

Ergebnisbericht Betonalter 10 Jahre – Projekt 201404

Festigkeitsentwicklung von Beton

*

Dr. Albin Kenel

August 2025

Impressum

Auftraggeber	cemsuisse Verband der Schweizerischen Cementindustrie Marktgasse 53 3011 Bern
Auftragnehmer	Dr. Albin Kenel, i-beratung GmbH Dorf 17 6162 Entlebuch Email: akenel@i-beratung.ch , Tel: +41 79 481 82 27
Verfasser	Dr. Albin Kenel
Fachausschuss	cemsuisse: Dr. H. Widmer (2014-2019), Dr. M. Tschan (2019-2024), Dr. M. Dahlkamp (seit 2024) Holcim (Schweiz) AG: K. Wassmann (seit 2014) Ciments Vigier SA: Dr. Ch. Malan (2014-2015), K. Strahm (2015-2019), C. Spirig (seit 2020) Jura Cement AG: Dr. C. Pilloud † (2014-2019), Dr. C. Di Bella (2020-2023), Emanuel Meyer (seit 2024)
Umfang	189 Seiten (inklusive Anhänge und Leerseiten)
Unterschrift	Entlebuch, 8. August 2025  Dr. Albin Kenel

Vorwort

Projekt

«Um die neuesten Erkenntnisse der Baustatik und der Festigkeitslehre, die sich beide auf den Ergebnissen der Materialprüfung aufbauen, auch für alle massiven Bauweisen nutzbringend verwerten zu können, müssen Bindemittel von hervorragenden technischen Eigenschaften zur Verfügung stehen, denn die bautechnischen Eigenschaften von Bauwerken massiver Bauweisen in Stein, in Beton und in Eisenbeton sind in hohem Masse von den Qualitäten des Bindemittels abhängig.» Mit diesem einleitenden Satz begann Roš den Diskussionsbericht im Mai 1925 zu den zukünftigen schweizerischen Normen für Bindemittel auf Grundlage von Untersuchungsergebnissen der E.M.P.A. in den Jahren 1922 bis 1924 [71].

Seit diesen Untersuchungen vor 100 Jahren hat sich die Betontechnologie (Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung) und dabei insbesondere die verwendeten Zemente stark verändert. Eine Überprüfung der zeitabhängigen Eigenschaften – insbesondere der Festigkeitseigenschaften auf Druck- und Zugbeanspruchung – unter Berücksichtigung der heute verwendeten Betonrezepturen waren angebracht.

Das Ziel des Projekts ist die Ermittlung von Daten für die Festigkeitsentwicklung (Druck- und Zugfestigkeit) und die Karbonatisierungstiefe für Betone mit unterschiedlichen Zementarten (bzw. Betonrezepturen) und Lagerungen (nass bzw. trocken) über einen Zeitraum von bis zu 10 Jahren. Die Druck- und Zugfestigkeit sowie die Karbonatisierungstiefe (Trockenlagerung) werden zu definierten Zeitpunkten d.h. im Betonalter von 2 Tagen, 7 Tagen, 28 Tagen, 56 Tagen, 91 Tagen, 182 Tagen, 1 Jahr, 2 Jahren, 5 Jahren und 10 Jahren an Würfeln (150 mm Kantenlänge) geprüft. Das soll die Anpassung der Fig. 1 der SIA 262:2013 [114] für Betone mit neuen Zementarten sowie die Verifizierung der Referenz CEM I ermöglichen.

Die Untersuchung beschränkt sich auf die Festigkeitsentwicklung von normal-festen Betonen gemäss SN EN 206 [117]. Hochfeste oder ultrahochfeste Betone gemäss Merkblatt 2052 [115] mit und ohne Fasern werden nicht untersucht. Der Einfluss der Umgebungstemperatur z.B. zur Bestimmung des Reifegrads (Grundlage für die Fig 1 in SIA 262, Bild 1.13 rechts) ist ebenfalls nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Der vorliegende Bericht stellt die Versuchsergebnisse einer Kampagne mit einer Beobachtungszeit von 10 Jahren dar. Ergänzend werden die Versuchsergebnisse interpretiert und mit einer daran validierten neuen Beziehung zur zeitlichen Entwicklung der Betondruckfestigkeit (und Betonzugfestigkeit) beschrieben.

Verdankung

Der Verfasser bedankt sich bei der cemsuisse für die Projektfinanzierung und im besonderen beim Fachausschuss für die Begleitung des Projekts und die konstruktiven Diskussionen an den Fachausschusssitzungen.

Weiter gilt ein Dank der TFB AG, welche unter der koordinierenden und umsichtigen Leitung von F. Deillon die über 900 Betonwürfel hergestellt und im jungen Betonalter geprüft hat.

Die OST – ehemals Hochschule Rapperswil HSR – hat die Langzeitlagerung und weiteren Prüfungen durchgeführt. Insbesondere bedankt sich der Verfasser bei M. Egli † für die Unterstützung bei der Konzeption der Versuchseinrichtungen und den Prüfungen in der ersten Projekthälfte. In der zweiten Projekthälfte hat M. Zemp gewissenhaft alle Messungen und Prüfungen durchgeführt; vielen Dank hierfür.

Für die fachlichen Diskussionen mit Dr. P. Lunk und im besonderen mit Dr. F. Hunkeler ist der Verfasser sehr dankbar. Daraus sind verschiedene Denkanstösse zur Interpretation der Versuchsergebnisse und zur Weiterentwicklung der Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Betondruckfestigkeit entstanden.

Entlebuch, 8. August 2025

Dr. Albin Kenel

Inhaltsverzeichnis

Impressum	iii
Vorwort	v
1 Einleitung	1
1.1 Historischer Rückblick	1
1.2 Verschiedene «Ansätze» zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung . . .	9
1.3 Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit	12
1.4 Normative Grundlagen	14
1.5 Projektziel	16
1.6 Abgrenzung	16
2 Betondruckfestigkeit	17
2.1 Experimentelle Ermittlung der Betondruckfestigkeit	17
2.2 Umrechnung der an Prüfkörpern ermittelten Festigkeitswerte	17
2.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehung gemäss der SIA 262:2013	18
2.4 Ringversuche in akkreditierten Schweizer Prüflabors	19
2.5 Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit	20
2.6 Exkurs zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls	22
3 Betonzugfestigkeit	25
3.1 Experimentelle Ermittlung der Betonzugfestigkeit	25
3.2 Fazit aus den verschiedenen Versuchsarten	36
3.3 Einfluss von Eigenspannungen auf die Betonzugfestigkeit	38
3.4 Zusammenhang von Druckfestigkeit und Zugfestigkeit	40
4 Prüfkörperherstellung, Lagerung und Prüfung	41
4.1 Herstellung der Prüfkörper	41
4.2 Lagerung der Prüfkörper	42
4.3 Ermittlung der Betondruckfestigkeit	44
4.4 Ermittlung der Betonzugfestigkeit	44
4.5 Ermittlung der Karbonatisierungstiefe	44
5 Datenaufbereitung	45
5.1 Druckfestigkeiten	45
5.2 Zugfestigkeit	47
5.3 Karbonatisierungstiefe	47
5.4 Dichte	48
5.5 Ermittlung der Konfidenzintervalle	49

6	Diskussion der Prüfergebnisse	51
6.1	Festigkeitskorrekturen TFB vs HSR	51
6.2	Festigkeitszunahmen über 10 Jahre	52
6.3	Zusammenhang von Druckfestigkeit und Zugfestigkeit	54
6.4	Vereinfachte Bestimmung der Double Punch Betonzugfestigkeit	57
6.5	Karbonatisierungstiefe	58
6.6	Dichte	61
7	r-Konzept	63
7.1	Einleitung	63
7.2	Festigkeitsentwicklung auf der Basis von s	63
7.3	Festigkeitsentwicklung auf der Basis von r	64
7.4	Fehlerfortpflanzung der Festigkeitsmessergebnisse	65
7.5	Grenzwerte für Festigkeiten und Streuungen	68
7.6	Kontrolle der Prognosefähigkeit an den untersuchten Betonsorten	68
7.7	Kontrolle der Prognosefähigkeit an «alten»Betonen	72
7.8	Überprüfung der Gleichung (1) in SIA 269/2	80
8	Zusammenfassung und Empfehlungen	81
8.1	Zusammenfassung	81
8.2	Folgerungen	83
8.3	Empfehlungen zur Erarbeitung der nationalen Elemente der 1992-1-1	87
	Bezeichnungen	89
	Literatur	93
	Publikationen	93
	Normen	98
	Dokumentationen	100
A	Anhang	101
A.1	Frischbetonkontrollen – Prüfberichte	101
A.2	Festigkeiten	108
A.3	Karbonatisierungstiefen	150
A.4	Bestimmung der Betonzugfestigkeit mittels Double Punch Versuch	160
A.5	Validation des r-Konzepts	162
A.6	Validation des r-Konzepts an «alten»Betonen	176

1 Einleitung

1.1 Historischer Rückblick

1.1.1 Untersuchungen in der Schweiz

Unter der Leitung von M. Roß hat die Empa – als Fortsetzung der Arbeiten und in der Tradition seines Vorgängers F. Schüle – von 1925 bis 1950 eine systematische Aufarbeitung des damaligen Standes des Wissens zum Baustoff Beton und der Betonbauweise getätigt und rege publiziert. Roß schreibt in seinem Diskussionsbericht aus dem Jahr 1925 [71]: «Die Zunahme an Festigkeit mit der Zeit, die Entfaltung der Erhärtung erfolgt bei den plastisch eingefüllten Mörtelkörpern infolge geringerer Körperdichte und besserer Möglichkeit des chemischen Erhärtungsprozesses rascher als bei den erdfeucht geramten Normenkörpern», siehe Bild 1.1.

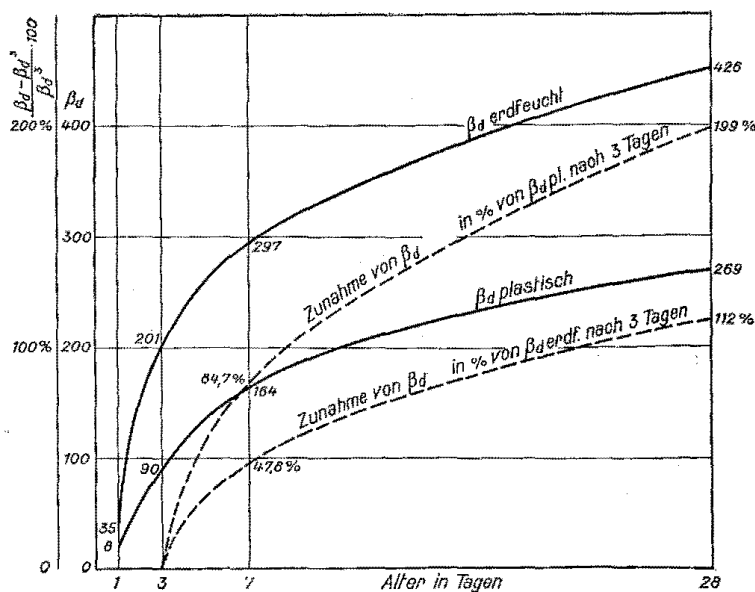


Bild 1.1: Würfeldruckfestigkeiten und relative Festigkeitszunahme des erdfeuchten und plastischen Normalmörtels, Bild aus [70].

Zur Überwachung und Qualitätskontrolle während dem Bau des Langwieser Viadukts (der heutigen RhB) auf der Strecke Chur-Arosa wurden Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 200 mm aus Betonchargen des Bogens, der Fahrbahnstützen und der Fahrbahnplatten hergestellt und vor Ort d.h. bewittert gelagert. In Bild 1.2 (a) ist die Brücke um 1914 und in Bild 1.2 (b) der zeitliche Verlauf der Betondruckfestigkeit dargestellt. Nach 11.5 Jahren Lagerung hat sich die Betondruckfestigkeit beinahe verdoppelt.

1 Einleitung

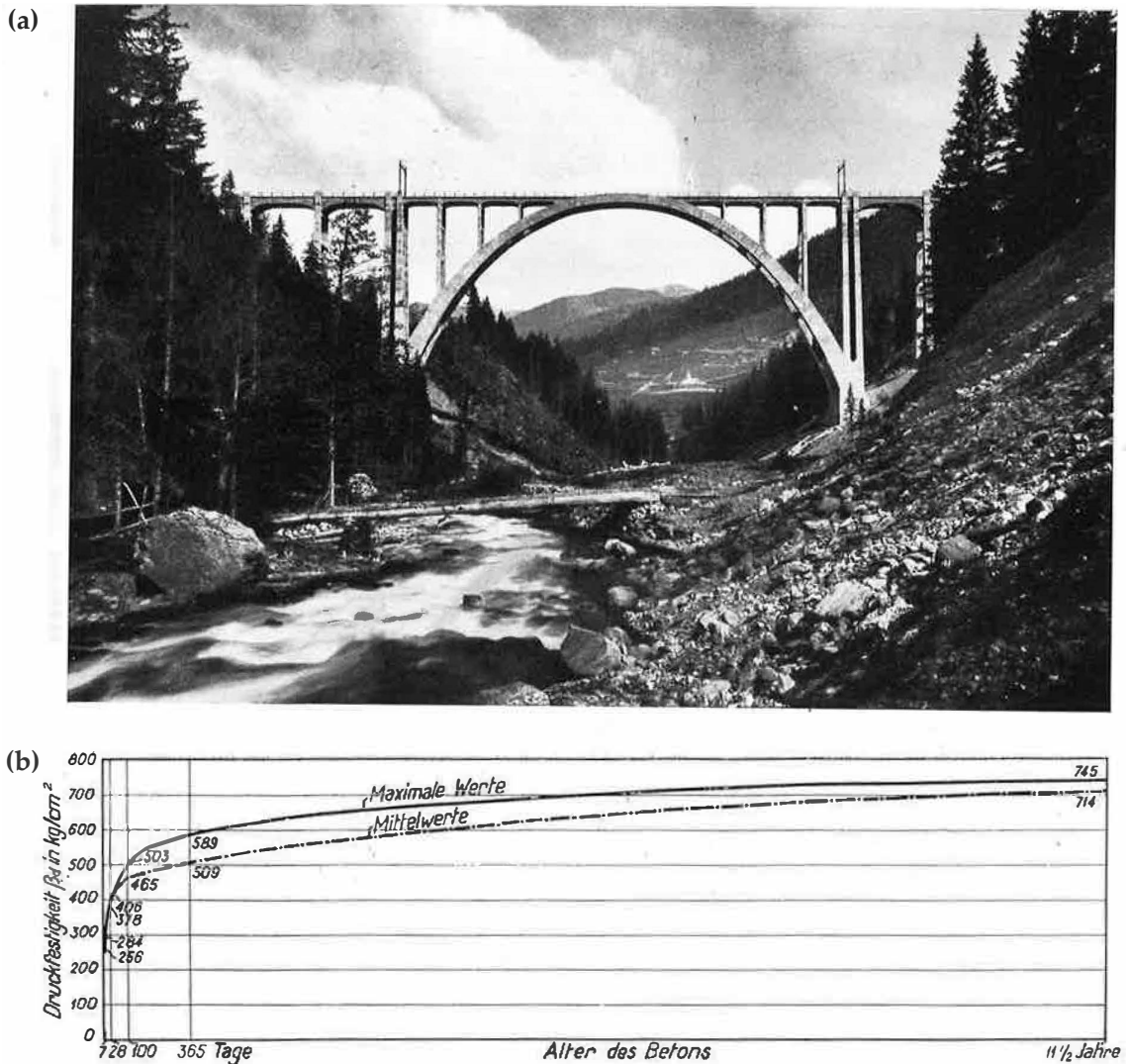


Bild 1.2: Überwachung des Langwieser Viadukts: (a) Brücke um 1914 und (b) Betondruckfestigkeiten; Bilder aus [71].

Bild 1.3 zeigt die Festigkeitsentwicklung von Normalmörtel und Beton über einen Zeitraum von 2 Jahren. Roš schreibt dazu in [70]: «Die Erhärtungskurve des Normal- und Baumörtels zeigt nur bei Wasserlagerung eine stetige Zunahme; bei Luft- bzw. kombinierter Lagerung (1 Tag feuchte Luft, 6 Tage unter Wasser und dann in feuchter Luft) stellt sich in der ersten Zeit von 3 bis 6 Monaten eine ausgesprochen stärkere Erhärtung ein als bei Wasserlagerung. Im späteren Alter nach Ablauf der 3-6 monatigen Erhärtungsfrist erfolgt dann aber eine mehr oder weniger ausgesprochene Abnahme der Druckfestigkeit, sodass die Festigkeitszahlen der Luftlagerung unter diejenigen der Wasserlagerung sinken», siehe Bild 1.3 (a). Weiter schreibt er: «Beim Beton zeigen die Erhärtungskurven einen ähnlichen Verlauf. Die Festigkeitszunahme im spätern Alter ist bei Luftlagerung gering und liegt weitaus unter der Festigkeitszunahme bei Wasserlagerung» siehe Bild 1.3 (b).

Zusammenfassend hält Roš fest: «Mit zunehmendem Alter streben sowohl Mörtel als Betonkörper, einerlei welcher Konsistenz, naturgemäss verschiedenen, aber weiterhin

weniger und langsamer zunehmenden Festigkeitswerten zu. Eine ursprüngliche Einbusse an Festigkeit infolge geringerer Kraftentfaltung des Zementes (Güte der Zementmarke), kleinerer Zementmenge (Dosierung) und höheren Wasserzusatzes (Konsistenz) wird im späteren Alter nur sehr selten, in der Regel nicht wieder eingeholt. Auch über diese Verhältnisse gibt die Formel von Feret [21] Aufschluss. Der K -Wert nimmt entsprechend dem Zuwachs der Würfeldruckfestigkeit mit dem Alter zu.»

Das Gesetz von Feret gibt, wie aus [70] hervorgeht, Aufschluss über den Einfluss

- der Qualität,
- der Menge des Zementes,
- der granulometrischen Beschaffenheit des Kies und Sandmaterials,
- der Menge des Anmachwassers,
- der Güte der Verarbeitung,
- der Lagerungsart,
- des Alters

auf die Druckfestigkeit von Mörtel- bzw. Betonkörpern.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die K -Werte für die gleiche Zementmarke, für eine bestimmte Altersklasse und bei gleicher Lagerungsart (berücksichtigt man die Auswirkung der mannigfaltigen Faktoren), innerhalb annehmbarer und praktisch genügend genauer Grenzen schwanken. Die Streuungen geben als Mittelwert $\pm 20\%$.

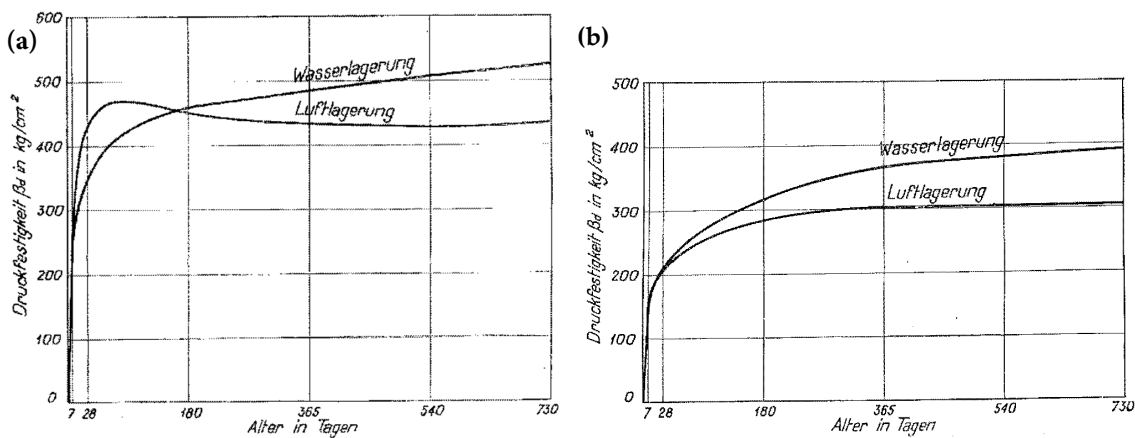


Bild 1.3: Würfeldruckfestigkeiten bei Wasser- und Luftlagerung (Mittelwerte von sieben Zementwerken): (a) erdfeuchter Normalmörtel und (b) Beton; Bilder aus [70].

In den 25 Jahren als Direktor der Empa hat Roš viele Eigenschaften und Merkmale von Beton untersucht. Der zusammenfassende Bericht [73] enthält folgende Untersuchungsergebnisse:

- Statische Festigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Verformung des auf Druck, Zug und Biegung beanspruchten, nicht bewehrten Betons und auf Druck beanspruchten bewehrten Betons,

1 Einleitung

- Schwinden und Kriechen des Betons,
- Festigkeits- und Verformungseigenschaften der normalen und der hochwertigen Bewehrungsstähle bei statischer und Ermüdungsbeanspruchung,
- Haftfestigkeit der Bewehrungsstähle im Beton,
- Festigkeit, Verformung und Rissbildung von auf statische Biegung und Biegeermüdung beanspruchten Eisenbetonbalken,
- Eisenbeton-Fachwerkträger,
- Knickstabilität des Eisenbetons,
- vorgespannter Beton,
- zulässige Spannungen – rechnerischer und wirklicher Sicherheitsgrad,
- Träger in Verbund-Bauweise.

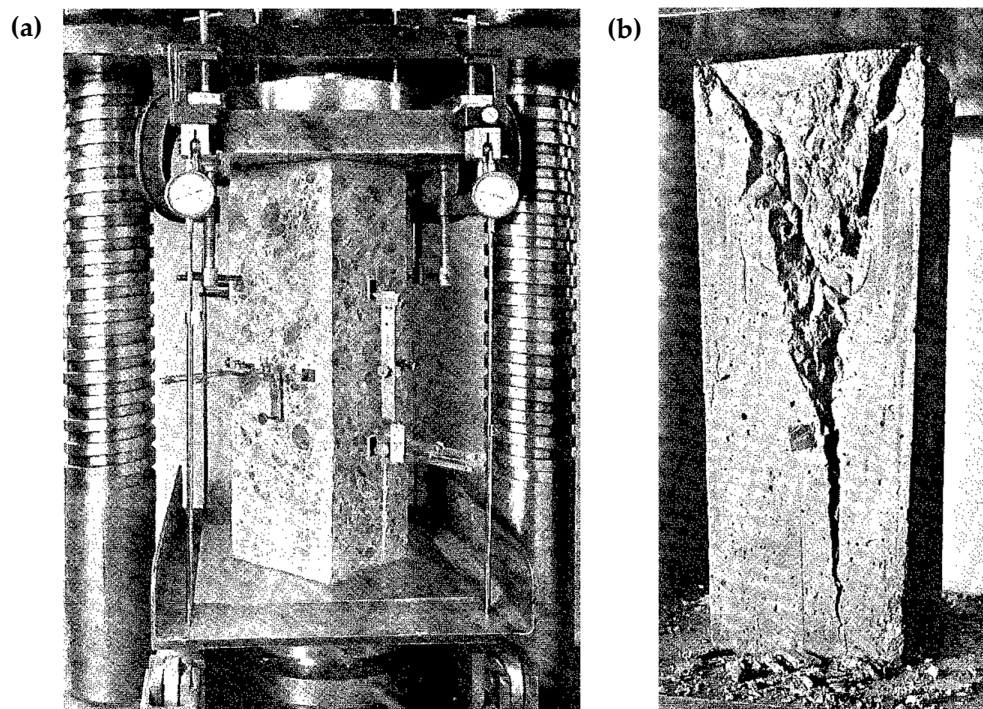


Bild 1.4: Elastizitätsmoduli und Prismendruckfestigkeiten: (a) Druckversuch mit Elastizitätsmessung und (b) Betonprisma nach einem Druckversuch; Bilder aus [73].

Stellvertretend für die Breite der Untersuchungen werden nachfolgend die Verformungseigenschaften von Beton dargestellt, siehe auch Bild 1.4. Aus den Elastizitätsmessungen wurde das Elastizitätsmodul E_c als Funktion der Prismendruckfestigkeit f_{cp} auch für Beanspruchungen innerhalb einer oberen Spannungsgrenze von $|\sigma| = 1/3 \cdot f_{cp}$ abgeleitet. Den Ableitungen lagen ~ 3000 Elastizitätsmessungen zugrunde: aus den Jahren 1906 bis 1909 ~ 600 und aus der Zeitspanne 1923 bis 1942 ~ 2400 Einzelversuche [73].

1.1 Historischer Rückblick

Die Hyperbelkurve der EMPA¹ der theoretischen Druck-Stauchungs-Diagramme für Beton und Mörtel lässt die Grösse oder Grössenordnung des Anteiles der elastischen und bleibenden Verformungen für beliebige σ -Grenzen ohne weiteres erkennen. Die Beziehung zwischen dem E_c -Modul und der Prismendruckfestigkeit f_{cp} lautet (angepasst auf die heute geltenden ISO Einheiten)

$$E_c = 60\,000 \text{ N/mm}^2 \frac{f_{cp}}{f_{cp} + 18 \text{ N/mm}^2} \quad f_{cp} \text{ in } [\text{N/mm}^2] \quad (1.1)$$

und zeigt als Mittelwert innerhalb $\pm 20\%$ liegende Streuungen.

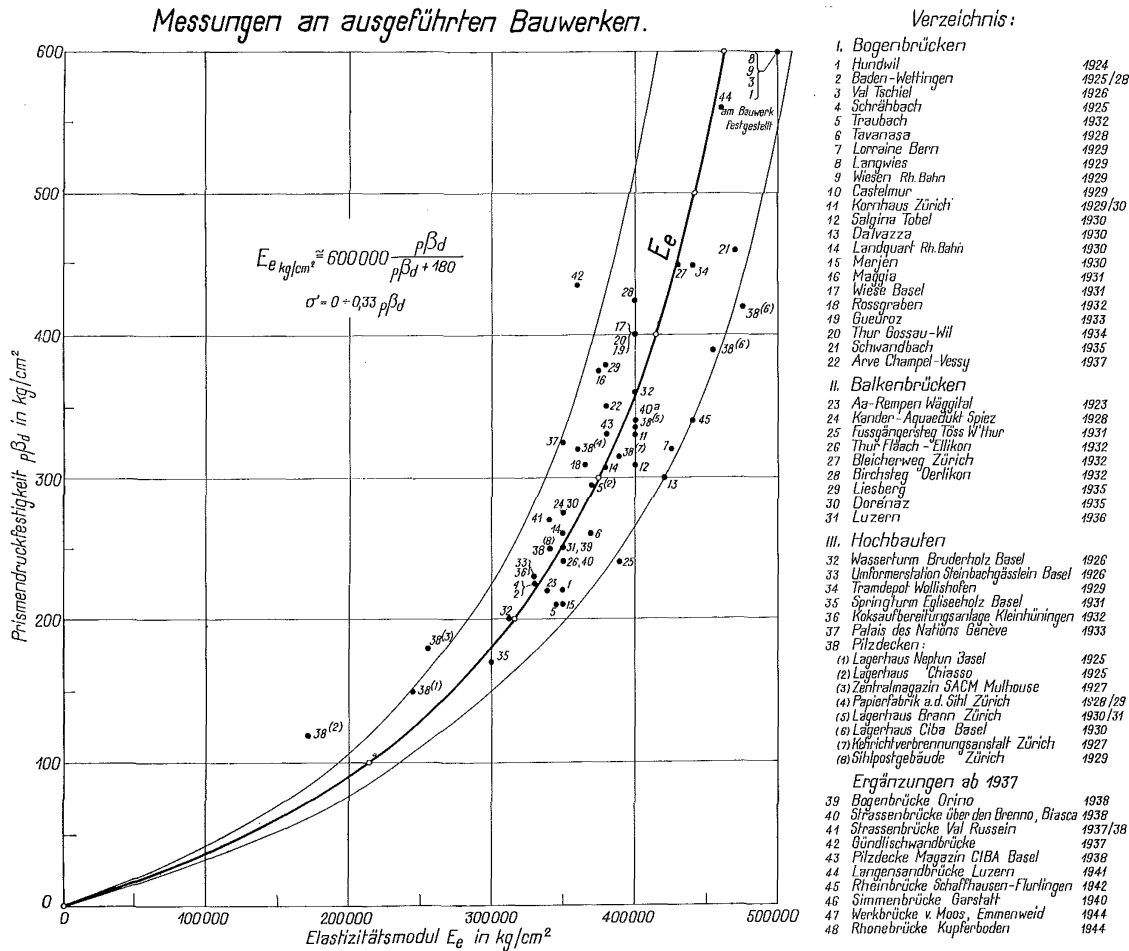


Bild 1.5: Elastizitätsmoduli und Prismendruckfestigkeiten – Messungen an ausgeführten Bauwerken, 1924 bis 1942; Bild aus [73].

¹Die Gleichung (1.1) hat eine ähnliche Form wie diejenige, welche aus der Gleichung (10) der Norm SIA 262:2013 [114] folgt, siehe Bild 2.6; allerdings liegen die rechnerischen Werte gemäss SIA 262 etwas tiefer. Einerseits werden unterschiedliche Faktoren und Festigkeiten berücksichtigt und andererseits sind die heutigen Prüfvorschriften nicht dieselben wie vor ca. 100 Jahren.

1 Einleitung

1.1.2 Untersuchungen in Nordamerika

Withey [93] berichtet 1961: «Im Jahre 1910 wurde an der Universität von Wisconsin ein Versuchsprogramm unternommen, um Angaben über die Auswirkungen des Alters und gewisser Trocknungsbedingungen auf die Druckfestigkeit des Betons zu erhalten. Probestücke dieser Untersuchungen waren aus 2 verschiedenen Mischungen hergestellt und unter Wasser der Witterung ausgesetzt und geschützt aufbewahrt. Versuche an 50 Jahre alten Probestücken wurden mit früheren Druckversuchsergebnissen verglichen. Es werden Vergrößerungen in der Druckfestigkeit nach 50 Jahren festgestellt.» Washa [88, 87] bestätigt die Erkenntnisse von Withey mehrheitlich.

Price [63] untersuchte 1951 verschiedene Einflussfaktoren (Zementtyp und -marke, Umgebungsfeuchte, Aushärtungstemperaturen und -beschleuniger) auf die Festigkeitsentwicklung. Primär die Frühfestigkeit seiner untersuchten Betone bzw. Zemente ist ausgeprägt unterschiedlich, siehe Bild 1.6.

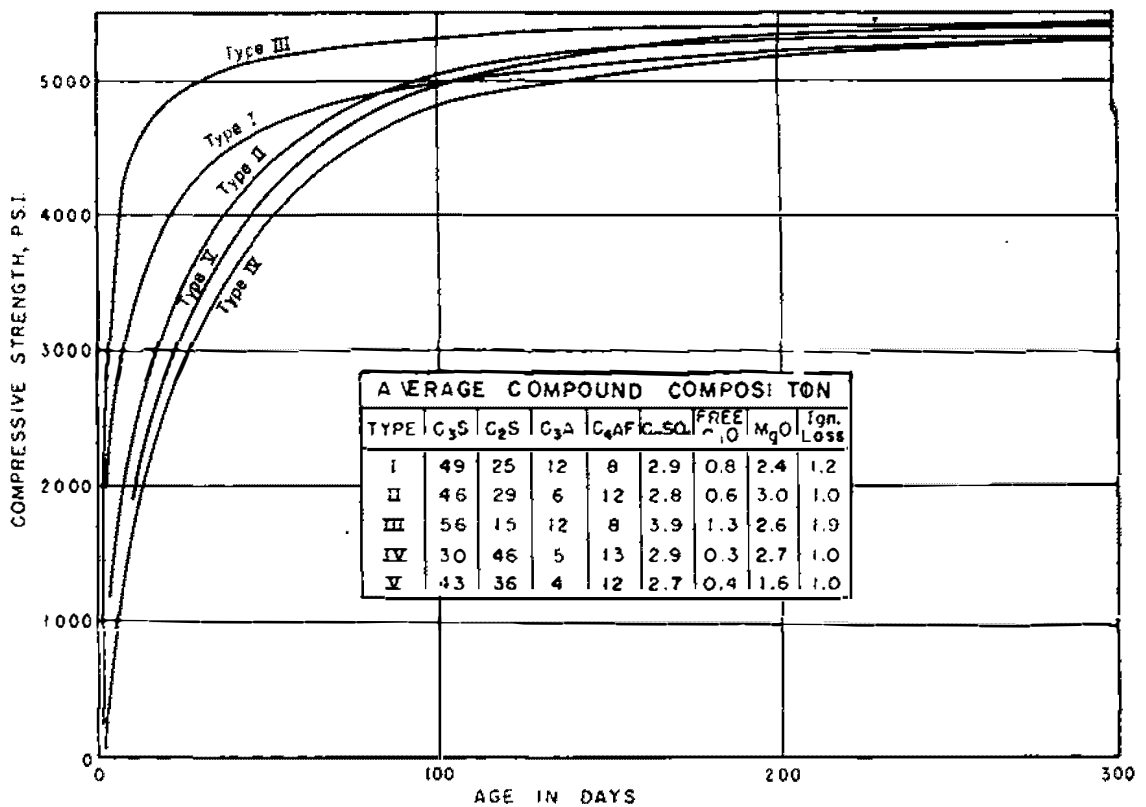


Bild 1.6: Einfluss der Zementsorte auf die Festigkeitsentwicklung, Bild aus [63]. 5000 psi \approx 34.5 N/mm².

Weiter stellte Price fest, dass bei trockener Lagerung sogar eine Festigkeitsabnahme mit dem Probenalter einhergehen kann, siehe Bild 1.7. Die Lagerungstemperatur hat gemäss Bild 1.8 speziell bei tiefen Temperaturen einen grossen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung.

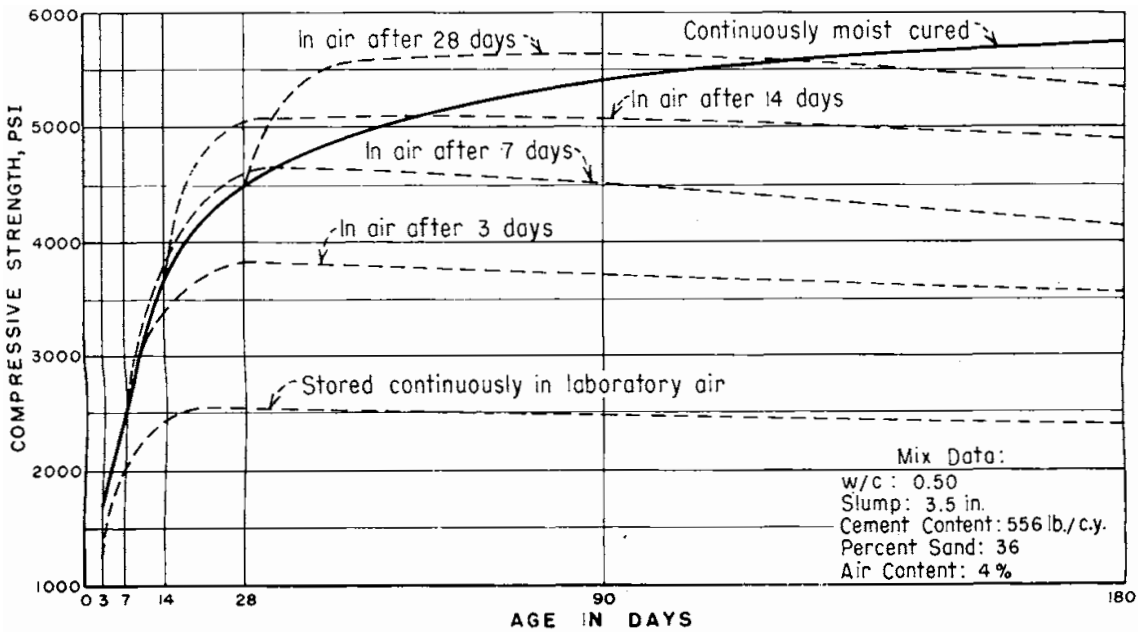


Bild 1.7: Einfluss der Nass- bzw. Trockenlagerung auf die Festigkeitsentwicklung, Bild aus [63].
5000 psi \approx 34.5 N/mm².

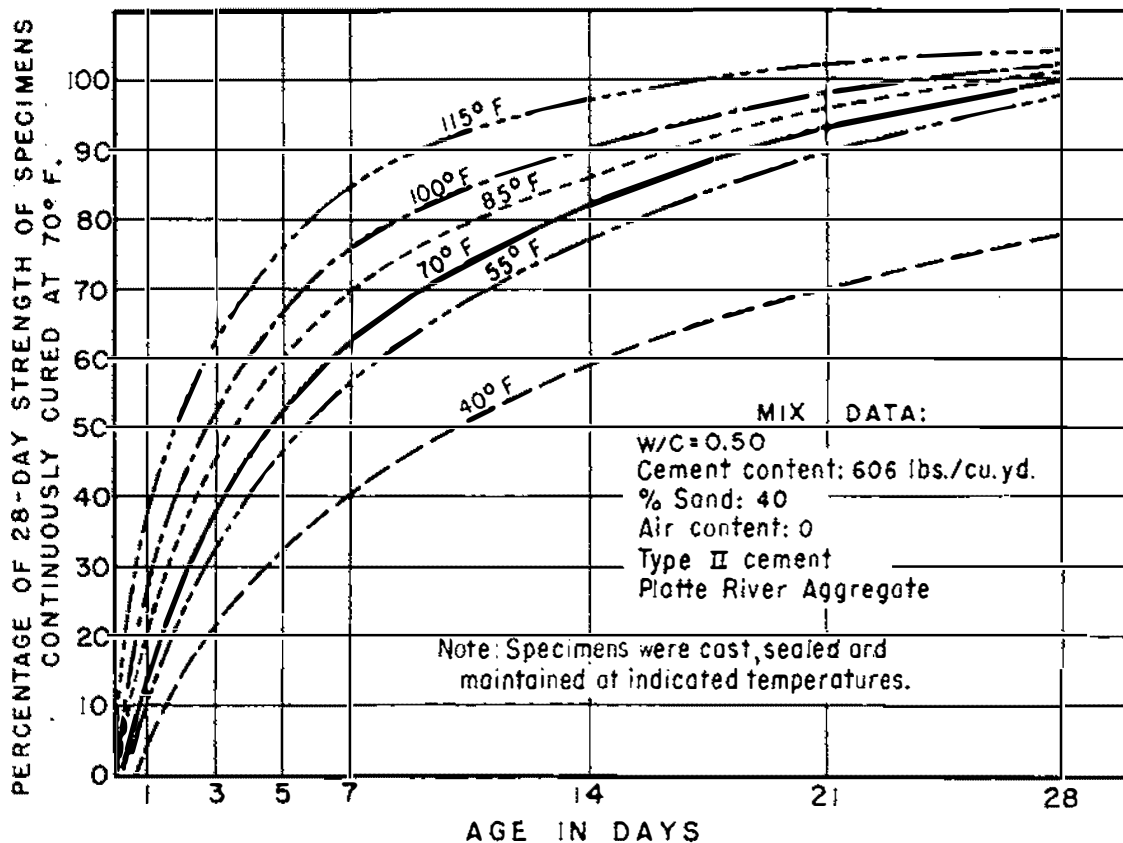


Bild 1.8: Einfluss der Lagerungstemperatur auf die Festigkeitsentwicklung, Bild aus [63].
40 F \approx 4.4°C, 70 F \approx 21°C, 115 F \approx 46°C.

1 Einleitung

1.1.3 Qualitätskontrolle der Betondruckfestigkeit

Im Jahr 1903 schlug v. Emperger rechteckige Eisenbetonbalken zur Güteprobe des Betons bei Biegung vor und wies darauf hin, dass für die zulässige Druckbeanspruchung des armierten Betons bei Biegung nicht die Würfelfestigkeit massgebend sein sollte, sondern die aus Biegebruchversuchen mit derselben Rechnungsmethode, die für die Querschnittsbemessung verwendet wird, abgeleitete Druckfestigkeit.

Vorschrift	Probekörper	Festigkeit in kg/qcm
Deutsche Bestimmung 1915	Würfel 20/20	Flüssiger Beton: 150 nach 28 Tagen, 180 nach 45 Tagen Säulenbeton: 180 nach 28 Tagen, 210 nach 45 Tagen
Vorläufige Leitsätze 1904	Würfel 30/30	180 bis 200 nach 28 Tagen
Vorschriften für die Württembergischen Staatseisenbahnen 1909	Würfel 30/30	180 bis 200 nach 28 Tagen
Österreichische Eisenbetonbestimmungen 1911	20/20	280 kg } Zement auf 130 } 350 » } 1 cbm 150 } nach 6 Wochen 470 » } Gemenge 170 }
Schweizerische Eisenbetonbestimmungen 1909	Würfel 16/16 Prismen 36/12/12	plastischer Beton: 150 } erdfeuchter » 200 } nach 28 Tagen
Französische Eisenbetonbestimmungen 1909		keine untere Grenze
Englische Eisenbetonbestimmungen	Würfel 10/10	170 nach 28 Tagen

Tabelle 1.1: Vorschriften einiger Länder zur festgesetzten Mindestfestigkeit von Beton, Tabelle aus [39].

Dieser Frage wurde verhältnismässig wenig Beachtung geschenkt, bis im Jahr 1907 die neuen preussischen Bestimmungen für Eisenbeton eine sechsfache Sicherheit für die Druckspannung des auf Biegung beanspruchten Betons vorschrieben. Es zeigte sich bald, dass dieser Nachweis mit Würfeln aus plastischem Beton, wie er bei den Eisenbetonbauten verwendet wurde, nur schwer zu führen war. Daher wurden von verschiedenen Seiten die Kontrollbalken als Güteprobe empfohlen, da hierbei eine grössere Betonfestigkeit nachgewiesen werden konnte.

Auf den Aufsatz von Prof. Foerster in [24] über die Frage: «Würfelprobe oder Kontrollbalken?» sind der Schriftleitung von *Armiertes Beton* eine Anzahl von Zuschriften zugegangen, welche diese in der darauf folgenden Nummer veröffentlichten [81]. Es finden sich zum

Teil sehr voneinander abweichende Meinungen unter diesen Äusserungen. Die Schriftleitung war der Ansicht, dass sich die letzte Entscheidung nur auf wissenschaftlichen Versuchen der Prüfungsanstalten, noch mehr aber auf den Erfahrungen der Praxis aufbauen würde.

Letztendlich hat sich der Würfeldruckversuch zur fortlaufenden Qualitätskontrolle wegen seiner Handlichkeit und Beschränkung der beeinflussenden Parameter durchgesetzt, siehe Tabelle 1.1.

1.2 Verschiedene «Ansätze» zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung

1.2.1 Einführung

Aus dem Bedürfnis einer im frühen Betonalter vorliegenden Aussage zur Festigkeit und Festigkeitsentwicklung von Beton sind schon Anfang des letzten Jahrhunderts verschiedene Verfahren zur (künstlichen) Beschleunigung des Erhärtungsprozesses entstanden, z.B. [5]. Im Zuge dieser Untersuchungen wurden zur Beschreibung der zeitabhängigen Festigkeitsentwicklung unterschiedliche Zeitfunktionen verwendet, welche eine Sättigungskurve mit einer oberen Schranke $f_{c,\infty}$ – die Betonfestigkeit bei $t \rightarrow \infty$ – erreichen. Eine weitere Anwendung der Festigkeitsverhältnisse von Beton unterschiedlichen Alters kommt in der Erforschung der Kriecheigenschaften von Beton zum Tragen. Neville [59] wertete verschiedene Kriech-Versuchsserien aus. Unter anderem verwendete und beschrieb er die Beziehung von Drögsler [20]

$$R = \frac{f_{cm}(t)}{f_{cm,90d}} \quad (1.2)$$

Mit der Festigkeits-Verhältniszahl R von Betondruck-Versuchsergebnissen zweier unterschiedlicher Betonalter t lässt sich die zukünftige Festigkeitsentwicklung abschätzen. Z.B. in [61] wurden die Festigkeitsverhältnisse im Betonalter 8 h mit 7 d und/oder 28 d, in [86] 1 d mit 28 d verglichen.

Nachfolgend werden ausgewählte «Ansätze» zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung dargestellt. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass die Parameter dieser Ansätze mit einfachen (grafischen) Methoden aus den Prüfwerten (Festigkeiten und Betonalter) bestimmt werden können. Durch geeignete Transformation der Prüfwerte kann eine Regressionsgerade in die transformierten Prüfwerte eingepasst und daraus die Parameter der Ansätze bestimmt werden.

1.2.2 Zeitfunktionen vom Typ $f(t)/(P+f(t))$

Durch Invertieren der (Sättigungs-) Funktion

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot \frac{t^\alpha}{P + t^\alpha} \quad (1.3)$$

1 Einleitung

mit einer Bezugsfestigkeit $f_{cm,28d}$ und der Halbwertszeit P lässt sich die zeitabhängige Druckfestigkeitsbeziehung gemäss Gleichung (1.3) in eine Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ überführen:

$$\underbrace{\frac{1}{f_{cm}(t)}}_y = \underbrace{\frac{P}{f_{cm,28d}}}_a \cdot \underbrace{\frac{1}{t^\alpha}}_x + \underbrace{\frac{1}{f_{cm,28d}}}_b \quad (1.4)$$

$$\text{Grenzbetrachtung für } t \rightarrow \infty \quad x = 0 \quad (1.5)$$

Durch Einpassen der best-passenden Gerade in die transformierten Werte (unter Annahme des Exponenten α) lassen sich die Geraden-Parameter a und b und daraus die Bezugsfestigkeit $f_{cm,28d}$ und die Halbwertszeit P bestimmen. Dabei wurden verschiedene Exponenten verwendet, wie beispielsweise (in chronologischer Reihenfolge):

- Feret [21]: $\alpha = 2/3$,
- Sadran [77]: $\alpha = 1.0$,
- Zhao [98]: $\alpha = 3/4$.

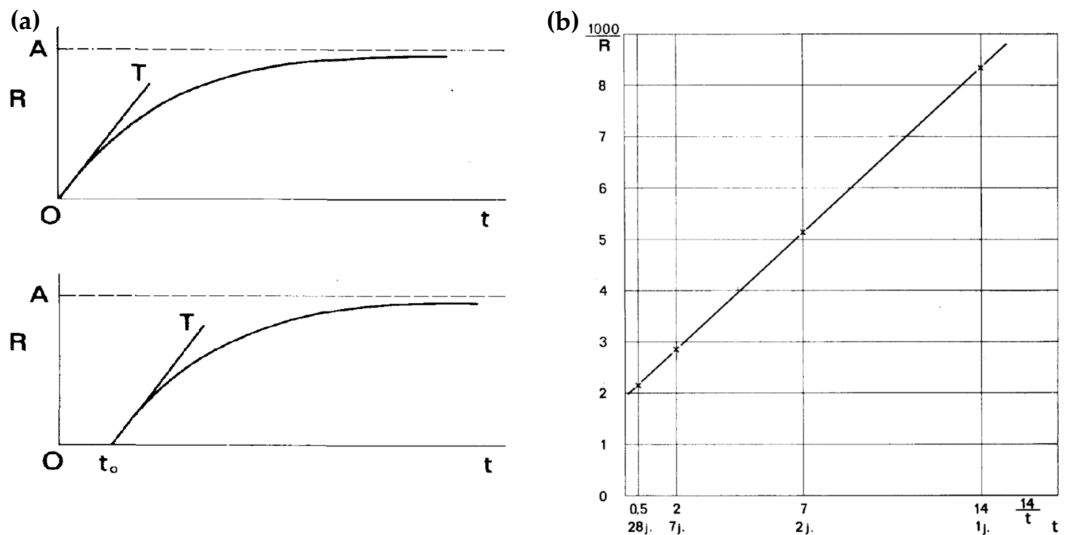


Bild 1.9: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit: (a) Ansatzfunktion (oben $t_0 = 0$, unten $t_0 \neq 0$), (b) transformierte Messwerte und Regressionsgerade; aus [77].

Sadran [77] verwendet eine zweiparametrische (A : Grenzwert, P : Halbwertszeit, Exponent $\alpha = 1.0$) Sättigungsfunktion zur Beschreibung der zeitlichen Festigkeitsentwicklung; bedarfsweise kann noch ein dritter Parameter (t_0) ergänzt werden, siehe Bild 1.9 (a) unten. Die Druckfestigkeit $R(t)$ wird beschrieben durch

$$R(t) = \frac{A \cdot P \cdot (t - t_0)}{A + P \cdot (t - t_0)} \quad \text{wobei} \quad R(t \rightarrow \infty) = A \quad (1.6)$$

1.2 Verschiedene «Ansätze» zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung

Durch Invertieren der Gleichung (1.6) lässt sich die zeitabhängige Druckfestigkeitsbeziehung in die Geradengleichung $y = b + a \cdot x$ überführen, siehe Bild 1.9 (b) bzw.

$$\underbrace{\frac{1}{R(t)}}_y = \underbrace{\frac{1}{A}}_b + \underbrace{\frac{1}{P}}_a \cdot \underbrace{\frac{1}{t-t_0}}_x \quad (1.7)$$

1.2.3 Zeitfunktionen vom Typ $\exp(s \cdot (B - t^\alpha))$

Durch Logarithmieren der (Sättigungs-) Funktion

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot e^{s \cdot (B - t^\alpha)} \quad (1.8)$$

mit einer Bezugsfestigkeit $f_{cm,28d}$ und einer Bezugszeit B lässt sich die zeitabhängige Druckfestigkeitsbeziehung gemäss Gleichung (1.8) in eine Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ überführen:

$$\underbrace{\ln(f_{cm}(t))}_y = \underbrace{s}_a \cdot \underbrace{(B - t^\alpha)}_x + \underbrace{\ln(f_{cm,28d})}_b \quad (1.9)$$

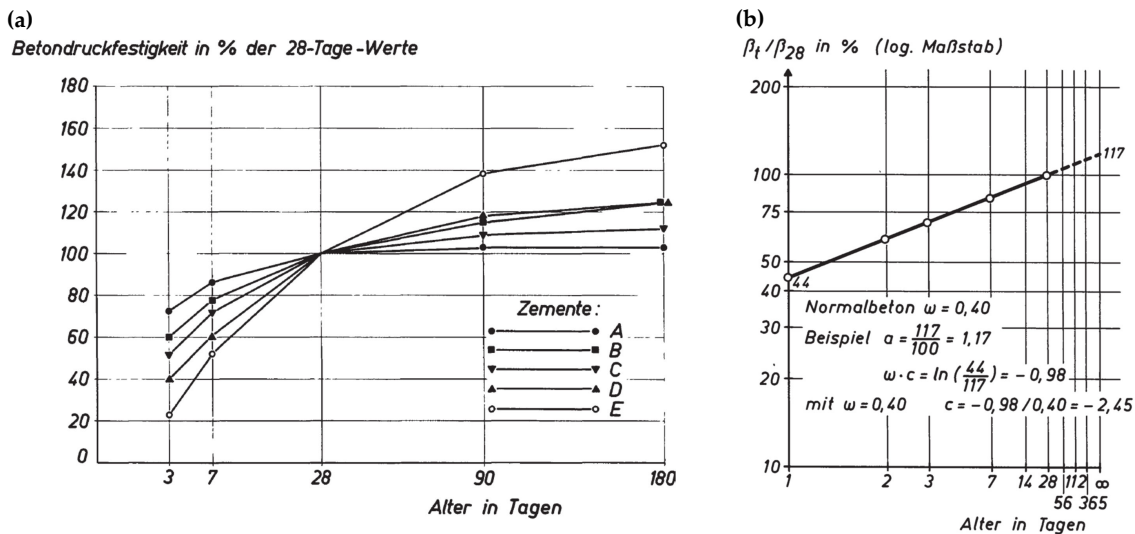


Bild 1.10: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit: (a) Betondruckfestigkeit in % der 28-Tage-Werte in Abhängigkeit vom Alter (gemittelt über Wasser-Zement-Werte von 0.45 bis 0.80), (b) transformierte Messwerte und Regressionsgerade; aus [91].

In Wesche [91] werden die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Festigkeitsentwicklung übersichtlich und zusammenfassend dargestellt. Zur Darstellung der Festigkeitsentwicklung verwendet Wesche die Beziehung aus [90] und stellt die Ergebnisse in einem \sqrt{t} -Gesetz dar. In [90] sind zudem zahlreiche Beziehungen zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung zusammengestellt. Zur Ermittlung der verwendeten Parameter verwendete er das Verhältnis $f_{cm,7d} / f_{cm,28d}$.

1 Einleitung

Wesche [91] verwendet eine zweiparametrische (a und ω) Sättigungsfunktion zur Beschreibung der zeitlichen Festigkeitsentwicklung auf der Basis von [90]. Die Druckfestigkeit $\beta_b(t)$ wird beschrieben durch

$$\beta_b(t) = \beta_{b,28} \cdot a^\omega \cdot e^{c \cdot \omega / t^d} \quad (1.10)$$

Der Parameter a ist demnach die bezogene Endfestigkeit und ω der Formfaktor der Zeitfunktion. Für die verschiedenen Zementfestigkeitsklassen sind die Parameter a und c als mittlere Werte, die sich bei der Auswertung zahlreicher Versuche ergeben haben, in [91] angegeben (der Parameter c ist negativ). Der Parameter d kann für Normalbeton und hochfesten Konstruktionsleichtbeton bei Würfeln von 200 mm Kantenlänge mit 0.55 eingesetzt werden.

Der Ansatz gemäss Gleichung (1.10) verwendet die Betondruckfestigkeit im Alter von 28 d sowie eine Zeitfunktion. Umgeformt kann die Gleichung (1.10) dargestellt werden zu

$$\beta_b(t) = \beta_{b,28} \cdot e^{\omega \cdot \left(\tilde{a} - \sqrt{\frac{t}{\tilde{a}}} \right)^{1.1}} \quad (1.11)$$

MC2010, Ziffer 5.1.9

In dieser Darstellung ist die Ähnlichkeit zur aktuell verwendeten Beziehung aus dem Model Code 2010 [102], d.h. Gleichung (1.18) der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit offensichtlich. Durch Logarithmieren der Gleichung (1.10) bzw. (1.11) lässt sich die zeitabhängige Druckfestigkeitsbeziehung in eine Geradengleichung überführen, siehe auch Abschnitt 5.1.1.

1.2.4 Zeitfunktionen vom Typ $r^{\frac{B-f(t)}{A}}$

Durch Logarithmieren der (Sättigungs-) Funktion

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot r^{(B-t^\alpha)/A} \quad (1.12)$$

mit einer Bezugsfestigkeit $f_{cm,28d}$ und einer Bezugszeit B lässt sich die zeitabhängige Druckfestigkeitsbeziehung gemäss Gleichung (1.12) in eine Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ überführen:

$$\underbrace{\ln(f_{cm}(t))}_y = \underbrace{\ln(r)/A}_a \cdot \underbrace{(B - t^\alpha)}_x + \underbrace{\ln(f_{cm,28d})}_b \quad (1.13)$$

1.3 Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit

Gonnermann und Shuman [28] haben in einer breit angelegten experimentellen Kampagne die gegenseitigen Abhängigkeiten von 560 Druckversuchen, 560 Biegezugversuchen («Modulus of Rupture») und 640 direkten Zugversuchen («Tensile Strength»; an Zylindern mit D/H mit 150 mm/450 mm) untersucht. Bild 1.11 (b) zeigt die direkte Betonzugfestigkeit in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit; die unterproportionale Beziehung ist gut sichtbar.

1.3 Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit

Heilmann [43] hat die Versuchsergebnisse von Gonnermann und Shuman [28] um weitere Daten erweitert. Zudem hat er eine analytische Beziehung zwischen (Würfel-) Druckfestigkeit (β_w) und Zugfestigkeit (β_Z für die zentrische Zugfestigkeit bzw. β_{ts} für die Spaltzugfestigkeit) formuliert und an den Versuchsergebnissen kalibriert

$$\beta_Z = c_Z \cdot \beta_w^{2/3} \quad (1.14)$$

Die direkten Zugfestigkeiten β_Z liegen im Mittel etwas tiefer als die mittleren Spaltzugfestigkeiten β_{ts}

$$\frac{\bar{c}_Z}{\bar{c}_{ts}} = \frac{0.52}{0.59} \approx 0.9 \quad (1.15)$$

Die von Heilmann berechneten 5%- bzw. 95%-Quantilen der direkten Zugfestigkeit betragen bezogen auf die Mittelwerte

$$\beta_{Z,0.05} = \frac{0.36}{0.52} \cdot \beta_{Zm} \approx 0.7 \cdot \beta_{Zm} \quad (1.16) \text{ entspricht SIA 262, Gleichung (7)}$$

$$\beta_{Z,0.95} = \frac{0.68}{0.52} \cdot \beta_{Zm} \approx 1.3 \cdot \beta_{Zm} \quad (1.17) \text{ entspricht SIA 262, Gleichung (8)}$$

Rüsch [75] hat die Versuchsdaten von Heilmann einer erneuten statistischen Überprüfung unterzogen und die Quantilwerte in Abhängigkeit der Betondruckklassen ermittelt, siehe auch [19]. Raphael [64] hat die Untersuchungen auf seismische Beanspruchungen erweitert. Weber und Thiele [89] haben die historischen Versuchsdaten statistisch aufgearbeitet und für die Überprüfung bestehender Bauten analysiert sowie die Abweichungen von Rechenwerten zu Versuchsergebnissen in Abhängigkeit des Baujahrs untersucht.

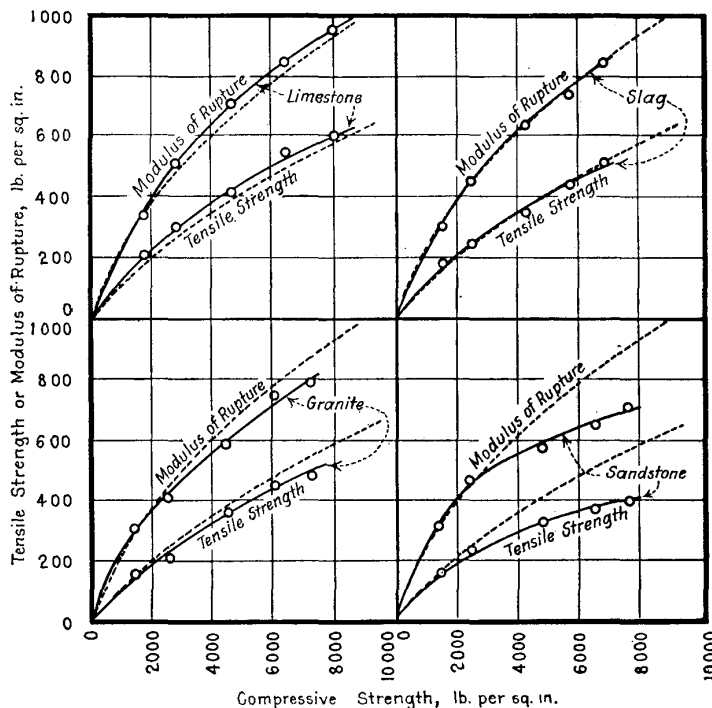


Bild 1.11: Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit; aus [28].

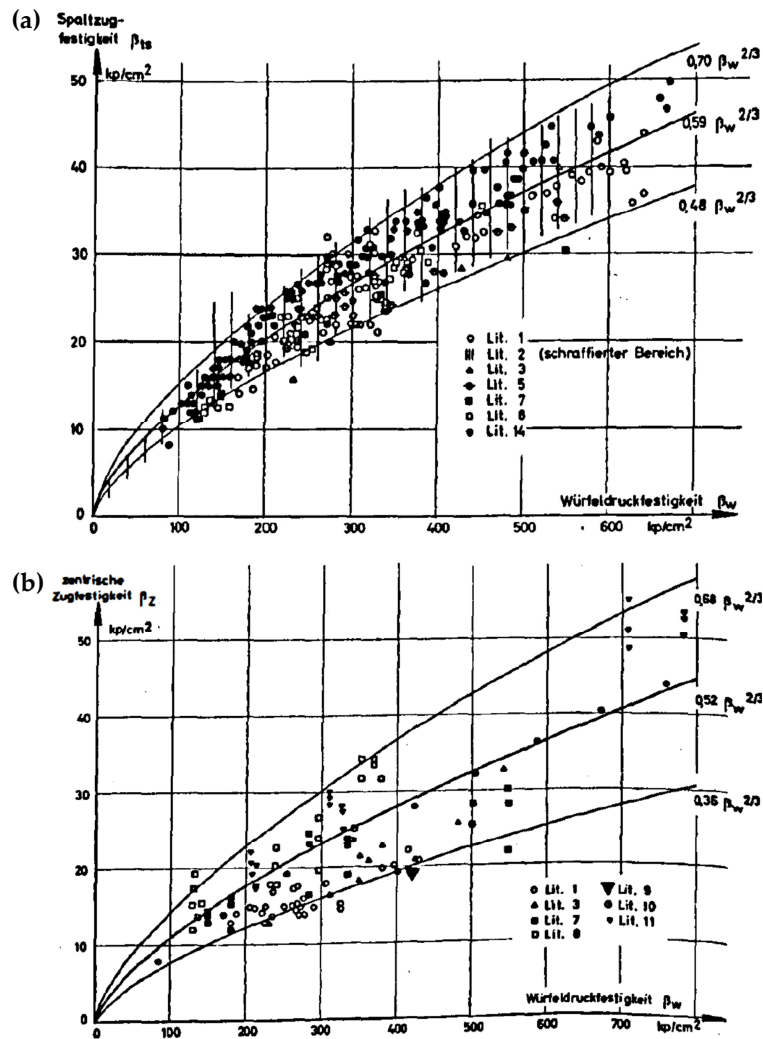


Bild 1.12: Verhältnis von Druck- und Zugfestigkeit; (a) Spaltzugfestigkeit und (b) direkte Zugfestigkeit; aus [43].

1.4 Normative Grundlagen

1.4.1 Betondruckfestigkeit

Die Angaben in der Norm SIA 262:2013 [114] basieren auf Betonen mit CEM I und auf teilweise sehr alten Versuchsergebnissen, siehe Abschnitte 1.1 und 1.2. Die Figur 1 der SIA 262 bzw. Bild 1.13 ist im Wesentlichen die grafische Darstellung des theoretischen Verlaufs der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit aus dem Model Code 2010 [102] :

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad t \text{ in [d]} \quad (1.18)$$

MC1990, Ziffer 2.1.6.1 Diese Beziehung wurde bereits im Model Code 1990 [101] verwendet und strebt einem Grenzwert zu:

$$\text{Grenzbetrachtung für } t \rightarrow \infty : \quad f_{cm,\infty} = f_{cm,28d} \cdot e^s \quad (1.19)$$

Der Faktor s wird auf Grund der Zementsorte festgelegt, siehe Tabelle 1.2:

f_{cm}	Zementsorte	s	Zement-Erhärtung
$\leq 60 \text{ N/mm}^2$	32.5 N	0.38	langsam
	32.5 R, 42.5 N	0.25	normal
	42.5 R, 52.5 N, 52.5 R	0.20	schnell
$> 60 \text{ N/mm}^2$	alle Sorten	0.20	–

MC2010, Tab. 5.1-9

Tabelle 1.2: s -Faktoren für verschiedene Zementsorten [102].

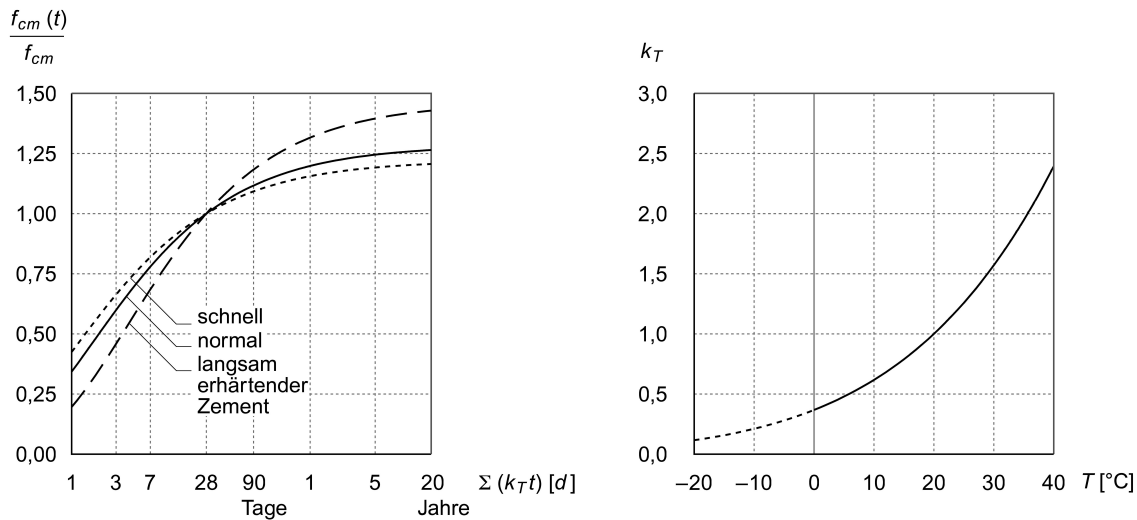


Bild 1.13: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit, Figur 1 aus [114].

Für Betone mit neuen Zementarten fehlen die entsprechenden Prüfergebnisse bzw. Literaturdaten.

1.4.2 Betonzugfestigkeit

Zur langfristigen Entwicklung der Zugfestigkeit ist die Datenlage noch prekärer. Die Zugfestigkeitsentwicklung geht direkt oder indirekt in die Bemessung von Stahlbetonbauteilen ein zur:

- Ermittlung des Mindest-Bewehrungsgehaltes zur Verhinderung von sprödem Versagen sowie zur Rissbreitenbegrenzung,
- Widerstandsermittlung von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung (Schub und Durchstanzen),
- Kontrolle der Querkzugkräfte im Bereich von Umlenkungen und Krümmungen der Bewehrung,
- Ermittlung der Mindestüberdeckung der Bewehrung.

1 Einleitung

Die Druckfestigkeitsentwicklung ist für die Beurteilung von Abplatzungen infolge Brandeinwirkung und der Tragsicherheit bestehender Stahlbetonbauten von Interesse. Zudem erlassen kantonale Ämter (z.B. Kt. Uri) Vorschriften zur Begrenzung der maximalen Betondruckfestigkeit.

EC 2, Ziffer 3.1.2

Die zeitabhängige Entwicklung der Zugfestigkeit unterliegt besonders stark der Nachbehandlung und den Trocknungsbedingungen sowie der Grösse der Bauteile. Wenn keine genaueren Werte vorliegen, darf gemäss dem Eurocode 2 [107] davon ausgegangen werden, dass die Zugfestigkeit $f_{ctm}(t)$ der folgenden Gleichung entspricht:

$$f_{ctm}(t) = f_{ctm,28d} \cdot e^{s \cdot \eta \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad t \text{ in [d]} \quad (1.20)$$
$$\eta = 1 \quad \text{für } t < 28 \text{ d}$$
$$\eta = 1 \quad \text{für } t \geq 28 \text{ d und «nasse» Umgebung}$$
$$\eta = \frac{2}{3} \quad \text{für } t \geq 28 \text{ d und «trockene» Umgebung}$$

1.5 Projektziel

Das Ziel des Projekts ist die Ermittlung von Daten für die Festigkeitsentwicklung (Druck- und Zugfestigkeit) und die Karbonatisierungstiefe für Betone mit unterschiedlichen Zementarten (bzw. Betonrezepturen) und Lagerungen (nass bzw. trocken) über einen Zeitraum von bis zu 10 Jahren. Die Druck- und Zugfestigkeit sowie die Karbonatisierungstiefe (Trockenlagerung) werden zu definierten Zeitpunkten d.h. im Betonalter von 2 Tagen, 7 Tagen, 28 Tagen, 56 Tagen, 91 Tagen, 182 Tagen, 1 Jahr, 2 Jahren, 5 Jahren und 10 Jahren an Würfeln (150 mm Kantenlänge) geprüft. Zylinder werden keine hergestellt und geprüft. Die Festigkeitswerte werden mit der Modellkurve zur Festigkeitsentwicklung z.B. des Model Code 2010 [102] verglichen. Das soll die Anpassung der Fig. 1 der SIA 262:2013 [114] für Betone mit neuen Zementarten sowie die Verifizierung der Referenz CEM I ermöglichen.

1.6 Abgrenzung

Die Untersuchung beschränkt sich auf die Festigkeitsentwicklung von normal-festen Betonen gemäss SN EN 206 [117]. Hochfeste oder ultrahochfeste Betone gemäss Merkblatt 2052 [115] mit und ohne Fasern werden nicht untersucht. Der Einfluss der Umgebungstemperatur z.B. zur Bestimmung des Reifegrads (Grundlage für die Fig 1 in SIA 262, Bild 1.13 rechts) ist ebenfalls nicht Gegenstand der Untersuchungen.

2 Betondruckfestigkeit

2.1 Experimentelle Ermittlung der Betondruckfestigkeit

Da Grösse und Gestalt der Probekörper die Festigkeit beeinflussen, sind sie in den Prüfnormen festgelegt wie z.B. in der SN EN 12390-1:2012 [113]. Das kleinste Mass des Probekörpers sollte mindestens das Vierfache des Grösstkorndurchmessers D_{\max} der verwendeten Zuschläge betragen.

Die Druckfestigkeit des Betons wird im allgemeinen an Würfeln mit 100, 150, 200 und in Ausnahmefällen auch 300 mm Kantenlänge oder an Kreiszylindern mit 150 mm Durchmesser ermittelt. Beim Zylinder soll die Höhe gleich dem doppelten Durchmesser sein. Würfel haben den Vorteil glatt geschalteter Druckflächen, da sie quer zur Einfüllrichtung beansprucht werden. Zylinder haben den Vorteil gleichmässiger Verformung über den Querschnitt, da sie in Einfüllrichtung beansprucht werden, jedoch den Nachteil, dass die obere Druckfläche als Einfüllfläche nicht glatt ist und nachbearbeitet (schleifen) werden muss. In Bild 2.1 sind die verschiedenen Probekörper-Formen dargestellt.

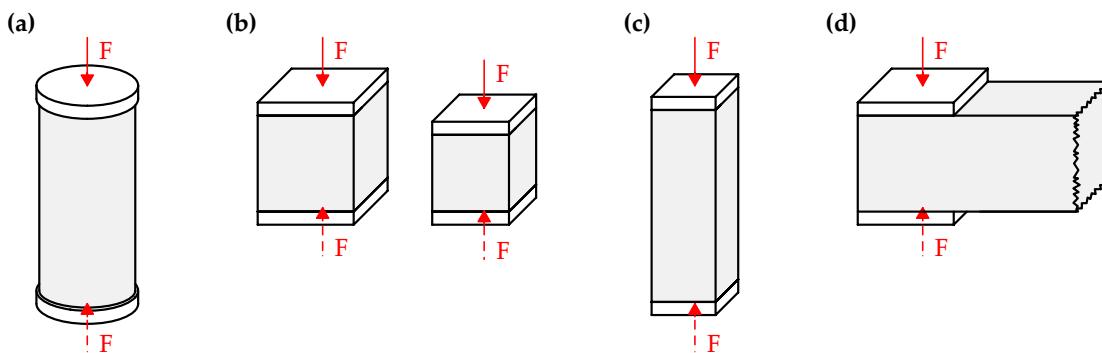


Bild 2.1: Unterschiedliche Probekörper-Formen zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit: (a) Zylinder, (b) Würfel, (c) Prismen und (d) an den Bruchstückenden nach Biegezugversuchen.

2.2 Umrechnung der an Probekörpern ermittelten Festigkeitswerte

Die an verschiedenen Probekörpern mit unterschiedlichen Grössen ermittelten Festigkeitswerte können in Anlehnung an [65] über die nachfolgenden Umrechnungsbeiwerte in Werte für die Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm} = f_{cm,150/300}$ (Zylinder mit den Abmessungen $\varnothing/h = 150 \text{ mm}/300 \text{ mm}$) umgerechnet werden.

