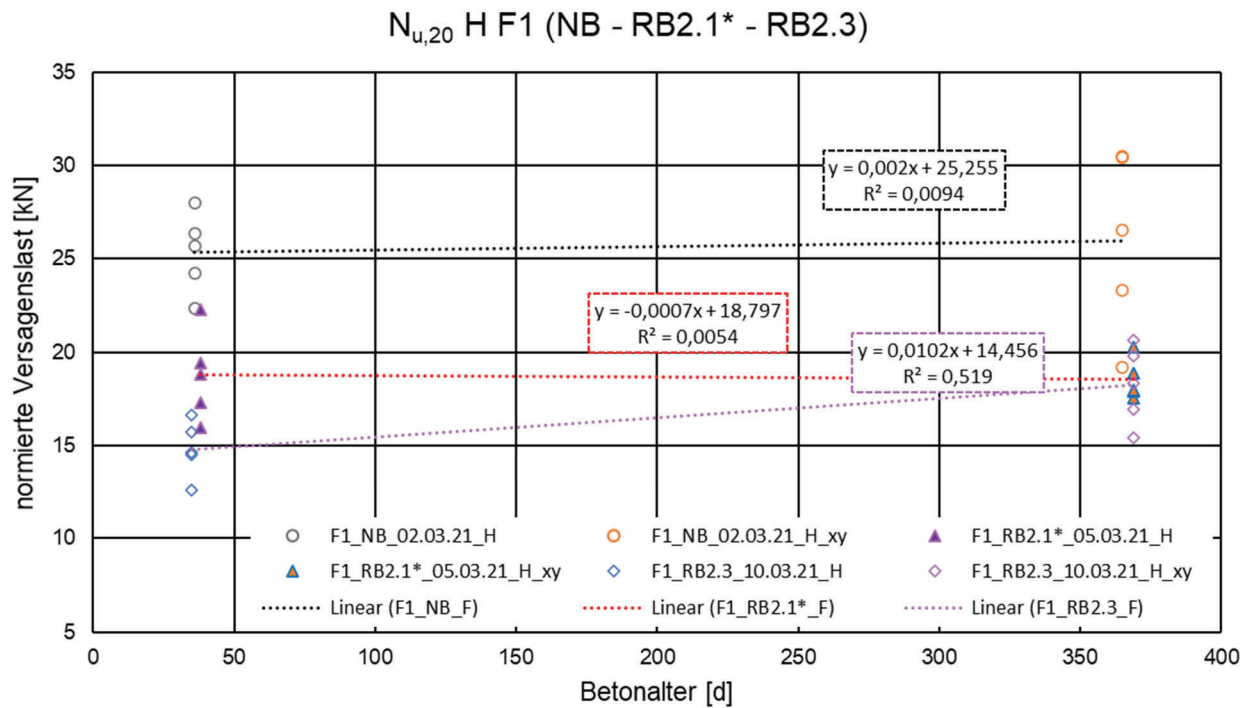


Abbildung 6-50: normierte Versagenslast über Betonalter, Betonschraube H, F1, Vergleich NB – RB

Tabelle 6-56: Vergleich NB – RB, normierte mittlere Versagenslasten, Betonschraube H, F1

Bezeichnung	norm. mittlere Versagenslast [kN]	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,NB_F1_H_t3}$	Verhältniswert zu $N_{u,m,20,NB_F1_H_t1}$
$N_{u,m,20,NB_F1_H_t3}$	26,0	100%	103%
$N_{u,m,20,RB2.1*_F1_H_t3}$	18,5	71%	73%
$N_{u,m,20,RB2.3_F1_H_t3}$	18,2	70%	72%
$N_{u,m,20,NB_F1_H_t1}$	25,3	97%	100%
$N_{u,m,20,RB2.1*_F1_H_t1}$	18,8	72%	74%
$N_{u,m,20,RB2.3_F1_H_t1}$	14,8	57%	58%

6.5.7 Zwischenfazit: Einfluss Recyclinggesteinskörnung Bolzenanker F und Betonschraube H gerissener Beton

Der Vergleich der mittleren normierten Versagenslasten aus den zentrischen Auszugversuchen mit weiter Abstützung in gerissenem Recyclingbeton (F1) mit den mittleren normierten Versagenslasten aus den Referenzversuchen, die bereits in Kapitel 6.3 diskutiert wurden, ist in Tabelle 6-57 und Abbildung 6-44 dargestellt. In den Prüfkörpern aus eigener Herstellung RB1.1 und RB2.1 wurden mit dem Bolzenanker F lediglich Versuche im Prüfzeitraum t1 durchgeführt. Die Betonschraube wurde ausschließlich in den extern hergestellten Prüfkörpern mit den Betonen RB2.1* und RB2.3 geprüft. In den extern hergestellten Prüfkörpern konnten sowohl mit dem Bolzenanker F als auch mit der Betonschraube H Versuche in den Prüfzeiträumen t1 und t3 durchgeführt werden.

Tabelle 6-57: Verhältniswerte der Versagenslasten aus B10: RB/NB für Bolzenanker F und Betonschraube H

Beton	Bezeichnung	$N_{u,m,20,RB_F1_t3} / N_{u,m,20,NB_F1_t3}$	$N_{u,m,20,RB_F1_t1} / N_{u,m,20,NB_F1_t1}$
[-]	[-]	[-]	[-]
RB1.1	$N_{u,m,20,RB1.1_F1_F}$	-	1,07
	$N_{u,m,20,RB1.1_F1_H}$	-	-
RB2.1	$N_{u,m,20,RB2.1_F1_F}$	-	1,03
	$N_{u,m,20,RB2.1_F1_H}$	-	-
RB2.1*	$N_{u,m,20,RB2.1*_F1_F}$	0,97	0,92
	$N_{u,m,20,RB2.1*_F1_H}$	0,71	0,74
RB2.3	$N_{u,m,20,RB2.3_F1_F}$	0,76	0,77
	$N_{u,m,20,RB2.3_F1_H}$	0,70	0,58

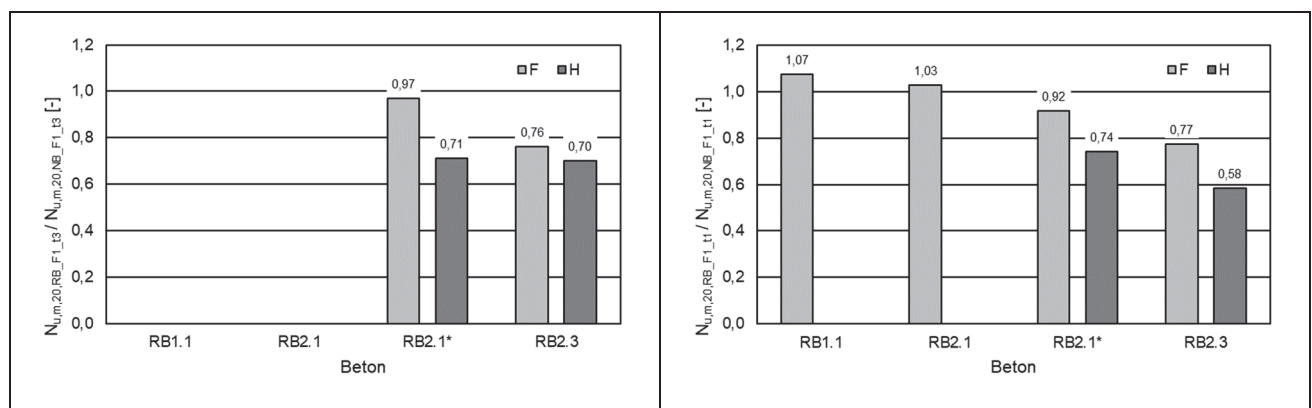


Abbildung 6-51: Verhältnis der mittleren normierten Versagenslasten (F und G) aus F1 RB/NB nach Betonmischung, links Prüfzeitraum t3, rechts: Prüfzeitraum t1

Die Ergebnisse aus den Referenzversuchen konnten mit 92 % bis 107 % in den Betonen RB1.1, RB2.1 und RB2.1* in beiden Prüfzeiträumen bestätigt werden. Es ist allerdings anzumerken, dass in den Prüfkörpern mit RB1.1 und RB2.1 lediglich im Prüfzeitraum t1 Versuche durchgeführt wurden.

Der Vergleich der normierten Versagenslasten aus den Versuchen mit der Betonschraube H zeigt, dass in RB2.1* 71 % bis 74 % der jeweiligen Referenzen und in RB2.3 58 % bis 70 % erzielt werden konnten.

7 Untersuchung lokaler Tragmechanismen

7.1 Reinigung und Lagerung

Zur Beurteilung des Einflusses der Bohrlochreinigung und Lagerungs- bzw. Feuchtebedingungen der Betonversuchskörper wurden innerhalb des Forschungsvorhabens die Versuchsreihen 5 und 7 durchgeführt. Dabei war zunächst die Frage zu beantworten, ob für Befestigungen in Recyclingbeton aufgrund der abweichenden Zusammensetzung der Betonmischung und die daraus folgenden Abweichungen der Eigenschaften eine Reinigung des Bohrlochs mit höherem Aufwand erforderlich ist als in Normalbeton. Zudem wurde überprüft, ob sich durch die Erstellung der Bohrlöcher mit Hohlbohrer (HDB) ein Einfluss in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung auf die Tragfähigkeit der Verbundankersysteme feststellen lässt.

7.1.1 Ergebnisse der Versuchsreihe 5 – Montagesicherheit und Lagerungsbedingungen

Der Großteil der Versuche innerhalb der Versuchsreihe 5 wurden mit dem Verbundankersystem B durchgeführt. Als Verankerungsgrund wurde ein Referenzbeton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen und ein Recyclingbeton RB2.2 mit 100 % rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm verwendet.

Als Versuchskörper wurden stahlummantelte Betonzylinder hergestellt, die nach der Betonage unter verschiedenen Umgebungssituationen gelagert wurden. Ein Teil der Versuchskörper wurde analog zu den Versuchskörpern der bereits oben gezeigten Versuche (Kapitel 6) an der Luft gelagert. Ein zweiter Teil wurde nach 28 Tagen Luftlagerung für ca. zwei Wochen bei 80 °C im Ofen bis zur Massekonstanz gelagert. Der dritte Teil der Versuchskörper wurde direkt nach dem Ausschalen bis zum Tag der Installation des Verbundankersystems in einem Wasserbad aufbewahrt. Ergänzend zu den Prüfkörpern wurden für die drei Lagerungsbedingungen jeweils Würfel und Zylinder zur Ermittlung der Festbetoneigenschaften gelagert.

7.1.1.1 Ermittlung der Montagesicherheit γ_{inst} , Auswertung nach [18]

Zunächst wurden mit dem Verbundankersystem B die Versuchsserien B6 und B7 nach [18] durchgeführt und mit den Ergebnissen der Referenzversuchsserien R5 verglichen. Bei den Versuchen sind eng abgestützte zentrische Auszugversuche mit maximaler Verankerungstiefe und halber Reinigung in trockenem (B6) und wassergesättigtem Beton (B7) vorgesehen. Für die B7 Versuche wurden die Versuchskörper mit Wasserlagerung verwendet. Die Versuche in trockenem Beton wurden doppelt ausgeführt – zum einen in den luftgelagerten, zum anderen in den ofengelagerten Versuchskörpern. Vor der Installation der Verbundanker in den ofengelagerten Prüfkörpern wurden diese zwei Tage an der Luft auf Zimmertemperatur heruntergekühlt, um einen Einfluss der erhöhten Temperatur zu verhindern. Das Vorgehen wurde sowohl für den Normalbeton als auch für den Recyclingbeton RB2.2 durchgeführt.

Um die maximale Verankerungstiefe zu erreichen und dennoch Stahlversagen zu vermeiden, wurde das Vorgehen nach [18] umgesetzt, das in Abbildung 7-1 gezeigt wird. Als maximale Verankerungstiefe gibt die ETA des Verbundankersystems B für die Größe M12 $h_{ef,max} = 240$ mm an. Als vereinfachende Maßnahme wurden zu jeder Betoncharge zusätzliche Würfel der Kantenlänge 150 mm hergestellt und an der Luft, im Ofen oder im Wasserbad gelagert. Um die Ankerstangen analog zu den in den bereits gezeigten Kapiteln enthaltenen Versuchsserien zu testen, betrug die

reduzierte Verankerungstiefe $h_{ef,red} = 70$ mm. Die Differenz von 20 mm zwischen der in der ETA angegebenen maximalen Verankerungstiefe von 240 mm und der geprüften maximalen Verankerungstiefe von 220 mm ($150 + 70$) wurde vernachlässigt.

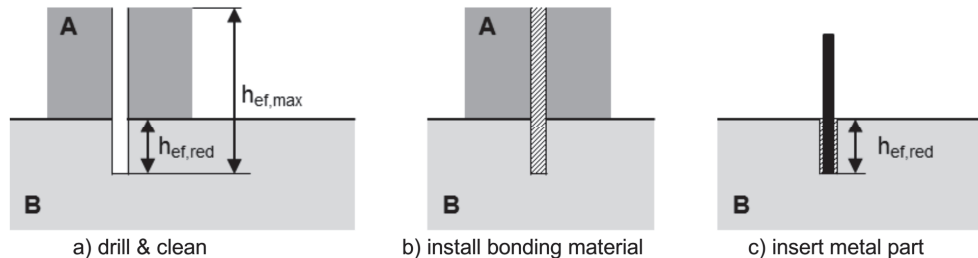


Abbildung 7-1: Versuchsaufbau für maximale Verankerungstiefe und zur Vermeidung von Stahlversagen nach [18]

Tabelle 7-2 fasst die Ergebnisse der Versuche zur Ermittlung des Faktors γ_{inst} der Montagesicherheit zusammen. Die Versuchskörper mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen (NB) waren am Tag der Prüfung der Befestigungsmittel in einem Alter von 47, die Versuchskörper mit dem Recyclingbeton RB2.2 in einem Alter von 44 Tagen. Die Streuungen der normierten Verbundspannungen innerhalb der gezeigten Serien liegen jeweils deutlich unter 20 %, weshalb keine Abminderung erfolgt.

Die mittleren normierten Verbundspannungen werden nach [18] gegenübergestellt, um den Faktor γ_{inst} der Montagesicherheit zu ermitteln. Für die Versuche in trockenem Beton R5 und B6 wurden sowohl luft- als auch ofengelagerte Versuchskörper verwendet. Die Auswertung wurde für beide Lagerungsbedingungen getrennt betrachtet und in Tabelle 7-1 dargestellt. Werden die mittleren normierten Verbundspannungen der Versuche B6/R5 verglichen, folgt für beide Lagerungsvarianten Luft und Ofen in Normalbeton ein $\alpha > 1,0$ und dadurch ein $\gamma_{inst} = 1,0$. Für Recyclingbeton RB2.2 gilt dies ebenfalls für die Versuchskörper mit Luftlagerung. In den ofengelagerten Versuchskörpern wurde ein $\alpha = 0,93 < 0,95$ ermittelt, woraus sich ein $\gamma_{inst} = 1,2$ ergibt.

Aus dem Vergleich der mittleren normierten Verbundspannungen aus den B7 Versuchen in den wassergelagerten Versuchskörpern mit denen aus den R5 Versuche ergab für Luft- und Ofenlagerung in Normalbeton jeweils minimal höhere Werte für α als in Recyclingbeton, allerdings resultierte letzten Endes für beide Betone jeweils ein Faktor $\gamma_{inst} = 1,2$. Es ist allerdings darauf zu achten, dass die Ergebnisse der Auszugversuche nur innerhalb der jeweiligen Betoncharge verglichen wurden, da innerhalb dieser Versuchsreihe lediglich der Einfluss eines geringeren Reinigungsaufwands auf die Montagesicherheit geprüft werden sollte. Der Einfluss durch die Recyclinggesteinskörnung auf die Auszuglast bei Standardreinigung wurde in Kapitel 6 ausführlich diskutiert.

Die Betonmischung RB2.2 bestand aus 100 % rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm. Es wird davon ausgegangen, dass sich aus Versuchen mit den Betonmischungen RB1.1, RB2.1 und RB2.1* mit deutlich geringeren Anteilen an rezyklierten Gesteinskörnungen keine höheren Werte für γ_{inst} ergeben würden.

Allerdings ist anzumerken, dass die Versuchskörper bei Prüfung der Versuche erst wenige Wochen alt waren. Demnach waren die Referenzen zur Ermittlung von γ_{inst} etwas niedriger als in älterem Beton

zu erwarten war (siehe Kapitel 6). Es bleibt offen, ob sich die Faktoren auch in Beton mit einem Alter von ca. einem Jahr bestätigen lassen.

Tabelle 7-1: Auswertung Montagesicherheit, Ermittlung γ_{inst}

Lagerung	Vergleich	NB			RB2.2		
		α	γ_{inst}		α	γ_{inst}	
Luft	B6/R5	1,06	1,0	1,2	0,98	1,0	1,2
	B7/R5	0,86	1,2		0,80	1,2	
Ofen	B6/R5	1,09	1,0	1,2	0,93	1,2	1,2
	B7/R5	0,79	1,2		0,76	1,2	

Tabelle 7-2: Testergebnisse Forschungsvorhaben: Versuchsreihe 5, Montagesicherheit

Serienbezeichnung	Test	Lagerung	Beton- druckfestigkeit $f_{c,m,cube}$	Beton	norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	mittlere norm. Verbundspannung $\tau_{u,i,20}$	Streuung	char. norm. Verbundspannung $\tau_{u,5\%}$
[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]	[N/mm ²]
B6_NB_19.03.21_L_1/2St_B	B6	L	28,0	NB	25,66	24,77	6,3%	19,46
					23,47			
					26,48			
					25,48			
					22,79			
B6_NB_19.03.21_O_1/2St_B	B6	O	24,8	NB	28,09	27,63	5,1%	22,83
					25,78			
					29,54			
					27,89			
					26,85			
B7_NB_19.03.21_W_1/2St_B	B7	W	27,2	NB	18,16	20,07	7,8%	14,75
					20,54			
					21,20			
					18,71			
					21,74			
R5_NB_19.03.21_L_St_B	R5	L	28,0	NB	23,71	23,36	11,5%	14,21
					22,82			
					25,37			
					25,84			
					19,07			
R5_NB_19.03.21_O_St_B	R5	O	24,8	NB	27,31	25,44	11,1%	15,87
					28,40			
					25,69			
					21,11			
					24,67			
B6_RB2.2_29.03.21_L_1/2St_B	B6	L	24,3	RB2.2	20,60	21,27	1,9%	19,91
					21,37			
					21,28			
					21,41			
					21,68			
B6_RB2.2_29.03.21_O_1/2St_B	B6	O	21,0	RB2.2	23,14	21,26	6,8%	16,33
					22,30			
					20,94			
					20,32			
					19,59			
B7_RB2.2_29.03.21_W_1/2St_B	B7	W	25,1	RB2.2	17,50	17,32	11,4%	10,59
					16,01			
					16,34			
					20,69			
					16,04			
R5_RB2.2_29.03.21_L_St_B	R5	L	24,3	RB2.2	21,00	21,65	7,2%	16,35
					21,01			
					24,35			
					20,41			
					21,47			
R5_RB2.2_29.03.21_O_St_B	R5	O	21,0	RB2.2	21,54	22,85	5,4%	18,63
					23,55			
					23,78			
					21,45			
					23,91			

O: Ofenlagerung, L: Luftlagerung, W: Wasserlagerung

7.1.1.2 Untersuchungen zum Einfluss des Reinigungsaufwands

Neben den Versuchen zur Bestimmung der Montagesicherheit wurden in Versuchskörpern mit gleicher Lagerung wie in Kapitel 7.1.1.1 zentrische Auszugversuche mit enger Abstützung mit der Verankerungstiefe $h_{ef} = 70$ mm für das System B durchgeführt. Wenige Versuche wurden durchgeführt mit dem System A mit einer Verankerungstiefe $h_{ef} = 65$ mm. Die Bohrlöcher eines Teils der Versuchskörper wurde nach den Angaben der ETA des jeweiligen Produkts gereinigt. Beim zweiten Teil wurde eine Reinigung mit erhöhtem Aufwand vorgenommen (Ex). Alle Versuchsserien wurden dennoch mit R1 bezeichnet und ergänzt mit den Lagerungsbedingungen (O, L oder W) sowie der Reinigung (St oder Ex).

In Kapitel 6.2 wurde mit dem System B in Normalbeton eine mittlere normierte Verbundspannung $\tau_{u,m,20,NB_B_R1_t3} = 28,2$ N/mm² im Prüfzeitraum t3 und $\tau_{u,m,20,NB_B_R1_t1} = 24,5$ N/mm² im Zeitraum t1 ermittelt in eng abgestützten Auszugversuchen R1 an luftgelagerten Versuchsplatten. Für Recyclingbeton RB2.2 wurden analog $\tau_{u,m,20,RB2.2_B_R1_t3} = 26,9$ N/mm² und $\tau_{u,m,20,RB2.2_B_R1_t1} = 21,3$ N/mm² bestimmt.

Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 zeigen den Vergleich der mittleren normierten Verbundspannungen aus den Auszugversuchen mit unterschiedlicher Reinigung und Lagerungsbedingungen zu den oben genannten Referenzen aus Kapitel 6.2. Werden zunächst die Ergebnisse betrachtet, die in den mit dem Standardverfahren (St) gereinigten Versuchskörpern ermittelt wurden, ist Folgendes zu beobachten. Im Normalbeton konnten zwischen 78 und 86 % und in Recyclingbeton RB2.2 76 bis 79 % der mittleren normierten Verbundspannungen aus den jeweiligen Referenzen aus dem Prüfzeitraum t3 erreicht werden. Die ermittelten Werte spiegeln vielmehr die mittleren normierten Verbundspannungen aus dem Prüfzeitraum t1 wider: 93 bis 99 % in Normalbeton und 96 bis 100 % in Recyclingbeton RB2.2. Die Versuchskörper waren bei Durchführung der Versuche in Versuchsreihe 5 in einem Alter von 44 bis 47 Tagen. Daher lässt sich die genannte Beobachtung erklären. Wurden die Bohrlöcher in weiteren Versuchskörpern derselben beiden Chargen mit erhöhtem Aufwand gereinigt, konnte im Normalbeton eine Steigerung der normierten Verbundspannungen von 10 bis maximal 31 % erreicht und somit das Niveau der Referenzwerte aus Prüfzeitraum t3 erreicht werden. Für Recyclingbeton wurde mit 10 bis 23 % ebenfalls eine deutliche Steigerung durch erhöhten Reinigungsaufwand erzielt und die mittleren normierten Verbundspannungen je nach Lagerungsbedingungen auf 83, 96 und 92 % der Referenz aus Prüfzeitraum t3 und RB2.2 erreicht werden.

Aus der Untersuchung der Ergebnisse aus beiden Betonchargen stellte sich heraus, dass in den ofengelagerten Versuchskörpern der erhöhte Reinigungsaufwand die geringste Erhöhung der mittleren normierten Verbundspannung zu beobachten war.

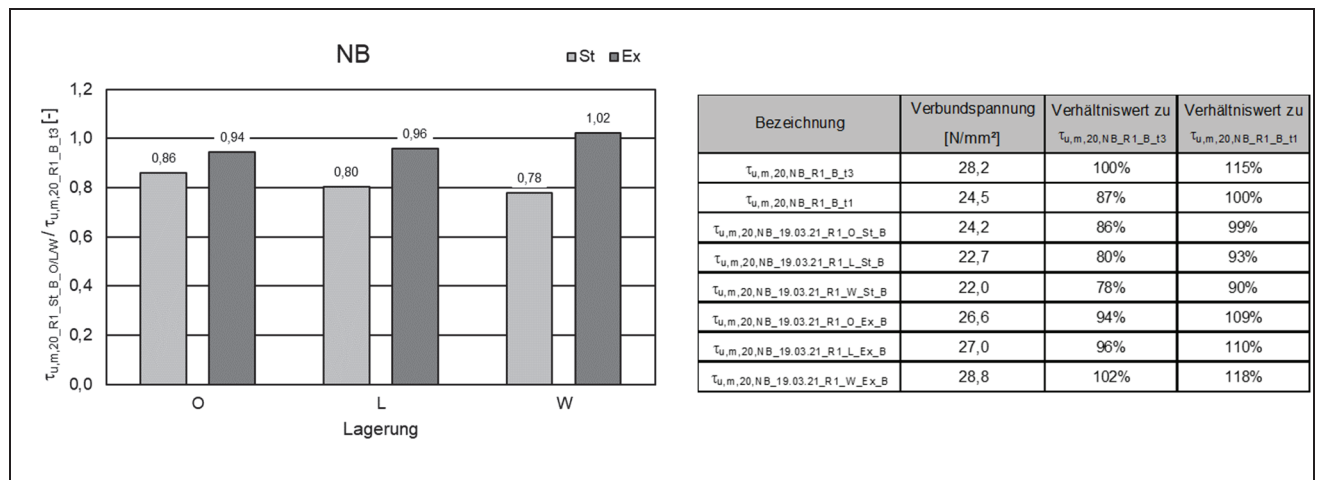


Abbildung 7-2: Gegenüberstellung der mittleren normierten Verbundspannungen bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Reinigungsaufwand im Vergleich zu $\tau_{u,m,20,NB,R1,B_t3}$ für NB

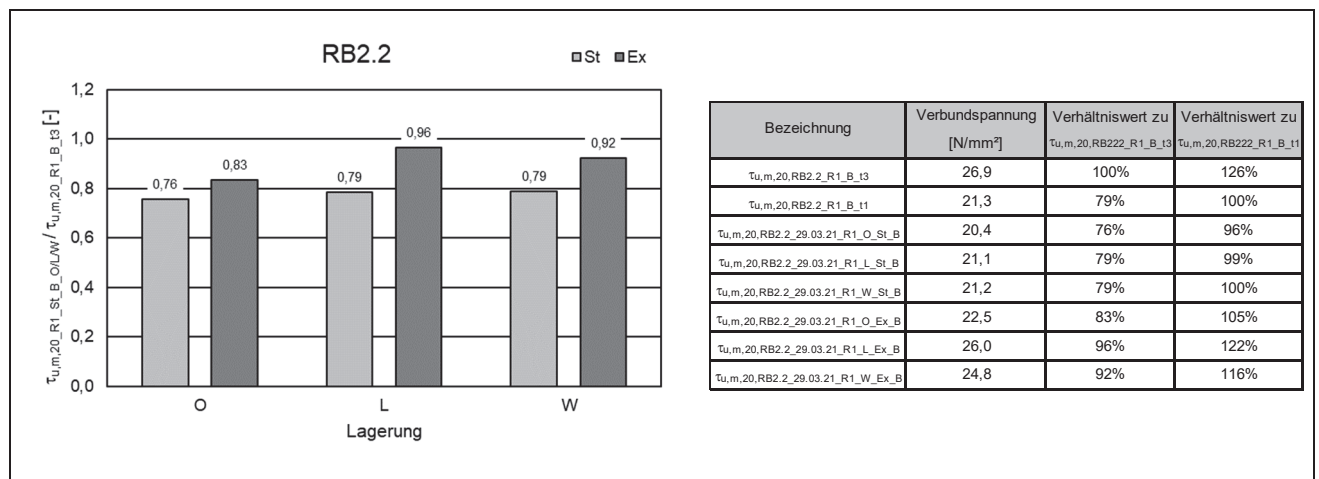


Abbildung 7-3: Gegenüberstellung der mittleren normierten Verbundspannungen bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Reinigungsaufwand im Vergleich zu $\tau_{u,m,20,RB2.2,R1,B_t3}$ für RB2.2

Es ist festzuhalten, dass die offen- und luftgelagerten Versuchskörper nach der Reinigung mit erhöhtem Aufwand (Ex) vor Installation der Verbundanker zunächst für ca. zwei Stunden im Ofen oberflächlich getrocknet und anschließend auf Raumklima abgekühlt wurden.

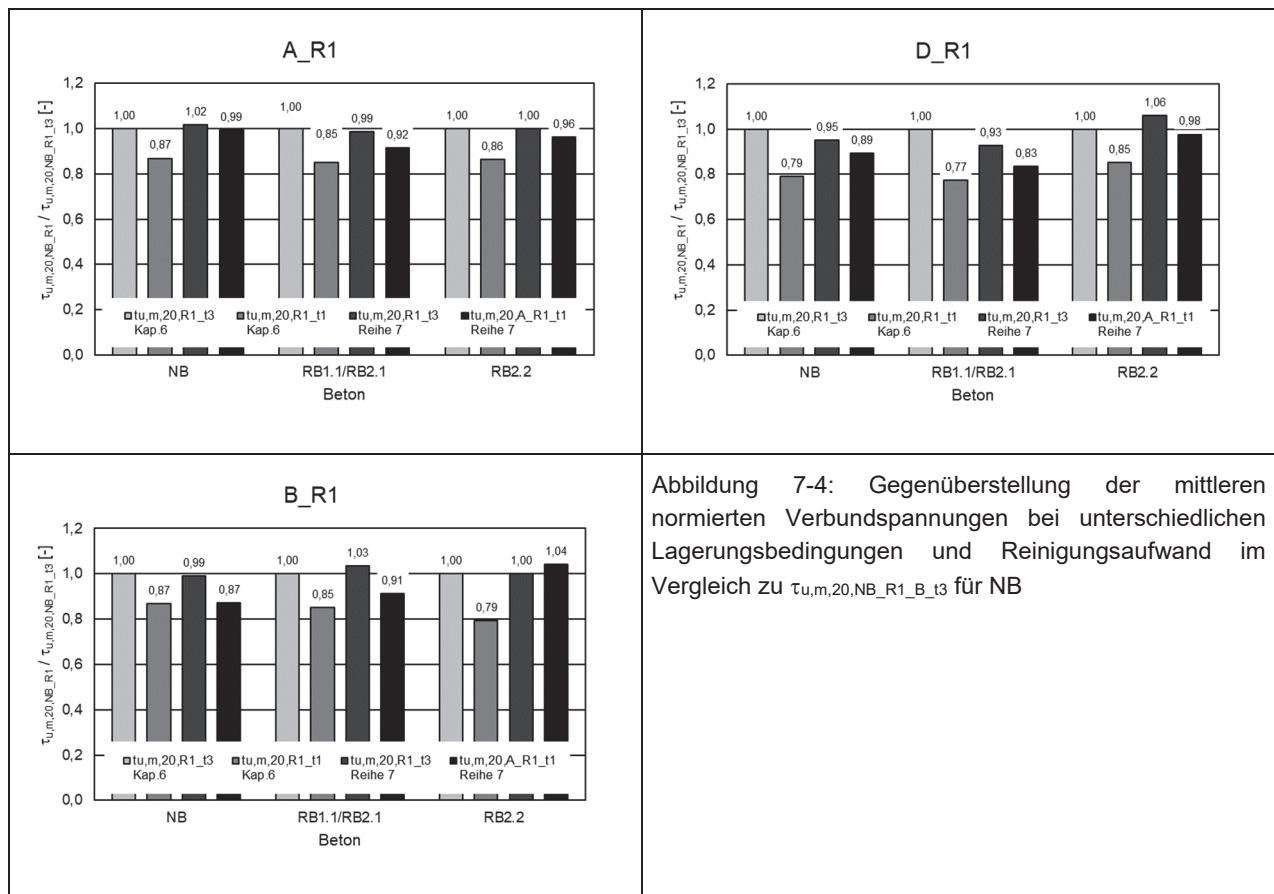
7.1.2 Ergebnisse der Versuchsreihe 7 – Reinigungsverfahren

In Versuchsreihe 7 lag der Fokus auf der Überprüfung des Einflusses unterschiedlicher Reinigungsverfahren auf das Verbundverhalten und mögliche Unterschiede durch die verschiedenen Zusammensetzungen des Betons. Neben der Reinigung mit erhöhtem Aufwand (Ex) und der Reinigung durch den Hohlbohrer (HDB) wurden auch in jeder Betoncharge Versuche mit Standardreinigung (St) durchgeführt. In Kapitel 6 wurde grundsätzlich nur das Standardverfahren zur Bohrlochreinigung nach der ETA des jeweiligen Produkts angewendet. Um die Ergebnisse aus Versuchsreihe 7 in die bisherigen Erkenntnisse einzuordnen, werden zunächst die hier erzielten mittleren normierten Verbundspannungen denen aus Kapitel 6 gegenübergestellt. Um die Auswirkungen abweichender Reinigungsverfahren auf die Tragfähigkeit beurteilen zu können, werden anschließend die Ergebnisse innerhalb der Versuchsreihe 7 mit den Reinigungsarten HDB und Ex mit dem Standardreinigungsverfahren verglichen. Neben den Versuchskörpern mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen (NB) wurden Körper mit den Recyclingbetonen RB1.1 und RB2.1 sowie RB2.2 untersucht. Das Alter der Versuchskörper zum Prüfzeitpunkt der Verbundankersysteme betrug 35 bis 40 Tage bzw. 365 bis 376 Tage und kann somit den Prüfzeiträumen t1 und t3 zugeordnet werden.

7.1.2.1 Einordnung der Resultate aus Versuchsreihe 7 in bisherige Erkenntnisse

Zur Einordnung der Ergebnisse aus Versuchsreihe 7 in die bereits in Kapitel 6 erläuterten Ergebnisse dient Abbildung 7-4, die die Verhältnismerte der mittleren normierten Verbundspannungen aus den durchgeführten Versuchsserien beinhaltet. Als Referenz dient jeweils der Wert der mittleren normierten Verbundspannung im Prüfzeitraum t3 aus Kapitel 6 für das jeweilige System. Zur Einordnung wurden zusätzlich die Ergebnisse aus dem Prüfzeitraum t1 aus Kapitel 6 eingefügt. Die Auszugversuche in den speziell für Versuchsreihe 7 hergestellten Versuchskörpern mit den Betonen NB, RB2.1 und RB2.2 wurden im Prüfzeitraum t1 durchgeführt. Für die Überprüfung des Prüfzeitraums t3 wurde auf Versuchskörper mit den Betonen NB, RB1.1 und RB2.2 aus dem Bestand des Forschungsvorhabens zurückgegriffen. Die Vorgehensweise bei der Herstellung der Versuchskörper in Reihe 7 war grundsätzlich analog zur Herstellung der restlichen Versuchskörper innerhalb des Projekts. Als Ausnahme ist allerdings festzuhalten, dass aus Beschaffungsgründen statt eines CEM I 32,5R ein CEM I 42,5N verwendet wurde.

Der Vergleich der mittleren normierten Verbundspannungen im Prüfzeitraum t3 zeigt, dass die Werte aus Tabelle 6-26, Tabelle 6-31 und Tabelle 6-36 in Versuchsreihe 7 bestätigt werden können. Für System A wurden in den drei Betonen im Mittel 102, 99 und 100 %, für System B 99, 103 und 100 % sowie für System D 95, 93 und 106 % der jeweiligen Referenzen erreicht. Die Ergebnisse aus Reihe 7 wurden der jeweiligen Referenz in der betrachteten Betonmischung gegenübergestellt. Die Ergebnisse aus Reihe 7 spiegeln allerdings nur zum Teil die Ergebnisse aus Kapitel 6 wider. Unter 90 % der jeweiligen Referenzen aus dem Prüfzeitraum t3 der Ergebnisse aus Kapitel 6 lagen lediglich die mittleren normierten Verbundspannungen der Versuche mit dem System B in NB und dem System D in NB und RB2.1. In den weiteren Versuchsserien wurden trotz des frühen Prüfzeitraums t1 in Versuchsreihe 7 über 90 % bis zu 104 % der Ergebnisse aus Kapitel 6 zum Prüfzeitraum t3 erzielt.



7.1.2.2 Einfluss Reinigung je Betoncharge

Um den Einfluss der Reinigungsverfahren auf die Tragfähigkeit und mögliche Unterschiede durch die voneinander abweichenden Betonmischungen zu untersuchen, wurden die oben genannten Reinigungsverfahren für jede Betonmischung und mit den drei Verbundankersystemen geprüft. Zudem wurden die Prüfzeiträume t1 und t3 mit den oben genannten Versuchskörpern abgedeckt. Für den Vergleich der mittleren normierten Verbundspannungen in Abbildung 7-5 wurden die Versuchsergebnisse aus den mit dem Hohlbohrverfahren und dem Verfahren mit erhöhtem Reinigungsaufwand gereinigten Versuchskörpern den jeweiligen Referenzen gegenübergestellt. Die Referenzen, die bereits oben diskutiert wurden, wurden in jeder der sechs Betonversuchskörpern (2xNB, RB1.1, 2.1, 2xRB2.2) mit dem Standardreinigungsverfahren ermittelt.

Auf Grundlage der in Abbildung 7-5 dargestellten Ergebnisse lässt sich feststellen, dass das Erstellen und gleichzeitige Reinigen des Bohrlochs mit Hilfe des Hohlbohrverfahrens (HDB) keinen deutlichen Einfluss auf das Tragverhalten der Verbundankersysteme hat. Es wurden im Mittel 95 bis 110 % in t1 und 93 bis 105 % der normierten Verbundspannungen der jeweiligen Referenzen in allen geprüften Betonen erreicht.

Die mittleren normierten Verbundspannungen der Versuche, die in den mit erhöhtem Aufwand gereinigten Bohrlochern geprüft wurden, konnten mit 96 bis 111 % in t1 und 95 bis 104 % die mittleren normierten Verbundspannungen der jeweiligen Referenzen in allen Betonen bestätigen. Der Wert, der sich im Mittel am deutlichsten von der zugehörigen Referenz unterschied, wurde in der Versuchsserie

mit dem Verbundankersystem A in Recyclingbeton RB1.1 zum Prüfzeitraum t3 mit erhöhtem Reinigungsaufwand (89 %) ermittelt.

Verglichen mit den Erkenntnissen aus Versuchsreihe 5 konnte in Versuchsreihe 7 der Effekt der deutlichen Steigerung der mittleren normierten Verbundspannung durch den erhöhten Reinigungsaufwand der Extrareinigung nicht festgestellt werden. Dies wird durch die folgenden beiden Punkte begründet.

In Versuchsreihe 7 musste aufgrund der deutlich größeren Versuchskörperabmessungen auf eine Trocknung der Bohrlochwandung nach Reinigung mit erhöhtem Aufwand durch kurzzeitige Ofenlagerung verzichtet werden. Es wird vermutet, dass der mögliche positive Effekt durch die Trocknung nicht durch eine längere Druckluftreinigung als abschließenden Reinigungsschritt ersetzt werden konnte. Zudem waren abweichend zu den bisherigen Versuchsergebnissen die mittleren normierten Verbundspannungen in Versuchsreihe 7 in t1 in mehreren Versuchsserien deutlich höher. Da die Verbundspannungen eines Systems nicht unbegrenzt gesteigert werden können, ist durch die bereits höheren Werte in t1 auch keine starke Steigerung mehr zu erwarten.

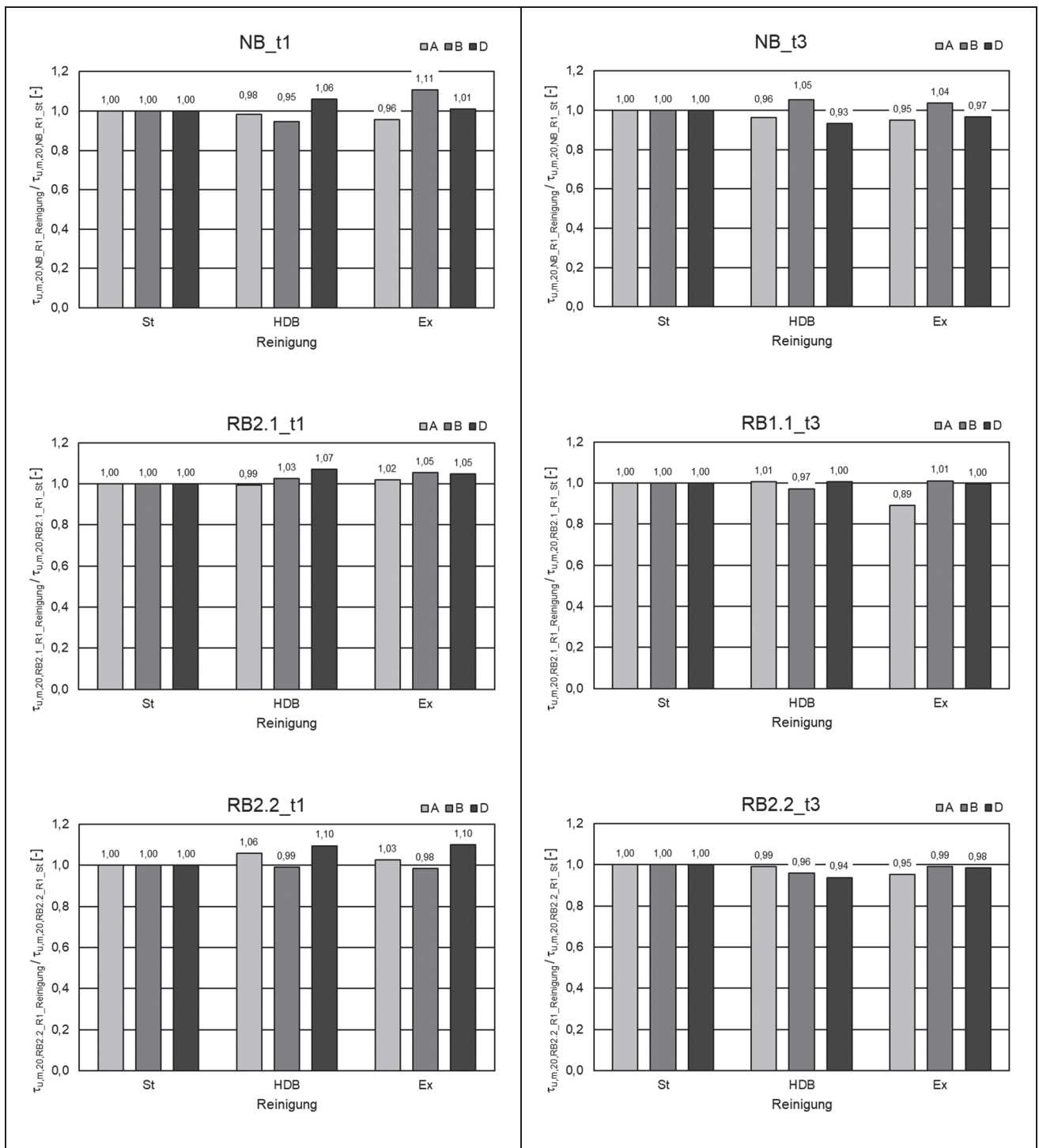


Abbildung 7-5: Einfluss durch das Reinigungsverfahren auf die mittlere normierte Verbundspannung nach Betoncharge (links: Prüfzeitraum t1, rechts: Prüfzeitraum t3), Referenz: Standardreinigung (St) in jeder Betoncharge

7.2 Untersuchung der Versagensarten

7.2.1 Verbundankersysteme

Die unterschiedlichen Versagensarten, die bei Verbundankersystemen unter zentrischer Zugbelastung auftreten können, wurden in Kapitel 3.2.2 bereits erläutert. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden die Versuche an Verbundankersystemen mit einem Aufbau mit enger Abstützung durchgeführt, um ein Betonversagen zu verhindern und ein Verbundversagen zu provozieren. Das aufgetretene Verbundversagen konnte in zwei Grenzflächen beobachtet werden. In Abbildung 7-6 werden die ausgezogenen Ankerstangen zweier Versuchsserien gezeigt. Links trat bei allen Versuchen das Versagen zwischen Mörtel und Bohrlochwand auf (bb = bond break borehole). In der Versuchsserie, die rechts dargestellt ist, trat zudem das Verbundversagen zwischen der Ankerstange und dem Mörtel auf (be = bond break element).

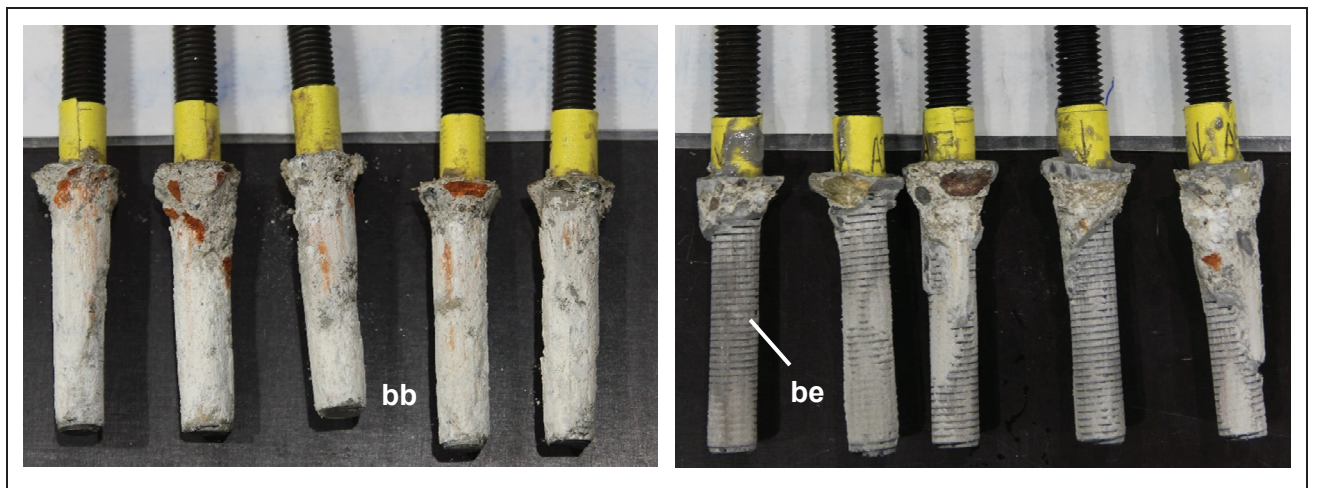


Abbildung 7-6: Versagensarten Verbundankersysteme

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der beobachteten Versagensarten je Verbundankersystem über alle Versuche der Reihen 1 bis 4. Dargestellt ist der Anteil an der Versagensart „be“. Ein Datenpunkt bei 100 % stellt somit einen Versuch dar, bei dem das Versagen über die gesamte Verankerungstiefe zwischen Ankerstange und Mörtel auftrat. Wurde ein Versagen zwischen Mörtel und Bohrlochwand über den gesamten Bereich festgestellt, wird dieser mit 0 % abgebildet. Alle Werte zwischen 0 und 100 % zeigen die Ergebnisse der Versuche, bei denen ein Versagen anteilig zwischen Mörtel und Ankerstange sowie Mörtel und Bohrloch auftrat.

Der Anteil „be“ wird über der in den zugehörigen Versuchen ermittelten normierten Verbundspannung aufgetragen. Grundsätzlich ist unabhängig der Betonmischungen der Trend zu erkennen, dass mit höherer normierter Verbundspannung erwartungsgemäß der Anteil „be“ steigt. Ausnahme bilden die Ergebnisse, die mit dem Verbundankersystem in Versuchskörpern der Mischung RB2.1 erzielt wurden. In den genannten Versuchen wurden bereits bei geringeren normierten Verbundspannungen höhere Anteile an „be“ beobachtet.

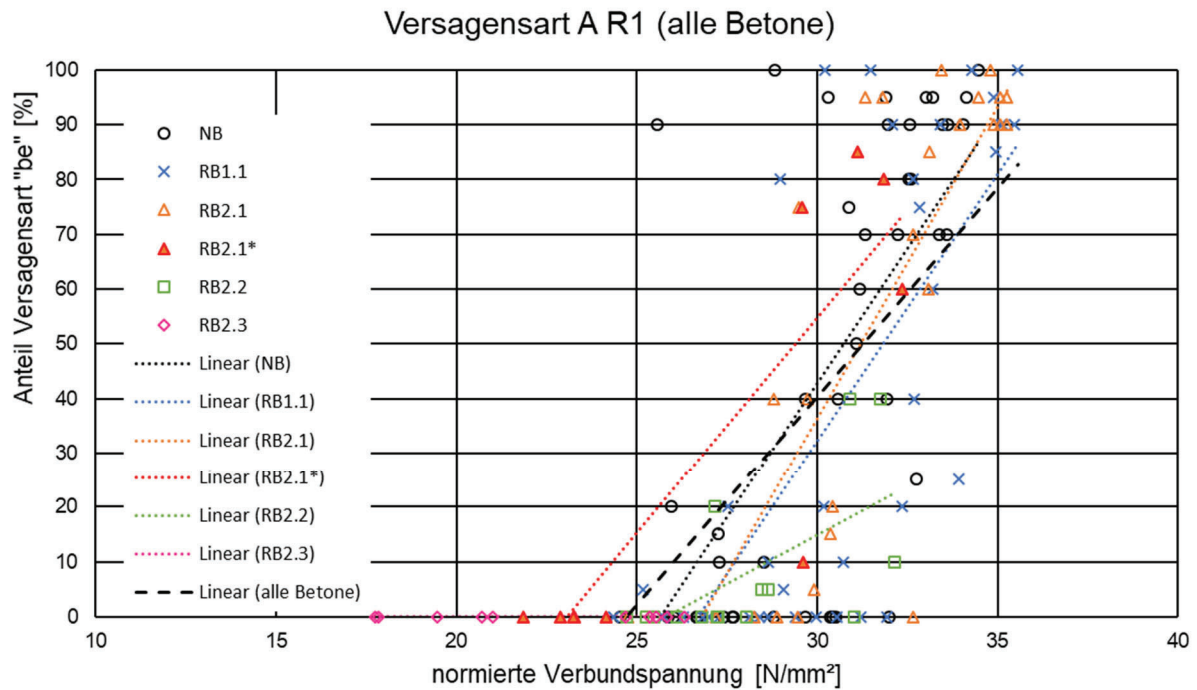


Abbildung 7-7: Verteilung Versagensart, Verbundankersystem A

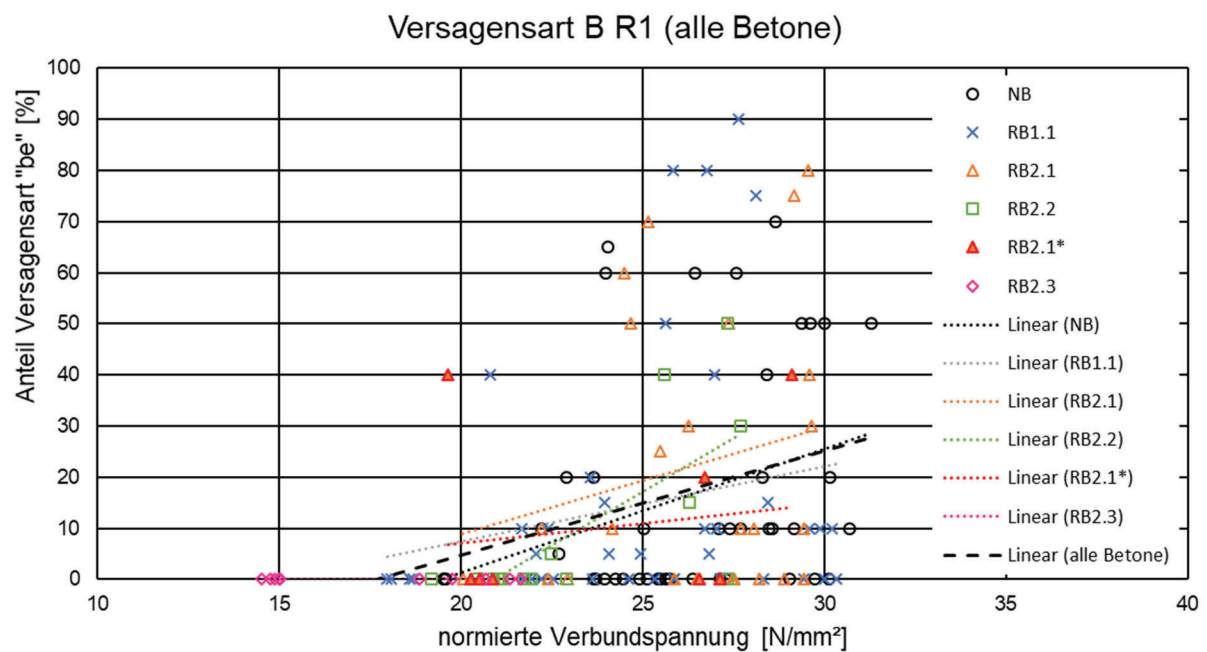


Abbildung 7-8: Verteilung Versagensart, Verbundankersystem B

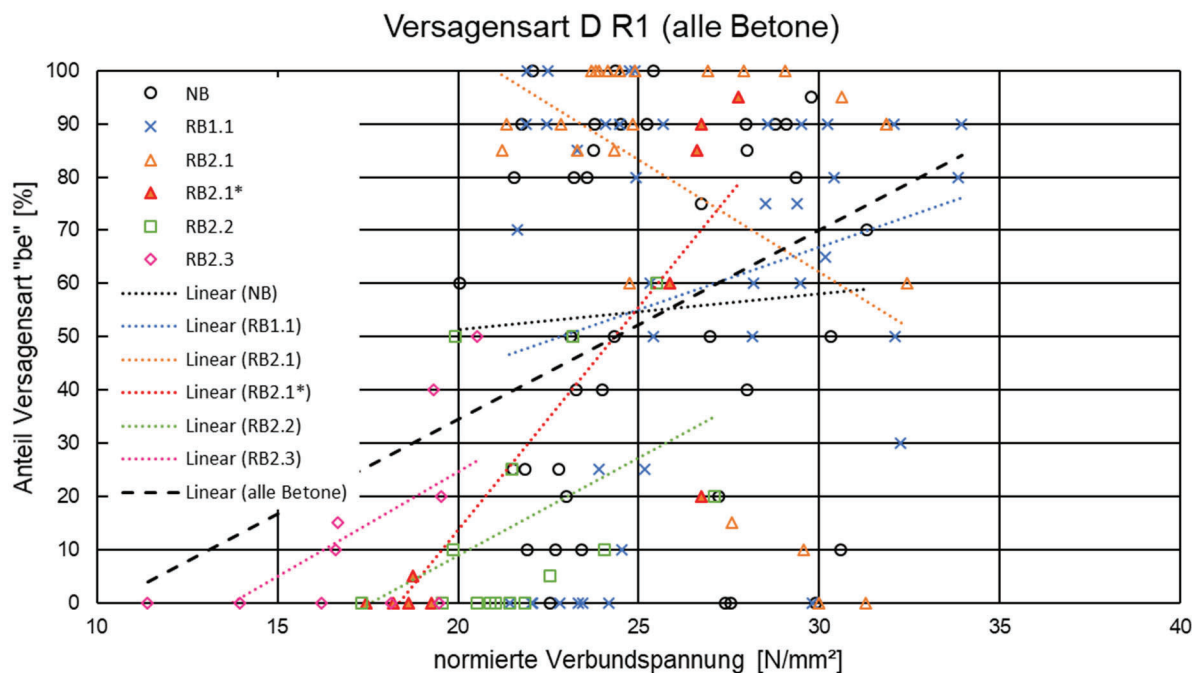


Abbildung 7-9: Verteilung Versagensart, Verbundankersystem D

In allen Recyclingbetonen sowie in den Referenzbetonen mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen konnten die beiden genannten Versagensarten „bb“ und „be“ sowie Mischversagen mit Anteilen beider Versagensarten beobachtet werden. Zwischen den Betonen mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen und den Recyclingbetonen RB1.1 und RB2.1 konnte bzgl. der erläuterten Versagensarten keine signifikante Abweichung festgestellt werden. In den Versuchskörpern mit Recyclingbeton RB2.2 trat das Versagen „be“ in geringeren Anteilen auf. Bei den Versuchen mit den Verbundankersystemen A und B konnte in allen Versuchen in RB2.3 das Versagen zwischen Mörtel und Bohrlochwand über die gesamte Verankerungslänge beobachtet werden. Mit dem System D wurde in einem Teil der Versuche ein anteiliges Versagen zwischen Ankerstange und Mörtel beobachtet.

7.2.2 Bolzenanker F und Betonschraube H

Aufgrund der für die zentrischen Auszugversuche mit dem Bolzenanker F gewählten geringen Verankerungstiefe von $h_{ef} = 50 \text{ mm}$ versagte der Verankerungsgrund erwartungsgemäß mit kegelförmigem Betonausbruch (cc) in allen Versuchen in ungerissenem Beton. Abbildung 7-10 zeigt die Versagensbilder zweier Versuche beispielhaft. In gerissenem Beton wurde in zwei Versuchsserien jeweils einmal zusätzlich zum Versagen des Betons ebenfalls ein Durchziehen des Bolzens durch den Spreizclip (p) beobachtet. Über alle Versuchsserien wurde kein Versagen beobachtet, bei dem der Bolzenanker komplett herausgezogen wurde. Es lässt sich bei der gewählten Verankerungstiefe kein Unterschied der Versagensart in Abhängigkeit des Betons feststellen.

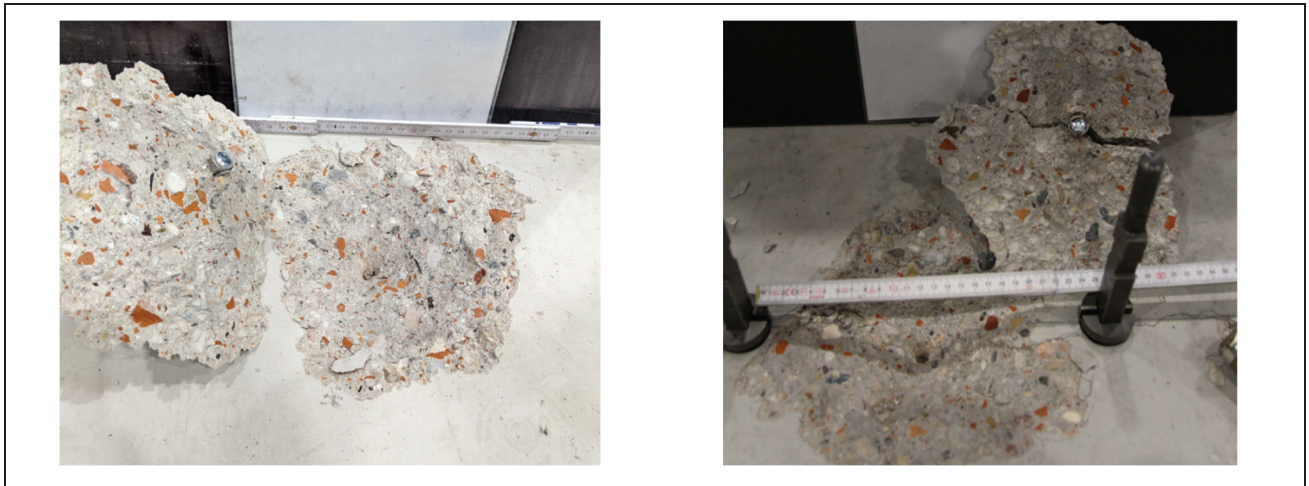


Abbildung 7-10: Versagensart kegelförmiger Betonausbruch, Bolzenanker F, links ungerissener, rechts gerissener Beton

Die Betonschraube H wurde ebenfalls in gerissenem und ungerissenem Beton in zentrischen Auszugversuchen geprüft. Es wurden in Normalbeton und Recyclingbeton die Versagensarten Betonausbruch (cc) und Herausziehen (po) beobachtet. Der Ausbruchkegel reichte allerdings in keinem der durchgeführten Versuche bis zum Ende der Schraube. Abbildung 7-11 zeigt exemplarisch die Versagensbilder zweier Versuche. Es wird deutlich, dass die Ausbruchkegel und die Anteile der Versagensarten Beton unterschiedlich groß waren.

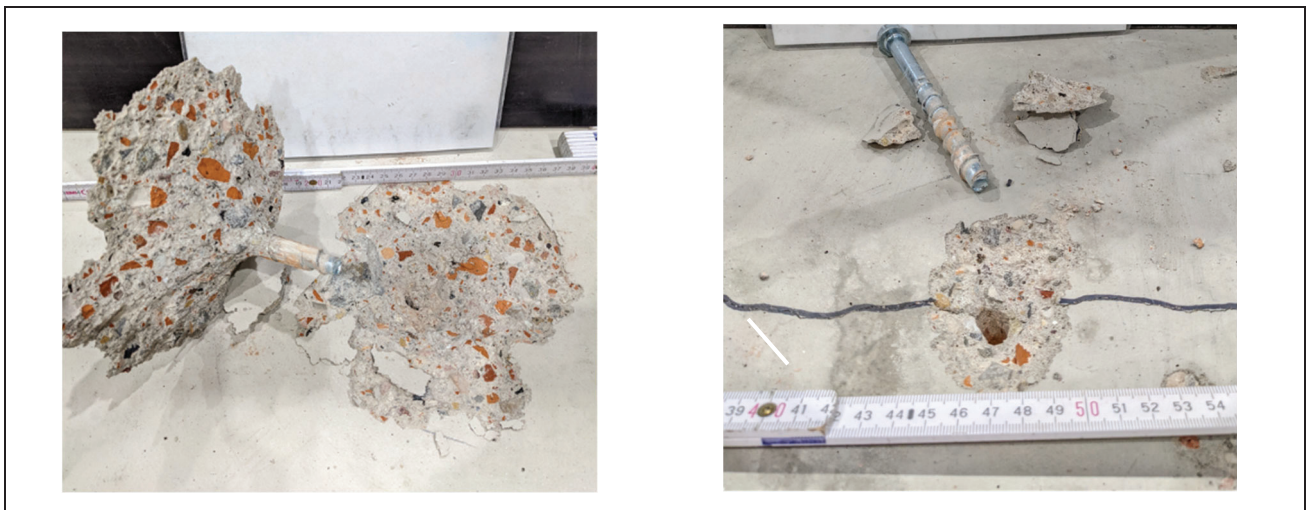


Abbildung 7-11: Versagensart kegelförmiger Betonausbruch und Herausziehen, Betonschraube H, links ungerissener, rechts gerissener Beton

7.3 Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens

In den folgenden Abschnitten wird das Last-Verformungsverhalten des Bolzenankers F, der Betonschraube H und den Verbundankersystemen A, B und D diskutiert. Hierfür wurden die Ergebnisse der Auszugversuche A1 und F1 sowie R1 und B10 analysiert.