2 Betondruckfestigkeit

2.2.1 Würfel als Prüfkörper

$$\begin{aligned} f_{cm} &= \frac{0.75}{0.95} \cdot f_{cwm,150} && \text{Würfel mit Kantenlänge } a = 150 \text{ mm} \\ &= \frac{0.75}{0.95} \cdot 1.05 \cdot f_{cwm,200} && \text{Würfel mit Kantenlänge } a = 200 \text{ mm} \\ &= \frac{0.75}{0.95} \cdot 0.90 \cdot f_{cwm,100} && \text{Würfel mit Kantenlänge } a = 100 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.1)$$

2.2.2 Zylinder als Prüfkörper

$$\begin{aligned} f_{cm} &= 1.05 \cdot f_{cm,100/300} && \varnothing/h = 100 \text{ mm}/300 \text{ mm} \\ &= \frac{1.00}{1.06} \cdot f_{cm,70/150} && \varnothing/h = 70 \text{ mm}/150 \text{ mm} \\ &= \frac{1.00}{0.95} \cdot f_{cm,120/360} && \varnothing/h = 120 \text{ mm}/360 \text{ mm} \\ &= \frac{0.92}{0.95} \cdot f_{cm,100/200} && \varnothing/h = 100 \text{ mm}/200 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.2.3 Prisma als Prüfkörper

$$f_{cm} = \frac{1.00}{0.95} \cdot f_{cp,100/100/500} \quad \text{Prisma mit Kantenlängen } a/a/h = 100/100/500 \text{ mm} \quad (2.3)$$

2.3 Spannungs-Dehnungs-Beziehung gemäss der SIA 262:2013

Für den aufsteigenden Ast des Spannungs-Dehnungs-Diagramms gilt die (1971 von Sargin [79] eingeführte) Beziehung¹

SIA 262, Gleichung (28)

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \frac{k_\sigma \cdot \zeta - \zeta^2}{1 + (k_\sigma - 2) \cdot \zeta} \quad \text{mit} \quad k_\sigma = \frac{E_{cd}}{400 \cdot f_{cd}} \quad \text{und} \quad \zeta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1d}} \quad (2.4)$$

Für den Fall $k_\sigma = 2$ vereinfacht sich die Gleichung (2.4) zur parabolischen Beziehung²

$$\sigma_c = f_{cd} \cdot (2 \cdot \zeta - \zeta^2) \quad (2.5)$$

¹Gemäss Tabelle 8 der SIA 262:2013 [114] beträgt $\varepsilon_{c1d} = 0.002$ für alle Druckfestigkeitsklassen. Demgegenüber beträgt der Wert gemäss Tabelle 3.1 des Eurocode 2 [107] $\varepsilon_{c1} = 0.0007 \cdot f_{cm}^{0.31} < 0.0028$.

²Bereits 1899 hat W. Ritter [68] eine Parabel zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung in der Biegedruckzone vorgeschlagen.

2.4 Ringversuche in akkreditierten Schweizer Prüflabors

2.4.1 Durchführung von Ringversuchen

In der Schweiz werden regelmässig Ringversuche nach ISO 5725-1 [104] zur Bestimmung der Würfeldruckfestigkeit nach SN EN 12390-3 [110] und der Dichte von Festbeton nach SN EN 12390-7 [111] durchgeführt. Dafür werden jeweils ca. 60 Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm nach SN EN 12390-2 [109] hergestellt und nach dem Zufallsprinzip auf die ca. 20 teilnehmenden akkreditierten Labore aufgeteilt.

Ausgewertet werden die Ringversuche nach ISO 5725-2 [105], wobei zur Ergebnisprüfung bezüglich Vereinbarkeit und Ausreisser Mandels k- und h-Statistik [56] mit Indikatoren auf dem 1 %- und 5 %-Signifikanzniveau angesetzt werden.

2.4.2 Ergebnisse von Ringversuchen

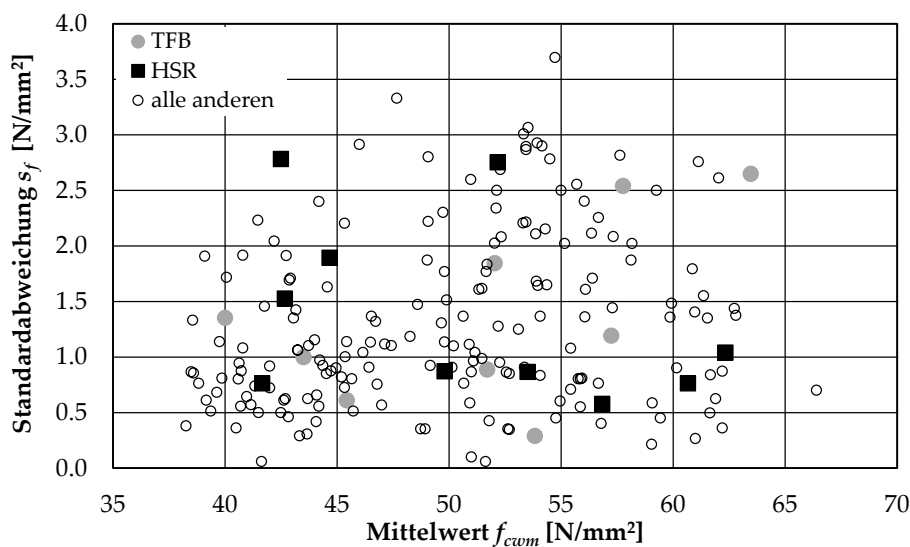


Bild 2.2: Zusammenstellung der Ringversuch-Würfeldruckfestigkeiten und Standardabweichungen [29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37].

Eine Analyse von 17 verschiedenen Ringversuchen zur Prüfung von Festbeton (Würfel-Druckfestigkeit) zeigt eine Vergleichbarkeitsgrösse $R = 3.8 \text{ N/mm}^2 \dots 12.0 \text{ N/mm}^2$ bzw. im Mittel $R = 6.7 \text{ N/mm}^2$ und eine Vergleichsstandardabweichung $s_R = 1.4 \text{ N/mm}^2 \dots 4.3 \text{ N/mm}^2$ bzw. im Mittel $s_R = 2.4 \text{ N/mm}^2$. Bild 2.2 zeigt die Standardabweichungen s_f der Ringversuche über die mittleren Würfeldruckfestigkeiten f_{cwm} aufgetragen.

Die Standardabweichungen aus jeweils 3 Würfel-Druckfestigkeiten betragen im Mittel 1.31 N/mm^2 (COV = 2.6 %) für alle untersuchten $3 \cdot 201$ Würfeldruckversuche.

Der Vergleich der referenzierten Ringversuche zwischen HSR (heute OST) und TFB zeigt, dass die Mittelwerte aus jeweils 3 Würfel-Druckfestigkeiten ein Verhältnis von 0.999 bei einer Spannweite von 0.96 bis 1.08 aufweisen, siehe Bild 2.3. Die Standardabweichungen

2 Betondruckfestigkeit

aus jeweils 3 Würfel-Druckfestigkeiten betragen an der TFB im Mittel 1.37 N/mm^2 bei einer Spannweite von 0.3 N/mm^2 bis 2.7 N/mm^2 ; an der HSR im Mittel 1.38 N/mm^2 bei einer Spannweite von 0.6 N/mm^2 bis 2.8 N/mm^2 . Im langjährigen Vergleich liegen die Prüfwerte (Mittelwerte und Standardabweichungen) sehr nahe beieinander.

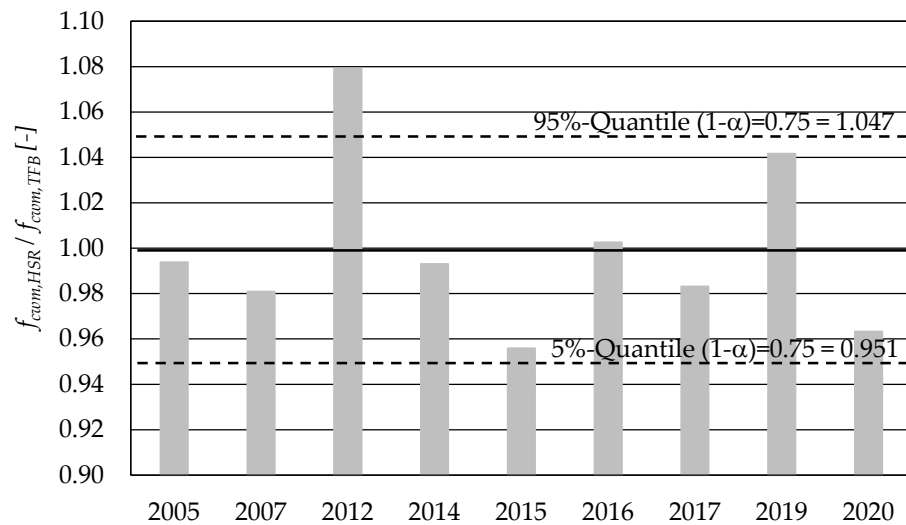


Bild 2.3: Vergleich der Ringversuch-Würfeldruckfestigkeiten der HSR und der TFB.

Unterzieht man die Prüfwerte aus HSR und TFB einem Zweistichproben-*t*-Test [84] für unabhängige Zufallsstichproben (aus normalverteilten Grundgesamtheiten), dann erreichen die Werte der Ringversuche 2012 [31] und 2020 [37] nur ein statistisches Signifikanzniveau $\alpha = 0.01$, während die übrigen Werte in statistisches Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$ erreichen.

Unterzieht man die Varianzen der Prüfwerte aus HSR und TFB einem Zweistichproben-*F*-Test [23], dann zeigt sich dass die Unterschiede in den Varianzen mit einem statistischen Signifikanzniveau $\alpha \approx 0.075$ zufällig sind.

Für Stempeldruckversuche sind dem Autor keine Ringversuchsergebnisse bekannt. Im VAB-Ringversuch «Bohrkerndruck- und Zugfestigkeit» [85] wurden in Anlehnung an SN EN 1542 [106] Messungen der Haftfestigkeit im Abreissversuch durchgeführt und ausgewertet. Für den Ringversuch wurden aus 3 verschiedenen Mischungen mit Grösstkorn 32 mm für jedes der 9 Prüflabore je 2 Würfel 200 mm hergestellt. Bei den beiden Mischungen mit Grösstkorn 4 mm und 16 mm wurden je 1 Würfel 200 mm für jedes teilnehmende Prüflabor hergestellt. Die Haftzugfestigkeit der 5 Mischungen erreichte im Mittel Werte zwischen 1.87 N/mm^2 und 3.29 N/mm^2 bei Standardabweichungen von 0.22 N/mm^2 bis 0.44 N/mm^2 . Der Variationskoeffizient erreichte Werte von 7.9 % bis 16 %.

2.5 Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit

Gemäss der Norm SIA 262:2013 [114] wird die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit bestimmt durch

$$\text{SIA 262, Gl. (6)} \quad f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ N/mm}^2 \quad (2.6)$$

2.5 Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit

Für kleine Werte der mittleren Zylinderdruckfestigkeit f_{cm} führt die Gleichung (2.6) aber zu unrealistisch tiefen charakteristischen Zylinderdruckfestigkeiten f_{ck} .

In [76] wurden ca. 2500 Betonprüfungen von 499 Baustellen aus 20 Ländern analysiert. Die vorsortierten Werte s_f der Standardabweichung wurden in Abhängigkeit von der mittleren Festigkeit f_{cwm} aufgetragen, siehe Bild 2.4. Die mittlere Lage aller Punkte entspricht einer annähernd horizontalen Geraden, die im Bereich kleiner Würfelfestigkeiten in eine auf Null absinkende Kurve übergeht. Es erschien den Autoren der Studie zweckmässig, das mittlere Verhalten durch eine stetige Funktion zu erfassen.

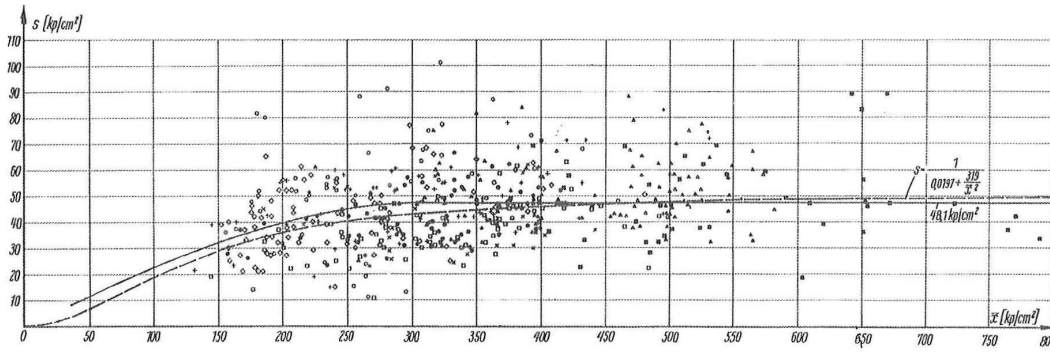


Bild 2.4: Die Standardabweichung s_f von Baustellen-Prüfungen in Abhängigkeit der mittleren Würfelfestigkeit f_{cwm} , aus [76].

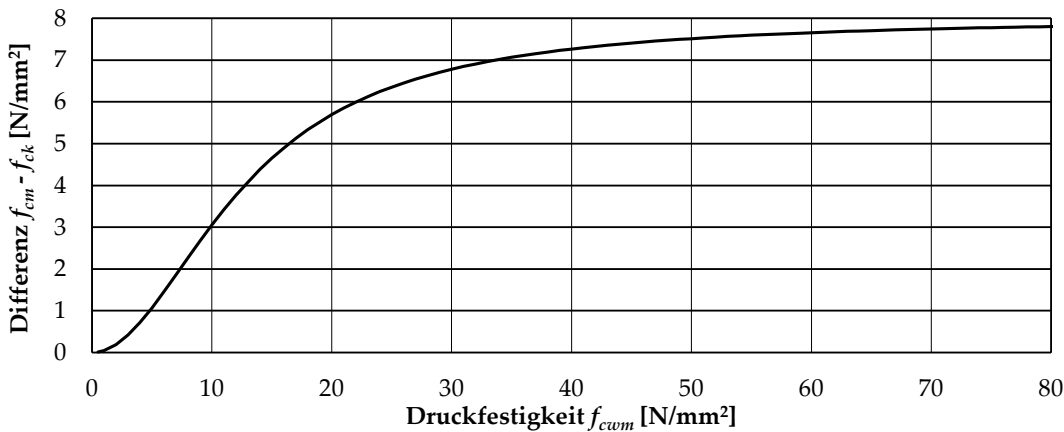


Bild 2.5: Differenz von $f_{cm} - f_{ck}$ gemäss Gleichung (2.7).

Durch Anpassung der in Bild 2.4 formulierten Beziehung für die würfelfestigkeitsabhängige Standardabweichung an das aktuelle Masssystem sowie den Grenzwert der Kurve an den Wert 8 N/mm^2 , kann die Gleichung (2.6) wie folgt formuliert werden

$$f_{ck} = \underbrace{0.82}_{k_{zyl/cube}} \cdot f_{cwm} - \frac{8 \text{ N/mm}^2}{1 + \left(\frac{12.7 \text{ N/mm}^2}{f_{cwm}}\right)^2} \quad (2.7)$$

Der Formfaktor $k_{zyl/cube} = 0.82$ zur Umrechnung der Würfel- zur Zylinderdruckfestigkeit korrespondiert mit der Gleichung (A.1.2) gemäss [80]. Bild 2.5 visualisiert die Berechnung der Differenz $f_{cm} - f_{ck}$ gemäss Gleichung (2.7).

2.6 Exkurs zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls

2.6.1 Rechnerische Ermittlung nach SIA 262

Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls E_{cm} von Normalbeton kann mit folgender Gleichung abgeschätzt werden

SIA 262, Gleichung (10)

$$E_{cm} = k_E \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad f_{cm} \text{ in } [\text{N/mm}^2] \quad (2.8)$$

Die SIA 262:2013 führt in Ziffer 3.1.2.3.3 dazu aus: «Der Beiwert k_E liegt für Gesteinskörnungen aus Alluvialkies zwischen 10000 und 12000, für solche aus gebrochenem Kalk zwischen 8000 und 10 000 und für glimmerhaltiges Gestein zwischen 6000 und 8000. Je nach Betonzusammensetzung können bedeutende Abweichungen von diesen Werten auftreten (insbesondere für selbstverdichtenden Beton); gegebenenfalls ist E_{cm} durch Versuche zu bestimmen. Für Recyclingbeton gilt das Merkblatt SIA 2030» [116].

2.6.2 Rechnerische Ermittlung aus der EMPA-Gleichung

Unter Berücksichtigung der Umrechnung von Prismen- auf Zylinderdruckfestigkeit mit Gleichung (2.3) kann die EMPA-Gleichung (1.1) wie folgt ausgedrückt werden

$$E_c = 60\,000 \text{ N/mm}^2 \frac{f_{cm}}{f_{cm} + 18 \text{ N/mm}^2 / 0.95} \quad f_{cm} \text{ in } [\text{N/mm}^2] \quad (2.9)$$

Bild 2.6 zeigt die rechnerische Werte des E_c -Moduls gemäss der EMPA-Gleichung (2.9) als schraffierten Bereich (Mittelwert bzw. Schranken innerhalb $\pm 20\%$ liegende Streuungen) im Vergleich zu den Werten gemäss der SIA 262:2013 bzw. Gleichung (2.8).

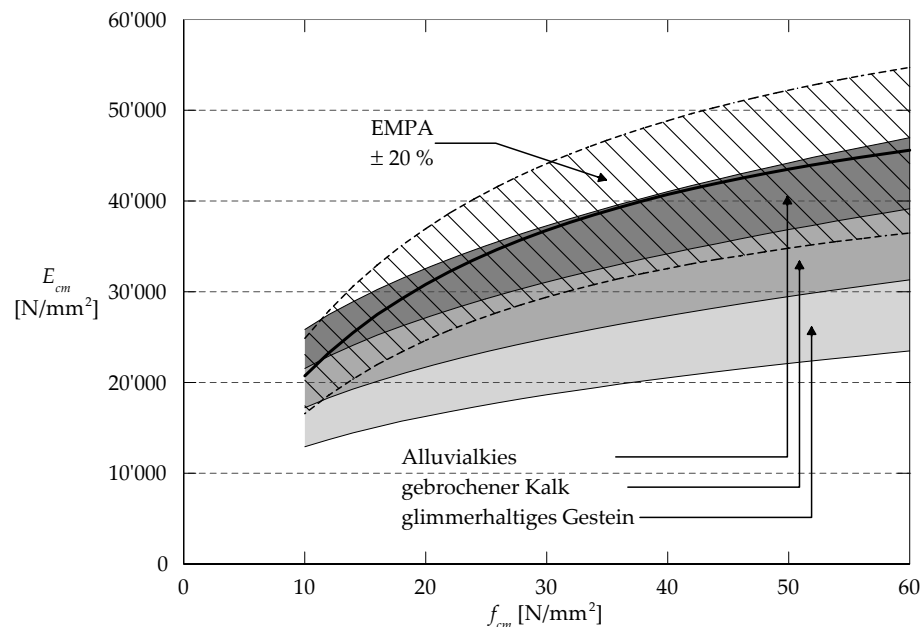


Bild 2.6: E_c -Moduli berechnet aus der Betondruckfestigkeit: Vergleich der Gleichung (10) SIA 262:2013 [114] mit Gleichung (2.9) (auf der Basis von [73]).

2.6.3 Rechnerische Ermittlung aus einer parabolischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung

Vielfach wird das E_c -Modul als Sekanten-Steigung zweier Beanspruchungspunkte (im Gebrauchszustand) vereinfacht, siehe Bild 2.7. Damit ergibt sich

$$E_c = \frac{\sigma_{\text{sup}} - \sigma_{\text{inf}}}{\varepsilon_{\text{sup}} - \varepsilon_{\text{inf}}} \quad (2.10)$$

Unter Verwendung von $\sigma_{\text{sup}} = \alpha_{\text{sup}} \cdot f_c$ bzw. $\sigma_{\text{inf}} = \alpha_{\text{inf}} \cdot f_c$ sowie einer parabolischen Spannungs-Dehnungs-Beziehung gemäss Gleichung (2.5) kann das E_c -Modul rechnerisch aus dem Spannungsbereich bestimmt werden zu

$$E_c = \frac{f_c}{\varepsilon_{c1}} \cdot \frac{\alpha_{\text{sup}} - \alpha_{\text{inf}}}{\sqrt{1 - \alpha_{\text{inf}}} - \sqrt{1 - \alpha_{\text{sup}}}} \quad (2.11)$$

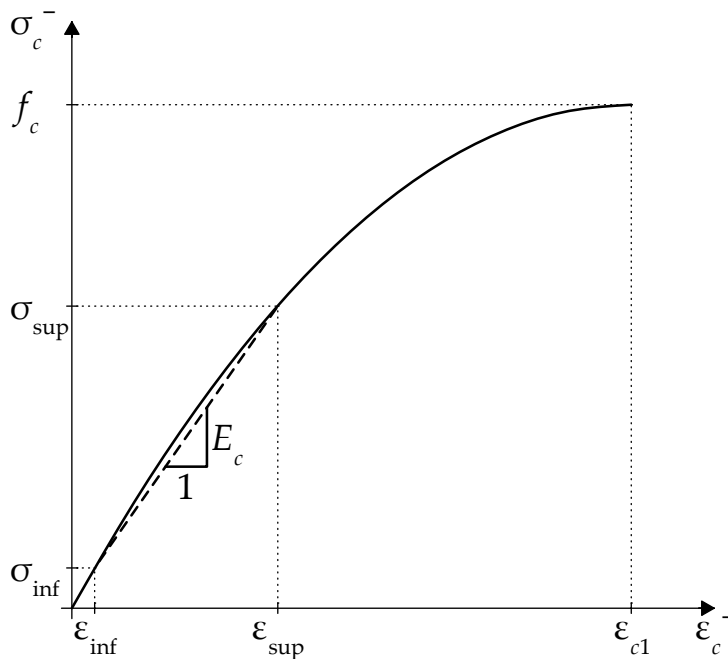


Bild 2.7: Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Beton und Definition des (Sekanten) E_c -Moduls.

2.6.4 Ansätze zur zeitlichen Entwicklung des Elastizitätsmoduls

Während in Ziffer 3.1.2.3 der SIA 262:2013 [114] keine Angaben zur zeitlichen Entwicklung des E_c -Moduls zu finden sind, kann die zeitabhängige Änderung des Elastizitätsmoduls gemäss Eurocode 2 [107] mit folgender Gleichung ermittelt werden

$$\text{EC 2, Gl. (3.5)} \quad E_{cm}(t) = E_{cm,28d} \cdot \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm,28d}} \right)^{0.3} \quad (2.12)$$

Weiter schlägt der Model Code 2010 [102] in Ziffer 5.1.9.3 vor

$$\text{MC2010, Gl. (5.1-56) und (5.1-57)} \quad E_{cm}(t) = E_{cm,28d} \cdot \sqrt{e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}} = E_{cm,28d} \cdot e^{\frac{s}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad t \text{ in [d]} \quad (2.13)$$

bzw. der Model Code 2020 [103] in Ziffer 14.9.1 sinngemäss vorschlägt

$$\text{MC2020, Gl. (14.9-5) und (14.9-6)} \quad E_{cm}(t) = E_{cm,28d} \cdot \sqrt[3]{e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}} = E_{cm,28d} \cdot e^{\frac{s}{3} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad t \text{ in [d]} \quad (2.14)$$

wobei das Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Gesteinskörnung³ bestimmt wird zu

$$\text{MC2020, Gl. (14.7-2)} \quad E_{cm,28d} = 21\,500 \text{ N/mm}^2 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad f_{cm} \text{ in [N/mm}^2] \quad (2.15)$$

³Der Beiwert α_E beträgt gemäss Tabelle 14.7-1 [103] für steife Gesteinskörnung (z.B. Basalt) $\alpha_E = 1.2$, normale Gesteinskörnung (z.B. Quarzit) $\alpha_E = 1.0$ und weiche Gesteinskörnung (z.B. Sandstein) $\alpha_E = 0.7$

3 Betonzugfestigkeit

3.1 Experimentelle Ermittlung der Betonzugfestigkeit

3.1.1 Einführung

Die experimentelle Ermittlung der Betonzugfestigkeit f_{ct} ist in der Regel mit viel Aufwand verbunden. Das Bild 3.1 zeigt eine Übersicht der gebräuchlichen Versuchsarten zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit.

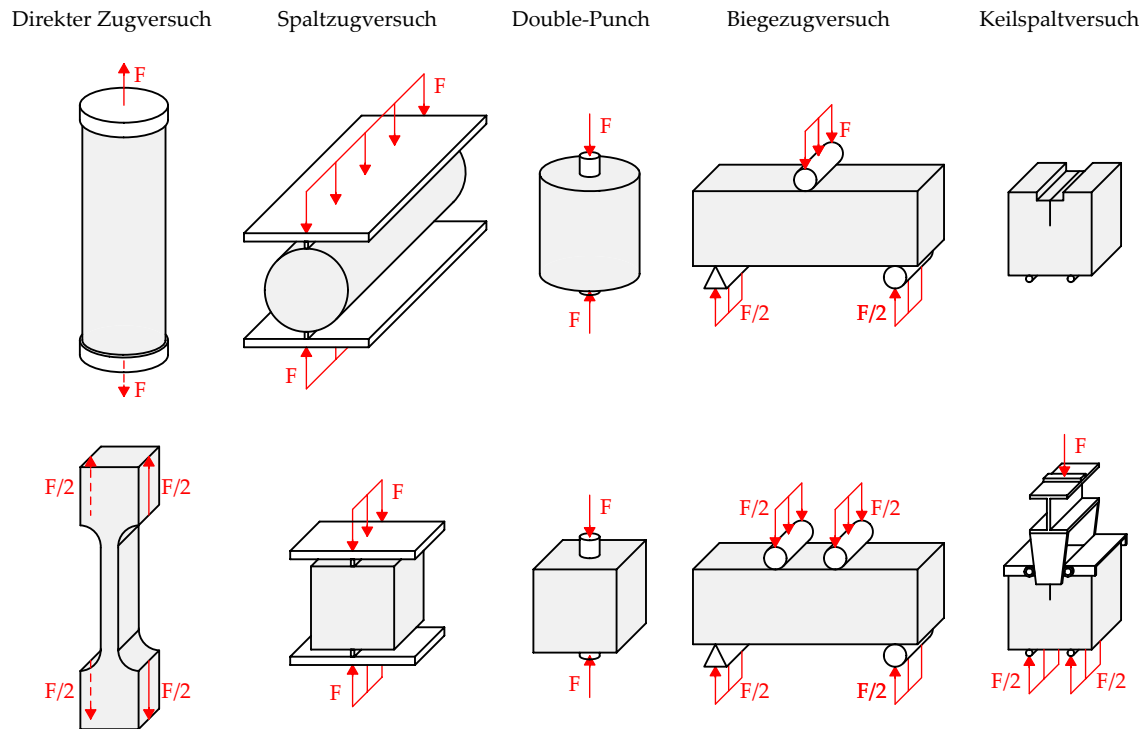


Bild 3.1: Zusammenstellung der gebräuchlichen Versuchsarten zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit.

In den nachfolgenden Abschnitten wird versucht, die spezifischen Eigenheiten der verschiedenen Versuchsarten sowie die Differenzen der entsprechenden «Zugfestigkeiten» zu erläutern.

3 Betonzugfestigkeit

3.1.2 Direkter Zugversuch

Mit direkten Zugversuchen wird versucht die «wahre» Betonzugfestigkeit zu ermitteln. Dazu werden in der Fachliteratur verschiedene Lasteinleitungsmöglichkeiten beschrieben, um einen vorzeitigen Bruch im Bereich der Lasteinleitung zu verhindern.

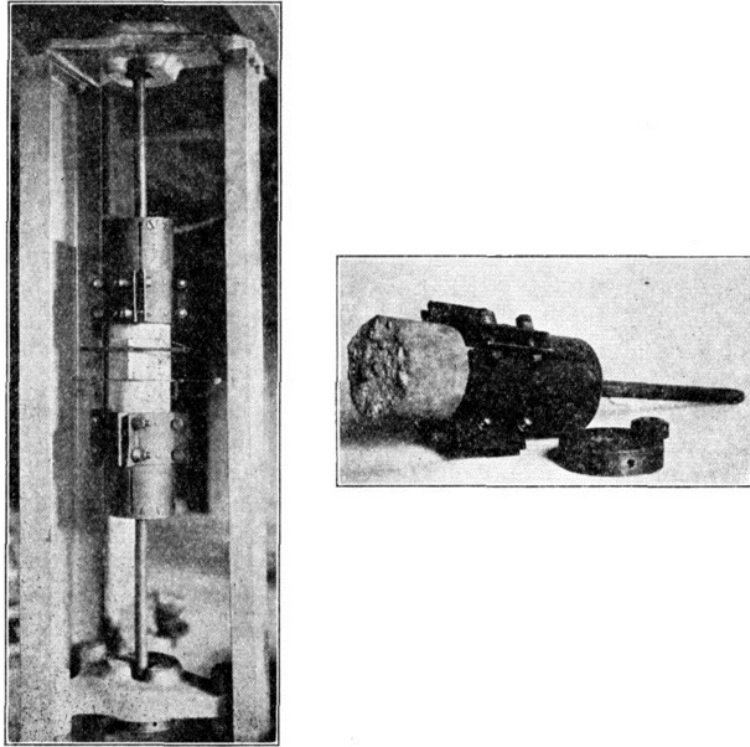


Bild 3.2: Versuchseinrichtung um 1925: direkter Zugversuch und Bruchkörper, Bilder aus [28].

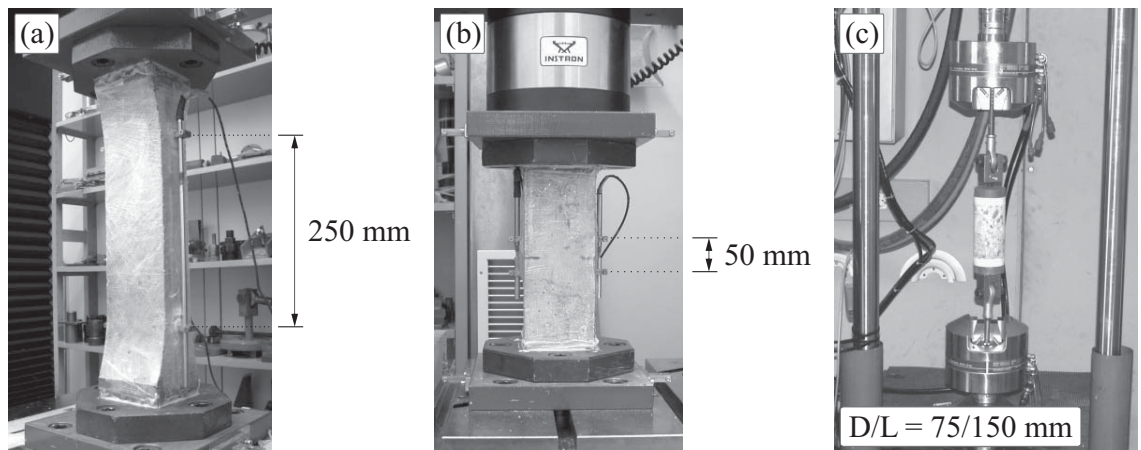


Bild 3.3: Versuchseinrichtung um 2010. Aufbau der einaxialen Zugversuche an: (a) eingeschnürten Proben, (b) gekerbten Prismen und (c) Bohrkernen, Bilder aus [54].

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit f_{ct} wird die Zugspannung im Betonquerschnitt bestimmt

3.1 Experimentelle Ermittlung der Betonzugfestigkeit

aus

$$f_{ct} = \frac{F_{\max}}{A_{ct}} \quad (3.1)$$

Hierin sind F_{\max} die im Versuch gemessene Höchstlast und A_{ct} die Fläche im Bruchbereich des Probekörpers.

3.1.3 Spaltzugversuch

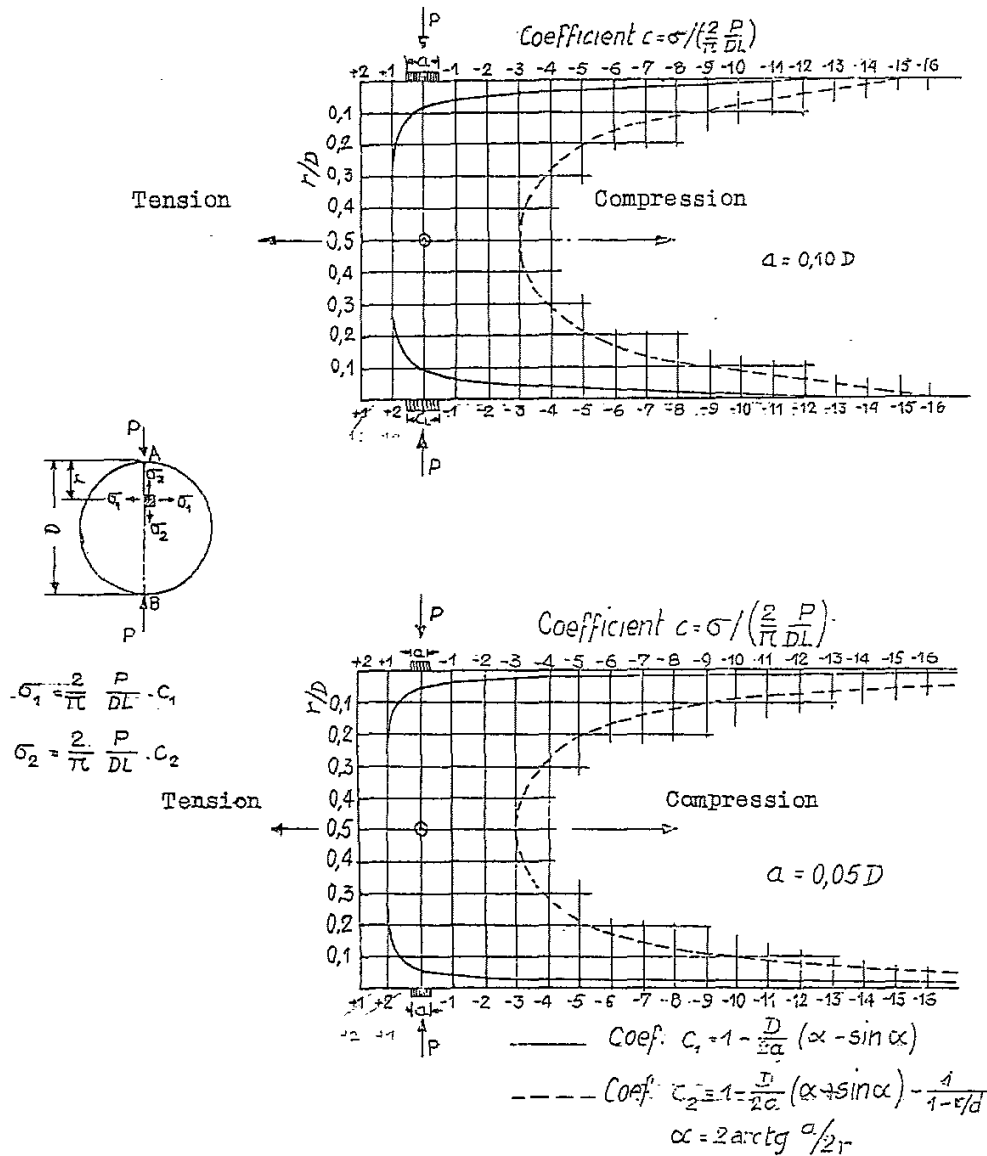


Bild 3.4: Verlauf der Hauptspannungen entlang der Mittelebene für zwei unterschiedliche Lasteinleitungsweiten a (oben: $a = 0.10 \cdot D$; unten: $a = 0.05 \cdot D$), Bild aus [14].

Zur Verhinderung des grossen Aufwands zur Zugkrafteinleitung gibt es verschiedene «indirekte» Zugversuche. Sehr verbreitet ist der Spaltzugversuch – auch bekannt als

3 Betonzugfestigkeit

«Brasilianer-Versuch» entsprechend dem Herkunftsland seines «Begründers» Carneiro [14]. Hiervon unabhängig hat der Japaner Akazawa nahezu zeitgleich den Spaltzugversuch im Rahmen seiner Dissertation in Japan präsentiert [1]. Sehr bald nach der Veröffentlichung des Spaltzugversuchs, zunächst nur für zylindrische Betonproben, fand dieser weltweit Eingang in die nationalen Normen und vieler weiterer Forschungsarbeiten [96, 95, 60, 9, 18, 53].

Zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ wird der bereits von Akazawa [1] und Carneiro [14] angewendete Ansatz herangezogen. Diese Beziehung drückt die im Mittelpunkt des zylindrischen Probekörpers herrschende horizontale (Zug-) Normalspannung aus.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F_{\max}}{\pi \cdot L \cdot D} \quad (3.2)$$

Hierin sind F_{\max} die im Versuch gemessene Höchstlast, L die Länge und D der Durchmesser des zylindrischen Probekörpers.

Um aus der ermittelten Spaltzugfestigkeit $f_{ct,sp}$ auf die einaxiale Zugfestigkeit f_{ct} schließen zu können, werden Umrechnungsfaktoren verwendet. Danach beträgt gemäss [100] die einaxiale Zugfestigkeit

$$f_{ct} = 0.9 \cdot f_{ct,sp} \quad (3.3)$$

Dieser festigkeitsunabhängige Umrechnungsfaktor mit dem Wert 0.9^1 stammt aus den 1960er Jahren und wurde auf der Grundlage von Versuchen an den damals üblichen normalfesten Betonen der Festigkeitsklassen bis C55/67 hergeleitet [43, 75].

Neuere Untersuchungen [99] zeigen, dass die Ergebnisse aus den Spaltzugversuchen ohne Umrechnungsfaktor als Betonzugfestigkeit f_{ct} verwendet werden können, siehe Bild 3.4.

$$f_{ct} = 1.026 \cdot f_{ct,sp} \approx 1.0 \cdot f_{ct,sp} \quad (3.4)$$

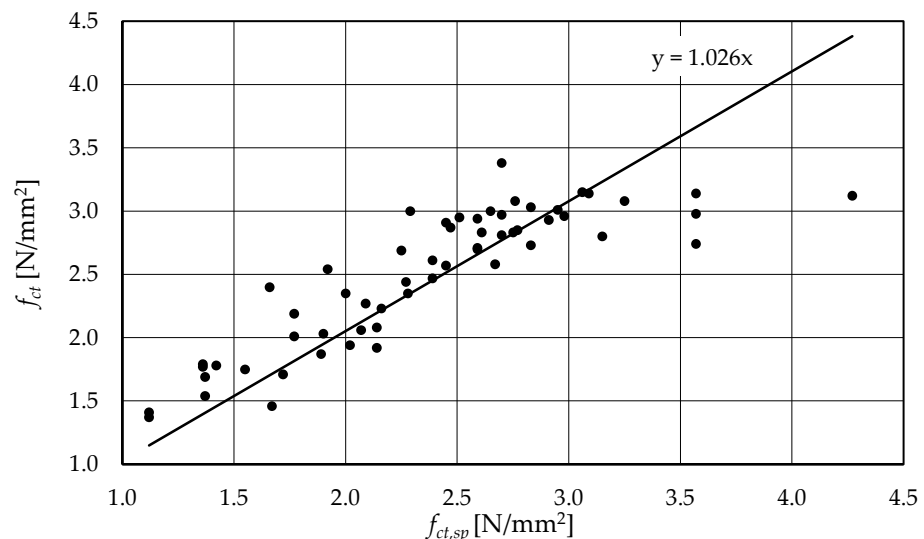


Bild 3.5: Vergleich der Versuchsergebnisse aus Spaltzugversuchen ($f_{ct,sp}$) und direkten Zugversuchen (f_{ct}), Daten aus [99].

¹vergleiche Bild 1.12 bzw. Gleichung (1.15)

[54] gibt einen Vergleich der ermittelten Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit der Geometrie des Probekörpers wieder. Im Allgemeinen kann eine gute Übereinstimmung zwischen den an Zylindern bestimmten Spaltzugfestigkeiten und den an Würfeln bestimmten Spaltzugfestigkeiten festgestellt werden.

Die Abhängigkeit der Zugfestigkeiten $f_{ctm}/f_{ctm,sp}$ von der Prüfkörpergeometrie und in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit ist in Bild 3.6 dargestellt.

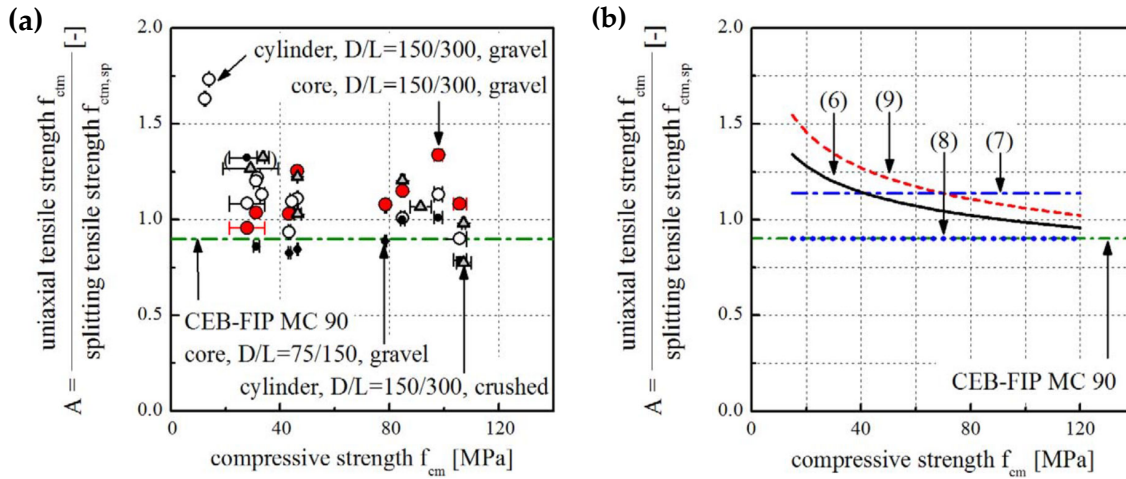


Bild 3.6: Verhältnis der Zugfestigkeiten $f_{ctm}/f_{ctm,sp}$ von der Prüfkörpergeometrie und in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit: (a) Versuchswerte und (b) verschiedene Näherungsgleichungen, Bilder aus [55].

3.1.4 Stempeldruckversuch (Double Punch)

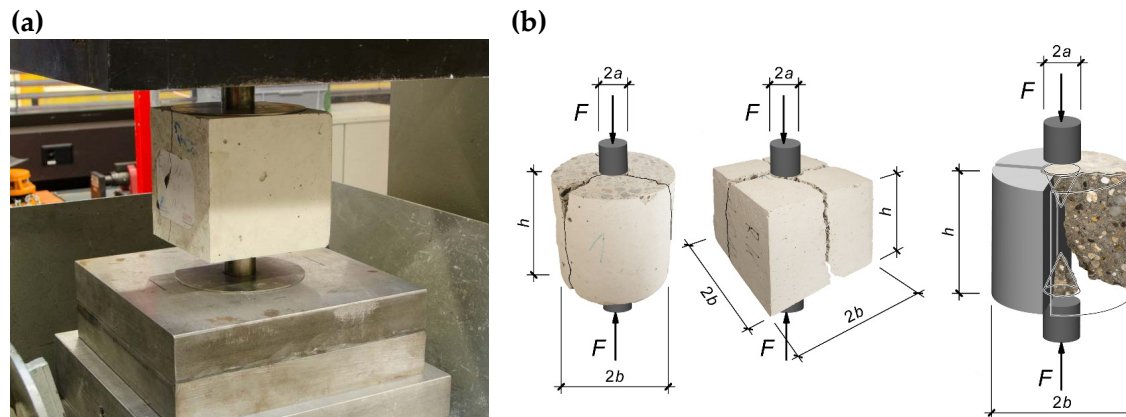


Bild 3.7: (a) Durchführung eines Stempeldruckversuchs an einem Betonwürfel in einer Druckprüfmaschine und (b) Bezeichnungen und Geometrie des Stempeldruckversuchs; Bilder des Autors.

Mit wenig Aufwand kann mit einer Prozedur analog zu einem Würfeldruckfestigkeitsversuch die Betonzugfestigkeit mit einem Double Punch Versuch ermittelt werden, siehe Bild 3.7 (a). Zur wirtschaftlichen Optimierung – der Schneid- und Schleifvorgang an den

3 Betonzugfestigkeit

zu halbierten Zylindern entfällt – kann die Zugfestigkeit auch an Würfeln anstelle der präparierten Zylinder ermittelt werden. Die Bezeichnungen und die Geometrie des Stempeldruckversuchs sind in Bild 3.7 (b) dargestellt.

Chen [16]² hat 1969 obere (Bild 3.8 (a)) und untere (Bild 3.8 (b)) Grenzwerte der Betonfestigkeit an einem Betonkörper auf Basis der Plastizitätstheorie hergeleitet und an Versuchsergebnissen validiert [47]. Die näherungsweise Ermittlung der Zugfestigkeit $f_{ct,DP}$ aus den Bruchkräften F_u erfolgt mit der erläuterten Beziehung bzw. Gleichung (3.5) aus [15]. Bortolotti [11] hat sich auf Basis von [41] kritisch mit dem Ansatz von Chen auseinandergesetzt.

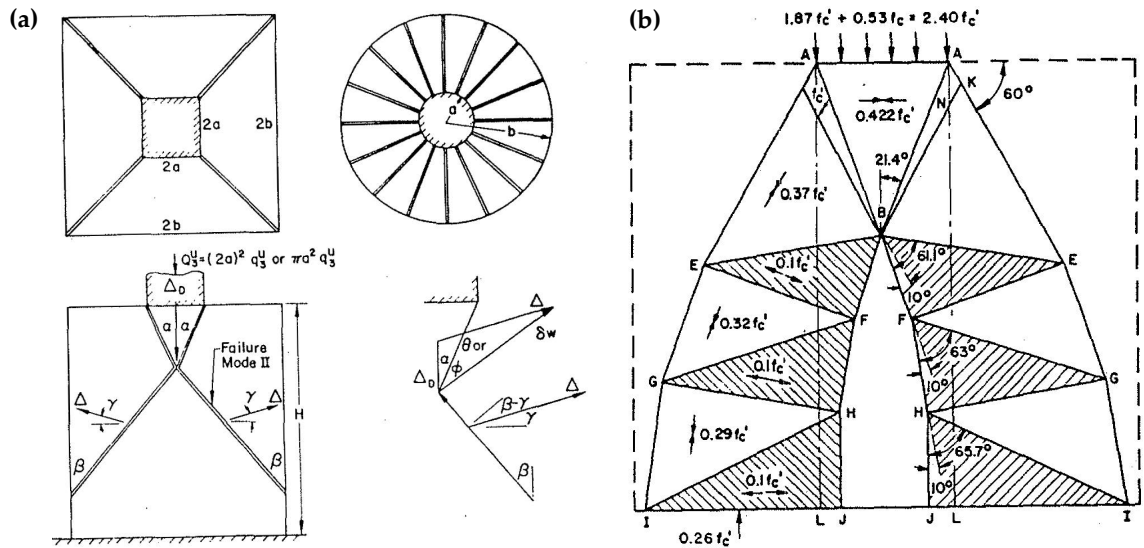


Bild 3.8: Ermittlung der Betonzugfestigkeit: (a) mit der kinematischen Methode (oberer Grenzwert der Plastizitätstheorie), (b) räumliche Spannungsfelder (unterer Grenzwert der Plastizitätstheorie), Bilder aus [16].

Untersuchungen über den Einfluss der Prüfkörpergrösse auf die ermittelten Zugfestigkeiten unter Anwendung des *Massstabgesetzes*³ nach Bažant [6] finden sich in Marti [57].

$$f_{ct,DP} = \frac{F_u}{\pi \cdot (1.2 \cdot b \cdot h - a^2)} \quad (3.5)$$

Für die im Projekt verwendeten Würfel gelten: $h = 2b$ und $h/4 = 2a$. Daraus ergibt sich:

$$f_{ct,DP} = \frac{320}{187} \cdot \frac{F_u}{\pi \cdot h^2} \approx 0.545 \cdot \frac{F_u}{h^2} \quad (3.6)$$

²Au und Baird haben bereits 1960 pyramidenförmige Eindrück-Stempel angesetzt [3].

³Bažant leitete ein halbempirisches Gesetz her, das den Übergang von einem Festigkeitskriterium für kleine Proben zur linear elastischen Bruchmechanik für grosse Proben beschreibt. Bei seiner Herleitung ging er davon aus, dass sich in einem Werkstoffvolumen eine Schädigungszone der Bandbreite d senkrecht zur Rissfläche bildet – das sogenannte Rissbandmodell [7].

3.1 Experimentelle Ermittlung der Betonzugfestigkeit

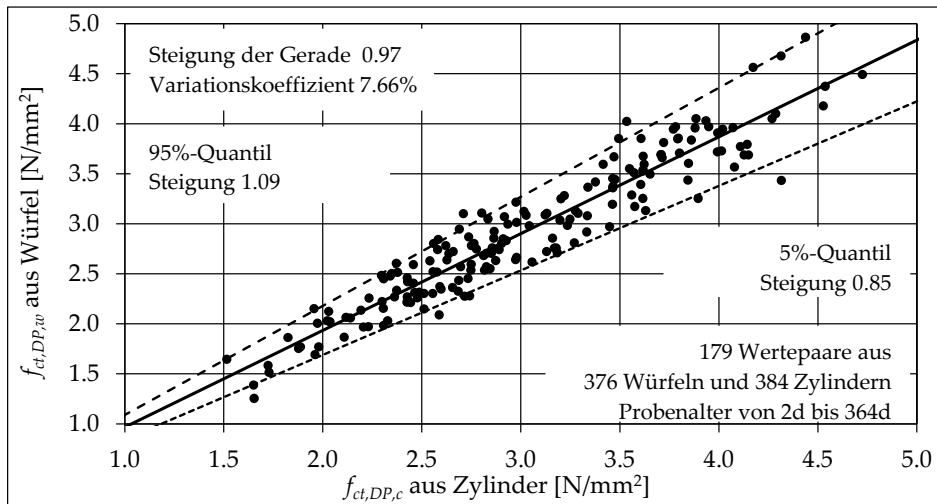


Bild 3.9: Vergleich der Versuchsergebnisse aus Würfeln vs. Zylindern; die Daten stammen aus dem Archiv des Autors.

Bild 3.9 zeigt den Vergleich der Versuchsergebnisse von Würfeln mit in der Mitte geschnittenen Zylindern. Die im gleichen Betonalter ermittelten Wertepaare (Mittelwerte aus mehreren Prüferten derselben Geometrie) gehören jeweils zur selben Betoncharge. Die strichlierten Linien zeigen die 5 %- bzw. 95 %-Quantilen-Steigungen. Vermutlich infolge besserer Verdichtung sind die ermittelten Betonzugfestigkeiten der unteren Zylinderhälfte $f_{ct,DP,inf}$ kleiner als die der oberen Zylinderhälfte $f_{ct,DP,sup}$. Das Verhältnis $f_{ct,DP,inf} / f_{ct,DP,sup} \approx 1.08 \pm 0.065$ der Zylinderprüfwertpaare stützt diese Vermutung.

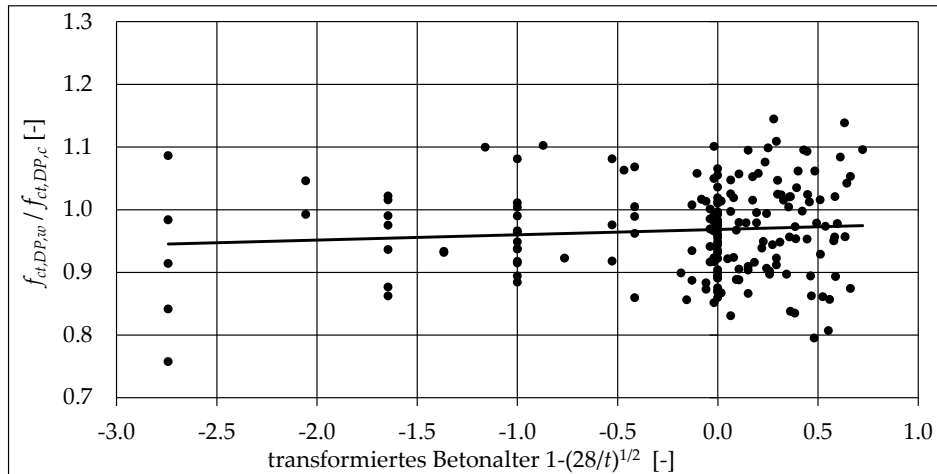


Bild 3.10: Verhältnis der Versuchsergebnisse aus Würfeln vs. Zylindern über das Betonalter; die Daten stammen aus dem Archiv des Autors.

Der Zusammenhang der beiden Prüfungen ist stark (siehe Bild 3.9) und unabhängig vom Alter der Prüfkörper, siehe Bild 3.10. Die Verwendung von Würfeln anstelle von bearbeiteten Zylindern zur Ermittlung der Zugfestigkeit ist gerechtfertigt; wie schon von Chen [15] festgehalten.

3.1.5 Biegezugversuch

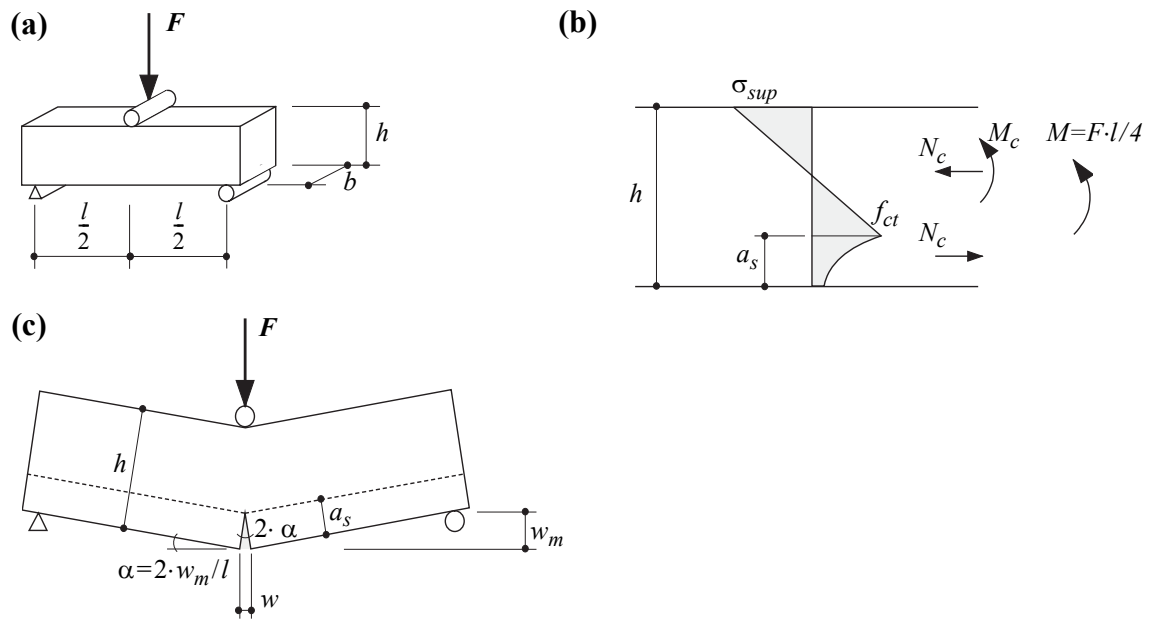


Bild 3.11: Biegezugversuch: (a) Versuchsaufbau und Abmessungen; (b) Gleichgewicht am Rissquerschnitt; (c) vereinfachte Kinematik der Rissöffnung, Bild aus [48].

Bild 3.11 (a) zeigt einen Versuch, wie er zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit üblicherweise durchgeführt wird. In der Regel wird davon ausgegangen, dass sich der Beton bis zum Erreichen der Betonzugfestigkeit linear elastisch verhält und dass die Entfestigung mit einem Potenzgesetz beschrieben werden kann. Der Querschnitt wird als initial eigenspannungsfrei angenommen.

Für einen 3-Punkt-Biegeversuch gemäss Bild 3.11 ergibt sich die Biegezugfestigkeit f_{ctb} aus der Maximalkraft F_u bzw. M_u zu

$$f_{ctb} = \frac{M_u}{W_c} = \frac{F_u \cdot \ell / 4}{b \cdot h^2 / 6} \quad (3.7)$$

Nach dem Erreichen einer Randspannung von f_{ct} bildet sich unmittelbar unter der Last eine Risszone der Höhe a_s , siehe Bild 3.11 (b) und (c). In Anlehnung an die Balkentheorie kann angenommen werden, dass sowohl die Querschnitte oberhalb des fiktiven Risses als auch die Rissufer eben bleiben. Daraus ergibt sich in Anlehnung an das fiktive Rissmodell nach Hillerborg [44] entlang der kohäsiven Risszone eine Entfestigungsspannung gemäss Bild 3.11 (b).

Die angenommene Kinematik der Rissöffnung entspricht der Vorstellung, dass sich die Verformungen des Balkens im Rissquerschnitt lokalisieren, was zumindest für Zustände mit grossen Risstiefen relativ gut zutrifft. Die Rissöffnung wird demnach überschätzt, wobei der dabei gemachte Fehler mit wachsender Risstiefe kleiner wird. Auf diesen Annahmen wurden in [48] zur Diskussion der Auswirkungen der Entfestigung im Riss auf das Last-Verformungsverhalten analytische Näherungslösungen erarbeitet.

In den Diagrammen in Bild 3.12 ist die Beanspruchung durch das auf das Rissmoment M_{cr} normierte Moment

$$\mu = \frac{M}{M_{cr}} = \frac{M}{f_{ct} \cdot b \cdot h^2 / 6} \quad (3.8)$$

angegeben, da damit direkt das Verhältnis der fiktiven Randspannung zur Zugfestigkeit ausgedrückt wird. Man erkennt, dass die in einem Biegezugversuch ermittelte fiktive Festigkeit $f_{ctb} = \mu_{max} \cdot f_{ct}$ wesentlich grösser ausfällt als die aus einem direkten Zugversuch gewonnene Zugfestigkeit f_{ct} , da gemäss Bild 3.12 $\mu_{max} \geq 1$ ist. Darüber hinaus zeigen die Diagramme in Bild 3.12 (a) und (b), dass durch die Form der Spannungs-Rissöffnungs-Funktion eine geringe Beeinflussung der maximalen Beanspruchung des Systems resultiert. Der Einfluss der Belastungsgeometrie ist deutlich geringer, siehe Bild 3.12 (c) und (d).

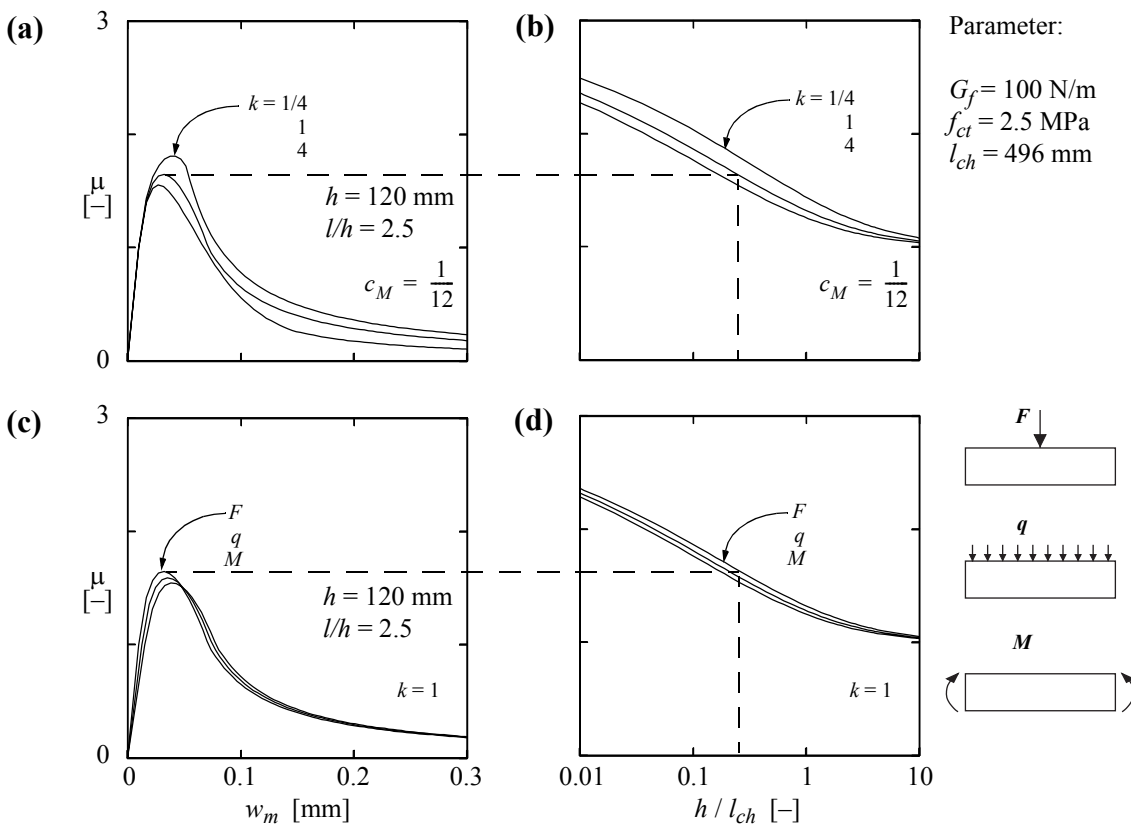


Bild 3.12: Biegezugfestigkeit: (a) Momenten-Durchbiegungs-Diagramm und (b) Maximalmomente für unterschiedliche Entfestigungs-Funktionen; (c) Momenten-Durchbiegungs-Diagramm und (d) Maximalmomente für unterschiedliche Belastungskonfigurationen, Bild aus [48].

Nach Auswertung von Parameterstudien zur Ermittlung der Bruchschnittgrössen leiteten

3 Betonzugfestigkeit

König et al. [50] unter Verwendung der charakteristischen Länge⁴

$$\ell_{ch} = \frac{E_c \cdot G_f}{f_t^2} \quad (3.9)$$

für die Maximalwerte (μ_{\max}) unter reiner Biegung her:

$$\mu_{\max} = 1 + \sqrt{\left(\frac{\ell_{ch}}{8 \cdot h}\right)^2 + \frac{\ell_{ch}}{2 \cdot h} - \frac{\ell_{ch}}{8 \cdot h}} \quad (3.10)$$

MC2010, Ziffer 5.1-8b Eine vergleichbare Beziehung lässt sich aus dem Model Code 2010 [102] herleiten

$$\mu_{\max} = 1 + \frac{1}{0.06 \cdot h^{0.7}} \quad h \text{ in [mm]} \quad (3.11)$$

Bild 3.13 zeigt die grafische Darstellung der Gleichungen (3.10) und (3.11). Es ist ersichtlich, dass das normierte Moment μ bzw. das Verhältnis f_{ctb}/f_{ct} stets grösser ist als 1.0 und für ein Standardprisma mit den Abmessungen 120/120/360 mm gemäss Gleichung (3.11) ca. 1.6 beträgt.

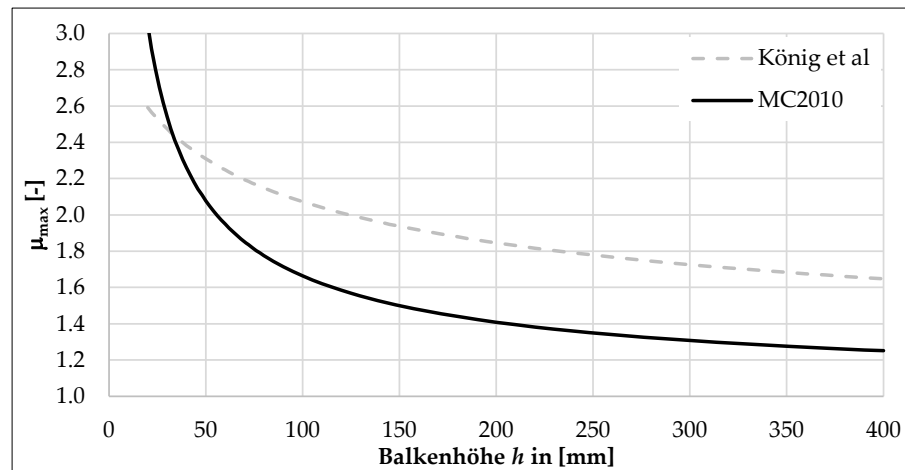


Bild 3.13: Grafische Darstellung der Gleichungen (3.10) und (3.11).

3.1.6 Keilspaltversuch

Aufgrund seiner Einfachheit hat sich der Keilspaltversuch bei der Prüfung zementgebundener Werkstoffe bewährt. In Bild 3.14 ist eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus gegeben.

Der Probekörper wird zunächst auf Linienlager gestellt. Die Linienlager befinden sich direkt unter dem Massenschwerpunkt der jeweiligen Probenhälfte. Anschliessend werden zwei Backen mit je einem Rollenlager auf jeder Probenseite in die Aussparung am oberen

⁴Die charakteristische Länge ℓ_{ch} ist ein Mass zur Beschreibung der Duktilität eines Werkstoffs. Sie erlaubt den Vergleich von Werkstoffen mit einem ähnlichen Entfestigungsverhalten. Diese Betrachtung geht auf Petersson [62] und Hillerborg [44] zurück.

3.1 Experimentelle Ermittlung der Betonzugfestigkeit

Ende der Probe gelegt. Unterhalb der Rollenlager werden induktive Wegaufnehmer, die mit Halterungen, welche auf dem Probekörper aufgeklebt sind, befestigt. Die Wegaufnehmer befinden sich auf gleicher Höhe als die Kräfteinleitungspunkte. Nun wird auf jeder Seite der Probe ein Keil zwischen die beiden Rollenlager gepresst. Gemessen wird die Vertikalkraft F in Abhängigkeit des Mittelwertes der Horizontalverformungen der beiden Wegaufnehmer. Aus der Vertikalkraft lässt sich über den Keilwinkel die horizontale Kraftkomponente bestimmen. Die Horizontalkraft wird im allgemeinen als Spaltkraft bezeichnet. Die Wegsteuerung der Versuche erfolgt über externe Wegaufnehmer auf beiden Seiten der Probe.

Da der Keilspaltversuch nach [51, 12, 13] im Vergleich zum Biegeversuch ein geringeres Probenvolumen benötigt und versuchstechnisch einfacher als der Kompaktzugversuch (CT) oder der direkte Zugversuch durchzuführen ist, kann dieser zur Bestimmung der nicht-linearen, bruchmechanischen Parameter gewählt werden.

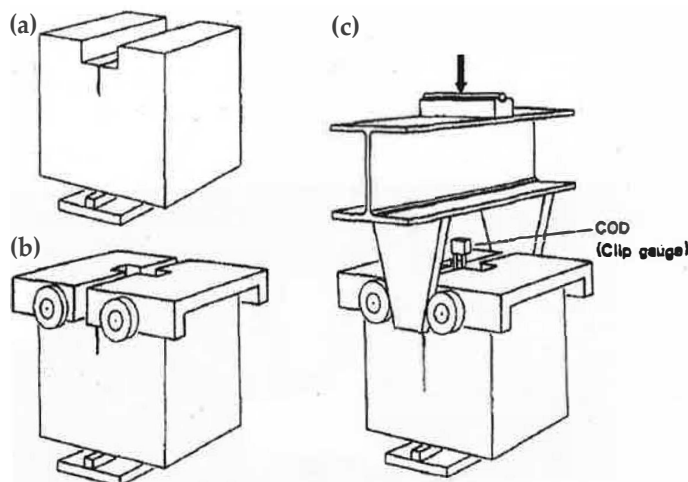


Bild 3.14: Versuchsaufbau: (a) Probekörper auf einem Linienlager, (b) Position der Lasteinleitungselemente inkl. Rollen und (c) «Keil» zwischen den Rollen inkl. Rissöffnungsmessgeber, Bild aus [13].

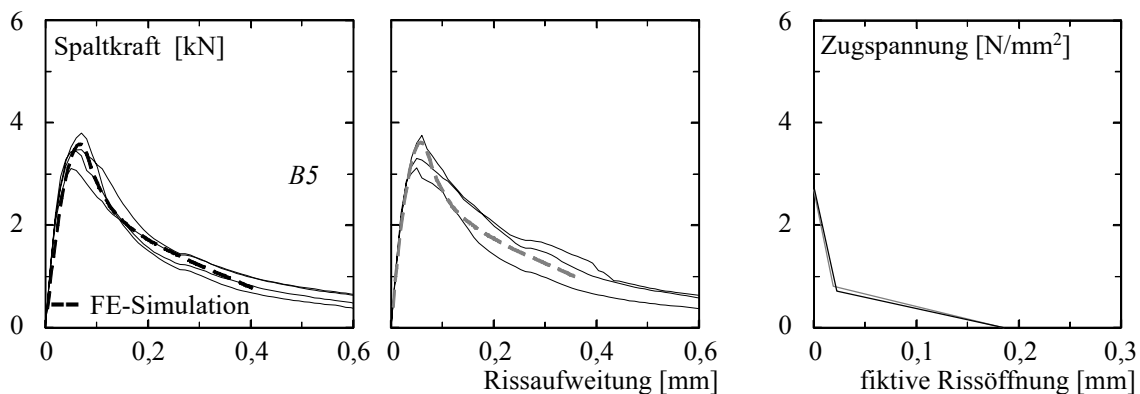


Bild 3.15: Keilspaltversuche: Spaltkraft-Rissaufweitungsdiagramme zweier Chargen links und bilineare Zugspannungs-Rissöffnungsdiagramme rechts, Bild aus [49].

3 Betonzugfestigkeit

Bild 3.15 zeigt Ergebnisse von Keilspaltversuchen [49]. Unter Verwendung von FE-Simulationen wurden mittels des von Roelfstra et al. [69] und Brühwiler [12] beschriebenen Verfahrens aus den Spaltkraft-Rissaufweitungskurven die Parameter der bilinear approximierten Dehnungs-Entfestigungs-Funktionen berechnet [44], siehe Bild 3.15 links. Die fett gestrichelten Spaltkraft-Rissaufweitungskurven in Bild 3.15 entsprechen den Ergebnissen der FE-Simulationen, während die dünn durchgezogenen Kurven die Messresultate der einzelnen Versuche repräsentieren. Die Probengeometrie und das bilineare Zugspannungs-Rissöffnungsdiagramm sind dargestellt in Bild 3.16.

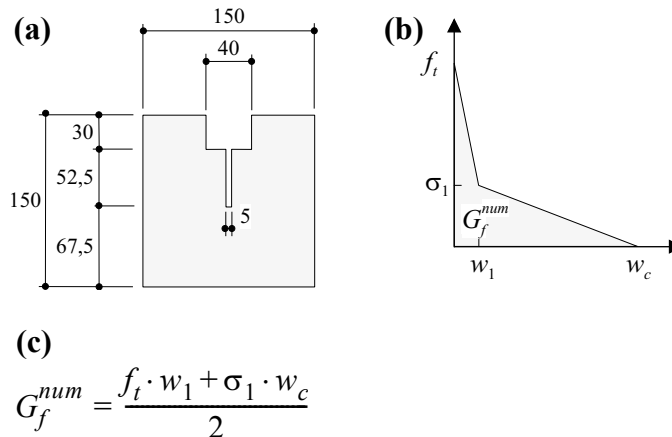


Bild 3.16: Keilspaltversuch: (a) Probengeometrie (Abmessungen in [mm]), (b) bilineare Entfestigungs-Funktion und (c) Formel zur Bestimmung der spezifischen Bruchenergie, Bild aus [49].

3.2 Fazit aus den verschiedenen Versuchsarten

3.2.1 Vergleich der Zugfestigkeiten

Verschiedene Forscher am Institut für Baustatik und Konstruktion an der ETH Zürich haben begleitend zu ihren grossmassstäblichen Bruchversuchen an Stahlbetonprobekörpern umfangreiche Prüfungen der mechanischen Eigenschaften des verwendeten Betons durchgeführt [49, 2, 25, 83]. In Bild 3.17 sind die ermittelten Betonzugfestigkeiten aus Keilspalt-, Double Punch- und Biegezugversuchen den Ergebnissen von direkten Zugversuchen gegenübergestellt. Die Betonzugfestigkeiten der Keilspaltversuche liegen auf der 1:1-Geraden – eine Konsequenz der inversen Analyse. Die Steigung der Regressionsgeraden für Double Punch Versuche ist 16 % steiler und die Steigung der Biegezugversuche ist 44 % steiler als die 1:1-Gerade.

Die Signifikanz der Auswertung ist nicht allzustark (kleine Stichprobengrösse), trotzdem zeigt die Tendenz auf, dass insbesondere $f_{ctb} > f_{ct}$ und damit die theoretischen Untersuchungen in Abschnitt 3.1.5 gestützt werden.

3.2 Fazit aus den verschiedenen Versuchsarten

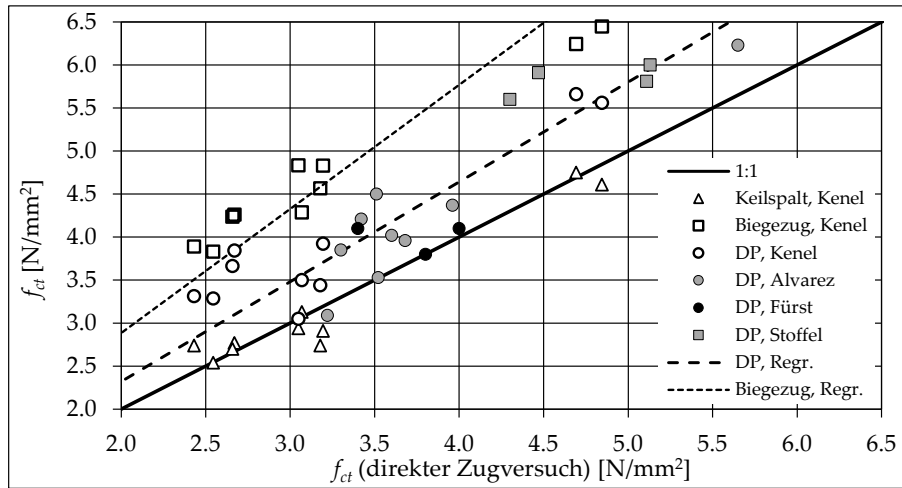


Bild 3.17: Vergleich der direkten Zugfestigkeit f_{ct} mit verschiedenen Zugfestigkeits-Versuchsergebnissen (Keilspalt, Double Punch und Biegezugversuche); Daten aus [49, 2, 25, 83].

3.2.2 Verhältnis von Druck und Double Punch Zugfestigkeit

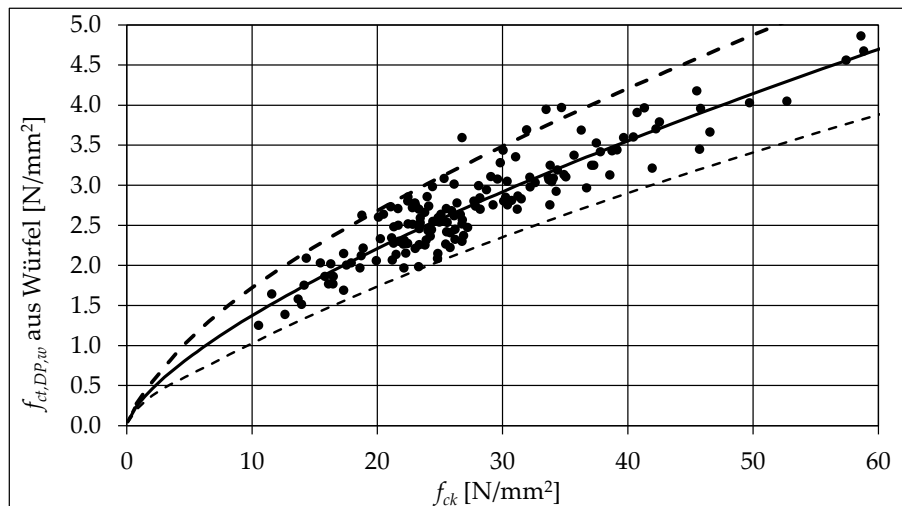


Bild 3.18: Verhältnis von Druck und Double Punch Zugfestigkeit aus Würfelproben (150 mm); die Daten stammen aus dem Archiv des Autors.

Bild 3.18 zeigt das Verhältnis von Druck und Double Punch Zugfestigkeit, getestet an Würfelproben mit 150 mm Kantenlänge. Die charakteristische Betondruckfestigkeit f_{ck} wurde mithilfe der Gleichung (2.7) aus der Würfeldruckfestigkeit f_{cwm} ermittelt. Die als in die Versuchsdaten best-passende Potenzfunktion (ausgezogene Linie) entspricht genau der Gleichung (3.13). Die beiden strichlierten Linien entsprechen den 5%- bzw. 95%-Quantilen, wobei der 5%-Quantilen $0.84 \cdot f_{ctm,DP}$ bzw. der 95%-Quantilen $1.16 \cdot f_{ctm,DP}$ entspricht.

3 Betonzugfestigkeit

Damit ist die Spannweite der Streuungen deutlich kleiner als bei direkten Zugversuchen, siehe auch Bild 1.12 bzw. die Gleichungen (1.16) und (1.17). Die Ursache der geringeren Streuung könnte darin begründet sein, dass die Bruchfläche eines Double Punch Versuchs deutlich grösser ist als die Bruchfläche des direkten Zugversuchs (A_{ct}). Zudem ist der Double Punch Versuch deutlich einfacher in der Durchführung (Lasteinleitung, Zwängungen, Exzentrizitäten usw.) und reagiert damit weniger empfindlich auf kleine Störungen.

3.3 Einfluss von Eigenspannungen auf die Betonzugfestigkeit

Ist die Verformung einzelner Fasern innerhalb eines Querschnittes in einem Bauteil behindert, so spricht man von innerem Zwang. Die dabei entstehenden Spannungen werden Eigenspannungen genannt. Solche Spannungszustände treten z.B. bei jeder Erwärmung oder Abkühlung eines festen Körpers auf. Beim Wärmeaustausch zwischen unmittelbar benachbarten Körperteilen kommt es zu unterschiedlicher Temperaturverteilung über den Querschnitt und wegen der gegenseitigen Verformungsbehinderung zu innerem Zwang.

Unter Verwendung der Wärmeleitungsgleichung berechnete Falkner [22] die Eigenspannungszustände in Betonbauteilen unterschiedlicher Dicke und mit veränderlichen Wärmeübergangszahlen für eine Abkühlung der Betonaussenfläche. Für Bauteile normaler Festigkeit und Dicken $h \leq 1$ m bleiben die Eigenspannungen bei atmosphärischen Bedingungen praktisch immer unterhalb der Betonzugfestigkeit, siehe Bild 3.19. Die Maxima der Randzugspannungen treten bei dicken Bauteilen bald nach dem Ausschalen auf, da infolge fehlender thermischer Isolation die oberflächennahe Auskühlung beginnt. Bei einer Beanspruchung infolge äusserer Last oder Zwang reisst das Bauteil im Randbereich. Wegen der geringen Rissbreite und -tiefe beeinflussen diese Risse die Temperaturverteilung über den Querschnitt nicht.

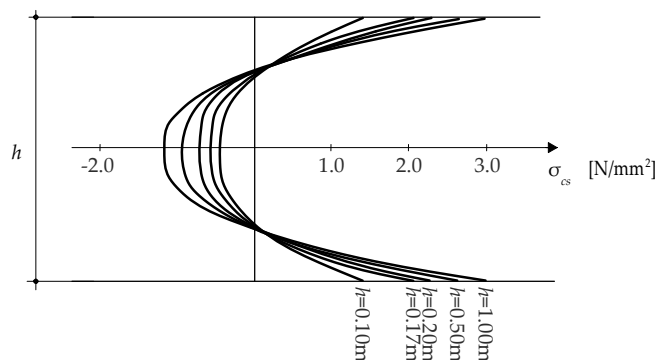


Bild 3.19: Eigenspannungen bei verschiedenen Plattendicken für eine Abkühlung am Aussenrand, aus Falkner [22].

Infolge der nicht synchronen Entwicklung der Betonzugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls für Zugbeanspruchungen ist die Bruchdehnung des jungen Betons eine zeitveränderliche Grösse und stark von der Nachbehandlung abhängig. Beim Übergang von Frischbeton zum Festbeton im Alter von 6 bis 12 Stunden tritt ein Minimum der Bruchdehnung auf [92].

3.3 Einfluss von Eigenspannungen auf die Betonzugfestigkeit

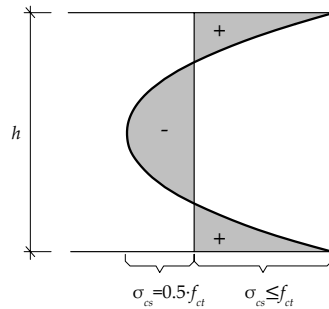


Bild 3.20: Ansatz zur Berücksichtigung der Schwindeigenspannungen; Berechnungen nach [62] in Bild 3.21.

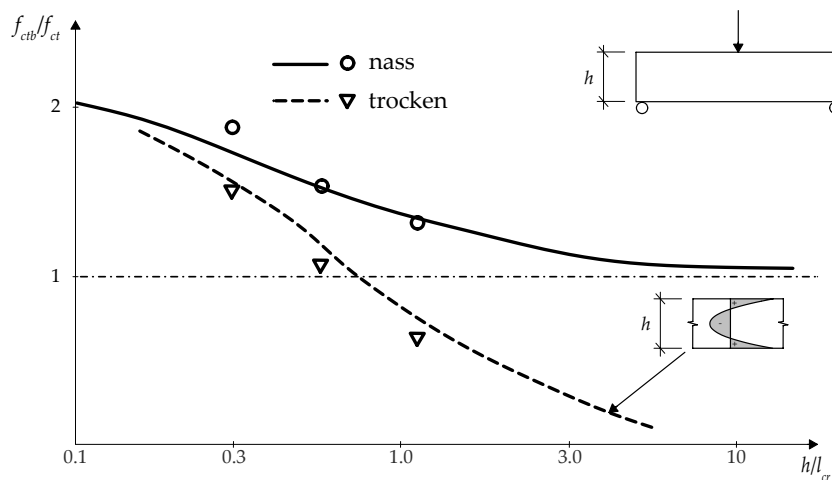


Bild 3.21: Einfluss der Schwindeigenspannungen (Spannungsverteilung siehe Bild 3.20) infolge Trocknung auf die Biegezugfestigkeit f_{ctb} .

Die in Bild 3.20 dargestellte Spannungsverteilung zur rechnerischen Erfassung der Beeinflussung durch Eigenspannungen infolge Schwinden wurde von Petersson [62] verwendet. Mit Finite-Element-Berechnungen ermittelte Petersson unter Verwendung des fiktiven Rissmodells nach Hillerborg [44] die Biegezugfestigkeit von Betonbalken unterschiedlicher Höhe unter Schwindbeanspruchung (getrocknet) und im nassen Zustand. Die rechnerischen Ergebnisse sind den experimentellen Werten in Bild 3.21 gegenübergestellt. Mit zunehmender Trägerhöhe wird die Biegezugfestigkeit f_{ctb} infolge von Schwindeigenspannungen massiv reduziert. Dabei gilt es allerdings zu beachten, dass die Schwindeigenspannungen auch von der Querschnittsform und nicht nur von der Querschnittshöhe abhängig sind. Weitere Grundlagen und Ausführungen sind in [48] zu finden.

Die Zugfestigkeit reagiert empfindlich auf die Austrocknung der Randbereiche und den damit verbundenen Zwangszugspannungen aus dem Schwinden, [8, 10]. Dieses Phänomen ist bekannt und experimentell sowie bruchmechanisch untersucht, z.B. Petersson [62].

3.4 Zusammenhang von Druckfestigkeit und Zugfestigkeit

3.4.1 Beziehungen aus der Forschung

In der Forschung [43, 75, 74] werden vielfach die aus der Druckfestigkeit berechneten Zugfestigkeiten verwendet:

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{cm}^{2/3} \quad (3.12)$$

3.4.2 Beziehungen aus der Normung

Der Tabelle 3 der Norm SIA 262:2013 [114] ist folgender Zusammenhang aus dem EC2 [107] zwischen Betonzugfestigkeit und Zylinderdruckfestigkeit zugrunde gelegt:

EC2, Tabelle 3.1

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{für } f_{ck} \leq 50 \text{ N/mm}^2$$

Gleichung (4.1) aus [66]

$$f_{ctm} = 2.12 \cdot \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10} \right) \quad \text{für } f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2 \quad (3.13)$$

Der Model Code 2020 [103] verwendet die Beziehung

Gleichung (14.6-3)

$$f_{ctm} = 1.8 \cdot \ln(f_{ck}) - 3.1 \quad \text{in } [\text{N/mm}^2] \quad (3.14)$$

Als untere und obere Grenzen der Betonzugfestigkeit verwendet der Model Code 2020 [103] die Beziehungen

Gleichung (14.6-4)

$$f_{ctk,\min} = 0.7 \cdot f_{ctm} \quad \text{entspricht SIA 262:2013, Gleichung (7)} \quad (3.15)$$

Gleichung (14.6-5)

$$f_{ctk,\max} = 1.3 \cdot f_{ctm} \quad \text{entspricht SIA 262:2013, Gleichung (8)} \quad (3.16)$$

4 Prüfkörperherstellung, Lagerung und Prüfung

4.1 Herstellung der Prüfkörper

Die TFB AG stellte im Auftrag der Zementhersteller – Jura Cement AG, Ciments Vigier SA und Holcim (Schweiz) AG – insgesamt 924 Betonwürfel mit einer Kantenlänge von 150 mm aus 10 verschiedenen Betonrezepturen her. Von 4 Betonrezepturen wurde die doppelte Anzahl Betonwürfel – für die zusätzliche Trockenlagerung – hergestellt, siehe Tabelle 4.1. Diese insgesamt 10 (+4) Mischungen wurden in einem Zeitraum von 4 Wochen hergestellt. Die Prüfberichte der Frischbetonkontrollen sind im Anhang A.1 aufgeführt. Zur logistischen Vereinfachung bzw. zur Verhinderung eines Transports der Betonwürfel in jungem Betonalter prüfte die TFB Druck- und Zugfestigkeit (Double-Punch) nach 2 d, 7 d, 28 d und 56 d. Die Tabelle 4.1 weist den nachfolgend verwendeten Kurzbezeichnungen die Rezeptur und die Lagerungsart zu.

Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z (¹)	Nr.	Bezeichnung «nass»	Bezeichnung «trocken»
CEM II/B-LL 32,5 R	290	0.60	③	A-A	
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	290	0.60	③	A-B	A-BT
CEM II/A-LL 42,5 N	290	0.60	②	A-C	A-CT
CEM II/A-LL 52,5 N	310	0.50	②	C-D	
CEM II/B-M (S-T) 42,5 R	310	0.50	③	C-E	
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	310	0.50	③	C-F	C-FT
CEM II/A-LL 42,5 N	310	0.50	②	C-G	C-GT
CEM II/B-LL 32,5 R	310	0.50	③	C-H	
CEM III/B 42,5 N	310	0.50	④	C-I	
CEM I 42,5 N	310	0.50	①	C-K	

Tabelle 4.1: Bezeichnung der Mischungen; (¹) Zielwert von w/z.

Den Zementsorten werden zur differenzierteren Auswertung Nummern zugewiesen:

- CEM I → Nr. ① (Referenz-Zement)
- CEM II/A → Nr. ②,
- CEM II/B → Nr. ③,
- CEM III → Nr. ④.

4.2 Lagerung der Prüfkörper

Nach der Herstellung der Prüfkörper an der TFB werden die «nass gelagerten» Würfel unter Wasser gelagert und die «trocken gelagerten» Würfel nach einem Tag ausgeschalt und an der Luft gelagert.

Die Betonwürfel wurden zur Prüfung ab Betonalter 28 d an die Hochschule Rapperswil geliefert und dort im Kellergeschoss unterhalb des Baustoffprüflabors gelagert bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Zur Verminderung von Auslaugungen wurden die «nass gelagerten» Würfel in Lösung (mit Calciumhydroxid über die Sättigungsgrenze angereichert) einzeln in Plastik verpackt und im Wasserbad in grossen Tanks eingelagert und periodisch überprüft. Die «trocken gelagerten» Würfel wurden direkt neben den Tanks an der Umgebungsluft gelagert.

Bild 4.1 zeigt den Verlauf der Wassertemperatur (Wasserlagerung, blaue Kurve) und der Lufttemperatur (Trockenlagerung, schwarze Kurve, verzögerter Aufzeichnungsbeginn) im 1. Jahr; Bild 4.2 für die gesamte bisherige Projektdauer. Die schwarz ausgefüllten Kreise ● stehen für die Prüftermine; die Zahlen unter den Kreisen entsprechen dem mittleren Betonalter in [d]. Der weiss ausgefüllte Kreis ○ entspricht dem mittleren Betonierdatum aller Probekörper: 07.02.2015 (± 14 d).

Ab Oktober 2017 wurde ein zusätzlicher Klimasensor vom Typ «Rotronic CL11» installiert, welcher neben der Lufttemperatur (rote Kurve in Bild 4.2) und der relativen Luftfeuchtigkeit (hellgrüne Kurve in Bild 4.3) auch den CO_2 -Gehalt (Bild 4.4) misst. Die Klimakennwerte sind in der Tabelle 4.2 zusammengestellt.

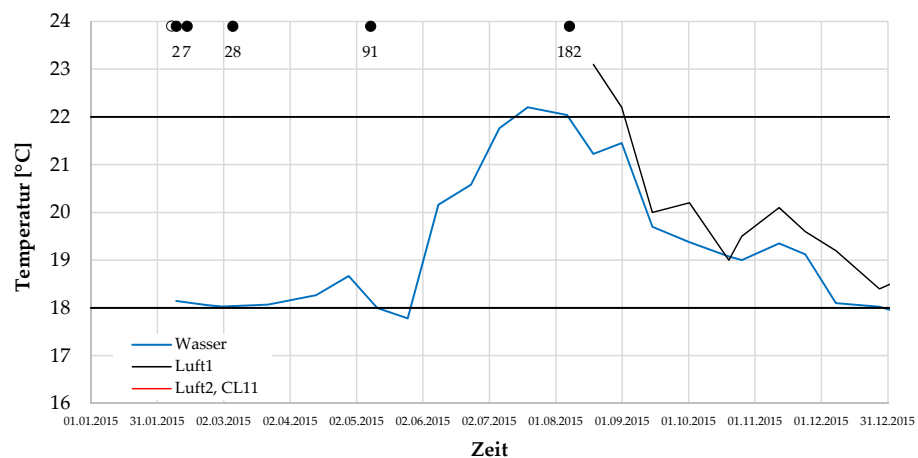


Bild 4.1: Verlauf der Temperatur im Wassertank und an der Luft im 1. Jahr (○ steht für den Betoniertermin, ● für die Prüftermine ± 14 d d.h. die «Terminmitte»); die Lufttemperatur wurde erst ab August 2015 aufgezeichnet.

Die verschiedenen Temperatur-Messwertkurven in Bild 4.2 zeigen eine gute Übereinstimmung. Erwartungsgemäss sind die Extremalwerte der Wassertemperatur kleiner als die der Lufttemperatur. An einzelnen Messtagen wurden die Grenzwerte der Lagerungsbedingungen d.h. $18^\circ\text{C} \leq T \leq 22^\circ\text{C}$ unter- bzw. überschritten. Im Wasserbad betrug

die mittlere Temperatur 19.9°C . In der Umgebungsluft betrug die mittlere Temperatur 19.9°C .

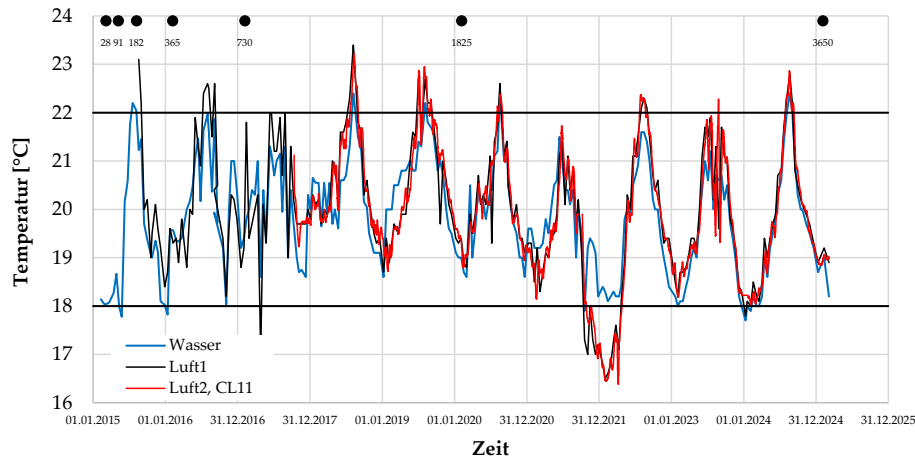


Bild 4.2: Verlauf der Temperatur im Wasser und an der Luft. (● steht für die Prüftermine ± 14 d).

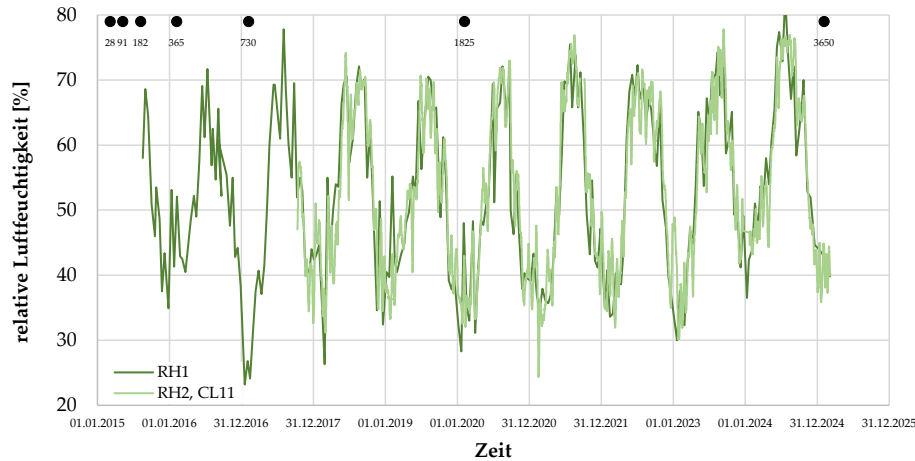


Bild 4.3: Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit. (● steht für die Prüftermine ± 14 d).

	$T_{\text{Wasser}} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{\text{Luft}} [^{\circ}\text{C}]$	RH [%]	$\text{CO}_2\text{-Gehalt [ppm]}$
Maximalwert: HSR / CL11	22.4 / –	23.4 / 23.2	83 / 78	– / 490
Mittelwert: HSR / CL11	19.9 / –	20.0 / 19.9	53 / 53	– / 436
Minimalwert: HSR / CL11	17.7 / –	16.5 / 16.4	23 / 24	– / 391
Stand.-Abw.: HSR / CL11	1.13 / –	1.37 / 1.35	13 / 12	– / 16

Tabelle 4.2: Zusammenstellung der Klimakennwerte

Die beiden RH-Messwertkurven in Bild 4.3 zeigen eine gute Übereinstimmung. Die relative Luftfeuchtigkeit schwankt saisonal und beträgt im Mittel ca. 53%. Der CO_2 -Gehalt schwankt um den Mittelwert 436 ppm, siehe Bild 4.4.

4 Prüfkörperherstellung, Lagerung und Prüfung

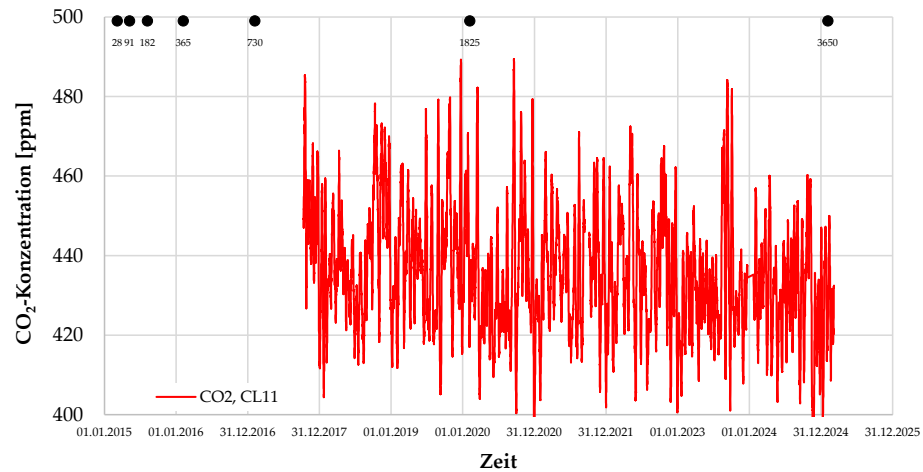


Bild 4.4: Verlauf der CO₂-Konzentration. (● steht für die Prüftermine ±14 d).

4.3 Ermittlung der Betondruckfestigkeit

Die «nass gelagerten» Würfel wurden vor der Prüfung aus dem Wassertank gehoben, aus dem Plastik gepackt, mit Stofftüchern abgetupft und danach an der Luft 2 bis 3 Stunden getrocknet, bis an der Oberfläche keine Feuchtigkeit mehr sichtbar war.

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgte nach [110] mit einer Belastungsgeschwindigkeit von $0.6 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ an den Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm. Im Rahmen der Druckfestigkeitsprüfung konnte auch die Dichte jedes Betonwürfels erhoben werden.

4.4 Ermittlung der Betonzugfestigkeit

Die «nass gelagerten» Würfel wurden vor der Prüfung aus dem Wassertank gehoben, aus dem Plastik gepackt, mit Stofftüchern abgetupft und danach an der Luft 2 bis 3 Stunden getrocknet, bis an der Oberfläche keine Feuchtigkeit mehr sichtbar war.

Die Stempeldruckversuche erfolgten mit einer Belastungsgeschwindigkeit von (bezogen auf die Würfeldruckfläche) $0.06 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ an den Betonwürfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm, d.h. mit einem 1/10 der Belastungsgeschwindigkeit der Würfeldruckversuche. Im Rahmen der Druckfestigkeitsprüfung konnte auch die Dichte jedes Betonwürfels erhoben werden.

4.5 Ermittlung der Karbonatisierungstiefe

Die Karbonatisierungstiefe wurde an den Bruchkörpern der Stempeldruckversuche gemäß [108] mit Phenolphthalein-Indikatorlösung an vier Stellen aller vier Seiten gemessen.

5 Datenaufbereitung

5.1 Druckfestigkeiten

5.1.1 Zeitverlauf der Druckfestigkeit

Die Prüfergebnisse der TFB nach 2 d, 7 d, 28 d und 56 d sowie die Prüfergebnisse der HSR nach 28 d, 91 d 182 d, 1 a, 2 a und 5 a wurden einer ersten groben Auswertung unterzogen. Für den theoretischen Verlauf der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit wurde die Beziehung aus dem Model Code 2010 [102] d.h. Gleichung (1.18) verwendet: Durch Logarithmieren der Gleichung (1.18) lässt sich die zeitabhängige Druckfestigkeitsbeziehung in eine Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ überführen: MC2010, Ziffer 5.1.9

$$\underbrace{\ln(f_{cwm}(t))}_y = \underbrace{s}_a \cdot \underbrace{\left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}_x + \underbrace{\ln(f_{cwm,28d})}_b \quad t \text{ in [d]} \quad (5.1)$$

$$\text{Grenzbetrachtung für } t \rightarrow \infty \quad x = 1 \quad (5.2)$$

Zur Vorbereitung des Betonalter-Druckfestigkeit-Diagramms werden das Betonalter t_i sowie die Druckfestigkeitswerte $f_{cw}(t_i)$ jeder Prüfung i transformiert:

$$x_i = 1 - \sqrt{\frac{28}{t_i}} \quad t_i \text{ in [d]} \quad (5.3)$$

$$y_i = \ln(f_{cw}(t_i))$$

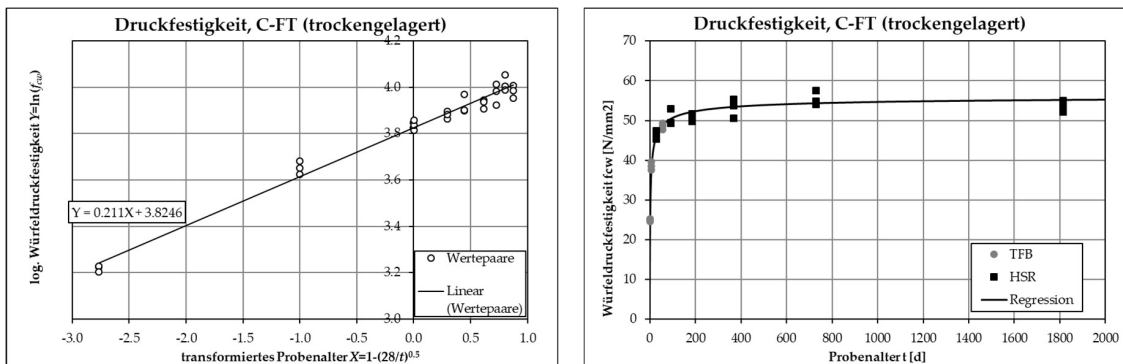


Bild 5.1: Druckfestigkeitsentwicklung: transformierte Wertepaare und Ausgleichsgerade (links); eingepasste Zeitfestigkeit gemäss Gleichung (8.2) in die Prüfergebnisse der Druckfestigkeit (rechts).

5 Datenaufbereitung

Diese Transformation ergibt die Wertepaare x_i/y_i bzw. Punkte im transformierten Betonalter-Druckfestigkeit-Diagramm. Aus der Geradensteigung a der Regressionsgeraden ergibt sich direkt der experimentell ermittelte Faktor

$$s = a \quad (5.4)$$

Aus dem Achsenabschnitt b ergibt sich die über alle Versuchstermine experimentell ermittelte 28 d-Druckfestigkeit

$$f_{cwm,28d} = e^b \quad (5.5)$$

d.h. $f_{cwm,28d}$ ist nicht die Druckfestigkeit, welche im Betonalter $t = 28$ d ermittelt wurde, sondern die Druckfestigkeit, welche über alle Versuchswerte die best-passende Betonalter-Druckfestigkeits-Beziehung ergibt.

5.1.2 Homogenisierung der Druckfestigkeitswerte

Naturgemäss unterscheiden sich Messwerte verschiedener Laboratorien (durch Ringversuche [29]-[37] belegt), siehe auch Abschnitt 2.4. Zur besseren Anpassung bzw. zum besseren Ausgleich überlappen sich die Versuchstermine im Bereich 28 d und 56 d, siehe Bild 5.2 links: die TFB hat nach 2 d und 7 d auch nach 28 d und 56 d Festigkeitsprüfungen durchgeführt. Die HSR hat die Prüfungen nach 28 d (und alle folgenden) durchgeführt.

Die Elimination der Messwertunterschiede erfolgte derart, dass die TFB-Prüfergebnisse unter Beibehaltung der Kurvenform (s_{TFB}) korrigiert wurden, bis diese dieselben 28 d-Festigkeitswerte wie die HSR 28 d-Festigkeitswerte aufwiesen, siehe Bild 5.2:

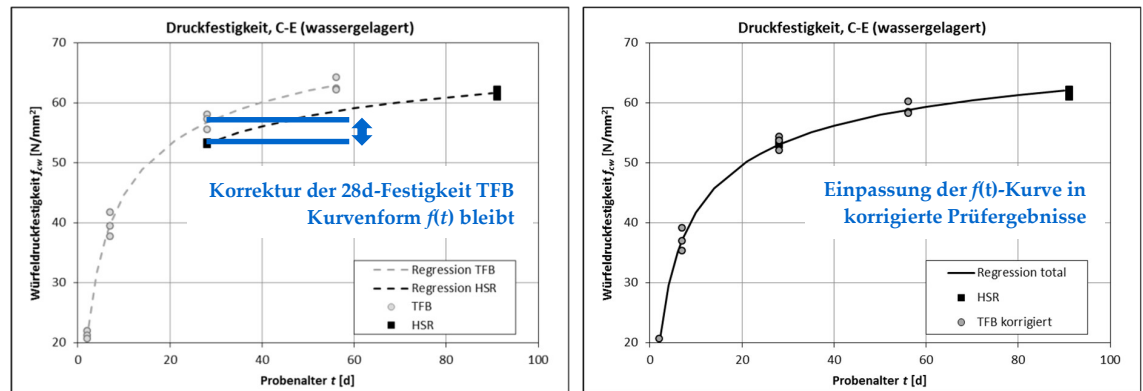


Bild 5.2: Unkorrigierte Prüfergebnisse der TFB und der HSR (links); eingepasste Zeitfestigkeit in die korrigierten Prüfergebnisse (rechts).

Für die TFB-Werte und die HSR-Werte wurden jeweils die Parameter $f_{cwm,28d,TFB}$ bzw. $f_{cwm,28d,HSR}$ und s_{TFB} bzw. s_{HSR} bestimmt. Danach wurden die TFB-Werte unter Beibehaltung von s_{TFB} korrigiert, sodass $f_{cwm,28d,TFB} = f_{cwm,28d,HSR}$ wird.

Mit den nun homogenisierten Prüfergebnissen konnten die best-passenden Zeitverlaufs-funktionen ermittelt und neben den 28 d, 91 d 182 d, 1 a, 2 a und 5 a-Festigkeitswerten auch eine erste Prognose der 10 a-Festigkeitswerte ermittelt werden.

5.2 Zugfestigkeit

Für die Bestimmung der best-passenden Betonalter-Zugfestigkeits-Beziehung wird die Gleichung (1.20) entsprechend dem im Abschnitt 5.1.1 (Gleichungen (5.1) und (5.3)) bzw. dem im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Vorgehen transformiert und die Parameter $f_{ctm,28d}$ und s aus den eingepassten Geradengleichungen ermittelt, siehe Bild 5.3.

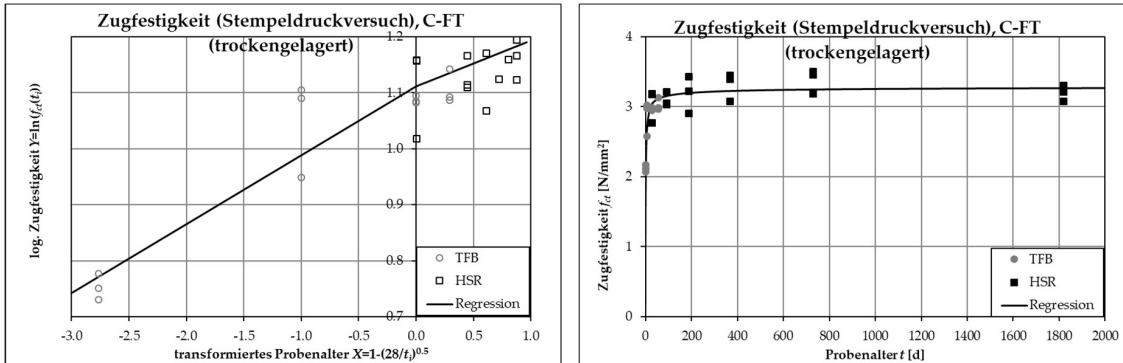


Bild 5.3: Zugfestigkeitsentwicklung: transformierte Wertepaare und Ausgleichsgeraden (links); eingepasste Zeitfestigkeit in die Prüfergebnisse der Zugfestigkeit (rechts).

Aus den Geradensteigungen a_1 für $t < 28$ d bzw. a_2 für $t \geq 28$ d ergeben sich direkt die experimentell ermittelten Faktoren $s = a_1$ bzw. $s \cdot \eta = a_2$. Aus dem für beide Geraden gemeinsamen Achsenabschnitt b (=Knickpunkt) ergibt sich die über alle Versuchstermine experimentell ermittelte 28 d-Zugfestigkeit $f_{ctm,28d} = e^b$.

Die unterschiedlichen Messergebnisse (TFB vs. HSR) der Betonzugfestigkeit werden analog dem im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Verfahren zur Anpassung der Betondruckfestigkeit korrigiert.

5.3 Karbonatisierungstiefe

11	10	11	10
11		11	
13	1825 Tage	9,9	
11	$d_{KM} = 10,3$	11	
11	COV 10%	11	
9,8	9,6	8,4	8,6

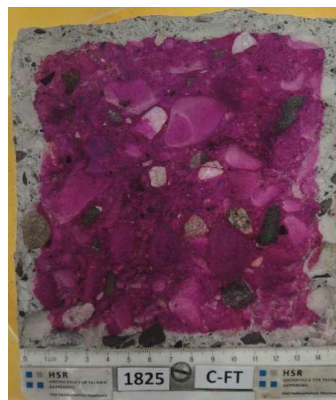


Bild 5.4: Messwerte der Karbonatisierungstiefe [mm] (links); Behandelte Bruchfläche (rechts).

5 Datenaufbereitung

Die Karbonatisierungstiefe d_K wird an den Bruchflächen der Stempeldruckversuche an vier Stellen pro Seite auf allen vier Seiten gemessen, siehe Bild 5.4.

Aus den gemessenen mittleren Karbonatisierungstiefen d_{KM} der Prüftermine wurden mittels linearer Regression (Bild 5.5 links: das Probenalter im \sqrt{t} -Gesetz, unter Annahme $b = 1/2$) die Konstanten A (=Achsenabschnitt der Regressionsgeraden) und K_N (\propto Steigung der Regressionsgeraden) berechnet:

$$d_{KM}(t) = A + K_N \cdot t^b \quad (5.6)$$

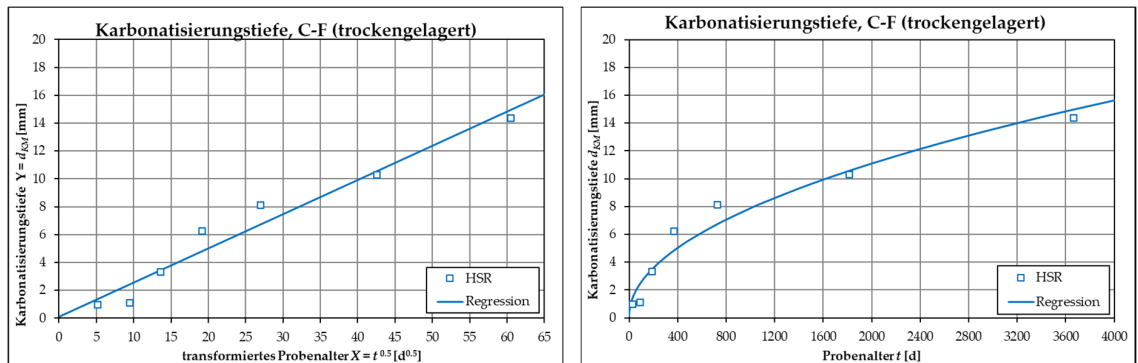


Bild 5.5: Karbonatisierungstiefe: im \sqrt{t} -Gesetz aufgetragen (links), linear aufgetragen (rechts); die Nachbehandlungsdauer (Ausschalfrist) betrug 1 d.

Die Auswertung erfolgt unter Berücksichtigung der Nachbehandlungsdauer (Ausschalfrist) von 1 Tag d.h. das karbonatisierungswirksame Probenalter wird um 1 Tag reduziert.

5.4 Dichte

Die Dichte $\rho(t)$ wird aus dem Gewicht und den geometrischen Abmessungen der Probekörper zum Zeitpunkt der Prüfung bestimmt. Dabei müssen die Ungenauigkeiten bzw. Fehlereinflüsse, wie z.B. die Wägegenauigkeit, die Genauigkeit der Messungen der Probekörpergeometrie und insbesondere der Trocknungsprozess (betrifft die wassergelagerten Würfel) vor dem Einbau in die Prüfmaschine berücksichtigt werden.

Der Verlauf der Dichte über das Probenalter wird mit einer Sättigungsfunktion approximiert, siehe beispielhaft in Bild 5.6:

$$\rho(t) = \rho_0 - \frac{\Delta\rho \cdot t}{t_{0.5} + t} \quad (5.7)$$

Durch invertieren der Gleichung (5.7) lässt sich die zeitabhängige Rohdichte in die Geradengleichung $y = b + a \cdot x$ überführen:

$$\underbrace{\frac{1}{\rho_0 - \rho(t)}}_y = \underbrace{\frac{1}{\Delta\rho}}_b + \underbrace{\frac{t_{0.5}}{\Delta\rho}}_a \cdot \underbrace{\frac{1}{t}}_x \quad (5.8)$$

Aus dem Geradenabschnitt b lässt sich der Grenzwert der Dichtedifferenz $\Delta\rho = 1/b$ und aus der Geradensteigung a lässt sich die Halbwertszeit $t_{0,5} = a/b$ bestimmen.

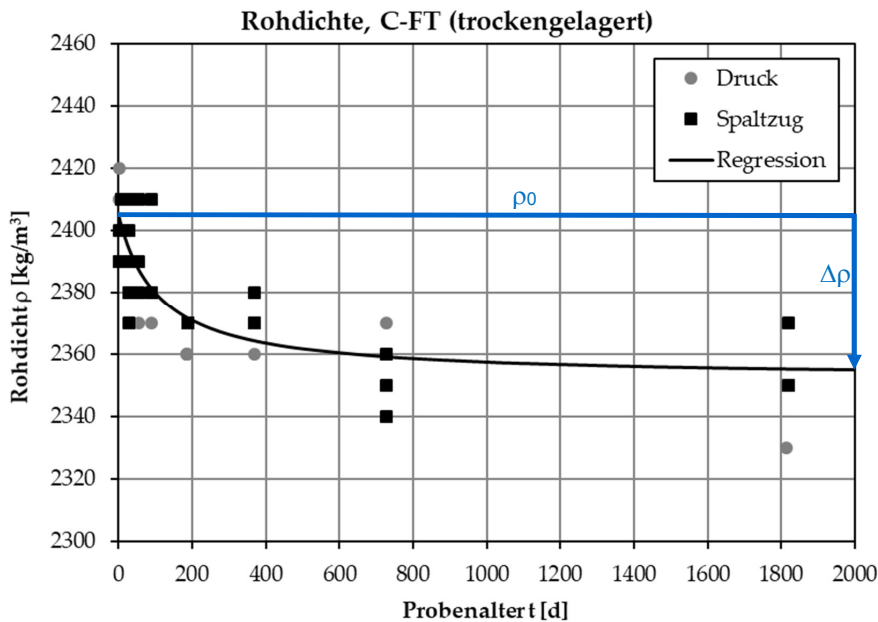


Bild 5.6: Dichte der Würfel C-FT über den Zeitverlauf aufgetragen.

5.5 Ermittlung der Konfidenzintervalle

In den Abschnitten 5.1.1, 5.2 und 5.3 wird aufgezeigt, wie für die Betondruck- und Zugfestigkeit sowie die Karbonatisierungstiefe ein best-passender Zeitverlauf ermittelt wird. Bei allen drei Funktionen können die Wertepaare (Zeitpunkt/Messwert) durch eine vorgängige Variablen-Transformation derart transformiert werden, dass der best-passende Zeitverlauf einer Regressionsgeraden $y(x) = a \cdot x + b$ entspricht.

Das Konfidenzintervall für den Erwartungswert y an der Stelle x ergibt sich gemäss [42] zu

$$y(x) \pm t_{n-2, 1-\alpha/2} \cdot s_{y,x} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (5.9)$$

wobei $t_{n-2, 1-\alpha/2}$ das entsprechende Quantil¹ der t -Verteilung² mit $n - 2$ Freiheitsgraden

¹Der Zahlenwert einer 95%-Quantile bzw. 5%-Quantile mit $v = n - 2 = 28$ Freiheitsgraden beträgt 1.701 bzw. -1.701; für $n \rightarrow \infty$ geht die t -Verteilung in die Gauss'sche Normalverteilung über und der Zahlenwert einer 95%-Quantile bzw. 5%-Quantile beträgt 1.645 bzw. -1.645. Die Quantilen einer t -Verteilung können gemäss [67] mit den Quantilwerten einer Normalverteilung $z(\alpha)$ und dem Freiheitsgrad v approximiert werden: $t_{v, 1-\alpha/2} \approx z(1 - \alpha/2) \cdot (1 + (1 + z^2(1 - \alpha/2))/(4 \cdot v) + \dots)$.

²Die t -Statistik wurde im Jahre 1908 von William Sealy Gosset [84] unter dem Pseudonym «Student» eingeführt.

5 Datenaufbereitung

bezeichnet. Der Standardschätzfehler³ $s_{y,x}$ oder Standardfehler der Voraussage entspricht

$$s_{y,x} = s_y \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n-2} \cdot \left(1 - \frac{s_{xy}^2}{s_x^2 \cdot s_y^2}\right)} \quad (5.10)$$

s_x bzw. s_y bezeichnen die Standardabweichungen in x bzw. y -Richtung, s_{xy} bezeichnet die Kovarianz der Stichprobe. Durch Verwendung des Bestimmtheitsmasses⁴ R^2

$$R^2 = \frac{s_{xy}^2}{s_x^2 \cdot s_y^2} \quad (5.11)$$

kann die Gleichung (5.10) umgeformt werden zu

$$s_{y,x} = s_y \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n-2} \cdot (1 - R^2)} \quad \text{und für grosse Stichproben} \quad s_{y,x} \approx s_y \cdot \sqrt{1 - R^2} \quad (5.12)$$

In Bild 5.7 (links) sind die Regressionsgerade – bezeichnet mit «Mittel» – sowie die Konfidenzgrenzen gemäss Gleichung (5.9) eingezeichnet. Dabei entspricht die Kurve «Max» der 95 %-Quantile und die Kurve «Min» der 5 %-Quantile. In Bild 5.7 (rechts) sind die effektiven Werte und die rücktransformierten Kurven dargestellt.

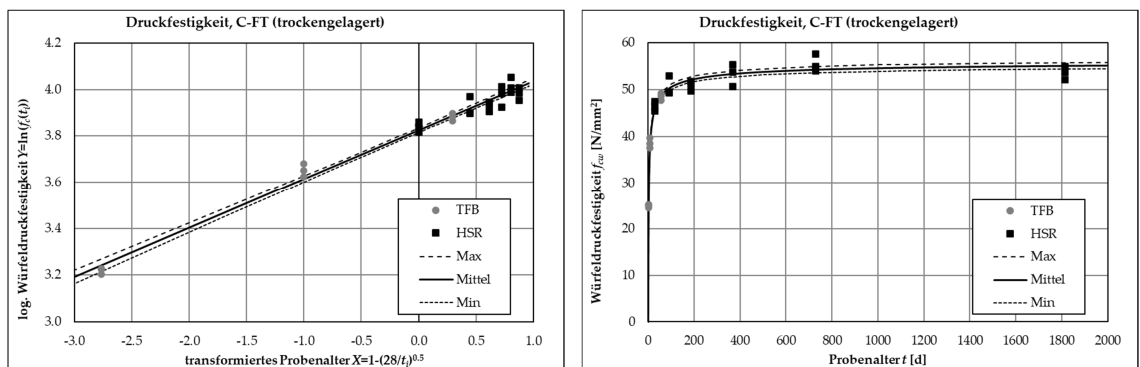


Bild 5.7: Konfidenzintervalle am Beispiel Druckfestigkeit C-FT: transformierte Wertepaare, Ausgleichsgerade und Konfidenzintervalle (links); effektive Werte, Zeitfestigkeit und Konfidenzintervalle (rechts).

³In Excel gibt es dafür den Befehl STFEHLERYX

⁴In Excel gibt es dafür den Befehl BESTIMMTHEITSMASS

6 Diskussion der Prüfergebnisse

6.1 Festigkeitskorrekturen TFB vs HSR

Die Tabelle 6.1 zeigt die Festigkeitsprüfwerte im Alter von 28 d sowie die Korrekturen der Festigkeitswerte (TFB) zur Homogenisierung der Festigkeitswerte, siehe Abschnitt 5.1.2 bzw. Bild 5.2.

Mischung	Druck		Stempel		Mischung	Druck		Stempel	
	$f_{cwm, 28d}$	$f_{ct,DP, 28d}$	$f_{cwm, 28d}$	$f_{ct,DP, 28d}$		$f_{cwm, 28d}$	$f_{ct,DP, 28d}$	$f_{cwm, 28d}$	$f_{ct,DP, 28d}$
	$\Delta f_{cwm, 28d}$ [N/mm ²] [%]	$\Delta f_{ct,DP, 28d}$ [N/mm ²] [%]	$\Delta f_{cwm, 28d}$ [N/mm ²] [%]	$\Delta f_{ct,DP, 28d}$ [N/mm ²] [%]		$\Delta f_{cwm, 28d}$ [N/mm ²] [%]	$\Delta f_{ct,DP, 28d}$ [N/mm ²] [%]	$\Delta f_{cwm, 28d}$ [N/mm ²] [%]	$\Delta f_{ct,DP, 28d}$ [N/mm ²] [%]
A-A	32.4 -0.3 -1.0%	2.4 0.01 0.2%							
A-B	37.4 -0.7 -1.7%	2.6 -0.20 -7.7%	A-BT	36.6 2.6 7.0%	2.5 -0.18 -7.3%				
A-C	31.7 0.0 -0.2%	2.3 0.05 2.4%	A-CT	29.4 0.2 0.8%	2.2 0.22 10.2%				
C-D	54.1 -2.2 -4.0%	3.0 -0.23 -7.5%							
C-E	54.1 -4.5 -8.3%	3.5 -0.27 -7.7%							
C-F	48.1 -1.0 -2.0%	2.9 -0.50 -17.2%	C-FT	45.8 2.1 4.5%	3.0 0.08 2.5%				
C-G	42.1 -2.0 -4.8%	2.6 -0.32 -12.3%	C-GT	39.5 0.7 1.9%	2.5 0.03 1.0%				
C-H	45.5 2.7 6.0%	2.9 -0.12 -4.2%							
C-I	49.4 -1.7 -3.3%	2.8 -0.36 -12.7%							
C-K	48.1 -2.6 -5.4%	2.9 -0.30 -10.5%							

Tabelle 6.1: Zusammenstellung der Festigkeitswerte im Alter von 28 d.

In Tabelle 6.2 sind die mittleren Korrekturen der Festigkeitswerte im Alter von 28 d entsprechend dem im Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Verfahren zusammengestellt.

6 Diskussion der Prüfergebnisse

Sorte	Nass		Trocken	
	$\Delta f_{cwm, 28d}$	$\Delta f_{ct, DP, 28d}$	$\Delta f_{cwm, 28d}$	$\Delta f_{ct, DP, 28d}$
A				
Mittel [N/mm ²]	-0.3	-0.05	1.4	0.02
Mittel [%]	-1.0%	-1.7%	3.9%	1.4%

Sorte	Nass		Trocken	
	$\Delta f_{cwm, 28d}$	$\Delta f_{ct, DP, 28d}$	$\Delta f_{cwm, 28d}$	$\Delta f_{ct, DP, 28d}$
C				
Mittel [N/mm ²]	-1.6	-0.30	1.4	0.05
Mittel [%]	-3.1%	-10.3%	3.2%	1.8%

Sorte	Nass		Trocken	
	$\Delta f_{cwm, 28d}$	$\Delta f_{ct, DP, 28d}$	$\Delta f_{cwm, 28d}$	$\Delta f_{ct, DP, 28d}$
A & C				
Mittel [N/mm ²]	-1.2	-0.2	1.4	0.03
Mittel [%]	-2.7%	-8.2%	3.5%	1.6%

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Korrekturen Festigkeitswerte im Alter von 28 d.

Die Korrekturwerte der Druckfestigkeiten liegen im Bereich der begründbaren Unterschiede zwischen Prüfwerten verschiedener Laboratorien, siehe [29]-[37] bzw. Abschnitt 2.4.2.

6.2 Festigkeitszunahmen über 10 Jahre

6.2.1 Prüfergebnisse

Mischung	Alter		Druck		Mischung	Alter		Druck	
	t	t	$f_{cwm}(t)$	$f_{ct, DP}(t)$		t	t	$f_{cwm}(t)$	$f_{ct, DP}(t)$
	[d]	[a]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		[d]	[a]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
A-A	28	0.08	32.4	2.4	A-BT	28	0.08	36.6	2.5
	3671	10.0	41.4	2.9		3669	10.0	45.6	2.9
A-B	28	0.08	37.4	2.6	A-CT	28	0.08	29.4	2.2
	3669	10.0	46.6	3.2		3673	10.0	37.7	2.4
A-C	28	0.08	31.7	2.3	C-D	28	0.08	54.1	3.0
	3673	10.0	42.9	3.0		3668	10.0	63.5	3.5
C-D	28	0.08	54.1	3.0	C-E	28	0.08	54.1	3.5
	3668	10.0	63.5	3.5		3666	10.0	76.5	4.4
C-E	28	0.08	54.1	3.5	C-F	28	0.08	48.1	2.9
	3666	10.0	76.5	4.4		3663	10.0	59.9	3.6
C-F	28	0.08	48.1	2.9	C-GT	28	0.08	39.5	2.5
	3663	10.0	59.9	3.6		3678	10.0	48.4	2.8
C-G	28	0.08	42.1	2.6	C-H	28	0.08	45.5	2.9
	3678	10.0	55.0	3.3		3676	10.0	56.0	3.6
C-H	28	0.08	45.5	2.9	C-I	28	0.08	49.4	2.8
	3676	10.0	56.0	3.6		3664	10.0	78.4	4.1
C-I	28	0.08	49.4	2.8	C-K	28	0.08	48.1	2.9
	3664	10.0	78.4	4.1		3676	10.0	62.4	3.6

Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Festigkeitswerte im Betonalter von 28 d und 10 Jahren.

Die Tabelle 6.3 zeigt die aus den best-passenden Betonalter-Festigkeits-Beziehungen berechneten Druck- und Zugfestigkeitswerte im Betonalter von 28 d und 10 Jahren.

Die Erhärtungsgeschwindigkeit ist erheblich von der Zementart bzw. der Betonrezeptur und von der Lagerungsart abhängig. Weiter sind die Erhärtungsgeschwindigkeiten von Druck- und Zugfestigkeit nicht synchron, siehe Tabelle 6.4.

Mischung	Alter	Alter	Druck		Stempel		Mischung	Alter	Alter	Druck		Stempel	
	t	t	$f_{cwm}(t) / f_{cwm}(28d)$	$f_{ct,DP}(t) / f_{ct,DP}(28d)$	$f_{cwm}(t) / f_{cwm}(28d)$	$f_{ct,DP}(t) / f_{ct,DP}(28d)$		t	t	$f_{cwm}(t) / f_{cwm}(28d)$	$f_{ct,DP}(t) / f_{ct,DP}(28d)$	$f_{cwm}(t) / f_{cwm}(28d)$	$f_{ct,DP}(t) / f_{ct,DP}(28d)$
	[d]	[a]	[-]	[-]			[d]	[a]	[-]	[-]			
A-A	3671	10.0	1.26	1.19									
A-B	3669	10.0	1.24	1.24	A-BT	3669	10.0	1.23	1.13				
A-C	3673	10.0	1.34	1.27	A-CT	3673	10.0	1.27	1.12				
C-D	3668	10.0	1.17	1.16									
C-E	3666	10.0	1.39	1.27									
C-F	3663	10.0	1.23	1.24	C-FT	3664	10.0	1.20	1.08				
C-G	3678	10.0	1.29	1.26	C-GT	3678	10.0	1.22	1.11				
C-H	3676	10.0	1.22	1.23									
C-I	3664	10.0	1.56	1.46									
C-K	3676	10.0	1.28	1.22									

Tabelle 6.4: Festigkeitszunahme nach 10 Jahren.

6.2.2 Druck-Festigkeiten

Die auf die 28 d bezogene Druckfestigkeit nimmt im Mittel über alle Mischungen nach zehn Jahren im Wasser um 30 % und an der Luft um 23 % zu, siehe Tabelle 6.5. Die mittlere Nacherhärtung ist an der Luft ca. 5 % geringer und damit vergleichbar mit derjenigen der Wasserlagerung.

		Nass		Trocken	
		$f_{cwm}(t) / f_{cwm}(28d)$	$f_{ct,DP}(t) / f_{ct,DP}(28d)$	$f_{cwm}(t) / f_{cwm}(28d)$	$f_{ct,DP}(t) / f_{ct,DP}(28d)$
		[-]	[-]	[-]	[-]
		Druck	Stempel	Druck	Stempel
10a	Mittelwert	1.30	1.25	1.23	1.11
	Standardabweichung	0.111	0.080	0.028	0.025
	COV	8.5%	6.4%	2.3%	2.2%

Tabelle 6.5: Zusammenstellung der relativen Festigkeitszunahme nach 10 Jahren.

Die Festigkeitszunahme wird durch den s -Faktor beschrieben. In Tabelle 6.6 sind die der Zementsorte entsprechenden s -Faktoren (gemäss Tabelle 1.2) den experimentell ermittelten s -Faktoren gegenübergestellt. Für die farbliche Zuordnung wurden die folgenden Grenzen gewählt:

$$\begin{aligned}
 0.225 &\geq s &\implies & \text{schnell erhärtender Zement} \\
 0.225 &< s < 0.315 &\implies & \text{normal erhärtender Zement} \\
 0.315 &\leq s &\implies & \text{langsam erhärtender Zement}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Der Vergleich der s -Faktoren in Tabelle 6.6 zeigt, dass 5 nass gelagerte Betone und 2 trocken gelagerte Betone der «Norm-Kategorie» entsprechen – die übrigen 7 Betone nicht.

6 Diskussion der Prüfergebnisse

Die Festigkeitszunahme ist nicht alleine von der Zementsorte abhängig und kann aus diesem Grund nicht ausreichend mit dem «s-Konzept» beschrieben werden. Zeman et al. [97] stellen nach Auswertung eigener Versuchen fest, dass die Beschreibbarkeit des Betondruckverlaufs auf Basis des Zements alleine nicht machbar ist und bestätigen die Folgerungen dieses Projekts. Die Notwendigkeit von Zuordnungsregeln (siehe Gleichung (6.1)) zeigt zudem eine weitere Schwäche des «s-Konzeptes» auf.

Betonsorte	Mischung	s -Norm	s -experimentell	
			Nass	Trocken
A	CEM II/B-LL 32,5 R	0.25	0.267	
	CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	0.25	0.243	0.239
	CEM II/A-LL 42,5 N	0.25	0.331	0.271
C	CEM II/A-LL 52,5 N	0.20	0.182	
	CEM II/B-M (S-T) 42,5 R	0.20	0.380	
	CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	0.25	0.239	0.211
	CEM II/A-LL 42,5 N	0.25	0.294	0.223
	CEM II/B-LL 32,5 R	0.25	0.226	
	CEM III/B 42,5 N	0.25	0.507	
	CEM I 42,5 N	0.25	0.284	

Legende

s = 0.38	langsam
s = 0.25	mittel
s = 0.20	schnell

Tabelle 6.6: Vergleich der s-Faktoren: normative Werte vs. aus der Versuchsergebnissen (über 10 Jahre) berechnete Werte.

6.2.3 Zug-Festigkeiten

Die auf die 28 d bezogene Zugfestigkeit nimmt im Mittel über alle Mischungen nach zehn Jahren im Wasser um 25 % und an der Luft um 11 % zu, siehe Tabelle 6.5. Die mittlere Nacherhärtung ist an der Luft knapp 12 % geringer und damit deutlich kleiner als die der Wasserlagerung. Die gegenüber der Druckfestigkeit kleinere Nacherhärtung ist einerseits auf die reduzierte Nachhydratation des Zementsteins und andererseits durch schwindinduzierte Eigenspannungen zu erklären, siehe auch Abschnitt 3.3.

6.3 Zusammenhang von Druckfestigkeit und Zugfestigkeit

6.3.1 In der Forschung verwendeter Ansatz

		Sorte A		Sorte C	
		$f_{ct}(f_{ct,DP}) / f_{ct}(f_{cwm})$		$f_{ct}(f_{ct,DP}) / f_{ct}(f_{cwm})$	
		Nass	Trocken	Nass	Trocken
28d	Mittelwert	0.88	0.87	0.83	0.87
	Standardabw	0.02	0.00	0.05	0.05
	Variationskoeff	3%	0%	5%	6%
10a	Mittelwert	0.93	0.88	0.88	0.87
	Standardabw	0.01	0.02	0.04	0.04
	Variationskoeff	1%	2%	5%	4%

Tabelle 6.7: Zusammenstellung der Festigkeitszunahme mit dem Mittelwert Druckfestigkeit f_{cwm} gemäss Gleichung (3.12).

6.3 Zusammenhang von Druckfestigkeit und Zugfestigkeit

Wird der in der Forschung verwendete Ansatz gemäss Gleichung (3.12) angewendet, zeigt sich eine Überschätzung der rechnerischen Zugfestigkeit bei Wasserlagerung (bezogen auf 28 d) und an der Luft um ca. 10 %, siehe Tabelle 6.7. Die Zugfestigkeitsverhältnisse betragen $f_{ct}(f_{ct,DP})/f_{ct}(f_{cwm}) = 0.83 \dots 0.93$.

6.3.2 Zusammenhang mit angepasster charakteristischer Druckfestigkeit

		Sorte	
		$f_{ct}(f_{ct,DP})/f_{ct}(f_{cwm})$	
		A	
		Nass	Trocken
28d	Mittelwert	1.07	1.06
	Standardabw	0.04	0.03
	Variationskoeff	3%	2%
10a	Mittelwert	1.07	1.04
	Standardabw	0.01	0.00
	Variationskoeff	1%	0%

		Sorte	
		$f_{ct}(f_{ct,DP})/f_{ct}(f_{cwm})$	
		C	
		Nass	Trocken
28d	Mittelwert	0.96	1.02
	Standardabw	0.05	0.04
	Variationskoeff	5%	4%
10a	Mittelwert	0.98	1.00
	Standardabw	0.05	0.03
	Variationskoeff	5%	3%

		Nummer	
		$f_{ct}(f_{ct,DP})/f_{ct}(f_{cwm})$	
		1	
		Nass	Trocken
28d	Mittelwert	0.95	
	Standardabw		
	Variationskoeff		
10a	Mittelwert	0.95	
	Standardabw		
	Variationskoeff		

		Nummer	
		$f_{ct}(f_{ct,DP})/f_{ct}(f_{cwm})$	
		2	
		Nass	Trocken
28d	Mittelwert	0.97	1.03
	Standardabw	0.09	0.06
	Variationskoeff	9%	6%
10a	Mittelwert	0.98	1.01
	Standardabw	0.07	0.05
	Variationskoeff	7%	5%

		Nummer	
		$f_{ct}(f_{ct,DP})/f_{ct}(f_{cwm})$	
		3	
		Nass	Trocken
28d	Mittelwert	1.03	1.04
	Standardabw	0.06	0.01
	Variationskoeff	6%	1%
10a	Mittelwert	1.05	1.03
	Standardabw	0.03	0.02
	Variationskoeff	3%	2%

		Nummer	
		$f_{ct}(f_{ct,DP})/f_{ct}(f_{cwm})$	
		4	
		Nass	Trocken
28d	Mittelwert	0.91	
	Standardabw		
	Variationskoeff		
10a	Mittelwert	0.94	
	Standardabw		
	Variationskoeff		

Tabelle 6.8: Zusammenstellung der Festigkeitszunahme mit der charakteristischen Druckfestigkeit gemäss Gleichungen (3.13) und (2.7): oben nach den Sorten A und C, unten nach den Zementsorten bzw. Nummern ① bis ④.

Wird nun die Betonzugfestigkeit mit den Gleichungen (3.13) und (2.7) berechnet, zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten sowohl bei beiden Sorten (A und C) und bei beiden Lagerungsarten (nass und trocken), siehe Tabelle 6.8.

Bild 6.1 vergleicht die experimentell ermittelten Zugfestigkeiten $f_{ct,exp}(t_i)$ der nass gelagerten Prüfkörper mit den berechneten Zugfestigkeiten mit den Gleichungen (3.13) und (2.7). Dabei werden die Zugfestigkeiten aller Betonalter t_i d.h. von 2 Tage bis 10 Jahre verwendet. Optisch zeigt sich eine gute Übereinstimmung für die Betone der Sorten A und C, siehe auch Tabelle 6.8.

Trägt man die verschiedenen Verhältniswerte $f_{ct,exp}/f_{ct,calc}$ über das Betonalter t bzw. ab $t \geq 28$ d auf, zeigt sich bei den nass gelagerten Prüfkörpern eine Zunahme zwischen 14 % und 17 %, siehe Bild 6.2.

6 Diskussion der Prüfergebnisse

Bild 6.3 vergleicht die experimentell ermittelten Zugfestigkeiten $f_{ct,exp}(t_i)$ der trocken gelagerten Prüfkörper mit den berechneten Zugfestigkeiten mit den Gleichungen (3.13) und (2.7). Optisch zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung für alle 4 Mischungen.

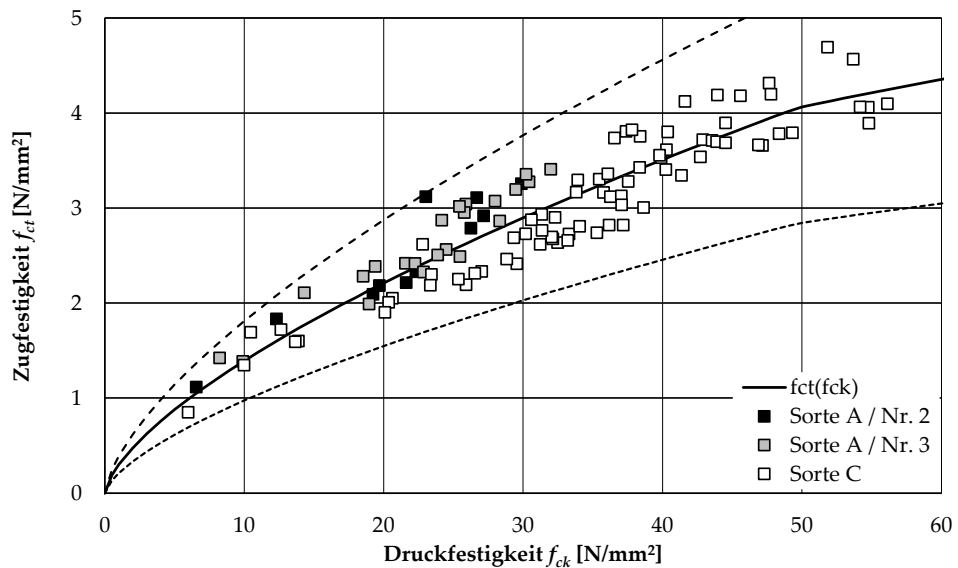


Bild 6.1: Vergleich der Gleichung (3.13) mit den Versuchsergebnissen der nass gelagerten Prüfkörper; die beiden strichlierten Linien zeigen die 5%- bzw. 95%-Quantilen der Zugfestigkeit gemäss den Gleichungen (7) und (8) der Norm SIA 262 [114].

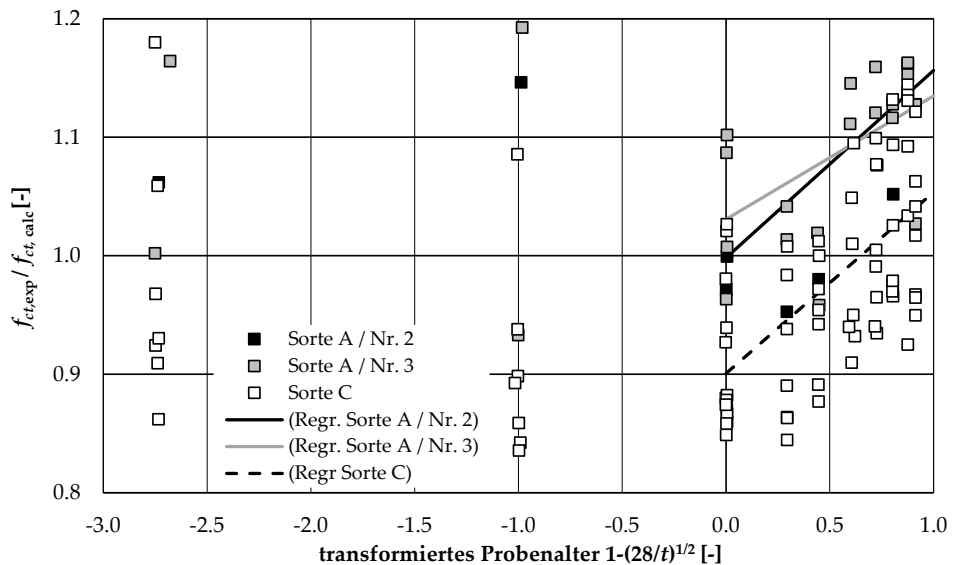


Bild 6.2: Einfluss des Probenalters t auf $f_{ct,exp}/f_{ct,calc}$ der nass gelagerten Prüfkörper.

Trägt man die verschiedenen Verhältniswerte $f_{ct,exp}/f_{ct,calc}$ über das Betonalter t bzw. ab $t \geq 28$ d auf, zeigt sich bei der Mischung A-BT eine leichte Zunahme von 0.7% und bei den anderen trocken gelagerten Mischungen eine Abnahme zwischen 3% und 5%, siehe Bild 6.4. Insgesamt liegen die Regressionsgeraden über das Betonalter $t \geq 28$ d sehr nahe

6.4 Vereinfachte Bestimmung der Double Punch Betonzugfestigkeit

bei $f_{ct,exp}/f_{ct,calc} \approx 1.0$.

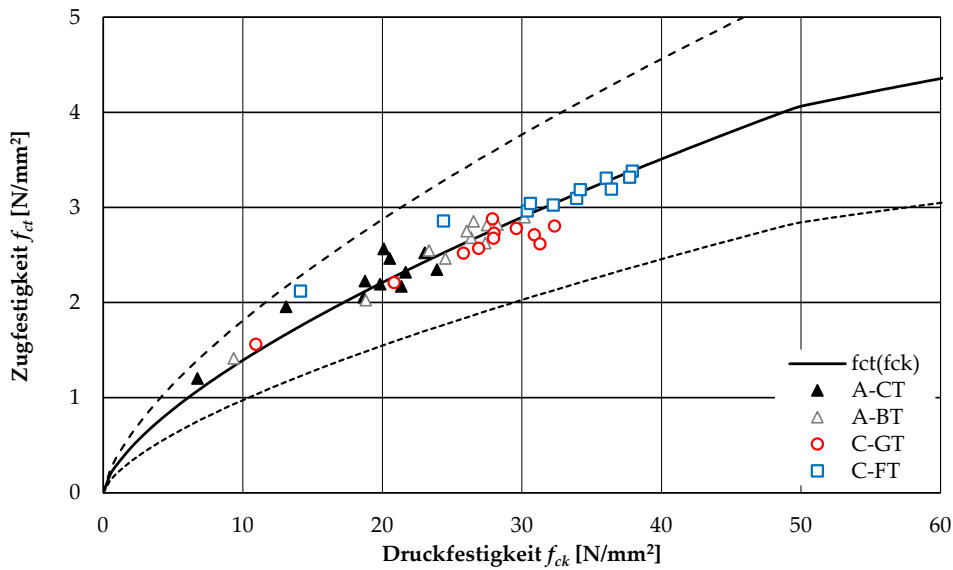


Bild 6.3: Vergleich der Gleichung (3.13) mit den Versuchsergebnissen der trocken gelagerten Prüfkörper; die beiden strichlierten Linien zeigen die 5%- bzw. 95%-Quantilen der Zugfestigkeit gemäss den Gleichungen (7) und (8) der Norm SIA 262 [114].