7.3.1 Bolzenanker F und Betonschraube

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, sind die Last-Verformungskurven von mechanischen Verankerungssystemen unter Zugbeanspruchung nach [29] auf unkontrollierten Schlupf zu untersuchen. Sofern der Mittelwert der Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast einer Versuchsserie den Wert von 0,4 mm im Mittel überschreiten, ist ein Grenzwert für die Streuung der Werte innerhalb einer Versuchsserie einzuhalten. Bei Versuchen A1 in ungerissenem Beton sind 25 %, bei Versuchen F1 in gerissenem Beton sind 40 % einzuhalten.

Tabelle 7-3 enthält die Ergebnisse der Versuchsserien A1 mit dem Bolzenanker F. Es wird deutlich, dass in allen Versuchsserien unabhängig der Betonzusammensetzung die Verschiebung bei mittlerer halber Versagenslast unter 0,4 mm lag. Bei Betrachtung der Last-Verformungskurven konnte unabhängig der Betonzusammensetzung kein ungewollter Schlupf beobachtet werden. Für die A1 Versuche mit der Betonschraube H ergab sich ein vergleichbares Bild (siehe Tabelle 7-4). Der Serienmittelwert der Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast überschritt jeweils den Wert von 0,4 mm nicht. Ungewollter Schlupf konnte in den Versuchsserien A1 mit der Betonschraube H ebenfalls nicht festgestellt werden.

Tabelle 7-3: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Bolzenanker F, A1

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_{i,j})$									Beurteilung	
		1	2	3	4	5	6	7	MW	cov	MW($\delta(0,5N_{i,j})$)	
8	A1_NB_29.06.18_F	0,05	0,06	0,01	0,16	0,12			0,08	74%	$\leq 0,4\text{mm}$	
1	A1_NB_17.06.20_F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03			0,01	204%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_NB_01.10.20/A_F	0,02	0,05	0,06					0,04	52%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_NB_01.10.20/A_F_xy	0,05	0,10	0,08	0,07	0,07			0,08	25%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_NB_01.10.20/B_F	0,04	0,01	0,01					0,02	76%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_NB_01.10.20/B_F_xy	0,05	0,08	0,13	0,03	0,09			0,08	52%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_NB_02.03.21_F	0,03	0,02	0,04	0,03	0,02			0,03	31%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_NB_02.03.21_F_xy	0,06	0,05	0,08	0,08	0,10			0,07	29%	$\leq 0,4\text{mm}$	
1	A1_RB1.1_24.06.20_F	0,07	0,09	0,07	0,07	0,05	0,06	0,03	0,06	31%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB1.1_14.10.20/A_F	0,04	0,02	0,05					0,04	32%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB1.1_14.10.20/A_F_xy	0,15	0,08	0,05	0,08	0,06			0,09	47%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB1.1_14.10.20/B_F	0,04	0,03	0,03					0,03	12%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB1.1_14.10.20/B_F_xy	0,08	0,05	0,05	0,06	0,06			0,06	22%	$\leq 0,4\text{mm}$	
1	A1_RB2.1_26.06.20_F	0,06	0,12	0,04	0,11	0,09			0,08	40%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.1*_05.03.21_F	0,03	0,05	0,00	0,08	0,01			0,03	90%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.1*_05.03.21_F_xy	0,00	0,01	0,00	0,03	0,05			0,02	118%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB2.2_22.10.20/A_F	0,00	0,02	0,04					0,02	85%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB2.2_22.10.20/A_F_xy	0,02	0,04	0,03	0,07	0,01			0,03	66%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB2.2_22.10.20/B_F	0,01	0,08	0,01					0,03	117%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB2.2_22.10.20/B_F_xy	0,04	0,05	0,02	0,03	0,09			0,05	68%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.3_10.03.21_F	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02			0,01	118%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.3_10.03.21_F_xy	0,06	0,00	0,01	0,05	0,01			0,03	93%	$\leq 0,4\text{mm}$	

Tabelle 7-4: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Betonschraube H, A1

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_u)$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	MW($\delta(0,5N_u)$)	
3	A1_NB_01.10.20A_H_xy	0,23	0,29	0,19	0,36	0,33	0,28	26%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_NB_01.10.20B_H_xy	0,25	0,39	0,31	0,20	0,26	0,28	25%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_NB_02.03.21_H	0,16	0,07	0,17	0,07	0,11	0,12	40%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_NB_02.03.21_H_xy	0,41	0,35	0,43	0,16	0,13	0,30	47%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB1.1_14.10.20A_H_xy	0,31	0,21	0,33	0,36	0,35	0,31	20%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB1.1_14.10.20B_H_xy	0,27	0,24	0,34	0,25	0,30	0,28	15%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.1*_05.03.21_H	0,14	0,14	0,08	0,13	0,17	0,13	25%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.1*_05.03.21_H_xy	0,27	0,33	0,27	0,27	0,25	0,28	11%	$\leq 0,4\text{mm}$	
3	A1_RB2.2_22.10.20/B_H_xy	0,25	0,24	0,27	0,36		0,28	20%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.3_10.03.21_H	0,07	0,07	0,06	0,07	0,12	0,08	28%	$\leq 0,4\text{mm}$	
4	A1_RB2.3_10.03.21_H_xy	0,27	0,35	0,34	0,16	0,18	0,26	33%	$\leq 0,4\text{mm}$	

Bei den Versuchsserien F1 muss eine Streuung von 40 % eingehalten werden, sofern die Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast im Mittel einen Wert von 0,4 mm überschreiten. Lediglich in einer der in den in Tabelle 7-6 gezeigten Versuchsserien F1 mit der Betonschraube H (F1_NB_02.03.21_H_xy) wurde im Mittel eine höhere Verschiebung bei mittlerer halber Versagenslast bestimmt. Die Streuung der Werte lag mit 18 % allerdings deutlich unter dem Grenzwert von 40 %. Zudem konnte in keinem Test das Verhalten von unkontrolliertem Schlupf beobachtet werden.

Mit dem Bolzenanker F wurden neun Versuchsserien F1 durchgeführt. Die Ergebnisse der Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast sind in Tabelle 7-5 zusammengefasst. Einzig in Versuchsserie F1_RB2.3_10.03.21_F_xy wurde im Mittel eine Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast ermittelt, die den Wert 0,4 mm nicht überschritt. Daher musste in allen weiteren Versuchsserien die Streuung der Verschiebungen untersucht werden. In den Versuchsserien F1_RB1.1_15.07.20_F, F1_RB2.1_17.07.20_F, F1_RB2.1*_05.03.21_F und F1_RB2.3_10.03.21_F_xy lagen diese unter 40 %. Bei den vier übrigen Versuchsserien wurden die Verschiebungen genauer analysiert. Nach Verschiebung der Last-Verschiebungskurven der Versuchsserie F1_NB_13.07.20_F nach [29] (F1_NB_13.07.20_F¹) liegt die Streuung der Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast mit 34 % unter dem Grenzwert von 40 %.

In den Versuchsserien F1_NB_02.03.21_F, F1_NB_02.03.21_F_xy und F1_RB2.1*_05.03.21_F_xy wurde jeweils ein Test aus der Untersuchung der Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast ausgeschlossen. Bei den jeweiligen Versuchen wurde ein auffälliges Last-Verformungsverhalten festgestellt, das bereits aus der Entwicklung des Produkts bekannt ist. Das Produkt wurde dahingehend überarbeitet, dass das auffällige Verhalten nicht mehr auftritt. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde allerdings mit einer älteren Version des Produkts geprüft, weshalb die Auffälligkeiten aus dem jetzigen Blickpunkt nicht überraschen. Da das Verhalten bekannt und die Ursache bereits behoben ist, werden die Kurven bei der Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens vernachlässigt und in den folgenden Tabellen mit „²⁾“ gekennzeichnet. Sofern in den Versuchsserien die Versuche mit dem genannten Verhalten außer Betracht gelassen werden, sind die Streuungen in allen Serien unter dem Grenzwert von 40 %. Das auffällige Last-Verformungsverhalten wurde auch bei weiteren Versuchsserien beobachtet, führte allerdings nicht zu Streuungen über 40 % innerhalb einer Versuchsserie.

Tabelle 7-5: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Bolzenanker F, F1

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_u)$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	MW($\delta(0,5N_u)$)	cov($\delta(0,5N_u)$)
2	F1_NB_13.07.20_F	0,80	1,67	1,54	0,57	0,85	1,09	45%	> 0,4mm	> 40%
2	F1_NB_13.07.20_F ¹⁾	1,28	1,78	1,54	0,75	0,94	1,26	34%	> 0,4mm	≤ 40%
4	F1_NB_02.03.21_F	0,51	0,73	0,36	0,41	1,14	0,63	51%	> 0,4mm	> 40%
4	F1_NB_02.03.21_F ²⁾	0,51	0,73	0,36	0,41	1,14	0,50	33%	> 0,4mm	≤ 40%
4	F1_NB_02.03.21_F_xy	1,13	1,47	2,65	1,08	0,82	1,43	50%	> 0,4mm	> 40%
4	F1_NB_02.03.21_F_xy ²⁾	1,13	1,47	2,65	1,08	0,82	1,13	24%	> 0,4mm	≤ 40%
2	F1_RB1.1_15.07.20_F	1,00	1,02	1,13	0,85	2,04	1,21	39%	> 0,4mm	≤ 40%
2	F1_RB2.1_17.07.20_F	1,17	1,86	1,30	0,73	0,85	1,18	37%	> 0,4mm	≤ 40%
4	F1_RB2.1*_05.03.21_F	0,51	0,58	0,45	0,45	0,40	0,48	15%	> 0,4mm	≤ 40%
4	F1_RB2.1*_05.03.21_F_xy	2,50	0,51	0,96	0,75	0,48	1,04	80%	> 0,4mm	> 40%
4	F1_RB2.1*_05.03.21_F_xy ²⁾	2,50	0,51	0,96	0,75	0,48	0,68	33%	> 0,4mm	≤ 40%
4	F1_RB2.3_10.03.21_F	0,17	0,35	0,35	0,58	0,52	0,39	41%	≤ 0,4mm	-
4	F1_RB2.3_10.03.21_F_xy	0,55	0,57	0,52	0,44	0,39	0,49	16%	> 0,4mm	≤ 40%

Tabelle 7-6: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Betonschraube H, F1

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_u)$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	MW($\delta(0,5N_u)$)	cov($\delta(0,5N_u)$)
4	F1_NB_02.03.21_H	0,32	0,36	0,29	0,27	0,41	0,33	17%	≤ 0,4mm	≤ 40%
4	F1_NB_02.03.21_H_xy	0,53	0,52	0,51	0,32	0,53	0,48	18%	> 0,4mm	≤ 40%
4	F1_RB2.1*_05.03.21_H	0,34	0,28	0,28	0,29	0,24	0,29	13%	≤ 0,4mm	≤ 40%
4	F1_RB2.1*_05.03.21_H_xy	0,35	0,51	0,47	0,37	0,29	0,40	23%	≤ 0,4mm	≤ 40%
4	F1_RB2.3_10.03.21_H	0,20	0,23	0,32	0,12	0,25	0,22	33%	≤ 0,4mm	≤ 40%
4	F1_RB2.3_10.03.21_H_xy	0,28	0,31	0,32	0,34	0,35	0,32	8%	≤ 0,4mm	≤ 40%

7.3.2 Verbundankersysteme

Wie in Kapitel 3.2.1 erläutert, wird zur Beurteilung des Last-Verformungsverhaltens von zentrisch belasteten Verbundankersystemen unter anderem die Verschiebung jedes geprüften Verankerungsmittels bei mittlerer halber Versagenslast ($\delta(0,5N_u)$) der Versuchsserien untersucht. Sofern dieser Wert nicht in allen Versuchen einer Serie kleiner oder gleich 0,4 mm ist, muss ein Grenzwert für die Streuung cov ($\delta(0,5N_u)$) eingehalten werden. Dieser liegt bei R1 Versuchen bei 25 % und bei B10 bei 40 %.

Die folgenden Tabellen zeigen die Verschiebungen bei mittlerer halber Versagenslast der zentrischen Auszugversuche R1 mit enger Abstützung mit den Verbundankersystemen A, B und D. In allen Versuchsserien mit Ausnahme von R1_NB_13.07.20_A wird unabhängig von der Betonmischung und des geprüften Systems mindestens eines der beiden oben genannten Kriterien eingehalten.

Tabelle 7-7: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Verbundankersystem A, R1

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_i)$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	$\delta(0,5N_i)$	$cov(\delta(0,5N_i))$
8	R1_NB_29.06.18_A	0,36	0,35	0,26	0,39	0,34	0,34	14%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
8	R1_NB_06.09.19_A	0,45	0,48	0,37	0,34	0,38	0,40	14%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
8	R1_NB_15.01.20_A	0,33	0,39	0,35	0,37	0,38	0,37	6%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_NB_17.06.20_A	0,53	0,42	0,38	0,37	0,39	0,42	16%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_NB_13.07.20_A	0,51	0,41	0,22	0,29	0,19	0,32	41%	$> 0,4\text{mm}$	$> 25\%$
2	R1_NB_13.07.20_A_x	0,45	0,47	0,43	0,38	0,53	0,45	12%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_NB_13.07.20_A_xy	0,45	0,44	0,41	0,36	0,37	0,40	10%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_NB_01.10.20/A_A	0,40	0,31	0,32	0,30	0,33	0,33	12%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3/7	R1_NB_01.10.20/A_A_xy	0,43	0,38	0,38	0,44	0,44	0,42	7%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_NB_01.10.20/B_A	0,27	0,24	0,30	0,28	0,30	0,28	9%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_NB_01.10.20/A_A_xy_Ex	0,36	0,39	0,41	0,38	0,41	0,39	5%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_01.10.20/A_A_xy_HDB	0,34	0,35	0,37	0,40	0,35	0,36	6%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
4	R1_NB_02.03.21_A	0,37	0,26	0,35	0,34	0,32	0,33	12%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
4	R1_NB_02.03.21_A_xy	0,32	0,45	0,40	0,43	0,43	0,41	13%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
5	R1_NB_19.03.21_L_St_A	0,47	0,32	0,41	0,31	0,30	0,36	20%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
5	R1_NB_19.03.21_O_St_A	0,45	0,51	0,48	0,55	0,42	0,48	11%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_18.08.21_A	0,41	0,37	0,41	0,39	0,38	0,39	5%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_18.08.21_A_Ex	0,39	0,33	0,36	0,44	0,41	0,39	12%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_18.08.21_A_HDB	0,46	0,40	0,39	0,43	0,42	0,42	7%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
1	R1_RB1.1_24.06.20_A	0,28	0,32	0,28	0,36	0,23	0,29	16%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_RB1.1_24.06.20_A_x	0,34		0,29	0,33		0,32	9%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_RB1.1_24.06.20_A_xy	0,38	0,39	0,45	0,44	0,46	0,42	8%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_RB1.1_15.07.20_A	0,26	0,28	0,35	0,34	0,32	0,31	13%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
2	R1_RB1.1_15.07.20_A_xy	0,39	0,39	0,39	0,46	0,24	0,38	21%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_A	0,33	0,37	0,34	0,37	0,30	0,34	9%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3/7	R1_RB1.1_14.10.20/A_A_xy	0,41	0,44	0,40	0,38	0,45	0,42	7%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_RB1.1_14.10.20/B_A	0,29	0,32	0,30	0,36	0,31	0,32	9%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB1.1_14.10.20/A_A_xy_Ex	0,37	0,34	0,33	0,37	0,35	0,35	5%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB1.1_14.10.20/A_A_xy_HDB	0,40	0,37	0,33	0,38	0,34	0,36	8%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_RB2.1_26.06.20_A	0,37	0,30	0,32	0,36	0,34	0,34	9%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_RB2.1_26.06.20_A_x	0,28	0,33	0,33	0,31	0,30	0,31	7%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_RB2.1_26.06.20_A_xy	0,46	0,43	0,45	0,38	0,42	0,43	7%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_RB2.1_17.07.20_A	0,22	0,27	0,40	0,33	0,28	0,30	23%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
2	R1_RB2.1_17.07.20_A_xy	0,37	0,40	0,40	0,36	0,42	0,39	6%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
4	R1_RB2.1_05.03.21_A	0,31	0,29	0,31	0,19	0,19	0,26	24%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
4	R1_RB2.1_05.03.21_A_xy	0,38	0,34	0,42	0,37	0,39	0,38	9%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.1_20.08.21_A	0,34	0,36	0,36	0,26	0,34	0,33	13%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB2.1_20.08.21_A_Ex	0,36	0,34	0,35	0,38	0,38	0,36	5%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB2.1_20.08.21_A_HDB	0,32	0,30	0,25	0,27	0,30	0,29	10%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB2.2_22.10.20/A_A_xy_Ex	0,37	0,35	0,30	0,24	-	0,32	19%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB2.2_22.10.20/A_A_xy_HDB	0,33	0,31	0,27	0,29	0,36	0,31	11%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_A	0,32	0,35	0,31	0,33	0,34	0,33	5%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3/7	R1_RB2.2_22.10.20/A_A_xy	0,34	0,36	0,23	0,28	0,39	0,32	20%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3	R1_RB2.2_22.10.20/B_A	0,33	0,29	0,25	0,37	0,27	0,30	16%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_L_St_A	0,34	0,31	0,24	0,29	0,28	0,29	13%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_O_St_A	0,41	0,37	0,44		0,54	0,44	17%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.2_23.08.21_A	0,32	0,38	0,40	0,35	0,39	0,37	10%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.2_23.08.21_A_Ex	0,42	0,39	0,36	0,37	0,42	0,39	7%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.2_23.08.21_A_HDB	0,32	0,37	0,45	0,40	0,44	0,40	13%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
4	R1_RB2.3_10.03.21_A	0,18	0,17	0,22	0,20	0,18	0,19	10%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
4	R1_RB2.3_10.03.21_A_xy	0,25	0,28	0,32	0,28	0,26	0,28	10%	$\leq 0,4\text{mm}$	-

Tabelle 7-8: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Verbundankersystem B, R1

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_i)$						Beurteilung		
		1	2	3	4	5	MW	cov	$\delta(0,5N_i)$	$cov(\delta(0,5N_i))$
8	R1_NB_06.09.19_B	0,43	0,39	0,40	0,38	0,43	0,41	6%	> 0,4mm	≤ 25%
8	R1_NB_15.01.20_B_ch	0,40	0,35	0,41	0,35	0,43	0,39	9%	> 0,4mm	≤ 25%
1	R1_NB_17.06.20_B	0,40	0,39	0,33	0,30	0,36	0,36	11%	> 0,4mm	≤ 25%
2	R1_NB_13.07.20_B	0,32	0,38	0,32	0,41	0,32	0,35	13%	> 0,4mm	≤ 25%
2	R1_NB_13.07.20_B_x	0,44	0,44	0,42	0,43	0,45	0,44	3%	> 0,4mm	≤ 25%
2	R1_NB_13.07.20_B_xy	0,33	0,32	0,34	0,45	0,52	0,39	22%	> 0,4mm	≤ 25%
3	R1_NB_01.10.20/A_B	0,28	0,30	0,29	0,29	0,28	0,29	3%	≤ 0,4mm	-
3	R1_NB_01.10.20/B_B	0,34	0,34	0,30	0,32	0,29	0,32	8%	≤ 0,4mm	-
3	R1_NB_01.10.20/A_B_xy	0,38	0,34	0,35	0,38	0,37	0,36	5%	≤ 0,4mm	-
7	R1_NB_01.10.20/A_B_xy_ch	0,33	0,37	0,34	0,37	0,30	0,34	9%	≤ 0,4mm	-
7	R1_NB_01.10.20/A_B_xy_ch_Ex	0,38	0,40	0,36	0,34	0,28	0,35	14%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_NB_01.10.20/A_B_xy_ch_HDB	0,35	0,32	0,40	0,53	0,36	0,39	21%	> 0,4mm	≤ 25%
4	R1_NB_02.03.21_B	0,36	0,32	0,44	0,30	0,32	0,35	15%	> 0,4mm	≤ 25%
4	R1_NB_02.03.21_B_xy_ch	0,36	0,38	0,38	0,37	0,38	0,37	3%	≤ 0,4mm	-
5	R1_NB_19.03.21_L_St_B	0,31	0,30	0,28	0,31	0,12	0,26	31%	≤ 0,4mm	-
5	R1_NB_19.03.21_O_St_B	0,37	0,36	0,38	0,34	0,31	0,35	7%	≤ 0,4mm	-
5	R1_NB_19.03.21_W_St_B	0,20	0,29	0,18	0,21	0,26	0,23	19%	≤ 0,4mm	-
5	R1_NB_19.03.21_L_Ex_B	0,40	0,31	0,35	0,37	0,36	0,36	9%	≤ 0,4mm	-
5	R1_NB_19.03.21_O_Ex_B	0,35	0,31	0,34	0,35	0,38	0,35	7%	≤ 0,4mm	-
5	R1_NB_19.03.21_W_Ex_B	0,35	0,45	0,36	0,33	0,41	0,38	13%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_NB_18.08.21_B	0,28	0,29	0,33	0,42	0,26	0,32	19%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_NB_18.08.21_B_Ex	0,45	0,39	0,40	0,40	0,42	0,41	6%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_NB_18.08.21_B_HDB	0,33	0,29	0,41	0,42	0,33	0,36	16%	> 0,4mm	≤ 25%
1	R1_RB1.1_24.06.20_B	0,39	0,36	0,48	0,31	0,39	0,39	17%	> 0,4mm	≤ 25%
1	R1_RB1.1_24.06.20_B_x	0,34	0,40	0,37	0,34	0,33	0,36	8%	≤ 0,4mm	-
1	R1_RB1.1_24.06.20_B_xy	0,33	0,35	0,47	0,43	0,39	0,39	15%	> 0,4mm	≤ 25%
2	R1_RB1.1_15.07.20_B	0,32	0,22	0,30	0,25	0,23	0,27	17%	≤ 0,4mm	-
2	R1_RB1.1_15.07.20_B_xy	0,39	0,33	0,35	0,34	0,35	0,35	6%	≤ 0,4mm	-
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_B	0,37	0,36	0,34	0,33	0,28	0,34	10%	≤ 0,4mm	-
3	R1_RB1.1_14.10.20/B_B	0,28	0,32	0,31	0,30	0,29	0,30	5%	≤ 0,4mm	-
3/7	R1_RB1.1_14.10.20/A_B_xy_ch	0,31	0,30	0,34	0,42	0,45	0,37	18%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_RB1.1_14.10.20/A_B_xy_ch_HDB	0,38	0,33	0,38	0,31	0,35	0,35	8%	≤ 0,4mm	-
1	R1_RB2.1_26.06.20_B	0,30	0,35	0,32	0,31	0,25	0,31	12%	≤ 0,4mm	-
1	R1_RB2.1_26.06.20_B_x	0,40	0,45	0,36	0,45	0,40	0,41	10%	> 0,4mm	≤ 25%
1	R1_RB2.1_26.06.20_B_xy	0,34	0,39	0,36	0,38	0,38	0,37	5%	≤ 0,4mm	-
2	R1_RB2.1_17.07.20_B	0,37	0,30	0,36	0,34	0,35	0,34	7%	≤ 0,4mm	-
2	R1_RB2.1_17.07.20_B_xy	0,42	0,44	0,44	0,39	0,29	0,40	16%	> 0,4mm	≤ 25%
4	R1_RB2.1_05.03.21_B	0,28	0,26	0,25	0,29	0,25	0,27	7%	≤ 0,4mm	-
4	R1_RB2.1_05.03.21_B_xy_ch	0,32	0,33	0,35	0,32	0,40	0,34	9%	≤ 0,4mm	-
7	R1_RB2.1_20.08.21_B	0,34	0,25	0,22	0,32	0,38	0,30	22%	≤ 0,4mm	-
7	R1_RB2.1_20.08.21_B_Ex	0,35	0,41	0,44	0,50	0,42	0,43	13%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_RB2.1_20.08.21_B_HDB	0,33	0,41	0,35	0,34	0,41	0,37	11%	> 0,4mm	≤ 25%
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_B	0,38	0,30	0,29	0,32	0,26	0,31	14%	≤ 0,4mm	-
3	R1_RB2.2_22.10.20/B_B	0,32	0,25	0,28	0,30	0,17	0,26	22%	≤ 0,4mm	-
7	R1_RB2.2_22.10.20/A_B_xy_ch_Ex	0,34	0,37	0,34	0,43	0,33	0,36	11%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_RB2.2_22.10.20/A_B_xy_ch_HDB	0,35	0,33	0,36	0,36	0,29	0,34	9%	≤ 0,4mm	-
3/7	R1_RB2.2_22.10.20/A_B_xy_ch	0,39	0,28	0,33	0,34	0,31	0,33	12%	≤ 0,4mm	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_L_St_B	0,26	0,30	0,21	0,32	0,23	0,26	18%	≤ 0,4mm	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_O_St_B	0,34	0,32	0,24	0,25	0,30	0,29	15%	≤ 0,4mm	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_W_St_B	0,27	0,26	0,26	0,19	0,32	0,26	17%	≤ 0,4mm	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_L_Ex_B	0,35	0,31	0,35	0,35	0,37	0,35	6%	≤ 0,4mm	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_O_Ex_B	0,29	0,25	0,31	0,23	0,26	0,27	13%	≤ 0,4mm	-
5	R1_RB2.2_29.03.21_W_Ex_B	0,31	0,41	0,25	0,34	0,36	0,33	18%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_RB2.2_23.08.21_B_ch	0,46	0,35	0,42	0,40	0,45	0,41	11%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_RB2.2_23.08.21_B_ch_Ex	0,41	0,33	0,37	0,37	0,42	0,38	10%	> 0,4mm	≤ 25%
7	R1_RB2.2_23.08.21_B_ch_HDB	0,38	0,34	0,38	0,40	0,39	0,38	7%	> 0,4mm	≤ 25%
4	R1_RB2.3_10.03.21_B	0,25	0,17	0,16	0,21	0,22	0,20	19%	≤ 0,4mm	-
4	R1_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch	0,26	0,19	0,28	0,25	0,28	0,25	15%	≤ 0,4mm	-

Tabelle 7-9: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Verbundankersystem D, R1

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_u)$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	$\delta(0,5N_u)$	$cov(\delta(0,5N_u))$
8	R1_NB_29.06.18_D	0,28	0,34	0,32	0,23	0,35	0,30	16%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
8	R1_NB_06.09.19_D	0,47	0,42	0,37	0,41	0,41	0,42	8%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
8	R1_NB_15.01.20_D_ch	0,40	0,44	0,31	0,36	0,37	0,38	13%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_NB_13.07.20_D	0,26	0,34	0,31	0,30	0,32	0,31	9%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
2	R1_NB_13.07.20_D_x	0,40	0,39	0,34	0,40	0,40	0,39	6%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_NB_13.07.20_D_xy	0,43	0,38	0,46	0,44	0,42	0,43	7%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_NB_01.10.20/A_D	0,39	0,33	0,33	0,34	0,28	0,34	12%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3	R1_NB_01.10.20/B_D	0,35	0,37	0,33	0,33	0,34	0,35	5%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3	R1_NB_01.10.20/A_D_xy	0,37	0,37	0,34	0,34	0,34	0,35	4%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_NB_01.10.20/A_D_xy_ch_Ex	0,40	0,32	0,26	0,33	0,36	0,34	16%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_01.10.20/A_D_xy_ch	0,36	0,24	0,29	0,29	0,35	0,30	16%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_NB_01.10.20/A_D_xy_ch_HDB	0,38	0,32	0,39	0,33	0,35	0,35	9%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
4	R1_NB_02.03.21_D	0,40	0,28	0,35	0,30	0,32	0,33	14%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
4	R1_NB_02.03.21_D_xy_ch	0,28	0,36	0,33	0,43	0,29	0,34	18%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_18.08.21_D	0,40	0,31	0,25	0,45	0,37	0,36	22%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_18.08.21_D_Ex	0,44	0,34	0,29	0,37	0,40	0,37	15%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_NB_18.08.21_D_HDB	0,41	0,45	0,36	0,34	0,39	0,39	11%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
1	R1_RB1.1_24.06.20_D	0,36	0,36	0,29	0,32	0,34	0,33	8%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_RB1.1_24.06.20_D_x	0,47	0,47	0,43	0,42	0,42	0,44	6%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
1	R1_RB1.1_24.06.20_D_xy	0,43	0,44	0,49	0,43	0,45	0,45	5%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_RB1.1_15.07.20_D	0,39	0,29	0,38	0,27	0,31	0,33	17%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
2	R1_RB1.1_15.07.20_D_xy	0,40	0,45	0,47	0,39	0,42	0,43	7%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_D	0,26	0,27	0,28	0,31	0,30	0,28	8%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3	R1_RB1.1_14.10.20/B_D	0,31	0,34	0,37	0,36	0,44	0,36	13%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_RB1.1_14.10.20/A_D_xy	0,35	0,39	0,34	0,32	0,33	0,35	8%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB1.1_14.10.20/A_D_xy_ch	0,38	0,40	0,33	0,38	0,31	0,36	10%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB1.1_14.10.20/A_D_xy_ch_Ex	0,43	0,42	0,38	0,39	0,29	0,38	14%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB1.1_14.10.20/A_D_xy_ch_HDB	0,32	0,33	0,33	0,33	0,31	0,32	3%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
1	R1_RB2.1_26.06.20_D	0,34	0,28	0,33	0,40		0,34	14%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
1	R1_RB2.1_26.06.20_D_x	0,28	0,44	0,43	0,51	0,40	0,41	20%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
1	R1_RB2.1_26.06.20_D_xy	0,40	0,35	0,39	0,38	0,42	0,39	6%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
2	R1_RB2.1_17.07.20_D	0,29	0,34	0,33	0,36	0,35	0,33	7%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
2	R1_RB2.1_17.07.20_D_xy	0,48	0,46	0,34	0,44	0,42	0,43	12%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
4	R1_RB2.1_05.03.21_D	0,35	0,24	0,28	0,25	0,26	0,28	17%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
4	R1_RB2.1_05.03.21_D_xy_ch	0,38	0,36	0,42	0,31	0,32	0,36	13%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.1_20.08.21_D	0,35	0,38	0,43	0,32	0,32	0,36	13%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.1_20.08.21_D_Ex	0,46	0,31	0,36	0,33	0,29	0,35	19%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.1_20.08.21_D_HDB	0,45	0,41	0,44	0,42	0,44	0,43	4%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_D	0,38	0,38	0,29	0,28	0,30	0,33	16%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3	R1_RB2.2_22.10.20/B_D	0,48	0,39	0,29	0,36	0,36	0,37	18%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.2_22.10.20/A_D_xy_ch_Ex	0,31	0,35	0,33	0,36	0,27	0,32	11%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB2.2_22.10.20/A_D_xy_ch	0,38	0,39	0,39	0,38	0,37	0,38	3%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB2.2_22.10.20/A_D_xy_ch_HDB	0,31	0,37	0,34	0,37	0,33	0,35	7%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
3	R1_RB2.2_22.10.20/A_D_xy	0,29	0,34	0,27	0,34	0,37	0,32	13%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
7	R1_RB2.2_23.08.21_D	0,39	0,46	0,34	0,33	0,32	0,37	15%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.2_23.08.21_D_Ex	0,37	0,38	0,39	0,36	0,41	0,38	5%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
7	R1_RB2.2_23.08.21_D_HDB	0,37	0,31	0,48	0,40	0,42	0,39	16%	$> 0,4\text{mm}$	$\leq 25\%$
4	R1_RB2.3_10.03.21_D	0,18	0,22	0,20	0,18	0,28	0,21	19%	$\leq 0,4\text{mm}$	-
4	R1_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch	0,24	0,26	0,32	0,33	0,30	0,29	14%	$\leq 0,4\text{mm}$	-

Die nachfolgenden Tabellen enthalten die Werte der Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast $\delta(0,5N_u)$ aus den eng abgestützten Auszugversuchen in gerissenem Beton B10. Es ergibt sich ein vergleichbares Bild zu den oben erläuterten Ergebnissen aus den Versuchen in ungerissenem Beton. In allen Versuchsserien unabhängig der Betonmischung und des geprüften Systems wurde mindestens eines der beiden Kriterien eingehalten.