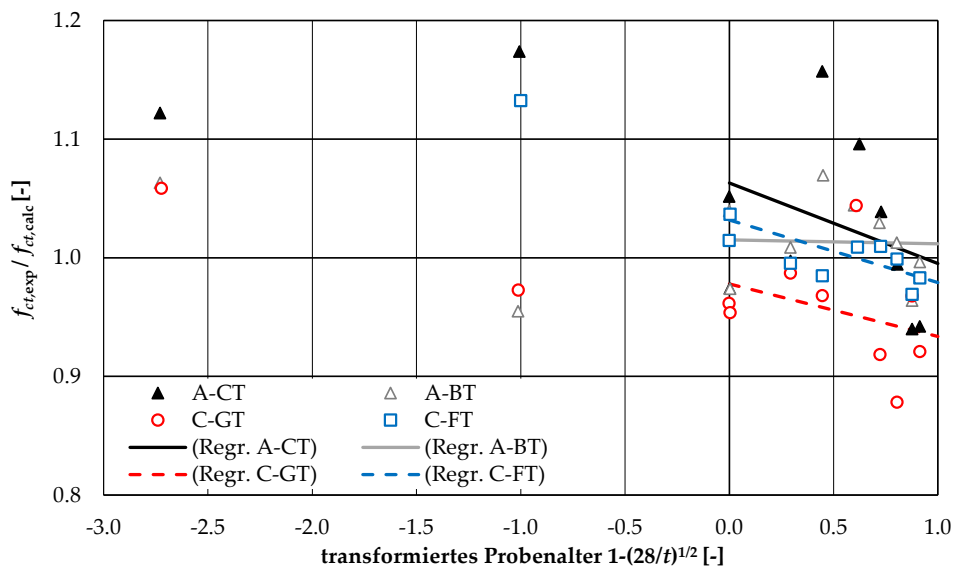


Bild 6.4: Einfluss des Probenalters t auf $f_{ct,exp}/f_{ct,calc}$ der trocken gelagerten Prüfkörper.

6.4 Vereinfachte Bestimmung der Double Punch Betonzugfestigkeit

Eine Auswertung aller 924 Würfelabmessungen ergibt erwartungsgemäss eine mittlere Breite bzw. Tiefe der Würfel von $149.83 \text{ mm} \pm 0.38 \%$ bzw. $149.92 \text{ mm} \pm 0.34 \%$ sowie eine

6 Diskussion der Prüfergebnisse

mittlere Einfüll-Höhe von $149.79 \text{ mm} \pm 0.55 \%$. Auf Grund der geringen Streuungen der Würfel-Abmessungen und dem Umstand, dass die experimentelle Bestimmung der Betonzugfestigkeit ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet ist, kann die Betonzugfestigkeit auf Basis der Gleichungen (3.5) und (3.6) sowie $h = 2b = 8a = 150 \text{ mm}$ wie folgt bestimmt werden

$$f_{ct} = f_{ct,DP} \approx \frac{F_u \text{ [N]}}{41\,300 \text{ mm}^2} \quad (6.2)$$

Die Auswertung aller 462 in diesem Projekt durchgeführten Double Punch Versuche zeigt, dass das Verhältnis der Betonzugfestigkeiten gemäss Gleichung (6.2) zu den «exakteren» Werten gemäss Gleichung (3.5) im Mittel $0.999 \pm 0.52 \%$ beträgt. Die vereinfachte Bestimmung der Betonzugfestigkeit $f_{ct,DP}$ gemäss Gleichung (6.2) kann praktisch ohne Verlust an Aussagekraft verwendet werden¹.

6.5 Karbonatisierungstiefe

Bild 6.5 zeigt den Vergleich aller Karbonatisierung-Regressionskurven; die Konstanten A und K_N sind in Tabelle 6.9 zusammengestellt. Die Kurven von A-BT und C-GT sind beinahe identisch; die Kurve A-CT tendiert zu den grössten Karbonatisierungstiefen und die Kurve C-FT zu den kleinsten Karbonatisierungstiefen, siehe Bild 6.7.

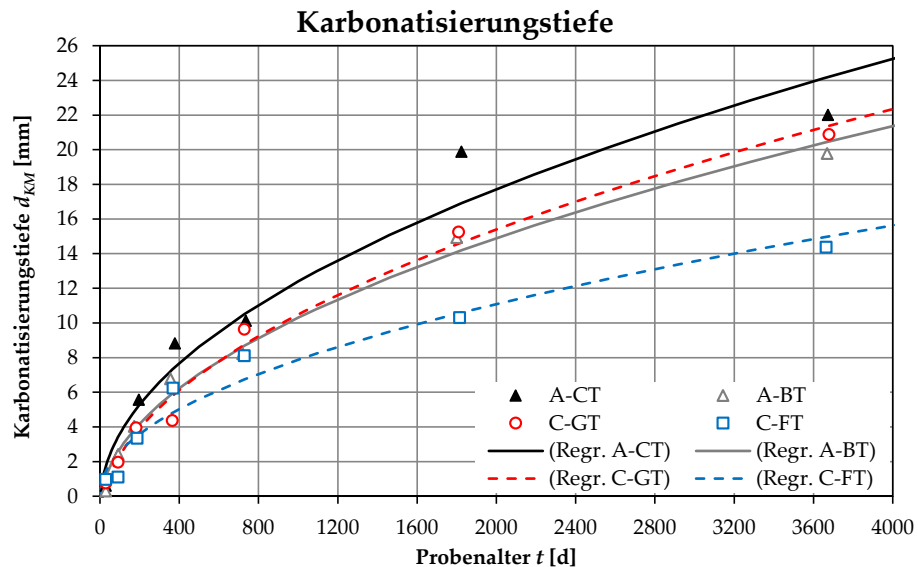


Bild 6.5: Vergleich der Karbonatisierung-Regressionskurven.

¹Die Gleichung (6.2) kann für Würfel mit einer Seitenlänge von 100 mm wie folgt angepasst werden: $f_{ct} = f_{ct,DP} \approx F_u \text{ [N]}/18\,300 \text{ mm}^2$ bzw. für Würfel mit Seitenlänge 200 mm $f_{ct} = f_{ct,DP} \approx F_u \text{ [N]}/73\,400 \text{ mm}^2$.

Mischung	Alter		Karbonat.	
	t	t	$d_K(t)$	A [mm]
	[d]	[a]	[mm]	K_N [mm/Jahr ^{0.5}]
A-BT	28	0.08	0.30	-0.8
	3669	10.00	19.8	6.70
A-CT	28	0.08	0.61	-0.5
	3673	10.00	22.0	7.77
C-FT	28	0.08	0.98	0.1
	3664	10.00	14.4	4.69
C-GT	28	0.08	0.77	-1.4
	3678	10.00	20.9	7.17

erst ab 180d
A [mm]
K_N [mm/Jahr ^{0.5}]
0.0
6.38
1.2
7.06
1.5
4.12
-1.4
7.18

Tabelle 6.9: Zusammenstellung der Karbonatisierungskennwerte nach 28 d und 10 Jahren.

Zur Kontrolle, ob das \sqrt{t} -Gesetz gültig ist, werden die Karbonatisierungskoeffizienten in Anlehnung an [45] nach dem in [38] beschriebenen Verfahren wie folgt bestimmt:

$$K(t_i) = \frac{d_{KM}(t_i)}{\sqrt{t_i}} \quad t \text{ in [Jahre]}, \quad d_{KM} \text{ in [mm]} \quad (6.3)$$

Gemäss Bild 6.6 sind die mit Gleichung (6.3) berechneten Werte nach 28 d und 91 d «zu tief». Durch die Lagerung der Betonwürfel im Keller unterhalb des Labors war das Angebot an «frischer Luft» zu Beginn der Lagerungszeit unter Umständen zu klein, weil die CO₂-Konzentration durch die Karbonatisierung der vielen Prüfkörper unter das «normale» Niveau gesunken sein könnte.

Für eine weitere Analyse werden die Messwerte im Betonalter von 28 d und 91 d gestrichen bzw. nicht berücksichtigt und die Karbonatisierungskoeffizienten tendieren danach zu einem mehr oder weniger konstanten Wert (siehe Bild 6.7), d.h. das \sqrt{t} -Gesetz ist damit bestätigt.

Die Mittelwerte aus den letzten 5 Messkampagnen (182 d, 1 a, 2 a, 5 a und 10 a) sind unter den HSR Labor-Bedingungen wohl die «wahren» Karbonatisierungskoeffizienten \bar{K} der einzelnen Betone, siehe Tabelle 6.10.

Beton	\bar{K} [mm/a ^{0.5}]
A-BT	6.3 ± 0.5
A-CT	7.9 ± 0.9
C-FT	5.3 ± 0.8
C-GT	5.9 ± 1.1

Tabelle 6.10: Mittlere Karbonatisierungskoeffizienten gemäss Bild 6.7.

Die Karbonatisierungskoeffizienten sind aufgrund der sehr kurzen Nachbehandlungsdauer (Ausschalzeit) von 1 Tag hoch. Die Mittelwerte der Betonsorten C-FT und C-GT liegen über dem Grenzwert der Mittelwerte gemäss der Tabelle NA.14 der SN EN 206 [117]²:

²Die Grenzwerte fussen auf den Untersuchungen von Hunkeler et al. [46], [45].

6 Diskussion der Prüfergebnisse

$K_N \leq 5.0 \text{ mm/a}^{0.5}$. Der Einfluss der Nachbehandlungsdauer auf die Karbonatisierung ist in [46] beschrieben.

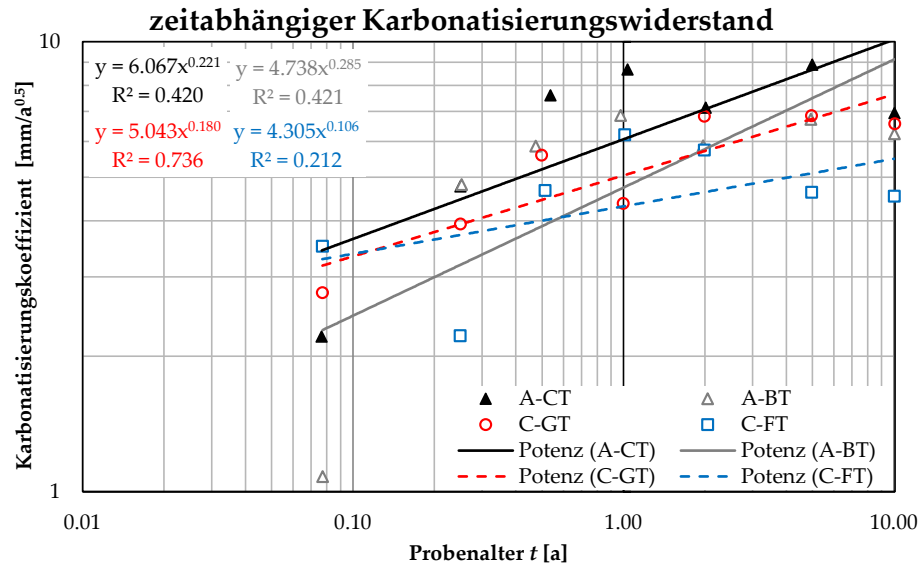


Bild 6.6: Vergleich der Karbonatisierung-Regressionskurven inkl. Messwerte nach 28 d und 91 d; im doppelt-logarithmischen Masstab.

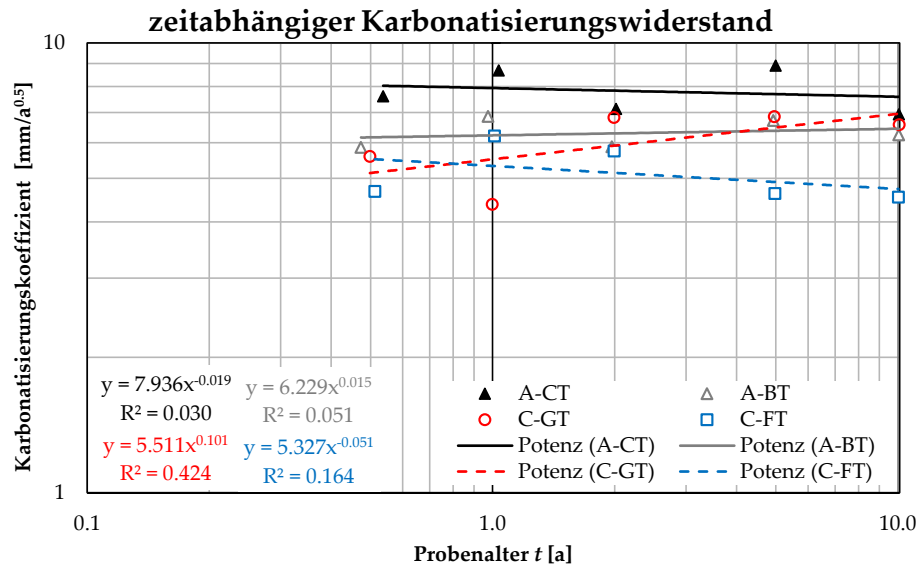


Bild 6.7: Vergleich der Karbonatisierung-Regressionskurven ohne Messwerte nach 28 d und 91 d; im doppelt-logarithmischen Masstab.

Die Zuverlässigkeit der auf zehn Jahre extrapolierten Karbonatisierungstiefen ist aufgrund der kurzen Nachbehandlungsdauer und der Messgenauigkeit [52] mit Vorbehalt zu beurteilen. Trotzdem zeigt sich ein Unterschied der Betonsorten A und C. Während nach zehn Jahren bei der Sorte A mit einer prognostizierten Karbonatisierungstiefe $d_k(10 \text{ a}) = 22 \text{ mm} \dots 25 \text{ mm}$ zu rechnen ist, beträgt die Prognose bei der Sorte C $d_k(10 \text{ a}) = 16 \text{ mm} \dots 22 \text{ mm}$.

6.6 Dichte

Die trocken gelagerten Würfel haben erwartungsgemäss im Verlauf der 10 Jahre im Mittel ca. 52 kg/m^3 Dichte bzw. Wasser verloren, siehe Tabelle 6.11. Die mittlere Dichte hat von 2401 kg/m^3 auf 2349 kg/m^3 abgenommen.

Auch die nass gelagerten Würfel haben im Verlauf der 10 Jahre im Mittel ca. 20 kg/m^3 Dichte verloren, d.h. die mittlere Dichte hat von 2435 kg/m^3 auf 2414 kg/m^3 abgenommen. Der Masseverlust kann einerseits auf die ungefähre Trocknung der Prüfkörper vor der Wägung zurückgeführt werden, siehe Abschnitte 4.3 bzw. 4.4. Andererseits ist zu vermuten, dass trotz der Lagerung in mit Calciumhydroxid übersättigtem Wasser und zusätzlicher Verpackung in Plastik eine gewisse Auslaugung nicht verhindert werden konnte.

Mischung	Alter		Rohdichte		Mischung	Alter		Rohdichte	
	t	t	$\rho(t)$	$\Delta\rho(t)$		t	t	$\rho(t)$	$\Delta\rho(t)$
	[d]	[a]	$[\text{kg/m}^3]$	$[\text{kg/m}^3]$		[d]	[a]	$[\text{kg/m}^3]$	$[\text{kg/m}^3]$
A-A	0	0.00	2394						
	28	0.08	2390	4					
	3671	10.1	2375	19					
A-B	0	0.00	2414		A-BT	0	0.00	2388	
	28	0.08	2404	12		28	0.08	2371	17
	3669	10.1	2396	19		3669	10.1	2330	58
A-C	0	0.00	2414		A-CT	0	0.00	2389	
	28	0.08	2414	0		28	0.08	2374	15
	3673	10.1	2405	8		3673	10.1	2337	53
C-D	0	0.00	2427						
	28	0.08	2427	0					
	3668	10.0	2427	1					
C-E	0	0.00	2443						
	28	0.08	2437	6					
	3666	10.0	2429	14					
C-F	0	0.00	2433		C-FT	0	0.00	2404	
	28	0.08	2429	4		28	0.08	2394	10
	3663	10.0	2420	13		3664	10.0	2355	49
C-G	0	0.00	2452		C-GT	0	0.00	2423	
	28	0.08	2445	7		28	0.08	2406	17
	3678	10.1	2435	18		3678	10.1	2375	48
C-H	0	0.00	2500						
	28	0.08	2419	81					
	3676	10.1	2418	82					
C-I	0	0.00	2424						
	28	0.08	2423	0					
	3664	10.0	2407	17					
C-K	0	0.00	2444						
	28	0.08	2438	6					
	3676	10.1	2430	14					

Tabelle 6.11: Zusammenstellung der Rohdichten nach 28 d und 10 Jahren.

7 r-Konzept

7.1 Einleitung

Die Beschreibung der Festigkeitsentwicklung mit der Gleichung (1.18) ist seit Jahrzehnten gebräuchlich, siehe Abschnitt 1.4. Die Festigkeit $f_{cm,28d}$ skaliert die Festigkeitsentwicklung auf das Betonalter 28 d; der Parameter s beschreibt die Form der Zeitfunktion¹

$$e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad t \text{ in [d]} \quad (7.1)$$

Dabei stützt sich die Bestimmung des Parameters s «nur» auf die Zementsorte, siehe Tabelle 1.2. Der Vergleich der s -Faktoren in Tabelle 6.6 zeigt, dass 6 nass gelagerte Betone und 2 trocken gelagerte Betone der «Norm-Kategorie» entsprechen – die übrigen 6 Betone nicht. Um die Festigkeitsentwicklung von Beton zu beschreiben, sollte sich die Bestimmung der Zeitfunktion an den zeitabhängigen Festigkeitswerten von Beton orientieren. Nachfolgend wird aufgezeigt, wie dies geschehen könnte.

7.2 Festigkeitsentwicklung auf der Basis von s

Wird die etablierte Zeitfunktion gemäss Gleichung (7.1) als gültig vorausgesetzt, können die Parameter zur Bestimmung der zeitabhängigen Festigkeit aus zwei Festigkeitswerten $f_{cm}(t_I)$ und $f_{cm}(t_{II})$ der zwei zugehörigen Zeitpunkte (Betonalter) t_I und t_{II} bestimmt werden, siehe Bild 7.1.

Zur Vereinfachung wird anschliessend die Bezeichnung $f_{cm,I} = f_{cm}(t_I)$ bzw. $f_{cm,II} = f_{cm}(t_{II})$ verwendet. Die allgemeinere Beschreibung der Festigkeitsentwicklung ergibt sich zu

$$f_{cm}(t) = f_{cm,II} \cdot e^{s \cdot \left(\sqrt{\frac{28}{t_{II}}} - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad (7.2)$$

woraus sich s aus $f_{cm,I}$, $f_{cm,II}$, t_I und t_{II} allgemein bestimmen lässt zu

$$s = \frac{\ln\left(\frac{f_{cm,I}}{f_{cm,II}}\right)}{\sqrt{\frac{28}{t_{II}}} - \sqrt{\frac{28}{t_I}}} \quad t \text{ in [d]} \quad (7.3)$$

Die rechnerische Festigkeit $f_{cm,28d}$ ergibt sich aus den Gleichungen (7.2) und (7.3) mit $t = 28$ d zu

$$f_{cm,28d} = f_{cm,II} \cdot \left(\frac{f_{cm,I}}{f_{cm,II}}\right)^{\frac{\sqrt{\frac{28}{t_{II}}}-1}{\sqrt{\frac{28}{t_{II}}} - \sqrt{\frac{28}{t_I}}}} \quad (7.4)$$

¹Als natürliche Exponentialfunktion mit Basis e .

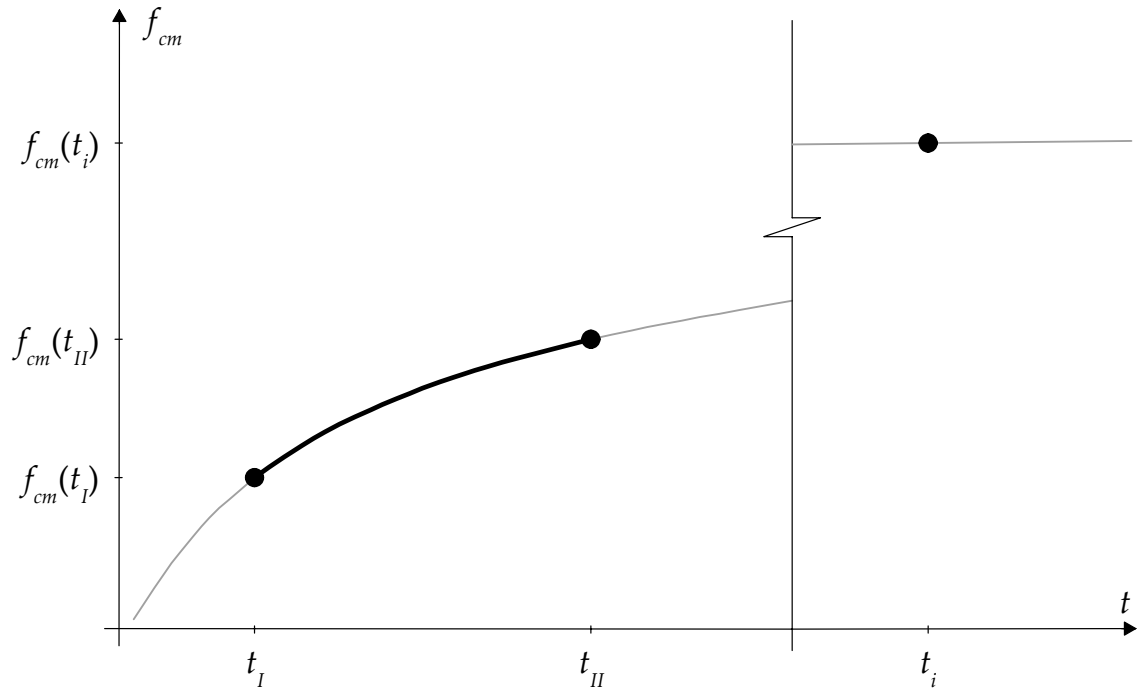


Bild 7.1: Bestimmung der Parameter aus den Festigkeitswerten im Betonalter von t_I und t_{II} .

7.3 Festigkeitsentwicklung auf der Basis von r

Wird das Verhältnis der mittleren Betondruckfestigkeiten mit

$$r_{I/II} = \frac{f_{cm,I}}{f_{cm,II}} \quad (7.5)$$

bezeichnet und die Zeitfunktion gemäss Gleichung (7.1) als Grundlage verwendet, kann die allgemeine Beschreibung der Festigkeitsentwicklung ausgedrückt werden durch²

$$f_{cm}(t) = f_{cm,II} \cdot r_{I/II}^{\frac{1 - \sqrt{\frac{t_{II}}{t}}}{1 - \sqrt{\frac{t_{II}}{t_I}}}} \quad (7.6)$$

Der Exponent der Zeitfunktion kann durch die Hilfsgrösse $\tau(t)$

$$\tau = \tau(t) = \frac{1 - \sqrt{\frac{t_{II}}{t}}}{1 - \sqrt{\frac{t_{II}}{t_I}}} \quad t \text{ in [d]} \quad (7.7)$$

ausgedrückt werden. Bild 7.2 zeigt den Verlauf der Hilfsgrösse $\tau(t)$ in Abhängigkeit des (transformierten) Probenalters für verschiedene Betonalter t_I bei konstantem Probenalter $t_{II} = 28$ d.

²Als Exponentialfunktion mit Basis r .

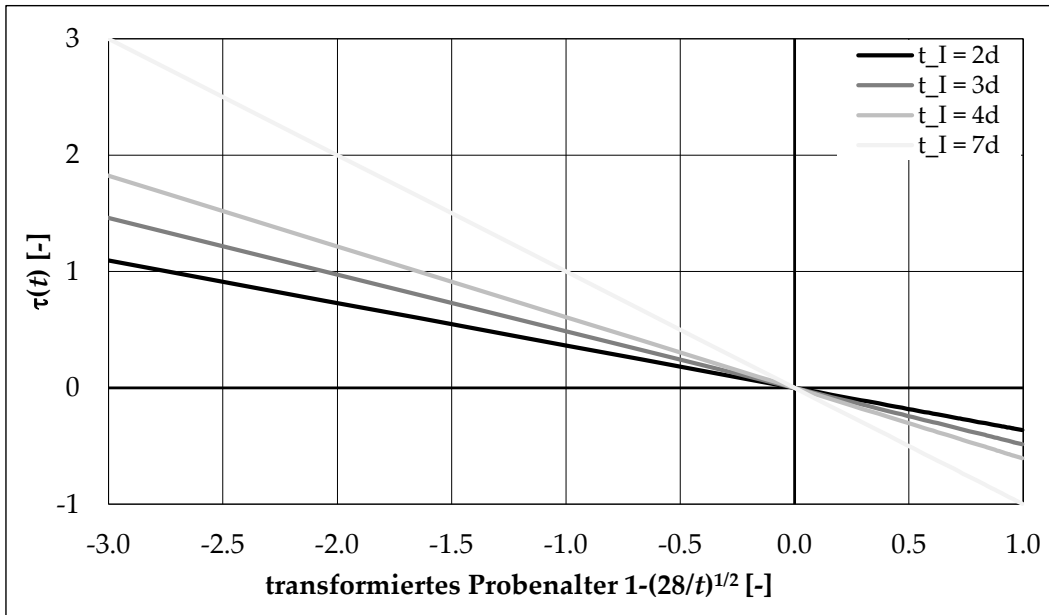


Bild 7.2: Hilfsgrösse τ mit $t_{II} = 28$ d in Abhängigkeit von t_I .

Die SIA 262:2013 verwendet zur Bestimmung der Richtwerte für die Mindestnachbehandlungsdauer das Verhältnis der mittleren Betondruckfestigkeit mit $t_I = 2$ d bzw. $t_{II} = 28$ d

$$r_{2/28} = \frac{f_{cm,2d}}{f_{cm,28d}} \quad (7.8)$$

SIA 262, Ziffer
6.4.6.10 bzw. SN EN
206, Ziffer NC.8.2

Damit lässt sich die Festigkeitsentwicklung statt durch die Gleichung (1.18) (auf Basis des Parameters s) auf der Basis von $r_{2/28}$ ausdrücken

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot r_{2/28}^{\frac{1-\sqrt{\frac{28}{t}}}{1-\sqrt{14}}} \quad t \text{ in [d]} \quad \text{bzw.} \quad f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot r_{2/28}^{\tau(t)} \quad (7.9)$$

Grundsätzlich lässt sich Festigkeitsentwicklung mit der bekannten (und etablierten) Gleichung (1.18) darstellen, indem s z.B. aus $r_{2/28}$ bestimmt wird zu

$$s = \frac{\ln(r_{2/28})}{1-\sqrt{14}} \approx -0.365 \cdot \ln(r_{2/28}) = -0.365 \cdot \ln\left(\frac{f_{cm,2d}}{f_{cm,28d}}\right) \quad (7.10)$$

7.4 Fehlerfortpflanzung der Festigkeitsmessergebnisse

7.4.1 Allgemein

Die Festigkeitswerte werden in der Regel aus verschiedenen Einzelwerten ermittelt, d.h. neben dem Mittelwert kann auch eine Unschärfe (Streuung) der Messgrößen festgestellt werden. Dabei streuen sowohl die Festigkeitswerte als auch die Werte um das mittlere Betonalter bei der Prüfung, dargestellt in Bild 7.3.

Zur Abschätzung der Unschärfen von f_{cm} zum Zeitpunkt t kann unter Annahme normalverteilter und voneinander unabhängiger Messgrössen das *Gauss'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz* [26] verwendet werden. Zusammengefasst ergibt sich folgende zeitabhängige Standardabweichung $s_f(t)$ der Betondruckfestigkeit

$$s_f(t) = f_{cm}(t) \sqrt{\frac{s_{fI}^2}{f_{cm,I}^2} \tau^2 + \frac{s_{fII}^2}{f_{cm,II}^2} (1 - \tau)^2 + 7[d] \underbrace{\left(\frac{\ln\left(\frac{f_{cm,I}}{f_{cm,II}}\right)}{\sqrt{\frac{28}{t_{II}} - \sqrt{\frac{28}{t_I}}}} \right)^2}_s \left(\frac{s_{fI}^2}{t_I^3} \tau^2 + \frac{s_{fII}^2}{t_{II}^3} (1 - \tau)^2 \right)} \quad (7.11)$$

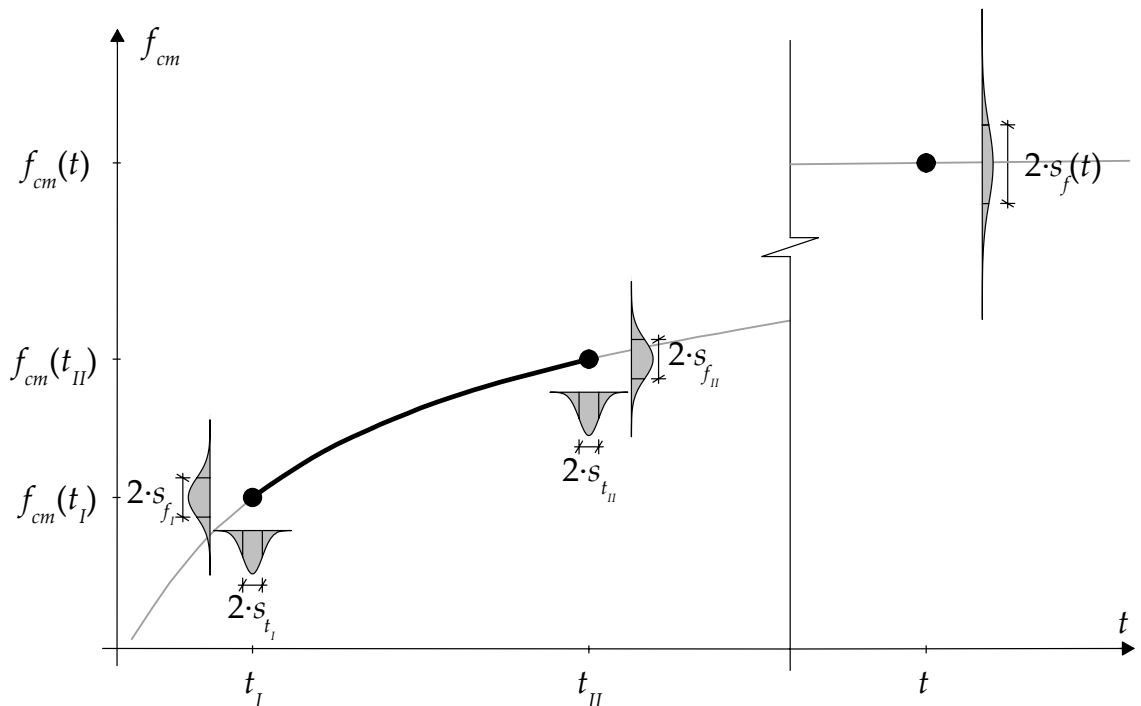


Bild 7.3: Unschärfen der Festigkeitswerte im Betonalter von t_I und t_{II} sowie die resultierende Unsicherheit im Betonalter t .

7.4.2 Vernachlässigung der zeitlichen Unschärfen

Unter Vernachlässigung der zeitlichen Unschärfen sowie $t_I = 2$ d bzw. $t_{II} = 28$ d und $r_{2/28}$ gemäss Gleichung (7.8) vereinfacht sich die Gleichung (7.11) zu

$$s_f(t) = r_{2/28}^\tau \cdot \sqrt{\frac{s_{fI}^2}{r^2} \cdot \tau^2 + s_{fII}^2 \cdot (1 - \tau)^2} \quad \text{mit} \quad \tau = \tau(t) = \frac{1 - \sqrt{\frac{28}{t}}}{1 - \sqrt{14}} \quad (7.12)$$

Mit der zeitabhängigen Standardabweichung $s_f(t)$ gemäss Gleichung (7.12), der Druckfestigkeitsentwicklung $f_{cm}(t)$ gemäss Gleichung (7.6) und dem Quantil $t_{n-2,1-\alpha/2}$ einer

t -Verteilung (gemäss Abschnitt 5.5) lässt sich ein «Gauss'sches Fehlerband» bestimmen zu

$$\begin{aligned} f_{c, \text{Max Gauss}}(t) &= f_{cm}(t) + t_{n-2, 1-\alpha/2} \cdot s_f(t) \hat{=} 95\% - \text{Quantil} \\ f_{c, \text{Min Gauss}}(t) &= f_{cm}(t) - t_{n-2, 1-\alpha/2} \cdot s_f(t) \hat{=} 5\% - \text{Quantil} \end{aligned} \quad (7.13)$$

Die Gleichung (7.13) ist in Bild 7.4 exemplarisch für die Mischung A-A dargestellt. Zur besseren Illustration ist die Zeitachse gemäss Gleichung (5.3) transformiert dargestellt.

In Anhang A.5 sind die Diagramme für alle 10 (+4) Mischungen Diagramme mit $f_{cm}(t)$ – bezeichnet mit Mittel 'r' – sowie das «Gauss'sche Fehlerband» gemäss Gleichung (7.13) zusammengestellt. Dabei entspricht die Kurve «Max Gauss» der 95%-Quantile und die Kurve «Min Gauss» der 5%-Quantile, entsprechend Gleichung (7.13).

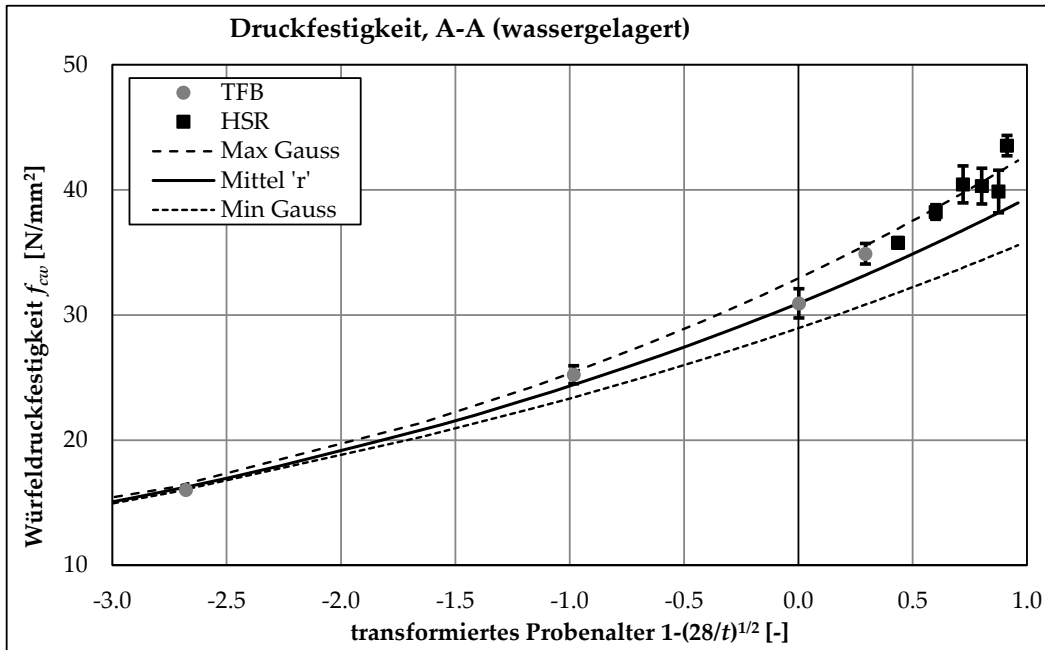


Bild 7.4: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung der Mischung A-A; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken.

7.4.3 Annahme konstanter Korrelationskoeffizienten

Unter Vernachlässigung der zeitlichen Unschärfen sowie $t_I = 2$ d bzw. $t_{II} = 28$ d und $r_{2/28}$ gemäss Gleichung (7.8) sowie der Annahme konstanter Korrelationskoeffizienten

$$\frac{s_{f_I}}{f_{cm,I}} = \frac{s_{f_{II}}}{f_{cm,II}} \quad \rightarrow \quad s_{f_I} = s_{f_{II}} \cdot \frac{f_{cm,I}}{f_{cm,II}} = s_{f_{II}} \cdot r_{2/28} \quad (7.14)$$

vereinfacht sich die Gleichung (7.11) zu

$$s_f(t) = s_{f_{II}} \cdot r_{2/28}^\tau \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \tau + 2 \cdot \tau^2} \quad \text{mit} \quad \tau = \tau(t) = \frac{1 - \sqrt{\frac{28}{t}}}{1 - \sqrt{14}} \quad (7.15)$$

7.5 Grenzwerte für Festigkeiten und Streuungen

7.5.1 Nasse Umgebung

Für die Grenzbetrachtung $t \rightarrow \infty$ sowie $t_I = 2 \text{ d}$ bzw. $t_{II} = 28 \text{ d}$ vereinfacht sich die Bestimmung der Hilfsgrösse τ_∞ gemäss Gleichung (7.7) zu

$$\tau_\infty = \frac{1}{1 - \sqrt{14}} \approx -0.365 \quad (7.16)$$

und daraus folgt die «Enddruckfestigkeit»

$$f_{cm,\infty} = f_{cm,28 \text{ d}} \cdot e^s = f_{cm,28 \text{ d}} \cdot r_{2/28}^{\tau_\infty} \approx f_{cm,28 \text{ d}} \cdot r_{2/28}^{-0.365} \approx \frac{f_{cm,28 \text{ d}}}{\sqrt[3]{r_{2/28}}} \quad (7.17)$$

Unter Annahme konstanter Korrelationskoeffizienten entsprechend Gleichung (7.14) ergibt sich die «Endstandardabweichung» der Druckfestigkeit zu

$$s_{f,\infty} \approx s_{f_{II}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt[3]{r_{2/28}}} \quad (7.18)$$

7.5.2 Trockene Umgebung

Für den Fall, dass für eine sogenannt «trockene» Umgebung (analog der Zugfestigkeitsentwicklung gemäss Gleichung (1.20)) ein Korrekturterm η eingeführt werden würde, folgt für die Grenzbetrachtung $t \rightarrow \infty$

$$f_{cm,\infty} = f_{cm,28 \text{ d}} \cdot e^{s \cdot \eta} = f_{cm,28 \text{ d}} \cdot r_{2/28}^{\tau_\infty \cdot \eta} \quad \text{mit} \quad \eta = \frac{2}{3} \quad \text{folgt} \quad f_{cm,\infty} \approx \frac{f_{cm,28 \text{ d}}}{\sqrt[4]{r_{2/28}}} \quad (7.19)$$

und unter Vernachlässigung der zeitlichen Unschärfen sowie der Annahme konstanter Korrelationskoeffizienten folgt (mit $\eta = \frac{2}{3}$)

$$s_{f,\infty} \approx s_{f_{II}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt[4]{r_{2/28}}} \quad (7.20)$$

7.6 Kontrolle der Prognosefähigkeit an den untersuchten Betonsorten

7.6.1 Betondruckfestigkeit

7.6.1.1 Vorgehen

In diesem Abschnitt wird überprüft, ob aus den Versuchsergebnissen nach 2 d und nach 28 d d.h. mit dem *r*-Konzept eine ausreichend gute Abschätzung des Druckfestigkeitsverlaufs im Betonalter $t > 28 \text{ d}$ erzielt werden kann. Zur Vereinfachung wird der Vergleich für die Grenzbetrachtung $t \rightarrow \infty$ d.h. für eine rechnerische «Endfestigkeit» $f_{cwm,\infty}$ angestellt.

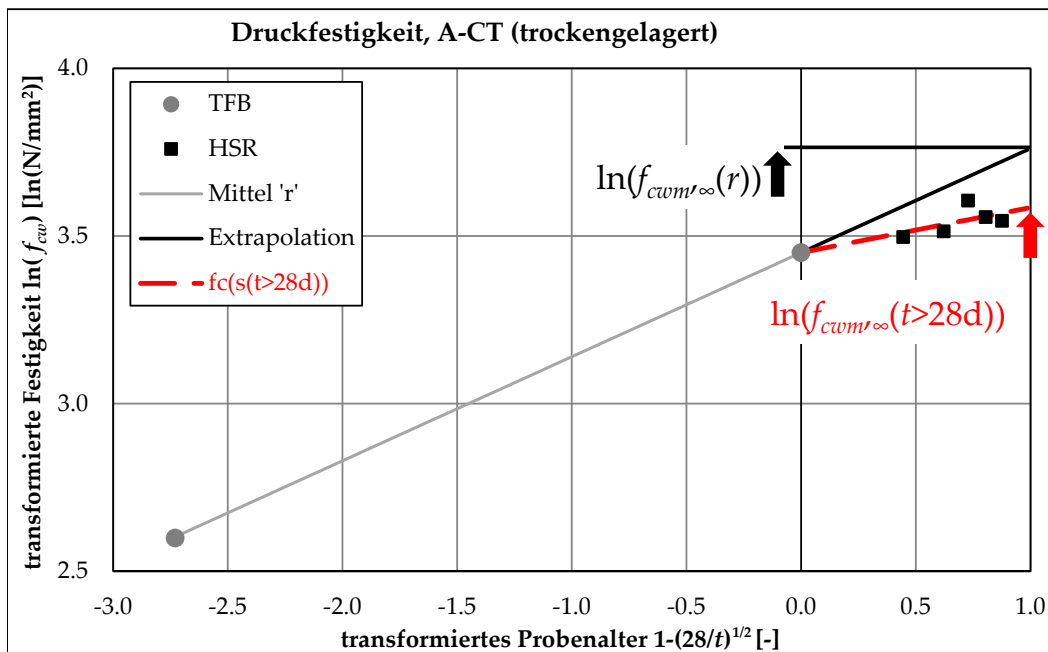


Bild 7.5: Vorgehen zur Kontrolle der Prognosefähigkeit.

Das Vorgehen ist wie folgt:

1. Berechnung von $r_{2/28}$ aus den beiden Festigkeitswerten $f_{cwm,2d}$ und $f_{cwm,28d}$ mit Gleichung (7.8), siehe die graue Gerade in Bild 7.5;
2. Bestimmung der «Endfestigkeit» $f_{cwm,\infty,2/28} = f_{cwm,28d} \cdot r_{2/28}^{r_{\infty}}$ entsprechend Gleichung (7.17), siehe die schwarze Gerade bzw. die schwarze Pfeilspitze in Bild 7.5;
3. Bestimmung der Regressionsgeradensteigung durch die Druckfestigkeitswerte mit Betonalter $t > 28$ d mit Ausgangspunkt $f_{cwm,28d}$ und daraus $r_{t>28d}$, siehe die rote strichlierte Gerade in Bild 7.5;
4. Bestimmung der «Endfestigkeit» $f_{cwm,\infty,t>28d} = f_{cwm,28d} \cdot r_{t>28d}^{r_{\infty}}$; siehe rote Pfeilspitze in Bild 7.5;
5. Vergleich der beiden «Endfestigkeiten»: $f_{cwm,\infty,2/28}$ mit $f_{cwm,\infty,t>28d}$.

Liegen die rote strichlierte Gerade und die schwarze Gerade deckungsgleich im Diagramm (oder sind die beiden Druckfestigkeitsverhältniswerte $r_{2/28} = r_{t>28d}$), sind die beiden rechnerischen «Endfestigkeiten» identisch und die Prognose trifft zu 100 % ein. Im Bild 7.5 überschätzt die Prognose die mutmassliche «Endfestigkeiten» klar. In Anhang A.5 sind die Diagramme für alle 10 (+4) Mischungen zusammengestellt.

7.6.1.2 Auswertung

In der Tabelle 7.1 sind die entsprechenden Zwischenergebnisse und rechnerischen «Endfestigkeiten» $f_{cwm,\infty}$ für alle 10 (+4) Mischungen zusammengestellt.

	Mischung:	A-A	A-B	A-BT	A-C	A-CT	C-D	C-E	C-F	C-FT	C-G	C-GT	C-H	C-I	C-K
	Zement	3	3	3	2	2	2	3	3	3	2	2	3	4	1
s_{fI}	[N/mm ²]	0.11	0.49	0.22	0.51	0.12	0.93	0.60	0.25	0.34	0.86	0.47	0.06	0.34	0.61
s_{fII}	[N/mm ²]	1.17	0.84	1.18	0.70	1.36	1.16	1.19	1.43	0.58	1.66	0.92	0.34	1.98	0.73
$f_{cwm,2d}$	[N/mm ²]	16.0	18.7	17.9	12.9	13.3	33.7	19.6	24.6	25.0	18.9	20.3	24.3	11.8	22.8
$f_{cwm,28d}$	[N/mm ²]	30.9	36.6	37.2	31.9	31.2	52.2	52.4	47.2	46.1	39.8	40.4	45.8	49.7	44.1
$r_{2/28}$	[-]	0.518	0.513	0.480	0.406	0.427	0.645	0.374	0.522	0.542	0.475	0.504	0.530	0.237	0.517
$r_{t>28d}$	[-]	0.393	0.468	0.598	0.408	0.640	0.501	0.296	0.467	0.587	0.334	0.628	0.547	0.259	0.300
$f_{cwm,\infty,2/28}$	[N/mm ²]	39.3	46.7	48.6	44.2	42.6	61.3	75.1	59.8	57.7	52.2	51.8	57.8	84.1	56.1
$f_{cwm,\infty,t>28d}$	[N/mm ²]	43.5	48.2	44.9	44.2	36.8	67.2	81.8	62.2	56.0	59.3	47.8	57.1	81.5	68.5
η_f	[-]	1.11	1.03	0.92	1.00	0.86	1.10	1.09	1.04	0.97	1.14	0.92	0.99	0.97	1.22
η_{opt}	[-]	1.42	1.14	0.70	0.99	0.52	1.57	1.24	1.17	0.87	1.47	0.68	0.95	0.94	1.83

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der rechnerischen Betondruck-«Endfestigkeit», deren Verhältniswerte und Zwischenergebnissen.

Die Variationskoeffizienten der Standardabweichungen s_{fI} bzw. s_{fII} gemäss Tabelle 7.1 betragen im Mittel 2.2 % bzw. 2.7 %. Damit ist die Grössenordnung vergleichbar mit den Ergebnissen der Ringversuche (COV = 2.6 %) gemäss Abschnitt 2.4.2.

Im Mittel beträgt das Verhältnis

$$\eta_f = \frac{f_{cwm,\infty,t>28d}}{f_{cwm,\infty,2/28}} = \frac{f_{cwm,\infty,t>t_{II}}}{f_{cwm,\infty,r}} \quad (7.21)$$

für alle nass gelagerten Proben $\eta_f = 1.07$ (COV = 7.2 %) bzw. $\eta_{ft} = 0.92$ (COV = 4.8 %) für alle trocken gelagerten Proben. D.h. im Fall der nassen Lagerung unterschätzt die Prognose die «Endfestigkeit» um ca. 7 %. Während für die Mischung A und Zementsorte ② $\eta_f = 1.05$ beträgt, ist dieser für die Zementsorte ③ und Mischung A $\eta_f = 1.08$.

Bei trockener Lagerung hingegen werden die «Endfestigkeit» im Mittel um 8 % überschätzt.

7.6.1.3 Fazit

Aus den Versuchsergebnissen nach 2 d und nach 28 d d.h. mit dem *r*-Konzept kann eine ausreichend gute Abschätzung des Druckfestigkeitsverlaufs von Beton in «nasser» Umgebung erzielt werden.

Zur Korrektur der Überschätzung der «Endfestigkeit» bei «trockener» Umgebung könnte analog zur Zugfestigkeitsentwicklung gemäss Gleichung (1.20) bzw. gemäss Gleichung (7.19) ein Korrekturterm η_{opt} eingeführt werden:

$$\eta_{opt} = \frac{\ln(r_{t>28d})}{\ln(r_{2/28})} \quad (7.22)$$

In der untersten Zeile der Tabelle 7.1 sind die entsprechenden Zahlenwerte für η_{opt} angegeben. Für die trocken gelagerten Proben beträgt η_{opt} im Mittel 0.69; allerdings streuen die Rechenwerte erheblich.

7.6.2 Betonzugfestigkeit

7.6.2.1 Vorgehen

In diesem Abschnitt wird überprüft, ob aus den Versuchsergebnissen nach 2 d und nach 28 d eine ausreichend gute Abschätzung des Zugfestigkeitsverlaufs im Betonalter $t > 28$ d erzielt werden kann. Zur Vereinfachung wird der Vergleich für die Grenzbetrachtung $t \rightarrow \infty$ d.h. für eine rechnerische «Endfestigkeit» $f_{ctm,\infty}$ angestellt. Für die trockenen gelagerten Proben gilt:

$$f_{ctm,\infty} = f_{ctm,28d} \cdot r_{2/28}^{\tau_{\infty} \cdot \eta} \quad (\eta = \frac{2}{3} \text{ für «trockene» Umgebung}) \quad (7.23)$$

Das Vorgehen entspricht dem im Abschnitt 7.6.1.1 dargestellten Ablauf. In Anhang A.5 sind die Diagramme für alle 10 (+4) Mischungen zusammengestellt.

7.6.2.2 Auswertung

	Mischung:	A-A	A-B	A-BT	A-C	A-CT	C-D	C-E	C-F	C-FT	C-G	C-GT	C-H	C-I	C-K
	Zement	3	3	3	2	2	2	3	3	3	2	2	3	4	1
s_{fI}	[N/mm ²]	0.052	0.082	0.083	0.070	0.056	0.095	0.061	0.038	0.050	0.279	0.097	0.109	0.060	0.033
s_{fII}	[N/mm ²]	0.132	0.139	0.231	0.024	0.049	0.214	0.188	0.124	0.020	0.075	0.074	0.121	0.147	0.179
$f_{ctm,2d}$	[N/mm ²]	1.42	1.39	1.42	1.11	1.20	2.05	1.69	1.60	2.12	1.35	1.56	1.59	0.85	1.72
$f_{ctm,28d}$	[N/mm ²]	2.28	2.33	2.55	2.09	2.23	2.74	3.30	2.62	2.96	2.25	2.52	2.73	2.73	2.46
$r_{2/28}$	[-]	0.624	0.595	0.555	0.533	0.540	0.749	0.512	0.612	0.716	0.598	0.620	0.584	0.312	0.698
$r_{t>28d}$	[-]	0.429	0.325	0.729	0.292	0.805	0.381	0.368	0.282	0.713	0.244	0.738	0.387	0.277	0.238
$f_{ctm,\infty,2/28}$	[N/mm ²]	2.71	2.81	3.16	2.63	2.79	3.04	4.22	3.13	3.35	2.72	3.00	3.32	4.17	2.81
$f_{ctm,\infty,t>28d}$	[N/mm ²]	3.11	3.51	2.86	3.28	2.41	3.89	4.76	4.15	3.35	3.77	2.82	3.86	4.36	4.16
η_{ft}	[-]	1.15	1.25	0.91	1.25	0.86	1.28	1.13	1.33	1.00	1.39	0.94	1.16	1.04	1.48
$\eta_{opt,t}$	[-]	1.79	2.17	0.54	1.96	0.35	3.33	1.49	2.58	1.01	2.74	0.64	1.76	1.10	4.00
$\eta_{ft,calc}$	[-]	1.23	1.19	1.00	1.19	0.96	1.08	1.15	1.16	1.05	1.20	0.95	1.09	0.91	1.29

Tabelle 7.2: Zusammenstellung der rechnerischen Betonzug-«Endfestigkeit», deren Verhältniswerte und Zwischenergebnissen.

In der Tabelle 7.2 sind die entsprechenden Zwischenergebnisse und rechnerischen «Endfestigkeiten» $f_{ctm,\infty}$ für alle 10 (+4) Mischungen zusammengestellt.

Die Variationskoeffizienten der Standardabweichungen s_{fI} bzw. s_{fII} gemäss Tabelle 7.2 betragen im Mittel 5.9% bzw. 4.8%. Damit liegen die Variationskoeffizienten erwartungsgemäss höher als die der Betondruckversuche.

Im Mittel beträgt das Verhältnis

$$\eta_{ft} = \frac{f_{ctm,\infty,t>28d}}{f_{ctm,\infty,2/28}} = \frac{f_{ctm,\infty,t>t_{II}}}{f_{ctm,\infty,r}} \quad (7.24)$$

7 *r*-Konzept

für alle nass gelagerten Proben $\eta_{ft} = 1.24$ (COV = 10.5 %) bzw. $\eta_{ft} = 0.93$ (COV = 6.3 %) für alle trocken gelagerten Proben. D.h. im Fall der nassen Lagerung unterschätzt die Prognose die «Endfestigkeit» um ca. 24 %. Während für die Mischung A und Zementsorte ② $\eta_f = 1.21$ beträgt, ist dieser für die Zementsorte ③ und Mischung A $\eta_f = 1.26$ und damit unabhängig von der Zementsorte.

Bei trockener Lagerung hingegen werden die «Endfestigkeit» im Mittel um 7 % (mit $\eta = \frac{2}{3}$ für $t \geq 28$ d) überschätzt.

In der letzten Zeile der Tabelle 7.2 wird das Verhältnis

$$\eta_{ft,calc} = \frac{f_{ctm,\infty,t>28d}}{f_{ctm,\infty}(f_{ck,28d})} \quad (7.25)$$

dargestellt, wobei in Anlehnung an Gleichung (1.20) (für $f_{ck,28d} \leq 50 \text{ N/mm}^2$)

$$f_{ctm,\infty}(f_{ck,28d}) = 0.3 \cdot f_{ck,28d}^{2/3} \cdot r_{2/28}^{\tau_{\infty} \cdot \eta} \quad (\eta = \frac{2}{3} \text{ für «trockene» Umgebung}) \quad (7.26)$$

aus $f_{ck,28d}$ (aus Gleichung (2.7) aus den mittleren Betondruckfestigkeiten) bestimmt wird.

Im Mittel beträgt das Verhältnis für alle nass gelagerten Proben $\eta_{ft,calc} = 1.11$ (COV = 11 %) bzw. $\eta_{ft} = 1.10$ (COV = 11 %) für alle trocken gelagerten Proben. D.h. im Fall der nassen Lagerung unterschätzt die Berechnung die «Endfestigkeit» um ca. 11 % und im Fall der trockenen Lagerung unterschätzt die Berechnung die «Endfestigkeit» um ca. 10 %.

7.6.2.3 Fazit

Die im Eurocode 2 [107] (Ziffer 3.1.2) vorgeschlagene Korrektur ($\eta = \frac{2}{3}$) für «trockene Umgebung» wird bestätigt: für die trocken gelagerten Proben beträgt η_{opt} im Mittel 0.63; allerdings streuen die Rechenwerte erheblich.

Die «Endfestigkeiten» $f_{ctm,\infty}$ können unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Korrektur für «trockene Umgebung» (d.h. $\eta = \frac{2}{3}$) mit ausreichender Genauigkeit rechnerisch aus den Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter $t_I = 2$ d bzw. $t_{II} = 28$ d abgeschätzt werden.

Die Festigkeitsentwicklung für nass gelagerte Proben wird nach dem «*r*-Konzept» für Betonalter $t > 28$ d allerdings deutlich unterschätzt: η_{opt} beträgt im Mittel 2.2; allerdings streuen die Rechenwerte erheblich.

7.7 Kontrolle der Prognosefähigkeit an «alten» Betonen

7.7.1 Einleitung

In der Fachliteratur existieren etliche Berichte zur zeitlichen Festigkeitsentwicklung von Beton verschiedener Rezepturen und/oder Lagerungsbedingungen. Teilweise konnten Prüfkampagnen mit einer Untersuchungsdauer von 50 Jahren durchgeführt werden. Mithilfe dieser Versuchsdaten soll im anschließenden Abschnitt geprüft werden, ob die Festigkeiten ausreichend genau mithilfe des *r*-Konzepts prognostiziert werden können.

Mithilfe von Gleichung (7.5) wird das Festigkeitsverhältnis $r_{I/II}$ aus zwei Prüfwerten zu den Zeitpunkten t_I und t_{II} bestimmt und damit den erwarteten Festigkeitsverlauf gemäss Gleichung (7.6) berechnet und in den Diagrammen im Anhang A.6 eingezeichnet. Zudem konnte damit der Rechenwert der «Endfestigkeit» $f_{c,\infty,r}$ bestimmt werden. Es wurde versucht, die Prüftermine möglichst nah an der Regel der SIA 262, Ziffer 6.4.6.10 ($t_I = 2$ d bzw. $t_{II} = 28$ d) auszuwählen. Diese Zeitpunkte sind in den Tabellen 7.3 bis 7.11 ausgewiesen und in den Diagrammen im Anhang A.6 als grosse und ausgefüllte Markierungen gekennzeichnet, siehe auch Bild 7.6.

Ergänzend wurde die Regressionsgeradensteigung durch die Druckfestigkeitswerte mit Betonalter $t > t_{II}$ mit Ausgangspunkt $f_{cm,II}$ und daraus $r_{t>t_{II}}$ bestimmt. Daraus konnte der Rechenwert der «Endfestigkeit» $f_{c,\infty,t>t_{II}} = f_{cm,II} \cdot r_{t>t_{II}}^{\tau_{\infty}}$ bestimmt werden. In Bild 7.6 ist der Festigkeitsverlauf $t_{II} \dots t \rightarrow \infty$ als rote strichlierte Linie dargestellt.

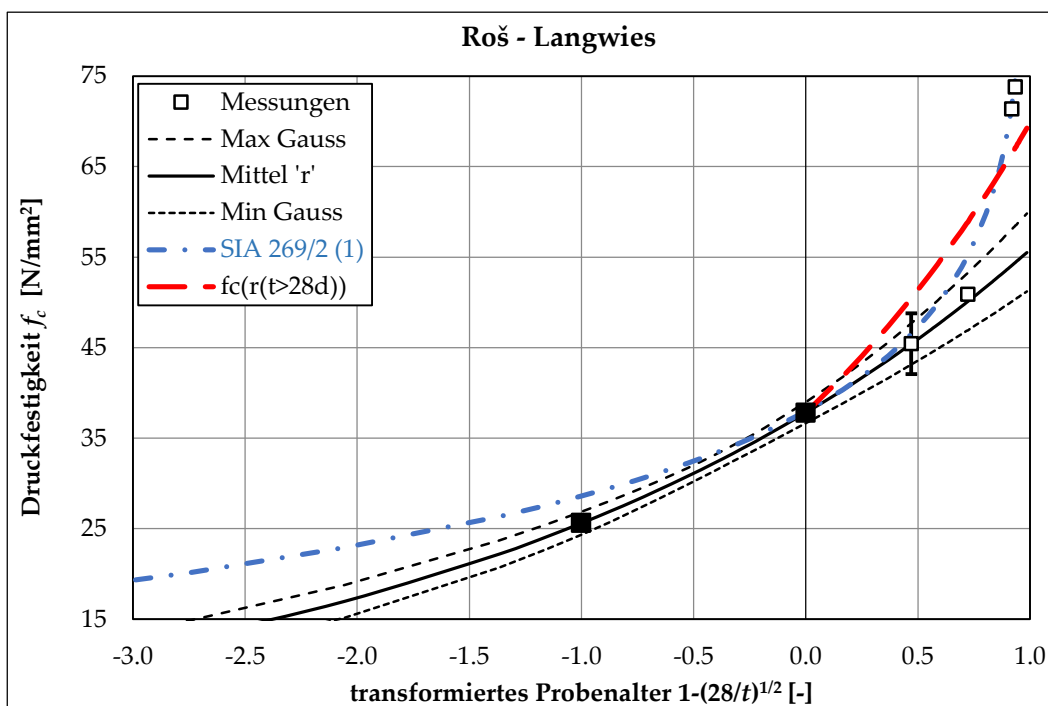


Bild 7.6: Vorgehen zur Kontrolle der Prognosefähigkeit; Druckfestigkeiten aus [72].

Der Wert der letzten Spalte bezeichnet das Festigkeitsverhältnis η_f aus den Prüfwerten mit $t > t_{II}$ gegenüber der Festigkeitsprognose auf Basis von $r_{I/II}$ gemäss Gleichung (7.21). Ist $\eta_f < 1$, überschätzt die Prognose die gemessenen Druckfestigkeiten im Betonalter $t > t_{II}$ und ist $\eta_f > 1$ unterschätzt die Prognose die Druckfestigkeiten.

Wo vorhanden, wurden die Unschärfen (Standardabweichungen) der Versuchsergebnisse zur Bestimmung eines Gauss'schen Fehlerbandes (gemäss Abschnitt 7.4) verwendet und in den Diagrammen im Anhang A.6 ergänzend zu den Fehlerbalken abgebildet.

7.7.2 Prüfkampagnen aus der Literatur

7.7.2.1 Prüfkampagne von Gonnermann und Lerch

Gonnermann und Lerch untersuchten in ihrer Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 10 Jahren. Die Betone wurden aus CEM I von fünf verschiedenen Zementherstellern (und chemischen Zusammensetzungen) hergestellt [27]. Der w/z -Wert der untersuchten Prüfkörper variierte von 0.26 bis 0.8 und der Zementgehalt variierte von 130 kg/m^3 bis 260 kg/m^3 ; in der Tabelle 7.3 sind die Mittelwerte eingetragen. Alle Probekörper wurden 24 h in der Schalung im Feuchtraum gelagert, danach ausgeschalt und bis zum Prüftag im Wasser gelagert. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.56 und A.57 dargestellt. In der Tabelle 7.3 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

Das Festigkeitsverhältnis aller fünf Betone beträgt im Mittel $\bar{\eta}_f = 0.99$, wobei die Werte von $\eta_{f,\min} = 0.64$ bis $\eta_{f,\max} = 1.44$ streuen. Die Druckfestigkeit der Betone von Typ I und III zeigten nach dem Betonalter von 28 d praktisch keine Zunahme; Typ III zeigte eine deutliche Reduktion. Demgegenüber nahm die Druckfestigkeit bei Typ IV und V über die Erwartung zu.

Bez.	Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z [-]	$t < t_{II}$ [-]	$t > t_{II}$ [-]	t_{\min} [d]	t_{\max} [d]	t_I [d]	t_{II} [d]	$f_{c,I}$ [Mpa]	$f_{c,II}$ [Mpa]	$s_{f,I}$ [Mpa]	$s_{f,II}$ [Mpa]	$r_{I/II}$ [-]	$r_{t>III}$ [-]	n_{tot} [-]	$n_{t>II}$ [-]	$f_{c,\infty}$ [Mpa]	$f_{c,\infty,t>II}$ [Mpa]	η_f [-]
Type I	CEM I	200	0.53	a	a	1	3650	3	28	11.1	30.6	1.15	1.85	0.36	0.91	32	16	50.2	32.0	0.64
Type II	CEM I	200	0.53	a	a	1	3650	3	28	9.68	26.1	1.18	1.36	0.37	0.40	32	16	42.4	40.7	0.96
Type III	CEM I	200	0.53	a	a	1	3650	3	28	25.4	43.7	2.75	2.63	0.58	1.44	32	16	56.9	36.5	0.64
Type IV	CEM I	200	0.53	a	a	1	3650	3	28	5.06	19.5	1.20	4.55	0.26	0.16	32	16	37.6	47.9	1.28
Type V	CEM I	200	0.53	a	a	1	3650	3	28	8.53	22.1	1.38	2.14	0.39	0.18	32	16	35.2	50.6	1.44

Tabelle 7.3: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [27]. Für den w/z -Wert und den Zementgehalt sind die Mittelwerte eingetragen. a: Lagerung unter Wasser.

7.7.2.2 Prüfkampagne von Withey

Withey untersuchte in seiner Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 50 Jahren. Die Betone wurden aus CEM I (Atlas cement) in zwei Mischungen («Mix 1-3-6» und «Mix 1-2-4») hergestellt [93]. Alle Probekörper wurden 3 d in der Schalung im Feuchtraum gelagert, danach in drei verschiedenen Expositionen (in der Schalung, im Keller und unter Wasser) gelagert. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.58 und A.59 dargestellt. In der Tabelle 7.4 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

7.7 Kontrolle der Prognosefähigkeit an «alten» Betonen

Bez.	Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z [-]	t < t _{II} [-]	t > t _{II} [-]	t _{min} [d]	t _{max} [d]	t _I [d]	t _{II} [d]	f _{c,I} [Mpa]	f _{c,II} [Mpa]	s _{f,I} [Mpa]	s _{f,II} [Mpa]	r _{I/II} [-]	r _{t>III} [-]	n _{tot} [-]	n _{t>t_{II}} [-]	f _{c,∞,r} [Mpa]	f _{c,∞,t>t_{II}} [Mpa]	η _f [-]
Mix 1-3-6	CEM I	545	0.44	c	c	31	18250	31	183	5.75	10.8	0.28	0.09	0.53	0.53	69	55	32.9	71.4	2.17
Mix 1-3-6	CEM I	545	0.44	b	b	31	18250	31	183	5.75	10.7	0.13	0.37	0.54	0.54	71	55	31.8	25.2	0.79
Mix 1-3-6	CEM I	545	0.44	a	a	31	18250	31	183	6.27	13.5	0.36	0.30	0.46	0.46	70	55	52.3	44.2	0.85
Mix 1-2-4	CEM I	705	0.31	c	c	31	18250	31	183	12.6	19.5	0.31	1.03	0.65	0.65	70	55	42.1	91.6	2.18
Mix 1-2-4	CEM I	705	0.31	b	b	31	18250	31	183	12.8	20.3	0.58	0.49	0.63	0.63	69	54	45.6	41.6	0.91
Mix 1-2-4	CEM I	705	0.31	a	a	31	18250	31	183	13.9	21.5	0.49	0.45	0.65	0.65	70	55	46.5	91.9	1.98

Tabelle 7.4: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [93].
a: Lagerung unter Wasser; b: bewittert; c: feucht gelagert.

Das Festigkeitsverhältnis aller fünf Betone beträgt im Mittel $\bar{\eta}_f = 1.48$, wobei die Werte von $\eta_{f,\min} = 0.79$ bis $\eta_{f,\max} = 2.18$ streuen. Alle Prüfergebnisse haben – insbesondere bei grossem Betonalter bei der Festigkeitsprüfung – über die Erwartung an Druckfestigkeit zugelegt

7.7.2.3 Prüfkampagne von Wood

Wood untersuchte in seiner Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von über 20 Jahren. Die Betone wurden aus CEM I hergestellt [94]. Der w/z-Wert der untersuchten Prüfkörper variierte von 0.4 bis 0.7 und der Zementgehalt variierte von 200 kg/m³ bis 400 kg/m³; in der Tabelle 7.5 sind die Mittelwerte eingetragen. Alle Probekörper wurden 1 d in der Schalung im Feuchtraum gelagert, danach ausgeschalt und weitere 6 d im Feuchtraum gelagert und anschliessend in drei verschiedenen Expositionen (feucht: 23 C, 100%RH bewittert und trocken: 22 C, 50%RH) gelagert. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.60 dargestellt – die Festigkeiten sind «nur» als auf f_{cm,28d} bezogene Werte und deshalb als normierte Werte (inkl. den «Gauss'schen Fehlerbändern») dargestellt. In der Tabelle 7.5 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

Bez.	Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z [-]	t < t _{II} [-]	t > t _{II} [-]	t _{min} [d]	t _{max} [d]	t _I [d]	t _{II} [d]	f _{c,I} [-]	f _{c,II} [-]	s _{f,I} [-]	s _{f,II} [-]	r _{I/II} [-]	r _{t>III} [-]	n _{tot} [-]	n _{t>t_{II}} [-]	f _{c,∞,r} [-]	f _{c,∞,t>t_{II}} [-]	η _f [-]
feucht	CEM I	300	0.55	c	c	1	7300	3	91	0.46	1.14	0.10	0.05	0.40	0.40	423	267	1.64	1.64	1.00
bewittert	CEM I	300	0.55	b	b	1	7300	3	91	0.53	1.09	0.10	0.06	0.49	0.41	141	99	1.45	1.75	1.21
trocken	CEM I	300	0.55	d	d	1	7300	3	91	0.44	1.08	0.10	0.04	0.41	0.49	122	74	1.55	1.15	0.74

Tabelle 7.5: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [94]. Für den w/z-Wert und den Zementgehalt sind die Mittelwerte eingetragen. b: bewittert; c: feucht gelagert; d: trocken gelagert.

Das Festigkeitsverhältnis aller fünf Betone beträgt im Mittel $\bar{\eta}_f = 0.98$, wobei die Werte von $\eta_{f,\min} = 0.74$ bis $\eta_{f,\max} = 1.21$ streuen. Während dem die Druckfestigkeit der feucht gelagerten und der bewitterten Betonproben über die Erwartung (aber noch innerhalb des Gauss'schen Fehlerbandes) stiegen, blieben die Prüfwerte der trocken gelagerten Betonproben auf dem Niveau der Versuche im Alter von 28 d – mit Ausnahme der letzten Prüfung im Alter von über 20 Jahren.

7.7.2.4 Prüfkampagne von Cook

Cook untersuchte in seiner Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 180 d. Die Betonprüfkörper wurden aus CEM I sowohl in Betonprüflabors als auch in Baustellensituationen hergestellt [17]. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.61 dargestellt. In der Tabelle 7.6 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

Bez.	Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z [-]	t < t _{II} [-]	t > t _{II} [-]	t _{min} [d]	t _{max} [d]	t _I [d]	t _{II} [d]	f _{c,I} [-]	f _{c,II} [-]	s _{f,I} [-]	s _{f,II} [-]	r _{I/II} [-]	r _{t>III} [-]	n _{tot} [-]	n _{t>II} [-]	f _{c,∞,f} [-]	f _{c,∞,t>II} [-]	η _f [-]
Com Lab	CEM I	360	0.32	-	-	1	180	3	28	50.8	76.8	6.75	5.89	0.66	0.66	2014	788	93.9	103.4	1.10
Prod. Lab	CEM I	360	0.32	-	-	1	180	3	28	51.4	77.1	4.75	4.67	0.67	0.67	667	277	93.9	103.7	1.10

Tabelle 7.6: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [17].

Das Festigkeitsverhältnis der in Betonprüflabors als auch in Baustellensituationen produzierten Probekörper beträgt im Mittel $\bar{\eta}_f = 1.10$. Die Prüfwerte der Betondruckfestigkeit im Alter von 56 d bzw. 180 d lagen bei beiden Produktionsarten der Proben (Labor und Baustelle) leicht über der Erwartung.

7.7.2.5 Prüfkampagne von Washa und Wendt

Washa und Wendt untersuchten in ihrer Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 50 Jahren. Die Betone der Serie B wurden aus CEM I (vier verschiedene Zemente bzw. vier verschiedene Rezepturen) hergestellt [88]. Alle Probekörper wurden 28 d feucht und danach bewittert gelagert: bei -32 C bis 35 C und 65 %RH bis 100 %RH. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.62 und A.63 dargestellt. In der Tabelle 7.7 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

Das Festigkeitsverhältnis aller fünf Betone beträgt im Mittel $\bar{\eta}_f = 1.38$, wobei die Werte von $\eta_{f,min} = 1.18$ bis $\eta_{f,max} = 1.59$ streuen. Alle Prüfergebnisse haben – insbesondere bei grossem Betonalter bei der Festigkeitsprüfung – über die Erwartung an Druckfestigkeit zugelegt.