Tabelle 7-10: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Verbundankersystem A, B10

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_{u_i})$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	$\delta(0,5N_{u_i})$	$cov(\delta(0,5N_{u_i}))$
2	B10_NB_13.07.20_A	0,30	0,38	0,34	0,39	0,43	0,37	13%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_NB_02.03.21_A	0,42	0,35	0,38	0,48	0,30	0,39	18%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_NB_02.03.21_A_xy	0,47	0,44	0,42	0,36	0,43	0,43	9%	> 0,4mm	≤ 40%
2	B10_RB1.1_15.07.20_A	0,26	0,31	0,46	0,54	0,35	0,38	30%	> 0,4mm	≤ 40%
2	B10_RB2.1_17.07.20_A	0,30	0,41	0,45	0,38	0,36	0,38	14%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_RB2.1*_05.03.21_A	0,45	0,33	0,42	0,32	0,37	0,38	15%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_RB2.1*_05.03.21_A_xy	0,40	0,34	0,24	0,34	0,32	0,33	18%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_RB2.3_10.03.21_A	0,17	0,28	0,15	0,19	0,13	0,18	32%	≤ 0,4mm	-
4	B10_RB2.3_10.03.21_A_xy	0,28	0,23	0,19	0,24	0,23	0,23	15%	≤ 0,4mm	-

Tabelle 7-11: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Verbundankersystem B, B10

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_{u_i})$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	$\delta(0,5N_{u_i})$	$cov(\delta(0,5N_{u_i}))$
2	B10_NB_13.07.20_B		0,42	0,49	0,45	0,32	0,42	17%	> 0,4mm	≤ 40%
2	B10_NB_13.07.20_B_B		0,32	0,40	0,22	0,28	0,30	24%	≤ 0,4mm	-
4	B10_NB_02.03.21_B	0,39	0,37	0,44	0,44	0,28	0,39	17%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_NB_02.03.21_B_xy_ch	0,31	0,37	0,38	0,28	0,22	0,31	21%	≤ 0,4mm	-
2	B10_RB1.1_15.07.20_B	0,38	0,38	0,27	0,38	0,38	0,36	13%	≤ 0,4mm	-
2	B10_RB2.1_17.07.20_B	0,31	0,42	0,33	0,31	0,36	0,35	13%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_RB2.1*_05.03.21_B	0,39	0,25	0,27	0,28	0,21	0,28	24%	≤ 0,4mm	-
4	B10_RB2.1*_05.03.21_B_xy_ch	0,30	0,21	0,27	0,21	0,27	0,25	16%	≤ 0,4mm	-
4	B10_RB2.3_10.03.21_B	0,12	0,13	0,26	0,20	0,09	0,16	42%	≤ 0,4mm	-
4	B10_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch	0,29	0,17	0,19	0,21	0,35	0,24	31%	≤ 0,4mm	-

Tabelle 7-12: Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast, Verbundankersystem D, B10

Versuchs-Reihe	Serie	$\delta(0,5N_{u_i})$							Beurteilung	
		1	2	3	4	5	MW	cov	$\delta(0,5N_{u_i})$	$cov(\delta(0,5N_{u_i}))$
2	B10_NB_13.07.20_D	0,44	0,47	0,50	0,52	0,43	0,47	8%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_NB_02.03.21_D	0,32	0,36	0,50	0,40	0,37	0,39	18%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_NB_02.03.21_D_xy_ch	0,35	0,50	0,39	0,44	0,49	0,43	15%	> 0,4mm	≤ 40%
2	B10_RB1.1_15.07.20_D	0,30	0,29	0,44	0,36	0,39	0,36	18%	> 0,4mm	≤ 40%
2	B10_RB2.1_17.07.20_D	0,28	0,36	0,40	0,51	0,53	0,42	25%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_RB2.1*_05.03.21_D	0,38	0,45	0,40	0,35	0,27	0,37	18%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_RB2.1*_05.03.21_D_xy_ch	0,45	0,52	0,37	0,43	0,47	0,45	12%	> 0,4mm	≤ 40%
4	B10_RB2.3_10.03.21_D	0,19	0,10	0,09	0,13	0,12	0,13	32%	≤ 0,4mm	-
4	B10_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch	0,38	0,37	0,32	0,35	0,37	0,36	6%	≤ 0,4mm	-

Neben der oben gezeigten Untersuchung der Verschiebungen wird bei Verbundankersystemen zudem untersucht, ob es während der Belastung zu unkontrolliertem Schlupf kam. Hierfür ist nach [18] die Last $N_{u,adh}$ zu kontrollieren. Es hat sich gezeigt, dass sich aus der Auswertung einiger Versuchsserien ein Wert $\alpha_1 < 1,0$ (siehe Gl. (22)) ergab. Dies wird allerdings nicht auf das Verhalten von möglichem ungewollten Schlupf zurückgeführt. Es kommen mehrere Faktoren zum Tragen.

Wie in Kapitel 3.2.1 erläutert, wird die ermittelte Last $N_{u,adh}$ mit dem Wert $N_{Rk,p}$ aus der ETA des jeweiligen Produkts verglichen. Die Werte $N_{Rk,p}$ wurden innerhalb der Zulassungsverfahren des jeweiligen Produkts ermittelt. In Kapitel 6 wurde ausführlich dargestellt, dass innerhalb des Forschungsvorhabens Versuchsserien mit allen Verbundankersystemen in Versuchskörpern

unterschiedlichen Alters durchgeführt. Tendenziell wurden deutlich niedriger Verbundspannungen in den Testzeiträumen t_1 und t_2 ermittelt. Für diese Testzeiträume existieren allerdings keine Vergleichswerte $N_{Rk,p}$ in der ETA. Es wurden demnach die ermittelten Lasten $N_{u,adh}$ weiterhin dem selben Wert $N_{Rk,p}$ gegenübergestellt. Daher ist bereits bedingt durch den Einfluss des Betonalters in den Versuchsserien aus dem Testzeitraum t_1 und t_2 ein kleinerer Wert α_1 zu erwarten.

Bei einigen Last-Verschiebungskurven startete die Verschiebung erst ab einer Last im Bereich von ca. 10 bis 20 % der Versagenslast, was die Höhe des Wertes $N_{u,adh}$ deutlich beeinflusst. Es ist davon auszugehen, dass mit Beginn der Belastung bei nicht vorgespannten Systemen in R1 Versuchen eine Verschiebung gemessen werden muss. Selbst wenn aus dem Verbundankersystem zu Beginn keine Verschiebung resultieren würde, ist durch die aus dem Versuchsaufbau resultierende freie Dehnlänge der Gewindestange oberhalb der Betonoberfläche bis zum Punkt, an dem die Mutter angreift, ein Wert abweichend von null zu erwarten.

Bei den Versuchsserien, die innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden und einen Wert $\alpha_1 < 1,0$ aufwiesen, wurde eine Kurvenkorrektur vorgenommen, die in Abbildung 7-12 mithilfe der Ergebnisse einer Versuchsserie graphisch dargestellt wird. (1) zeigt die Last-Verformungskurven aus den Rohdaten der fünf Auszugversuche. Aus jeder der Kurven wurde im Bereich zwischen 25 % und 45 % der Versagenslast die Steigung ermittelt. Dieser Bereich wurde pauschal für alle Versuche festgelegt. Die ermittelte Steigung wurde anschließend bereits ab Start des Versuchs angesetzt und die gesamte Last-Verschiebungskurve in x-Richtung verschoben, was in Bild (2) deutlich gemacht wird. Im Schritt zu Bild (3) wird eine Gerade mit der ermittelten Steigung vom Punkt 0/0 bis zur hier gewählten Stelle (bspw. 25 % der Versagenslast) gezeichnet. Bild (3) wurde in den Protokollen im Anhang ausgelassen, um deutlich erkennbar zu machen, dass die Kurven bearbeitet wurden. Zudem wurden die Versuchsbezeichnungen der Versuchsserien, bei denen die Kurvenkorrektur angewendet wurde, um „1“ ergänzt.

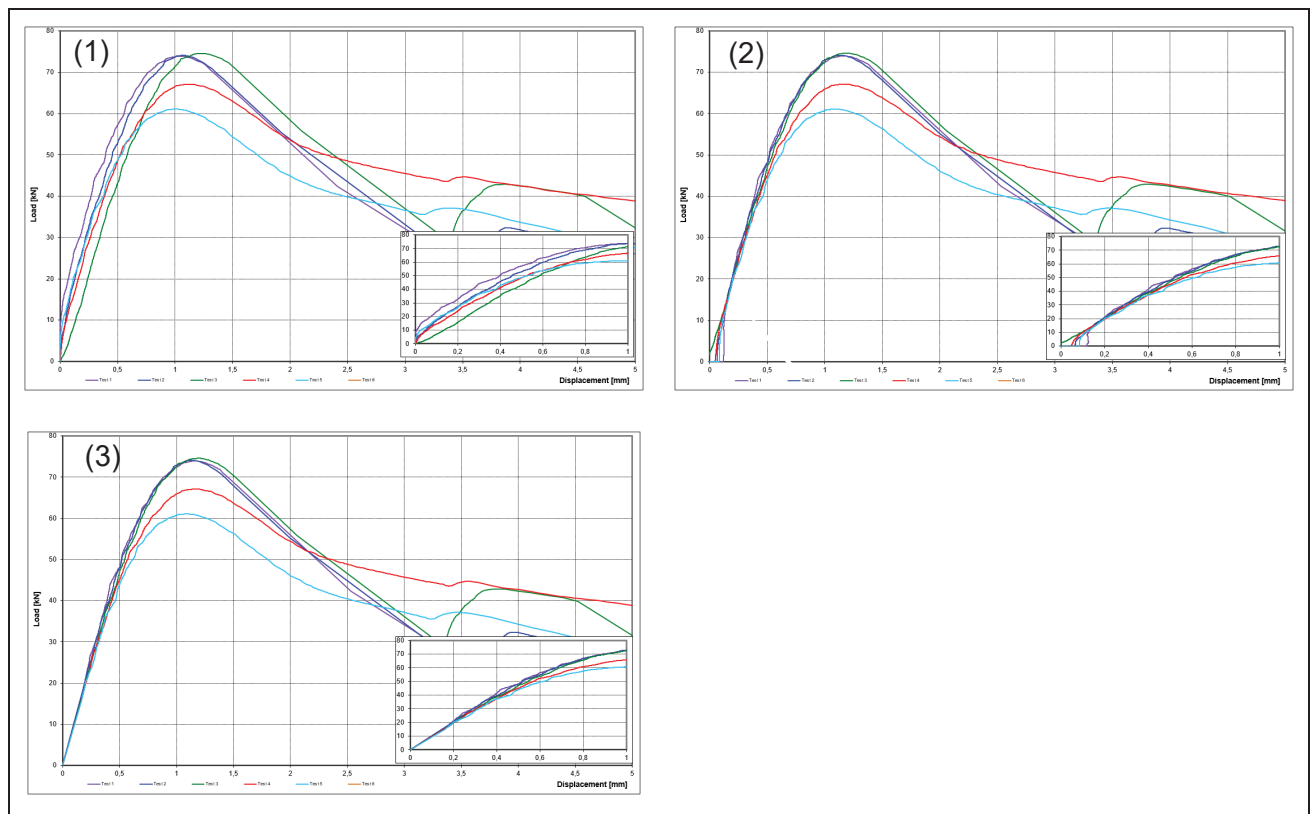


Abbildung 7-12: Beispiel Kurvenkorrektur Verbundankersystem, zentrischer Auszugversuch mit enger Abstützung

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die ermittelten Werte für $N_{u,adh}$ sowie den Faktor α_1 aus den R1 und B10 Versuchen mit den Verbundankersystemen A, B und D. Es werden ausschließlich die Serien dargestellt, bei denen vor Anwendung der Kurvenkorrektur ein Wert $\alpha_1 < 1,0$ ermittelt wurde. Aus den B10 Versuche mit dem System A ergaben sich keine $\alpha_1 < 1,0$.

Es ist zu erkennen, dass durch die Korrektur der Kurven in allen R1 Versuchen keine Abminderung der Verbundspannung erforderlich wäre, da alle $\alpha_1 \geq 1,0$.

In den B10 Versuchen lässt sich beobachten, dass in den Versuchsserien B10_RB2.3_10.03.21_B, B10_RB2.3_10.03.21_B_xy und B10_RB2.3_10.03.21_D selbst nach Kurvenkorrektur die Auswertung nicht in allen Versuchen zu $\alpha_1 \geq 1,0$ führte. Dies wird allerdings darauf zurückgeführt, dass in den genannten Serien bereits deutlich niedrigere Versagenslasten ermittelt wurden (siehe Kapitel 6). Teilweise wäre auch ein $\alpha_1 < 1,0$ mit maximaler Versagenslast ($N_{u,adh} = N_{u,t}$).

Grundsätzlich lässt sich kein Trend erkennen, in welchem Beton kleinere Werte für α_1 ermittelt wurden. Es wurden in allen Betonmischungen Versuche durchgeführt, deren Auswertung vor Kurvenkorrektur zu Werten von $\alpha_1 < 1,0$ führten. Auffällig ist jedoch, dass in den extern hergestellten Betonchargen RB2.1*_05.03.21 und RB2.3_10.03.21 in fast allen Serien Versuche durchgeführt wurden, die zu einem $\alpha_1 < 1,0$ führten. Wie in Kapitel 6 dargestellt, wurden in diesen Betonchargen zum Teil deutlich geringere Versagenslasten erzielt. Da zur Ermittlung des Wertes α_1 der Wert $N_{RK,p}$ aus der ETA des jeweiligen Produkts jedoch gleich blieb, ist ein geringerer Wert für α_1 die logische Folge. Zudem ist zu erwähnen, dass mit Ausnahme der extern hergestellten Betonchargen (NB_02.03.21, RB2.1*_05.03.21 und RB2.3_10.03.21) keine Versuche im Prüfzeitraum t3 durchgeführt wurden, die bereits zu einem Wert $\alpha_1 < 1,0$ führten. Somit kann festgehalten werden,

dass die Versuchsserien in den gezeigten Tabellen deutlich machen, dass mit Ausnahme der genannten Betonchargen lediglich in Versuchsserien im Prüfzeitraum t1 Werte für α_1 mit einem Wert kleiner 1,0 ermittelt wurden. Dies ist allerdings auch wieder damit zu erklären, dass die Versagenslasten, die im Prüfzeitraum t1 erzielt wurden, grundsätzlich in allen Betonmischungen deutlich unter den Werten aus den Versuchen im Prüfzeitraum t3 bzw. den Werten aus den Zulassungsverfahren lagen (siehe Kapitel 6).

Tabelle 7-13: Verbundankersystem A, R1: $N_{u,adh}$, α_1

Serie	$N_{u,adh}$ [kN]					α_1				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
R1_NB_13.07.20_A ¹⁾	74,68	78,76	73,72	78,42	76,50	1,79	1,93	1,80	1,91	1,85
R1_NB_13.07.20_A	75,14	78,77	34,17	53,59	28,34	1,80	1,93	0,83	1,30	0,68
R1_NB_01.10.20/B_A ¹⁾	64,21	51,48	59,75	70,53	56,86	1,55	1,29	1,47	1,70	1,38
R1_NB_01.10.20/B_A	43,46	27,67	34,87	40,82	47,06	1,05	0,69	0,86	0,98	1,14
R1_NB_02.03.21_A ¹⁾	56,15	65,96	64,19	68,39	66,33	1,43	1,63	1,59	1,64	1,68
R1_NB_02.03.21_A	30,23	37,70	52,00	25,61	39,00	0,77	0,93	1,29	0,61	0,99
R1_NB_19.03.21_L_St_A ¹⁾	85,47	75,61	76,00	74,43	77,87	2,28	1,86	1,84	1,76	1,87
R1_NB_19.03.21_L_St_A	85,47	61,45	74,24	50,14	39,50	2,28	1,51	1,80	1,19	0,95
R1_RB1.1_24.06.20_A ¹⁾	69,73	69,16	77,98	81,39	73,54	1,69	1,62	1,81	1,97	1,77
R1_RB1.1_24.06.20_A	39,62	65,93	67,71	81,33	41,31	0,96	1,55	1,57	1,97	1,00
R1_RB2.1_17.07.20_A ¹⁾	72,79	73,44	74,34	66,04	59,85	1,80	1,76	1,78	1,61	1,46
R1_RB2.1_17.07.20_A	31,96	57,95	74,60	58,31	37,22	0,79	1,39	1,79	1,42	0,91
R1_RB2.1* 05.03.21_A ¹⁾	55,29	54,70	56,64	55,71	56,05	1,36	1,35	1,36	1,37	1,29
R1_RB2.1* 05.03.21_A	50,32	53,75	55,80	29,80	30,59	1,24	1,33	1,34	0,73	0,70
R1_RB2.1_20.08.21_A_HDB ¹⁾	69,52	73,42	75,96	81,84	80,78	1,72	1,81	1,88	2,04	1,97
R1_RB2.1_20.08.21_A_HDB	50,94	48,29	39,94	67,87	54,19	1,26	1,19	0,99	1,69	1,32
R1_RB2.2_29.03.21_L_St_A ¹⁾	69,77	77,61	78,86	73,17	74,92	1,58	1,76	1,76	1,68	1,70
R1_RB2.2_29.03.21_L_St_A	60,76	63,45	42,26	34,77	31,68	1,38	1,44	0,95	0,80	0,72
R1_RB2.3_10.03.21_A ¹⁾	44,04	45,36	46,30	52,53	53,21	1,09	1,14	1,10	1,27	1,27
R1_RB2.3_10.03.21_A	23,62	18,35	44,30	37,87	34,14	0,59	0,46	1,06	0,92	0,82
R1_RB2.3_10.03.21_A_xy ¹⁾	70,52	68,07	66,18	65,57	68,95	1,69	1,65	1,64	1,59	1,67
R1_RB2.3_10.03.21_A_xy	41,38	66,11	64,76	57,96	54,05	0,99	1,60	1,60	1,41	1,31

¹⁾Anwendung Kurvenkorrektur

Tabelle 7-14: Verbundankersystem B, R1: $N_{u,adh}$, α_1

Serie	$N_{u,adh}$ [kN]					α_1				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
R1_NB_01.10.20/A_B ¹⁾	52,71	61,07	62,85	59,11	66,33	1,39	1,64	1,75	1,62	1,78
R1_NB_01.10.20/A_B	36,02	55,83	53,72	57,58	56,42	0,95	1,50	1,50	1,58	1,51
R1_NB_02.03.21_B ¹⁾	51,83	59,67	52,16	71,18	67,06	1,42	1,60	1,42	1,87	1,75
R1_NB_02.03.21_B	22,18	52,46	50,80	69,63	66,17	0,61	1,41	1,38	1,83	1,72
R1_NB_19.03.21_W_St_B ¹⁾	58,24	55,41	52,81	63,15	65,31	1,55	1,49	1,43	1,68	1,76
R1_NB_19.03.21_W_St_B	27,31	50,11	22,09	52,27	62,09	0,73	1,35	0,60	1,39	1,68
R1_RB1.1_15.07.20_B ¹⁾	46,87	59,35	54,66	51,15	58,84	1,29	1,59	1,49	1,33	1,55
R1_RB1.1_15.07.20_B	46,92	37,19	54,69	25,39	48,65	1,29	1,00	1,49	0,66	1,28
R1_RB2.1* 05.03.21_B ¹⁾	52,73	56,89	51,79	54,19	50,71	1,48	1,51	1,45	1,49	1,38
R1_RB2.1* 05.03.21_B	35,84	42,17	36,79	47,80	30,31	1,01	1,12	1,03	1,31	0,83
R1_RB2.2_29.03.21_O_Ex_B ¹⁾	60,04	63,87	56,38	55,40	53,70	1,59	1,71	1,51	1,47	1,42
R1_RB2.2_29.03.21_O_Ex_B	47,43	45,76	49,93	21,94	33,64	1,25	1,22	1,34	0,58	0,89
R1_RB2.2_29.03.21_O_St_B ¹⁾	49,50	52,39	57,62	55,65	61,99	1,28	1,32	1,50	1,45	1,55
R1_RB2.2_29.03.21_O_St_B	30,60	50,36	35,33	44,00	59,63	0,79	1,27	0,92	1,15	1,49
R1_RB2.2_29.03.21_W_St_B ¹⁾	55,56	55,03	51,58	58,26	58,22	1,49	1,52	1,40	1,58	1,58
R1_RB2.2_29.03.21_W_St_B	48,31	54,63	47,52	26,99	58,72	1,29	1,51	1,29	0,73	1,60
R1_RB2.3_10.03.21_B ¹⁾	40,49	39,39	43,60	40,55	40,51	1,07	1,01	1,09	1,08	1,09
R1_RB2.3_10.03.21_B	40,02	24,31	23,06	30,20	39,37	1,06	0,62	0,57	0,80	1,06
R1_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch ¹⁾	59,36	51,28	56,83	58,41	53,31	1,62	1,42	1,54	1,59	1,41
R1_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch	57,01	22,22	51,84	56,74	50,90	1,55	0,62	1,41	1,54	1,34

¹⁾Anwendung Kurvenkorrektur

Tabelle 7-15: Verbundankersystem D, R1: $N_{u,adh}$, α_1

Serie	$N_{u,adh}$ [kN]					α_1				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
R1_NB_01.10.20/B_D ¹⁾	63,26	60,24	61,23	61,46	55,79	2,44	2,35	2,35	2,42	2,21
R1_NB_01.10.20/B_D	61,14	50,23	53,62	29,85	23,39	2,36	1,96	2,06	1,18	0,93
R1_RB1.1_14.10.20/A_D ¹⁾	60,53	57,63	60,36	56,78	55,03	2,34	2,26	2,45	2,26	2,20
R1_RB1.1_14.10.20/A_D	42,31	33,39	41,98	37,00	21,71	1,64	1,31	1,70	1,47	0,87
R1_RB2.1*_05.03.21_D ¹⁾	52,62	52,56	46,83	51,72	52,32	2,00	2,07	1,88	1,95	1,98
R1_RB2.1*_05.03.21_D	52,66	35,97	19,80	28,95	44,24	2,00	1,42	0,79	1,09	1,68
R1_RB2.3_10.03.21_D ¹⁾	46,89	38,38	46,18	44,20	29,26	1,80	1,49	1,79	1,75	1,15
R1_RB2.3_10.03.21_D	25,08	21,97	20,30	20,32	20,69	0,96	0,85	0,79	0,81	0,81

¹⁾Anwendung Kurvenkorrektur

Tabelle 7-16: Verbundankersystem B, B10: $N_{u,adh}$, α_1

Serie	$N_{u,adh}$ [kN]					α_1				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
B10_NB_02.03.21_B_xy_ch ¹⁾	32,83	37,61	35,38	39,21	40,94	1,80	2,11	1,91	2,16	2,27
B10_NB_02.03.21_B_xy_ch	12,86	36,08	35,38	32,62	14,71	0,71	2,03	1,91	1,79	0,81
B10_NB_13.07.20_B ¹⁾		20,88	22,66	24,85	25,44		1,12	1,23	1,34	1,36
B10_NB_13.07.20_B		10,91	7,60	24,41	11,53		0,58	0,41	1,32	0,62
B10_NB_13.07.20_B_B ¹⁾		22,51	24,98	24,08	27,19		1,24	1,36	1,30	1,47
B10_NB_13.07.20_B_B		12,67	24,44	15,11	10,79		0,70	1,33	0,81	0,58
B10_RB1.1_15.07.20_B ¹⁾	26,91	27,09	41,44	33,01	32,07	1,46	1,45	2,24	1,78	1,77
B10_RB1.1_15.07.20_B	15,75	17,47	39,69	32,90	32,10	0,85	0,94	2,14	1,78	1,77
B10_RB2.1*_05.03.21_B ¹⁾	28,49	34,11	37,35	27,27	24,73	1,55	1,84	2,06	1,44	1,35
B10_RB2.1*_05.03.21_B	28,40	32,50	35,31	20,43	15,03	1,54	1,75	1,95	1,08	0,82
B10_RB2.1*_05.03.21_B_xy_ch ¹⁾	32,30	32,49	27,85	26,79	29,70	1,77	1,70	1,58	1,51	1,69
B10_RB2.1*_05.03.21_B_xy_ch	28,78	25,59	25,10	15,15	22,51	1,57	1,34	1,42	0,86	1,28
B10_RB2.1_17.07.20_B ¹⁾	30,88	26,90	28,59	23,80	28,46	1,65	1,47	1,50	1,28	1,53
B10_RB2.1_17.07.20_B	27,69	25,07	25,70	10,31	28,21	1,48	1,37	1,35	0,56	1,52
B10_RB2.3_10.03.21_B ¹⁾	14,66	14,49	13,65	16,00	14,57	0,78	0,79	0,73	0,87	0,79
B10_RB2.3_10.03.21_B	15,94	15,10	7,84	6,21	14,64	0,85	0,82	0,42	0,34	0,80
B10_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch ¹⁾	26,28	22,28	22,22	17,59	17,24	1,40	1,20	1,20	0,98	0,95
B10_RB2.3_10.03.21_B_xy_ch	24,66	15,68	18,32	10,48	7,14	1,32	0,85	0,99	0,58	0,39

¹⁾Anwendung Kurvenkorrektur

Tabelle 7-17: Verbundankersystem D, B10: $N_{u,adh}$, α_1

Serie	$N_{u,adh}$ [kN]					α_1				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
B10_RB1.1_15.07.20_D ¹⁾	36,08	32,21	28,87	32,03	33,36	1,69	1,49	1,35	1,48	1,57
B10_RB1.1_15.07.20_D	26,14	13,80	27,80	21,03	27,65	1,23	0,64	1,30	0,97	1,30
B10_RB2.1*_05.03.21_D ¹⁾	22,51	18,69	19,93	24,97	23,57	1,66	1,36	1,44	1,86	1,72
B10_RB2.1*_05.03.21_D	20,72	9,84	20,17	24,63	22,05	1,53	0,72	1,46	1,84	1,61
B10_RB2.1*_05.03.21_D_xy_ch ¹⁾	33,74	35,71	54,92	64,54	55,77	1,57	1,67	2,57	3,02	2,61
B10_RB2.1*_05.03.21_D_xy_ch	21,23	28,15	52,58	64,54	55,58	0,99	1,32	2,46	3,02	2,61
B10_RB2.1_17.07.20_D ¹⁾	50,85	42,29	24,98	33,99	35,21	2,39	1,92	1,17	1,60	1,65
B10_RB2.1_17.07.20_D	49,54	39,04	20,10	26,13	34,84	2,33	1,78	0,94	1,23	1,64
B10_RB2.3_10.03.21_D ¹⁾	11,97	17,82	10,37	14,74	16,46	0,85	1,29	0,77	1,05	1,17
B10_RB2.3_10.03.21_D	8,06	17,66	14,21	15,02	16,64	0,57	1,27	1,06	1,07	1,18
B10_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch ¹⁾	28,42	26,67	22,75	31,37	28,89	1,31	1,24	1,04	1,45	1,33
B10_RB2.3_10.03.21_D_xy_ch	26,18	16,21	12,03	12,08	22,64	1,20	0,75	0,55	0,56	1,05

¹⁾Anwendung Kurvenkorrektur

7.3.3 Zwischenfazit: Last-Verformungsverhalten

Bei der Auswertung des Last-Verformungsverhaltens nach [29] zeigten sich keine Auffälligkeiten für den Bolzenanker F und die Betonschraube H in den Versuchen in ungerissenem Beton (A1). Alle Verschiebungen bei mittlerer halber Versagenslast lagen im Serienmittelwert unter 0,4 mm – sowohl für Normalbeton als auch für Recyclingbeton.

Bei den Versuchen in gerissenem Beton (F1) wurden mit dem Bolzenanker F erwartungsgemäß in der Mehrzahl der Versuchsserien Verschiebungen größer 0,4 mm bei halber mittlerer Versagenslast ermittelt. In diesen Fällen wurde die Streuung der Testergebnisse innerhalb einer Versuchsserie untersucht. Diese erreichte teilweise Werte über 40 %. Dies lässt sich allerdings durch ein für dieses Produkt bekanntes, bereits aber behobenes Verhalten erklären. Sofern die Versuche, die innerhalb des Forschungsvorhabens das auffällige Verformungsverhalten aufwiesen, aus der Analyse ausgenommen werden, ergeben sich Werte für die Streuung von unter 40 %.

Die Werte der Verschiebung bei mittlerer halber Versagenslast lagen im Mittel der jeweils mit der Betonschraube H im gerissenen Beton durchgeführten Auszugversuche mit Ausnahme einer Serie unter 0,4 mm. Bei der Serie mit einem Wert über 0,4 mm wurde allerdings die Streuung von 40 % eingehalten.

Bei den Verbundankersystemen A, B und D konnte nach Auswertung des Last-Verformungsverhaltens nach [18] ebenfalls kein signifikanter Einfluss durch die Betonmischung erkannt werden. In allen Versuchen mit Ausnahme einer Serie in Normalbeton wurde entweder eine Verschiebung bei mittlerer halber Versagenslast von $\delta(0,5N_u) \leq 0,4$ mm ermittelt oder die Streuung der Verschiebungen innerhalb einer Serie lag unter 25 % bzw. 40 %.

Bei der Analyse der Last $N_{u,adh}$ wurden in zahlreichen Versuchsserien Werte ermittelt, die zu einem Abminderungsfaktor $\alpha_1 < 1,0$ führen würden. Dies ließ sich allerdings nicht direkt mit der Betonmischung in Zusammenhang stellen, da dies sowohl in Normalbeton als auch in allen Betonmischungen mit Recyclinggesteinskörnung festgestellt wurde. Auffällig war aber das Last-Verformungsverhalten im Anfangsbereich der Kurven. In den Last-Verformungskurven der durchgeführten Auszugversuche R1 und B10 wurde festgestellt, dass bei zahlreichen Versuchen die Befestigungen erst ab einem gewissen Wert der Kraft eine Dübelverschiebung gemessen wurde, obwohl keine Vorspannung aufgebracht wurde. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass aus einer Belastung eine Verschiebung am Dübelkopf größer 0 mm resultieren muss. Daher wurde eine Korrektur für die Kurven angewendet. Nach Analyse der Last-Verformungskurven mit Korrektur konnte unabhängig der Betonmischung ein Wert $\alpha_1 \geq 1,0$ ermittelt werden. Wenige Ausnahmen bilden Versuche im gerissenen Beton mit den Verbundankersystemen B und D in der Betoncharge RB2.3_10.03.21. Allerdings wurden in dieser Charge insgesamt deutlich geringere Versagenslasten ermittelt im Vergleich zu den Werten aus dem Zulassungsverfahren. Diese Auffälligkeit wurde bereits in Kapitel 6 ausführlich beschrieben. Da der Wert $N_{Rk,p}$ aus der ETA des jeweiligen Produkts für den Vergleich mit dem Wert $N_{u,adh}$ in der durchgeführten Untersuchung, unverändert blieb, ist eine Abminderung durch α_1 nach der Vorgehensweise aus [18] verständlich. Allerdings würde diese Abminderung nicht das Last-Verformungsverhalten berücksichtigen, sondern in diesem Fall vielmehr die deutliche geringere Versagenslast.

8 Weitere Untersuchungen

8.1 Risswechselversuche F3

Zusätzlich zu den Versuchen in gerissenem Beton aus Kapitel 6 wurden in Versuchsreihe 6 Risswechselversuche F3 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-2 dargestellt. Dabei wurden unter einer Dauerlast von $N_p = 6,1 \text{ kN}$ 1000 Risswechsel durchgeführt und anschließend die Resttragfähigkeit des Systems überprüft. Es wurden je Betoncharge drei Versuche durchgeführt. Die Grenzwerte zur Beurteilung aus [29] wurden für eine Testanzahl von fünf bis neun gewählt. Es wurde in einem Referenzbeton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen und in den Recyclingbetonen RB2.1 und RB2.2 geprüft. Zudem wurden in den Versuchskörpern mit gleichen Abmessungen die Referenzversuche A3 durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 8-1 zusammengefasst sind.

Nach [29] ist für die Versuche eine Würfeldruckfestigkeit der Prüfkörper von $25 \text{ N/mm}^2 \leq f_{c,cube} \leq 35 \text{ N/mm}^2$ einzuhalten. Bei Durchführung der A3 und F3 Versuche lag die Würfeldruckfestigkeit zwischen $19,6 \text{ N/mm}^2$ und $24,3 \text{ N/mm}^2$. Dennoch wurden die Bezeichnungen A3 und F3 beibehalten. Die Dauerlast N_p wurde mit der halben rechnerischen Betonversagenslast für die geprüfte Verankerungstiefe $h_{ef} = 50 \text{ mm}$ bestimmt. Auf der sicheren Seite liegend wurde zur Ermittlung der Dauerlast die tatsächliche Druckfestigkeit der Prüfkörper nicht berücksichtigt und mit $f_{c,cube} = 25 \text{ N/mm}^2$ gerechnet. Die Auszuglast bei der Überprüfung der Resttragfähigkeit wurde für den Vergleich der Ergebnisse aus den A3 Versuche und den F3 Versuche sowie dem Vergleich der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Betonchargen auf eine Druckfestigkeit $f_{c,cube} = 25 \text{ N/mm}^2$ bzw. $f_{c,cyl} = 20 \text{ N/mm}^2$ normiert. Da die Betondruckfestigkeit der Normalbetoncharge den geringsten Wert aufwies, ist dies bzgl. der Bewertung des Einflusses der rezyklierten Gesteinskörnung auf der sicheren Seite.

Bei den Referenzversuchen A3 wurden in den drei Betonchargen je drei Versuche durchgeführt. Die Streuung der normierten Auszuglasten lag in allen drei Versuchsserien deutlich unter 15 % (max: 4,3 %). Die Streuung der Verschiebung bei halber Versagenslast in den Versuchen in Normalbeton und dem Recyclingbeton RB2.1 liegt jeweils unter 25 %. Bei der Versuchsserie in RB2.2 waren die Einzelwerte der Verschiebung bei halber mittlerer Versagenslast alle unter 0,4 mm.

Wird der Wert der mittleren normierten Versagenslasten $N_{u,m,20}$ verglichen, wird deutlich, dass gegenüber den Ergebnissen in Normalbeton in RB2.1 im Mittel 93 % und in RB2.2 im Mittel 85 % erreicht wurden.

Tabelle 8-1: Ergebnisse A3 Versuche

Test Nr. [-]	NB			RB2.1			RB2.2		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	19,6	19,6	19,7	23,5	23,5	23,5	24,3	24,3	24,3
N_u [kN]	20,32	20,21	19,39	19,66	20,10	21,02	18,51	19,89	18,43
$N_{u,20}$ [kN]	22,95	22,80	21,85	20,26	20,72	21,67	18,78	20,18	18,69
$N_{u,m,20}$ [kN]	22,53 (100%)			20,88 (93%)			19,22 (85%)		
sd [kN]	0,59			0,72			0,83		
cov [%]	2,6%			3,4%			4,3%		
$\delta_{0,5N_u}$ [mm]	0,56	0,38	0,40	0,27	0,41	0,37	0,28	0,15	0,29
m [mm]	0,45			0,35			0,24		
sd [mm]	0,10			0,07			0,08		
cov [%]	22,8%			20,4%			31,5%		

Die Betrachtung der Ergebnisse aus den Risswechselversuchen F3 zeigt, dass die Verschiebung nach 20 Risswechseln $\delta_{\text{cycle}(20)}$ bei allen Versuchen unabhängig von der Betoncharge deutlich unter 2 mm lag. Die größte Verschiebung nach 1000 Risswechseln $\delta_{\text{cycle}(1000)}$ konnte in der Betoncharge RB2.1 mit einem Wert von 1,92 mm ermittelt werden. Alle Verschiebungen sind deutlich unter 3 mm. Die Verschiebung bei mittlerer halber Versagenslast war in allen Versuchen der drei Versuchsserien mit maximal 0,10 mm deutlich kleiner als 0,4 mm.

Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich eine Stabilisierung der Verschiebungen. Bei Betrachtung der Verschiebungen im Bereich der Zyklen 500 bis 750 und 750 bis 1000 wird deutlich, dass in diesen Bereich lediglich sehr kleine Verschiebungsdifferenzen auftraten. Die Differenzen der Verschiebungen im Bereich 750 bis 1000 Zyklen sind entweder kleiner als die Werte im Bereich 500 bis 750 oder nahmen so geringe Werte ein, dass sie im Bereich der vorgegebenen Messunsicherheit aus [29] liegen. Ausnahme bildet Test 1 der Reihe RB2.2. Es ist eine deutlich größere Verschiebung im Bereich der Zyklen 750 bis 1000 zu verzeichnen. Dies wird allerdings mit einem Systemausfall der Prüfmaschine nach 848 Risszyklen begründet. Da die Rissöffnung und das Aufbringen der Last anschließend erneut durchgeführt wurden, wird der erhöhte Wert als unproblematisch angesehen.

Tabelle 8-2: Ergebnisse F3 Versuche

Test Nr.	[-]	NB			RB2.1			RB2.2		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
$f_{c,cube}$	[N/mm ²]	19,6	19,6	19,6	23,5	23,5	23,5	24,2	24,2	24,2
N_p	[kN]	6,1			6,1			6,1		
N_u	[kN]	18,97	17,00	19,61	19,48	20,04	18,51	18,02	20,47	20,48
$N_{u,20}$	[kN]	21,42	19,20	22,13	20,09	20,67	19,09	18,32	20,80	20,82
$N_{u,m,20}$	[kN]	20,92 (100%)			19,95 (95%)			19,98 (96%)		
sd	[kN]	1,52			0,80			1,44		
cov	[%]	7,3%			4,0%			7,2%		
$N_{u,m,20,A3}$	[kN]	22,53			20,88			19,22		
α_m	[-]	0,93			0,96			1,04		
$\alpha_m/req\alpha$	[-]	1,03			1,06			1,16		
α_m^*	[-]	0,93			0,89			0,89		
$\alpha_m^*/req\alpha$	[-]	1,03			0,98			0,99		
$\delta_{0,5N_u}$	[mm]	0,05	0,07	0,10	0,09	0,09	0,08	0,09	0,07	0,07
m	[mm]	0,07			0,09			0,08		
sd	[mm]	0,03			0,01			0,01		
cov	[%]	40,1%			10,9%			10,7%		
$\delta_{\text{cycle}(20)}$	[mm]	0,40	0,57	0,86	0,49	0,79	0,89	0,81	0,42	0,61
$\delta_{\text{cycle}(500)}$	[mm]	0,65	0,93	1,58	1,04	1,45	1,79	1,44	0,78	1,07
$\delta_{\text{cycle}(750)}$	[mm]	0,68	0,98	1,64	1,11	1,52	1,88	1,49	0,84	1,13
$\delta_{\text{cycle}(1000)}$	[mm]	0,72	1,01	1,69	1,28	1,57	1,92	1,54	0,86	1,17
$\delta_{\text{cycle}(500-750)}$	[mm]	0,03	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09	0,05	0,06	0,06
$\delta_{\text{cycle}(750-1000)}$	[mm]	0,04	0,03	0,05	0,18	0,05	0,04	0,05	0,02	0,04

Werden die mittleren normierten Versagenslasten aus den F3 Versuchen zwischen den drei Betonmischungen verglichen, kann festgehalten werden, dass in den Recyclingbetonen im Mittel 95 % bzw. 96 % der Werte aus den Versuchen in Normalbeton erreicht wurden. Innerhalb jeder der drei Versuchsserien wurde trotz der geringen Anzahl an Versuchen die Streuung der normierten Versagenslasten von 20 % eingehalten.

Da die Streuungen der Versagenslasten innerhalb der drei Versuchsserien F3 und der drei Versuchsserien A3 jeweils unter 15 % liegen, wird für den Vergleich der Versagenslasten der jeweilige

Mittelwert betrachtet. Das Verhältnis der mittleren normierten Versagenslasten α_m aus den F3 Versuchen bezogen auf die Ergebnisse der A3 Versuche muss mindestens $r_{qd\alpha} = 0,9$ betragen. Wird der Vergleich $\alpha_m = N_{u,m,20,F3}/N_{u,m,20,A3}$ innerhalb der jeweiligen Betonchargen betrachtet, wird die Bedingung mit einem α_m von 0,93 für die Versuche in Normalbeton und 0,96 und 1,04 für die Versuche in den Recyclingbetonen eingehalten. Hieraus folgt jeweils ein $\alpha_m/r_{qd\alpha} > 1,0$.

Wird für alle F3 Versuche als Referenz die mittlere normierte Versagenslast aus den A3 Versuchen in Normalbeton angenommen, so werden Verhältniswerte α_m^* von 0,93 für Normalbeton und 0,89 für beide Recyclingbetone ermittelt. Hieraus folgt für Recyclingbeton RB2.1 ein $\alpha_m^*/r_{qd\alpha} = 0,98$ und für RB2.2 ein $\alpha_m^*/r_{qd\alpha} = 0,99$.

Zusammenfassend betrachtet kann festgehalten werden, dass die Bedingungen aus [29] für die Verschiebungen und deren Streuungen für die Größe M12 mit der Verankerungstiefe $h_{ef} = 50$ mm unter einer Dauerlast $N_p = 6,1$ kN in allen geprüften Recyclingbetonen eingehalten werden konnten. Zur Beurteilung der Auszuglast nach Durchlaufen der Risswechsel unter Dauerlast wurde zunächst der Mittelwert der normierten Versagenslasten innerhalb einer Betoncharge verglichen mit den zugehörigen Referenzversuchen innerhalb der jeweiligen Betoncharge. Hier wurde keine Abminderung festgestellt. Wird jedoch für alle Risswechselversuche die Referenz aus den Versuchen in Normalbeton herangezogen, wird eine geringen Abminderung auf 0,98 für Recyclingbeton RB2.1 und 0,99 für RB2.2 festgehalten. Es bleibt jedoch zu erwähnen, dass die Normierung der Versagenslasten auf der sicheren Seite bei Normalbeton die höchste Steigerung zur Folge hatte.

8.2 Montageversuche/ Rand- Eck- Achsabstand

8.2.1 F11: minimaler Rand- und Achsabstand

In den F11 Versuchen nach [29] werden die minimalen Rand- (c) und Achsabstände (s) ermittelt, die eingehalten werden müssen, um ein Spalten des Betons während der Installation zu verhindern. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurden Versuche in Versuchsreihe 1 und 2 mit dem Bolzenanker F der Größe M12 in zwei Recyclingbetonen und einem Referenzbeton durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-3 dargestellt. Nach [29] sollen die Versuche in Versuchskörpern mit einer Würfeldruckfestigkeit zwischen 25 N/mm^2 und 35 N/mm^2 durchgeführt werden. Wie bereits in den zuvor erläuterten Testergebnissen in den vorangegangenen Kapiteln wurde innerhalb des Forschungsvorhabens auch Versuche in Versuchskörpern durchgeführt, deren Druckfestigkeit außerhalb der genannten Werte lag. Die Ergebnisse wurden anschließend wie beschrieben normiert. Die Benennung der Versuchsreihen wurde dennoch nach [29] beibehalten. Diese Vorgehensweise wurde ebenfalls für die F11 Versuche übernommen.

Bei Durchführung der Versuche wurden die maximalen Drehmomente für verschiedene Rand- und Achsabstände geprüft. Einige Versuche führten zu Stahlversagen des Bolzenankers (S). Diese Ergebnisse wurden für die nachfolgende Auswertung der F11 Versuche nicht beachtet und es wurden lediglich die Ergebnisse aus den Versuchen betrachtet, die zum Spalten des Betons führten (R). Die ermittelten Werte des Drehmoments $T_{\max, \text{test}}$ wurden nach Gl. (30) auf eine Würfeldruckfestigkeit von 25 N/mm^2 bzw. Zylinderdruckfestigkeit von 20 N/mm^2 normiert. Die normierten Drehmomente $T_{\max, 20}$ sind in Abbildung 8-2 und Abbildung 8-3 über der projizierten Fläche A_{sp} nach Gl. (31) und Gl. (32) sowie Abbildung 8-1 dargestellt. Die Ergebnisse aus den Versuchen, die innerhalb des Zulassungsverfahrens ermittelt wurden, sind zusätzlich in der grafischen Darstellung aufgenommen. Aus diesen Ergebnissen wurde eine Trendlinie $T_{\max, 20, \text{Zul}}$ und eine Trendlinie für die 5 %-Fraktilwerte $T_{5\%, 20, \text{Zul}}$ erstellt. Die Ergebnisse, die innerhalb des Forschungsvorhabens ermittelt wurden, beeinflussen beide Trendlinien nicht.

$$T_{\max, 20} = T_{\max, \text{test}} \cdot \left(\frac{f_{c,t}}{f_{ck}} \right)^{0,5} \quad \text{Gl. (30)}$$

mit:

f_{ck}	Neendruckfestigkeit in $[\text{N/mm}^2]$
$f_{c,t}$	Betondruckfestigkeit zum Zeitpunkt der Prüfung $[\text{N/mm}^2]$

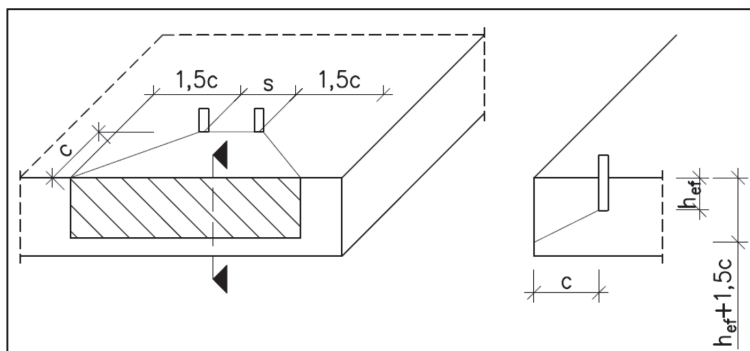


Abbildung 8-1: Projektionsfläche bei F11 Versuche nach [29]

$$A_{sp,t} = (3 \cdot c_{min,t} + s_{min,t})(1,5 \cdot c_{min,t} + h_{ef}), \text{ für } h > (1,5 \cdot c_t + h_{ef}) \quad \text{Gl. (31)}$$

$$A_{sp,t} = (3 \cdot c_{min,t} + s_{min,t}) \cdot h, \text{ für } h \leq (1,5 \cdot c_t + h_{ef}) \quad \text{Gl. (32)}$$

Es wird ersichtlich, dass die Ergebnisse unterteilt betrachtet werden müssen. Die Werte $T_{max,20}$ aus den Versuchen in den Betonchargen NB_17.06.20, RB1.1_24.06.20 und RB2.1_26.06.20 aus Reihe 1 sind tendenziell niedriger als die Ergebnisse aus den drei weiteren Betonchargen und ebenfalls niedriger als die Werte, die innerhalb des Zulassungsverfahrens bestimmt wurden. Die Druckfestigkeit der Prüfkörper lag zum Zeitpunkt der Prüfung bei den R-Betonen bei 35,5 bis 36,8 N/mm² und bei dem Referenzbeton bei 47,2 bis 47,6 N/mm².

Die Werte $T_{max,20}$ aus den Versuchskörpern der Chargen NB_13.07.20, RB1.1_15.07.20 und RB2.1_17.07.20 aus Reihe 2 weisen alle Werte auf, die höher sind als $T_{5\%,20,Zul}$ aus dem Zulassungsverfahren. Die Ergebnisse aus den Prüfkörpern aus Recyclingbeton wird keine signifikante Abweichung zu denen aus dem Zulassungsverfahren erkannt.

Der deutliche Unterschied der Ergebnisse beider Gruppen wird im Vorgang des Normierens über Gl. (30) für das Drehmoment vermutet. Sofern die Drehmomente $T_{max,test}$ in Prüfkörpern mit einer Würfeldruckfestigkeit ermittelt wurden, die nicht mehr als 5 N/mm² von 25 N/mm² abweichen, ist durch die vorliegenden Daten kein negativer Einfluss der von Recyclingbeton festzustellen.

Tabelle 8-3: Ergebnisse F11 Versuche aus den Versuchsreihen 1 und 2

NB				RB1.1				RB2.1			
Betoncharge	$f_{c,cube}$	$T_{max,(20)}$	A_{sp}	Betoncharge	$f_{c,cube}$	$T_{max,(20)}$	A_{sp}	Betoncharge	$f_{c,cube}$	$T_{max,(20)}$	A_{sp}
[-]	[N/mm ²]	[Nm]	[mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[Nm]	[mm ²]	[-]	[N/mm ²]	[Nm]	[mm ²]
NB_17.06.20	47,2	95	25.000	RB1.1_24.06.20	35,5	86	31.000	RB2.1_26.06.20	36,8	144	34.500
	47,2	70	26.500		35,5	130	34.000		36,8	84	34.000
	47,6	98	28.000		35,5	81	32.500		36,8	103	34.000
	47,6	87	31.000		35,6	105	34.000		36,8	128	34.500
	47,6	83	28.000		35,6	85	32.500		36,8	103	34.000
	47,2	95	28.000		35,6	85	34.500		36,8	94	35.500
	47,2	91	25.000		35,6	80	34.000		36,8	84	34.000
	47,2	70	26.500		35,5	86	31.000		36,8	103	34.000
	47,6	98	28.000		35,5	126	34.000		36,8	128	34.500
	47,6	87	31.000		35,5	134	36.000		36,8	99	34.000
NB_13.07.20	47,6	83	28.000	35,5	81	32.500	36,8	132	35.500		
	29,5	94	31.800	35,6	101	34.000	36,8	94	35.500		
	29,5	110	31.800	35,6	85	32.500	23,9	110	37.800		
	29,5	124	33.000	35,6	70	34.500	23,9	110	37.800		
	29,5	147	37.884	35,6	80	34.000	23,9	138	32.724		
	29,5	88	31.800	24,3	152	37.200	23,9	138	32.724		
	29,5	105	31.800	24,3	157	35.400	23,9	153	41.388		
	29,5	120	33.000	24,3	157	35.400	23,9	143	41.388		
29,5	143	37.884	24,3	122	35.400						
			24,3	116	35.400						
			24,3	137	35.400						
			24,3	137	35.400						

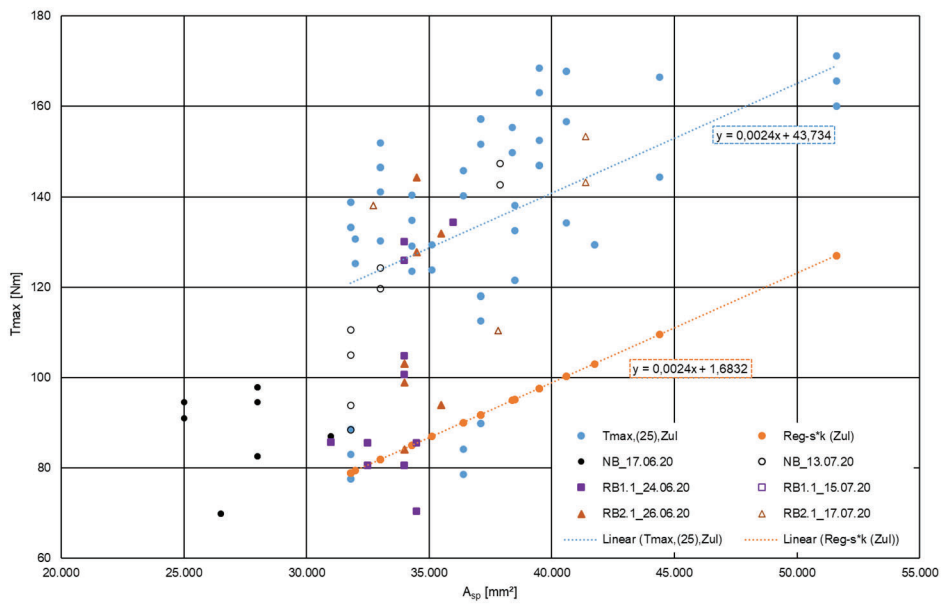


Abbildung 8-2: Ergebnisse F11 Versuche im Vergleich zu Zulassungsverfahren, Reihe 1 und 2

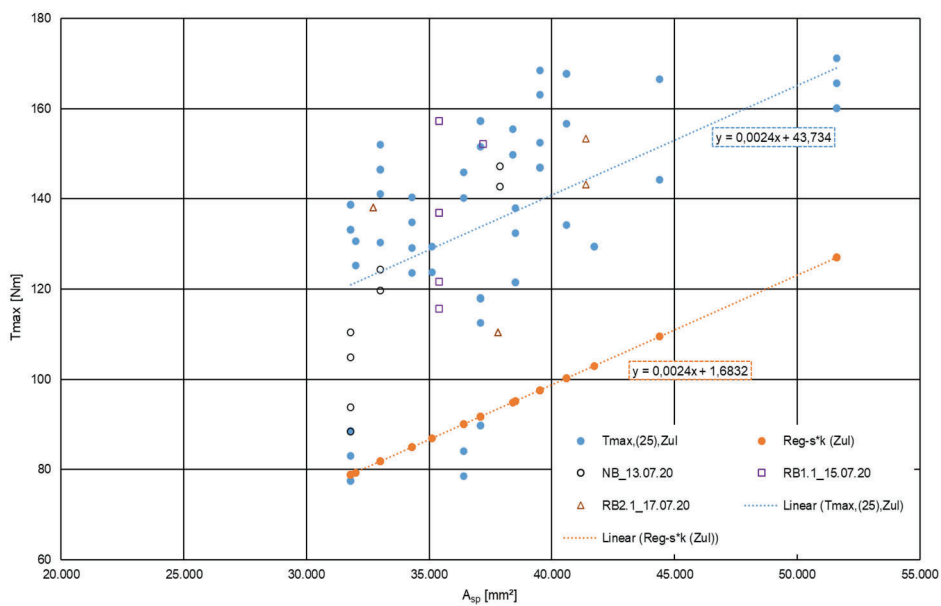


Abbildung 8-3: Ergebnisse F11 Versuche im Vergleich zu Zulassungsverfahren, Reihe 2

8.2.2 F12: Eckabstand

Die Versuche F12 nach [29] werden durchgeführt zur Ermittlung der charakteristischen Eckabstände, bei denen ein Spalten des Betons nicht maßgebend wird. Dafür werden die Dübel als Einzelbefestigung mit einem Randabstand von $c_1 = c_2 = c_{cr,sp}$ in einer Bauteilecke installiert und zentrische Auszugversuche durchgeführt. Die ermittelten Auszuglasten sollen sich statistisch nicht unterscheiden von denen aus Auszugversuchen an Dübeln ohne Randeinfluss.

Es wurden innerhalb der Versuchsreihen 1 und 2 Versuche F12 durchgeführt. Dabei wurden der Bolzenanker F in jeweils einer Referenzcharge aus Normalbeton und in jeweils zwei Betonmischungen mit Recyclingbeton (RB1.1 und RB2.1) geprüft. Die Bauteildicke variierte zwischen 100 und 120 mm. Als Eckabstände wurden 75, 90 und 100 mm gewählt. Die Verankerungstiefe wurde in allen Versuchen mit 50 mm konstant gehalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-4 sowie in Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5 dargestellt.

Zunächst werden alle Versuchsserien getrennt voneinander betrachtet und die Überprüfung der Vorgaben nach [29] durchgeführt. Die maximale Streuung der normierten Versagenslasten von 15 % innerhalb jeder Versuchsserie wurde trotz der geringen Anzahl von zwei bis drei Versuchen je Serie nicht überschritten. Dies wurde sowohl für die Versuche in Normalbeton als auch in beiden R-Betonmischungen festgestellt.

Beim Last-Verformungsverhalten konnte bei der Betrachtung der Kurven kein unkontrollierter Schlupf festgestellt werden. In allen Versuchen unabhängig der Betonmischung wurden Verschiebungen bei halber mittlerer Versagenslast $\delta(0,5N_u)$ gemessen, die mit maximal 0,11 mm deutlich unter 0,4 mm lagen.

Tabelle 8-4: Ergebnisse F12 Versuche

Versuchsreihe	Serie	Eckabstand	Betonmischung	$f_{c,cube}$	$N_{u,20}$					$\delta(0,5N_u)$			
					$N_{u,fc=20,1}$	$N_{u,fc=20,2}$	$N_{u,fc=20,3}$	MW	cov	1	2	3	MW
[-]	[-]	[mm]	[-]	[N/mm ²]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	F12 NB 17.06.20 F 75	75	NB	47,0	14,30	16,44	14,23	14,99	8,4	0,03	0,07	0,04	0,05
1	F12 NB 17.06.20 F 90	90	NB	47,0	16,96	17,03	-	16,99	0,3	0,11	0,05	-	0,08
1	F12 NB 17.06.20 F 100	100	NB	47,0	18,14	18,20	17,28	17,87	2,9	0,02	0,09	0,07	0,06
2	F12 NB 13.07.20 F 75	75	NB	29,5	15,35	14,89	-	15,12	2,2	0,06	0,01	-	0,04
2	F12 NB 13.07.20 F 100	100	NB	29,5	15,92	18,55	-	17,23	10,8	0,08	0,03	-	0,06
1	F12 RB1.1 24.06.20 F 75	75	RB1.1	35,3	14,44	11,12	11,68	12,42	14,3	0,01	0,02	0,03	0,02
1	F12 RB1.1 24.06.20 F 90	90	RB1.1	35,3	13,05	16,78	13,63	14,48	13,8	0,01	0,03	0,05	0,03
1	F12 RB1.1 24.06.20 F 100	100	RB1.1	35,3	15,79	17,20	-	16,50	6,0	0,06	0,05	-	0,05
2	F12 RB1.1 15.07.20 F 75	75	RB1.1	23,4	18,28	17,67	-	17,97	2,4	0,05	0,07	-	0,06
2	F12 RB1.1 15.07.20 F 100	100	RB1.1	23,4	18,74	18,26	-	18,50	1,8	0,03	0,10	-	0,06
1	F12 RB2.1 26.06.20 F 75	75	RB2.1	36,8	15,53	14,34	-	14,94	5,6	0,02	0,02	-	0,02
1	F12 RB2.1 26.06.20 F 90	90	RB2.1	36,8	16,83	17,52	15,12	16,49	7,5	0,03	0,05	0,06	0,05
1	F12 RB2.1 26.06.20 F 100	100	RB2.1	36,8	16,91	17,02	18,85	17,59	6,2	0,05	0,03	0,01	0,03
2	F12 RB2.1 17.07.20 F 75	75	RB2.1	23,8	17,85	15,86	-	16,86	8,3	0,01	0,03	-	0,02
2	F12 RB2.1 17.07.20 F 100	100	RB2.1	23,8	20,22	19,55	-	19,88	2,4	0,10	0,03	-	0,07

In den zwei Versuchsreihen 1 und 2 wurden Versuchskörper mit unterschiedlichen Bauteildicken hergestellt. In Versuchsreihe 1 wurden Bauteildicken $h = 100$ mm, in Versuchsreihe 2 Bauteildicken $h = 120$ mm geprüft. Abbildung 8-4 zeigt den Vergleich der mittleren normierten Versagenslasten. Dabei wurden die Ergebnisse getrennt nach Betonmischung aus den Versuchen aus Reihe 2 denen aus Reihe 1 gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Versuchen in Recyclingbeton jeweils die mittleren normierten Versagenslasten in den Platten mit einer Bauteildicke $h = 120$ mm erwartungsgemäß höher lagen (112 bis 145 %). In den Versuchskörpern aus Normalbeton konnte

dies nicht gezeigt werden (96 bis 101 %). Grund hierfür könnte die relativ geringe Anzahl an Versuchsergebnissen sein. Ein Vergleich der Versagenslasten mit einem Eckabstand von 90 mm wurde nicht durchgeführt, da mit dieser Konfiguration lediglich Ergebnisse aus Versuchsreihe 1 vorliegen.