Bez.	Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z [-]	t < t _{II} [-]	t > t _{II} [-]	t _{min} [d]	t _{max} [d]	t _I [d]	t _{II} [d]	f _{c,I} [Mpa]	f _{c,II} [Mpa]	s _{f,I} [Mpa]	s _{f,II} [Mpa]	r _{I/II} [-]	r _{t>III} [-]	n _{tot} [-]	n _{t>II} [-]	f _{c,∞,f} [Mpa]	f _{c,∞,t>II} [Mpa]	η _f [-]
1-1.5-3	CEM I	216	0.41	c	b	7	18250	7	28	17.7	25.7	1.37	2.74	0.69	0.69	140	100	37.4	51.7	1.38
1-2-4(1)	CEM I	168	0.51	c	b	7	18250	7	28	10.6	19.2	0.79	1.68	0.56	0.56	140	100	34.8	43.0	1.23
1-2-4(2)	CEM I	164	0.67	c	b	7	18250	7	28	5.85	12.3	0.62	1.91	0.48	0.48	140	100	26.1	30.8	1.18
1-3-6	CEM I	117	0.69	c	b	7	18250	7	28	5.49	10.0	0.14	0.63	0.55	0.55	140	100	18.5	29.3	1.59
1-2-4 Lan	CEM I	180	0.54	c	b	7	18250	7	28	10.9	19.1	1.58	2.47	0.57	0.57	140	100	33.9	46.1	1.36
1-2-4 Red	CEM I	176	0.51	c	b	7	18250	7	28	10.7	17.3	0.74	2.96	0.62	0.62	140	100	28.2	42.6	1.51

Tabelle 7.7: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [88].
b: bewittert; c: feucht gelagert.

7.7.2.6 Prüfkampagne von Hanson

Hanson untersuchte in seiner Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 3 Jahren. Die Betone wurden aus CEM I und CEM III mit je drei verschiedenen Gesteinskörnungen hergestellt [40]. Alle Probekörper wurden 5 d feucht und danach trocken gelagert bei 23 C und 50 %RH. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.64 dargestellt. In der Tabelle 7.8 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

Bez.	Zementart	Zement [kg/m³]	w/z [-]	t < t _{II} [-]	t > t _{II} [-]	t _{min} [d]	t _{max} [d]	t _I [d]	t _{II} [d]	f _{c,I} [Mpa]	f _{c,II} [Mpa]	s _{f,I} [Mpa]	s _{f,II} [Mpa]	r _{I/II} [-]	r _{t>II} [-]	n _{tot} [-]	n _{t>t_{II}} [-]	f _{c,so,r} [Mpa]	f _{c,so,t>t_{II}} [Mpa]	η _f [-]
Agg.No.6	CEM I	360	0.53	d	d	2	1095	2	28	21.2	36.9	-	-	0.57	0.57	12	6	45.2	38.0	0.84
Agg.No.8	CEM I	251	0.46	d	d	2	1095	2	28	18.5	37.5	-	-	0.49	0.49	12	6	48.5	35.3	0.73
Agg.No.10	CEM I	255	0.63	d	d	2	1095	2	28	18.1	36.1	-	-	0.50	0.50	12	6	46.4	39.3	0.85
Agg.No.6	CEM III	288	0.63	d	d	2	1095	2	28	24.3	37.2	-	-	0.65	0.65	12	6	43.5	33.0	0.76
Agg.No.8	CEM III	201	0.56	d	d	2	1095	2	28	24.1	42.6	-	-	0.57	0.57	12	6	52.4	36.8	0.70
Agg.No.10	CEM III	200	0.78	d	d	2	1095	2	28	22.7	37.1	-	-	0.61	0.61	12	6	44.3	35.4	0.80

Tabelle 7.8: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [40].
d: trocken gelagert.

Das Festigkeitsverhältnis beträgt für CEM I im Mittel $\bar{\eta}_f = 0.81$ und für CEM III im Mittel $\bar{\eta}_f = 0.75$. Die Prüfwerte der Betondruckfestigkeit im Alter von 1 Jahr bzw. 3 Jahren lagen bei beiden sowohl bei den Betonen aus CEM I als auch CEM III unter der Erwartung bzw. hat die Druckfestigkeit gegenüber den Prüfwerten im Alter von 28 d abgenommen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den eigenen Untersuchungen an trocken gelagerten Prüfkörper, siehe Tabelle 7.1.

7.7.2.7 Prüfkampagne von Bager

Bez.	Zementart	Zement [kg/m³]	w/z [-]	t < t _{II} [-]	t > t _{II} [-]	t _{min} [d]	t _{max} [d]	t _I [d]	t _{II} [d]	f _{c,I} [Mpa]	f _{c,II} [Mpa]	s _{f,I} [Mpa]	s _{f,II} [Mpa]	r _{I/II} [-]	r _{t>II} [-]	n _{tot} [-]	n _{t>t_{II}} [-]	f _{c,so,r} [Mpa]	f _{c,so,t>t_{II}} [Mpa]	η _f [-]
Typ 2	CEM I	200	0.52	a	a	7	9125	7	28	36	36	-	-	0.58	0.58	-	-	61.7	46.8	0.76
Typ 3	CEM I	264	0.52	a	a	7	9125	7	28	25	25	-	-	0.68	0.68	-	-	36.8	39.6	1.08
Typ 4	CEM I	261	0.54	a	a	7	9125	7	28	28	28	-	-	0.75	0.75	-	-	37.3	31.6	0.85
Typ 7	CEM I	256	0.46	a	a	7	9125	7	28	51	51	-	-	0.59	0.59	-	-	86.7	64.8	0.75
Typ 8	CEM I	340	0.42	a	a	7	9125	7	28	40	40	-	-	0.78	0.78	-	-	51.6	65.7	1.27
Typ 10	CEM I	327	0.40	a	a	7	9125	7	28	44	44	-	-	0.75	0.75	-	-	58.7	79.4	1.35
Typ 11	CEM I	334	0.43	a	a	7	9125	7	28	38	38	-	-	0.79	0.79	-	-	48.1	48.1	1.00
Typ 13	CEM I	300	0.39	a	a	7	9125	7	28	49	49	-	-	0.61	0.61	-	-	80.0	64.7	0.81
Typ 14	CEM I	390	0.36	a	a	7	9125	7	28	48	48	-	-	0.79	0.79	-	-	60.6	78.3	1.29
Typ 15	CEM I	300	0.38	a	a	7	9125	7	28	62	62	-	-	0.63	0.63	-	-	98.6	75.3	0.76
Typ 1	CEM II/B	261	0.54	a	a	7	9125	7	28	27	27	-	-	0.74	0.30	-	-	36.5	46.9	1.29
Typ 5	CEM II/B	199	0.59	a	a	7	9125	7	28	27	27	-	-	0.59	0.59	-	-	45.6	47.8	1.05
Typ 6	CEM II/B	333	0.44	a	a	7	9125	7	28	32	32	-	-	0.75	0.75	-	-	42.7	50.7	1.19
Typ 9	CEM II/B	260	0.45	a	a	7	9125	7	28	34	34	-	-	0.62	0.62	-	-	55.0	53.3	0.97
Typ 12	CEM II/B	397	0.42	a	a	7	9125	7	28	38	38	-	-	0.74	0.74	-	-	51.6	61.6	1.19
Typ 16	CEM II/B	300	0.39	a	a	7	9125	7	28	46	46	-	-	0.63	0.63	-	-	73.0	63.8	0.87

Tabelle 7.9: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [4].
a: Lagerung unter Wasser.

7 r-Konzept

Bager untersuchte in seiner Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 25 Jahren. Die Betone wurden aus CEM I und CEM II/B hergestellt [4]. Alle Probekörper wurden bis zur Festigkeitsprüfung unter Wasser gelagert. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.65, A.66 und A.67 dargestellt. In der Tabelle 7.9 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt. Das Festigkeitsverhältnis beträgt für CEM I im Mittel $\bar{\eta}_f = 0.99$ und für CEM II/B im Mittel $\bar{\eta}_f = 1.09$.

7.7.2.8 Prüfkampagne von Sorensen

Sorensen untersuchte in seiner Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 6 Jahren. Die Betone wurden aus CEM I und CEM II/B hergestellt – die Mischung mit der Bezeichnung «HSC» enthielt Hochleistungsverflüssiger und die Mischung mit der Bezeichnung «HPC» zusätzlich Microsilica [82]. Alle Probekörper wurden bis zur Festigkeitsprüfung unter Wasser gelagert. Die Festigkeitsentwicklung ist in den Diagrammen A.68 und A.69 dargestellt. In der Tabelle 7.10 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

Das Festigkeitsverhältnis aller Betone beträgt im Mittel $\bar{\eta}_f = 1.13$, wobei die Werte von $\eta_{f,\min} = 1.04$ bis $\eta_{f,\max} = 1.18$ streuen. Alle Prüfergebnisse haben – insbesondere bei grossem Betonalter bei der Festigkeitsprüfung – über die Erwartung an Druckfestigkeit zugelegt.

Bez.	Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z [-]	t < t _{II} [-]	t > t _{II} [-]	t _{min} [d]	t _{max} [d]	t _I [d]	t _{II} [d]	f _{c,I} [Mpa]	f _{c,II} [Mpa]	s _{f,I} [Mpa]	s _{f,II} [Mpa]	r _{I/II} [-]	r _{t>III} [-]	n _{tot} [-]	n _{t>t_{II}} [-]	f _{c,∞,I} [Mpa]	f _{c,∞,t>t_{II}} [Mpa]	η _f [-]
Type 2	CEM I	330	0.48	a	a	1	2280	1	28	12	38	–	–	0.32	0.32	–	–	49.7	51.7	1.04
Type 3	CEM I	330	0.48	a	a	1	2280	1	28	14	44	–	–	0.32	0.32	–	–	57.5	65.2	1.14
Type 5	CEM I	290	0.55	a	a	1	2280	1	28	11	45	–	–	0.24	0.24	–	–	62.5	72.8	1.17
Type 4	CEM II/B	310	0.48	a	a	1	2280	1	28	10	40	–	–	0.25	0.25	–	–	55.3	64.4	1.17
Type 6	(HSC)	400	0.29	a	a	1	2280	1	28	30	72	–	–	0.42	0.42	–	–	88.3	102.3	1.16
Type 7	(HSC)	330	0.31	a	a	1	2280	1	28	31	66	–	–	0.47	0.47	–	–	78.7	93.2	1.18
Type 8	(HPC)	530	0.23	a	a	1	2280	1	28	51	95	–	–	0.54	0.54	–	–	109.8	127.5	1.16
Type 9	(HPC)	415	0.27	a	a	1	2280	1	28	50	115	–	–	0.43	0.43	–	–	139.6	146.8	1.05
Type 10	(HPC)	294	0.36	a	a	1	2280	1	28	36	114	–	–	0.32	0.32	–	–	149.1	160.1	1.07

Tabelle 7.10: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [82].
a: nass gelagert.

7.7.2.9 Prüfkampagne von Saje und Lopatič

Saje und Lopatič untersuchten in ihrer Prüfkampagne die Festigkeitsentwicklung über einen Zeitraum von 1 Jahr. Die Betone wurden aus CEM I und CEM II/A hergestellt und enthalten in verschiedenen Rezepturen zusätzlich Microsilica [78]. Aus diesem Grund wird in der Tabelle 7.11 anstelle des w/z-Wertes der auf die Bindemittel bezogene w/B-Wert ausgewiesen. Alle Probekörper wurden 24 h in der Schalung im Feuchtraum gelagert, danach ausgeschalt und bis zum Prüftag im Wasser gelagert. In der Tabelle 7.11 sind die relevanten Kennwerte und Ergebnisse dargestellt.

7.7 Kontrolle der Prognosefähigkeit an «alten» Betonen

Bez.	Zementart	Zement [kg/m ³]	Microsilica [%]	w/B [-]	$t < t_{II}$ [-]	$t > t_{II}$ [-]	t_{min} [d]	t_{max} [d]	t_I [d]	t_{II} [d]	$f_{c,I}$ [Mpa]	$f_{c,II}$ [Mpa]	n_{II} [-]	$s_{f,II}$ [Mpa]	$r_{I/II}$ [-]	$r_{t>II}$ [-]	$f_{c,exp}$ [Mpa]	$f_{c,exp,t>II}$ [Mpa]	η_f [-]
H-1	CEM II/A-S 42,5 R	540	10	0.23	a	a	<1	365	1	28	56.2	90.3	7	4.15	0.62	0.44	100.9	109.5	1.09
H-2	CEM II/A-S 42,5 R	450	10	0.28	a	a	<1	365	1	28	50.8	89.0	10	3.62	0.57	0.58	101.4	101.0	1.00
H-3	CEM II/A-S 42,5 R	360	10	0.36	a	a	<1	365	1	28	42.5	81.4	13	3.09	0.52	0.58	94.7	92.6	0.98
H-4	CEM II/A-S 42,5 R	400	-	0.40	a	a	<1	365	1	28	32.3	68.9	6	4.22	0.47	0.32	82.2	90.1	1.10
H-5	CEM I 52,5 R	400	-	0.40	a	a	<1	365	1	28	42.9	74.9	3	2.32	0.57	0.38	85.3	94.0	1.10
H-6	CEM II/A-S 42,5 R	400	-	0.40	a	a	<1	365	1	28	28.0	87.1	3	2.89	0.32	0.59	113.5	98.3	0.87
H-7	CEM I 42,5 LH	400	-	0.40	a	a	<1	365	1.7	28	13.1	56.9	3	2.89	0.23	0.25	92.1	89.8	0.98
H-8	CEM II/A-S 42,5 R	360	10	0.40	a	a	<1	365	1	28	26.4	80.6	12	3.79	0.33	0.36	104.5	102.5	0.98
H-9	CEM I 52,5 R	360	10	0.40	a	a	<1	365	1	28	41.6	85.0	7	2.36	0.49	0.62	100.4	95.1	0.95
H-10	CEM II/A-S 42,5 R	360	10	0.40	a	a	<1	365	1	28	22.7	89.2	4	2.81	0.25	0.29	122.7	118.9	0.97
H-11	CEM I 42,5 LH	360	10	0.40	a	a	<1	365	1.8	28	12.9	74.0	4	1.41	0.17	0.30	132.5	110.0	0.83
H-12	CEM I 52,5 R	360	10	0.40	a	a	<1	365	1	28	34.9	96.8	7	3.63	0.36	0.48	122.8	114.9	0.94
H-13	CEM II/A-S 42,5 R	340	15	0.40	a	a	<1	365	1	28	22.8	80.2	4	1.28	0.28	0.34	107.5	103.0	0.96
H-14	CEM II/A-S 42,5 R	380	5	0.40	a	a	<1	365	1	28	21.6	73.8	4	4.37	0.29	0.28	98.3	99.3	1.01
N-1	CEM II/A-S 42,5 R	400	-	0.52	a	a	<1	365	1	28	21.0	48.3	9	2.12	0.43	0.28	58.6	65.0	1.11

Tabelle 7.11: Zusammenstellung der relevanten Kennwerte und Ergebnisse; Daten aus [78].
a: nass gelagert.

Das Festigkeitsverhältnis aller Betone beträgt im Mittel $\bar{\eta}_f = 0.99$, wobei die Werte von $\eta_{f,min} = 0.83$ bis $\eta_{f,max} = 1.11$ (bei einem $COV = 8.3\%$) streuen. In Bild 7.7 sind die Festigkeitsverhältnisse dargestellt.

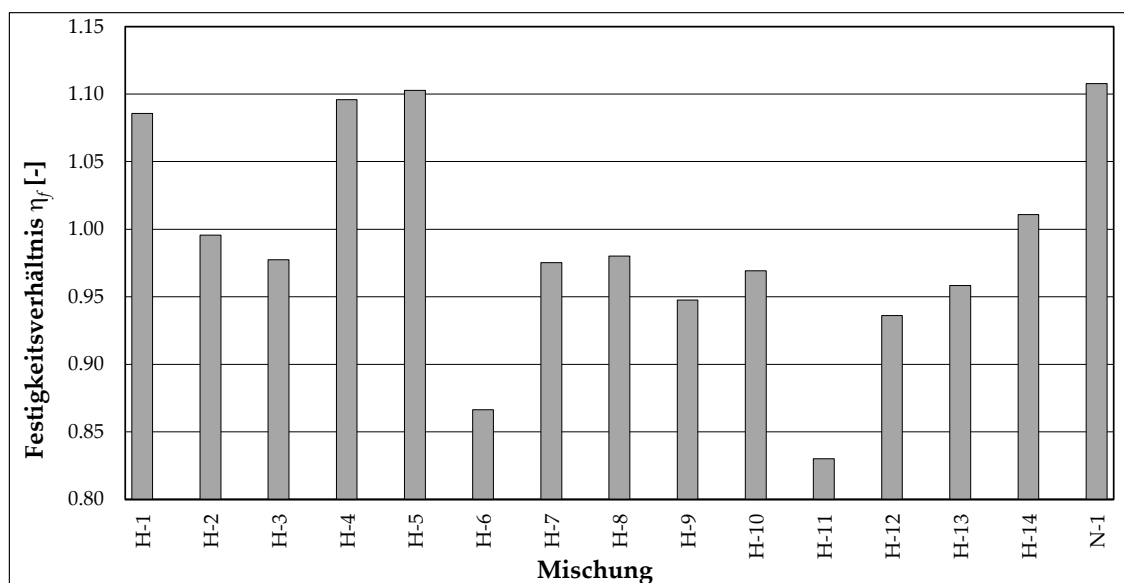


Bild 7.7: Festigkeitsverhältnisse η_f für alle 15 Betone der Prüfkampagne von Saje und Lopatič.

7.7.3 Fazit

Die Übersicht über alle hier untersuchten Prüfkampagnen zeigt, dass die Prognose der Festigkeitsentwicklung von Beton – insbesondere über sehr lange Zeiträume – mit Unsicherheiten behaftet ist. In den sehr «alten» Untersuchungen an im Wasser gelagertem

Beton aus CEM I zeigte sich eine Festigkeitsentwicklung, welche zum Teil deutlich über die Erwartungen hinausging. Wurden die Proben trocken gelagert (wie bei Wood [94] und Hanson [40]), stagnierten die Festigkeitsentwicklungen nach dem Betonalter von 28 d oder gingen gar zurück.

Die Auswertung der «neueren» Untersuchungen mit Betonen neben CEM I auch aus CEM II/A und II/B sowie CEM III zeigen, dass die Festigkeiten ausreichend genau mithilfe des *r*-Konzepts prognostiziert werden können.

7.8 Überprüfung der Gleichung (1) in SIA 269/2

7.8.1 Einleitung

In der SIA 269/2 [112] sind verschiedene Hinweise und Regeln zur Überprüfung bestehender Stahlbeton-Tragwerke gegeben. Zur Entwicklung der Betondruckfestigkeit nennt Ziffer 3.2.7:

Falls der Beton keine frühfestigkeitssteigernde Zusatzstoffe enthält und die Bedingungen der Ziffer 3.1.5 erfüllt sind, kann die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit gemäss Norm SIA 262 berücksichtigt werden; für ältere Betone (Baujahr vor 1985/1990) ohne puzzolanisch oder latent hydraulische Zusatzstoffe (Typ II gemäss SN EN 206 [117]) kann die Druckfestigkeitszunahme wie folgt abgeschätzt werden:

Figur 1 aus [114]

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28} \cdot 0.41 \cdot [\log(t) + 1] \quad t \text{ in [d]} \quad (1)_{\text{SIA 269/2}}$$

Für die Gleichung (1) in SIA 269/2 gilt:

- sie hat keinen physikalischen Bezug zur Festigkeitsentwicklung von Beton,
- sie hat nur den Parameter $f_{cm,28}$, d.h. sie kann keine unterschiedlichen Betonsorten d.h. zeitlich abhängige Nacherhärtungsverläufe abbilden,
- sie ist monoton wachsend d.h. erreicht keine «Endfestigkeit» $f_{cm,\infty}$,
- sie ist derart konzipiert, dass $0.41 \cdot [\log(28) + 1] = 1.0033... \approx 1.0$,
- bei einem Betonalter von 20 a erreicht die rechnerische Betondruckfestigkeit ca. $2.0 \cdot f_{cm,28}$.

In den Diagrammen im Anhang A.5 und im Anhang A.6 ist die Festigkeitsentwicklung gemäss Gleichung (1) der SIA 269/2 durch blaue strichpunktierte Kurven dargestellt.

7.8.2 Fazit

Da die Gleichung (1)_{SIA 269/2} «nur» auf die 28 d Druckfestigkeit skaliert und dem zeitlichen Verlauf der Festigkeitsentwicklung nicht angepasst werden kann, wird die Betondruckfestigkeit je nach Betonalter und Umgebungsbedingungen (nass, feucht, bewittert oder trocken) über- oder unterschätzt. Insbesondere nehmen die Unschärfen bei Betonalter von über 20 Jahren deutlich zu.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

8.1 Zusammenfassung

Mit dem vorliegenden Bericht wird versucht, zu einem besseren Verständnis des zeitabhängigen Festigkeitsverhaltens von normalfestem Beton beizutragen. Im Abschnitt 1 werden nach einem historischen Rückblick über die Untersuchungen in der Schweiz und Nordamerika verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung erläutert. Nach der Darstellung der normativen Grundlagen der Druck- und Zugfestigkeit werden das Projektziel sowie die Abgrenzungen definiert. Die Tabelle 8.1 weist den im Projekt untersuchten Betonsorten die verwendeten Kurzbezeichnungen, die Rezeptur und die Lagerungsart zu:

Zementart	Zement [kg/m ³]	w/z (¹)	Nr.	Bezeichnung «nass»	Bezeichnung «trocken»
CEM II/B-LL 32,5 R	290	0.60	③	A-A	
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	290	0.60	③	A-B	A-BT
CEM II/A-LL 42,5 N	290	0.60	②	A-C	A-CT
CEM II/A-LL 52,5 N	310	0.50	②	C-D	
CEM II/B-M (S-T) 42,5 R	310	0.50	③	C-E	
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	310	0.50	③	C-F	C-FT
CEM II/A-LL 42,5 N	310	0.50	②	C-G	C-GT
CEM II/B-LL 32,5 R	310	0.50	③	C-H	
CEM III/B 42,5 N	310	0.50	④	C-I	
CEM I 42,5 N	310	0.50	①	C-K	

Tabelle 8.1: Bezeichnung der Mischungen; (¹) Zielwert von w/z. Den Zementsorten werden zur differenzierteren Auswertung Nummern zugewiesen: CEM I → Nr. ① (Referenz-Zement), CEM II/A → Nr. ②, CEM II/B → Nr. ③ und CEM III → Nr. ④.

Im Abschnitt 2 werden die unterschiedlichen Prüfkörperformen zur experimentellen Bestimmung der Betondruckfestigkeit sowie die Umrechnungen zwischen diesen Prüfkörperform abhängigen Festigkeiten beschrieben. Auf eine kurze Betrachtung der Ringversuche in akkreditierten Schweizer Prüflabors folgt eine Erläuterung zur Ermittlung der charakteristischen Druckfestigkeit. Der Abschnitt schliesst mit einem Exkurs zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls von Beton.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

Der Begriff der Betonzugfestigkeit wird oftmals unpräzise verwendet. Zur Klärung werden im Abschnitt 3 die verschiedenen experimentellen Prüfungen beschrieben und in einem Fazit verglichen und bewertet. Der Einfluss von Eigenspannungen – primär durch den Schwindprozess – wird beschrieben. Der rechnerische Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und der Betonzugfestigkeit wird eingeführt.

Die Herstellung und Lagerung der Prüfkörper werden im Abschnitt 4 beschrieben. Die Prüfkörper mit der Bezeichnung «nass» wurden im Wasserbad gelagert, während die Prüfkörper mit der Bezeichnung «trocken» nach einem Tag ausgeschalt und Luft gelagert wurden. Anschliessend werden die Verfahren zur Ermittlung der Betondruckfestigkeit, der Betonzugfestigkeit und der Karbonatisierungstiefe erläutert.

Im Abschnitt 5 werden die Methoden zur Aufbereitung der Prüfwerte der Betondruckfestigkeit, der Betonzugfestigkeit, der Karbonatisierungstiefe und der Dichte beschrieben. In einem kurzen Exkurs wird die Ermittlung der Konfidenzintervalle erläutert – diese Konfidenzintervalle sind in allen Diagrammen der Anhänge A.2 und A.3.5 eingezeichnet.

Die aufbereiteten Prüfergebnisse werden im Abschnitt 6 diskutiert. Nach einer Beschreibung und Bewertung der Festigkeitskorrekturen zwischen den Prüfwerten der TFB und der HSR wird die Festigkeitszunahme sowie der Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit und der Betonzugfestigkeit über 5 Jahre beschrieben.

Zur Ermittlung der Karbonatisierungstiefe wird zuerst kontrolliert, ob das \sqrt{t} -Gesetz gültig ist. Danach werden die «wahren» Karbonatisierungskoeffizienten durch Weglassen der Prüfwerte im Betonalter bis 91 Tagen bestimmt.

Die Auswertung der Dichtemessungen haben ergeben, dass neben den erwarteten Masseverlusten (Wasserverlusten) auch die im Wasser gelagerten Prüfkörper an Dichte verloren haben – vermutlich konnte trotz der Lagerung in mit Calciumhydroxid übersättigtem Wasser und zusätzlicher Verpackung in Plastik eine gewisse Auslaugung nicht verhindert werden.

Im Abschnitt 7 wird das r -Konzept eingeführt. Unter der Annahme, dass die Zeitfunktion der Festigkeitsentwicklung (Basis der Kurven aus Figur 1 der SIA 262:2013) gültig ist, wird nach einer Einleitung beschrieben, wie der s -Faktor aus zwei in unterschiedlichen Betonalter ermittelten Betondruckfestigkeiten bestimmt werden kann. In Anlehnung an das Festigkeitsverhältnis $r_{2/28}$ zur Ermittlung der erforderlichen Nachbehandlungsdauer wird dieses Festigkeitsverhältnis zur Beschreibung Festigkeitsentwicklung eingeführt. In Abschnitt 7.3 wird gezeigt, wie aus den Festigkeitsverhältniswerten r auf den Parameter s geschlossen werden kann. Für $r_{2/28}$ folgt

$$s = \frac{\ln(r_{2/28})}{1 - \sqrt{14}} \approx -0.365 \cdot \ln(r_{2/28}) = -0.365 \cdot \ln\left(\frac{f_{cm,2d}}{f_{cm,28d}}\right) = 0.365 \cdot \ln\left(\frac{f_{cm,28d}}{f_{cm,2d}}\right)$$

Für beliebige Prüfzeitpunkte t_I und t_{II} und zugehörige Festigkeitsmesswerte $f_{cm,I}$ und $f_{cm,II}$ lässt sich der Parameter s allgemein bestimmen aus

$$s = \frac{\ln\left(\frac{f_{cm,I}}{f_{cm,II}}\right)}{\sqrt{\frac{28}{t_{II}}} - \sqrt{\frac{28}{t_I}}} \quad t \text{ in [d]}$$

Zur Berücksichtigung einer «trockenen» Umgebung auf die Festigkeitsentwicklung wird in Abschnitt 7.5 ein Korrekturterm $\eta \leq 1$ eingeführt

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot e^{s \cdot \eta \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad t \geq 28 \text{ d} \quad \text{in [d]}$$

Aus der Validierung an den Versuchsergebnissen konnte $\eta = \eta_{opt} \approx \frac{2}{3}$ sowohl für die Druckfestigkeiten als auch die Zugfestigkeiten (im Betonalter $t \geq 28$ d) ermittelt werden.

Unter Berücksichtigung der Fehlerfortpflanzung – infolge der unscharfen Messergebnisse – wird die Prognosefähigkeit dieser Festigkeitsentwicklung an den in diesem Projekt untersuchten Betonsorten und an «alten» Betonen aus der Fachliteratur kontrolliert und bewertet. Ergänzend wird die Gleichung (1) der SIA 269/2:2011 überprüft und bewertet.

Im ausführlichen Anhang A werden die Prüfberichte der Frischbetonkontrollen (Anhang A.1), die Ergebnisse Festigkeitsprüfungen für die Betondruck- und Zugfestigkeit (Anhang A.2) und die Karbonatisierungstiefen (A.3) dokumentiert. Eine Arbeitsanweisung zur experimentellen Bestimmung der Betonzugfestigkeit mittels Double Punch Versuch (Anhang A.4) hilft der Verbreitung dieser einfachen und robusten Methode. Im Anschluss erfolgt die Validation des r -Konzepts an den in diesem Projekt untersuchten Betonsorten (Anhang A.5) und an «alten» Betonen aus der Fachliteratur (Anhang A.6).

8.2 Folgerungen

In der nachfolgenden, nach Themen gruppierten Aufzählung werden die wichtigsten Folgerungen zusammengefasst.

8.2.1 Betondruckfestigkeit

- Die Mischung C-K (CEM I 42,5 N) weist als Referenzbeton eine höhere Nacherhärtung (+33 %) auf als erwartet, siehe Bild A.55.
- Der Zement der Mischung C-D (CEM II/A-LL 52,5 N) ist hoch aufgemahlen. Die Nacherhärtung nach 10 Jahren ist gemäss Tabelle 6.4 mit 17 % für die Druckfestigkeit und 16 % für die Zugfestigkeit vergleichsweise gering und entspricht der Erwartung bei Verwendung inerter Hauptbestandteile, siehe Bild A.47.
- Die Mischung C-I (CEM III) ist die Ausnahme. Die Nacherhärtung nach 10 Jahren ist gemäss Tabelle 6.4 mit 56 % für die Druckfestigkeit und 46 % für die Zugfestigkeit vergleichsweise hoch und entspricht der Erwartung bei Verwendung von Hüttensand, siehe Bild A.54.
- Früher wurden die Zemente weniger fein gemahlen und daraus folgt eine verzögerte Nacherhärtung.
- Die Nacherhärtung trocken gelagerter Betonproben ist deutlich kleiner als diejenigen nass oder feucht gelagerter Proben. Dies gilt sowohl für die Druck- als auch die Zugfestigkeit, siehe Tabelle 7.1 bzw. Tabelle 7.2. Der Einfluss einer «trockenen» Umgebung kann mit einem Korrekturterm $\eta = \frac{2}{3}$ in Gleichung (8.2) ausreichend genau berücksichtigt werden.

8.2.2 Betonzugfestigkeit

- Double Punch Versuche sind robust in der Anwendung und geeignet zur Ermittlung der Betonzugfestigkeit. Die Verwendung von Würfeln anstelle von bearbeiteten Zylindern reduziert den Aufwand der Prüfkörpervorbereitung und liefert vergleichbare Versuchsergebnisse, siehe Abschnitt 3.1.4 und insbesondere Bilder 3.9 und 3.10. Die Betonzugfestigkeit kann in sehr guter Näherung mit der vereinfachten Beziehung (6.2) d.h. $f_{ct} = f_{ct,DP} \approx F_u \text{ [N]} / 41\,300 \text{ mm}^2$ aus Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm bestimmt werden.
- Im Abschnitt 3.2.1 werden die verschiedenen Versuchsdurchführungen für Zugversuche an Beton verglichen und insbesondere im Bild 3.17 dargestellt. Biegezugversuche sind zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit nicht geeignet, siehe auch [58].
- Infolge der Austrocknung an der Betonoberfläche und dadurch hervorgerufene schwindinduzierte Eigenspannungen sinken die geprüften Betonzugfestigkeiten, siehe Bild 6.4. auch die Zugfestigkeit, siehe Tabelle 7.1 bzw. Tabelle 7.2. Der Einfluss einer «trockenen» Umgebung kann mit einem Korrekturterm $\eta = \frac{2}{3}$ analog Gleichung (1.20) ausreichend genau berücksichtigt werden.
- Der rechnerische, normative Zusammenhang zwischen der charakteristischen Betondruckfestigkeit und der mittleren Betonzugfestigkeit kann unter Verwendung einer festigkeitsabhängigen Differenz ($(f_{cwm} - f_{cwk}) = f(f_{cwm}) \neq \text{konstant}$) gemäss Gleichung (2.7) sowohl in nasser Umgebung (Bild 6.1) als auch in trockener Umgebung (Bild 6.3) bestätigt werden.

8.2.3 Karbonatisierung

- Durch die Lagerung der Betonwürfel im Keller unterhalb des Labors an der HSR (heute OST) war das Angebot an «frischer Luft» zu Beginn der Lagerungszeit unter Umständen zu klein. In der Folge sank vermutlich die CO₂-Konzentration durch die Karbonatisierung der vielen Prüfkörper unter das «normale» Niveau, siehe Bild 6.6. Zur Steigerung der Aussagekraft wurden die ersten Messergebnisse der Karbonatisierungstiefe (Messwerte nach 28 d und 91 d) weggelassen.
- Die Mittelwerte der Karbonatisierungskoeffizienten der Betonsorten C-FT und C-GT ($\bar{K}_{C-FT} = 5.3 \text{ mm/a}^{0.5}$ und $\bar{K}_{C-GT} = 5.9 \text{ mm/a}^{0.5}$) liegen über dem Grenzwert der Mittelwerte ($K_N \leq 5.0 \text{ mm/a}^{0.5}$) gemäss der Tabelle NA.14 der SN EN 206 [117], siehe Tabelle 6.10 bzw. Bild 6.7.
- Die Würfel wurden im Betonalter 1 d ausgeschalt und für die Trockenlagerung der Umgebungsluft ausgesetzt. Damit werden die Anforderungen an die Nachbehandlungsdauer gemäss Ziffer 6.4.6.10 in SIA 262:2013 [114] nicht erfüllt. Dass die Mittelwerte der Karbonatisierungskoeffizienten über dem Grenzwert der Tabelle NA.14 der SN EN 206 [117] liegen, könnte mit der zu kurzen Nachbehandlungsdauer in Zusammenhang stehen.

8.2.4 Rohdichte

- Die nass gelagerten Betonprüfkörper haben trotz der Lagerung in mit Calciumhydroxid übersättigtem Wasser und zusätzlich doppelter Verpackung in Plastik im Verlauf der 10 Jahre ca. 20 kg/m^3 an Rohdichte (bezogen auf das Betonalter von 28 Tagen) verloren, siehe Tabelle 6.11. Dies ist vermutlich auf eine gewisse Auslaugung zurückzuführen.
- Die trocken gelagerten Betonprüfkörper haben im Verlauf der 10 Jahre ca. 50 kg/m^3 an Rohdichte (bezogen auf das Betonalter von 28 Tagen) verloren, siehe Tabelle 6.11.

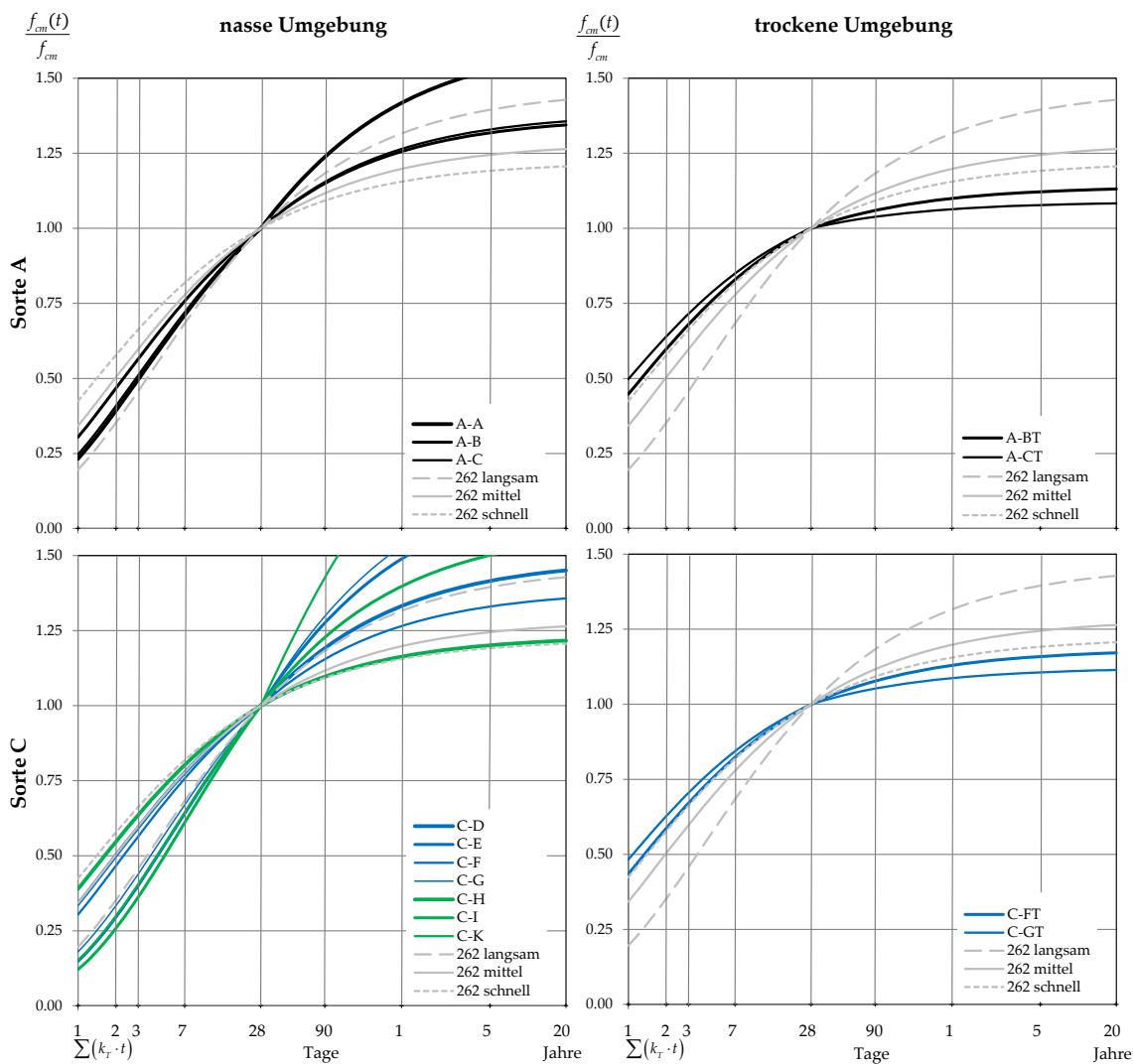
8.2.5 r -Konzept

Bild 8.1: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit: Vergleich der Kurven gemäss Figur 1 der SIA 262:2013 [114] mit den Erwartungen für alle 14 untersuchten Betonmischungen auf Basis von $r_{2/28}$ gemäss Tabelle 7.1.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

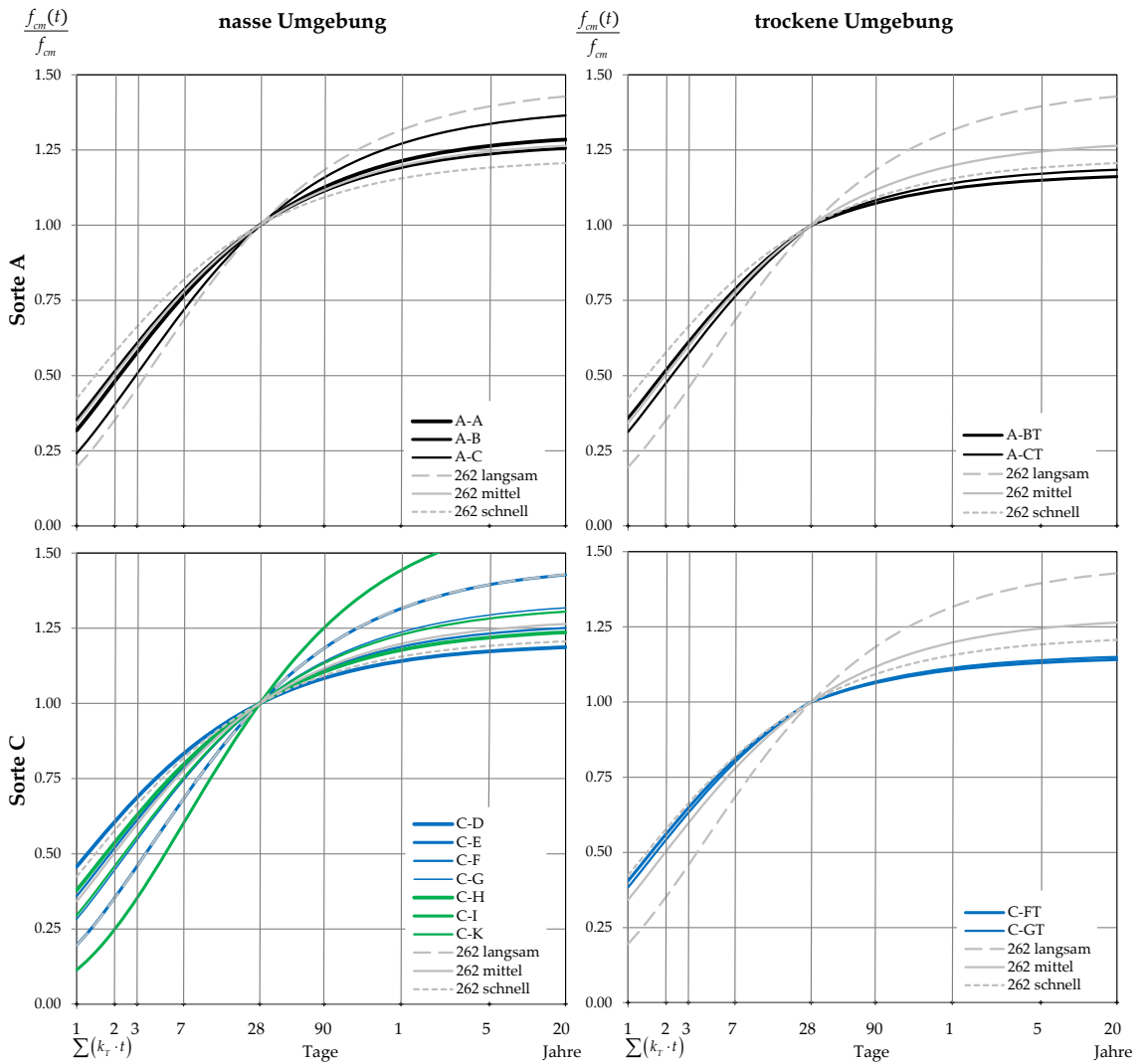


Bild 8.2: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit: Vergleich der Kurven gemäss Figur 1 der SIA 262:2013 [114] mit den Erwartungen für alle 14 untersuchten Betonmischungen unter Einbezug aller Versuchsdaten (s gemäss Tabelle 6.6 bzw. A.2).

- Die Festigkeitsentwicklung kann mit dem s -Konzept – d.h. nur auf der Basis der Zementart allein – nicht zutreffend abgeschätzt werden, siehe Tabelle 6.6.
- Mithilfe des r -Konzeptes kann die Druck-Festigkeitsentwicklung von Beton ausreichend genau beschrieben werden, siehe Tabelle 7.1.
- Der Parameter s kann problemlos aus dem Festigkeitsverhältnis r umgerechnet werden, siehe Gleichung (7.10) bzw. Gleichung (8.1).
- Mithilfe des r -Konzeptes wird die Zug-Festigkeitsentwicklung von Beton in feuchter Umgebung unterschätzt, siehe Tabelle 7.2. Dies könnte mit der unterschiedlichen Entwicklungsgeschwindigkeit von Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung zusammenhängen.

8.3 Empfehlungen zur Erarbeitung der nationalen Elemente der 1992-1-1

- Die Streuung der Druckfestigkeitsentwicklung auf Basis von $r_{2/28}$ (gemäss Tabelle 7.1) – abhängig von der Betonmischung und der Umgebungsfeuchte – ist gross, siehe Bild 8.1. Auch für den Fall, dass alle Versuchsdaten (s gemäss Tabelle 6.6 bzw. Anhang A.2) für eine Prognose verwendet wird, bleibt die Streuung gross, siehe Bild 8.2. Diesem Umstand ist insbesondere bei der Überprüfung bestehender Tragwerke gebührend Beachtung zu schenken.
- Die Streuung der Druckfestigkeit im Betonalter 7 d ist vermutlich kleiner als im Betonalter 2 d. Das würde die Prognosezuverlässigkeit der Festigkeitsentwicklung verbessern. Aus Abschnitt 7.3 folgt mit $r_{7/28}$

$$s = \frac{\ln(r_{7/28})}{1 - \sqrt{4}} = -1 \cdot \ln(r_{7/28}) = -1 \cdot \ln\left(\frac{f_{cm,7d}}{f_{cm,28d}}\right) = \ln\left(\frac{f_{cm,28d}}{f_{cm,7d}}\right) \quad (8.1)$$

- Mit derselben Hypothese (dass die Streuung der Druckfestigkeit im Betonalter 7 d kleiner ist als im Betonalter 2 d) müsste die Grundlage der Nachbehandlungsdauer gemäss Ziffer 6.4.6.10 in SIA 262:2013 [114] neu aufgearbeitet werden. Daraus würden sich vermutlich neue Anforderungen an die Dauer der Nachbehandlung ergeben.

8.3 Empfehlungen zur Erarbeitung der nationalen Elemente der 1992-1-1

In «trockener» Umgebung entwickelt sich die Betondruckfestigkeit weniger als in «nasser» Umgebung. Zur Berücksichtigung des Umgebungseinflusses sollte die Gleichung (1.18) mit $\eta = \eta_{opt} \approx \frac{2}{3}$ angepasst werden:

$$f_{cm}(t) = f_{cm,28d} \cdot e^{s \cdot \eta \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)} \quad t \text{ in [d]} \quad (8.2)$$

$$\eta = 1 \quad \text{für } t < 28 \text{ d}$$

$$\eta = 1 \quad \text{für } t \geq 28 \text{ d und «nasse» Umgebung}$$

$$\eta = \frac{2}{3} \quad \text{für } t \geq 28 \text{ d und «trockene» Umgebung}$$

Der Einfluss einer «trockenen» Umgebung auf die zu erreichende Festigkeit $f_{cm,\infty}$ kann mit folgender Beziehung abgeschätzt werden¹

$$\frac{f_{cm,\infty}(\eta < 1)}{f_{cm,\infty}(\eta = 1)} \approx 1 - s \cdot (1 - \eta) \quad \text{für } \eta = \frac{2}{3} \quad \frac{f_{cm,\infty}(\eta = \frac{2}{3})}{f_{cm,\infty}(\eta = 1)} \approx 1 - \frac{s}{3} \quad (8.3)$$

Der Parameter s kann aus dem Festigkeitsverhältnis $r_{2/28}$ mithilfe von Gleichung (7.10) bestimmt werden zu

$$s \approx 0.365 \cdot \ln\left(\frac{f_{cm,28d}}{f_{cm,2d}}\right)$$

¹Die Gleichung (8.3) gilt auch für die zu erreichende Betonzugfestigkeit $f_{ctm,\infty}$ in einer «trockenen» Umgebung.

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

oder aus dem Festigkeitsverhältnis $r_{7/28}$ mithilfe von Gleichung (8.1) bestimmt werden zu

$$s = \ln \left(\frac{f_{cm,28d}}{f_{cm,7d}} \right)$$

Die Figur 1 der SIA [114] sollte angepasst und als Erläuterung der Gleichung (8.2) aufgenommen werden. Dabei sollte einerseits ein Erwartungsbereich der Betondruckfestigkeiten (schraffiert für $s = 0.22 \dots 0.38$) gezeigt und andererseits die Linien mit $s = 0.25$ für eine mittlere Festigkeitsentwicklung und mit $s = 0.44$ für eine langsame Festigkeitsentwicklung dargestellt werden.

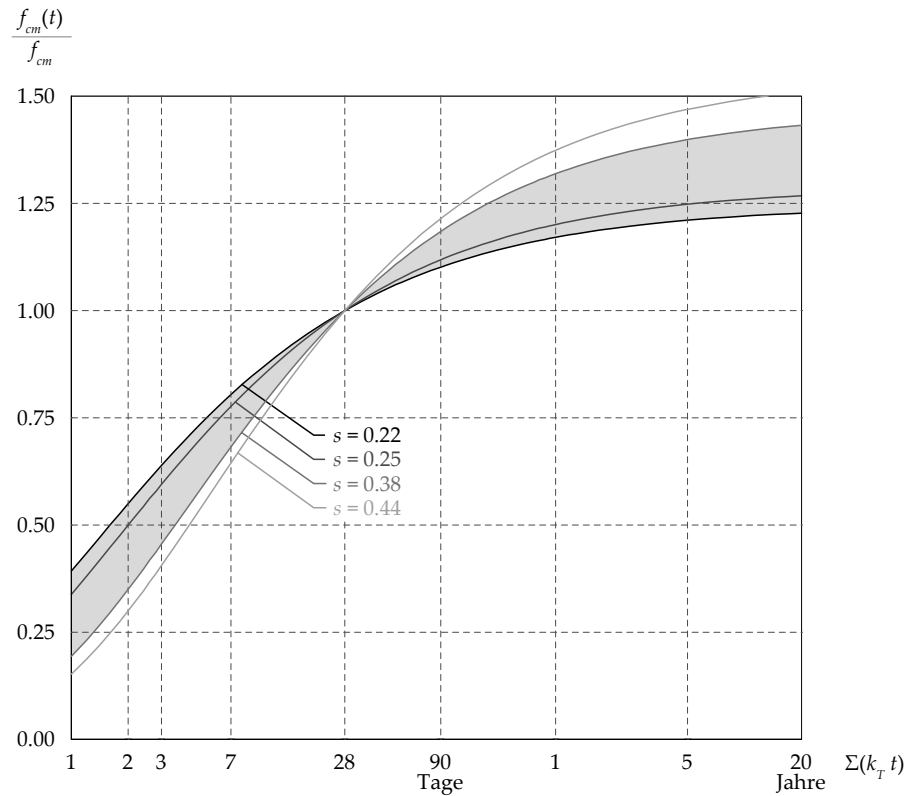


Bild 8.3: Vorschlag zur Anpassung der Figur 1 der SIA 262:2013 bzw. zur Aufnahme in die nationalen Elemente der 1992-1-1.

Bezeichnungen

Lateinische Grossbuchstaben

A	Grenzwert (Sadran), Konstante (Karbonatisierung)
A_{ct}	Zugbruchfläche
B	Bezugszeit, Bindemittelgehalt
COV	Variationskoeffizient
D	Durchmesser
D_{max}	Grösstkorn der Gesteinskörnung
E_c	Elastizitätsmodul von Beton
F	Kraft
F_{max}	maximale Kraft
F_u	Bruch-Kraft
G_f	Bruchenergie
K	Karbonatisierungskoeffizient
K_N	Faktor (Karbonatisierung)
L	Länge
M	Biegemoment
M_{cr}	Riss-Moment
M_u	Bruch-Moment
P	Halbwertszeit (Sadran)
R	Festigkeitsverhältnis (Drögsler), Druckfestigkeit (Sadran), Vergleichbarkeitsgrösse (Ringversuche)
R^2	Bestimmtheitsmass
RH	Relative Luftfeuchtigkeit
T	Temperatur
W_c	Widerstandsmoment von Beton

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Geraden-Steigung, Endfestigkeit (Wesche), Kantenlänge, Streifenbreite (Spaltzugversuch)
b	Geradenabschnitt, Breite, Exponent (Karbonatisierung)
c	Parameter (Wesche)
c_{ts}	Faktor zur Berechnung der Spaltzugfestigkeit

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

c_Z	Faktor zur Berechnung der zentrischen Zugfestigkeit
d	Parameter (Wesche), Dicke der Schädigungszone (Rissbandmodell)
d_k	Karbonatisierungstiefe
d_{KM}	mittlere Karbonatisierungstiefe
f	Festigkeit
f_c	Betondruckfestigkeit
f_{ck}	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit
f_{cm}	mittlere Zylinderdruckfestigkeit
$f_{cwm,2d}$	Würfeldruckfestigkeit bei $t = 2$ d
$f_{cwm,28d}$	Würfeldruckfestigkeit bei $t = 28$ d
f_{cp}	Prismendruckfestigkeit
f_{ct}	Betonzugfestigkeit
f_{ctm}	mittlere Betonzugfestigkeit
$f_{ctm,\infty,2/28}$	Betonzugfestigkeit bei $t \rightarrow \infty$ berechnet mit $r_{2/28}$
$f_{ctm,\infty,t>28d}$	Betonzugdruckfestigkeit bei $t \rightarrow \infty$ berechnet mit $r_{t>28d}$
f_{ctb}	Biegezugfestigkeit
$f_{ct,DP}$	Double Punch Zugfestigkeit
$f_{ct,sp}$	Spaltzugfestigkeit
f_{cw}	Würfeldruckfestigkeit
f_{cwm}	mittlere Würfeldruckfestigkeit
$f_{cwm,\infty,2/28}$	Würfeldruckfestigkeit bei $t \rightarrow \infty$ berechnet mit $r_{2/28}$
$f_{cwm,\infty,t>28d}$	Würfeldruckfestigkeit bei $t \rightarrow \infty$ berechnet mit $r_{t>28d}$
f_t	Zugfestigkeit
h	Höhe
k_E	Beiwert zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Beton
$k_{zyl/cube}$	Formfaktor zur Umrechnung von Würfel- zu Zylinderdruckfestigkeit
k_σ	Beiwert zur rechnerischen Bestimmung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms von Beton
ℓ_{ch}	charakteristische Länge
n	Probenzahl, Grösse der Stichprobe
q	verteilte Last
r	Festigkeitsverhältnis
$r_{t>28d}$	Festigkeitsverhältnis berechnet aus Prüfergebnissen im Betonalter $t > 28$ d
$r_{2/28}$	Verhältnis der Festigkeiten im Betonalter t_{2d} bzw. t_{28d}
$r_{I/II}$	Verhältnis der Festigkeiten im Betonalter t_I bzw. t_{II}
s	Formfaktor der Zeitfunktion, Standardabweichung
s_f	Standardabweichung der Festigkeit
s_{fI}	Standardabweichung der Festigkeit im Betonalter t_I
s_{fII}	Standardabweichung der Festigkeit im Betonalter t_{II}
s_R	Vergleichsstandardabweichung (Ringversuche)
s_t	Standardabweichung der Prüfzeit

8.3 Empfehlungen zur Erarbeitung der nationalen Elemente der 1992-1-1

s_x	Standardabweichung in x
s_{xy}	Kovarianz in x und y
s_y	Standardabweichung in y
$s_{y,x}$	Standardschätzfehler oder Standardfehler der Voraussage
t	Zeit, Zahlenwert zur Berechnung der Quantile der t -Verteilung
t_0	Zeitpunkt 0
$t_{0,5}$	Halbwertszeit
t_{\max}	maximales Betonalter der Festigkeits-Prüfung
t_{\min}	minimales Betonalter der Festigkeits-Prüfung
v	Freiheitsgrad (der t -Verteilung)
w	Wassergehalt
x	Abszissenwert
y	Ordinatenwert
z	Zementgehalt, Quantile der Normal-Verteilung

Indizes

\square_{calc}	berechnet
\square_{exp}	experimentell ermittelt, Versuchsergebnis
\square_i	i -ter Wert einer Datenreihe
\square_{inf}	unten («inferior»)
\square_m	Mittel
\square_{max}	Höchstwert, Maximalwert
\square_{min}	Kleinstwert, Minimalwert
\square_{sup}	oben («superior»)
\square_{tot}	total
$\bar{\square}$	Mittelwert (arithmetisches Mittel)

Sonderbezeichnungen

\varnothing	Durchmesser
∞	unendlich

Griechische Kleinbuchstaben

α	Exponent (Sadran), Risswinkel, Vertrauensintervall
α_E	Beiwert der Gesteinskörnung zur Bestimmung des E -Moduls
α_{inf}	unteres Druckspannungsniveau
α_{sup}	oberes Druckspannungsniveau

8 Zusammenfassung und Empfehlungen

β_{ts}	Spaltzugfestigkeit
β_w	Würfeldruckfestigkeit
β_Z	zentrische Zugfestigkeit
$\Delta\rho$	Grenzwert der Dichtedifferenz
ε_c	Betonstauchung
ε_{c1}	Wert der Betonstauchung beim Erreichen von f_c
ε_{c1d}	Bemessungswert der Betonstauchung beim Erreichen von f_{cd}
ε_{inf}	unteres Dehnungsniveau
ε_{sup}	oberes Dehnungsniveau
η	Faktor
η_f	Festigkeitsverhältnis $f_{cwm,\infty,t>28\text{ d}} / f_{cwm,\infty,2/28}$ bzw. $f_{cwm,\infty,t>t_{II}} / f_{cwm,\infty,r}$
η_{ft}	Festigkeitsverhältnis $f_{ctm,\infty,t>28\text{ d}} / f_{ctm,\infty,2/28}$ bzw. $f_{ctm,\infty,t>t_{II}} / f_{ctm,\infty,r}$
$\eta_{ft,calc}$	Festigkeitsverhältnis $f_{ctm,\infty,t>28\text{ d}} / f_{ctm,\infty}(f_{ck,28\text{ d}})$
η_{opt}	Korrektur-Faktor
ζ	Verhältnis der Betonstauchungen
μ	normiertes Moment M / M_{cr}
μ_{max}	maximales normiertes Moment
ρ	Dichte
ρ_0	Dichte zum Zeitpunkt t_0
σ_c	Beton-Spannung
σ_{cs}	schwindinduzierte Beton-Spannung (Eigenspannung)
σ_{inf}	untere Druckspannung
σ_{sup}	obere Druckspannung
τ	Hilfsgrösse der Zeitfunktion
τ_∞	Hilfsgrösse der Zeitfunktion bei $t \rightarrow \infty$
ω	Formfaktor der Zeitfunktion (Wesche)

Literatur

Publikationen

- [1] T. Akazawa. „New Testing Method to Find the Tensile Strength of Concrete“. en. In: *Journal of Japan Society of Civil Engineers* 29.347 (1943), S. 777–787.
- [2] M. Alvarez und P. Marti. *Versuche zum Verbundverhalten von Bewehrungsstahl bei plastischen Verformungen*. de. Techn. Ber. 222. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1996, S. 135. DOI: [10.3929/ethz-a-001685619](https://doi.org/10.3929/ethz-a-001685619).
- [3] T. Au und D.L. Baird. „Bearing Capacity of Concrete Blocks“. en. In: *ACI Journal Proceedings* (1960), S. 869–880. DOI: [10.14359/8125](https://doi.org/10.14359/8125).
- [4] D.H. Bager. „Aalborg Portland’s Durability Project – 25 Years Judgement, Nordic Exposure Sites – Input to Revision of EN 206-1“. en. In: *Workshop Proceeding from A Nordic Miniseminar, Hirtshals, Denmark 1* (2008), S. 119–135.
- [5] P.H. Bates und R. L. Blaine. „Notes on Hardening Cements at the Boiling Point of Water“. en. In: *ACI Journal* 28.4 (1932), S. 531–535. DOI: [10.14359/8250](https://doi.org/10.14359/8250).
- [6] Z.P. Bažant. „Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal“. en. In: *Journal of Engineering Mechanics* 110.4 (1984), S. 518–535.
- [7] Z.P. Bažant und B.H. Oh. „Crack Band Theory for Fracture of Concrete“. en. In: *Materials and Structures* 16.93 (1983), S. 155–177.
- [8] J. Bonzel. „Über die Biegezugfestigkeit des Betons“. de. In: *Beton* 13.4+5 (1963), S. 179–182, 227–232.
- [9] J. Bonzel. „Über die Spaltzugfestigkeit des Betons“. de. In: *Beton* 14.3+4 (1964), S. 108–114, 150–157.
- [10] J. Bonzel und V. Kadlecěk. „Einfluss der Nachbehandlung und des Feuchtigkeitszustands auf die Zugfestigkeit des Beton“. de. In: *Beton* 20.7 (1970), S. 303–309.
- [11] L. Bortolotti. „Double-Punch Test for Tensile and Compressive Strengths in Concrete“. en. In: *ACI Materials Journal* 85.1 (1988), S. 26–32. DOI: [10.14359/2482](https://doi.org/10.14359/2482).
- [12] E. Brühwiler. „Bruchmechanik von Staumauerbeton unter quasi-statischer und erbebendynamischer Einwirkung“. de. Diss. EPF Lausanne, 1988.
- [13] E. Brühwiler und F.H. Wittmann. „The Wedge splitting Test, a new Method of performing stable Fracture Mechanics Tests“. en. In: *Engineering Fracture Mechanics* 35.1/2/3 (1990), S. 117–125.
- [14] F.L.L.B. Carneiro und A. Barcellos. „Tensile Strength of Concretes“. en. In: *RILEM Bulletin* 13.347 (1953), S. 103–123.
- [15] W.F. Chen. „Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete“. en. In: *ACI Journal* (1970), S. 993–995.

- [16] W.F. Chen und D.C. Drucker. „Bearing Capacity of Concrete Blocks or Rock“. en. In: ASCE Proceedings 95.August (1969), S. 955–978.
- [17] J.E. Cook. „10'000 psi Concrete“. en. In: Concrete International October 1989 (1989), S. 67–7.
- [18] J.D Davies und D.K. Bose. „Stress Distribution in Splitting Tests“. en. In: *ACI Journal* 65.8 (1968), S. 662–669. DOI: [10.14359/7504](https://doi.org/10.14359/7504).
- [19] S.N. Doshi und H.R. Guiguis. „Statistical Relations Between Compressive and Tensile Strengths of Soil-Cement“. en. In: *Australian Road Research* 13.3 (1983), S. 195–200.
- [20] O. Drögsler. „Quelques questions relatives concernant notamment le au retrait beton et le fluage“. fr. In: *Revue des matériaux de construction* 584 (1964), S. 141–150.
- [21] C.L. Durand-Claye, Dérôme und R. Féret. *Chimie appliquée à l'art l'ingenieur – Seconde partie: Etude spéciale des Matériaux d'Agrégation des Maçonneries*. 2. Aufl. WILEY-VCH Verlag GmbH, 1897.
- [22] H. Falkner. *Zur Frage der Rissbildung durch Eigen- und Zwängsspannungen infolge Temperatur in Stahlbetonbauteilen*. de. Techn. Ber. 1969.
- [23] R.A. Fisher. *Statistical Methods for Research Workers*. Edinburgh: Oliver und Boyd, 1925.
- [24] M. Foerster. „Würfelprobe oder Kontrollbalken?“ de. In: *Armierter Beton* IV.April (1911), S. 117–119.
- [25] A. Fürst und P. Marti. *Versuche an Trägern mit Unterspannung aus vorfabrizierten, vorgespannten Betonzuggliedern*. de. Techn. Ber. 243. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1999, S. 108. DOI: [10.3929/ethz-a-003862577](https://doi.org/10.3929/ethz-a-003862577).
- [26] C.F. Gauss. „Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae – Pars prior“. lat. In: *Commentationes Societatis Regiae Scientiarum Gottingensis recentiores* 5 (1823), S. 33–62.
- [27] H.F. Gonnermann und W. Lerch. „Changes in Characteristics of Portland Cement as Exhibited by Laboratory Tests over the Period 1904 to 1950“. en. In: *ASTM Proceedings Sepcial Technical Publication No. 127* (1952), 56 S.
- [28] H.F. Gonnermann und E.C. Shuman. „Compression, Flexure and Tension Tests of Plain Concrete“. en. In: *ASTM Proceedings* (1928), S. 527–564.
- [29] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2005.
- [30] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2007.
- [31] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2012.
- [32] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2014.
- [33] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2015.

- [34] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2016.
- [35] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2017.
- [36] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2019.
- [37] TBA GR. *Ringversuch an Festbeton zur Prüfung der Druckfestigkeit und der Dichte*. de. Techn. Ber. unveröffentlicht. 2020.
- [38] S.M. von Greve-Dierfeld. „Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile“. de. Diss. TU München, 2015.
- [39] K. Hager. *Theorie des Eisenbetons*. 2. Aufl. Oldenbourg, 1916.
- [40] J.A. Hanson. „Prestress Loss as Affected by Type of Curing“. en. In: *PCI Journal* April (1964), S. 69–93.
- [41] N. Hawkins. „The Bearing Strength of Concrete Loaded through Rigid Plates“. en. In: *Magazine of Concrete Research* 20.62 (1968), S. 31–40.
- [42] J. Hedderich und L. Sachs. *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R*. 16. Aufl. Springer, 2018. ISBN: 978-3-662-56656-5. DOI: [10.1007/978-3-662-56657-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-56657-2).
- [43] H.G. Heilmann. „Beziehung zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons“. de. In: *Beton* 2 (1969), S. 67–70.
- [44] A. Hillerborg, M. Modéer und P.E. Petersson. „Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements“. en. In: *Cement and Concrete Research* 6.5 (1976), S. 773–782.
- [45] F. Hunkeler und S.M. von Greve-Dierfeld. *Karbonatisierung von Beton und Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung im karbonatisierten Beton*. de. Techn. Ber. 696. TFB AG. Forschungsbericht AGB 2013/005, 2019, 176 S.
- [46] F. Hunkeler und L. Lammar. *Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen*. de. Techn. Ber. VSS 649. TFB AG. Forschungsbericht AGB 2008/012, 2012, 191 S.
- [47] M.W. Hyland und W.F. Chen. „Bearing Capacity of Concrete Blocks“. en. In: *ACI Journal* 67.3 (1970), S. 228–236.
- [48] A. Kenel. „Biegetragverhalten und Mindestbewehrung von Stahlbetonbauteilen“. de. Nr. 14874. Diss. ETH Zurich, 2002. DOI: [10.3929/ethz-a-004470989](https://doi.org/10.3929/ethz-a-004470989).
- [49] A. Kenel und P. Marti. *Faseroptische Dehnungsmessungen an einbetonierten Bewehrungsstäben*. de. Techn. Ber. 270. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 2001, S. 93. DOI: [10.3929/ethz-a-004306146](https://doi.org/10.3929/ethz-a-004306146).
- [50] G. König, D. Scheidler und E. Fehling. „Grundlagen zur Traglastermittlung unbewehrter Betonbauteile unter Zugbeanspruchung“. de. In: *Beton und Stahlbetonbau* 81.11 und 12 (1986), S. 292–296, 325–329.
- [51] H. Linsbauer und E. Tschegg. „Die Bestimmung der Bruchenergie von zementgebundenen Werkstoffen an Würfelpföben“. de. In: *Zement und Beton* 31.1 (1986), S. 38–40.

- [52] R. Loser. *VAB-Ringversuch Karbonatisierungswiderstand von Beton nach SIA 262/1, Anhang I, Schlussbericht*. Techn. Ber. unveröffentlicht. VAB/ALA, 2015, 39 S.
- [53] A. Machida. „Studies on Tests for Splitting Tensile Strength of Concrete“. en. In: *Proceedings of JSCE* 242.Oct (1975), S. 115–124.
- [54] V. Malárics. „Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben“. de. Diss. Karlsruher Institut für Technologie KIT, 2011.
- [55] V. Malárics und H.S. Müller. „Evaluation of the Splitting Tension Test for Concrete from a Fracture Mechanical Point of View“. en. In: *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures – Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete Structures* (2010), S. 709–716.
- [56] J. Mandel. „A New Analysis of Interlaboratory Test Results“. In: *ASQC Quality Congress Transaction*, 1985, S. 267–281.
- [57] P. Marti. „Size Effect in Double-Punch Tests on Concrete Cylinders“. en. In: *ACI Materials Journal* 86.6 (1989), S. 597–601. DOI: [10.14359/2261](https://doi.org/10.14359/2261).
- [58] A. Meyer. „Die Biegezugfestigkeit als Gütemerkmal des Betons“. de. In: *Der Bauingenieur* 38.2 (1963), S. 45–51.
- [59] A.M. Neville. *Creep of Concrete: Plain, Reinforced and Prestressed*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1970. ISBN: 0 7204 0175 5.
- [60] S. Nilsson. „The Tensile Strength of Concrete Determined by Splitting Tests on Cubes“. en. In: *Bulletin RILEM* 11 (1961), S. 121–125.
- [61] O.G. Patch. „An 8-Hour Accelerated Strength Test for Field Concrete Control“. en. In: *ACI Journal* 29.March (1933). Doc. J129-15, S. 318–324. DOI: [10.14359/8276](https://doi.org/10.14359/8276).
- [62] P.E. Petterson. *Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials*. en. Techn. Ber. Report TVBM - 1006. Lund Institute of Technology, Sweden, 1981.
- [63] W.H. Price. „Factors Influencing Concrete Strength“. en. In: *ACI Journal* 47.2 (1951), S. 417–432. DOI: [10.14359/12003](https://doi.org/10.14359/12003).
- [64] J.M. Raphael. „Tensile Strength of Concrete“. en. In: *ACI Journal* March-April (1984), S. 158–165.
- [65] K.-H. Reineck, D.A. Kuchma und B. Fitik. *Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbauteile mit und ohne Bügel*. Bericht 597. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2012.
- [66] G. Rimmel. *Zum Zug- und Schubtragverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton*. Bericht 444. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1994.
- [67] H. Rinne. *Taschenbuch der Statistik*. 1060 S. Verlag Harri deutsch, 2008. ISBN: 978-3-8171-1827-4.
- [68] W. Ritter. „Die Bauweise Hennebique“. de. In: *Schweizerische Bauzeitung* XX-XIII.5,6 und 7 (1899), S. 41–43, 49–52, 59–61. DOI: [10.3931/e-rara-20036](https://doi.org/10.3931/e-rara-20036).
- [69] P.E. Roelfstra und F.H. Wittmann. „Numerical Method to link Strain Softening with Failure of Concrete“. en. In: *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, ed. F.H. Wittmann (1986), S. 163–175.

- [70] M. Roš. *Die Festigkeit des Mörtels und des Betons – Diskussionsbericht Nr. 7.* de. Techn. Ber. 7. Empa, 1925, 64 S.
- [71] M. Roš. *Die zukünftigen schweizerischen Normen für Bindemittel auf Grundlage von Untersuchungsergebnissen der E.M.P.A. in den Jahren 1922 bis 1924 – Diskussionsbericht Nr. 1.* de. Techn. Ber. 1. Empa, 1925, 14 S.
- [72] M. Roš. *Belastungsversuche am Langwieser Viadukt über die Plessur der Chur-Arosa-Bahn.* de. Techn. Ber. Empa, 1938, 11 S.
- [73] M. Roš. *Die materialtechnischen Grundlagen und Probleme des Eisenbetons im Hinblick auf die zukünftige Gestaltung der Stahlbeton-Bauweise – Bericht Nr. 162.* de. Techn. Ber. 162. Empa, 1950, 305 S.
- [74] F.S. Rostasy und E.H. Ranisch. *Altersabhängige Beziehung, zwischen der Druck- und Zugfestigkeit von Beton im Bauwerk – Bauwerkszugfestigkeit.* de. Techn. Ber. Heft 408. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1990, 38 S.
- [75] H. Rüschi. „Die Ableitung der charakteristischen Werte der Betonzugfestigkeit“. de. In: Beton 2 (1975), S. 55–58.
- [76] H. Rüschi, R. Sell und R. Rackwitz. *Statistische Analyse der Betonfestigkeit.* de. Bericht 201. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1969, 38 S.
- [77] G. Sadran und R. Dellyes. „Représentation linéaire de la résistance mécanique des ciments en fonction du temps“. fr. In: Revue des matériaux de construction 606 (1966), S. 93–106.
- [78] D. Saje und J. Lopatič. „The Effect of Constituent Materials on the Time Development of the Compressive Strength of High-Strength Concrete“. en. In: Magazine of Concrete Research 62.April (2010), S. 291–300. DOI: [10.1680/mac.2010.62.4.291](https://doi.org/10.1680/mac.2010.62.4.291).
- [79] M. Sargin. *Stress-Strain Relationship for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections, Study 4.* Solid Mechanics Division; University of Waterloo, Waterloo, Canada, 1971.
- [80] J. Schnell u. a. *Sachstandbericht Bauen im Bestand – Teil I: Mechanische Kennwerte historischer Betone, Betonstähle und Spannstähle für die Nachrechnung von bestehenden Bauwerken.* Bericht 616. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2016, 128 S.
- [81] F. Schüle u. a. „Diskussionen über «Würfelprobe oder Kontrollbalken?»“ de. In: Armierter Beton IV.Mai (1911), S. 151–172.
- [82] E.V. Sorensen. „Properties of Concrete Exposed to Running Fresh Water for 24 years, Nordic Exposure Sites – Input to revision of EN 206-1“. en. In: Workshop Proceeding from A Nordic Miniseminar, Hirtshals, Denmark 1 (2008), S. 265–273.
- [83] Ph. Stoffel und P. Marti. *Modellversuche Europabrücken.* de. Techn. Ber. 227. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 1997, S. 118. DOI: [10.3929/ethz-a-001800362](https://doi.org/10.3929/ethz-a-001800362).
- [84] Student. „The Probable Error of a Mean“. en. In: Biometrika 6.1 (1908). Author: William Sealy Gosset, S. 1–25. DOI: [10.1093/biomet/6.1.1](https://doi.org/10.1093/biomet/6.1.1).
- [85] *VAB-Ringversuch Bohrkerndruck- und Zugfestigkeit, Schlussbericht.* Techn. Ber. unveröffentlicht. VAB/ALA, 2009, 38 S.