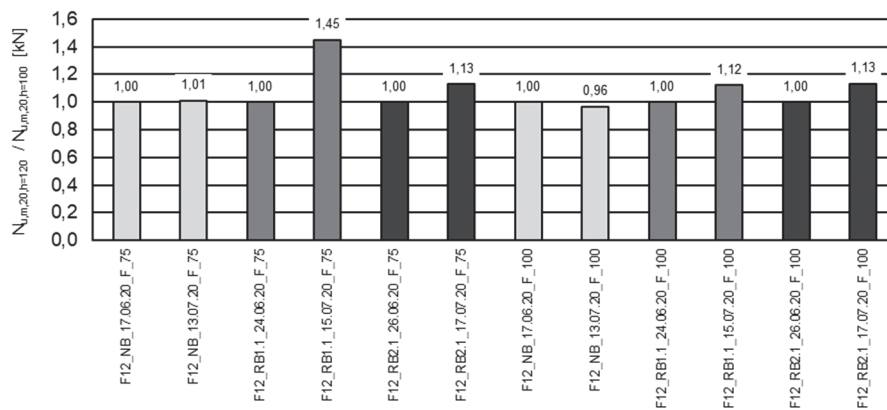


Abbildung 8-4: Ergebnisse F12 Versuche, Vergleich Plattendicke

Die Darstellung der Testergebnisse in Abbildung 8-5 zeigt die mittleren normierten Versagenslasten aller F12 Versuche nach Serien aufgeteilt. Zudem wurde getrennt nach Bauteildicke ein Vergleich der mittleren normierten Versagenslasten in Abhängigkeit der Betonmischung durchgeführt. Als Referenz wurden die jeweiligen Ergebnisse gewählt, die in Normalbeton erzielt wurden. Bei Betrachtung der Ergebnisse in Versuchsreihe 1 ($h = 100$ mm) lagen die mittleren normierten Versagenslasten in Recyclingbeton RB2.1 auf einem Niveau mit denen, die in Normalbeton ermittelt wurden (97 bis 100 %). In Recyclingbeton RB1.1 wurden für die Eckabstände 75 und 90 mm geringere Lasten erreicht (83 bis 85 %). Bei dem Eckabstand 100 mm wurden im Mittel 92 % der Referenzen erzielt. Die Versuche in Versuchsreihe 2 zeigen ein etwas anderes Bild. Es wurden sowohl in RB1.1 als auch in RB2.1 mit 107 bis 119 % im Mittel höhere normierte Versagenslasten erreicht als in den Referenzbetonen.

Als Beurteilung der F12 Versuche kann Folgendes zusammenfassend festgehalten werden. Zunächst ist zu beobachten, dass die Auszugversuche grundsätzlich keine Auffälligkeiten zeigten. Die Grenzwerte für die Streuung der Versagenslasten und die Beurteilungskriterien zum Last-Verformungsverhalten nach [29] wurden unabhängig von der Betonmischung – sowohl in Normalbeton als auch in den geprüften Recyclingbetonen RB1.1 und RB2.1 eingehalten. Ein Vergleich der mittleren normierten Versagenslasten zwischen den Betonmischungen zeigte, dass in RB2.1 in beiden geprüften Betonchargen das Niveau der Referenzen erreicht oder teilweise übertroffen wurde. In der Betonmischung RB1.1 konnten in Versuchsreihe 1 die mittleren normierten Versagenslasten nicht bestätigt werden. In Versuchsreihe 2 wurden das Niveau der Referenzen bestätigt bzw. höhere Versagenslasten erreicht.

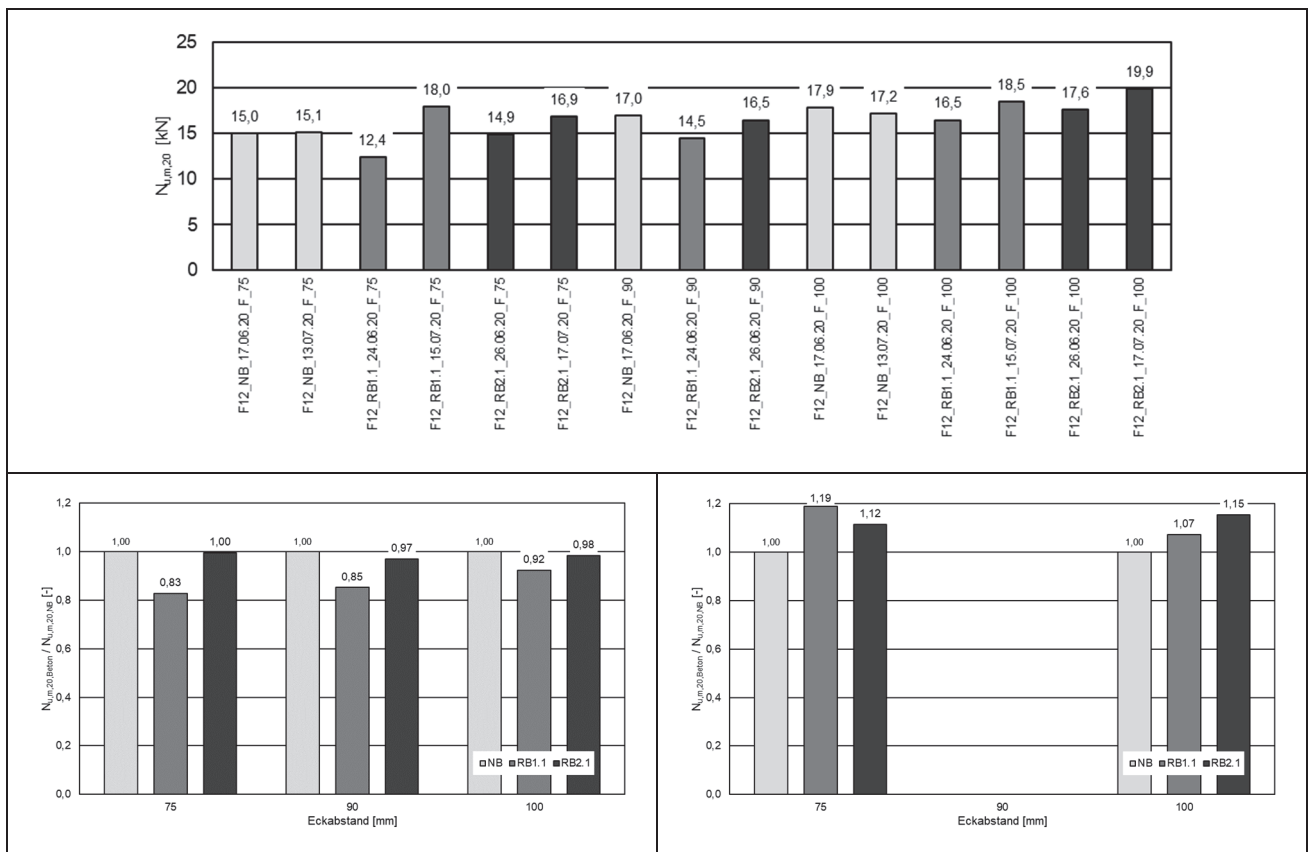


Abbildung 8-5: Darstellung Ergebnisse F12, oben: alle Versuche, unten: Plattendicke: links: $h = 100$ mm, rechts: $h = 120$ mm

8.3 Vergleich der Versuchsergebnisse zur rechnerischen Tragfähigkeit für kegelförmigen Betonausbruch nach DIN EN 1992-4:2019-04 [4] mit dem Bolzenanker F

Zur Ermittlung des charakteristischen Widerstands gegen kegelförmigen Betonausbruch unter zentrischer Zugbelastung wird in DIN EN 1992-4:2019-04 [4] Gl. (33) gegeben. Im folgenden Abschnitt sollen die in Versuchen ermittelten Betonversagenslasten (siehe Kapitel 6) mit der genannten Bemessungsgleichung verglichen werden. Um die Ergebnisse auf Mittelwertbasis zu vergleichen, wird der charakteristische Widerstand gegen kegelförmigen Betonausbruch aus Gl. (33) mit dem Faktor $1/0,75$ multipliziert. Die hierfür zugrundeliegenden Annahmen sind eine Streuung von 15 % und eine unendliche Versuchsanzahl sowie eine Normalverteilung mit unbekannter Standardabweichung und ein Vertrauensniveau von 90 %. Zudem wird in Gl. (34) für die Betondruckfestigkeit der Mittelwert aus den Druckprüfungen eingesetzt. Gegebenenfalls wird diese auf den Tag der Prüfung nach Gl. (29) umgerechnet. Der Faktor k_1 ist der ETA des jeweiligen Produktes zu entnehmen. Für ungerissenen Beton gilt für den geprüften Bolzenanker $k_1 = k_{ucr,N} = 11,0$. Für die effektive Verankerungstiefe h_{ef} wurde die in jedem Versuch gemessene Verankerungstiefe eingesetzt.

Analog zu Gl. (34) wurde in Gl. (35) die mittlere Versagenslast bestimmt. Allerdings wurde die ermittelte Spaltzugfestigkeit eingesetzt.

$$N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot f_{ck}^{0,5} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad \text{Gl. (33)}$$

$$N_{u,m,calc}(f_{cm,t}) = \frac{1}{0,75} \cdot k_1 \cdot f_{cm,t}^{0,5} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad \text{Gl. (34)}$$

$$N_{u,m,calc}(f_{ctm,sp}) = \frac{1}{0,75} \cdot k_1 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot f_{ctm,sp}}{0,3} \right)^{0,75} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad \text{Gl. (35)}$$

Abbildung 8-6 zeigt das Verhältnis der aus den mit dem Bolzenanker durchgeführten A1 Versuchen resultierenden mittleren Versagenslasten $N_{u,m,t}$ und dem Mittelwert der rechnerischen Versagenslast $N_{u,m,calc}$ mit den jeweils oben beschriebenen Parametern. Es wird unterschieden zwischen Normal- und Recyclingbeton. Für die Betone der Versuchsserien F_12_A1_C, _E, _F wurden keine Spaltzugprüfungen durchgeführt. Die genannten Serien sowie die Serie A1_NB_29.06.18_F wurden in Betonen durchgeführt, die extern hergestellt wurden. Bei Durchführung der Auszugversuche waren die Prüfkörper in einem Alter von über 750 Tagen. Es wird deutlich, dass die Versuchsergebnisse im Mittel zu der Berechnung nach Gl. (34) passen. Für Versuchsserie A1_NB_29.06.18_F wurde zudem die Spaltzugfestigkeit ermittelt. Die Versuchsergebnisse entsprachen zu 99 % bzw. 96 % der Berechnung.

Bei der Beurteilung der weiteren Ergebnisse in Normalbeton wird aufgrund der Erkenntnisse aus Kapitel 6 nach Betonalter unterschieden. In den in Versuchskörpern mit einem Alter von über einem Jahr (Endung „xy“) wurden Versagenslasten erzielt, die im Mittel zu 87 bis 94 % der nach Gl. (34) rechnerisch über die Betondruckfestigkeit bestimmten Versagenslasten entsprechen. Teilweise deutlich geringere Versagenslasten im Vergleich zur Berechnung wurden im Mittel in Beton erzielt, der bei Prüfung der Bolzenanker in einem Alter von vier bis sechs Wochen. Es konnten 74 bis 89 % der gerechneten Versagenslasten erreicht werden.

Werden die Ergebnisse aus den Versuchen den über die Spaltzugfestigkeit bestimmten rechnerischen Versagenslasten gegenübergestellt, zeigt sich ein abweichendes Bild. Zunächst ist zu beobachten, dass mit Ausnahme der Serie A1_NB_29.06.18_F die Verhältniswerte $N_{u,m,t}/N_{u,m,calc}$ höher sind. Abgesehen von der Versuchsserie A1_NB_01.10.20/A_F entsprechen die Versuchsergebnisse mit 91 bis 109 % unabhängig des Alters der Prüfkörper den rechnerisch bestimmten Ergebnissen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse, die in Recyclingbeton erzielt wurden, ist ebenfalls zu erkennen, dass alle aus der Spaltzugfestigkeit berechneten Versagenslasten unter den Versagenslasten aus der Berechnung über die Druckfestigkeit liegen. Für die betrachteten Versuche ist daher der Quotient $N_{u,m,t}/N_{u,m,calc}$ mit der aus der Spaltzugfestigkeit bestimmten Versagenslasten 6 bis 28 % höher als die aus der Druckfestigkeit ermittelten Versagenslasten.

Die Versuchsergebnisse in Prüfkörpern aus Recyclingbeton konnten lediglich in der Versuchsserie A1_RB1.1_14.10.20/A_F_xy mit 106 % die Versagenslasten nach Gl. (34) bestätigen. Ausgenommen der Ergebnisse, die in den Betonchargen RB2.1*_05.03.21 und RB2.3_10.03.21 erzielt wurden, wurde in den Versuchen im Mittel 76 bis 91 % der über die Druckfestigkeit berechneten Versagenslasten erreicht. In den Recyclingbetonen, die innerhalb des Forschungsvorhabens an der TUK hergestellt wurden und deren Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen in Anlehnung an [3] gestaltet wurden (RB1.1 und RB2.1), konnten die Versuchsergebnisse mit der Berechnung der Versagenslasten über die Spaltzugfestigkeit widerspiegelt werden. Der Vergleich zeigte, dass die Versagenslasten in Prüfkörpern in einem Alter von wenigen Wochen der Berechnung zu 97 bis 104 % entsprachen. Mit 114 bis 136 % der Berechnung lagen die Versagenslasten in Prüfkörpern mit einem Alter von ca. einem Jahr deutlich höher.

Die Versuchsergebnisse in den Versuchskörpern mit der Betonmischung RB2.2 konnten in wenigen Wochen alten Prüfkörpern 76 bis 81 % bzw. 85 bis 86 % der rechnerisch ermittelten Versagenslasten erreichen. Bei Betrachtung der Ergebnisse in ca. einem Jahr alten Beton wird deutlich, dass das Verhältnis aus Versuchsergebnissen und Berechnung über die Druckfestigkeit sich nicht signifikant geändert hat. Die Versuchsergebnisse erreichten weiterhin lediglich 78 bis 87 % der Rechnung über die Druckfestigkeit. Wird allerdings der Vergleich zur Berechnung über die Spaltzugfestigkeit gezogen, entsprechen die Versagenslasten aus der versuchstechnischen Überprüfung denen der Rechnung (95 bis 99 %).

Die Betone aus externer Herstellung (RB2.1*_05.03.21 und RB2.3_10.03.21) wurden bereits in Kapitel 6 gesondert betrachtet. Die Ergebnisse aus den Versuchen in RB2.1* konnten unabhängig des Alters der Prüfkörper und unabhängig davon, ob bei der Berechnung die Betondruck- oder spaltzugfestigkeit eingesetzt wurde, die rechnerisch ermittelten Versagenslasten nicht erreichen. Die Ergebnisse aus den Versuchen in RB2.3 sind dahingehend interessant, dass die erzielten Versagenslasten in wenigen Wochen altem Beton mit 44 % bzw. 55 % die rechnerisch ermittelten Versagenslasten nicht erreichten. Die Versagenslasten, die ein Jahr später in Auszugversuchen in der gleichen Betoncharge ermittelt wurden, stiegen deutlich stärker als die berechneten Versagenslasten. So konnten in den Auszugversuchen 88 % der über die Spaltzugfestigkeit berechneten Versagenslasten erreicht werden.

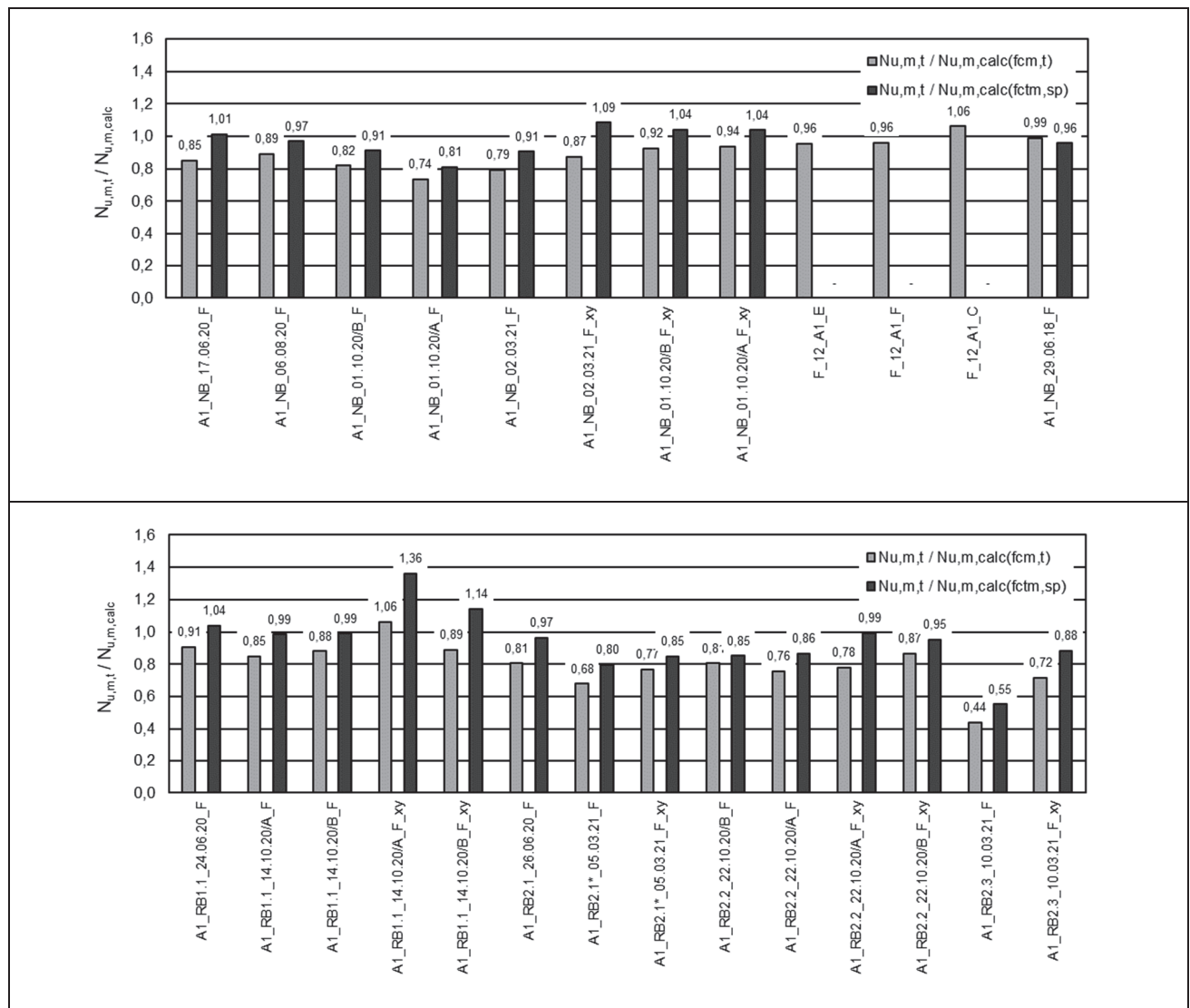


Abbildung 8-6: Gegenüberstellung der im A1 Versuch mit dem Bolzenanker F ermittelten und der rechnerischen Betonversagenslasten $Nu_{m,t}/Nu_{m,calc}$, oben: Normalbeton, unten: Recyclingbeton

Es kann festgehalten werden, dass die mittleren Versagenslasten aus den Versuchsserien, die innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, tendenziell unter den über die Druckfestigkeit rechnerisch ermittelten Versagenslasten (Gl. (34)) lagen. Bei den Betonchargen der TUK konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Normalbeton und den Recyclingbetonen RB1.1 und RB2.1 festgestellt werden, was bereits aus den Ergebnissen in Kapitel 6 hervorgeht. Die Abweichung der in den Versuchen erzielten zu den rechnerisch bestimmten Auszuglasten war ferner zu untersuchen. Insbesondere in den Versuchen in den extern hergestellten Versuchskörpern von Kaltenbach wurden deutlich geringere Versagenslasten in den Auszugversuchen erzielt. Dies ist für Recyclingbeton RB2.3 mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen nicht überraschend, allerdings wurden teilweise auch für Recyclingbeton RB2.1* und Normalbeton NB Verhältniswerte der im Versuch ermittelten zur gerechneten Versagenslast von unter 80 % erreicht. Sofern die Versagenslasten rechnerisch über die Spaltzugfestigkeit (Gl. (35)) ermittelt wurden, stimmten Versuchsergebnisse und rechnerische Versagenslasten besser überein.

Wie bereits in Kapitel 6 erörtert, konnte unter anderem aufgrund der geringeren Datenbasis in den Versuchsserien F1 mit dem Bolzenanker der Trend einer steigenden mittleren normierten Versagenslast mit steigendem Alter der Betonprüfkörper nicht so deutlich herausgestellt werden wie in ungerissenem Beton (A1). Dies spiegelt sich auch in der Darstellung in Abbildung 8-7 wider. Es werden die in den Versuchen ermittelten Versagenslasten den mithilfe von Gl. (34) über die Betondruckfestigkeit und Gl. (35) über die Spaltzugfestigkeit rechnerisch bestimmten Versagenslasten gegenübergestellt. Für die Bestimmung der rechnerischen Versagenslast $N_{u,m,calc}$ wurde der Faktor $k_1 = 7,7$ aus der ETA des Produkts entnommen.

Das Verhältnis der versuchstechnisch und rechnerisch ermittelten Versagenslasten über die Druckfestigkeit liegt für alle Prüfserien unter 0,9. Somit konnte in keiner Versuchsserie die mittlere rechnerische Versagenslast in den Versuchen erreicht werden. Die minimalen Werte von 0,63 und 0,67 resultieren aus dem Vergleich der mittleren Versagenslasten aus den Versuchsserien in Recyclingbeton RB2.3 und den rechnerischen Versagenslasten. Die Ergebnisse aus dem Vergleich der Versuche, die in den Normalbetonen und den Recyclingbetonen RB1.1, RB2.1, RB2.1* durchgeführt wurden, unterscheiden sich nicht wesentlich. Die Verhältnisse von Versuch und Rechnung liegen bei den Serien in den genannten Betonen zwischen 0,73 und 0,88.

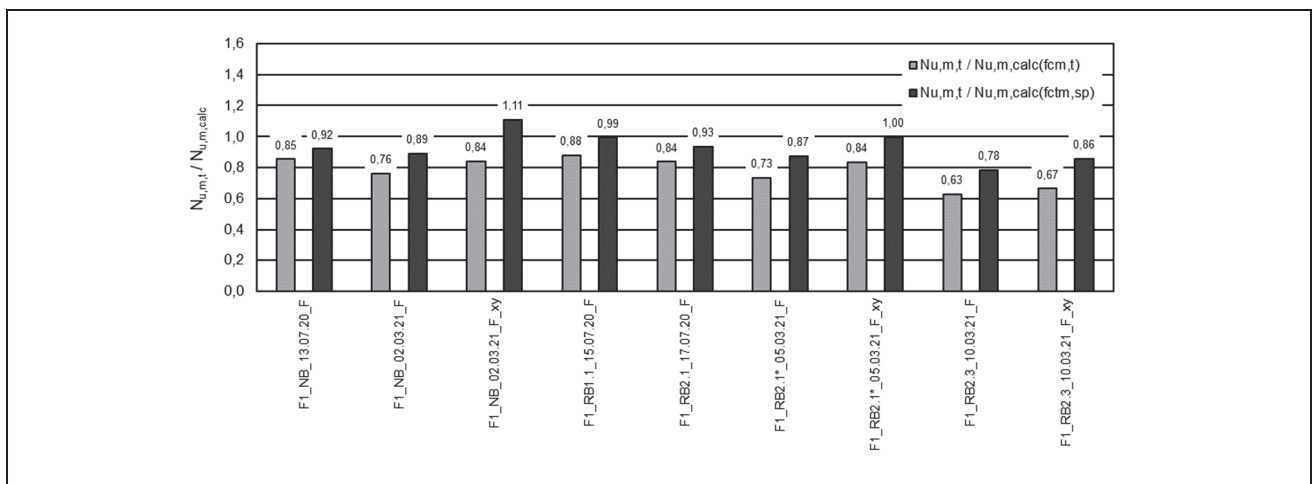


Abbildung 8-7: Gegenüberstellung der im F1 Versuch mit dem Bolzenanker F ermittelten und der rechnerischen Betonversagenslasten $N_{u,m,t}/N_{u,m,calc}$

Es bleibt festzuhalten, dass die mittlere rechnerische Versagenslast in gerissenem Beton in keiner Versuchsserie erreicht werden konnte. Dies gilt sowohl für den Prüfzeitraum t_1 als auch t_3 . Zu erwähnen ist hierbei allerdings, dass für Versuche im Prüfzeitraum t_3 lediglich Versuchskörper aus externer Herstellung (Kaltenbach) zur Verfügung standen.

Werden die Versagenslasten jedoch auf Grundlage der Spaltzugfestigkeit der Prüfkörper bestimmt (Gl. (35)), stimmen versuchstechnisch ermittelte und berechnete Versagenslasten besser überein. Die über die Druckfestigkeit berechneten Versagenslasten sind 8 bis 32 % höher als die Versagenslasten, die über die Spaltzugfestigkeit bestimmt werden. Dies macht sich in der grafischen Darstellung dadurch deutlich, dass die Verhältnisse Versuch zu Rechnung steigen. Werden die Versagenslasten über die Spaltzugfestigkeit als Referenz zu den Versuchsergebnissen gestellt, wurden in den F1 Versuchen mit Ausnahme der Versuche in der Betoncharge RB2.3_10.03.21 87 bis 111 % der Rechnung erreicht. Für die Versuche in Recyclingbeton RB2.3 mit ausschließlich Recyclinggesteinskörnung lag der Verhältniswert je nach Alter der Prüfkörper bei 78 und 86 %.

8.4 Betonkantenbruch

Neben den oben bereits besprochenen Versuchen unter zentrischer Zugbelastung wurden innerhalb des Forschungsvorhabens stichprobenartig Versuche unter Querbelastung senkrecht zum Bauteilrand durchgeführt. Ziel war es, ein Versagen auf Betonkantenbruch zu erreichen. Es wurden Versuche in drei Betonchargen durchgeführt. Dabei wurden die extern hergestellten Recyclingbetone RB2.1*_05.03.21 und RB2.3_10.03.21 sowie eine Referenzcharge NB_02.03.21 geprüft. Die Betone waren zum Prüfzeitpunkt in einem Alter zwischen 379 und 387 Tagen. Die Betondruckfestigkeit $f_{c,cube}$ wurde ca. zwei Wochen vor Durchführung der Versuche zum Betonkantenbruch ermittelt und auf den Tag der Prüfung des Betonkantenbruchs nach Gl. (29) hochgerechnet ($f_{c,cube,t}$).

Die unten dargestellten Tabellen zeigen die Installationsparameter und erzielten Versagenslasten. Zudem wurden die Versagenslasten auf eine Betondruckfestigkeit von $f_{c,cube} = 25 \text{ N/mm}^2$ bzw. $f_{c,cyl} = 20 \text{ N/mm}^2$ analog zu der Vorgehensweise in Kapitel 6 normiert. In jeder Betoncharge wurden drei Versuchsserien mit je drei Einzelversuchen durchgeführt. In den beiden Versuchskonfigurationen BK1 und BK2 wurden jeweils Einzelbefestigungen mit einem geplanten Randabstand $c = 60 \text{ mm}$ und $c = 100 \text{ mm}$ geprüft. Bei der Konfiguration BK3 wurden Doppelbefestigungen geprüft. Für den Randabstand c und den Achsabstand s waren 60 mm und 65 mm vorgesehen. Als Befestigungsmittel wurden Gewindestangen M16 verwendet, die in passgenau gebohrte Bohrlöcher auf eine Verankerungstiefe von $h_{ef} = 120 \text{ mm}$ eingeschlagen wurden.

Der Versuchsaufbau orientierte sich an dem Beispielaufbau nach [29] (siehe Abbildung 8-8) für eine Belastung senkrecht zur Dübelachse. Der Abstand von der Dübelachse zum Auflager der Abstützung des Zuggestells wurde mit mindestens dem doppelten Randabstand der Befestigung gewählt.

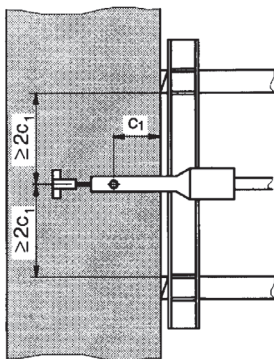


Abbildung 8-8: Beispielaufbau Querzugversuche nach [29]

Werden zunächst lediglich die mittleren normierten Versagenslasten verglichen, kann Folgendes beobachtet werden. Die mittlere normierte Versagenslast bei der Serie BK1 lag im Normalbeton bei $8,41 \text{ kN}$ und wird als Referenz angesetzt. Aus den jeweils drei Versuchen in der Betoncharge RB2.1* und RB2.3 resultieren mittlere normierte Versagenslasten von $7,57 \text{ kN}$ und $8,02 \text{ kN}$, das 90% und 95% der Referenz entspricht. In der Reihe BK2 wurden bedingt durch den größeren Randabstand von 100 mm erwartungsgemäß höhere Lasten erzielt. Die normierten Versagenslasten lagen mit $17,75 \text{ kN}$ (RB2.3) bis $18,91 \text{ kN}$ (RB2.1*) zwischen 96% und 103% im Streubereich der Referenzversuche in Normalbeton ($18,40 \text{ kN}$). Bei den Versuchen mit Doppelbefestigung konnten die Ergebnisse der Versuche in RB2.1* mit 99% im Mittel den Referenzwert von $10,48 \text{ kN}$ bestätigen. Die größte Abweichung der mittleren normierten Versagenslasten innerhalb der Versuche zum

Betonkantenbruch wurden mit der Doppelbefestigung in RB2.3 festgestellt. Es konnten lediglich 87 % der Referenzlast erreicht werden.

Werden wie oben beschrieben lediglich die mittleren normierten Versagenslasten verglichen, kann festgehalten werden, dass bei der Wahl des Befestigungsmittels und den gewählten Achs- und Randabständen kein deutlicher Einfluss der Betonmischung ermittelt werden konnte. Mit Ausnahme der Versuche mit Doppelbefestigung in der Betonmischung RB2.3 konnten die mittleren normierten Versagenslasten der Referenzversuche in Normalbeton jeweils im Mittel mit 90 % bis 103 % bestätigt werden. Es ist allerdings zu erwähnen, dass die Anzahl der Versuche relativ gering ist und weitere Untersuchungen erforderlich sind, um die gewonnenen Erkenntnisse zu unterstützen.

Tabelle 8-5: Ergebnisse BK1

Test Nr.	NB			RB2.1*			RB2.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Datum	22.03.2022			23.03.2022			23.03.2022		
$f_{cm,cube,t}$ [N/mm ²]	42,1			36,0			35,5		
$f_{ctm,sp}$ [N/mm ²]	2,6			2,8			2,4		
h_{ef} [mm]	124,8	119,1	119,0	121,8	119,7	119,9	119,3	121,4	120,4
c [mm]	62,1	58,7	60,4	59,5	59,2	56,7	65,7	62,2	60,8
s [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$V_{u,t}$ [kN]	10,87	9,44	12,40	9,20	8,87	9,20	10,95	9,01	8,74
$V_{u,20}$ [kN]	8,38	7,28	9,56	7,66	7,39	7,66	9,18	7,56	7,33
$V_{u,m,20}$ [kN]	8,41		(100%)	7,57		(90%)	8,02		(95%)
sd [kN]	1,14			0,16			1,01		
cov [%]	13,6%			2,1%			12,6%		
$V_{u,m,calc}(f_{cm,cube,t})$ [kN]	19,45	17,92	18,55	16,97	16,78	15,92	18,93	17,78	17,25
$V_{u,t} / (V_{u,m,calc}(f_{cm,cube,t}))$ [-]	0,56	0,53	0,67	0,54	0,53	0,58	0,58	0,51	0,51
	0,58			0,55			0,53		
$V_{u,m,calc}(f_{ctm,sp})$ [kN]	15,65	14,41	14,93	15,38	15,21	14,43	15,36	14,42	13,99
$V_{u,t} / (V_{u,m,calc}(f_{ctm,sp}))$ [-]	0,69	0,65	0,83	0,60	0,58	0,64	0,71	0,62	0,62
	0,73			0,61			0,65		

Tabelle 8-6: Ergebnisse BK2

Test Nr.	NB			RB2.1*			RB2.3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Datum	23.03.2022			23.03.2022			23.03.2022		
$f_{cm,cube,t}$ [N/mm ²]	42,1			36,0			35,5		
$f_{ctm,sp}$ [N/mm ²]	2,6			2,8			2,4		
h_{ef} [mm]	121,1	119,8	119,8	120,2	120,2	119,3	118,7	120,6	119,5
c [mm]	98,8	100,6	96,2	101,9	100,1	101,0	99,4	99,6	99,2
s [mm]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$V_{u,t}$ [kN]	23,68	26,09	21,84	23,75	23,26	21,10	18,73	21,03	23,74
$V_{u,20}$ [kN]	18,25	20,11	16,84	19,78	19,37	17,57	15,71	17,64	19,91
$V_{u,m,20}$ [kN]	18,40		(100%)	18,91		(103%)	17,75		(96%)
sd [kN]	1,64			1,17			2,10		
cov [%]	8,9%			6,2%			11,8%		
$V_{u,m,calc}(f_{cm,cube,t})$ [kN]	34,59	35,31	33,34	33,25	32,50	32,82	31,89	32,09	31,86
$V_{u,t} / (V_{u,m,calc}(f_{cm,cube,t}))$ [-]	0,68	0,74	0,65	0,71	0,72	0,64	0,59	0,66	0,75
	0,69			0,69			0,66		
$V_{u,m,calc}(f_{ctm,sp})$ [kN]	27,82	28,41	26,83	30,14	29,46	29,75	25,88	26,04	25,85
$V_{u,t} / (V_{u,m,calc}(f_{ctm,sp}))$ [-]	0,85	0,92	0,81	0,79	0,79	0,71	0,72	0,81	0,92
	0,86			0,76			0,82		

Tabelle 8-7: Ergebnisse BK3

Test Nr.	NB						RB2.1*						RB2.3											
	1		2		3		1		2		3		1		2		3							
Datum	24.03.2022												24.03.2022											
$f_{cm,cube,t}$ [N/mm ²]	42,1						36,0						35,5											
$f_{ctm,sp}$ [N/mm ²]	2,6						2,8						2,4											
h_{ef} [mm]	120,2	125,5	119,7	120,6	120,3	119,0	121,0	120,3	120,0	124,2	119,2	119,5	119,9	117,6	120,7	121,7	120,9	122,7						
$h_{ef,m}$ [mm]	122,9		120,2		119,7		120,7		122,1		119,4		118,8		121,2		121,8							
c [mm]	58,4	56,1	56,7	56,1	59,4	59,3	57,2	60,6	60,6	62,1	57,4	60,7	58,1	59,1	64,1	65,1	67,0	66,0						
c_{rm} [mm]	57,3		56,4		59,4		58,9		61,4		59,1		58,6		64,6		66,5							
s [mm]	63,5		62,8		64,0		64,5		63,2		63,8		64,5		65,4		63,8							
$V_{u,t}$ [kN]	12,76		15,93		12,10		12,00		13,61		11,74		11,40		11,31		10,09							
$V_{u,20}$ [kN]	9,84		12,28		9,33		9,99		11,33		9,78		9,56		9,48		8,46							
$V_{u,m,20}$ [kN]	10,48				(100%)		10,37				(99%)		9,17				(87%)							
sd [kN]	1,58						0,84						0,61											
coV [%]	15,1%						8,1%						6,7%											
$V_{u,m,calc}(f_{cm,cube,t})$ [kN]	24,0		23,4		24,7		22,8		23,7		22,7		22,4		24,9		25,5							
$V_{u,t} / (V_{u,m,calc}(f_{cm,cube,t}))$ [-]	0,53		0,68		0,49		0,53		0,57		0,52		0,51		0,45		0,40							
	0,57						0,54						0,45											
$V_{u,m,calc}(f_{ctm,sp})$ [kN]	19,3		18,9		19,9		20,7		21,5		20,6		18,2		20,2		20,7							
$V_{u,t} / (V_{u,m,calc}(f_{ctm,sp}))$ [-]	0,66		0,84		0,61		0,58		0,63		0,57		0,63		0,56		0,49							
	0,70						0,59						0,56											

Zusätzlich zum Vergleich der normierten Versagenslasten wurden die rechnerischen Versagenslasten für die Versagensart Betonkantenbruch mithilfe von Gl. (38) und Gl. (39), die auf Gl. (36) und Gl. (37) nach DIN EN 1992-4:2019-04 [4] aufbauen, ermittelt und mit den Ergebnissen der durchgeführten Versuche verglichen. Über die Bemessungsgleichung in [4] wird der charakteristische Widerstand bestimmt. Wie in Kapitel 8.3 wird der berechnete charakteristische Widerstand mit dem Faktor 1/0,75 multipliziert, um eine mittlere Versagenslast zu ermitteln. Für die Ermittlung der rechnerischen Versagenslast wurden die geometrischen Werte der Verankerungstiefe, Rand- und Achsabstand aus den jeweiligen Versuchen eingesetzt sowie die tatsächliche Druckfestigkeit bzw. Spaltzugfestigkeit, die an den Probekörpern ermittelt wurde. Für die Konfiguration BK3 wurden die Werte c und h_{ef} der beiden Befestigungen gemittelt.

$$V_{Rk,c} = V_{Rk,c}^0 \frac{A_{c,V}}{A_{c,V}^0} \cdot \psi_{s,V} \cdot \psi_{h,V} \cdot \psi_{ec,V} \cdot \psi_{\alpha,V} \cdot \psi_{re,V} \quad \text{Gl. (36)}$$

$$V_{Rk,c}^0 = k_9 \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot c_1^{1,5} \quad \text{Gl. (37)}$$

$$V_{u,m,calc}(f_{cm,cube,t}) = \frac{1}{0,75} \cdot k_9 \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{0,8 \cdot f_{cm,cube}} \cdot c_1^{1,5} \quad \text{Gl. (38)}$$

$$V_{u,m,calc}(f_{ctm,sp}) = \frac{1}{0,75} \cdot k_9 \cdot d_{nom}^\alpha \cdot l_f^\beta \cdot \sqrt{\left(\frac{0,9 \cdot f_{ctm,sp}}{0,3}\right)^{1,5}} \cdot c_1^{1,5} \quad \text{Gl. (39)}$$

mit:

$$k_9 = 1,7 \quad \text{für gerissenen Beton}$$

$$= 2,4 \quad \text{für ungerissenen Beton}$$

$$\alpha = 0,1 \cdot \left(\frac{l_f}{c_1}\right)^{0,5}$$

$$\beta = 0,1 \cdot \left(\frac{d_{nom}}{c_1}\right)^{0,2}$$

$$l_f = h_{ef} \quad \text{für einheitlichen Durchmesser}$$

Der Vergleich zeigt, dass die in den Versuchen ermittelten Versagenslasten die berechneten Versagenslasten nicht bestätigen konnten. Werden als Referenz für den Vergleich die nach Gl. (38) über die Betondruckfestigkeit bestimmten Versagenslasten gesetzt, konnten in den Versuchen über die Serienmittelwerte für Normalbeton 57 bis 69 %, für Recyclingbeton RB2.1* 54 bis 69 % und für RB2.3 45 bis 66 % erreicht werden.

Die über die Spaltzugfestigkeit berechneten Versagenslasten sind niedriger. Dementsprechend fällt der Vergleich mit den in den Versuchen ermittelten Lasten höher aus. Über alle Versuchsserien betrachtet sind die Verhältniswerte aus dem Vergleich mit den über die Spaltzugfestigkeit ermittelten Versagenslasten um 10 bis 24 % höher und liegen somit für Normalbeton zwischen 70 und 86 %, für Recyclingbeton RB2.1* zwischen 59 und 76 % sowie für RB2.3 zwischen 56 und 82 %.

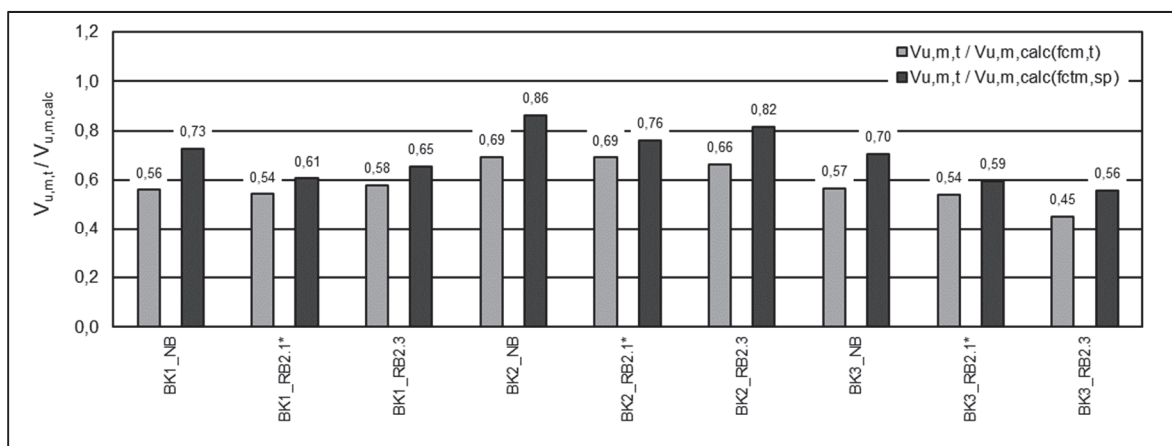


Abbildung 8-9: Gegenüberstellung der ermittelten und der rechnerischen Versagenslasten bei Betonkantenbruch $V_{u,m,t}/V_{u,m,calc}$

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die rechnerischen Versagenslasten nach den Gleichungen aus [4] in den durchgeführten Versuchen nicht erreicht werden konnten. Wird bei der Berechnung der Versagenslasten statt der Druckfestigkeit die Zugfestigkeit der Probekörper angesetzt, nähern sich Rechnung und Versuchsergebnisse zwar an, allerdings konnten maximal 86 % der gerechneten Versagenslasten in den Versuchen erzielt werden. Es bleiben die Hintergründe zu klären. Bereits in Kapitel 8.3 wurde erläutert, dass die Ergebnisse aus den Versuchen in den Betonchargen, die extern bei Kaltenbach produziert wurden, teilweise deutlich unter den rechnerischen Versagenslasten lagen. Für die Versuche zur Überprüfung der Versagenslast bei Betonkantenbruch standen ausschließlich Versuchskörper des genannten Lieferanten zur Verfügung.

Werden die Ergebnisse aus der versuchstechnischen Überprüfung in Normalbeton und dem Recyclingbeton RB2.1* gegenübergestellt, ist keine signifikante Abweichung zu verzeichnen. Dies gilt ebenfalls für den Recyclingbeton RB2.3 mit Ausnahme der Ergebnisse mit der Doppelbefestigung.

9 Fazit

9.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Da bisher nur sehr wenige Erkenntnisse zur Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen vorliegen (siehe [45]), wurde innerhalb des Forschungsvorhabens zunächst der Fokus auf erste grundlegende Prüfungen mit verschiedenen Befestigungssystemen einer Größe in unterschiedlichen Recyclingbetonen gelegt. Für die Versuche wurden Versuchskörper mit unterschiedlichen Betonmischungen hergestellt. Um jeweils Vergleichswerte zu generieren, wurden zunächst Versuchskörper mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen hergestellt. Die darin erzielten Ergebnisse der Auszugversuche wurden in einem ersten Schritt durch den Vergleich mit den Werten aus dem Zulassungsverfahren der jeweiligen Produkte auf ihre Plausibilität überprüft. In einem nächsten Schritt wurden diese Ergebnisse als Referenzwerte für den Vergleich mit den Versagenslasten und -verbundspannungen aus den Versuchen in Prüfkörpern aus Recyclingbeton angesetzt.

Neben den Betonen mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen (NB) wurden verschiedene Recyclingbetone (RB) entwickelt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den entwickelten Recyclingbetonen war der Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen. Es wurden Betone hergestellt mit den nach der DAfStb-Richtlinie [3] maximal erlaubten Anteilen, mit geringeren Anteilen, aber auch mit deutlich höheren Anteilen bis zum kompletten Ersatz der natürlichen durch rezyklierte Gesteinskörnung. Zusätzlich zu den Betonkörpern aus eigener Herstellung wurden von einem Betonhersteller extern Prüfkörper geordert. Dadurch ergab sich zum einen die Möglichkeit, eine weitere Quelle von rezyklierten Gesteinskörnungen zu testen und zum anderen, in einer Betonmischung zu prüfen, deren Gesteinskörnung zu 100 % aus rezykliertem Material – also auch Brechsand – bestand.

Als Befestigungssysteme wurden drei Verbundankersysteme, ein Bolzenanker und eine Betonschraube getestet.

Erste Ergebnisse zeigten bereits in den Versuchen in Prüfkörpern mit Normalbeton aus eigener Herstellung, dass die normierten Auszuglasten die Werte aus den Versuchen innerhalb des jeweiligen Zulassungsverfahrens nicht bestätigen konnten. Es wurden unabhängig des geprüften Systems im Mittel lediglich 80 bis 85 % erreicht. Systematische Fehler wurden durch Vergleichsversuche mit ausgewählten Systemen in Normalbetonversuchskörpern aus vergangenen Projekten ausgeschlossen. Mit den Vergleichsversuchen konnten die Ergebnisse aus den Zulassungsverfahren bestätigt werden. Da die Versuche in den Versuchskörpern aus eigener Herstellung ca. vier bis sieben Wochen nach Betonage durchgeführt wurden, wurde ein Einfluss des Alters der Körper auf die Tragfähigkeit vermutet, der sich in weiteren zahlreichen Versuchen bestätigte. Um dies zu überprüfen, wurden zum einen die Versuchskörper aufbewahrt, in denen bereits nach wenigen Wochen Versuche durchgeführt wurden und zusätzlich weitere Versuchskörper hergestellt, die ca. ein Jahr gelagert wurden, bevor die Befestigungssysteme darin geprüft wurden. Es konnte ein signifikanter Einfluss des Betonalters auf die Tragfähigkeit von Befestigungssystemen dargestellt werden. Dieser Trend konnte tendenziell auch in Recyclingbetonen festgehalten werden. Um Ergebnisse in Betonen verschiedenen Alters zu erhalten, musste eine deutlich höhere Anzahl an Auszugversuchen durchgeführt werden als ursprünglich geplant.

Wurden die erzielten Ergebnisse getrennt nach Betonalter verglichen, konnte im ungerissenen Recyclingbeton aus eigener Herstellung RB1.1 und RB2.1 grundsätzlich kein signifikanter Einfluss der Recyclinggesteinskörnung auf die in eng abgestützten Auszugversuchen ermittelte mittlere normierte Verbundspannung festgestellt werden. In der extern hergestellten Betoncharge RB2.1* konnten die Referenzwerte in den vier bis sieben Wochen alten Betonprüfkörpern nicht bestätigt werden. Zum späteren Prüfzeitpunkt – also in Betonen mit einem Alter von ca. einem Jahr – näherten sich die Ergebnisse denen aus den Referenzversuchen an. Für die Betone, deren Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen die Angaben nach der DAfStb-Richtlinie [3] deutlich überschreiten, muss unterschieden werden in die Versuchskörper, die natürlichen oder rezyklierten Sand beinhalteten. In den Versuchen in eigens hergestellten Betonchargen mit natürlichem Sand allerdings ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm (RB2.2) konnten die normierten Verbundspannungen abhängig vom geprüften Produkt im Mittel 84 bis 95 % der Referenzwerte erreichen.

In zentrischen Auszugversuchen mit weiter Abstützung wurde die Betonversagenslast in Prüfungen mit Bolzenankern und Betonschrauben bestimmt. Aufgrund des Ausbruchkegels bei Betonversagen sowie dem Umstand, dass in mehreren Prüfzeiträumen getestet werden musste, konnten weniger Versuche durchgeführt werden als bei den Verbundankersystemen. Die Versuche in Versuchskörpern mit geringen Anteilen der rezyklierten Gesteinskörnungen zeigten vergleichbare Auszuglasten wie in den Referenzbetonen. Mit 92 bis 97 % der Versagenslasten im Vergleich zu den Referenzen zeigten die Versuche in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm und natürlichem Sand nur eine leichte Abminderung gegenüber den Referenzen. In den extern hergestellten Versuchskörpern aus Recyclingbeton (RB2.1* und RB2.3) wurden mit Traglasten entsprechend 53 bis 88 % der Referenzlasten deutliche Abweichungen der Auszuglasten bei Betonversagen ermittelt.

Neben den besprochenen Versuchen in ungerissenem Beton wurden auch Auszuglasten in gerissenem Beton mit einer Rissweite $\Delta w = 0,5$ mm überprüft. In den Versuchen mit den Verbundankersystemen konnte grundsätzlich ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Betonalter und Versagenslast erkannt werden, allerdings in geringerem Maße. Zunächst ist zu erwähnen, dass die aus den Zulassungsverfahren bekannten normierten Verbundspannungen bei zwei von drei Produkten mit den innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführten Referenzen nicht bestätigt werden konnten. Dies gilt ebenso für die normierten Versagenslasten mit dem Bolzenanker F. Die Beobachtung könnte mit dem geringeren Umfang der Datengrundlage zusammenhängen. Innerhalb eines Zulassungsverfahrens ist für den hier betrachteten Test je Dübelgröße grundsätzlich nur eine Versuchsserie mit mindestens fünf Versuchen durchzuführen. Zudem kommt die geringere Anzahl an Versuchsserien in gerissenem Beton innerhalb des Forschungsvorhabens. Im Gegensatz dazu wurden im ungerissenen Beton teilweise für die Verbundankersysteme die Chargenreferenzversuche als Datengrundlage genutzt, deren Umfang für die betrachteten Verbundankersysteme mindestens acht Serien mit je fünf Versuchen betrug. Zudem wurden die Befestigungssysteme lediglich in Versuchen in gerissenem Recyclingbeton aus eigener Herstellung im ersten Prüfzeitraum (vier bis sieben Wochen) geprüft. Für eine Prüfung in ca. einem Jahr alten, gerissenen Beton standen ausschließlich die extern hergestellten Versuchskörper zur Verfügung. Lediglich in der Versuchsserie in gerissenem Recyclingbeton in dem ca. einem Jahr alten Versuchskörper aus externer Herstellung mit rezyklierten Gesteinskörnungen in Anlehnung an [3] konnten die Referenzen bestätigt werden. Bei den Verbundankersystemen und der Betonschraube wurden teilweise im Mittel deutlich unter 90 % der Versagenslasten erreicht.

Aufgrund des erst innerhalb des Forschungsvorhabens bekannt gewordenen starken Einflusses des Betonalters konnten nicht in allen Betonmischungen in einem Alter von mindestens einem Jahr Prüfungen durchgeführt werden. Da das Bild in ungerissenem Beton eindeutig war, wird dieses mit einer größeren Datengrundlage auch für gerissenen Beton in ähnlicher Form erwartet.

Die Reinigung des Bohrlochs kann einen starken Einfluss auf die Tragfähigkeit von Verbundankersystemen haben. Innerhalb eines Zulassungsverfahrens sind nach [18] Versuche zur Montagesicherheit durchzuführen, bei denen für die maximale Verankerungstiefe mit reduziertem Aufwand in trockenem und wassergesättigtem Beton gereinigt wird. Aus den Ergebnissen resultierte für Normalbeton und einen Recyclingbeton mit 100 % rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm (hier genannt: RB2.2) der gleiche Faktor für die Montagesicherheit. Daraus wurde geschlossen, dass für Recyclingbetone, die in Anlehnung an [3] konzipiert werden und somit einen deutlich geringeren Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen enthalten, keine abweichenden Ergebnisse erwartet werden. Bei Durchführung der Tests waren die Versuchskörper allerdings erst wenige Wochen alt. Es müsste weiterhin geprüft werden, ob sich die Ergebnisse für Beton in einem Alter von mindestens einem Jahr bestätigen lassen.

Wie oben bereits erläutert, wurden signifikante Abweichungen der normierten Verbundspannungen in Abhängigkeit des Alters der Betonprüfkörper festgestellt. In weiteren Versuchsserien sollte untersucht werden, ob die Abweichung der Versuchsergebnisse für Verbundankersysteme auf den Gehalt der Restfeuchte der Prüfkörper an sich oder eine erschwerte Reinigung infolge einer höheren Betonfeuchte zurückzuführen ist. Hierfür wurden mit einem Verbundankersystem unterschiedliche Lagerungs- bzw. Umgebungsbedingungen und Reinigungsmethoden untersucht. Es stellte sich heraus, dass durch erhöhten Reinigungsaufwand im Vergleich zur Standardreinigungsmethode eine deutliche Steigerung der mittleren normierten Verbundspannungen erreicht werden konnte. So konnten je nach Lagerungsart in Prüfkörpern mit einem Alter von ca. sieben Wochen die mittleren normierten Verbundspannungen aus den Versuchen in ca. einem Jahr alten Versuchskörpern erreicht werden.

Die Erhöhung der normierten Verbundspannungen durch erhöhten Reinigungsaufwand konnte in einer weiteren Versuchsreihe nicht eindeutig bestätigt werden. Ein möglicher Grund hierfür wird in den bereits hohen Referenzwerten mit Standardreinigung gesehen. Zudem konnte nach der Reinigung mit erhöhtem Aufwand innerhalb der Versuchsreihe keine Trocknung des Bohrlochs durchgeführt werden. Zusätzlich wurde gezeigt, dass durch das Erstellen der Bohrlöcher mit einem Hohl- bzw. Saugbohrer kein negativer Einfluss zu verzeichnen war. Die genannten Erkenntnisse wurden in Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen sowie Recyclingbetonen mit geringeren Anteilen sowie ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm gewonnen.

Das Versagen der geprüften Verbundankersysteme wurde sowohl in der Grenzschicht zwischen Mörtel und Ankerstange („be“) als auch zwischen Mörtel und Bohrlochwand („bb“) festgestellt. Es konnte beobachtet werden, dass mit höheren Versagenslasten tendenziell der Anteil an der Versagensart „be“ stieg. Dies gilt für alle Betonmischungen. Da in den Betonmischungen mit hohem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen grundsätzlich geringere Versagenslasten ermittelt wurden, wurde für diese erwartungsgemäß ein größerer Anteil an Versagen in der Grenzschicht Mörtel/Bohrlochwand beobachtet.

Bedingt durch die gering gewählte Verankerungstiefe des Bolzenankers wurde planmäßig für alle Betonmischungen ein Betonversagen ermittelt. Bei der Betonschraube wurde in der Regel ebenfalls

Betonversagen beobachtet, wobei die Höhe des Ausbruchkegels nicht bis zum Ende der Schraube reichte.

Zur Beurteilung des Last-Verformungsverhaltens müssen innerhalb eines Zulassungsverfahrens unterschiedliche Kriterien eingehalten werden. Die durchgeführten Auszugversuche wurden bezüglich dieser Kriterien untersucht. Es konnte kein negativer Einfluss durch den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen beobachtet werden.

Neben den oben bereits erläuterten Versuchen im gerissenen Beton wurden zusätzlich mit dem Bolzenanker Risswechselversuche unter Dauerlast in einer Referenzbeton- und zwei Recyclingbetonchargen durchgeführt. Unabhängig von dem Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung im Beton konnten in allen Chargen die Kriterien nach [29] eingehalten werden.

Für die Montageversuche zur Ermittlung der Achs- und Randabstände konnten keine eindeutigen Einflüsse der Recyclinggesteinskörnung erkannt werden. Es ist zusätzlich anzumerken, dass die Versuche in Betonkörpern in einem Alter von wenigen Wochen geprüft wurden. Aufgrund der oben erläuterten Erkenntnisse zum Einfluss des Betonalters auf die Versagenslasten wären weitere Versuchsserien in Recyclingbeton in einem deutlich höheren Alter interessant.

Abschließend wurden stichprobenartig Versuchsserien durchgeführt, in denen eine Belastung quer zur Dübelachse aufgebracht wurde. Ziel war ein Versagen auf Betonkantenbruch. Mit Ausnahme einer Serie in Recyclingbeton mit 100 % rezyklierten Gesteinskörnungen konnten für unterschiedliche Rand- und Achsabstände in Versuchen in Recyclingbeton mindestens 90 % der Versagenslasten aus den Referenzserien in Normalbeton erreicht werden.

Die Betonversagenslasten bei Betonkantenbruch und kegelförmigem Betonausbruch unter Zuglast aus den durchgeführten Versuchen wurden mit den rechnerischen Versagenslasten nach DIN EN 1992-4 verglichen. Dabei wurden teilweise deutliche Abweichungen von bis zu ca. 50 % festgestellt. Allerdings zeigten sich die größten Differenzen in Recyclingbeton 2.3 mit ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen. Neben der Druckfestigkeit wurde zusätzlich die Spaltzugfestigkeit in für die geprüften Betone ermittelt. Wurde in den Bemessungsgleichungen in DIN EN 1992-4 statt der Druckfestigkeit die Zugfestigkeit eingesetzt, zeigte sich eine deutlich bessere Übereinstimmung der mittleren Versagenslasten zwischen Versuchsergebnissen und Rechnung. Daher wäre eine weiter umfängliche Untersuchung diesbezüglich interessant.

Grundsätzlich konnte eine gute Datengrundlage für zentrische Auszugversuche in ungerissenem Beton geschaffen werden. Aufgrund der neu gewonnenen Erkenntnisse über den signifikanten Einfluss des Betonalters mussten viele Testergebnisse getrennt voneinander betrachtet werden, was die allgemeine Aussagekraft abschwächt. Daher wird unter anderem empfohlen, weitere Versuche insbesondere in gerissenem Beton durchzuführen – sowohl im statischen als auch im bewegten Riss. Die Empfehlung zu ergänzenden Versuchen wird ebenfalls für Montageversuche ausgesprochen, um einen größeren Bereich für die geometrische Anordnung abzudecken. Dabei sollte grundsätzlich auf das Alter des Betons geachtet werden, in dem die Befestigungssysteme geprüft werden. Zudem wird empfohlen, neben der Druckfestigkeit ebenfalls die Zugfestigkeit des Betons der Prüfkörper zu ermitteln. Ein detaillierter Vorschlag für ein Prüfprogramm wird in Kapitel 9.2 gegeben.

Langzeitversuche wurden innerhalb des Forschungsvorhabens nicht untersucht. Ein möglicher Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen wäre ebenfalls ein weiteres Forschungsfeld.

9.2 Prüfprogramm für eine Bemessung nach DIN EN 1992-4 [4]

Aus den Ergebnissen, die innerhalb des Forschungsvorhabens ermittelt wurden sowie weiteren Überlegungen, wird im Folgenden ein Vorschlag zu einem Versuchsprogramm in Anlehnung an die durchzuführenden Versuche in [18, 29] für Verbundankersysteme und mechanische Befestigungssysteme in Recyclingbeton gegeben. Als konservative Vorgabe werden die Werte aus der bestehenden ETA des Produkts als Grenzwerte angesehen. Somit soll vermieden werden, dass aus den Versuchen in Recyclingbeton höhere Widerstände und geringere Achs- und Randabstände resultieren.

Der Beton für die Prüfkörper soll den vom Hersteller des Befestigungssystems höchsten angestrebten Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen enthalten. Als Anhaltswerte können die in Kapitel 2 dargestellten Anteile aus der DAfStb-Richtlinie [3] angenommen werden. Für die Vorschläge der Prüfprogramme werden die erforderlichen Versuchsserien nach den im aktuellen Entwurf der DIN 1045-2 [6] enthaltenen Betonklassen unterschieden. Als rezyklierte Gesteinskörnung soll Typ 2 zum Einsatz kommen. Bei der stofflichen Zusammensetzung wird empfohlen, den maximalen Anteil an Rb (Mauerziegel, Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton) von 30 M.-% zu prüfen, da der Bestandteil Rb kritischer als die Bestandteile Rc und Ru gesehen wird.

Die Bemessung der Verankerung von Befestigungen nach DIN EN 1992-4 [4] soll allerdings nur für Recyclingbetone zulässig sein, die die Vorgaben der DAfStb-Richtlinie [3] bzw. der aktuell im Entwurf vorliegenden DIN 1045-2 [6] einhalten und insbesondere das Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit von dem von Normalbeton nicht abweicht.

In Kapitel 8.3 und 8.4 wurden zur Überprüfung der Bemessung nach DIN EN 1992-4 [4] die versuchstechnisch und rechnerisch ermittelten Versagenslasten gegenübergestellt. Die Versagenslasten zeigten für Recyclingbetone mit geringen Anteilen an rezyklierten Gesteinskörnungen und Anteilen in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie [3] keine signifikante Abweichung zur durchgeführten Referenz. Es zeigte sich allerdings eine deutliche Abweichung zwischen versuchstechnisch ermittelten und rechnerisch bestimmten Versagenslasten. Die Abweichung wurde jedoch geringer oder gänzlich aufgehoben, sofern die berechneten Versagenslasten mit der an Probekörpern ermittelten Zugfestigkeit bestimmt wurden.

Die Betondruckfestigkeitsklasse für Recyclingbeton ist in Deutschland aktuell in [3] auf C30/37 beschränkt. In [18, 29] werden für Normalbeton Prüfungen an Befestigungen durchgeführt, die zu einer ETA für die Klassen C20/25 bis C50/60 führen. Die mittlere Würfeldruckfestigkeit der Betonprüfkörper mit Recyclinggesteinskörnung, in denen innerhalb des Forschungsvorhabens die Versagenslasten in zentrischen Auszugversuchen mit enger Abstützung (R1) ermittelt wurden, lag zwischen 18,6 N/mm² und 42,6 N/mm². Dies deckt nahezu den aktuell in [3] geregelten Bereich für Recyclingbeton in Deutschland ab. Für Recyclingbeton wird vorgeschlagen, die Prüfungen insbesondere in der Druckfestigkeitsklasse C20/25 durchzuführen. Detaillierte Informationen zu den jeweils erforderlichen Versuchsserien sowie weiteren Optionen für die Betondruckfestigkeitsklassen werden in den folgenden Kapiteln gegeben.

Die Auswertung der im Folgenden aufgeführten Versuche soll wie in [18, 29] beschrieben wird, durchgeführt werden. Für die Auswertung und Bewertung von Versagenslasten, Verschiebungen und dem Last-Verformungsverhalten sollen die Kriterien aus den bereits vorhandenen Regelwerken auch für Recyclingbeton überprüft werden.