- [86] K. Walz und J. Dahms. „Kurzfristige Festigkeitsprüfung zur Güteüberwachung des Betons“. de. In: Berichte und Mitteilungen der betontechnischen Abteilung des Forschungsinstitutes der Zementindustrie Heft 11 und 12.5 (1961), 752-756 und 813–818.
- [87] G.W. Washa, J.C. Saemann und S.M. Cramer. „Fifty-Year Properties of Concrete Made in 1937“. en. In: ACI Journal 86.4 (1989), S. 20–28. DOI: [10.14359/2139](https://doi.org/10.14359/2139).
- [88] G.W. Washa und K.F. Wendt. „Fifty Year Properties of Concrete“. en. In: ACI Journal 72.1 (1975), S. 20–28. DOI: [10.14359/11112](https://doi.org/10.14359/11112).
- [89] M. Weber und C. Thiele. „Korrelation von Betondruck- und Zugfestigkeit historischer Betone – Bewertung der Anwendbarkeit bestehender Regeln nach DIN EN 1992-1-1“. de. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111.10 (2016), S. 635–644. DOI: [10.1002/best.201600038](https://doi.org/10.1002/best.201600038).
- [90] R. Weber und K. Wesche. *Entwicklung eines Verfahrens zur Vorausbestimmung der Druckfestigkeit von Normal- und Leichtbetonen in Abhängigkeit von den Matrix und Zuschlageigenschaften unter Anwendung mathematisch-statistischer Verfahren*. de. Techn. Ber. Nr. 2783 / Fachgruppe Bau/Steine/Erden. FORSCHUNGSBERICHTE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN, 1978, 168 S.
- [91] K. Wesche. *Baustoffe für tragende Bauteile*. Bd. 2; Beton, Mauerwerk. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH, 1993, 524 S. ISBN: 3-7625-2681-8.
- [92] H.J. Wierig. „Frischbeton und Bauwerksqualität“. de. In: *Beton* 33.5 (1983), S. 175–179.
- [93] M.O. Withey. „Fifty Year Compression Test of Concrete“. en. In: ACI Journal 58.12 (1961), S. 695–712. DOI: [10.14359/8003](https://doi.org/10.14359/8003).
- [94] S.L. Wood. „Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete“. en. In: ACI Materials Journal 88.6 (1991), S. 630–643.
- [95] C. Zelger. „Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit“. de. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 51.6 (1956), S. 139–140.
- [96] C. Zelger. „Comments on an Indirect Tensile Test on Concrete Cylinders“. en. In: *Magazine of Concrete Research* 6.20 (1955), S. 87–96.
- [97] O. Zeman, M. Schwenn und K. Bergmeister. „Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit und ihr Einfluss auf das Tragverhalten von Befestigungen“. de. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110.6 (2015), S. 402–409. DOI: [10.1002/best.201400093](https://doi.org/10.1002/best.201400093).
- [98] J. Zhao. *Mechanical Properties of Concrete at early Ages*. en. Techn. Ber. University of Ottawa, 1991, 124 S.
- [99] W. Zheng, A. K. H. Kwan und P. K. K. Lee. „Direct Tension Test of Concrete“. en. In: ACI Materials Journal 98.1 (2001), S. 63–71.
- [100] K. Zilch (Obmann). *Erläuterungen zu DIN 1045-1*. Bericht 525. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2003, 223 S.

Normen

- [101] CEB Comite Euro-International du Beton. *CEB-FIP Model Code 1990*. Thomas Telford Services Ltd, 1993. ISBN: 0 7277 1696 4.

- [102] fib - federation internationale du beton fib. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Wiley, 2013. ISBN: 9783433030615. URL: <https://books.google.ch/books?id=Xf91AQAAQBAJ>.
- [103] fib - federation internationale du beton fib. *fib Model Code for Concrete Structures 2020*. Wiley, 2023. ISBN: 978-88394-175-5.
- [104] ISO. *Norm 5725-1 – Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 1: General principles and definitions*. International Organization for Standardization, 1997, 44 S.
- [105] ISO. *Norm 5725-2 – Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method*. International Organization for Standardization, 2019, 69 S.
- [106] SIA. *Norm SN EN 1542 – Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Messung der Haftfestigkeit im Abreissversuch*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 1999, 4 S. national plus 11 S. EN.
- [107] SIA. *Norm SIA 262:001 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Zürich. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2004, 246 S.
- [108] SIA. *Norm SIA 14630 – Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2006, 7 S. EN + 3 S. national.
- [109] SIA. *Norm SN EN 12390-2 – Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2009, 2 (national) + 8 (EN).
- [110] SIA. *Norm SN EN 12390-3 – Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2009, 17 S.
- [111] SIA. *Norm SN EN 12390-7 – Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2009, 10 S.
- [112] SIA. *Norm SIA 269/2 – Erhaltung von Tragwerken-Betonbau*. Zürich. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2011, 44 S.
- [113] SIA. *Norm SN EN 12390-1 – Prüfung von Festbeton – Teil 1: Form, Masse und andere Anforderungen für Probekörper und Formen*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2012, 15 S.
- [114] SIA. *Norm SIA 262 – Betonbau*. Zürich. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2013, 102 S.
- [115] SIA. *Merkblatt SIA 2052 Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2016, 48 S.
- [116] SIA. *Merkblatt SIA 2030 Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2021.
- [117] SIA. *Norm SN EN 206 – Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2022, 144 S.

Dokumentationen

- [118] R. Koppitz und A. Kenel. *Bestimmung der Spaltzugfestigkeit mittels Stempeldruckversuch*. (kann beim Autor bezogen werden). 2017, 4 S.

A Anhang

A.1 Frischbetonkontrollen – Prüfberichte

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	AA		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/B-LL 32,5 R	290 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:					
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikastaub	---	kg/m ³
			Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	---	--- % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:		16.02.2015		Entnahme:		.....		nach 0 - 0.2 m ³						
Witterung:		trocken		Stichproben		Laborant: hf/re/jw								
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	AA	8:27	8:35	21.1	21.4	2390	1.00					550	F4	W 1-66

Bild A.1: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle A-A.

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	AB		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N I	290 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:					
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikastaub	---	kg/m ³
			Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	---	--- % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:		18.02.2015		Entnahme:		.....		nach 0 - 0.2 m ³						
Witterung:		trocken		Stichproben		Laborant: hf/re/jw								
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	AB	8:08	8:15	19.8	19.8	2400	0.60					550	F4	W 1-66

Bild A.2: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle A-B.

A Anhang

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	ABT
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N 290 kg/m ³
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche --- kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub --- kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry --- kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1: --- % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2: --- % Zem.
Weitere Angaben:	---		

Datum FBK:	18.02.2015	Entnahme:	.....	nach 0 - 0.2 m ³										
Witterung:	trocken	Stichproben		Laborant: hf/re/jw										
	Liefer-	Herstellung	Entnahme	Temperatur	Roh-	Luft	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-	
	schein-			Luft	Beton	dichte	A₁	m₀	w₀	w/z *	C	F	Kl.	körper
Nr.	Nr.	[h:min]	[h:min]	[°C]	[°C]	[kg/m³]	[%]	[g]	[kg/m³]	[-]	[-]	[mm]		W 1-66
1	ABT	10:13	10:20	19.0	18.8	2430	0.70					540	F4	

Bild A.3: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle A-BT.

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	AC
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/A-LL 42,5 N 290 kg/m ³
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche --- kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub --- kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry --- kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1: --- % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2: --- % Zem.
Weitere Angaben:	---		

Datum FBK:	26.01.2015	Entnahme:	.....	nach 0 - 0.2 m ³										
Witterung:	trocken	Stichproben		Laborant: ck/hf/re										
	Liefer-	Herstellung	Entnahme	Temperatur	Roh-	Luft	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-	
	schein-			Luft	Beton	dichte	A₁	m₀	w₀	w/z *	C	F	Kl.	körper
Nr.	Nr.	[h:min]	[h:min]	[°C]	[°C]	[kg/m³]	[%]	[g]	[kg/m³]	[-]	[-]	[mm]		W 1-66
1	A-C	8:00	8:15	19.0	20.2	2410	0.90					570	F5	

Bild A.4: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle A-C.

A.1 Frischbetonkontrollen – Prüfberichte

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsclassen:	---	Rezeptur-Nr.:	ACT		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/A-LL 42,5 N	290 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	---	--- % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:		26.01.2015	Entnahme:		.....	nach 0 - 0.2 m ³								
Witterung:		trocken	Stichproben			Laborant: ck/hf/re								
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung	Entnahme	Temperatur		Roh-dichte	Luft	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
	Nr.	[h:min]	[h:min]	Luft	Beton	A ₁	A ₁	m ₀	w ₀	w/z *)	C	F	Kl.	
1	ACT	9:45	10:00	19.0	19.6	2400	0.90					560	F5	W 1-66

Bild A.5: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle A-CT.

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsclassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CD		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/A-LL 52,5 N	310 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:		28.01.2015	Entnahme:		.....	nach 0 - 0.2 m ³								
Witterung:		trocken	Stichproben			Laborant: hf,re,ck									
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung	Entnahme	Temperatur		Roh-dichte	Luft	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper	
	Nr.	[h:min]	[h:min]	Luft	Beton	A ₁	A ₁	m ₀	w ₀	w/z *)	C	F	Kl.		
1	CD	7:56	8:06	21.0	20.2	2440	0.70					530	F	F4	W 1-66

Bild A.6: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-D.

A Anhang

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CE		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/B-M (S-T) 42,5 R	310 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	13 %	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	---	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	---
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:	02.02.2015		Entnahme:	.....	nach 0 - 0.2 m3									
Witterung:	trocken		Stichproben		Laborant: jw/hf/re									
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CE	10:35	10:40	18.3	16.7	2430	0.60					570	F5	W 1-66

Bild A.7: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-E.

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CF		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	310 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete3082	0.38 % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	---
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:	04.02.2015		Entnahme:	.....	nach 0 - 0.2 m3									
Witterung:	trocken		Stichproben		Laborant: cf/re/jw									
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CF	8:06	8:10	19.0	17.7	2430	1.30					530	F4	W 1-66

Bild A.8: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-F.

A.1 Frischbetonkontrollen – Prüfberichte

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsclassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CFT		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N	310 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:		04.02.2015	Entnahme:		.....	nach 0 - 0.2 m ³								
Witterung:		trocken	Stichproben			Laborant: cf/re/ck								
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CFT	10:27	10:31	19.9	16.7	2450	0.80					550	F4	W 1-66

Bild A.9: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-FT.

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB		
Expositionsclassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CG		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/A-LL 42,5 N	310 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:		09.02.2015	Entnahme:		.....	nach 0 - 0.2 m ³								
Witterung:		trocken	Stichproben			Laborant: re/ck/hf								
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CG	8:22	8:28	19.5	18.4	2440	0.60					570	F5	W 1-66

Bild A.10: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-G.

A Anhang

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG		
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CGT		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/A-LL 42,5 N	310 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	--- kg/m ³	
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	--- kg/m ³	
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	--- kg/m ³	
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:	09.02.2015		Entnahme:	.....	nach 0 - 0.2 m ³									
Witterung:	trocken		Stichproben		Laborant: re/jw/ck									
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CGT	10:43	10:48	20.5	17.4	2430	0.80					560	F5	W 1-66

Bild A.11: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-GT.

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB		
Expositionsklassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CG		
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM II/A-LL 42,5 N	310 kg/m ³	
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	--- kg/m ³	
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	--- kg/m ³	
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	--- kg/m ³	
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	--- % Zem.
Weitere Angaben:	---				

Datum FBK:	09.02.2015		Entnahme:	.....	nach 0 - 0.2 m ³									
Witterung:	trocken		Stichproben		Laborant: re/ck/hf									
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CG	8:22	8:28	19.5	18.4	2440	0.60					570	F5	W 1-66

Bild A.12: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-H.

A.1 Frischbetonkontrollen – Prüfberichte

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG			
Expositionsclassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CI			
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM III/B 42,5 N	310 kg/m ³		
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³	
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³	
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³	
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.	
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	---	% Zem.
Weitere Angaben:	---					

Datum FBK:		23.02.2015	Entnahme:		.....	nach 0 - 0.2 m ³								
Witterung:		trocken	Stichproben			Laborant: hf/ck/re								
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CI	8:20	8:27	19.1	20.3	2410	0.80					580	F5	W 1-66

Bild A.13: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-I.

Festigkeitsklasse:	---	Betonwerk:	TFB AG			
Expositionsclassen:	---	Rezeptur-Nr.:	CK			
Chloridgehaltskl.:	---	Zementart:	CEM I 42,5 N	310 kg/m ³		
Konsistenzklasse:	---	Zusatzstoff Typ II:	Flugasche	---	kg/m ³	
Angaben zur Gesteinskörnung:			Silikastaub	---	kg/m ³	
Grösstkorn D_{max}:	32 mm		Silikast.-Slurry	---	kg/m ³	
Korrekturfaktor G:	---	(A _c =A ₁ -G)	Zusatzmittel 1:	Sika Viscocrete 3082	0.38 % Zem.	
Wasseraufnahme w_G:	13 kg/m ³	(w=w ₀ -w _G)	Zusatzmittel 2:	---	---	% Zem.
Weitere Angaben:	---					

Datum FBK:		11.02.2015	Entnahme:		.....	nach 0 - 0.2 m ³								
Witterung:		trocken	Stichproben			Laborant: hf/ck/jw								
Nr.	Liefer-schein-Nr.	Herstellung [h:min]	Entnahme [h:min]	Temperatur		Roh-dichte [kg/m ³]	Luft A ₁ [%]	Wassergehalt			Konsistenz			Prüf-körper
				Luft [°C]	Beton [°C]			m ₀ [g]	w ₀ [kg/m ³]	w/z *) [-]	C [-]	F [mm]	Kl.	
1	CK	10:29	10:37	19.5	18.3	2420	0.90					550	F4	W 1-66

Bild A.14: Prüfbericht der Frischbetonkontrolle C-K.

A.2 Festigkeiten

A.2.1 Festigkeiten A-A

Druckfestigkeit		Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]	effektiv	korrigiert
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	datum	datum	t [d]	t [a]	m [kg]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	ρ_{roh} [kg/m ³]	$F_{u,cube}$ [kN]	f_{cum} [N/mm ²]		f_{cum} [N/mm ²]
100000	TFB	16.02.15	18.02.15	2.1	0.01	8.04	149.0	148.9	150.2	2'410	357.5	16.1		15.9
100000	TFB	16.02.15	18.02.15	2.1	0.01	7.99	149.1	148.7	149.7	2'410	362.1	16.3		16.1
100000	TFB	16.02.15	18.02.15	2.1	0.01	7.94	149.2	149.0	149.8	2'380	358.4	16.1		15.9
100000	TFB	16.02.15	23.02.15	7.1	0.02	7.97	149.2	149.0	149.7	2'400	584.8	26.3		26.0
100000	TFB	16.02.15	23.02.15	7.1	0.02	7.93	149.1	149.1	149.5	2'390	557.6	25.1		24.9
100000	TFB	16.02.15	23.02.15	7.1	0.02	8.00	149.4	148.8	149.7	2'400	556.8	25.0		24.8
100000	TFB	16.02.15	16.03.15	28.1	0.08	8.03	149.5	149.6	150.2	2'390	681.9	30.5		30.2
100000	TFB	16.02.15	16.03.15	28.1	0.08	8.01	149.7	148.5	149.8	2'410	724.9	32.6		32.3
100000	TFB	16.02.15	16.03.15	28.1	0.08	8.09	150.0	149.7	150.1	2'400	687.7	30.6		30.3
100000	TFB	16.02.15	13.04.15	56.1	0.15	8.02	149.5	149.5	149.9	2'390	767.7	34.3		34.0
100000	TFB	16.02.15	13.04.15	56.1	0.15	8.10	149.9	149.7	150.2	2'400	806.4	35.9		35.6
100000	TFB	16.02.15	13.04.15	56.1	0.15	8.09	149.7	150.5	149.9	2'390	800.4	35.5		35.2
120000	HSR	16.02.15	16.03.15	28.3	0.08	8.10	150.0	150.0	150.3	2'400	730.0	32.4		32.4
120000	HSR	16.02.15	16.03.15	28.3	0.08	8.04	149.7	149.8	149.5	2'400	708.4	31.6		31.6
120000	HSR	16.02.15	16.03.15	28.3	0.08	8.00	149.8	149.8	149.2	2'390	721.7	32.2		32.2
120000	HSR	16.02.15	15.05.15	88.2	0.24	8.06	150.2	150.2	149.5	2'390	816.2	36.2		36.2
120000	HSR	16.02.15	15.05.15	88.2	0.24	8.02	149.9	149.9	149.8	2'380	789.0	35.1		35.1
120000	HSR	16.02.15	15.05.15	88.2	0.24	8.08	150.1	150.1	149.9	2'390	810.0	36.0		36.0
120000	HSR	16.02.15	10.08.15	175.1	0.48	7.98	149.8	149.7	150.0	2'370	831.6	37.1		37.1
120000	HSR	16.02.15	10.08.15	175.1	0.48	7.88	149.8	149.0	149.2	2'370	891.6	39.9		39.9
120000	HSR	16.02.15	10.08.15	175.1	0.48	8.04	149.9	150.0	150.5	2'380	848.3	37.7		37.7
120000	HSR	16.02.15	08.02.16	357.3	0.98	7.96	149.0	150.1	150.0	2'370	926.7	41.4		41.4
120000	HSR	16.02.15	08.02.16	357.3	0.98	8.02	149.3	149.7	149.7	2'400	867.0	38.8		38.8
120000	HSR	16.02.15	08.02.16	357.3	0.98	7.96	149.1	150.0	150.0	2'370	918.3	41.1		41.1
120000	HSR	16.02.15	03.02.17	718.3	1.97	7.96	150.4	150.1	150.1	2'350	940.8	41.7		41.7
120000	HSR	16.02.15	03.02.17	718.3	1.97	7.92	148.3	149.6	149.7	2'380	851.0	38.4		38.4
120000	HSR	16.02.15	03.02.17	718.3	1.97	7.98	150.7	149.8	149.8	2'360	922.0	40.8		40.8
120000	HSR	16.02.15	23.01.20	1802.1	4.94	8.06	148.4	149.9	149.9	2'420	907.4	40.8		40.8
120000	HSR	16.02.15	23.01.20	1802.1	4.94	8.04	150.4	149.8	149.8	2'380	889.5	39.5		39.5
120000	HSR	16.02.15	23.01.20	1802.1	4.94	8.12	150.1	150.1	150.2	2'400	885.1	39.3		39.3
120000	HSR	16.02.15	06.03.25	3671.1	10.06	8.04	150.5	149.8	149.8	2'380	995.3	44.1		44.1
120000	HSR	16.02.15	06.03.25	3671.1	10.06	8.12	152.3	150.0	149.9	2'370	936.8	41.0		41.0
120000	HSR	16.02.15	06.03.25	3671.1	10.06	8.00	149.6	150.0	150.2	2'370	1'020.9	45.5		45.5

Tabelle A.1: Würfeldruckfestigkeiten A-A.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)		Betonger- datum		Prüf- datum		Alter t [d]		Alter t [a]		Masse m [kg]		Würfelabmessungen L [mm] B [mm] H [mm]		Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]		Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]		Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]		Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]		Zylinder / Stempel	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf-Anstalt	Betonger- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	m [kg]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	ρ_{roh} [kg/m ³]	$F_{u,cube}$ [kN]	$f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	$f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	$f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	$f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	$F_{u,cube}$ [kN]	ρ_{roh} [kg/m ³]	$F_{u,cube}$ [kN]	$f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	$f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	16.02.15	18.02.15	2.1	0.01	8.05	151.0	150.0	150.0	2'370	61.1	1.5	1.5	1.5	1.5	61.1	2'370	61.1	1.5	1.5	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	18.02.15	2.1	0.01	8.00	150.0	151.0	150.0	2'350	58.7	1.4	1.4	1.4	1.4	58.7	2'350	58.7	1.4	1.4	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	18.02.15	2.1	0.01	8.03	150.0	150.0	150.0	2'380	56.6	1.4	1.4	1.4	1.4	56.6	2'380	56.6	1.4	1.4	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	23.02.15	7.1	0.02	8.01	149.0	150.0	150.0	2'390	87.4	2.1	2.1	2.1	2.1	87.4	2'390	87.4	2.1	2.1	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	23.02.15	7.1	0.02	8.01	149.0	149.0	150.0	2'410	86.5	2.1	2.1	2.1	2.1	86.5	2'410	86.5	2.1	2.1	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	23.02.15	7.1	0.02	7.95	149.0	149.0	150.0	2'390	85.3	2.1	2.1	2.1	2.1	85.3	2'390	85.3	2.1	2.1	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	16.03.15	28.1	0.08	8.02	150.0	149.0	150.0	2'390	94.0	2.3	2.3	2.3	2.3	94.0	2'390	94.0	2.3	2.3	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	16.03.15	28.1	0.08	8.02	150.0	150.0	150.0	2'380	99.4	2.4	2.4	2.4	2.4	99.4	2'380	99.4	2.4	2.4	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	16.03.15	28.1	0.08	8.07	150.0	150.0	150.0	2'390	88.5	2.1	2.1	2.1	2.1	88.5	2'390	88.5	2.1	2.1	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	13.04.15	56.1	0.15	8.10	150.0	151.0	150.0	2'390	97.0	2.3	2.3	2.3	2.3	97.0	2'390	97.0	2.3	2.3	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	13.04.15	56.1	0.15	8.08	150.0	150.0	150.0	2'390	102.9	2.5	2.5	2.5	2.5	102.9	2'390	102.9	2.5	2.5	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	16.02.15	13.04.15	56.1	0.15	8.15	151.0	150.0	150.0	2'400	100.0	2.4	2.4	2.4	2.4	100.0	2'400	100.0	2.4	2.4	150.5	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	16.03.15	28.3	0.08	8.06	150.0	150.0	149.6	2'390	93.0	2.3	2.3	2.3	2.3	93.0	2'390	93.0	2.3	2.3	150.0	149.6	37.5
120000	HSR	16.02.15	16.03.15	28.3	0.08	8.02	149.7	149.7	149.7	2'390	100.3	2.4	2.4	2.4	2.4	100.3	2'390	100.3	2.4	2.4	149.7	149.7	37.5
120000	HSR	16.02.15	16.03.15	28.3	0.08	8.12	150.2	150.1	150.0	2'400	101.7	2.5	2.5	2.5	2.5	101.7	2'400	101.7	2.5	2.5	150.2	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	18.05.15	91.2	0.25	8.06	149.9	149.9	150.2	2'390	104.0	2.5	2.5	2.5	2.5	104.0	2'390	104.0	2.5	2.5	149.9	150.2	37.5
120000	HSR	16.02.15	18.05.15	91.2	0.25	8.08	150.0	150.1	149.5	2'400	97.6	2.4	2.4	2.4	2.4	97.6	2'400	97.6	2.4	2.4	150.1	149.5	37.5
120000	HSR	16.02.15	18.05.15	91.2	0.25	8.10	150.1	149.9	151.3	2'380	98.6	2.4	2.4	2.4	2.4	98.6	2'380	98.6	2.4	2.4	150.0	151.3	37.5
120000	HSR	16.02.15	10.08.15	175.3	0.48	7.96	150.5	150.3	150.0	2'350	114.5	2.8	2.8	2.8	2.8	114.5	2'350	114.5	2.8	2.8	150.4	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	10.08.15	175.3	0.48	7.96	150.0	150.0	148.6	2'380	119.2	2.9	2.9	2.9	2.9	119.2	2'380	119.2	2.9	2.9	150.0	148.6	37.5
120000	HSR	16.02.15	10.08.15	175.3	0.48	8.00	150.0	150.0	150.3	2'370	121.5	2.9	2.9	2.9	2.9	121.5	2'370	121.5	2.9	2.9	150.0	150.3	37.5
120000	HSR	16.02.15	08.02.16	357.3	0.98	7.94	149.0	150.1	150.1	2'370	138.9	3.4	3.4	3.4	3.4	138.9	2'370	138.9	3.4	3.4	149.6	150.1	37.5
120000	HSR	16.02.15	08.02.16	357.3	0.98	8.00	150.3	150.0	150.0	2'370	112.1	2.7	2.7	2.7	2.7	112.1	2'370	112.1	2.7	2.7	150.2	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	08.02.16	357.3	0.98	8.02	149.4	150.1	150.1	2'380	125.7	3.0	3.0	3.0	3.0	125.7	2'380	125.7	3.0	3.0	149.8	150.1	37.5
120000	HSR	16.02.15	03.02.17	718.3	1.97	8.06	150.8	150.0	150.1	2'380	120.6	2.9	2.9	2.9	2.9	120.6	2'380	120.6	2.9	2.9	150.4	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	03.02.17	718.3	1.97	8.04	150.0	150.4	150.3	2'370	128.5	3.1	3.1	3.1	3.1	128.5	2'370	128.5	3.1	3.1	150.2	150.3	37.5
120000	HSR	16.02.15	03.02.17	718.3	1.97	8.10	152.1	150.0	150.0	2'370	118.3	2.8	2.8	2.8	2.8	118.3	2'370	118.3	2.8	2.8	151.1	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	28.01.20	1807.3	4.95	7.96	149.7	150.0	150.0	2'360	124.1	3.0	3.0	3.0	3.0	124.1	2'360	124.1	3.0	3.0	149.9	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	28.01.20	1807.3	4.95	8.06	151.6	150.0	150.0	2'360	128.4	3.1	3.1	3.1	3.1	128.4	2'360	128.4	3.1	3.1	150.8	150.0	37.5
120000	HSR	16.02.15	28.01.20	1807.3	4.95	8.04	151.5	150.1	150.1	2'360	122.7	3.0	3.0	3.0	3.0	122.7	2'360	122.7	3.0	3.0	150.8	150.1	37.5
120000	HSR	16.02.15	06.03.25	3671.3	10.06	8.09	151.2	150.0	150.1	2'380	119.8	2.9	2.9	2.9	2.9	119.8	2'380	119.8	2.9	2.9	150.6	150.1	37.5
120000	HSR	16.02.15	07.03.25	3671.6	10.06	8.05	149.9	149.7	149.8	2'390	118.9	2.9	2.9	2.9	2.9	118.9	2'390	118.9	2.9	2.9	149.8	149.8	37.5
120000	HSR	16.02.15	08.03.25	3672.6	10.06	8.14	151.3	150.2	150.2	2'380	117.1	2.8	2.8	2.8	2.8	117.1	2'380	117.1	2.8	2.8	150.8	150.2	37.5

effektiv korrigiert

Tabelle A.2: Double-Punch-Zugfestigkeiten A-A.

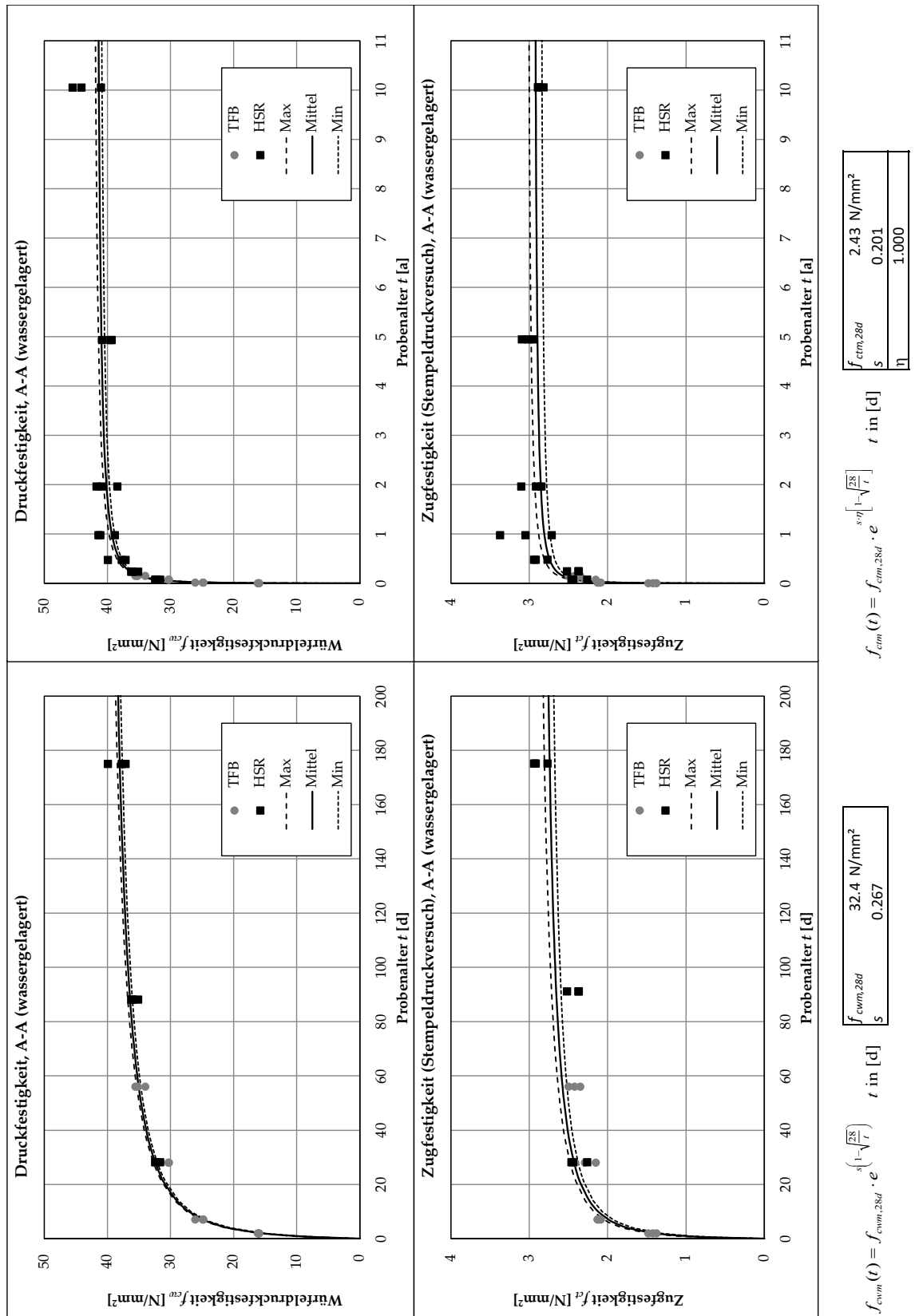


Bild A.15: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten A-A.

A.2.2 Festigkeiten A-B

Druckfestigkeit		Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	effektiv	korrigiert
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt						L [mm]	B [mm]	H [mm]		$F_{u,cube}$ [kN]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.08	148.8	149.4	149.6	2'430	412.7	18.6	18.3
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.11	149.2	150.0	149.9	2'420	425.1	19.0	18.7
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.09	149.2	149.1	149.9	2'420	436.7	19.6	19.3
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	7.0	0.02	8.10	149.5	149.9	150.1	2'410	683.0	30.5	30.0
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	7.0	0.02	8.04	148.8	148.8	149.5	2'430	733.8	33.1	32.5
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	7.0	0.02	7.98	148.8	148.5	149.4	2'420	718.0	32.5	31.9
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.1	0.08	8.00	149.7	149.3	149.9	2'390	810.6	36.3	35.7
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.1	0.08	8.20	150.1	150.4	150.1	2'420	841.1	37.3	36.7
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.1	0.08	7.98	149.5	149.1	149.7	2'390	847.1	38.0	37.3
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.1	0.15	8.10	149.4	149.7	150.0	2'410	898.3	40.2	39.5
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.1	0.15	8.16	150.7	149.7	150.4	2'410	895.0	39.7	39.0
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.1	0.15	8.07	149.7	149.1	150.1	2'410	849.6	38.1	37.4
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.3	0.08	8.04	149.9	149.9	149.8	2'390	843.0	37.5	37.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.3	0.08	7.96	149.8	150.0	149.4	2'370	887.5	39.5	39.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.3	0.08	8.08	149.8	149.8	151.0	2'380	821.5	36.6	36.6
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.2	0.25	8.18	150.1	150.1	150.9	2'410	929.5	41.3	41.3
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.2	0.25	8.04	150.1	150.1	149.5	2'390	895.8	39.8	39.8
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.2	0.25	8.14	150.1	149.9	150.4	2'410	868.0	38.6	38.6
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	173.1	0.47	8.16	149.9	150.0	150.5	2'410	951.7	42.3	42.3
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	173.1	0.47	8.02	149.9	149.9	150.8	2'370	971.9	43.3	43.3
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	173.1	0.47	8.08	149.9	149.9	149.9	2'400	981.4	43.7	43.7
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	356.0	0.98	8.04	149.5	150.0	150.0	2'390	1'026.7	45.8	45.8
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	356.0	0.98	8.04	149.1	150.0	150.0	2'400	1'066.9	47.7	47.7
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	356.0	0.98	7.96	148.7	149.8	149.8	2'390	1'003.0	45.0	45.0
120000	HSR	18.02.15	03.02.17	716.3	1.96	8.06	149.6	150.4	150.2	2'380	1'044.7	46.4	46.4
120000	HSR	18.02.15	03.02.17	716.3	1.96	8.08	151.0	150.2	150.2	2'370	1'010.5	44.6	44.6
120000	HSR	18.02.15	03.02.17	716.3	1.96	8.14	149.0	150.4	150.1	2'420	984.6	43.9	43.9
120000	HSR	18.02.15	23.01.20	1800.1	4.93	8.04	148.5	149.9	149.9	2'410	1'011.4	45.4	45.4
120000	HSR	18.02.15	23.01.20	1800.1	4.93	8.18	150.1	150.1	150.2	2'420	1'020.8	45.3	45.3
120000	HSR	18.02.15	23.01.20	1800.1	4.93	8.02	148.6	149.9	150.0	2'400	1'047.5	47.0	47.0
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.2	10.05	8.12	149.9	150.2	150.3	2'400	1'064.4	47.3	47.3
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.2	10.05	8.19	151.3	150.4	150.4	2'390	1'103.6	48.5	48.5
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.2	10.05	8.21	151.0	150.3	150.3	2'410	1'099.7	48.5	48.5

Tabelle A.3: Würfeldruckfestigkeiten A-B.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,abse}$ [kN]	Festigkeit $f_{cs,z}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{cs,z}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.00	150.0	150.0	149.0	2'390	64.6	1.6	1.5	150.0	149.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.11	151.0	150.0	150.0	2'390	63.1	1.5	1.4	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.14	151.0	150.0	150.0	2'400	58.1	1.4	1.3	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	7.0	0.02	8.14	149.0	149.0	150.0	2'450	87.7	2.1	2.0	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	7.0	0.02	8.05	149.0	150.0	150.0	2'400	87.3	2.1	2.0	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	7.0	0.02	8.16	149.0	150.0	150.0	2'430	90.6	2.2	2.0	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.1	0.08	8.11	150.0	150.0	150.0	2'400	99.4	2.4	2.2	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.1	0.08	8.16	151.0	150.0	150.0	2'400	111.5	2.7	2.5	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.1	0.08	8.13	151.0	150.0	150.0	2'390	102.0	2.5	2.3	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.1	0.15	8.09	150.0	150.0	150.0	2'400	112.6	2.7	2.5	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.1	0.15	8.23	150.0	151.0	151.0	2'410	110.9	2.7	2.5	150.5	151.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.1	0.15	8.06	149.0	150.0	150.0	2'400	121.2	2.9	2.7	149.5	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.3	0.08	8.12	150.0	150.0	150.4	2'400	96.7	2.3	2.3	150.0	150.4	37.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.3	0.08	8.16	150.2	150.2	150.3	2'410	110.8	2.7	2.7	150.2	150.3	37.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	27.7	0.08	8.16	150.2	150.2	150.4	2'400	104.0	2.5	2.5	150.2	150.4	37.5
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.3	0.25	8.16	150.2	150.3	150.1	2'410	106.6	2.6	2.6	150.3	150.1	37.5
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.3	0.25	8.24	150.2	150.2	151.0	2'420	96.9	2.3	2.3	150.2	151.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.3	0.25	8.12	150.0	150.0	149.8	2'410	105.7	2.6	2.6	150.0	149.8	37.5
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	173.3	0.47	8.06	150.0	149.9	152.0	2'360	137.7	3.3	3.3	150.0	152.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	173.3	0.47	8.08	150.1	150.0	150.0	2'390	116.9	2.8	2.8	150.1	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	173.3	0.47	8.10	150.0	149.9	150.0	2'400	128.0	3.1	3.1	150.0	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	356.0	0.98	8.06	150.6	149.8	149.7	2'390	133.7	3.2	3.2	150.2	149.7	37.5
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	356.0	0.98	8.06	149.4	150.1	150.2	2'390	136.5	3.3	3.3	149.8	150.2	37.5
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	356.0	0.98	7.94	150.4	150.2	149.6	2'350	135.6	3.3	3.3	150.3	149.6	37.5
120000	HSR	18.02.15	03.02.17	716.3	1.96	8.18	151.1	150.1	150.0	2'400	139.1	3.4	3.4	150.6	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	03.02.17	716.3	1.96	8.04	149.6	149.9	149.9	2'390	130.8	3.2	3.2	149.8	149.9	37.5
120000	HSR	18.02.15	03.02.17	716.3	1.96	8.06	149.8	149.8	149.9	2'400	126.0	3.1	3.1	149.8	149.9	37.5
120000	HSR	18.02.15	30.01.20	1807.0	4.95	8.02	148.8	149.8	149.8	2'400	136.2	3.3	3.3	149.3	149.8	37.5
120000	HSR	18.02.15	30.01.20	1807.0	4.95	8.12	150.1	150.2	150.1	2'400	133.8	3.2	3.2	150.2	150.1	37.5
120000	HSR	18.02.15	30.01.20	1807.0	4.95	8.08	150.0	149.9	149.9	2'400	144.9	3.5	3.5	150.0	149.9	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.3	10.05	8.18	150.8	150.2	150.2	2'400	144.0	3.5	3.5	150.5	150.2	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.3	10.05	8.09	148.5	150.1	150.0	2'420	144.6	3.5	3.5	149.3	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.3	10.05	8.12	150.1	149.9	150.0	2'410	133.6	3.2	3.2	150.0	150.0	37.5

Tabelle A.4: Double-Punch-Zugfestigkeiten A-B.

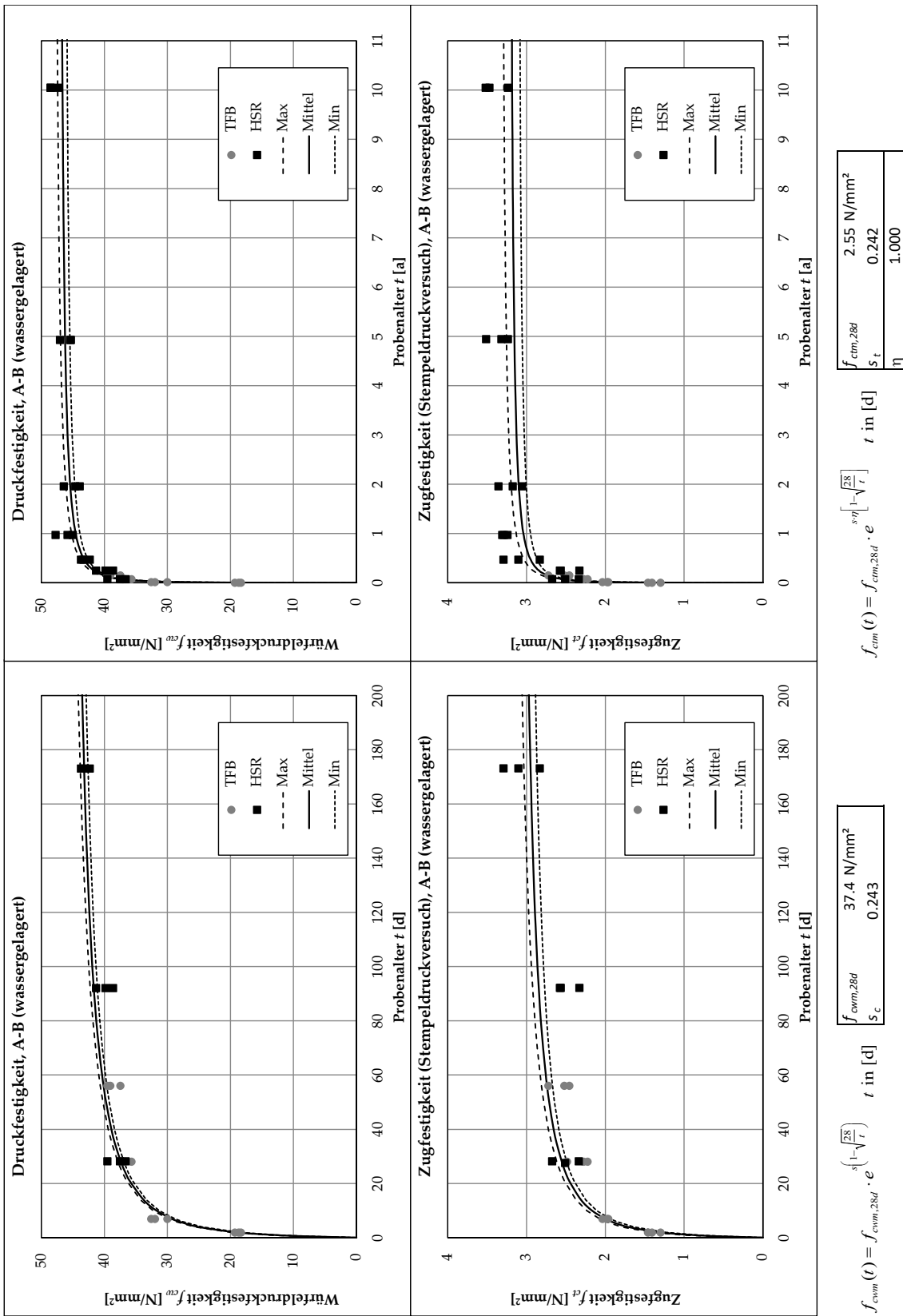


Bild A.16: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten A-B.

A.2.3 Festigkeiten A-BT

Druckfestigkeit		Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	effektiv Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]	korrigiert Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.18	149.5	151.7	150.1	2'400	374.0	16.5	17.7
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.17	149.0	150.9	149.7	2'430	374.3	16.6	17.8
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.04	148.7	149.4	149.6	2'420	375.4	16.9	18.1
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	6.9	0.02	8.03	148.9	149.5	149.6	2'410	649.3	29.2	31.3
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	6.9	0.02	8.15	149.7	150.5	150.2	2'410	653.7	29.0	31.1
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	6.9	0.02	7.97	149.2	149.4	149.8	2'390	654.8	29.4	31.5
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.0	0.08	8.12	150.2	151.0	150.4	2'380	787.6	34.7	37.2
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.0	0.08	7.96	149.6	149.5	149.8	2'380	800.4	35.8	38.4
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.0	0.08	7.96	149.6	149.6	149.8	2'370	752.7	33.6	36.0
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.0	0.15	8.07	149.9	150.1	150.3	2'390	910.1	40.4	43.3
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.0	0.15	8.06	149.9	151.3	150.2	2'370	873.9	38.5	41.3
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.0	0.15	8.03	149.7	150.1	150.3	2'380	807.9	36.0	38.6
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.2	0.08	7.96	149.7	149.9	150.6	2'360	875.9	39.0	39.0
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.2	0.08	8.02	150.2	150.2	150.0	2'370	859.0	38.1	38.1
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.2	0.08	7.98	149.8	149.8	151.3	2'350	874.6	39.0	39.0
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.1	0.25	7.94	149.8	149.9	149.5	2'370	936.0	41.7	41.7
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.1	0.25	7.82	149.6	149.8	150.0	2'330	934.3	41.7	41.7
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.1	0.25	7.96	149.9	150.0	150.8	2'350	908.9	40.4	40.4
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	172.9	0.47	7.88	149.8	149.9	150.7	2'330	897.8	40.0	40.0
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	172.9	0.47	7.90	150.0	149.9	148.8	2'360	910.4	40.5	40.5
120000	HSR	18.02.15	10.08.15	172.9	0.47	7.98	150.3	150.3	151.4	2'330	934.9	41.4	41.4
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	355.9	0.98	7.90	150.0	149.8	149.8	2'350	934.4	41.6	41.6
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	355.9	0.98	7.92	149.6	150.1	150.2	2'350	976.7	43.5	43.5
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	355.9	0.98	7.86	150.1	149.7	149.7	2'340	953.4	42.4	42.4
120000	HSR	18.02.15	06.02.17	718.9	1.97	7.90	149.6	149.6	149.8	2'360	979.9	43.8	43.8
120000	HSR	18.02.15	06.02.17	718.9	1.97	7.86	151.2	150.0	149.6	2'320	959.0	42.3	42.3
120000	HSR	18.02.15	06.02.17	718.9	1.97	7.88	151.3	150.1	150.1	2'310	1'002.7	44.2	44.2
120000	HSR	18.02.15	23.01.20	1800.1	4.93	7.80	150.2	149.8	149.8	2'310	925.2	41.1	41.1
120000	HSR	18.02.15	23.01.20	1800.1	4.93	7.84	149.5	149.7	149.6	2'340	1'006.2	45.0	45.0
120000	HSR	18.02.15	23.01.20	1800.1	4.93	7.92	151.4	150.3	150.2	2'320	929.7	40.9	40.9
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.0	10.05	7.86	150.3	149.7	149.7	2'330	1'058.4	47.0	47.0
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.0	10.05	7.89	149.6	149.7	149.8	2'350	1'006.6	44.9	44.9
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.0	10.05	7.81	150.5	149.6	149.6	2'320	1'029.7	45.7	45.7

Tabelle A.5: Würfeldruckfestigkeiten A-BT.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert			
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel	
							L [mm]	B [mm]	H [mm]				2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.03	150.0	151.0	151.0	2'350	59.1	1.4	150.5	151.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	7.96	150.0	151.0	151.0	2'330	64.9	1.6	150.5	151.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	20.02.15	2.0	0.01	8.06	151.0	151.0	150.0	2'360	65.8	1.6	151.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	6.9	0.02	8.02	150.0	149.0	151.0	2'370	102.2	2.5	149.5	151.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	6.9	0.02	8.01	149.0	149.0	150.0	2'410	78.4	1.9	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	25.02.15	6.9	0.02	7.94	149.0	149.0	150.0	2'390	87.9	2.1	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.0	0.08	8.00	152.0	152.0	150.0	2'310	120.3	2.9	152.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.0	0.08	8.15	151.0	150.0	150.0	2'400	101.4	2.4	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	18.03.15	28.0	0.08	8.03	151.0	151.0	150.0	2'350	119.7	2.9	151.0	150.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.0	0.15	8.11	150.0	150.0	151.0	2'390	123.1	3.0	150.0	151.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.0	0.15	8.06	150.0	150.0	151.0	2'370	112.6	2.7	150.0	151.0	37.5
100000	TFB	18.02.15	15.04.15	56.0	0.15	8.11	150.0	150.0	151.0	2'390	123.1	3.0	150.0	151.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.2	0.08	7.92	149.5	149.9	149.5	2'360	107.9	2.6	149.7	149.5	37.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.2	0.08	7.96	149.7	149.8	149.2	2'380	95.8	2.3	149.8	149.2	37.5
120000	HSR	18.02.15	18.03.15	28.2	0.08	7.86	148.8	149.8	149.6	2'360	99.8	2.4	149.3	149.6	37.5
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.2	0.25	7.92	149.9	149.8	149.8	2'350	117.0	2.8	149.9	149.8	37.5
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.2	0.25	8.06	150.2	150.2	152.0	2'350	108.8	2.6	150.2	152.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	21.05.15	92.2	0.25	8.04	150.1	150.1	150.8	2'370	130.1	3.1	150.1	150.8	37.5
120000	HSR	18.02.15	11.08.15	174.0	0.48	7.82	149.6	149.4	149.7	2'340	108.7	2.6	149.5	149.7	37.5
120000	HSR	18.02.15	11.08.15	174.0	0.48	7.86	149.6	149.6	150.0	2'340	105.5	2.6	149.6	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	11.08.15	174.0	0.48	7.86	150.1	150.1	149.4	2'340	125.5	3.0	150.1	149.4	37.5
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	355.9	0.98	7.90	150.5	149.8	149.8	2'340	102.4	2.5	150.2	149.8	37.5
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	355.9	0.98	7.96	150.0	150.0	150.1	2'360	125.5	3.0	150.0	150.1	37.5
120000	HSR	18.02.15	09.02.16	355.9	0.98	7.98	152.2	150.1	150.1	2'330	122.0	2.9	151.2	150.1	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.02.17	719.0	1.97	7.90	152.3	150.2	150.2	2'300	120.9	2.9	151.3	150.2	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.02.17	719.0	1.97	7.96	152.5	150.1	150.0	2'320	118.1	2.8	151.3	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.02.17	719.0	1.97	7.94	150.1	149.6	149.6	2'360	112.1	2.7	149.9	149.6	37.5
120000	HSR	18.02.15	30.01.20	1807.3	4.95	7.96	151.1	150.0	150.0	2'340	99.8	2.4	150.6	150.0	37.5
120000	HSR	18.02.15	30.01.20	1807.3	4.95	7.84	147.4	149.8	149.7	2'370	101.8	2.5	148.6	149.7	37.5
120000	HSR	18.02.15	30.01.20	1807.3	4.95	7.94	152.2	149.6	149.6	2'330	123.5	3.0	150.9	149.6	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.2	10.05	7.94	151.6	150.0	150.1	2'330	113.7	2.7	150.8	150.1	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.2	10.05	7.79	150.0	150.2	150.2	2'300	130.1	3.1	150.1	150.2	37.5
120000	HSR	18.02.15	06.03.25	3669.2	10.05	7.87	150.0	149.9	149.8	2'340	116.1	2.8	150.0	149.8	37.5

Tabelle A.6: Double-Punch-Zugfestigkeiten A-BT.

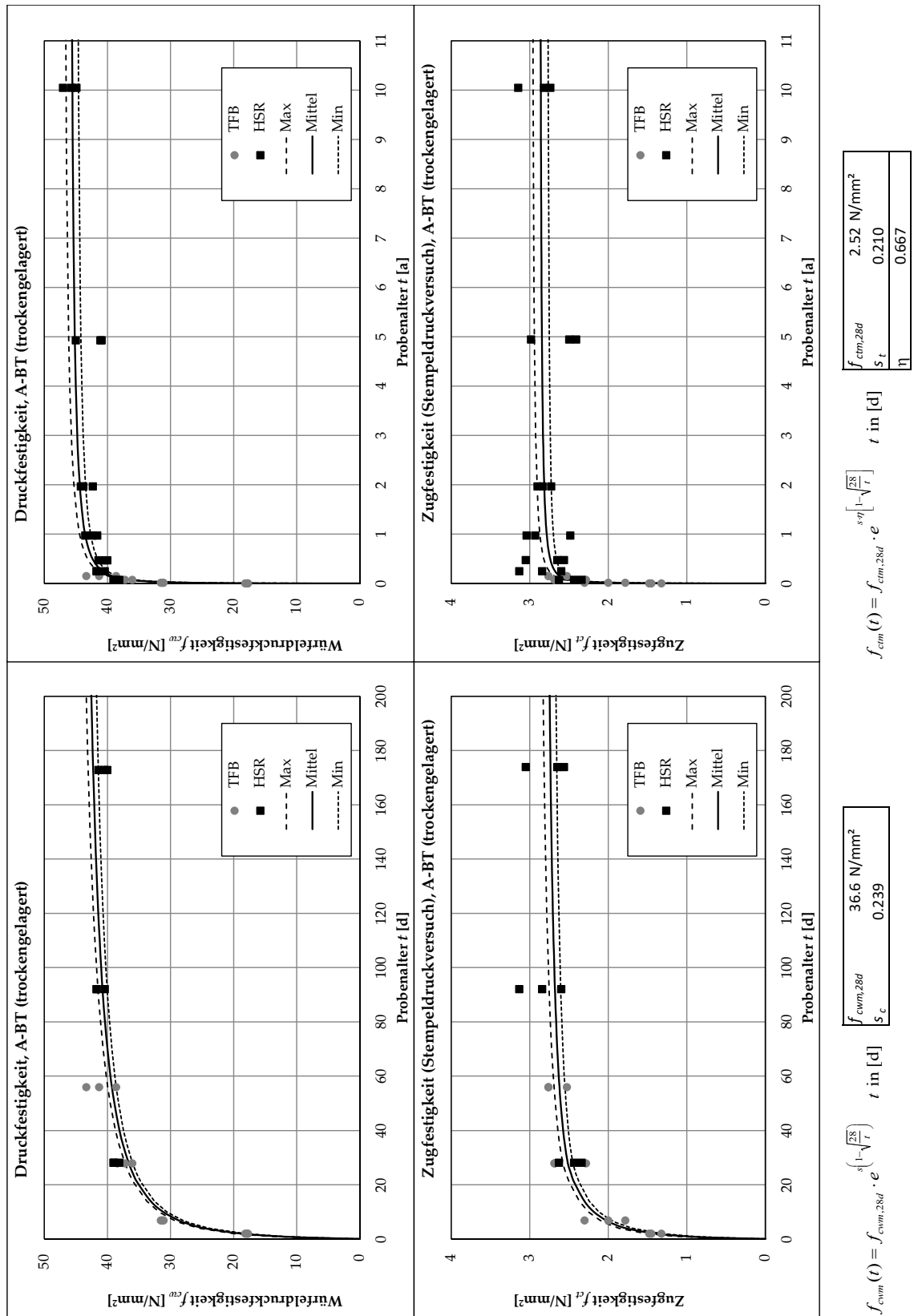


Bild A.17: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten A-BT.

A.2.4 Festigkeiten A-C

Druckfestigkeit		effektiv										korrigiert	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]
							L [mm]	B [mm]	H [mm]				
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.11	150.7	150.3	149.6	2'390	280.0	12.4	12.4
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.14	149.1	149.4	149.7	2'440	298.1	13.4	13.4
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.17	149.5	150.0	150.0	2'430	294.5	13.1	13.1
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	7.1	0.02	8.12	148.8	149.5	149.5	2'440	489.7	22.0	22.0
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	7.1	0.02	8.15	149.2	149.0	149.8	2'450	504.4	22.7	22.7
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	7.1	0.02	8.21	149.5	150.3	150.1	2'440	505.2	22.5	22.5
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.04	149.2	148.4	149.7	2'430	696.1	31.4	31.4
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.23	149.6	149.6	150.1	2'450	731.9	32.7	32.7
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.10	149.4	149.0	149.9	2'430	703.6	31.6	31.6
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	56.0	0.15	8.22	149.9	151.6	150.1	2'410	812.4	35.7	35.6
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	56.0	0.15	8.14	150.3	149.1	150.3	2'420	795.4	35.5	35.4
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	56.0	0.15	8.10	150.3	148.8	149.9	2'420	755.7	33.8	33.7
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.3	0.08	8.08	150.2	150.2	148.7	2'410	689.3	30.6	30.6
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.3	0.08	8.04	150.3	150.4	149.3	2'380	776.3	34.3	34.3
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	27.7	0.08	8.14	150.2	150.2	150.3	2'400	732.2	32.5	32.5
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.2	0.25	8.24	150.3	150.3	150.9	2'420	749.7	33.2	33.2
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.2	0.25	8.14	149.9	149.9	150.1	2'410	806.6	35.9	35.9
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.2	0.25	8.04	150.1	150.0	148.6	2'400	866.1	38.5	38.5
120000	HSR	26.01.15	10.08.15	196.0	0.54	8.14	150.2	150.2	150.0	2'410	812.9	36.0	36.0
120000	HSR	26.01.15	10.08.15	196.0	0.54	8.06	149.7	149.7	150.0	2'400	864.9	38.6	38.6
120000	HSR	26.01.15	10.08.15	196.0	0.54	8.10	150.2	150.2	149.4	2'400	805.2	35.7	35.7
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	378.0	1.04	8.10	150.3	150.3	150.4	2'380	901.5	39.9	39.9
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	378.0	1.04	7.98	149.2	150.2	149.7	2'380	954.5	42.6	42.6
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	378.0	1.04	7.96	148.2	149.7	149.8	2'400	970.5	43.7	43.7
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	8.12	149.9	150.3	150.3	2'400	907.8	40.3	40.3
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	8.10	150.6	150.0	150.0	2'390	950.9	42.1	42.1
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	8.10	148.8	149.8	149.8	2'430	898.7	40.3	40.3
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.0	4.99	8.10	149.5	150.0	150.0	2'410	953.8	42.5	42.5
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.0	4.99	8.16	151.1	150.2	150.2	2'390	894.4	39.4	39.4
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.0	4.99	8.14	149.9	149.9	150.2	2'410	952.4	42.4	42.4
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.1	10.06	8.14	151.4	150.4	150.3	2'380	1'028.8	45.2	45.2
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.1	10.06	8.20	152.0	151.1	150.2	2'380	1'033.1	45.0	45.0
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.1	10.06	8.07	149.1	150.0	149.9	2'410	1'033.6	46.2	46.2

Tabelle A.7: Würfeldruckfestigkeiten A-C.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen L [mm] B [mm] H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm] h [mm] 2a [mm]	
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.22	150.0 151.0 150.0	2'420	48.3	1.2	1.2	150.5 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.19	150.0 150.0 150.0	2'430	43.2	1.0	1.1	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.20	150.0 150.0 150.0	2'430	43.3	1.0	1.1	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	7.1	0.02	8.20	151.0 150.0 150.0	2'410	71.8	1.7	1.8	150.5 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	7.1	0.02	8.11	151.0 150.0 150.0	2'390	77.0	1.9	1.9	150.5 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	7.1	0.02	8.16	151.0 150.0 150.0	2'400	73.2	1.8	1.8	150.5 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.18	150.0 149.0 151.0	2'420	84.1	2.0	2.1	149.5 151.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.20	150.0 150.0 150.0	2'430	85.3	2.1	2.1	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.07	149.0 148.0 150.0	2'440	82.6	2.0	2.1	148.5 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	56.0	0.15	8.15	150.0 150.0 150.0	2'420	90.0	2.2	2.2	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	56.0	0.15	8.08	150.0 149.0 150.0	2'410	87.6	2.1	2.2	149.5 150.0 37.5	
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	56.0	0.15	8.07	150.0 149.0 150.0	2'410	89.4	2.2	2.2	149.5 150.0 37.5	
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.3	0.08	8.04	150.0 149.9 149.3	2'390	90.1	2.2	2.2	150.0 149.3 37.5	
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.3	0.08	8.06	150.3 150.1 148.5	2'410	89.3	2.2	2.2	150.2 148.5 37.5	
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.3	0.08	8.14	150.3 150.3 150.6	2'390	90.8	2.2	2.2	150.3 150.6 37.5	
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.2	0.25	8.10	150.0 150.0 150.1	2'400	101.5	2.5	2.5	150.0 150.1 37.5	
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.2	0.25	8.08	149.6 149.7 149.8	2'410	95.3	2.3	2.3	149.7 149.8 37.5	
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.2	0.25	8.08	149.9 149.9 148.4	2'420	90.6	2.2	2.2	149.9 148.4 37.5	
120000	HSR	26.01.15	11.08.15	197.1	0.54	8.16	150.4 150.4 150.0	2'400	113.0	2.7	2.7	150.4 150.0 37.5	
120000	HSR	26.01.15	11.08.15	197.1	0.54	8.00	150.0 150.0 150.0	2'370	150.0	3.6	3.6	150.0 150.0 37.5	
120000	HSR	26.01.15	11.08.15	197.1	0.54	8.20	140.4 150.3 150.5	2'580	120.4	3.0	3.0	145.4 150.5 37.5	
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	378.0	1.04	8.10	150.2 150.1 150.2	2'390	118.5	2.9	2.9	150.2 150.2 37.5	
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	378.0	1.04	8.04	150.1 149.8 149.7	2'390	117.7	2.9	2.9	150.0 149.7 37.5	
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	378.0	1.04	8.10	149.6 150.2 150.2	2'400	125.5	3.0	3.0	149.9 150.2 37.5	
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	8.02	149.1 149.9 150.0	2'390	125.5	3.0	3.0	149.5 150.0 37.5	
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	8.02	148.8 150.2 150.1	2'390	120.5	2.9	2.9	149.5 150.1 37.5	
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	8.16	150.7 150.4 150.4	2'390	99.2	2.4	2.4	150.6 150.4 37.5	
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.3	5.00	8.12	149.4 150.3 150.3	2'410	138.4	3.3	3.3	149.9 150.3 37.5	
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.3	5.00	8.22	150.8 150.3 150.3	2'410	124.9	3.0	3.0	150.6 150.3 37.5	
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.3	5.00	8.08	148.5 150.1 150.2	2'410	122.5	3.0	3.0	149.3 150.2 37.5	
120000	HSR	26.01.15	14.02.25	3672.1	10.06	8.01	148.7 150.0 150.0	2'390	145.7	3.5	3.5	149.4 150.0 37.5	
120000	HSR	26.01.15	14.02.25	3672.1	10.06	8.18	148.8 150.5 150.5	2'430	131.6	3.2	3.2	149.7 150.5 37.5	
120000	HSR	26.01.15	14.02.25	3672.1	10.06	8.10	149.1 150.0 150.0	2'410	125.4	3.0	3.0	149.6 150.0 37.5	

Tabelle A.8: Double-Punch-Zugfestigkeiten A-C.

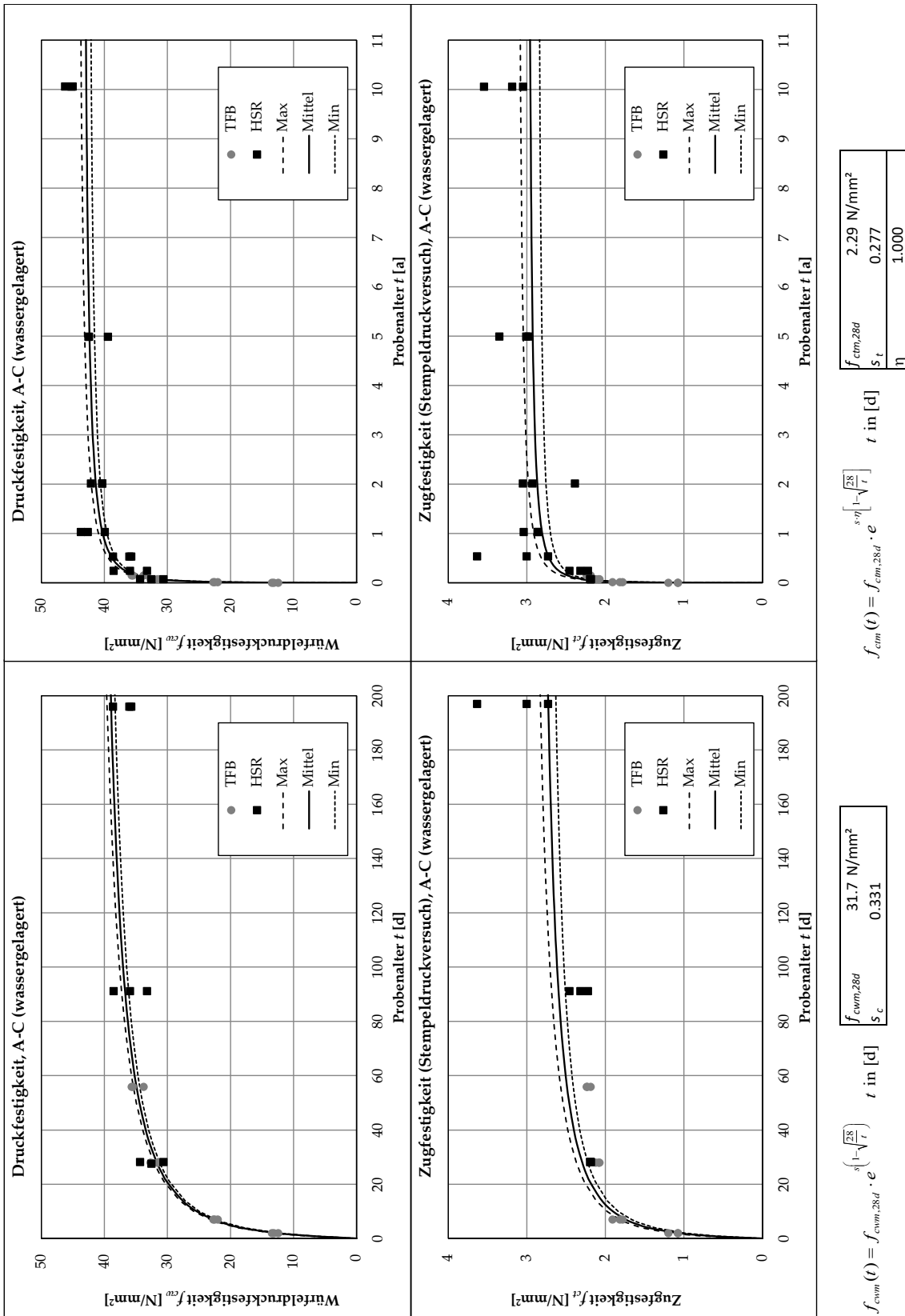


Bild A.18: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten A-C.

A.2.5 Festigkeiten A-CT

Druckfestigkeit		Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	effektiv	korrigiert
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt						L [mm]	B [mm]	H [mm]		$F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]	Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	7.92	149.1	147.6	149.5	2'410	293.1	13.3	13.4
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	7.98	149.3	148.2	149.7	2'410	294.5	13.3	13.4
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.01	149.4	149.3	149.6	2'400	291.5	13.1	13.2
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	6.9	0.02	7.85	149.1	148.6	149.5	2'370	495.1	22.3	22.5
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	6.9	0.02	8.04	149.1	150.1	149.6	2'400	512.1	22.9	23.1
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	6.9	0.02	7.97	149.4	148.2	149.9	2'400	549.5	24.8	25.0
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.00	149.5	148.4	150.0	2'400	685.2	30.9	31.1
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	7.98	149.4	149.1	149.8	2'390	661.9	29.7	29.9
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	7.94	149.0	148.1	149.6	2'400	715.4	32.4	32.7
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	55.9	0.15	8.00	149.8	149.2	149.9	2'390	697.8	31.2	31.4
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	55.9	0.15	7.94	149.7	148.1	149.8	2'390	737.9	33.3	33.6
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	55.9	0.15	7.98	149.7	148.8	149.9	2'390	729.3	32.7	33.0
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	7.94	150.1	149.8	148.6	2'380	708.4	31.5	31.5
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	7.84	149.8	149.7	147.6	2'370	713.6	31.8	31.8
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	7.84	150.1	149.8	149.2	2'340	674.5	30.0	30.0
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.0	0.25	7.82	149.9	150.0	149.0	2'330	731.9	32.6	32.6
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.0	0.25	7.82	149.8	149.9	148.3	2'350	733.4	32.7	32.7
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.0	0.25	7.92	150.3	150.3	149.3	2'350	762.1	33.7	33.7
120000	HSR	26.01.15	10.08.15	196.1	0.54	7.92	150.0	150.1	149.4	2'350	767.2	34.1	34.1
120000	HSR	26.01.15	10.08.15	196.1	0.54	7.80	149.7	149.7	150.2	2'320	762.8	34.0	34.0
120000	HSR	26.01.15	10.08.15	196.1	0.54	7.88	149.9	149.8	149.0	2'360	732.6	32.6	32.6
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	377.9	1.04	7.86	149.4	149.8	149.8	2'340	818.4	36.6	36.6
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	377.9	1.04	7.78	148.2	150.0	149.8	2'340	808.8	36.4	36.4
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	377.9	1.04	7.80	147.7	149.8	149.8	2'350	827.9	37.4	37.4
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	7.80	148.0	150.0	149.9	2'340	785.6	35.4	35.4
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	7.86	149.2	149.7	149.7	2'350	775.2	34.7	34.7
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	7.80	147.8	149.9	149.9	2'350	774.4	35.0	35.0
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1822.9	4.99	7.82	148.2	149.7	149.8	2'350	795.2	35.8	35.8
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1822.9	4.99	7.86	149.1	150.2	150.2	2'340	772.2	34.5	34.5
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1822.9	4.99	7.74	148.9	149.4	149.5	2'330	746.6	33.6	33.6
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.1	10.06	7.87	150.1	150.2	150.3	2'320	846.4	37.5	37.5
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.1	10.06	7.84	150.0	149.7	149.7	2'330	856.0	38.1	38.1
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.1	10.06	7.85	149.1	149.9	149.9	2'340	854.3	38.2	38.2

Tabelle A.9: Würfeldruckfestigkeiten A-CT.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	7.92	150.0	150.0	149.0	2'360	46.5	1.1	1.1	150.0	149.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	8.00	148.0	150.0	150.0	2'400	44.3	1.1	1.1	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	28.01.15	2.0	0.01	7.95	150.0	149.0	150.0	2'370	42.5	1.0	1.1	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	6.9	0.02	8.01	150.0	150.0	150.0	2'370	68.3	1.7	1.8	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	6.9	0.02	7.94	150.0	149.0	151.0	2'350	74.5	1.8	2.0	149.5	151.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	02.02.15	6.9	0.02	7.92	151.0	150.0	150.0	2'330	75.9	1.8	2.0	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	7.93	149.0	149.0	150.0	2'380	84.3	2.1	2.3	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.08	150.0	148.0	150.0	2'430	81.0	2.0	2.2	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	23.02.15	28.0	0.08	8.02	149.0	149.0	150.0	2'410	81.4	2.0	2.2	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	55.9	0.15	7.95	150.0	148.0	150.0	2'390	90.6	2.2	2.5	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	55.9	0.15	7.97	150.0	149.0	150.0	2'380	75.4	1.8	2.0	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	26.01.15	23.03.15	55.9	0.15	7.89	150.0	148.0	150.0	2'370	77.1	1.9	2.1	149.0	150.0	37.5
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.2	0.08	7.90	150.2	150.2	148.8	2'350	90.3	2.2	2.2	150.2	148.8	37.5
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.2	0.08	7.88	149.5	149.4	149.7	2'360	78.8	1.9	1.9	149.5	149.7	37.5
120000	HSR	26.01.15	23.02.15	28.2	0.08	7.82	149.7	149.8	148.5	2'350	83.5	2.0	2.0	149.8	148.5	37.5
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.0	0.25	7.78	149.8	149.8	148.4	2'340	111.6	2.7	2.7	149.8	148.4	37.5
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.0	0.25	7.90	150.0	150.1	149.6	2'350	104.9	2.5	2.5	150.1	149.6	37.5
120000	HSR	26.01.15	27.04.15	91.0	0.25	7.84	149.9	150.0	148.4	2'350	98.7	2.4	2.4	150.0	148.4	37.5
120000	HSR	26.01.15	11.08.15	197.0	0.54	7.80	149.6	149.7	149.9	2'320	107.4	2.6	2.6	149.7	149.9	37.5
120000	HSR	26.01.15	11.08.15	197.0	0.54	7.80	149.8	149.7	150.0	2'320	107.9	2.6	2.6	149.8	150.0	37.5
120000	HSR	26.01.15	11.08.15	197.0	0.54	7.88	150.0	150.1	149.5	2'340	89.4	2.2	2.2	150.1	149.5	37.5
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	377.9	1.04	7.80	147.2	149.5	149.7	2'370	99.3	2.4	2.4	148.4	149.7	37.5
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	377.9	1.04	7.86	149.0	150.0	150.1	2'340	110.6	2.7	2.7	149.5	150.1	37.5
120000	HSR	26.01.15	08.02.16	377.9	1.04	7.84	148.5	149.6	149.7	2'360	100.2	2.4	2.4	149.1	149.7	37.5
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	7.72	146.7	149.6	149.7	2'350	90.4	2.2	2.2	148.2	149.7	37.5
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	7.74	148.0	149.6	149.7	2'340	92.8	2.3	2.3	148.8	149.7	37.5
120000	HSR	26.01.15	31.01.17	736.2	2.02	7.86	149.9	149.6	149.8	2'340	101.5	2.5	2.5	149.8	149.8	37.5
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.2	5.00	7.74	147.8	150.0	150.1	2'330	89.2	2.2	2.2	148.9	150.1	37.5
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.2	5.00	7.68	147.6	149.7	149.6	2'320	95.5	2.3	2.3	148.7	149.6	37.5
120000	HSR	26.01.15	23.01.20	1823.2	5.00	7.82	148.7	149.5	149.5	2'350	81.7	2.0	2.0	149.1	149.5	37.5
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.2	10.06	7.84	150.0	149.9	149.8	2'330	104.6	2.5	2.5	150.0	149.8	37.5
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.2	10.06	7.92	149.9	150.1	150.0	2'350	88.4	2.1	2.1	150.0	150.0	37.5
120000	HSR	26.01.15	15.02.25	3673.2	10.06	7.73	147.2	149.8	149.8	2'340	96.5	2.4	2.4	148.5	149.8	37.5

Tabelle A.10: Double-Punch-Zugfestigkeiten A-CT.