Im Folgenden werden Vorschläge für Versuchsprogramme für Verbundankersysteme und mechanische Befestigungssysteme gegeben. Dabei wird zum einen unterschieden zwischen reinen Druckzonendübel, die nur in ungerissenem Beton angewendet werden dürfen und Zugzonendübel, die auch in gerissenem Beton eingesetzt werden können. Zudem wird differenziert zwischen der Möglichkeit, Gleichwertigkeit der jeweiligen Produkte in Recyclingbeton nachzuweisen im Vergleich zum Einsatz in Normalbeton und der Möglichkeit, neue charakteristische Widerstände zu ermitteln. Für den Nachweis der Gleichwertigkeit sollen die Kriterien wie für Normalbeton aus den jeweiligen Regelwerken eingehalten werden. Für die Ermittlung der Abminderungsfaktoren α und α_p sollen als Referenz die im Zulassungsverfahren angesetzten Lasten verwendet werden.

9.2.1 Verbundankersysteme

Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2 zeigen jeweils einen Vorschlag für ein Prüfprogramm für Verbundankersysteme in Recyclingbeton. Dabei unterscheiden sich die beiden Optionen darin, ob das zu prüfende Produkt lediglich für ungerissenen Beton eingesetzt werden darf oder zusätzlich auch für gerissenen Beton. Die Vorschläge für die erforderlichen Versuchsserien orientieren sich am Prüfprogramm aus EAD 330499-01-0601 [18]. Für beide unten dargestellten Optionen für ein Prüfprogramm können die Versuche zur Ermittlung des Widerstands gegen Stahlversagen (N1, N2) entfallen, da unter Zugbelastung kein abweichender Einfluss aus der Betonmischung gegenüber Normalbeton gesehen wird.

Mögliche Abminderungen aus dem Einfluss erhöhter Temperaturen (B2 und B3), minimaler Installationstemperatur (B4) und minimaler Aushärtezeit (B5) können aus den Versuchen innerhalb des Zulassungsverfahrens in Normalbeton übernommen werden, da keine Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Gesteinskörnung des Betons gesehen wird. Für die Versuchsserien B8 und B9 sowie B14 bis B20 wird ebenfalls lediglich eine Abhängigkeit von dem verwendeten Verbundankersystem und nicht vom Beton gesehen. Daher kann auf die Durchführung der genannten Versuchsserien in Recyclingbeton verzichtet werden, wenn die Einflüsse in Normalbeton innerhalb eines Zulassungsverfahrens geprüft wurden. Mögliche Abminderungsfaktoren sollen aus dem Zulassungsverfahren übernommen werden.

Der Wert α_{setup} kann nach EAD 330499-01-0601 [18] mit 0,75 für ungerissenen und mit 0,70 für gerissenen Beton angesetzt werden. Da der Wert α_{setup} für Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen nicht ausführlich untersucht ist, wird nicht empfohlen, eine genauere Untersuchung in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen durchzuführen. Die oben genannten Werte können ebenfalls für Recyclingbeton angesetzt werden.

Aus den Versuchen B6 und B7, die innerhalb des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden, konnte kein unterschiedlicher Wert für γ_{inst} zwischen Normalbeton und Recyclingbeton ermittelt werden. Allerdings wurde lediglich ein Verbundankersystem überprüft. Zudem wurden die Versuchsreihen in Beton in einem Alter von wenigen Wochen durchgeführt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Verbundspannungen in den Referenzversuchen in älterem Beton in deutlich größerem Maße steigen als diejenigen aus den B6 und B7 Versuchen. Daher wird empfohlen, die Versuchsserien B6 und B7 mit einer kleinen, mittleren und großen Größe in Recyclingbeton durchzuführen.

Der Einfluss aus Lastwechselversuchen in Recyclingbeton wurde innerhalb des Forschungsvorhabens nicht überprüft. Es wird empfohlen, für den Einsatz in ausschließlich ungerissenem Beton eine Versuchsserie B12 mit einer mittleren Größe durchzuführen. Sofern das

Verbundankersystem in gerissenem Beton eingesetzt werden soll, kann die Serie B12 entfallen. Stattdessen muss die Serie B13 allen Dübelgrößen durchgeführt werden.

Für beide Optionen sollen angelehnt an die Chargenreferenzversuche in Normalbeton ebenfalls Vergleichsversuche in allen geprüften Betonchargen durchgeführt werden. Es soll in jeder neuen Betoncharge eine Referenzversuchsserie mit der Größe M12 in ungerissenem Beton durchgeführt werden. Zudem ist darauf zu achten, dass innerhalb des Prüfprogramms in Versuchskörpern geprüft wird, deren rezyklierte Gesteinskörnungen drei unterschiedlichen Herkünften bzw. Chargen entstammen.

Die Versuchsserien A5-RC, B1-RC sowie V2-RC werden lediglich für die Betonklasse BK-S als erforderlich angesehen.

Neben der Unterscheidung zwischen Zug- und Druckzonendübel wird unterschieden zwischen der Variante, Gleichwertigkeit der Versuche in Recyclingbeton und der innerhalb des Zulassungsverfahrens in Normalbeton ermittelten Ergebnisse nachzuweisen und der Variante, neue Widerstände zu ermitteln. Daher sind die Referenzserien R1-RC bis R5-RC für Zugzonendübel bzw. R1-RC, R2-RC und R5-RC für Druckzonendübel optional, sofern die Gleichwertigkeit nicht nachgewiesen werden kann.

Zudem können durch die zusätzlichen Referenztestserien die Betonerhöhungsfaktoren ermittelt werden. Werden die Referenztestserien nicht durchgeführt, wird vorgeschlagen, zum Normieren der Versuchsergebnisse den Exponenten aus dem Zulassungsverfahren anzusetzen. Allerdings sollen die Betonerhöhungsfaktoren für höhere Betonfestigkeitsklassen nicht angesetzt werden dürfen und auf der sicheren Seite liegend die Verbundspannung für die niedrigste Betonfestigkeitsklasse angesetzt werden.

Tabelle 9-1: Vorschlag Prüfprogramm Verbundankersystem ungerissener R-Beton in Anl. an EAD 330499-01-0601 [18]

N°	Purpose of test	concrete	crack width [mm]	size	d _{cut}	n _{min}	req. α	Required for	Concrete Class acc. to E DIN 1045-2 [6] / design acc. to									
									BK-N	BK-E	BK-S							
Basic tension tests									DIN EN 1992-4 [4]	DIN EN 1992-4 [4]	not regulated so far							
A1-RC	Basic tension tests	C20/25	0	All	d _{cut,m}	5	-	Option 1-12	o	o	o							
A2-RC		¹⁾	0	All		5	-	-	o	o	o							
A3-RC		C20/25	0,3	All		5	-	Option 1-6	-	-	-							
A4-RC		¹⁾	0,3	All		5	-	-	-	-	-							
Resistance to pull-out failure																		
F1-RC	Maximum crack width and large hole diameter	C20/25	0	s/m/l	d _{cut,max}	5	0,80	Option 7-12	x	x	x							
			0,5	All	d _{cut,max} ²⁾			Option 1-6	-	-	-							
F3-RC	Crack cycling under load	C20/25	0,1 - 0,3	All	d _{cut,max} ²⁾	5	0,90	TC, DC	-	-	-							
F4-RC	repeated loads	C20/25	0	m	d _{cut,m}	3	0,90	DC, TC, UC	x	x	x							
				All	5			CS Option 1-12	x	x	x							
F6-RC	Torquing in low strength concrete	C20/25	0	All	d _{cut,max}	10	-	CS	x	x	x							
F11-RC	Minimum edge distance and spacing	C20/25	0	All	d _{cut,m}	5	-	All	-	-	x							
F12-RC	Edge distance to prevent splitting under load	C20/25	0	All	d _{cut,m}	4	-	Option 1-12	-	-	x							
Characteristic Resistance to shear load																		
V2-RC	Characteristic resistance to pry-out failure	C20/25	0	All	d _{cut,m}	5	-	All	-	-	x							
Batch of recycled aggregates									C20/25	0	m	d _{cut,m}	5	-	All	x	x	x

x: Versuchsreihen erforderlich

-: Versuchsreihen nicht erforderlich

o: Versuchsreihen optional

¹⁾ optional möglich, wenn neuer Betonerhöhungsfaktor bestimmt werden soll. Mögliche Druckfestigkeitsklasse in Anlehnung an DAfStb-Richtlinie: C30/37

²⁾ aktueller Vorschlag der EGF: für alle Systeme d_{cut,m}

Tabelle 9-2: Vorschlag Prüfprogramm Verbundankersystem gerissener R-Beton in Anl. an EAD 330499-01-0601 [18]

N°	Purpose of test	concrete	crack width [mm]	size	d _{cut}	n _{min}	req. α	Required for	Concrete Class acc. to E DIN 1045-2 [6] / design acc. to									
									BK-N	BK-E	BK-S							
Basic tension tests									DIN EN 1992-4 [4]	DIN EN 1992-4 [4]	not regulated so far							
A1-RC	Basic tension tests	C20/25	0	All	d _{cut,m}	5	-	Option 1-12	o	o	o							
A2-RC		¹⁾	0	All		5	-	-	o	o	o							
A3-RC		C20/25	0,3	All		5	-	Option 1-6	o	o	o							
A4-RC		¹⁾	0,3	All		5	-	-	o	o	o							
Resistance to pull-out failure																		
F1-RC	Maximum crack width and large hole diameter	C20/25	0	s/m/l	d _{cut,max}	5	0,80	Option 7-12	-	-	-							
			0,5	All	d _{cut,max} ²⁾			Option 1-6	x	x	x							
F3-RC	Crack cycling under load	C20/25	0,1 - 0,3	All	d _{cut,max} ²⁾	5	0,90	TC, DC	x	x	x							
								UC, CS	x	x	x							
F4-RC	repeated loads	C20/25	0	m	d _{cut,m}	3	0,90	DC, TC, UC	-	-	-							
				All	5			CS Option 1-12	-	-	-							
F6-RC	Torquing in low strength concrete	C20/25	0	All	d _{cut,max}	10	-	CS	x	x	x							
F11-RC	Minimum edge distance and spacing	C20/25	0	All	d _{cut,m}	5	-	All	-	-	x							
F12-RC	Edge distance to prevent splitting under load	C20/25	0	All	d _{cut,m}	4	-	Option 1-12	-	-	x							
Characteristic Resistance to shear load																		
V2-RC	Characteristic resistance to pry-out failure	C20/25	0	All	d _{cut,m}	5	-	All	-	-	x							
Batch of recycled aggregates									C20/25	0	m	d _{cut,m}	5	-	All	x	x	x

x: Versuchsreihen erforderlich

-: Versuchsreihen nicht erforderlich

o: Versuchsreihen optional

¹⁾ optional möglich, wenn neuer Betonerhöhungsfaktor bestimmt werden soll. Mögliche Druckfestigkeitsklasse in Anlehnung an DAfStb-Richtlinie: C30/37

²⁾ aktueller Vorschlag der EGF: für alle Systeme d_{cut,m}

9.2.2 Mechanische Befestigungssysteme

In Tabelle 9-3 und Tabelle 9-4 werden Vorschläge für Prüfprogramme für mechanische Befestigungssysteme in ausschließlich ungerissenem und in gerissenem Recyclingbeton gegeben in Anlehnung an die Versuchsserien des Prüfprogramms in EAD 330232-01-0601 [29].

Tabelle 9-3: Vorschlag Prüfprogramm mech. Befestigungen in ungerissenem R-Beton in Anlehnung an EAD 330232-01-0601 [29]

N°	Purpose of test	concrete	crack width [mm]	size	h _{ef}	n _{min}	req. α	remarks	Concrete Class acc. to E DIN 1045-2 [6] / design acc. to								
									BK-N	BK-E	BK-S						
Reference tests (confined test setup)									DIN EN 1992-4 [4]	DIN EN 1992-4 [4]	not regulated so far						
R1-RC	Bond strength with confined test setup	C20/25	0	All	7d ¹⁾	5	-		o	o	o						
R2-RC		²⁾	0	s/m/l	7d ¹⁾	5	-		o	o	o						
R3-RC		C20/25	0,3	s/m/l	7d ¹⁾	5	-		-	-	-						
R4-RC		²⁾	0,3	s/m/l	7d ¹⁾	5	-		-	-	-						
R5-RC	Ref. for sensitivity to reduced cleaning effort	C20/25	0	s/m/l	max	5	-		o	o	o						
Basic tension tests with unconfined test setup																	
A5-RC	Edge distance to prevent splitting under load	C20/25	0	s/m/l	min	4	1,00		-	-	x						
Resistance to shear load																	
V2-RC	Resistance to pry-out failure	C20/25	0	s/m/l	min	5	-		-	-	x						
Resistance to pull-out failure																	
B1-RC	Minimum edge distance and spacing	C20/25	0	s/m/l	min	5	-		-	-	x						
B6-RC	Robustness in dry concrete	C20/25	0	s/m/l	max	5	see Table 2.4 EAD 330499-01-0601		x	x	x						
B7-RC	Robustness in water saturated concrete	C20/25	0	s/m/l	max	5			x	x	x						
B10-RC	Increased crack width	C20/25	0,5	s/m/l	7d ¹⁾	5	0,80		-	-	-						
B12-RC	Repeated loads	C20/25	0	m	7d ¹⁾	5	1,00		x	x	x						
B13-RC	Crack cycling under load	C20/25	0,1 - 0,3	all	7d ¹⁾	5	0,90		-	-	-						
Batch of recycled aggregates									C20/25	0	m	7d ¹⁾	5		x	x	x

x: Versuchsreihen erforderlich

-: Versuchsreihen nicht erforderlich

o: Versuchsreihen optional

¹⁾ gilt für Injektionsankersysteme. Für Patronensysteme soll die zur Größe angegebene Verankerungstiefe gewählt werden.

²⁾ optional möglich, wenn neuer Betonerhöhungsfaktor bestimmt werden soll. Mögliche Druckfestigkeitsklasse in Anlehnung an DAfStb-Richtlinie: C30/37

Wie bereits für Verbundankersysteme wird es bei mechanischen Verankerungssystemen als nicht erforderlich gesehen, in den Versuchsserien N1, N2 und N3 den Widerstand gegen Stahlversagen

erneut zu prüfen. Die Widerstände und Einflussfaktoren, die innerhalb des Zulassungsverfahrens ermittelt wurden, können für Recyclingbeton angenommen werden.

Für Befestigungen in ausschließlich ungerissenem Beton sind F1-RC und F4-RC für alle Betonklassen erforderlich, um Gleichwertigkeit nachzuweisen. Zudem wird für Betonschrauben die Durchführung von F6-RC Versuchsserien empfohlen. Die jeweiligen Referenzen sind aus dem Zulassungsverfahren in Normalbeton zu entnehmen. Für die Betonklasse BK-S werden ergänzend die Versuchsserien F11-RC, F12-RC sowie V2-RC als erforderlich angesehen.

Analog zu der vorgeschlagenen Vorgehensweise für Verbundankersysteme können die Exponenten zur Normierung der Versagenslasten angesetzt werden, die innerhalb des Zulassungsverfahrens ermittelt wurden. Ohne Durchführung der optionalen Versuchsserien A1-RC und A2-RC können allerdings die Versagenslasten lediglich für die niedrigste Betonfestigkeitsklasse angesetzt werden und dürfen nicht erhöht werden.

Tabelle 9-4: Vorschlag Prüfprogramm mech. Befestigungen in gerissenem R-Beton in Anlehnung an EAD330232-01-0601 [29]

N°	Purpose of test	concrete	crack width [mm]	size	h _{ef}	n _{min}	reqd. α	remarks	Concrete Class acc. to E DIN 1045-2 [6] / design acc. to		
									BK-N	BK-E	BK-S
Reference tests (confined test setup)									DIN EN 1992-4 [4]	DIN EN 1992-4 [4]	not regulated so far
R1-RC	Bond strength with confined test setup	C20/25	0	All	7d ¹⁾	5	-		o	o	o
R2-RC		²⁾	0	s/ml	7d ¹⁾	5	-		o	o	o
R3-RC		C20/25	0,3	s/ml	7d ¹⁾	5	-		o	o	o
R4-RC		²⁾	0,3	s/ml	7d ¹⁾	5	-		o	o	o
R5-RC	Ref. for sensitivity to reduced cleaning effort	C20/25	0	s/ml	max	5	-		o	o	o
Basic tension tests with unconfined test setup											
A5-RC	Edge distance to prevent splitting under load	C20/25	0	s/ml	min	4	1,00		-	-	x
Resistance to shear load											
V2-RC	Resistance to pry-out failure	C20/25	0	s/ml	min	5	-		-	-	x
Resistance to pull-out failure											
B1-RC	Minimum edge distance and spacing	C20/25	0	s/ml	min	5	-		-	-	x
B6-RC	Robustness in dry concrete	C20/25	0	s/ml	max	5	see Table 2.4 EAD 330499-01-0601		x	x	x
B7-RC	Robustness in water saturated concrete	C20/25	0	s/ml	max	5			x	x	x
B10-RC	Increased crack width	C20/25	0,5	s/ml	7d ¹⁾	5	0,80		x	x	x
B12-RC	Repeated loads	C20/25	0	m	7d ¹⁾	5	1,00		-	-	-
B13-RC	Crack cycling under load	C20/25	0,1 - 0,3	all	7d ¹⁾	5	0,90		x	x	x
Batch of recycled aggregates											
		C20/25	0	m	7d ¹⁾	5			x	x	x

*x: Versuchsserien erforderlich

**x: Versuchsserien nicht erforderlich

o: Versuchsserien optional

¹⁾ gilt für Injektionsankersysteme. Für Patronensysteme soll die zur Größe angegebene Verankerungstiefe gewählt werden.

²⁾ optional möglich, wenn neuer Betonerrhöhungsfaktor bestimmt werden soll. Mögliche Druckfestigkeitsklasse in Anlehnung an DAStb-Richtlinie: C30/37

Für mechanische Befestigungen in gerissenem Beton gilt ebenfalls, dass die Versuchsserien F11-RC, F12-RC und V2-RC lediglich für die Betonklasse BK-S durchgeführt werden müssen. Zudem können die Versuchsserien N1, N2 und N3 auch entfallen und die innerhalb des Zulassungsverfahrens ermittelten Widerstände übernommen werden.

Die Versuchsserien F1 konnten innerhalb des Forschungsvorhabens keine eindeutigen Ergebnisse liefern. Für gerissenen Beton wird empfohlen, Auszugversuche in Versuchskörpern der Druckfestigkeitsklasse C20/25 durchzuführen. Dabei ist darauf zu achten, dass ein Bohrer mit einem Schneidendurchmesser $d_{cut,max}$ zu verwenden ist. Wie in Versuchsserie F1 wird nach [29] in F2 Versuchen verlangt, den Einfluss einer großen Rissbreite zu untersuchen. Allerdings sind die Versuche in Beton der Druckfestigkeitsklasse C50/60 durchzuführen und die Bohrlöcher sind mit einem Bohrer mit dem Schneidendurchmesser $d_{cut,min}$ herzustellen. Recyclingbeton ist bisher in Deutschland lediglich bis zu der Druckfestigkeitsklasse C30/37 zulässig. Da innerhalb des

Zulassungsverfahren in Normalbeton Untersuchungen in F2 Versuchen erfolgen müssen, sind diese in Recyclingbeton nicht erneut durchzuführen. Zudem wird in Recyclingbeton mit höherer Festigkeit keine größere Abminderung in F2 Versuchen erwartet als in F2 Versuchen in Normalbeton.

Risswechselfersuche F3 sind oft maßgebend bei der Ermittlung des Widerstands gegen Herausziehen. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde festgestellt, dass die Funktion der Dübel mit der in den Versuchen angesetzten Dauerlasten auch in Recyclingbeton gegeben ist.

Um Gleichwertigkeit für Zugzonendübel nachzuweisen werden zu den F1-RC Versuchen zusätzlich für alle Betonklassen Risswechselfersuche F3-RC für alle Größen mit den entsprechenden Verankerungstiefen und F6-RC Versuche mit der Betonschraube empfohlen. Innerhalb der EGF wird aktuell diskutiert, dass für alle mechanischen Befestigungssysteme in F3 Versuchen die Erstellung des Bohrlochs mit einem Bohrer mit einem Eckmaß $d_{cut,m}$ durchgeführt wird. Es sollte zukünftig darauf geachtet werden, inwiefern dieser Vorschlag umgesetzt wurde.

Lastwechselfersuche F4 können für Zugzonendübel entfallen. Für die erneute Durchführung von F5 Versuchen wird kein Erfordernis gesehen im Hinblick auf die Zulassung in Recyclingbeton, sofern der Einfluss in Normalbeton innerhalb des Zulassungsverfahrens überprüft wurde.

In F7 und F8 Versuchen wird untersucht, ob Stahlversagen beim Installieren von Betonschrauben auftritt. In Recyclingbeton wird kein größerer Einfluss erwartet als in Normalbeton. Sofern die Versuche in Normalbeton innerhalb des Zulassungsverfahrens durchgeführt wurden, sind sie in Recyclingbeton nicht zu wiederholen.

In den Versuchsserien F9 wird die Montagesicherheit eines Systems überprüft. Die Versuche sind in Recyclingbeton nicht erneut durchzuführen. Der Montagebeiwert γ_{inst} kann aus den Versuchsergebnissen aus dem Zulassungsverfahren übernommen werden.

Der Einfluss aus bewehrungsnahe Befestigung für Betonschrauben und Hinterschnittankern kann aus den Versuchen F10 innerhalb des Zulassungsverfahrens entnommen werden und muss nicht neu in Recyclingbeton ermittelt werden.

Die Versuche V1 und V3 zur Ermittlung des charakteristischen Widerstands gegen Stahlversagen unter Querbelastung müssen für Recyclingbeton nicht erneut geprüft werden. Es können die Werte aus dem Zulassungsverfahren angesetzt werden.

Auch für Zugzonendübel wird vorgeschlagen, die Normierung der Versuchsergebnisse über die Exponenten aus dem Zulassungsverfahren durchzuführen. Es soll allerdings keine Erhöhung der Lasten für höhere Druckfestigkeitsklassen möglich sein ohne die Durchführung der optionalen basic tension tests A1-RC bis A4-RC. Über die genannten Versuchsserien kann der Betonerhöhungsfaktor ψ_c ermittelt werden. Die Versuchsserien A1-RC bis A4-RC werden ebenfalls vorgeschlagen für den Fall, dass wie oben genannt die Gleichwertigkeit nicht nachgewiesen werden kann.

Wie bereits in Kapitel 9.2.1 für Verbundankersysteme vorgeschlagen, wird auch für alle Varianten des Versuchsprogramms für mechanische Befestigungssysteme empfohlen, einen möglichen Einfluss aus der Herkunft der rezyklierten Gesteinskörnungen zu überprüfen. Es soll in Prüfkörpern mit rezyklierten Gesteinskörnungen von mindestens drei unterschiedlichen Herkünften eine Versuchsserie A1 mit einer mittleren Größe durchgeführt werden. Die Auswertung und Berücksichtigung der Versuchsergebnisse soll in Anlehnung an die Chargenreferenzversuche in [18] durchgeführt werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] CYLLOK, M. K.: *Zugbeanspruchte Übergreifungsstöße in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung*. München, Technische Universität München. Dissertation. 2006. URL <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss20060821-1406026341>
- [2] WIENS, U.: *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung: Übersicht zu Regelwerken in Deutschland*. In: *beton, Sonderheft zum DAfStb-Fachsymposium Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung* (2017), Nr. 9, S. 314–316
- [3] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E. V. - DAFSTB (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620: Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1*, 2010
- [4] DIN EN 1992-4:2019-04: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 4: Bemessung der Verankerungen von Befestigungen in Beton*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [5] DIN EN 206:2021-06: *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [6] E DIN 1045-2:2022-07: *Entwurf: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [7] DIN EN 1992-1-1:2011-01: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [8] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E. V. - DAFSTB (Hrsg.): *DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)*. Berlin. Beuth Verlag GmbH, 2013
- [9] DIN EN 12620:2008-07: *Gesteinskörnungen für Beton*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [10] DIN 4226-101:2017-08: *Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [11] BREIT, W. ; SCHEIDT, J.: *Status Quo beim Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen in der Betonherstellung: Eigenschaften, Stand der Normung und Möglichkeiten zum Einsatz*. In: *beton* (2018), 1+2, S. 14–19
- [12] DIN 4226-100:2002-02: *Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [13] GRÜBL, P. ; WEIGLER, H. ; KARL, S.: *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Aufl. Berlin. Ernst, 2001 (Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau)
- [14] ZILCH, K. ; ZEHETMAIER, G.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau: Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [15] SILVA, R. V. ; BRITO, J. de ; DHIR, R. K.: *Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production*. In: *Construction and Building Materials* 65 (2014), S. 201–217

- [16] SILVA, R. V. ; BRITO, J. de ; DHIR, R. K.: *The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review*. In: *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19 (2015), Nr. 7, S. 825–849
- [17] DIN EN 13791/A20:2022-04: *Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken und in Bauwerksteilen - Änderung A20*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [18] EOTA - EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL ASSESSMENT: *Bonded Fasteners for use in Concrete*. Brüssel, 2018 (European Assessment Document EAD 330499-01-0601)
- [19] DIN EN 12390-2:2019-10: *Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [20] DIN EN 12390-3:2019-10: *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [21] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (FIB): *Model Code for Concrete Structures 2010*. 1. Aufl. s.l. Ernst Sohn, 2013
- [22] DIN EN 12390-5:2019-10: *Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [23] DIN EN 12390-6:2010-09: *Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [24] HEILMANN, H. G.: *Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons*. In: *beton* (1969), S. 68–70
- [25] WEBER, M.: *Zur Ermittlung mechanischer Kennwerte von Bestandsbetonen*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern. Dissertation. 2019
- [26] MALÁRICS, V.: *Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Massivbau und Baustofftechnologie. 2010
- [27] ELIGEHAUSEN, R. ; MALLÉE, R. ; SILVA, J. F.: *Anchorage in Concrete Construction*. 1. Aufl. s.l. Ernst Sohn, 2006
- [28] KRÄNKEL, T. S.: *Ein rheologischer Modellansatz zur Prognose des Langzeittragverhaltens von Verbunddübeln*. München, Technische Universität München, Fakultät für Bau Geo Umwelt. Dissertation. 2017
- [29] EOTA - EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL ASSESSMENT: *Mechanical Fasteners for use in Concrete*. Brüssel, 2019 (European Assessment Document EAD 330232-01-0601)
- [30] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON E. V. - DAFSTB (Hrsg.): *Erläuterungen zu DIN EN 1992-4: Heft 615: Bemessung der Verankerung von Befestigungen in Beton*. Berlin. Beuth Verlag GmbH, 2019
- [31] COOK, R. ; BISHOP, M. C. ; HAGEDOORN, H. L. ; SIKES, D. ; RICHARDSON, D. ; ADAMS, T. L. ; ZEE, C.: *Adhesive-Bonded Anchors: Bond properties and effects of in-service and installation conditions. final projekt report: Structural and Material Research Report No. 94-2A*. 1994
- [32] MÉSZÁROS, J.: *Tragverhalten von Einzelverbunddübeln unter zentrischer Kurzzeitbelastung*. Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Dissertation. 2002

- [33] APPL, J.-J. ; ELIGEHAUSEN, R.: *Gruppenbefestigungen mit Verbunddübeln: Bemessungskonzept*. Bericht des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, Nr. 0,/10-2/48, nicht veröffentlicht. 2003
- [34] APPL, J.-J.: *Tragverhalten von Verbunddübeln unter Zugbelastung*. Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Dissertation. 2009
- [35] COOK, R. ; KUNZ, J. ; FUCHS, W. ; KONZ, R.: Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete, Vol. 95, Nr. 1, 1996. In: *ACI Structural Journal*, S. 9–26
- [36] LEHR, B.: *Tragverhalten von Verbunddübeln unter zentraler Belastung im ungerissenen Beton - Gruppenbefestigungen und Befestigungen am Bauteilrand*. Universität Stuttgart. Dissertation. 2003
- [37] COOK, R. A. ; DOUGLAS, E. P. ; DAVIS, T. M.: *Adhesive Anchors in Concrete Under Sustained Loading Conditions*. Washington, D.C. Transportation Research Board, 2009
- [38] ÇOLAK, A.: *Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels*. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 21 (2001), Nr. 6, S. 487–493
- [39] ÇOLAK, A.: *Estimation of ultimate tension load of methylmethacrylate bonded steel rods into concrete*. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 27 (2007), Nr. 8, S. 653–660
- [40] SPIETH, H.: *Tragverhalten und Bemessung von eingemörtelten Bewehrungsstäben*. Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Dissertation. 2002
- [41] UNTERWEGER, R. ; BERGMEISTER, K.: *Experimentelle und numerische Untersuchungen von Injektionsankern - Bohrverfahren, Haftspannungen, Materialmodell*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 94 (1999), Nr. 12, S. 524–536
- [42] UNTERWEGER, R. ; BERGMEISTER, K.: *Erster Zwischenbericht Forschungsprojekt Injektionsanker: (unveröffentlicht)*. 1998
- [43] KUNZ, J. ; COOK, R. A. ; FUCHS, W. ; SPIETH, H.: *Tragverhalten und Bemessung von chemischen Befestigungen (Fortsetzung aus Heft 1/1998 und Schluß)*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 93 (1998), Nr. 2, S. 44–49
- [44] DIN EN 1990:2021-10: *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [45] HORDIJK, D. A. ; VAN DER PLUIJM, R.: Behaviour of fasteners in concrete with coarse recycled concrete and masonry aggregates. In: RILEM Publications SARL (Hrsg.): *International Symposium on Connections between Steel and Concrete*. Cachan, France : RILEM Publications, 2001 (RILEM proceedings PRO, 21), S. 805–814
- [46] DIN EN 1097-6:2013-09: *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme*. Beuth Verlag GmbH. Berlin
- [47] EOTA - EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL ASSESSMENT: *Details of tests for post-installed fasteners in concrete: TR 048*. Brüssel, 2016

-
- [48] WEBER, J. W.: *Empirische Formeln zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung und der Entwicklung des E-Moduls von Beton*. In: *Betonwerk und Fertigteil-Technik* (1979), Nr. 12, S. 753–756
- [49] TEST REPORT: *Verbundankersystem A: nicht veröffentlicht*
- [50] EVALUATION REPORT: *Verbundankersystem B: nicht veröffentlicht*
- [51] TEST REPORT: *Verbundankersystem B: nicht veröffentlicht*
- [52] ICC EVALUATION SERVICE: *AC308 Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete Elements*. 2019
- [53] EVALUATION REPORT: *Verbundankersystem D: nicht veröffentlicht*
- [54] TEST REPORT: *Bolzenanker F: nicht veröffentlicht*
- [55] TEST REPORT: *Betonschraube H: nicht veröffentlicht*
- [56] EVALUATION REPORT: *Verbundankersystem A: nicht veröffentlicht*