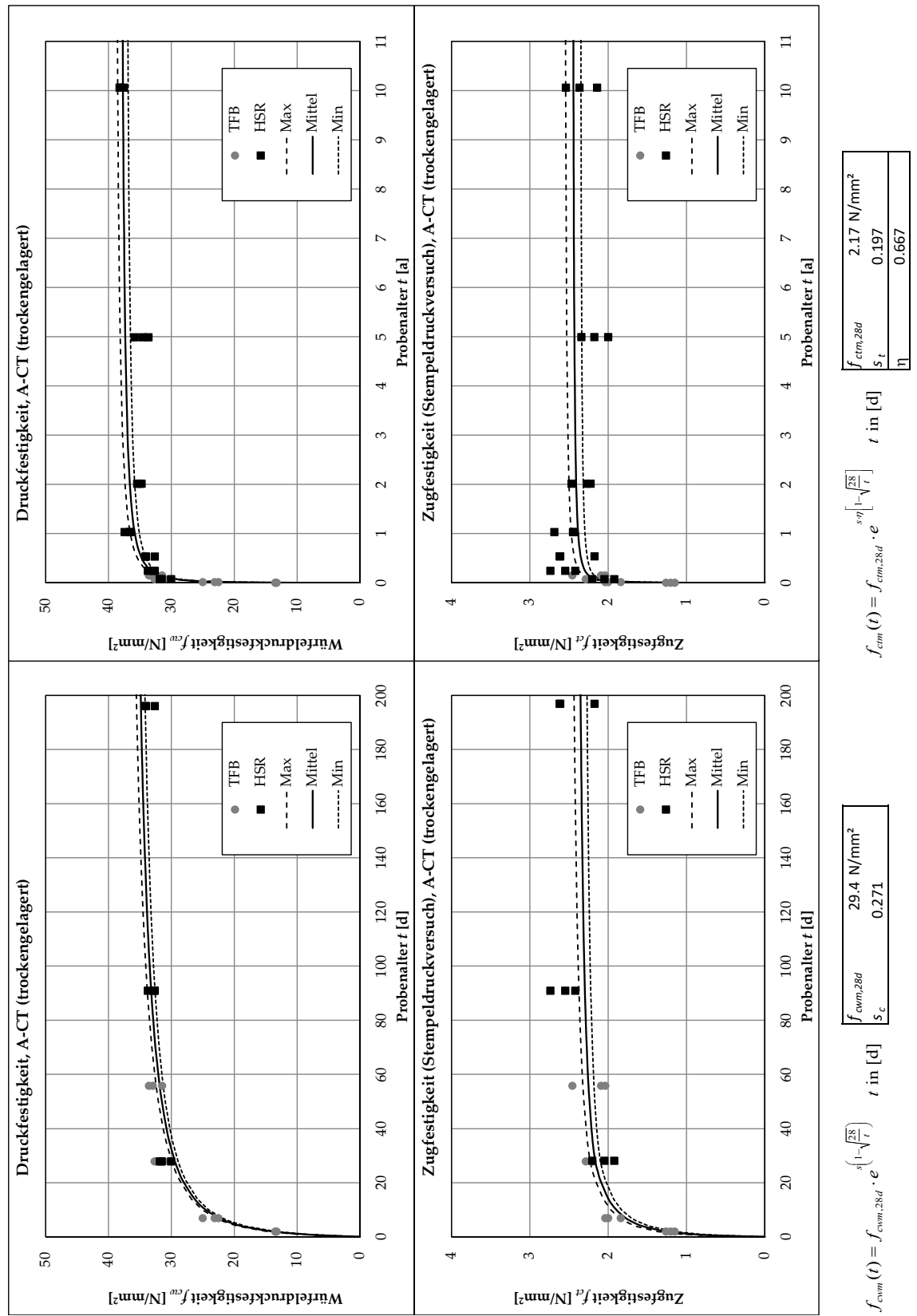


Bild A.19: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten A-CT.

A.2.6 Festigkeiten C-D

Versuch Lauf-Nr.	Druckfestigkeit Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	effektiv		korrigiert
							L [mm]	B [mm]	H [mm]			Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]	
100000	TFB	28.01.15	30.01.15	2.0	0.01	8.08	149.3	148.5	150.0	2'430	795.9	35.9	34.5	
100000	TFB	28.01.15	30.01.15	2.0	0.01	8.15	149.1	149.7	149.6	2'440	787.9	35.3	33.9	
100000	TFB	28.01.15	30.01.15	2.0	0.01	8.12	149.5	149.4	149.5	2'430	759.1	34.0	32.6	
100000	TFB	28.01.15	04.02.15	7.1	0.02	8.13	149.5	149.0	150.0	2'430	1'049.4	47.1	45.2	
100000	TFB	28.01.15	04.02.15	7.1	0.02	8.16	149.3	150.1	149.8	2'430	1'048.9	46.8	44.9	
100000	TFB	28.01.15	04.02.15	7.1	0.02	8.13	149.2	148.9	149.7	2'440	1'041.4	46.9	45.0	
100000	TFB	28.01.15	25.02.15	28.1	0.08	8.12	149.3	148.5	149.8	2'450	1'174.9	53.0	50.9	
100000	TFB	28.01.15	25.02.15	28.1	0.08	8.23	149.6	149.4	150.1	2'450	1'230.5	55.1	52.9	
100000	TFB	28.01.15	25.02.15	28.1	0.08	8.27	149.4	150.8	150.0	2'450	1'241.2	55.1	52.9	
100000	TFB	28.01.15	25.03.15	56.1	0.15	8.24	150.1	150.3	150.3	2'430	1'322.9	58.6	56.3	
100000	TFB	28.01.15	25.03.15	56.1	0.15	8.20	149.9	149.2	150.0	2'440	1'246.9	55.8	53.6	
100000	TFB	28.01.15	25.03.15	56.1	0.15	8.20	149.7	149.3	149.8	2'450	1'254.4	56.1	53.9	
120000	HSR	28.01.15	25.02.15	28.2	0.08	8.12	149.8	149.8	149.0	2'430	1'141.6	50.9	50.9	
120000	HSR	28.01.15	25.02.15	28.2	0.08	8.14	149.9	149.7	149.5	2'430	1'207.5	53.8	53.8	
120000	HSR	28.01.15	25.02.15	28.2	0.08	8.12	149.8	149.7	149.5	2'420	1'240.9	55.3	55.3	
120000	HSR	28.01.15	29.04.15	91.3	0.25	8.12	149.9	149.9	149.8	2'410	1'275.7	56.8	56.8	
120000	HSR	28.01.15	29.04.15	91.3	0.25	8.14	149.9	150.1	149.4	2'420	1'265.6	56.2	56.2	
120000	HSR	28.01.15	29.04.15	91.3	0.25	8.16	149.9	149.9	149.4	2'430	1'262.4	56.2	56.2	
120000	HSR	28.01.15	10.08.15	194.1	0.53	8.10	149.8	149.7	148.2	2'440	1'320.5	58.9	58.9	
120000	HSR	28.01.15	10.08.15	194.1	0.53	8.22	150.0	150.0	150.0	2'440	1'352.4	60.1	60.1	
120000	HSR	28.01.15	10.08.15	194.1	0.53	8.28	150.3	150.3	150.3	2'440	1'361.6	60.3	60.3	
120000	HSR	28.01.15	08.02.16	376.1	1.03	8.04	149.1	149.7	149.5	2'410	1'480.7	66.3	66.3	
120000	HSR	28.01.15	08.02.16	376.1	1.03	8.14	148.7	150.0	150.0	2'430	1'597.1	71.6	71.6	
120000	HSR	28.01.15	08.02.16	376.1	1.03	8.16	149.6	150.0	150.0	2'420	1'412.3	62.9	62.9	
120000	HSR	28.01.15	31.01.17	734.3	2.01	8.16	151.6	150.1	150.0	2'390	1'415.5	62.2	62.2	
120000	HSR	28.01.15	31.01.17	734.3	2.01	8.26	150.6	150.0	150.0	2'440	1'377.1	61.0	61.0	
120000	HSR	28.01.15	31.01.17	734.3	2.01	8.20	151.0	149.8	149.9	2'420	1'382.7	61.1	61.1	
120000	HSR	28.01.15	23.01.20	1821.0	4.99	8.22	150.7	150.1	150.1	2'420	1'404.0	62.1	62.1	
120000	HSR	28.01.15	23.01.20	1821.0	4.99	8.18	149.0	150.2	150.2	2'430	1'485.1	66.4	66.4	
120000	HSR	28.01.15	23.01.20	1821.0	4.99	8.30	152.6	150.3	150.3	2'410	1'433.1	62.5	62.5	
120000	HSR	28.01.15	12.02.25	3668.1	10.05	8.15	147.9	149.9	149.9	2'450	1'532.8	69.1	69.1	
120000	HSR	28.01.15	12.02.25	3668.1	10.05	8.13	150.0	150.2	150.3	2'400	1'547.8	68.7	68.7	
120000	HSR	28.01.15	12.02.25	3668.1	10.05	8.29	150.9	150.1	150.2	2'440	1'526.7	67.4	67.4	

Tabelle A.11: Würfeldruckfestigkeiten C-D.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,abst}$ [kN]	Festigkeit $f_{cs,z}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{cs,z}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	28.01.15	30.01.15	2.0	0.01	8.11	149.0	150.0	150.0	2'420	90.4	2.2	2.0	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	30.01.15	2.0	0.01	8.20	150.0	150.0	150.0	2'430	96.4	2.3	2.2	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	30.01.15	2.0	0.01	8.26	150.0	152.0	150.0	2'410	88.7	2.1	2.0	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	04.02.15	7.1	0.02	8.17	150.0	150.0	150.0	2'420	104.1	2.5	2.3	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	04.02.15	7.1	0.02	8.19	150.0	151.0	150.0	2'410	110.6	2.7	2.5	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	04.02.15	7.1	0.02	8.15	150.0	150.0	150.0	2'420	109.8	2.7	2.5	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	25.02.15	28.1	0.08	8.13	149.0	149.0	150.0	2'440	113.1	2.8	2.5	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	25.02.15	28.1	0.08	8.16	149.0	150.0	150.0	2'440	132.4	3.2	3.0	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	25.02.15	28.1	0.08	8.12	149.0	150.0	150.0	2'420	120.5	2.9	2.7	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	25.03.15	56.1	0.15	8.15	150.0	149.0	150.0	2'430	124.6	3.0	2.8	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	25.03.15	56.1	0.15	8.22	150.0	150.0	150.0	2'440	126.5	3.1	2.8	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	28.01.15	25.03.15	56.1	0.15	8.28	150.0	150.0	150.0	2'450	127.1	3.1	2.8	150.0	150.0	37.5
120000	HSR	28.01.15	25.02.15	28.3	0.08	8.20	149.9	149.9	150.4	2'430	112.4	2.7	2.7	149.9	150.4	37.5
120000	HSR	28.01.15	25.02.15	28.3	0.08	8.20	150.1	150.1	150.0	2'430	121.4	2.9	2.9	150.1	150.0	37.5
120000	HSR	28.01.15	25.02.15	28.3	0.08	8.24	150.3	150.3	150.0	2'430	116.4	2.8	2.8	150.3	150.0	37.5
120000	HSR	28.01.15	29.04.15	91.3	0.25	8.22	149.9	150.0	149.7	2'440	108.0	2.6	2.6	150.0	149.7	37.5
120000	HSR	28.01.15	29.04.15	91.3	0.25	8.16	150.0	150.0	149.2	2'430	126.6	3.1	3.1	150.0	149.2	37.5
120000	HSR	28.01.15	29.04.15	91.3	0.25	8.10	149.6	149.7	149.1	2'430	135.9	3.3	3.3	149.7	149.1	37.5
120000	HSR	28.01.15	11.08.15	195.0	0.53	8.14	150.0	150.1	149.7	2'420	134.7	3.3	3.3	150.1	149.7	37.5
120000	HSR	28.01.15	11.08.15	195.0	0.53	8.18	150.0	150.1	149.8	2'430	142.6	3.5	3.5	150.1	149.8	37.5
120000	HSR	28.01.15	11.08.15	195.0	0.53	8.16	150.0	149.9	149.6	2'430	136.3	3.3	3.3	150.0	149.6	37.5
120000	HSR	28.01.15	08.02.16	376.1	1.03	8.22	150.9	150.3	150.3	2'410	151.4	3.6	3.6	150.6	150.3	37.5
120000	HSR	28.01.15	08.02.16	376.1	1.03	8.12	151.6	150.1	150.1	2'380	150.0	3.6	3.6	150.9	150.1	37.5
120000	HSR	28.01.15	08.02.16	376.1	1.03	8.10	148.9	150.0	149.8	2'420	153.3	3.7	3.7	149.5	149.8	37.5
120000	HSR	28.01.15	31.01.17	734.3	2.01	8.24	151.1	150.4	150.3	2'410	145.3	3.5	3.5	150.8	150.3	37.5
120000	HSR	28.01.15	31.01.17	734.3	2.01	8.14	150.5	149.8	149.8	2'410	143.7	3.5	3.5	150.2	149.8	37.5
120000	HSR	28.01.15	31.01.17	734.3	2.01	8.12	150.7	149.9	149.9	2'400	150.9	3.6	3.6	150.3	149.9	37.5
120000	HSR	28.01.15	28.01.20	1826.1	5.00	8.14	148.9	149.9	149.9	2'430	166.0	4.0	4.0	149.4	149.9	37.5
120000	HSR	28.01.15	28.01.20	1826.1	5.00	8.22	150.5	150.1	150.2	2'420	167.7	4.0	4.0	150.3	150.2	37.5
120000	HSR	28.01.15	28.01.20	1826.1	5.00	8.20	149.2	150.1	150.0	2'440	148.4	3.6	3.6	149.7	150.0	37.5
120000	HSR	28.01.15	12.02.25	3668.1	10.05	8.20	150.0	150.3	150.3	2'420	157.9	3.8	3.8	150.2	150.3	37.5
120000	HSR	28.01.15	12.02.25	3668.1	10.05	8.23	149.6	150.1	149.9	2'450	158.9	3.9	3.9	149.9	149.9	37.5
120000	HSR	28.01.15	12.02.25	3668.1	10.05	8.23	150.0	150.2	150.4	2'430	152.6	3.7	3.7	150.1	150.4	37.5

Tabelle A.12: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-D.

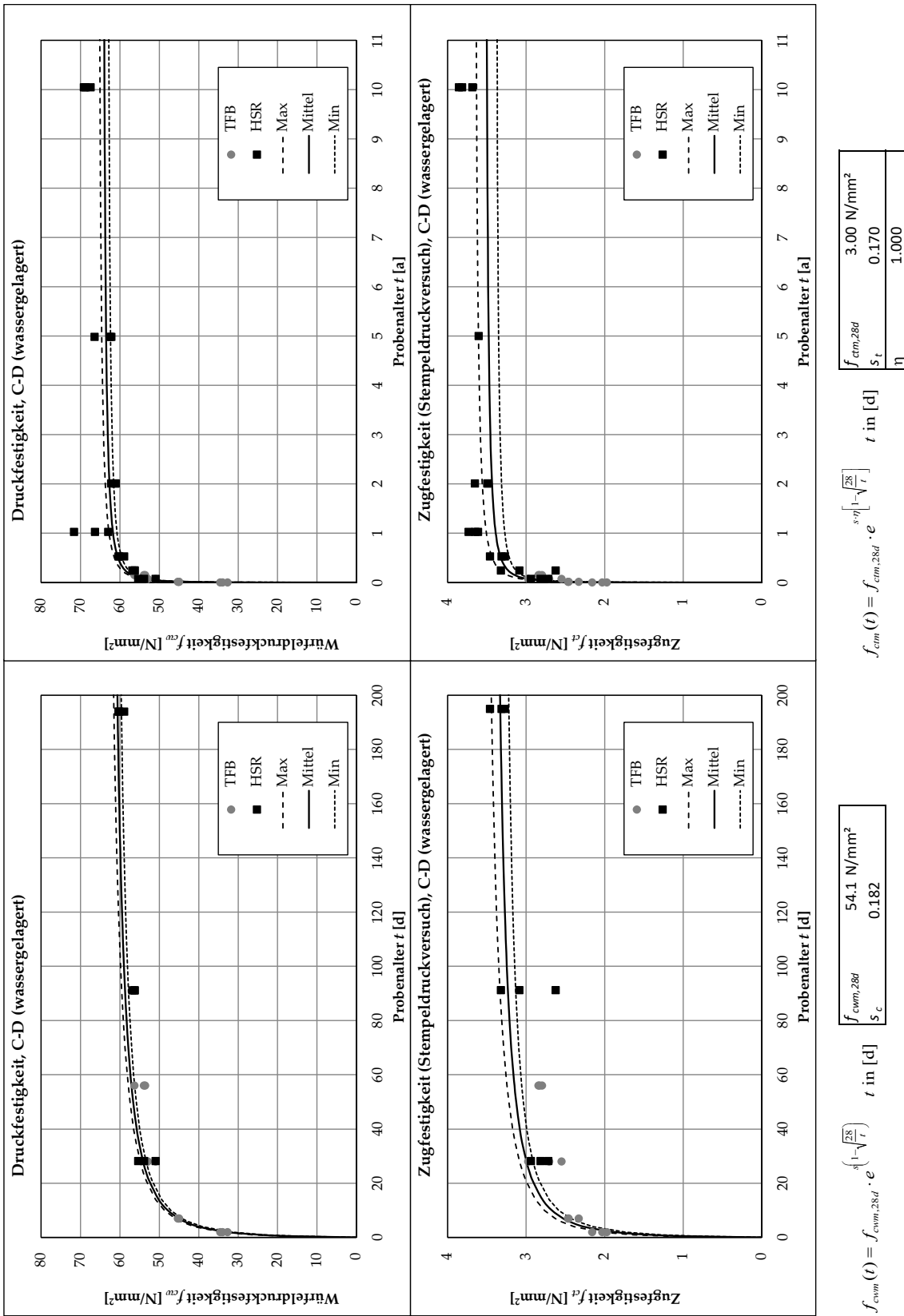


Bild A.20: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-D.

A.2.7 Festigkeiten C-E

Druckfestigkeit		Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]	effektiv	korrigiert
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt						L [mm]	B [mm]	H [mm]			Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]	Festigkeit f_{cum} [N/mm ²]	
100000	TFB	02.02.15	04.02.15	2.0	0.01	8.12	149.0	148.6	149.5	2'450	487.7	22.0	20.3	
100000	TFB	02.02.15	04.02.15	2.0	0.01	8.29	149.6	150.1	150.1	2'460	475.1	21.2	19.5	
100000	TFB	02.02.15	04.02.15	2.0	0.01	8.22	149.1	150.2	149.6	2'450	463.6	20.7	19.1	
100000	TFB	02.02.15	09.02.15	7.0	0.02	8.24	149.2	150.2	149.7	2'460	844.6	37.7	34.7	
100000	TFB	02.02.15	09.02.15	7.0	0.02	8.21	149.6	149.3	150.2	2'450	880.9	39.4	36.3	
100000	TFB	02.02.15	09.02.15	7.0	0.02	8.22	149.5	149.3	149.8	2'460	931.6	41.7	38.4	
100000	TFB	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.24	150.3	149.8	150.2	2'440	1'306.3	58.0	53.4	
100000	TFB	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.32	150.2	150.0	150.3	2'460	1'291.7	57.3	52.8	
100000	TFB	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.22	149.7	150.4	149.9	2'430	1'250.3	55.5	51.1	
100000	TFB	02.02.15	30.03.15	56.1	0.15	8.24	150.0	149.8	150.1	2'440	1'401.2	62.4	57.5	
100000	TFB	02.02.15	30.03.15	56.1	0.15	8.25	150.4	149.5	150.5	2'440	1'396.3	62.1	57.2	
100000	TFB	02.02.15	30.03.15	56.1	0.15	8.24	150.2	149.7	150.3	2'440	1'443.8	64.2	59.1	
120000	HSR	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.14	149.6	149.8	148.8	2'440	1'194.8	53.3	53.3	
120000	HSR	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.18	149.8	150.0	149.1	2'440	1'191.5	53.0	53.0	
120000	HSR	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.12	149.7	149.8	149.2	2'430	1'195.4	53.3	53.3	
120000	HSR	02.02.15	04.05.15	91.1	0.25	8.18	149.8	149.8	148.5	2'450	1'389.5	61.9	61.9	
120000	HSR	02.02.15	04.05.15	91.1	0.25	8.12	149.8	149.8	149.0	2'430	1'393.0	62.1	62.1	
120000	HSR	02.02.15	04.05.15	91.1	0.25	8.08	149.8	149.8	149.0	2'420	1'366.7	60.9	60.9	
120000	HSR	02.02.15	10.08.15	189.0	0.52	8.18	150.3	150.3	149.0	2'430	1'518.5	67.2	67.2	
120000	HSR	02.02.15	10.08.15	189.0	0.52	8.32	150.2	150.2	150.5	2'450	1'540.8	68.3	68.3	
120000	HSR	02.02.15	10.08.15	189.0	0.52	8.08	150.0	150.0	148.5	2'420	1'507.1	67.0	67.0	
120000	HSR	02.02.15	08.02.16	371.0	1.02	8.14	149.7	149.8	149.8	2'420	1'685.4	75.2	75.2	
120000	HSR	02.02.15	08.02.16	371.0	1.02	8.24	150.1	150.0	150.3	2'430	1'715.2	76.2	76.2	
120000	HSR	02.02.15	08.02.16	371.0	1.02	8.14	148.5	150.0	149.8	2'440	1'724.7	77.4	77.4	
120000	HSR	02.02.15	01.02.17	730.1	2.00	8.22	148.6	150.1	150.0	2'460	1'650.6	74.0	74.0	
120000	HSR	02.02.15	01.02.17	730.1	2.00	8.08	148.5	150.1	150.0	2'420	1'715.6	77.0	77.0	
120000	HSR	02.02.15	01.02.17	730.1	2.00	8.30	151.4	150.3	150.3	2'430	1'678.6	73.8	73.8	
120000	HSR	02.02.15	22.01.20	1815.2	4.97	8.32	151.3	150.2	150.3	2'440	1'670.0	73.5	73.5	
120000	HSR	02.02.15	22.01.20	1815.2	4.97	8.24	151.3	150.2	150.0	2'420	1'592.3	70.1	70.1	
120000	HSR	02.02.15	22.01.20	1815.2	4.97	8.22	149.6	150.3	150.3	2'430	1'672.0	74.4	74.4	
120000	HSR	02.02.15	15.02.25	3666.0	10.04	8.29	149.7	150.4	150.5	2'450	1'839.6	81.7	81.7	
120000	HSR	02.02.15	15.02.25	3666.0	10.04	8.22	150.4	150.5	150.4	2'410	1'927.5	85.2	85.2	
120000	HSR	02.02.15	15.02.25	3666.0	10.04	8.31	150.0	150.6	150.4	2'450	1'847.6	81.8	81.8	

Tabelle A.13: Würfeldruckfestigkeiten C-E.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	02.02.15	04.02.15	2.0	0.01	8.19	150.0	150.0	150.0	2'430	73.4	1.8	1.6	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	04.02.15	2.0	0.01	8.15	151.0	150.0	150.0	2'400	78.9	1.9	1.8	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	04.02.15	2.0	0.01	8.18	150.0	150.0	150.0	2'420	74.8	1.8	1.7	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	09.02.15	7.0	0.02	8.26	150.0	149.0	150.0	2'460	121.4	2.9	2.7	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	09.02.15	7.0	0.02	8.20	149.0	150.0	150.0	2'450	108.9	2.6	2.4	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	09.02.15	7.0	0.02	8.19	150.0	150.0	150.0	2'430	119.5	2.9	2.7	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.28	150.0	150.0	150.0	2'450	137.9	3.3	3.1	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.12	150.0	149.0	150.0	2'420	152.3	3.7	3.4	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.22	150.0	149.0	150.0	2'450	151.5	3.7	3.4	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	30.03.15	56.1	0.15	8.27	151.0	151.0	150.0	2'420	163.8	3.9	3.6	151.0	150.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	30.03.15	56.1	0.15	8.26	151.0	150.0	151.0	2'410	160.7	3.9	3.6	150.5	151.0	37.5
100000	TFB	02.02.15	30.03.15	56.1	0.15	8.23	150.0	150.0	151.0	2'420	152.1	3.7	3.4	150.0	151.0	37.5
120000	HSR	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.12	150.0	149.8	149.8	2'410	134.6	3.3	3.3	149.9	149.8	37.5
120000	HSR	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.26	150.4	150.4	150.3	2'430	146.1	3.5	3.5	150.4	150.3	37.5
120000	HSR	02.02.15	02.03.15	28.2	0.08	8.12	149.8	149.9	148.6	2'430	134.8	3.3	3.3	149.9	148.6	37.5
120000	HSR	02.02.15	04.05.15	91.2	0.25	8.20	149.7	149.6	149.8	2'440	149.1	3.6	3.6	149.7	149.8	37.5
120000	HSR	02.02.15	04.05.15	91.2	0.25	8.30	150.0	149.9	150.6	2'450	157.1	3.8	3.8	150.0	150.6	37.5
120000	HSR	02.02.15	04.05.15	91.2	0.25	8.26	150.3	150.3	149.5	2'450	154.6	3.7	3.7	150.3	149.5	37.5
120000	HSR	02.02.15	11.08.15	189.9	0.52	8.14	150.4	150.4	150.0	2'400	183.2	4.4	4.4	150.4	150.0	37.5
120000	HSR	02.02.15	11.08.15	189.9	0.52	8.18	150.2	150.0	149.7	2'430	175.8	4.3	4.3	150.1	149.7	37.5
120000	HSR	02.02.15	11.08.15	189.9	0.52	8.10	149.8	149.7	148.8	2'430	174.3	4.3	4.3	149.8	148.8	37.5
120000	HSR	02.02.15	08.02.16	371.0	1.02	8.18	150.2	150.1	149.7	2'420	169.6	4.1	4.1	150.2	149.7	37.5
120000	HSR	02.02.15	08.02.16	371.0	1.02	8.18	150.4	149.8	149.8	2'420	172.7	4.2	4.2	150.1	149.8	37.5
120000	HSR	02.02.15	08.02.16	371.0	1.02	8.14	149.3	150.0	149.9	2'420	160.0	3.9	3.9	149.7	149.9	37.5
120000	HSR	02.02.15	01.02.17	730.1	2.00	8.12	148.4	150.1	150.0	2'430	188.3	4.6	4.6	149.3	150.0	37.5
120000	HSR	02.02.15	01.02.17	730.1	2.00	8.18	149.9	150.3	150.2	2'420	193.0	4.7	4.7	150.1	150.2	37.5
120000	HSR	02.02.15	01.02.17	730.1	2.00	8.22	150.2	150.2	150.1	2'430	184.3	4.5	4.5	150.2	150.1	37.5
120000	HSR	02.02.15	23.01.20	1816.2	4.98	8.26	151.7	150.1	150.1	2'420	186.3	4.5	4.5	150.9	150.1	37.5
120000	HSR	02.02.15	23.01.20	1816.2	4.98	8.18	150.4	149.9	149.9	2'420	205.1	5.0	5.0	150.2	149.9	37.5
120000	HSR	02.02.15	23.01.20	1816.2	4.98	8.14	148.8	150.0	149.8	2'430	190.2	4.6	4.6	149.4	149.8	37.5
120000	HSR	02.02.15	15.02.25	3666.2	10.04	8.14	148.7	149.9	150.1	2'430	181.5	4.4	4.4	149.3	150.1	37.5
120000	HSR	02.02.15	15.02.25	3666.2	10.04	8.31	150.5	150.5	150.6	2'440	197.3	4.7	4.7	150.5	150.6	37.5
120000	HSR	02.02.15	15.02.25	3666.2	10.04	8.25	150.2	150.4	150.2	2'430	185.2	4.5	4.5	150.3	150.2	37.5

Tabelle A.14: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-E.

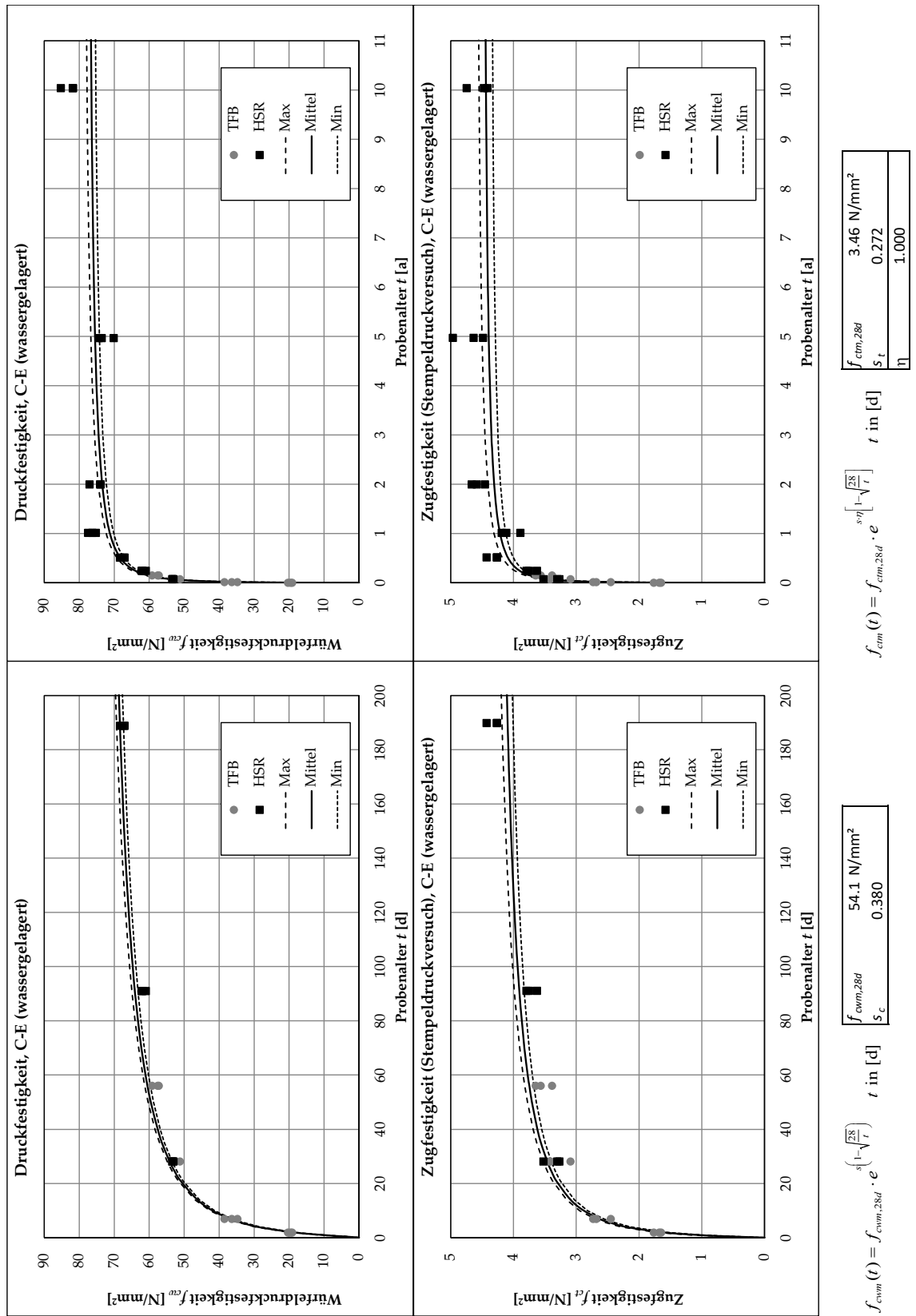


Bild A.21: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-E.

A.2.8 Festigkeiten C-F

Druckfestigkeit		Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	effektiv		korrigiert
L									B	H	Festigkeit f_{cvm} [N/mm ²]			Festigkeit f_{cvm} [N/mm ²]		
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.09	149.1	148.8	149.6	2'440	563.2	25.4	24.9			
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.15	149.4	149.1	149.7	2'440	558.9	25.1	24.6			
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.17	149.3	149.8	149.8	2'440	557.3	24.9	24.4			
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.19	149.5	150.1	150.0	2'430	945.1	42.1	41.2			
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.09	148.8	148.7	149.4	2'450	891.5	40.3	39.5			
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.05	149.0	147.9	149.7	2'440	913.5	41.5	40.7			
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	28.0	0.08	8.23	150.8	149.5	150.3	2'430	1'115.1	49.5	48.5			
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	28.0	0.08	8.16	149.7	148.6	149.8	2'450	1'075.5	48.3	47.3			
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	28.0	0.08	8.22	150.2	149.2	150.2	2'440	1'044.9	46.6	45.6			
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.1	0.15	8.08	149.5	147.7	149.8	2'440	1'089.3	49.3	48.3			
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.1	0.15	8.12	149.8	149.7	150.1	2'410	1'111.4	49.6	48.6			
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.1	0.15	8.08	149.6	148.0	149.9	2'430	1'112.6	50.3	49.3			
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.2	0.08	8.18	150.0	150.0	149.4	2'430	1'089.6	48.4	48.4			
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.2	0.08	8.18	149.9	149.9	150.0	2'430	1'106.5	49.2	49.2			
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.2	0.08	8.22	150.0	150.1	149.4	2'440	1'066.0	47.3	47.3			
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.1	0.25	8.16	149.7	149.7	149.4	2'440	1'197.7	53.4	53.4			
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.1	0.25	8.30	150.3	150.3	151.8	2'420	1'197.1	53.0	53.0			
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.1	0.25	8.18	150.3	150.1	150.0	2'420	1'174.8	52.1	52.1			
120000	HSR	04.02.15	10.08.15	187.1	0.51	8.08	150.0	150.0	151.0	2'380	1'148.4	51.0	51.0			
120000	HSR	04.02.15	10.08.15	187.1	0.51	8.18	149.8	149.9	150.4	2'420	1'215.1	54.1	54.1			
120000	HSR	04.02.15	10.08.15	187.1	0.51	8.14	150.1	150.0	149.1	2'420	1'243.4	55.2	55.2			
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.06	150.0	149.8	149.7	2'400	1'400.8	62.3	62.3			
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.10	150.1	150.0	150.0	2'400	1'342.9	59.6	59.6			
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.28	150.3	150.2	150.3	2'440	1'212.6	53.7	53.7			
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	8.16	149.8	150.4	150.4	2'410	1280.4	56.8	56.8			
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	8.16	149.2	150.3	150.2	2'420	1285.9	57.3	57.3			
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	8.12	148.9	150.0	150.0	2'420	1367.8	61.2	61.2			
120000	HSR	04.02.15	23.01.20	1814.0	4.97	8.20	150.0	150.5	150.6	2'410	1388.1	61.5	61.5			
120000	HSR	04.02.15	23.01.20	1814.0	4.97	8.26	151.3	150.2	150.2	2'420	1303.0	57.3	57.3			
120000	HSR	04.02.15	23.01.20	1814.0	4.97	8.12	148.1	150.0	149.9	2'440	1364.9	61.4	61.4			
120000	HSR	04.02.15	14.02.25	3663.1	10.04	8.21	150.6	150.4	150.2	2'410	1'454.6	64.2	64.2			
120000	HSR	04.02.15	14.02.25	3663.1	10.04	8.22	151.7	150.0	150.1	2'410	1'407.8	61.9	61.9			
120000	HSR	04.02.15	14.02.25	3663.1	10.04	8.12	148.4	150.3	150.0	2'430	1'399.4	62.7	62.7			

Tabelle A.15: Würfeldruckfestigkeiten C-F.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	L [mm]	Würfelmessungen B [mm]	H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,abse}$ [kN]	Festigkeit $f_{cs,z}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{cs,z}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.17	150.0	150.0	149.0	2'440	79.4	1.9	1.6	150.0	149.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.22	150.0	152.0	150.0	2'400	80.7	1.9	1.6	151.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.17	150.0	150.0	150.0	2'420	76.8	1.9	1.6	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.24	149.0	151.0	151.0	2'420	113.8	2.7	2.3	150.0	151.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	7.91	149.0	148.0	150.0	2'390	104.4	2.6	2.1	148.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.07	149.0	148.0	150.0	2'440	105.0	2.6	2.2	148.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	28.0	0.08	8.27	150.0	150.0	150.0	2'450	122.1	3.0	2.5	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	28.0	0.08	8.16	150.0	149.0	150.0	2'440	133.3	3.2	2.7	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	28.0	0.08	8.15	150.0	149.0	150.0	2'430	130.8	3.2	2.7	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.1	0.15	8.12	150.0	149.0	150.0	2'420	130.2	3.2	2.6	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.1	0.15	8.15	149.0	150.0	150.0	2'430	129.1	3.1	2.6	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.1	0.15	8.13	149.0	150.0	150.0	2'420	129.5	3.1	2.6	149.5	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.3	0.08	8.14	150.1	150.1	150.0	2'410	123.9	3.0	3.0	150.1	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.3	0.08	8.20	150.0	150.0	150.1	2'430	103.6	2.5	2.5	150.0	150.1	37.5
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.3	0.08	8.12	149.8	149.8	149.4	2'420	103.6	2.5	2.5	149.8	149.4	37.5
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.1	0.25	8.14	150.1	150.0	149.5	2'420	124.3	3.0	3.0	150.1	149.5	37.5
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.1	0.25	8.14	150.0	150.0	148.5	2'440	128.4	3.1	3.1	150.0	148.5	37.5
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.1	0.25	8.18	149.7	150.0	150.0	2'430	137.6	3.3	3.3	149.9	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	11.08.15	188.0	0.52	8.18	149.9	149.9	149.5	2'440	127.2	3.1	3.1	149.9	149.5	37.5
120000	HSR	04.02.15	11.08.15	188.0	0.52	8.22	150.0	150.2	149.9	2'430	119.2	2.9	2.9	150.1	149.9	37.5
120000	HSR	04.02.15	11.08.15	188.0	0.52	8.10	150.0	150.3	149.5	2'400	139.5	3.4	3.4	150.2	149.5	37.5
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.02	148.2	149.9	149.8	2'410	160.4	3.9	3.9	149.1	149.8	37.5
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.08	147.1	150.1	150.0	2'440	157.9	3.9	3.9	148.6	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.12	149.1	150.0	150.0	2'420	149.6	3.6	3.6	149.6	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.3	2.00	8.30	150.3	150.4	150.4	2'440	146.1	3.5	3.5	150.4	150.4	37.5
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.3	2.00	8.22	150.6	150.1	150.2	2'420	149.8	3.6	3.6	150.4	150.2	37.5
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.3	2.00	8.26	149.8	150.9	150.3	2'430	154.1	3.7	3.7	150.4	150.3	37.5
120000	HSR	04.02.15	28.01.20	1819.1	4.98	8.16	148.2	149.9	150.0	2'450	169.5	4.1	4.1	149.1	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	28.01.20	1819.1	4.98	8.08	149.1	150.0	150.0	2'410	175.3	4.3	4.3	149.6	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	28.01.20	1819.1	4.98	8.18	150.9	150.2	150.2	2'400	165.1	4.0	4.0	150.6	150.2	37.5
120000	HSR	04.02.15	14.02.25	3663.1	10.04	8.10	148.8	150.1	150.1	2'420	184.2	4.5	4.5	149.5	150.1	37.5
120000	HSR	04.02.15	14.02.25	3663.1	10.04	8.20	148.5	150.6	150.3	2'440	171.2	4.1	4.1	149.6	150.3	37.5
120000	HSR	04.02.15	14.02.25	3663.1	10.04	8.22	149.9	150.5	150.5	2'420	163.7	3.9	3.9	150.2	150.5	37.5

Tabelle A.16: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-F.

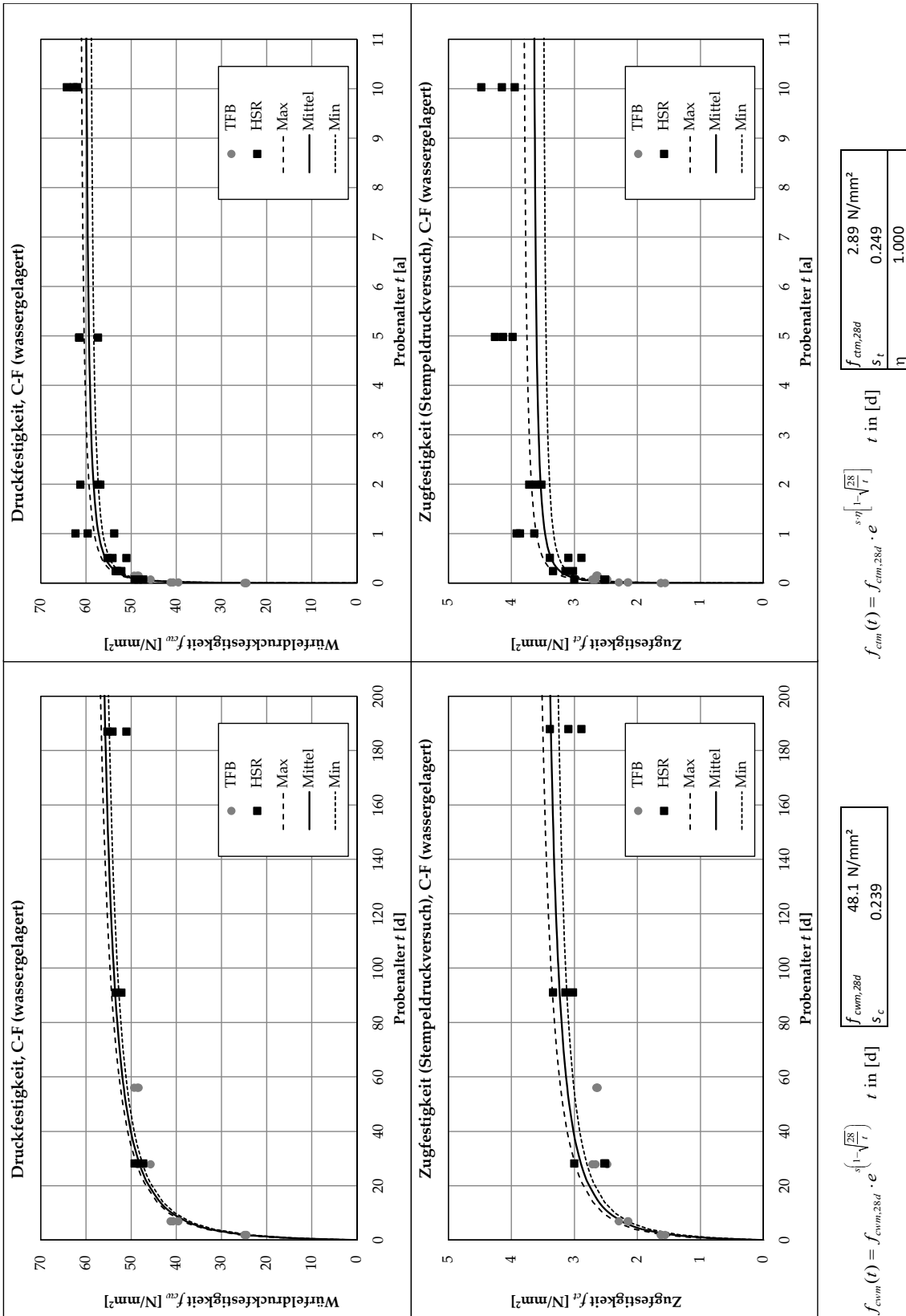


Bild A.22: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-F.

A.2.9 Festigkeiten C-FT

Druckfestigkeit		Alter		Alter		Masse			Würfelabmessungen			Rohdichte	Bruchlast	effektiv	korrigiert
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	t [d]	t [a]	m [kg]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	ρ_{roh} [kg/m ³]	$F_{u,cube}$ [kN]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	7.98	149.0	148.0	149.6	2'420	529.4	24.0	25.1		
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.05	149.3	149.1	149.8	2'410	537.2	24.1	25.2		
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.06	149.7	149.2	149.6	2'410	523.9	23.5	24.6		
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.10	149.4	150.4	149.8	2'410	826.7	36.8	38.5		
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.06	149.6	150.1	150.0	2'390	803.7	35.8	37.5		
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	7.98	149.2	149.1	149.6	2'400	842.3	37.9	39.7		
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	27.9	0.08	8.06	149.7	149.7	149.8	2'400	1'001.1	44.7	46.8		
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	27.9	0.08	8.13	150.1	150.0	150.1	2'410	987.1	43.8	45.8		
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	27.9	0.08	8.05	149.7	149.7	149.8	2'400	978.3	43.7	45.7		
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.0	0.15	8.14	150.2	150.8	150.4	2'390	1'031.1	45.5	47.6		
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.0	0.15	8.12	150.1	150.6	150.4	2'390	1'062.0	47.0	49.2		
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.0	0.15	8.05	150.1	150.4	150.3	2'370	1'048.3	46.4	48.6		
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.1	0.08	8.12	150.4	150.3	151.0	2'380	1'026.2	45.4	45.4		
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.1	0.08	8.06	150.1	150.1	149.1	2'400	1'046.0	46.4	46.4		
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.1	0.08	8.04	150.0	150.0	150.4	2'380	1'065.9	47.4	47.4		
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.0	0.25	8.00	149.8	149.7	150.0	2'380	1'105.8	49.3	49.3		
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.0	0.25	8.02	149.8	149.9	150.5	2'370	1'108.8	49.4	49.4		
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.0	0.25	8.10	150.3	150.3	150.5	2'380	1'195.5	52.9	52.9		
120000	HSR	04.02.15	10.08.15	187.1	0.51	8.04	150.2	150.2	151.0	2'360	1'121.1	49.7	49.7		
120000	HSR	04.02.15	10.08.15	187.1	0.51	8.08	150.1	150.1	152.0	2'360	1'163.8	51.7	51.7		
120000	HSR	04.02.15	10.08.15	187.1	0.51	8.08	150.1	150.2	151.6	2'360	1'154.2	51.2	51.2		
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.0	1.01	8.08	151.1	149.9	149.9	2'380	1'216.6	53.7	53.7		
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.0	1.01	7.94	150.1	149.7	149.9	2'360	1'137.5	50.6	50.6		
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.0	1.01	8.02	150.4	150.0	150.0	2'370	1'246.8	55.3	55.3		
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	8.06	150.9	150.2	150.2	2'370	1'304.4	57.6	57.6		
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	7.96	149.6	150.1	150.1	2'360	1'231.9	54.9	54.9		
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	7.90	149.3	149.6	149.6	2'360	1'205.6	54.0	54.0		
120000	HSR	04.02.15	23.01.20	1813.9	4.97	8.00	150.7	150.2	150.1	2'350	1'245.9	55.0	55.0		
120000	HSR	04.02.15	23.01.20	1813.9	4.97	7.94	152.2	149.6	149.6	2'330	1'185.9	52.1	52.1		
120000	HSR	04.02.15	23.01.20	1813.9	4.97	7.90	149.1	149.6	149.7	2'370	1'200.4	53.8	53.8		
120000	HSR	04.02.15	15.02.25	3664.1	10.04	8.09	151.5	150.3	150.0	2'370	1'261.7	55.4	55.4		
120000	HSR	04.02.15	15.02.25	3664.1	10.04	7.88	150.3	149.6	149.6	2'340	1'234.3	54.9	54.9		
120000	HSR	04.02.15	15.02.25	3664.1	10.04	7.94	149.6	149.8	149.8	2'370	1'242.9	55.5	55.5		

Tabelle A.17: Würfeldruckfestigkeiten C-FT.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	$f_{ct,eff}$ [N/mm ²]	$f_{ct,corr}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel		
							L [mm]	B [mm]	H [mm]				2b [mm]	h [mm]	2a [mm]	
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.13	151.0	150.0	150.0	2'390	87.8	2.1	2.1	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.03	149.0	150.0	150.0	2'390	83.2	2.0	2.1	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	06.02.15	2.0	0.01	8.09	150.0	150.0	150.0	2'400	85.2	2.1	2.1	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.08	149.0	150.0	150.0	2'410	103.5	2.5	2.6	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.03	149.0	149.0	150.0	2'410	120.7	2.9	3.0	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	11.02.15	7.0	0.02	8.02	149.0	149.0	150.0	2'410	118.9	2.9	3.0	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	27.9	0.08	8.03	150.0	150.0	150.0	2'380	118.7	2.9	2.9	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	27.9	0.08	7.99	150.0	150.0	150.0	2'370	120.2	2.9	3.0	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	04.03.15	27.9	0.08	8.05	150.0	149.0	150.0	2'400	118.6	2.9	3.0	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.0	0.15	8.14	150.0	150.0	150.0	2'410	119.3	2.9	3.0	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.0	0.15	8.09	150.0	150.0	151.0	2'380	120.8	2.9	3.0	150.0	151.0	37.5
100000	TFB	04.02.15	01.04.15	56.0	0.15	8.03	150.0	150.0	149.0	2'390	125.2	3.1	3.1	150.0	149.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.2	0.08	8.06	150.1	150.1	149.4	2'390	130.9	3.2	3.2	150.1	149.4	37.5
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.2	0.08	8.16	150.3	150.3	150.1	2'410	114.6	2.8	2.8	150.3	150.1	37.5
120000	HSR	04.02.15	04.03.15	28.2	0.08	7.98	150.0	150.0	149.0	2'380	130.6	3.2	3.2	150.0	149.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.0	0.25	7.94	150.0	150.0	148.5	2'380	124.0	3.0	3.0	150.0	148.5	37.5
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.0	0.25	8.02	149.9	149.9	150.0	2'380	132.5	3.2	3.2	149.9	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	06.05.15	91.0	0.25	8.06	149.9	150.0	149.0	2'410	124.9	3.0	3.0	150.0	149.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	11.08.15	188.0	0.52	8.00	149.9	149.7	150.2	2'370	141.8	3.4	3.4	149.8	150.2	37.5
120000	HSR	04.02.15	11.08.15	188.0	0.52	8.00	150.0	149.7	150.1	2'370	120.1	2.9	2.9	149.9	150.1	37.5
120000	HSR	04.02.15	11.08.15	188.0	0.52	8.02	150.1	150.2	150.0	2'370	133.3	3.2	3.2	150.2	150.0	37.5
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.00	149.6	150.1	150.1	2'370	140.2	3.4	3.4	149.9	150.1	37.5
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	8.00	149.5	149.8	149.8	2'380	126.6	3.1	3.1	149.7	149.8	37.5
120000	HSR	04.02.15	08.02.16	369.1	1.01	7.88	148.8	149.6	149.6	2'370	141.2	3.4	3.4	149.2	149.6	37.5
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	8.00	150.9	150.2	150.2	2'350	132.3	3.2	3.2	150.6	150.2	37.5
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	8.00	152.0	150.1	150.1	2'340	145.8	3.5	3.5	151.1	150.1	37.5
120000	HSR	04.02.15	01.02.17	728.2	2.00	7.96	149.8	150.1	150.1	2'360	142.9	3.5	3.5	150.0	150.1	37.5
120000	HSR	04.02.15	28.01.20	1819.1	4.98	7.96	151.0	149.7	149.7	2'350	127.0	3.1	3.1	150.4	149.7	37.5
120000	HSR	04.02.15	28.01.20	1819.1	4.98	7.92	149.1	149.8	149.8	2'370	135.6	3.3	3.3	149.5	149.8	37.5
120000	HSR	04.02.15	28.01.20	1819.1	4.98	7.92	149.6	150.0	149.9	2'350	132.3	3.2	3.2	149.8	149.9	37.5
120000	HSR	04.02.15	15.02.25	3664.2	10.04	7.98	150.0	149.8	149.7	2'370	129.9	3.2	3.2	149.9	149.7	37.5
120000	HSR	04.02.15	15.02.25	3664.2	10.04	7.79	150.0	150.1	147.9	2'340	144.5	3.5	3.5	150.1	147.9	37.5
120000	HSR	04.02.15	15.02.25	3664.2	10.04	7.92	151.2	150.0	149.9	2'330	134.8	3.3	3.3	150.6	149.9	37.5

Tabelle A.18: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-FT.

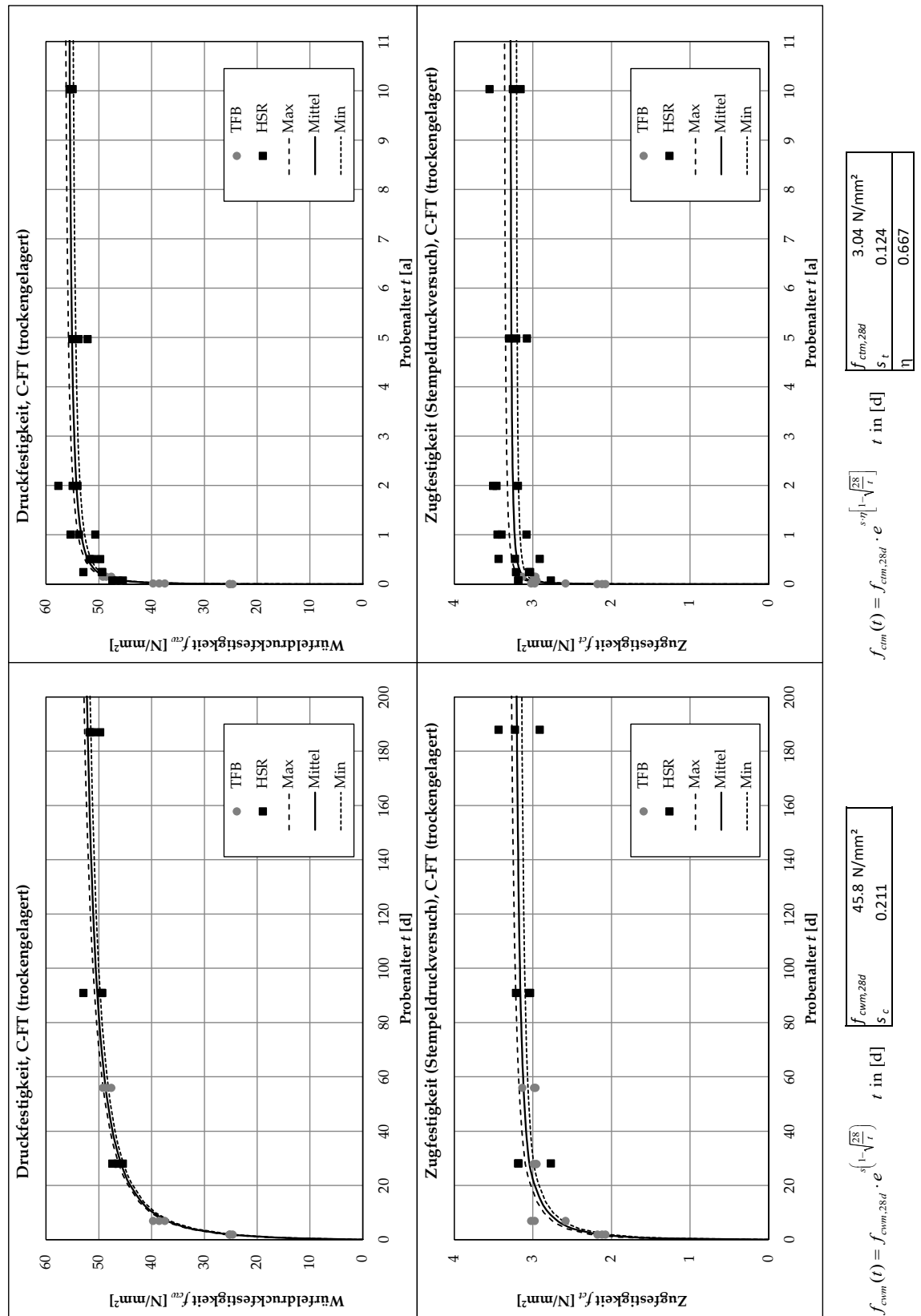


Bild A.23: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-FT.

A.2.10 Festigkeiten C-G

Druckfestigkeit		Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	effektiv		korrigiert
Würfelmessungen									Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]						
L	B	H														
[mm]	[mm]	[mm]														
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.22	149.3	149.9	149.8	2'450	464.4	20.8	19.8			
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.12	149.0	148.2	149.6	2'460	434.3	19.7	18.8			
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.23	149.2	149.6	149.9	2'460	424.9	19.0	18.1			
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	7.0	0.02	8.18	149.1	148.8	149.7	2'460	777.6	35.0	33.3			
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	7.0	0.02	8.20	149.2	148.8	149.8	2'460	750.8	33.8	32.2			
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	7.0	0.02	8.10	148.9	148.3	149.5	2'450	800.4	36.2	34.5			
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.26	149.9	149.1	150.1	2'460	922.8	41.3	39.3			
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.21	149.6	149.3	149.8	2'450	976.3	43.7	41.6			
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.29	150.2	150.4	150.4	2'440	909.6	40.3	38.4			
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	56.2	0.15	8.30	150.1	149.5	150.6	2'460	945.6	42.1	40.1			
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	56.2	0.15	8.22	149.8	148.5	150.3	2'460	991.4	44.6	42.5			
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	56.2	0.15	8.21	149.8	148.6	150.3	2'450	1'008.7	45.3	43.1			
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.3	0.08	8.22	150.2	149.9	148.8	2'450	906.9	40.3	40.3			
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.3	0.08	8.16	149.8	149.7	149.5	2'430	929.7	41.5	41.5			
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.3	0.08	8.18	149.8	149.8	150.0	2'430	943.3	42.0	42.0			
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.2	0.25	8.30	150.1	150.2	150.5	2'450	1'050.3	46.6	46.6			
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.2	0.25	8.28	150.2	150.3	150.3	2'440	963.0	42.7	42.7			
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.2	0.25	8.26	150.1	150.0	149.3	2'460	1'015.4	45.1	45.1			
120000	HSR	09.02.15	10.08.15	182.1	0.50	8.08	149.9	150.0	148.0	2'430	1'251.5	55.7	55.7			
120000	HSR	09.02.15	10.08.15	182.1	0.50	8.24	150.0	150.2	149.6	2'440	1'041.0	46.2	46.2			
120000	HSR	09.02.15	10.08.15	182.1	0.50	8.16	149.9	150.0	148.0	2'450	1'107.8	49.3	49.3			
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.2	1.00	8.22	149.0	150.2	150.2	2'450	1'256.3	56.1	56.1			
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.2	1.00	8.16	149.4	149.8	149.8	2'430	1'218.7	54.5	54.5			
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.2	1.00	8.06	147.7	149.7	149.7	2'440	1'271.7	57.5	57.5			
120000	HSR	09.02.15	03.02.17	725.2	1.99	8.10	148.4	149.6	149.7	2'440	1'254.5	56.5	56.5			
120000	HSR	09.02.15	03.02.17	725.2	1.99	8.20	149.8	149.8	149.8	2'440	1'245.5	55.5	55.5			
120000	HSR	09.02.15	03.02.17	725.2	1.99	8.24	150.5	150.4	150.3	2'420	1'200.8	53.1	53.1			
120000	HSR	09.02.15	23.01.20	1809.1	4.96	8.24	149.7	149.9	150.0	2'450	1'226.4	54.7	54.7			
120000	HSR	09.02.15	23.01.20	1809.1	4.96	8.20	147.2	150.1	150.0	2'470	1'206.6	54.6	54.6			
120000	HSR	09.02.15	23.01.20	1809.1	4.96	8.34	149.4	150.3	150.3	2'470	1'240.1	55.2	55.2			
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.2	10.08	8.23	150.8	150.2	150.2	2'420	1'325.4	58.5	58.5			
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.2	10.08	8.20	149.6	149.9	150.0	2'440	1'313.1	58.6	58.6			
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.2	10.08	8.20	148.5	150.0	150.1	2'450	1'292.7	58.0	58.0			

Tabelle A.19: Würfeldruckfestigkeiten C-G.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)		effektiv										korrigiert	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]
											Zylinder / Stempel		
						L [mm]	B [mm]	H [mm]			2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.16	150.0	149.0	150.0	2'430	77.9	1.9	1.7
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.12	150.0	149.0	150.0	2'420	58.5	1.4	1.2
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.15	150.0	149.0	150.0	2'430	53.0	1.3	1.1
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	7.0	0.02	8.18	149.0	148.0	150.0	2'470	99.8	2.4	2.1
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	7.0	0.02	8.18	149.0	149.0	150.0	2'460	89.1	2.2	1.9
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	7.0	0.02	8.21	149.0	149.0	150.0	2'460	92.3	2.2	2.0
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.27	150.0	150.0	150.0	2'450	106.6	2.6	2.3
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.14	150.0	149.0	150.0	2'430	101.9	2.5	2.2
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.16	150.0	149.0	149.0	2'450	108.1	2.6	2.3
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	56.2	0.15	8.25	150.0	150.0	150.0	2'440	106.6	2.6	2.3
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	56.2	0.15	8.28	150.0	150.0	150.0	2'450	110.1	2.7	2.3
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	56.2	0.15	8.12	149.0	149.0	150.0	2'440	111.7	2.7	2.4
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.30	150.2	150.2	150.3	2'450	95.8	2.3	2.3
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.10	150.1	150.1	148.6	2'420	101.1	2.5	2.5
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.2	0.08	8.20	149.6	149.6	149.4	2'450	88.6	2.2	2.2
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.3	0.25	8.16	150.1	150.1	149.2	2'430	98.1	2.4	2.4
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.3	0.25	8.08	150.0	149.9	149.5	2'400	122.4	3.0	3.0
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.3	0.25	8.16	150.0	150.1	149.3	2'430	111.2	2.7	2.7
120000	HSR	09.02.15	11.08.15	183.0	0.50	8.14	150.1	150.0	149.5	2'420	136.1	3.3	3.3
120000	HSR	09.02.15	11.08.15	183.0	0.50	8.22	150.2	150.2	149.2	2'440	124.8	3.0	3.0
120000	HSR	09.02.15	11.08.15	183.0	0.50	8.16	149.9	149.7	150.7	2'410	131.2	3.2	3.2
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.2	1.00	8.10	148.6	149.9	149.9	2'430	157.3	3.8	3.8
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.2	1.00	8.16	148.8	150.2	150.1	2'430	139.3	3.4	3.4
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.2	1.00	8.22	150.6	149.8	149.8	2'430	126.9	3.1	3.1
120000	HSR	09.02.15	03.02.17	725.3	1.99	8.16	150.4	150.1	150.1	2'410	134.7	3.3	3.3
120000	HSR	09.02.15	03.02.17	725.3	1.99	8.14	149.3	150.5	150.5	2'410	148.0	3.6	3.6
120000	HSR	09.02.15	03.02.17	725.3	1.99	8.20	149.6	150.1	150.0	2'430	124.4	3.0	3.0
120000	HSR	09.02.15	28.01.20	1814.3	4.97	8.10	149.5	150.2	150.2	2'400	158.7	3.8	3.8
120000	HSR	09.02.15	28.01.20	1814.3	4.97	8.20	151.5	150.3	150.2	2'400	151.0	3.6	3.6
120000	HSR	09.02.15	28.01.20	1814.3	4.97	8.18	148.3	150.1	150.0	2'450	162.5	4.0	4.0
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.3	10.08	8.25	149.4	149.9	149.9	2'460	138.4	3.4	3.4
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.3	10.08	8.23	148.6	150.4	150.4	2'450	149.2	3.6	3.6
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.3	10.08	8.27	150.0	150.2	150.3	2'440	134.3	3.2	3.2

Tabelle A.20: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-G.

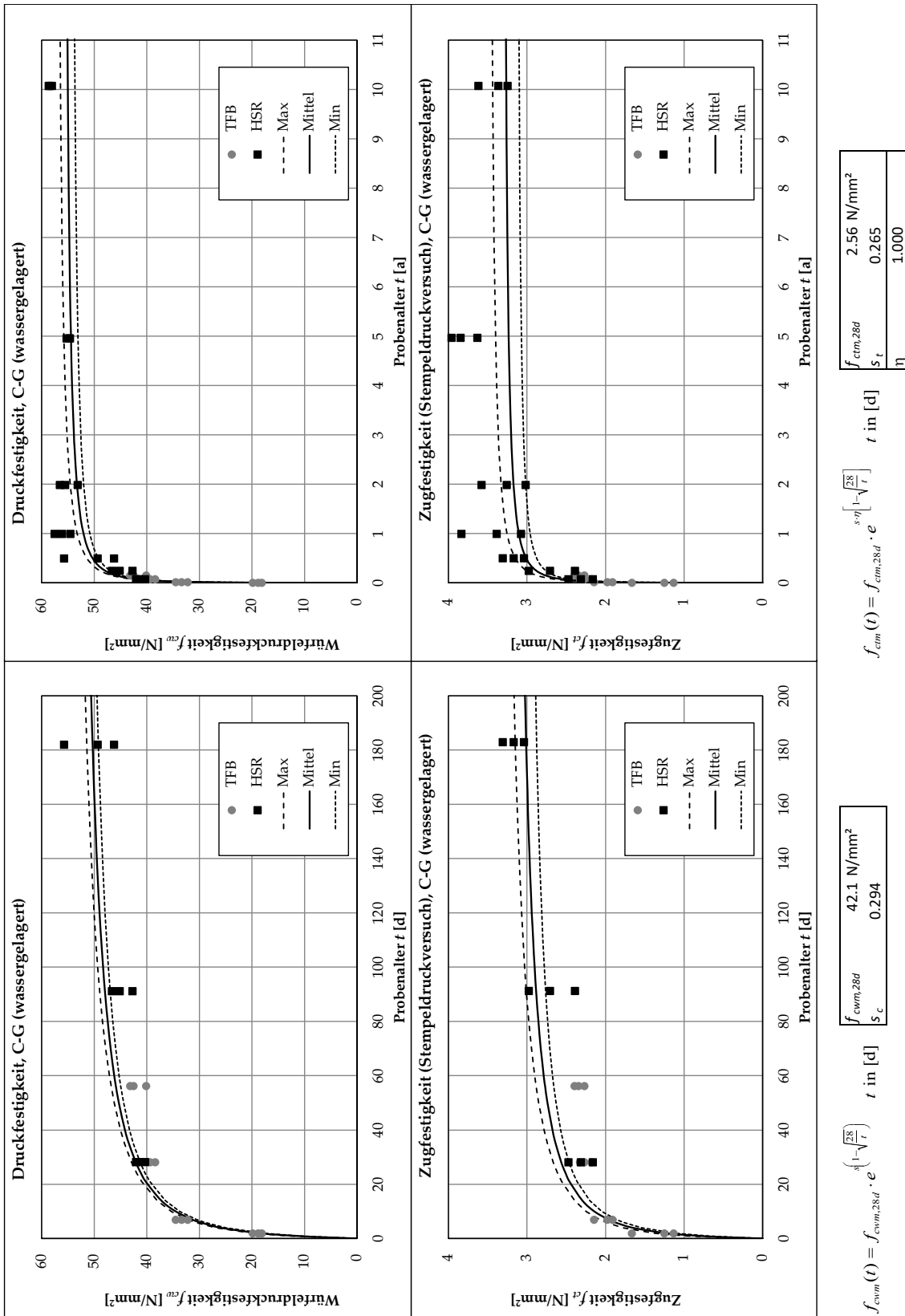


Bild A.24: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-G.

A.2.11 Festigkeiten C-GT

Druckfestigkeit		Betонier- datum		Prüf- datum		Alter		Masse		Würfelabmessungen			Rohdichte		Bruchlast		effektiv		korrigiert	
Versuch lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betонier- datum	Prüf- datum	t [d]	t [a]	m [kg]	L [mm]	B [mm]	H [mm]	ρ_{roh} [kg/m ³]	$F_{u,cube}$ [kN]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	7.97	148.9	147.6	149.6	2'420	432.7	19.7	19.7	20.1						
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.08	149.0	148.2	149.6	2'450	452.8	20.5	20.5	20.9						
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.09	149.2	150.0	149.6	2'420	440.6	19.7	19.7	20.1						
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	6.9	0.02	8.28	149.5	151.3	150.1	2'440	749.0	33.1	33.1	33.7						
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	6.9	0.02	8.14	149.6	149.4	150.2	2'420	723.2	32.4	32.4	33.0						
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	6.9	0.02	8.17	149.5	150.1	150.1	2'420	776.7	34.6	34.6	35.2						
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	27.9	0.08	7.98	149.4	148.3	149.5	2'410	854.8	38.6	38.6	39.3						
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	27.9	0.08	8.17	150.2	149.3	150.2	2'430	897.5	40.0	40.0	40.7						
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	27.9	0.08	8.11	149.6	150.1	149.7	2'410	904.0	40.3	40.3	41.0						
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	55.9	0.15	8.11	150.1	150.1	150.5	2'390	940.1	41.7	41.7	42.5						
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	55.9	0.15	8.19	150.0	150.0	150.3	2'420	965.6	42.9	42.9	43.7						
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	55.9	0.15	8.17	150.1	149.6	150.5	2'420	952.5	42.4	42.4	43.2						
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.1	0.08	7.96	149.6	149.6	149.6	2'380	914.0	40.8	40.8	40.8						
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.1	0.08	8.14	149.8	149.8	149.8	2'420	940.2	41.9	41.9	41.9						
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.1	0.08	8.04	149.9	149.9	148.6	2'410	955.4	42.5	42.5	42.5						
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.1	0.25	7.96	149.8	149.8	150.0	2'360	970.3	43.2	43.2	43.2						
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.1	0.25	8.06	149.8	149.8	149.6	2'400	965.8	43.0	43.0	43.0						
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.1	0.25	8.00	149.8	149.7	149.4	2'390	963.3	43.0	43.0	43.0						
120000	HSR	09.02.15	10.08.15	181.9	0.50	7.94	149.7	149.7	149.0	2'380	920.5	41.1	41.1	41.1						
120000	HSR	09.02.15	10.08.15	181.9	0.50	7.78	149.9	149.8	146.4	2'370	981.7	43.7	43.7	43.7						
120000	HSR	09.02.15	10.08.15	181.9	0.50	8.04	150.3	150.1	149.0	2'390	994.6	44.1	44.1	44.1						
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.1	1.00	8.02	149.8	149.8	149.9	2'380	1'047.0	46.7	46.7	46.7						
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.1	1.00	7.98	148.8	149.9	149.9	2'390	1'039.3	46.6	46.6	46.6						
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.1	1.00	8.02	149.5	149.8	149.7	2'390	1'053.6	47.0	47.0	47.0						
120000	HSR	09.02.15	06.02.17	727.9	1.99	8.20	150.8	150.3	150.3	2'410	1'057.1	46.6	46.6	46.6						
120000	HSR	09.02.15	06.02.17	727.9	1.99	7.84	148.7	149.9	149.9	2'350	1'060.1	47.6	47.6	47.6						
120000	HSR	09.02.15	06.02.17	727.9	1.99	7.92	149.1	150.0	149.8	2'360	1'064.4	47.6	47.6	47.6						
120000	HSR	09.02.15	23.01.20	1809.0	4.96	7.84	148.5	149.8	149.9	2'350	998.2	44.9	44.9	44.9						
120000	HSR	09.02.15	23.01.20	1809.0	4.96	8.02	149.4	149.8	149.8	2'390	1'022.7	45.7	45.7	45.7						
120000	HSR	09.02.15	23.01.20	1809.0	4.96	8.04	150.9	150.1	150.1	2'360	1'013.7	44.8	44.8	44.8						
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.0	10.08	7.93	149.0	149.7	149.7	2'370	1'111.4	49.8	49.8	49.8						
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.0	10.08	7.98	150.1	149.8	149.8	2'370	1'066.8	47.4	47.4	47.4						
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.0	10.08	7.91	150.0	150.0	149.9	2'350	1'091.3	48.5	48.5	48.5						

Tabelle A.21: Würfeldruckfestigkeiten C-GT.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelmessungen L [mm]	B [mm]	H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{ct, SZ}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.02	150.0	148.0	150.0	2'410	67.9	1.7	1.7	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.08	150.0	150.0	150.0	2'390	60.7	1.5	1.5	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	11.02.15	2.0	0.01	8.07	150.0	149.0	150.0	2'410	62.6	1.5	1.5	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	6.9	0.02	8.19	150.0	150.0	150.0	2'430	87.6	2.1	2.1	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	6.9	0.02	8.16	150.0	150.0	150.0	2'420	90.1	2.2	2.2	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	16.02.15	6.9	0.02	8.13	150.0	150.0	150.0	2'410	93.6	2.3	2.3	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	27.9	0.08	8.14	150.0	149.0	150.0	2'430	105.4	2.6	2.6	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	27.9	0.08	7.99	150.0	149.0	150.0	2'380	103.4	2.5	2.5	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	09.03.15	27.9	0.08	8.16	150.0	150.0	150.0	2'420	99.8	2.4	2.4	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	55.9	0.15	8.15	150.0	150.0	150.0	2'420	112.9	2.7	2.8	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	55.9	0.15	7.97	150.0	148.0	150.0	2'390	103.5	2.5	2.5	149.0	150.0	37.5
100000	TFB	09.02.15	06.04.15	55.9	0.15	8.10	150.0	149.0	150.0	2'420	117.5	2.9	2.9	149.5	150.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.1	0.08	8.06	149.7	149.7	149.8	2'400	104.3	2.5	2.5	149.7	149.8	37.5
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.1	0.08	8.14	149.8	149.7	150.9	2'410	108.2	2.6	2.6	149.8	150.9	37.5
120000	HSR	09.02.15	09.03.15	28.1	0.08	8.00	149.8	149.7	150.0	2'380	105.8	2.6	2.6	149.8	150.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.2	0.25	8.02	150.2	150.2	149.8	2'370	115.3	2.8	2.8	150.2	149.8	37.5
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.2	0.25	7.98	149.5	149.4	149.0	2'400	105.6	2.6	2.6	149.5	149.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	11.05.15	91.2	0.25	7.94	149.7	149.8	149.9	2'360	109.3	2.7	2.7	149.8	149.9	37.5
120000	HSR	09.02.15	11.08.15	183.0	0.50	8.04	150.2	150.1	150.0	2'380	116.7	2.8	2.8	150.2	150.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	11.08.15	183.0	0.50	8.10	150.2	150.2	150.0	2'390	117.1	2.8	2.8	150.2	150.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	11.08.15	183.0	0.50	8.02	150.0	150.1	150.0	2'370	123.4	3.0	3.0	150.1	150.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.1	1.00	7.94	147.9	149.7	149.8	2'390	107.4	2.6	2.6	148.8	149.8	37.5
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.1	1.00	8.10	150.7	150.0	150.2	2'390	112.6	2.7	2.7	150.4	150.2	37.5
120000	HSR	09.02.15	08.02.16	364.1	1.00	7.88	149.0	150.0	150.0	2'350	115.3	2.8	2.8	149.5	150.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	06.02.17	727.9	1.99	8.04	149.4	150.3	150.3	2'380	100.4	2.4	2.4	149.9	150.3	37.5
120000	HSR	09.02.15	06.02.17	727.9	1.99	7.84	148.3	149.6	149.6	2'360	116.9	2.9	2.9	149.0	149.6	37.5
120000	HSR	09.02.15	06.02.17	727.9	1.99	7.90	149.0	149.7	149.7	2'370	105.3	2.6	2.6	149.4	149.7	37.5
120000	HSR	09.02.15	28.01.20	1814.2	4.97	8.14	151.3	150.1	150.1	2'390	108.2	2.6	2.6	150.7	150.1	37.5
120000	HSR	09.02.15	28.01.20	1814.2	4.97	7.98	149.6	149.9	150.0	2'370	121.0	2.9	2.9	149.8	150.0	37.5
120000	HSR	09.02.15	28.01.20	1814.2	4.97	7.98	150.5	149.9	149.8	2'360	115.5	2.8	2.8	150.2	149.8	37.5
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.1	10.08	8.04	149.8	149.7	149.7	2'390	111.3	2.7	2.7	149.8	149.7	37.5
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.1	10.08	8.06	149.8	149.9	149.9	2'390	112.2	2.7	2.7	149.9	149.9	37.5
120000	HSR	09.02.15	06.03.25	3678.1	10.08	8.19	150.1	150.2	150.1	2'420	123.7	3.0	3.0	150.2	150.1	37.5

Tabelle A.22: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-GT.

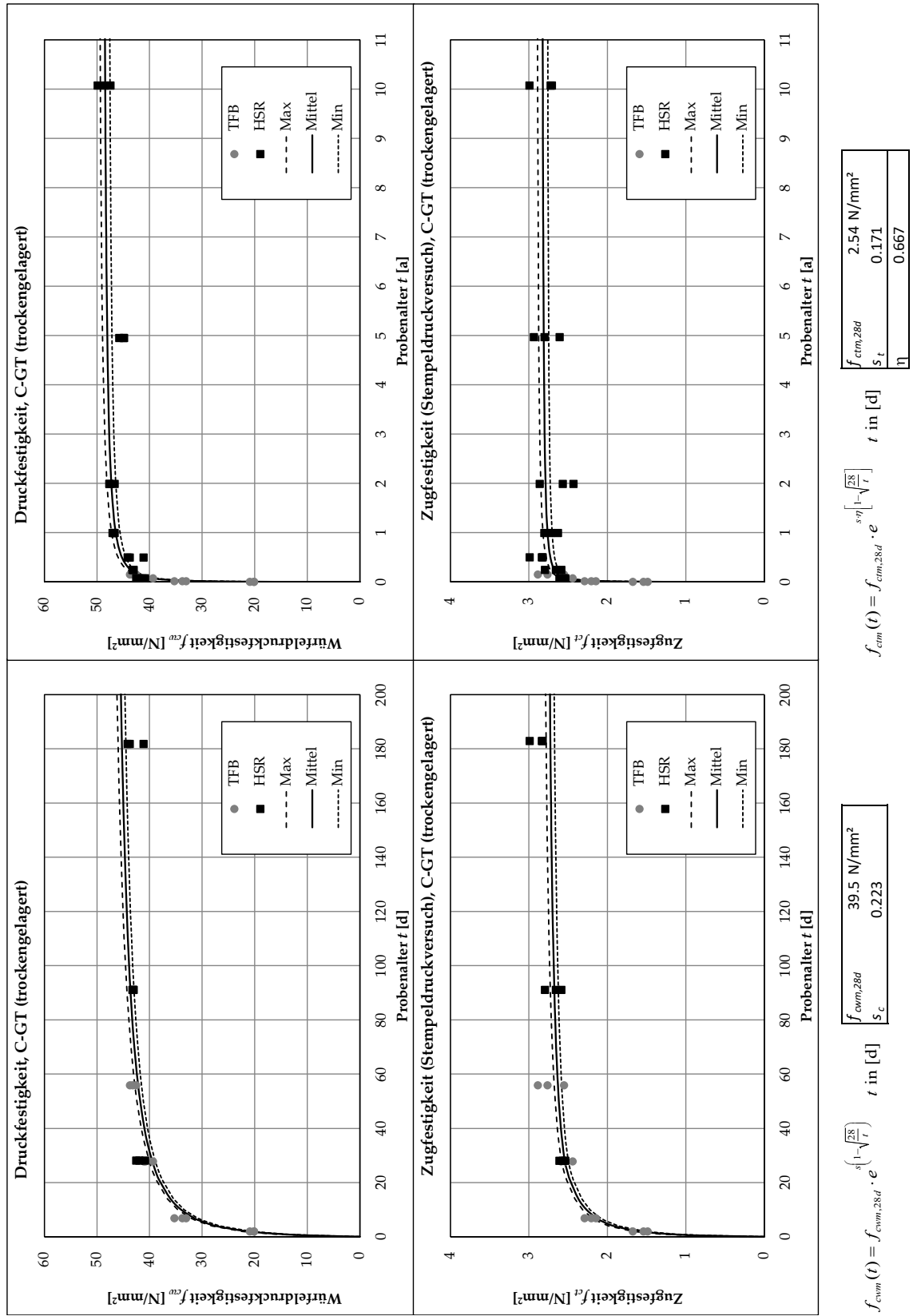


Bild A.25: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-GT.

A.2.12 Festigkeiten C-H

Druckfestigkeit		effektiv										korrigiert	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]
							L [mm]	B [mm]	H [mm]				
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.18	149.5	149.8	149.8	2'440	511.7	22.8	24.3
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.14	149.2	148.8	149.6	2'450	508.0	22.9	24.4
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.16	149.3	149.2	149.7	2'450	506.8	22.8	24.3
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	7.0	0.02	8.11	149.0	150.1	149.8	2'420	762.8	34.1	36.3
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	7.0	0.02	8.16	149.4	150.1	150.0	2'430	774.3	34.5	36.7
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	7.0	0.02	8.22	149.3	149.5	149.9	2'460	814.4	36.5	38.8
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.1	0.08	8.15	149.9	150.0	150.2	2'410	960.1	42.7	45.4
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.1	0.08	8.05	149.7	149.3	150.0	2'400	965.9	43.2	46.0
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.1	0.08	8.21	150.2	149.6	150.3	2'430	972.9	43.3	46.1
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	56.1	0.15	8.23	150.2	150.0	150.5	2'430	976.1	43.3	46.1
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	56.1	0.15	8.09	149.7	150.0	150.0	2'400	1'019.5	45.4	48.3
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	56.1	0.15	8.26	150.2	151.0	150.5	2'420	1'012.5	44.6	47.5
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.20	150.0	150.0	150.1	2'430	1'053.6	46.8	46.8
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.10	149.9	149.9	149.8	2'410	1'030.7	45.9	45.9
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.18	150.0	150.0	150.2	2'420	1'044.1	46.4	46.4
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	91.0	0.25	8.22	150.4	150.4	150.5	2'410	1'067.2	47.2	47.2
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	91.0	0.25	8.22	150.1	150.2	150.0	2'430	1'130.7	50.2	50.2
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	91.0	0.25	8.14	149.9	149.8	149.0	2'430	1'081.0	48.1	48.1
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.1	0.49	8.16	149.9	150.0	149.9	2'420	1'161.7	51.7	51.7
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.1	0.49	8.02	149.8	149.8	150.7	2'370	1'132.1	50.4	50.4
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.1	0.49	8.26	150.0	150.1	151.6	2'420	1'114.3	49.5	49.5
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.3	0.99	8.08	150.4	150.0	149.7	2'390	1'217.8	54.0	54.0
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.3	0.99	8.14	149.4	149.8	149.7	2'430	1'277.0	57.1	57.1
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.3	0.99	8.12	150.1	150.2	150.0	2'400	1'289.3	57.2	57.2
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.12	149.8	150.0	150.0	2'410	1267.0	56.4	56.4
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.18	149.9	150.1	150.1	2'420	1231.6	54.7	54.7
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.08	149.3	150.1	149.9	2'410	1231.6	55.0	55.0
120000	HSR	11.02.15	23.01.20	1807.1	4.95	8.24	150.5	150.2	150.2	2'430	1223.1	54.1	54.1
120000	HSR	11.02.15	23.01.20	1807.1	4.95	8.14	150.1	149.9	149.9	2'410	1186.5	52.7	52.7
120000	HSR	11.02.15	23.01.20	1807.1	4.95	8.18	150.1	150.1	150.1	2'420	1229.5	54.6	54.6
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.2	10.07	8.22	150.0	150.0	150.1	2'430	1'296.1	57.6	57.6
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.2	10.07	8.25	149.8	150.1	150.2	2'440	1'288.8	57.3	57.3
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.2	10.07	8.25	150.6	150.2	150.1	2'430	1'323.9	58.5	58.5

Tabelle A.23: Würfeldruckfestigkeiten C-H.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen L [mm] B [mm] H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm] h [mm] 2a [mm]	
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.16	149.0 150.0 150.0	2'440	67.5	1.6	1.6	149.5 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.12	150.0 150.0 150.0	2'410	73.9	1.8	1.7	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.20	150.0 150.0 150.0	2'430	64.7	1.6	1.5	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	7.0	0.02	8.20	150.0 150.0 150.0	2'430	98.6	2.4	2.3	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	7.0	0.02	8.13	150.0 150.0 150.0	2'410	97.3	2.4	2.3	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	7.0	0.02	8.18	150.0 151.0 150.0	2'410	102.5	2.5	2.4	150.5 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.1	0.08	8.13	150.0 150.0 150.0	2'410	111.8	2.7	2.6	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.1	0.08	8.16	150.0 151.0 150.0	2'400	120.6	2.9	2.8	150.5 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.1	0.08	8.15	150.0 151.0 150.0	2'400	121.8	2.9	2.8	150.5 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	56.1	0.15	8.18	150.0 150.0 150.0	2'420	126.8	3.1	2.9	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	56.1	0.15	8.18	150.0 150.0 150.0	2'420	126.9	3.1	2.9	150.0 150.0 37.5	
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	56.1	0.15	8.18	150.0 150.0 150.0	2'420	125.8	3.0	2.9	150.0 150.0 37.5	
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.10	149.9 149.9 149.0	2'420	113.2	2.8	2.8	149.9 149.0 37.5	
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.10	149.7 149.7 149.3	2'420	110.1	2.7	2.7	149.7 149.3 37.5	
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	7.98	149.6 149.7 148.6	2'400	130.0	3.2	3.2	149.7 148.6 37.5	
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	91.1	0.25	8.22	149.9 150.2 151.0	2'420	125.3	3.0	3.0	150.1 151.0 37.5	
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	91.1	0.25	8.14	150.2 149.9 149.5	2'420	125.2	3.0	3.0	150.1 149.5 37.5	
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	91.1	0.25	8.24	150.0 150.0 150.0	2'440	109.7	2.7	2.7	150.0 150.0 37.5	
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.3	0.49	8.18	150.2 150.1 150.5	2'410	136.9	3.3	3.3	150.2 150.5 37.5	
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.3	0.49	8.16	150.0 150.0 151.3	2'400	136.4	3.3	3.3	150.0 151.3 37.5	
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.3	0.49	8.14	149.7 149.8 149.0	2'440	135.9	3.3	3.3	149.8 149.0 37.5	
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.3	0.99	8.16	150.0 149.7 149.6	2'430	159.6	3.9	3.9	149.9 149.6 37.5	
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.3	0.99	8.18	149.3 150.1 150.1	2'430	160.0	3.9	3.9	149.7 150.1 37.5	
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.3	0.99	8.02	150.3 149.7 149.7	2'380	144.3	3.5	3.5	150.0 149.7 37.5	
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.10	150.1 150.0 149.9	2'400	155.6	3.8	3.8	150.1 149.9 37.5	
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.14	149.8 149.8 149.8	2'420	157.7	3.8	3.8	149.8 149.8 37.5	
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.12	149.7 150.1 150.1	2'410	160.1	3.9	3.9	149.9 150.1 37.5	
120000	HSR	11.02.15	28.01.20	1812.3	4.97	8.18	149.4 150.2 149.8	2'430	155.9	3.8	3.8	149.8 149.8 37.5	
120000	HSR	11.02.15	28.01.20	1812.3	4.97	8.12	148.3 149.8 149.8	2'440	146.1	3.6	3.6	149.1 149.8 37.5	
120000	HSR	11.02.15	28.01.20	1812.3	4.97	8.18	148.5 149.9 149.9	2'450	158.4	3.9	3.9	149.2 149.9 37.5	
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.3	10.07	8.15	149.6 149.8 149.8	2'430	143.4	3.5	3.5	149.7 149.8 37.5	
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.3	10.07	8.16	150.6 150.0 150.0	2'410	158.6	3.8	3.8	150.3 150.0 37.5	
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.3	10.07	8.21	149.0 150.2 150.3	2'440	138.2	3.3	3.3	149.6 150.3 37.5	

Tabelle A.24: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-H.

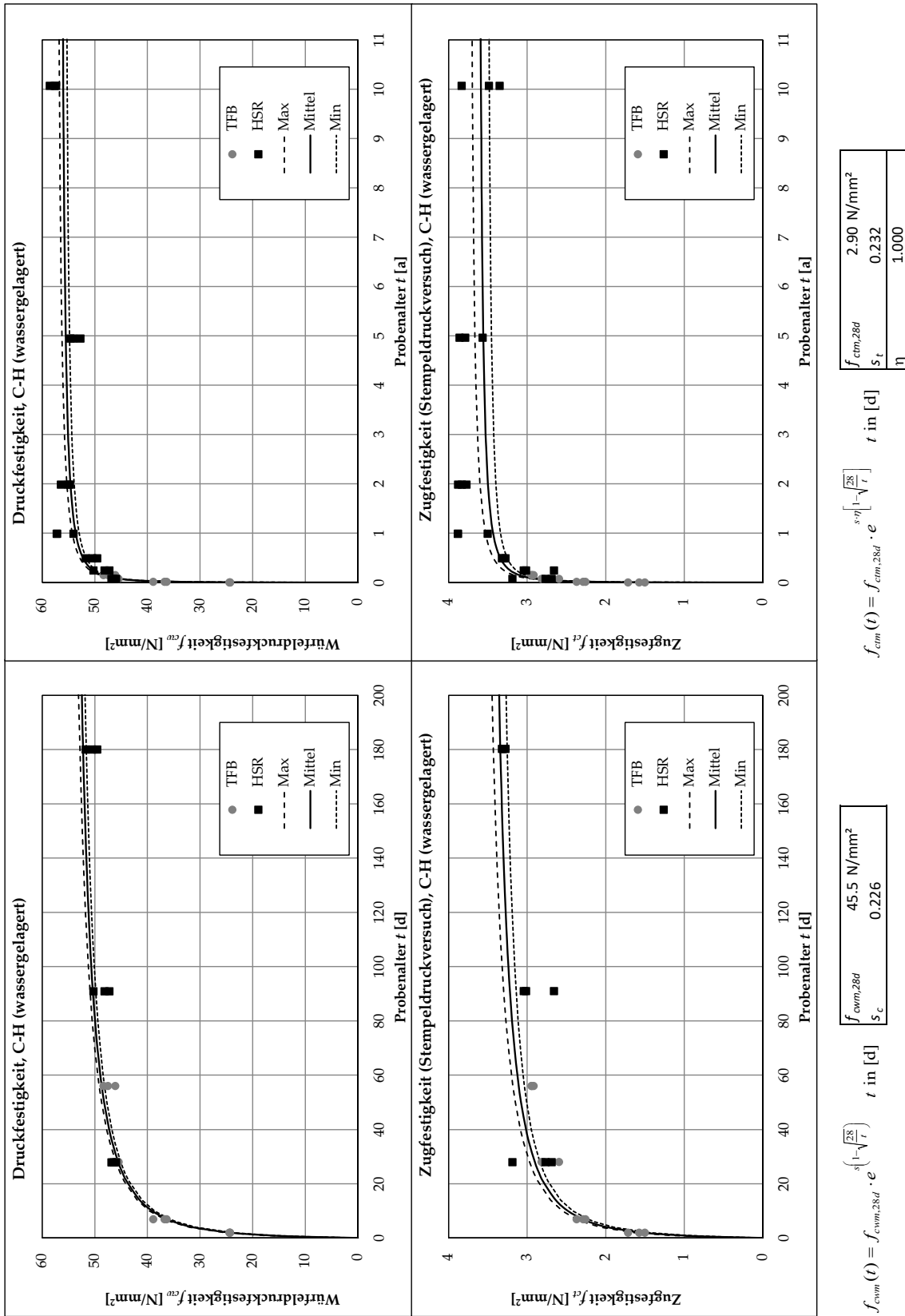


Bild A.26: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-H.

A.2.13 Festigkeiten C-I

Druckfestigkeit		effektiv										korrigiert	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]
							L [mm]	B [mm]	H [mm]				
100000	TFB	23.02.15	25.02.15	2.0	0.01	8.10	149.3	148.9	149.8	2'430	277.9	12.5	12.1
100000	TFB	23.02.15	25.02.15	2.0	0.01	8.11	149.0	149.3	149.6	2'440	272.4	12.2	11.8
100000	TFB	23.02.15	25.02.15	2.0	0.01	8.03	149.4	148.9	149.7	2'410	261.9	11.8	11.4
100000	TFB	23.02.15	02.03.15	7.0	0.02	8.25	149.9	150.1	150.0	2'450	782.4	34.8	33.7
100000	TFB	23.02.15	02.03.15	7.0	0.02	8.19	149.9	149.5	150.0	2'440	743.9	33.2	32.1
100000	TFB	23.02.15	02.03.15	7.0	0.02	8.15	149.6	148.4	149.8	2'450	759.6	34.2	33.1
100000	TFB	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.29	149.7	150.9	149.9	2'450	1'145.8	50.7	49.1
100000	TFB	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.09	149.7	148.8	149.8	2'420	1'195.5	53.7	52.0
100000	TFB	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.04	150.1	148.9	150.1	2'400	1'112.4	49.8	48.2
100000	TFB	23.02.15	20.04.15	56.1	0.15	8.11	149.7	148.7	150.1	2'430	1'262.4	56.7	54.9
100000	TFB	23.02.15	20.04.15	56.1	0.15	8.23	149.8	149.6	150.1	2'450	1'249.4	55.8	54.0
100000	TFB	23.02.15	20.04.15	56.1	0.15	8.07	149.6	148.8	149.9	2'420	1'251.2	56.2	54.4
120000	HSR	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.22	150.3	150.1	150.0	2'430	1'132.9	50.2	50.2
120000	HSR	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.30	150.4	150.3	152.5	2'410	1'135.6	50.2	50.2
120000	HSR	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.02	149.8	149.6	149.8	2'390	1'087.9	48.5	48.5
120000	HSR	23.02.15	26.05.15	92.2	0.25	8.14	150.0	149.8	148.8	2'430	1'461.2	65.0	65.0
120000	HSR	23.02.15	26.05.15	92.2	0.25	8.12	149.9	149.9	148.8	2'430	1'375.6	61.2	61.2
120000	HSR	23.02.15	26.05.15	92.2	0.25	8.18	150.0	149.8	150.8	2'410	1'375.8	61.2	61.2
120000	HSR	23.02.15	10.08.15	168.1	0.46	8.16	149.8	149.7	149.4	2'440	1'513.9	67.5	67.5
120000	HSR	23.02.15	10.08.15	168.1	0.46	8.18	149.8	149.9	151.0	2'410	1'496.8	66.7	66.7
120000	HSR	23.02.15	10.08.15	168.1	0.46	8.04	150.0	150.0	149.0	2'400	1'474.6	65.5	65.5
120000	HSR	23.02.15	09.02.16	351.0	0.96	8.12	150.4	149.9	149.8	2'400	1'618.6	71.8	71.8
120000	HSR	23.02.15	09.02.16	351.0	0.96	8.12	147.8	149.7	149.8	2'450	1'532.3	69.3	69.3
120000	HSR	23.02.15	09.02.16	351.0	0.96	8.12	151.4	150.2	149.8	2'380	1'536.9	67.6	67.6
120000	HSR	23.02.15	06.02.17	714.3	1.96	8.12	151.5	150.0	150.0	2'380	1'734.3	76.3	76.3
120000	HSR	23.02.15	06.02.17	714.3	1.96	8.16	149.3	150.1	150.1	2'430	1'723.0	76.9	76.9
120000	HSR	23.02.15	06.02.17	714.3	1.96	8.12	149.7	150.0	149.9	2'410	1'647.5	73.4	73.4
120000	HSR	23.02.15	30.01.20	1802.3	4.94	8.22	150.6	150.1	150.2	2'420	1'746.2	77.2	77.2
120000	HSR	23.02.15	30.01.20	1802.3	4.94	8.10	151.2	149.8	150.1	2'380	1'635.7	72.2	72.2
120000	HSR	23.02.15	30.01.20	1802.3	4.94	8.18	148.0	150.0	150.0	2'460	1'765.3	79.5	79.5
120000	HSR	23.02.15	06.03.25	3664.2	10.04	8.12	150.0	149.9	149.9	2'410	1'704.6	75.8	75.8
120000	HSR	23.02.15	06.03.25	3664.2	10.04	8.01	150.0	150.0	150.1	2'370	1'759.9	78.2	78.2
120000	HSR	23.02.15	06.03.25	3664.2	10.04	7.99	148.1	150.2	150.1	2'390	1'775.3	79.8	79.8

Tabelle A.25: Würfeldruckfestigkeiten C-I.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)										effektiv		korrigiert				
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelmessungen L [mm]	B [mm]	H [mm]	Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{ct,SZ}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{ct,SZ}$ [N/mm ²]	Zylinder / Stempel 2b [mm]	h [mm]	2a [mm]
100000	TFB	23.02.15	25.02.15	2.0	0.01	8.11	149.0	150.0	150.0	2'420	36.6	0.9	0.8	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	25.02.15	2.0	0.01	8.18	151.0	151.0	150.0	2'390	42.6	1.0	0.9	151.0	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	25.02.15	2.0	0.01	8.18	150.0	151.0	150.0	2'410	40.0	1.0	0.9	150.5	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	02.03.15	7.0	0.02	8.26	150.0	150.0	150.0	2'450	86.6	2.1	1.9	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	02.03.15	7.0	0.02	8.15	150.0	150.0	151.0	2'400	94.9	2.3	2.0	150.0	151.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	02.03.15	7.0	0.02	8.18	150.0	149.0	150.0	2'440	84.9	2.1	1.8	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.15	150.0	150.0	150.0	2'410	129.1	3.1	2.8	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.17	150.0	149.0	150.0	2'440	132.2	3.2	2.8	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.16	150.0	150.0	150.0	2'420	119.4	2.9	2.6	150.0	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	20.04.15	56.1	0.15	8.12	150.0	149.0	150.0	2'420	146.1	3.5	3.1	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	20.04.15	56.1	0.15	8.22	150.0	149.0	150.0	2'450	145.0	3.5	3.1	149.5	150.0	37.5
100000	TFB	23.02.15	20.04.15	56.1	0.15	8.21	150.0	150.0	150.0	2'430	145.1	3.5	3.1	150.0	150.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.18	149.9	150.0	150.0	2'430	109.0	2.6	2.6	150.0	150.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.22	150.0	150.0	150.8	2'420	98.7	2.4	2.4	150.0	150.8	37.5
120000	HSR	23.02.15	23.03.15	28.1	0.08	8.10	149.8	149.8	149.5	2'410	121.8	3.0	3.0	149.8	149.5	37.5
120000	HSR	23.02.15	26.05.15	92.3	0.25	8.22	150.0	150.0	149.8	2'440	144.9	3.5	3.5	150.0	149.8	37.5
120000	HSR	23.02.15	26.05.15	92.3	0.25	8.04	150.1	150.0	148.2	2'410	154.6	3.8	3.8	150.1	148.2	37.5
120000	HSR	23.02.15	26.05.15	92.3	0.25	8.10	150.0	150.0	149.6	2'410	158.1	3.8	3.8	150.0	149.6	37.5
120000	HSR	23.02.15	10.08.15	168.2	0.46	8.18	150.1	150.0	150.0	2'420	144.5	3.5	3.5	150.1	150.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	10.08.15	168.2	0.46	8.20	150.2	150.0	149.0	2'440	157.5	3.8	3.8	150.1	149.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	10.08.15	168.2	0.46	8.24	150.1	150.0	149.0	2'460	150.3	3.7	3.7	150.1	149.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	09.02.16	351.0	0.96	8.16	148.7	150.0	150.0	2'440	152.9	3.7	3.7	149.4	150.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	09.02.16	351.0	0.96	8.12	149.5	150.0	150.1	2'410	154.9	3.8	3.8	149.8	150.1	37.5
120000	HSR	23.02.15	09.02.16	351.0	0.96	8.14	151.7	149.8	149.9	2'390	162.1	3.9	3.9	150.8	149.9	37.5
120000	HSR	23.02.15	06.02.17	714.2	1.96	8.30	151.8	150.6	150.5	2'410	161.8	3.9	3.9	151.2	150.5	37.5
120000	HSR	23.02.15	06.02.17	714.2	1.96	8.12	150.3	150.3	150.2	2'390	172.5	4.2	4.2	150.3	150.2	37.5
120000	HSR	23.02.15	06.02.17	714.2	1.96	8.22	149.5	150.1	150.1	2'440	171.6	4.2	4.2	149.8	150.1	37.5
120000	HSR	23.02.15	30.01.20	1802.3	4.94	8.16	150.3	150.1	150.1	2'410	159.7	3.9	3.9	150.2	150.1	37.5
120000	HSR	23.02.15	30.01.20	1802.3	4.94	8.04	151.2	150.0	150.0	2'360	158.3	3.8	3.8	150.6	150.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	30.01.20	1802.3	4.94	8.16	150.0	150.1	150.1	2'410	165.5	4.0	4.0	150.1	150.1	37.5
120000	HSR	23.02.15	06.03.25	3664.3	10.04	8.02	150.3	150.1	150.0	2'370	171.9	4.2	4.2	150.2	150.0	37.5
120000	HSR	23.02.15	06.03.25	3664.3	10.04	8.12	151.0	150.1	150.2	2'390	177.5	4.3	4.3	150.6	150.2	37.5
120000	HSR	23.02.15	06.03.25	3664.3	10.04	8.18	150.6	150.0	150.1	2'410	159.8	3.9	3.9	150.3	150.1	37.5

Tabelle A.26: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-I.

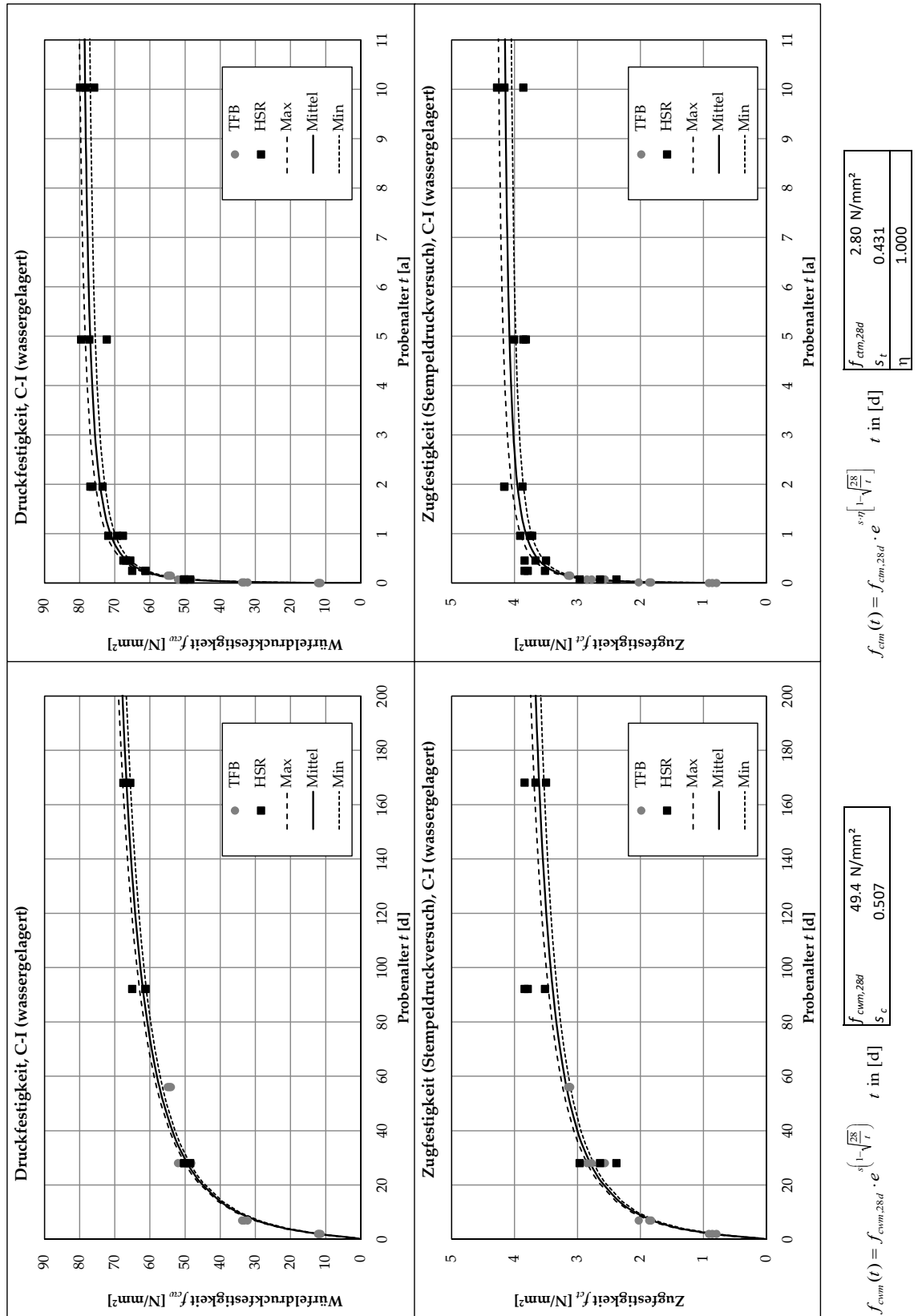


Bild A.27: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-I.

A.2.14 Festigkeiten C-K

Druckfestigkeit		Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit f_{cwm} [N/mm ²]	effektiv	korrigiert
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt						L [mm]	B [mm]	H [mm]			f_{cwm} [N/mm ²]	f_{cwm} [N/mm ²]	
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.20	149.6	148.6	150.1	2'460	547.2	24.6	23.3	
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.23	149.1	149.9	149.6	2'460	524.0	23.4	22.1	
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.10	149.1	148.5	149.6	2'450	541.3	24.4	23.1	
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	6.9	0.02	8.12	149.3	149.0	149.7	2'440	835.9	37.6	35.6	
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	6.9	0.02	8.21	149.0	149.2	149.6	2'470	904.9	40.7	38.5	
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	6.9	0.02	8.26	149.4	148.8	150.0	2'480	881.5	39.7	37.5	
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.19	149.7	149.2	149.9	2'450	1'047.9	46.9	44.4	
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.28	149.9	150.1	150.0	2'450	1'065.3	47.3	44.7	
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.24	150.6	149.7	150.3	2'430	1'031.8	45.8	43.3	
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	55.9	0.15	8.39	150.3	151.4	150.6	2'450	1'123.5	49.4	46.7	
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	55.9	0.15	8.25	150.2	149.5	150.5	2'440	1'132.0	50.4	47.7	
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	55.9	0.15	8.36	150.1	150.4	150.4	2'460	1'198.1	53.1	50.2	
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	27.9	0.08	8.12	150.1	150.1	149.3	2'410	1'088.0	48.3	48.3	
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	27.9	0.08	8.16	149.8	149.9	148.9	2'440	1'055.5	47.0	47.0	
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	27.9	0.08	8.06	149.9	149.8	148.5	2'420	1'047.8	46.7	46.7	
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	90.9	0.25	8.24	150.3	150.2	150.0	2'430	1'143.8	50.7	50.7	
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	90.9	0.25	8.24	150.3	150.4	149.8	2'430	1'088.6	48.2	48.2	
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	90.9	0.25	8.18	150.3	150.2	149.9	2'420	1'201.7	53.2	53.2	
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.0	0.49	8.04	149.7	150.0	150.0	2'390	1'275.2	56.8	56.8	
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.0	0.49	8.26	150.2	150.3	149.6	2'450	1'143.8	50.7	50.7	
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.0	0.49	8.18	150.0	149.8	149.8	2'430	1'253.6	55.8	55.8	
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.2	0.99	8.24	149.3	150.0	150.0	2'450	1'419.8	63.4	63.4	
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.2	0.99	8.02	147.7	149.7	149.7	2'420	1'397.2	63.2	63.2	
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.2	0.99	8.12	149.1	150.0	150.2	2'420	1'386.7	62.0	62.0	
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.16	150.6	150.0	150.0	2'410	1477.1	65.4	65.4	
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.26	149.8	150.2	150.2	2'440	1385.2	61.6	61.6	
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.20	149.6	149.9	150.0	2'440	1435.1	64.0	64.0	
120000	HSR	11.02.15	23.01.20	1807.0	4.95	8.10	149.0	150.0	150.0	2'420	1430.0	64.0	64.0	
120000	HSR	11.02.15	23.01.20	1807.0	4.95	8.16	148.3	150.1	150.1	2'440	1429.4	64.2	64.2	
120000	HSR	11.02.15	23.01.20	1807.0	4.95	8.18	149.2	149.8	149.8	2'440	1490.7	66.7	66.7	
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.1	10.07	8.22	149.8	150.1	150.1	2'440	1'484.1	66.0	66.0	
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.1	10.07	8.11	148.6	149.8	149.7	2'430	1'490.3	66.9	66.9	
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.1	10.07	8.29	149.2	150.3	150.4	2'460	1'572.4	70.1	70.1	

Tabelle A.27: Würfeldruckfestigkeiten C-K.

Zugfestigkeit (Stempeldruckversuch)		effektiv										korrigiert	
Versuch Lauf-Nr.	Prüf- Anstalt	Betonier- datum	Prüf- datum	Alter t [d]	Alter t [a]	Masse m [kg]	Würfelabmessungen			Rohdichte ρ_{roh} [kg/m ³]	Bruchlast $F_{u,cube}$ [kN]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]	Festigkeit $f_{c,sz}$ [N/mm ²]
							L [mm]	B [mm]	H [mm]				
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.10	149.0	150.0	150.0	2'420	81.1	2.0	1.8
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.12	149.0	150.0	150.0	2'420	78.3	1.9	1.7
100000	TFB	11.02.15	13.02.15	2.0	0.01	8.14	150.0	150.0	150.0	2'410	79.0	1.9	1.7
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	6.9	0.02	8.24	150.0	150.0	150.0	2'440	101.3	2.5	2.2
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	6.9	0.02	8.22	149.0	150.0	151.0	2'430	105.7	2.6	2.3
100000	TFB	11.02.15	18.02.15	6.9	0.02	8.19	149.0	149.0	150.0	2'460	96.3	2.3	2.1
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.20	150.0	149.0	150.0	2'450	107.5	2.6	2.3
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.36	150.0	151.0	150.0	2'460	123.9	3.0	2.7
100000	TFB	11.02.15	11.03.15	28.0	0.08	8.39	150.0	152.0	151.0	2'440	112.3	2.7	2.4
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	55.9	0.15	8.19	150.0	149.0	150.0	2'440	124.9	3.0	2.7
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	55.9	0.15	8.17	150.0	149.0	150.0	2'440	126.5	3.1	2.7
100000	TFB	11.02.15	08.04.15	55.9	0.15	8.17	150.0	149.0	150.0	2'440	121.4	2.9	2.6
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	27.9	0.08	8.16	149.9	149.8	149.6	2'430	108.9	2.6	2.6
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	27.9	0.08	8.20	150.3	150.1	150.6	2'410	119.2	2.9	2.9
120000	HSR	11.02.15	11.03.15	27.9	0.08	8.18	149.9	149.8	150.3	2'420	114.9	2.8	2.8
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	90.9	0.25	8.16	150.2	150.2	149.0	2'430	121.5	3.0	3.0
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	90.9	0.25	8.26	150.3	150.2	149.5	2'450	115.5	2.8	2.8
120000	HSR	11.02.15	13.05.15	90.9	0.25	8.22	150.1	150.1	149.7	2'440	110.0	2.7	2.7
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.2	0.49	8.24	150.2	150.2	150.3	2'430	127.1	3.1	3.1
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.2	0.49	8.18	149.9	150.0	149.0	2'440	124.4	3.0	3.0
120000	HSR	11.02.15	10.08.15	180.2	0.49	8.24	150.0	150.0	150.5	2'430	124.3	3.0	3.0
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.2	0.99	8.10	147.7	150.0	150.2	2'430	164.5	4.0	4.0
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.2	0.99	8.14	149.7	150.0	150.0	2'420	138.9	3.4	3.4
120000	HSR	11.02.15	08.02.16	362.2	0.99	8.10	147.5	150.3	150.3	2'430	152.7	3.7	3.7
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.14	150.0	150.1	150.0	2'410	151.7	3.7	3.7
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.08	148.7	150.0	150.1	2'410	149.8	3.6	3.6
120000	HSR	11.02.15	06.02.17	726.1	1.99	8.12	148.9	150.0	150.1	2'420	154.5	3.8	3.8
120000	HSR	11.02.15	30.01.20	1813.9	4.97	8.28	151.4	150.1	149.8	2'430	174.3	4.2	4.2
120000	HSR	11.02.15	30.01.20	1813.9	4.97	8.16	150.1	149.8	149.9	2'420	173.9	4.2	4.2
120000	HSR	11.02.15	30.01.20	1813.9	4.97	8.20	149.6	150.4	150.5	2'420	170.9	4.1	4.1
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.2	10.07	8.18	150.3	149.8	149.8	2'430	167.5	4.1	4.1
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.2	10.07	8.23	149.2	149.9	150.0	2'450	177.3	4.3	4.3
120000	HSR	11.02.15	06.03.25	3676.2	10.07	8.21	149.3	150.2	150.2	2'440	174.5	4.2	4.2

Tabelle A.28: Double-Punch-Zugfestigkeiten C-K.

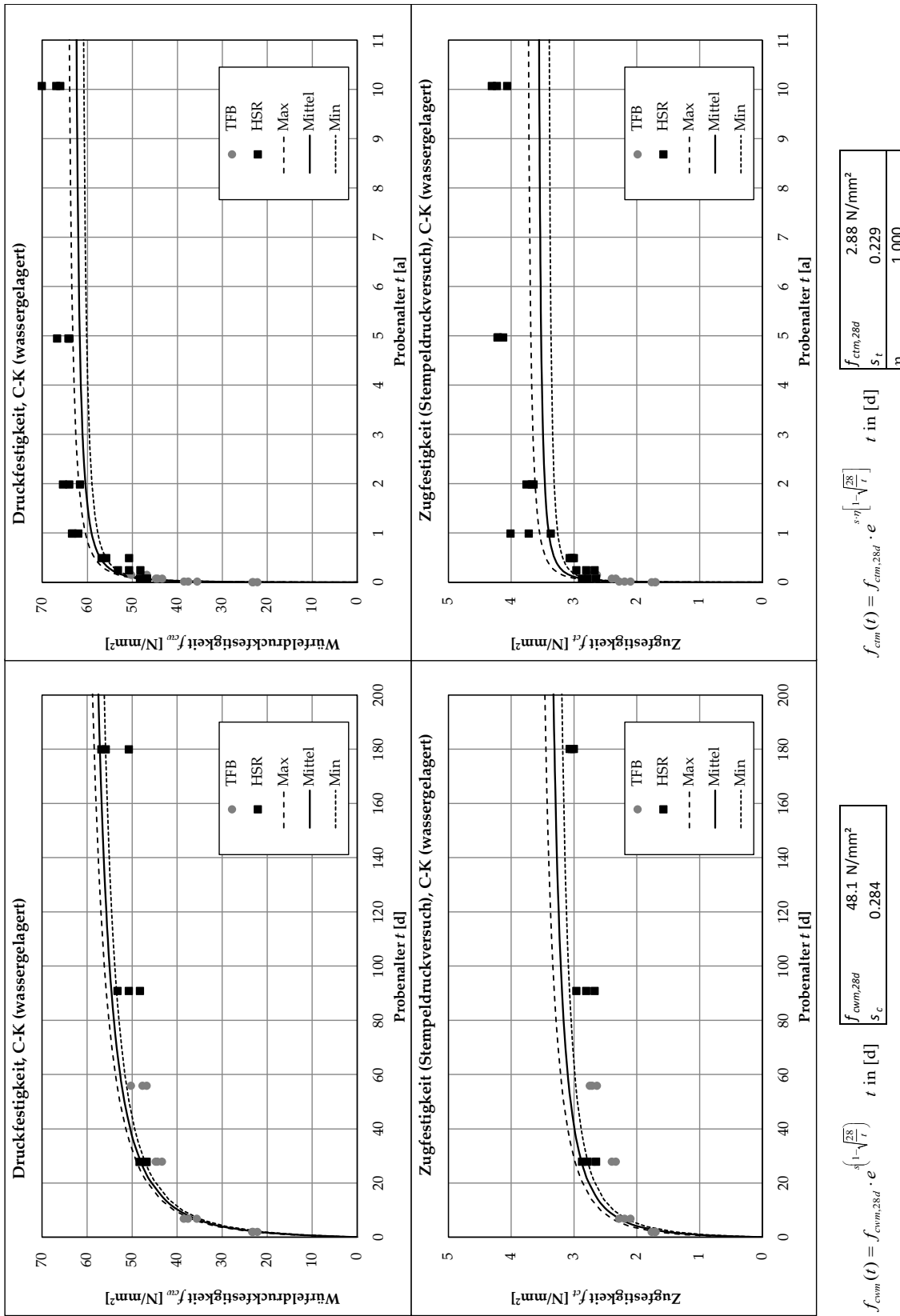


Bild A.28: Zeitliche Entwicklung der Druck- und Zugfestigkeiten C-K.

A.3 Karbonatisierungstiefen

A.3.1 Karbonatisierungstiefen A-BT

0.5	0.5	0.5	0.5
0.3			0.2
0.3	28 Tage		0.2
0.3	$d_{KM} = 0.30$ COV 42%		0.2
0.3			0.2
0.2	0.2	0.2	0.2
2.7			1.7
2.9	92Tage		2.1
3.1	$d_{KM} = 2.42$ COV 21%		2.1
2.7			2.1
4.8			3.3
4.8	173 Tage		3.3
4.9	$d_{KM} = 4.03$ COV 16%		3.6
4.7			3.5
4.6	3.9	3.6	3.4

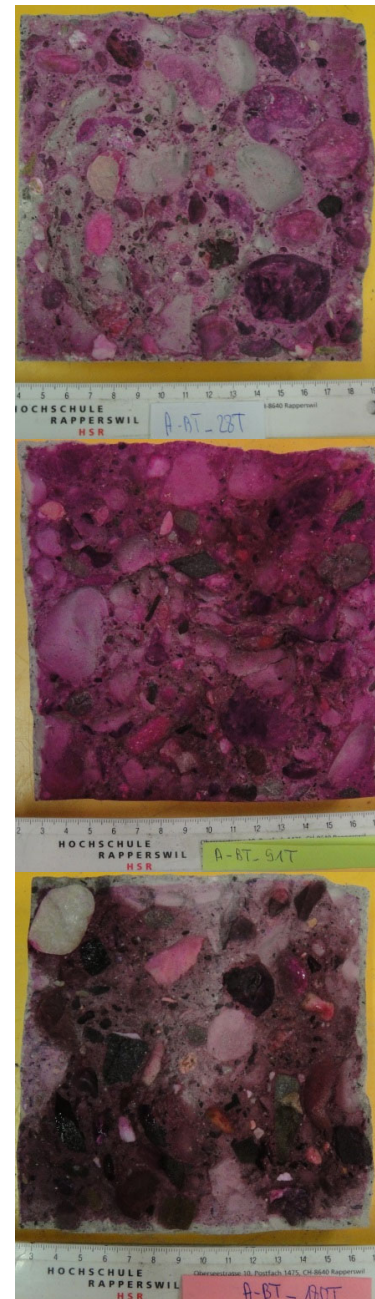


Bild A.29: Karbonatisierungstiefen A-BT, Teil 1.

7.7	6.5	6.3	6.2
7.2			6.4
7.4	356 Tage		5.8
7.4	$d_{KM} = 6.78$ COV 9%		5.9
7.7			6.1
6.6	7.3	7.2	6.7
8.4	8.0	8.3	10
8.6			9.5
7.6	719 Tage		9.5
8.6	$d_{KM} = 8.24$ COV 17%		9.5
8.8			10
5.8	6.2	6.5	6.5
18	16	13	16
17			18
17	1800 Tage		14
13	$d_{KM} = 14.9$ COV 15%		13
16			11
12	12	16	16
21	19	19	21
23			19
23	3669 Tage		19
23	$d_{KM} = 19.8$ COV 10%		19
23			19
18	18	18.2	18

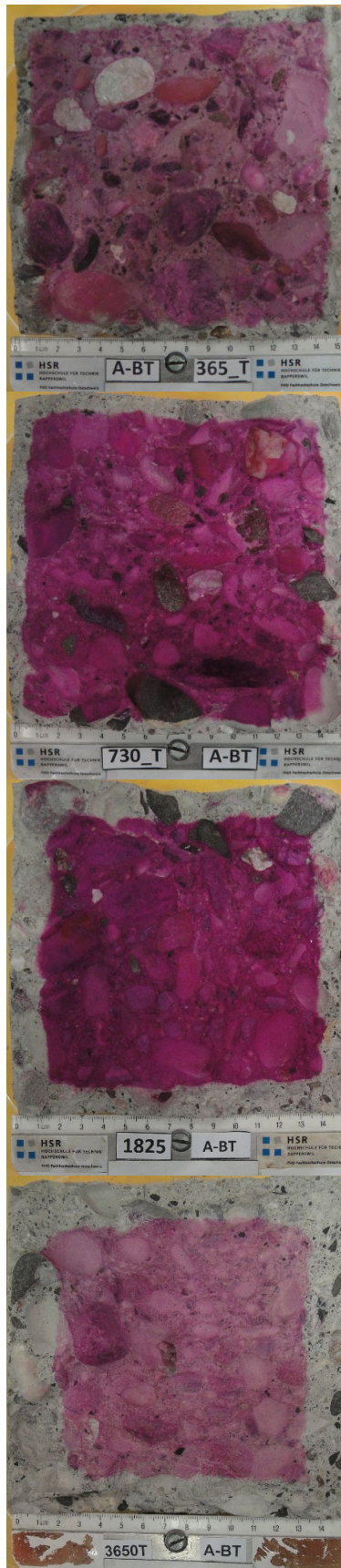


Bild A.30: Karbonatisierungstiefen A-BT, Teil 2.

A.3.2 Karbonatisierungstiefen A-CT

0.6	0.4	0.5	0.6
0.7			0.4
0.7	28 Tage		0.5
0.8	$d_{KM} = 0.61$ COV 24%		0.4
0.7			0.5
0.7	0.8	0.7	0.8
2.2	2.6	2.6	2.6
2.3			2.7
2.3	91 Tage		2.9
2.3	$d_{KM} = 2.38$ COV 15%		2.9
2.3			2.8
1.9	1.9	1.9	1.9
5.3	5.9	5.6	6.6
5.2			5.7
5.6	196 Tage		5.8
5.8	$d_{KM} = 5.58$ COV 9%		5.0
6.2			5.0
5.7	4.9	4.9	6.0

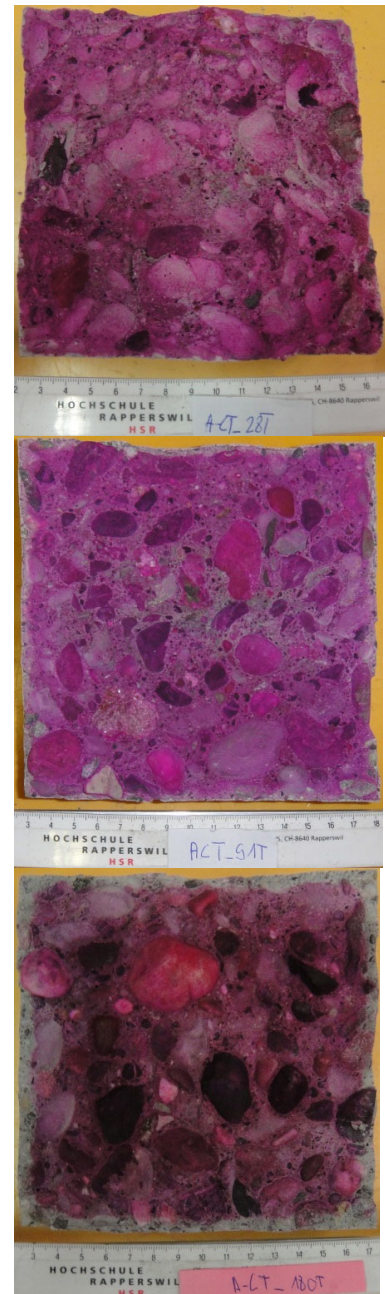


Bild A.31: Karbonatisierungstiefen A-CT, Teil 1.

A.3 Karbonatisierungstiefen

6.6	6.7	6.7	7.3		
8.3				7.1	
10	378Tage			8.7	
11	$d_{KM} = 8.83$ COV 19%			8.8	
12				8.9	
9.6	9.6	9.6	9.9		
8.7	8.0	6.8	10		
8.4				11	
9.2	736 Tage			10	
9.4	$d_{KM} = 10.1$ COV 17%			10	
9.4				11	
13	14	12	12		
20	21	21	18		
16				22	
19	1823 Tage			22	
19	$d_{KM} = 19.9$ COV 9%			22	
17				19	
19	19	22	22		
21	21	21	21		
22				22	
22	3673 Tage			22	
22	$d_{KM} = 22.0$ COV 4%			23	
22				24	
22	22	22	22		

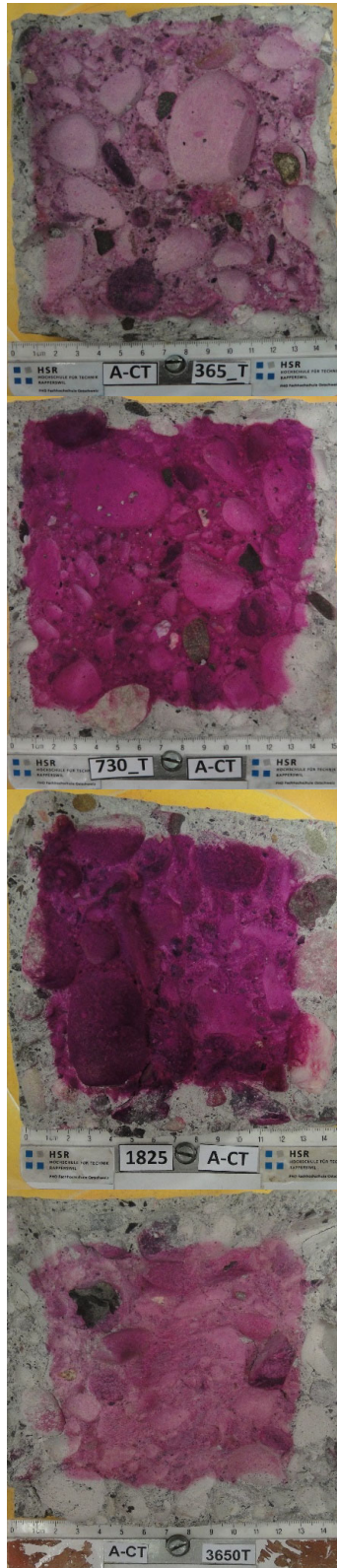


Bild A.32: Karbonatisierungstiefen A-CT, Teil 2.

A.3.3 Karbonatisierungstiefen C-FT

0.9	0.9	1.0	1.0
1.1			
1.0	28 Tage		
0.9	$d_{KM} = 0.98$		
1.0	COV 7%		
1.0	1.5	1.1	1.7
0.8			1.4
0.9	91 Tage		1.4
0.8	$d_{KM} = 1.11$		1.5
0.8	COV 27%		1.1
1.0	0.9	1.0	0.9
3.4	3.4	3.3	3.0
3.2			3.0
3.2	188 Tage		3.0
3.2	$d_{KM} = 3.34$		3.0
3.5	COV 10%		3.0
3.6	3.6	4.1	4.0



Bild A.33: Karbonatisierungstiefen C-FT, Teil 1.

A.3 Karbonatisierungstiefen

5.5	6.2	7.2	9.1
4.6			11
3.9	369 Tage		9.2
5.2	$d_{KM} = 6.24$ COV 33%		8.4
5.2			6.3
3.7	4.9	5.1	4.8
9.8	8.6	8.1	10
8.8			9.2
7.5	728 Tage		6.5
7.5	$d_{KM} = 8.12$ COV 14%		6.5
7.5			7.3
7.5	7.5	7.5	10
11	10	11	10
11			11
13	1819 Tage		9.9
11	$d_{KM} = 10.3$ COV 10%		11
11			11
9.8	9.6	8.4	8.6
15	15	15	15
16			14
16	3664 Tage		14
16	$d_{KM} = 14.4$ COV 9%		14
16			14
13	13	12	12

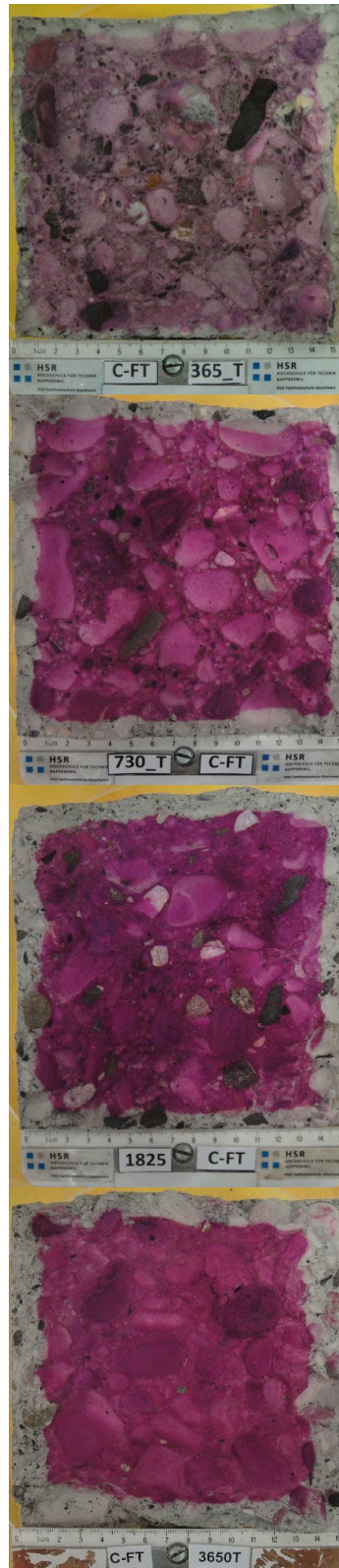


Bild A.34: Karbonatisierungstiefen C-FT, Teil 2.

A.3.4 Karbonatisierungstiefen C-GT

0.9	0.7	0.8	0.9
0.8			0.9
0.9	28 Tage		0.8
0.9	$d_{KM} = 0.77$		0.7
	COV 15%		
0.8			0.7
0.5	0.6	0.7	0.7
2.9	2.9	3.1	2.7
1.0			2.6
1.2	91 Tage		2.2
1.2	$d_{KM} = 1.96$		2.2
	COV 40%		
1.0			2.1
1.5	0.9		
3.1	3.0	4.2	4.2
3.8			3.9
3.8	182 Tage		3.4
3.8	$d_{KM} = 3.95$		4.5
	COV 12%		
3.9			4.5
4.0	4.2	4.4	4.5



Bild A.35: Karbonatisierungstiefen C-GT, Teil 1.

3.3	3.1	2.5	2.7
4.8			5.3
4.8	364 Tage		5.3
5.0	$d_{KM} = 4.37$ COV 25%		5.0
3.8			6.1
3.8	4.7	5.8	3.9
13	13	10	8.4
11			12
8.9	728 Tage		9.3
9.8	$d_{KM} = 9.64$ COV 18%		9.0
9.8			7.4
10	7.0	8.8	7.4
20	20	17	13
19			12
18	1809 Tage		12
19	$d_{KM} = 15.3$ COV 24%		11
15			9.5
17	20	11	14
23	23	20	20
23			20
23	3678 Tage		20
23	$d_{KM} = 20.9$ COV 8%		20
23			20
19	19	19	19



Bild A.36: Karbonatisierungstiefen C-GT, Teil 2.

A.3.5 Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefe

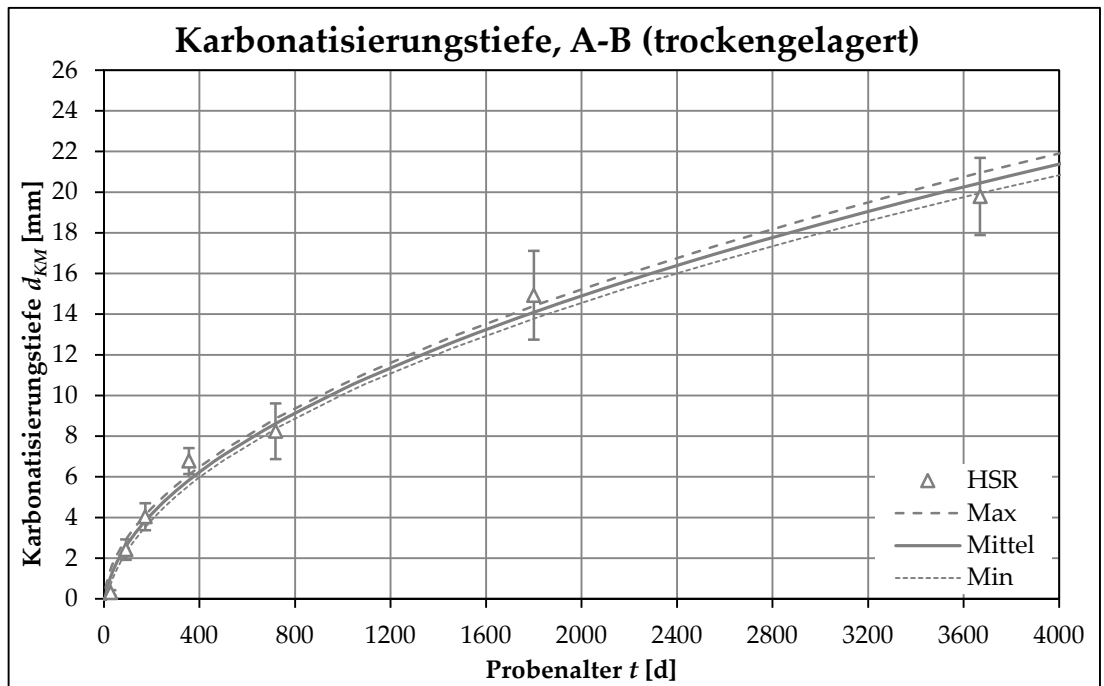


Bild A.37: Karbonatisierungstiefen A-BT; inkl. 95%/5%–Konfidenzintervallen und Fehlerbalken.

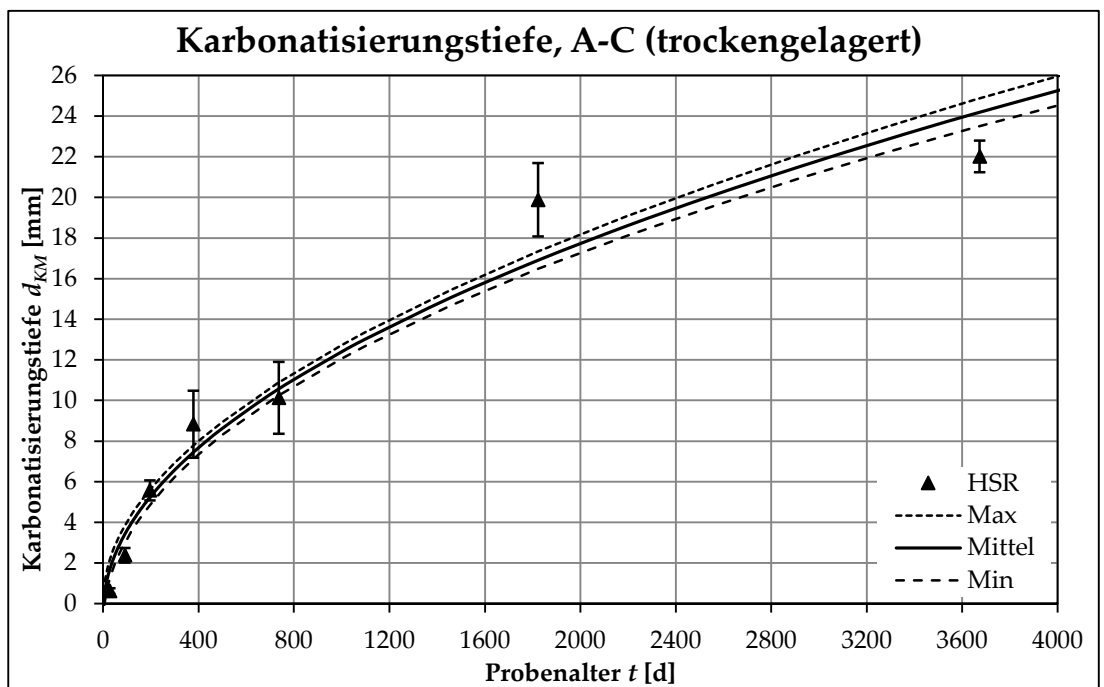


Bild A.38: Karbonatisierungstiefen der A-CT; inkl. 95%/5%–Konfidenzintervallen und Fehlerbalken.

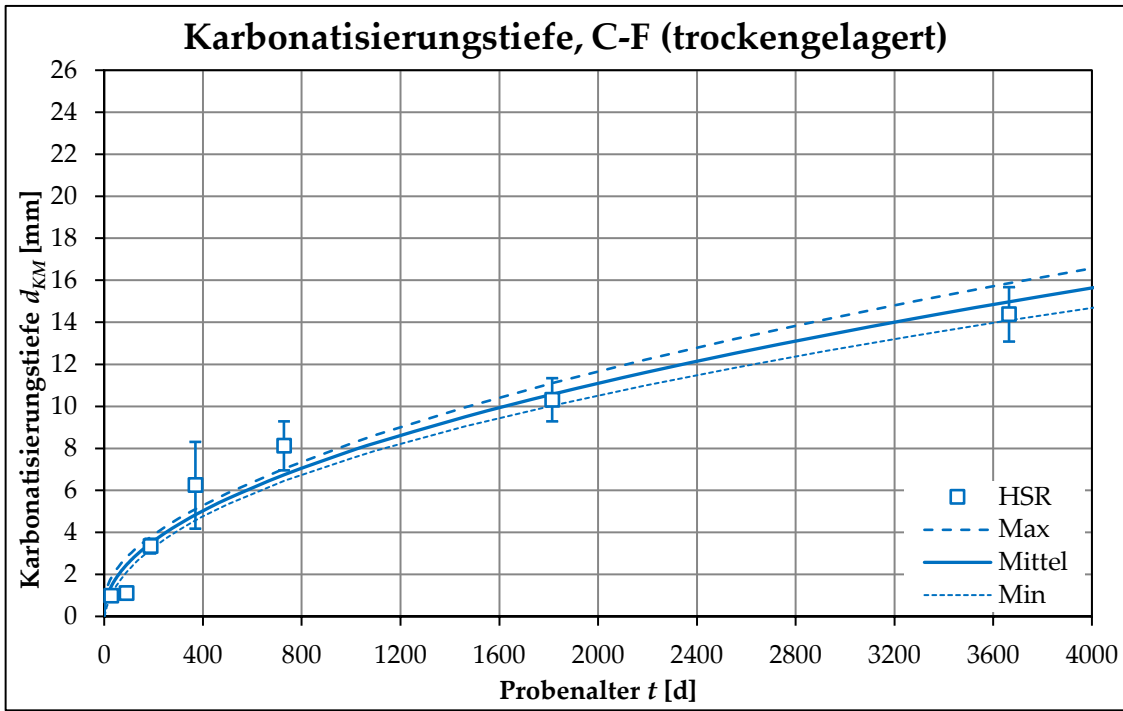


Bild A.39: Karbonatisierungstiefen C-FT; inkl. 95%/5%–Konfidenzintervallen und Fehlerbalken.

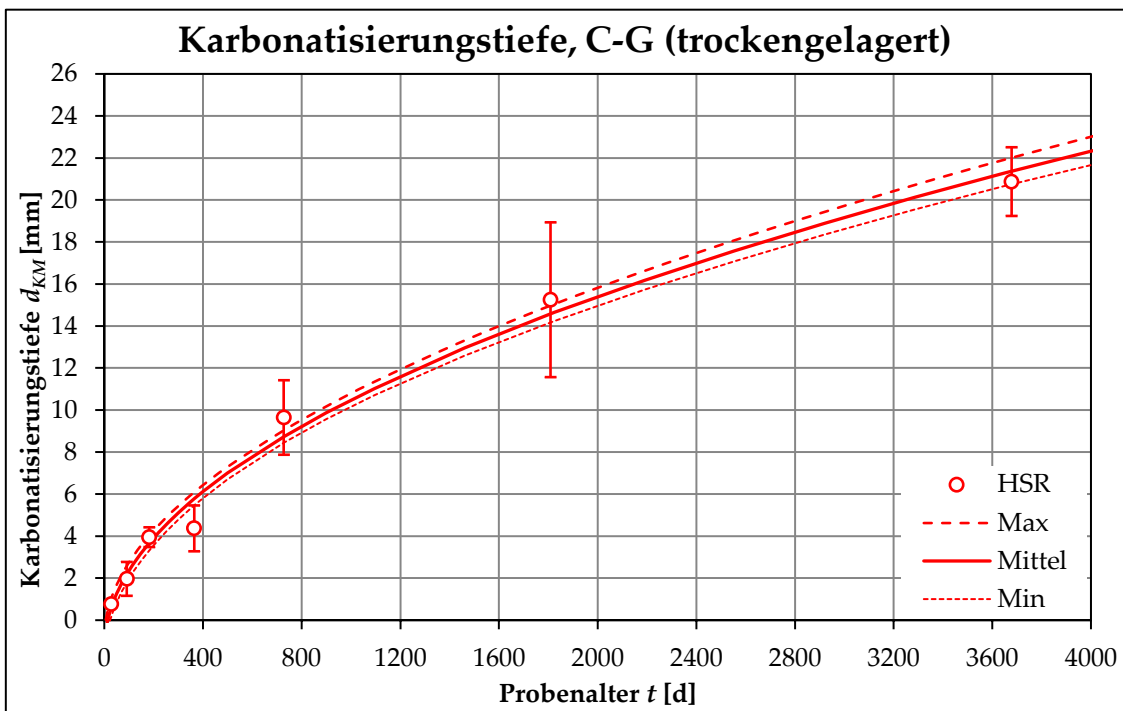


Bild A.40: Karbonatisierungstiefen der C-GT; inkl. 95%/5%–Konfidenzintervallen und Fehlerbalken.

A.4 Bestimmung der Betonzugfestigkeit mittels Double Punch Versuch

Nachfolgend wird die Arbeitsanweisung zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit mittels Double Punch Versuch in einem Betonprüflabor ausgeführt. Die Angaben inkl. Text und Bildern stammen aus [118] und werden verkürzt wiedergegeben. Falls die Aussenabmessungen der (halbierten) Zylinder oder der Würfel nicht 150 mm betragen, sind die geometrischen Masse entsprechend anzupassen sowie entsprechende Stahlzylinder und Kreisscheiben zu verwenden.

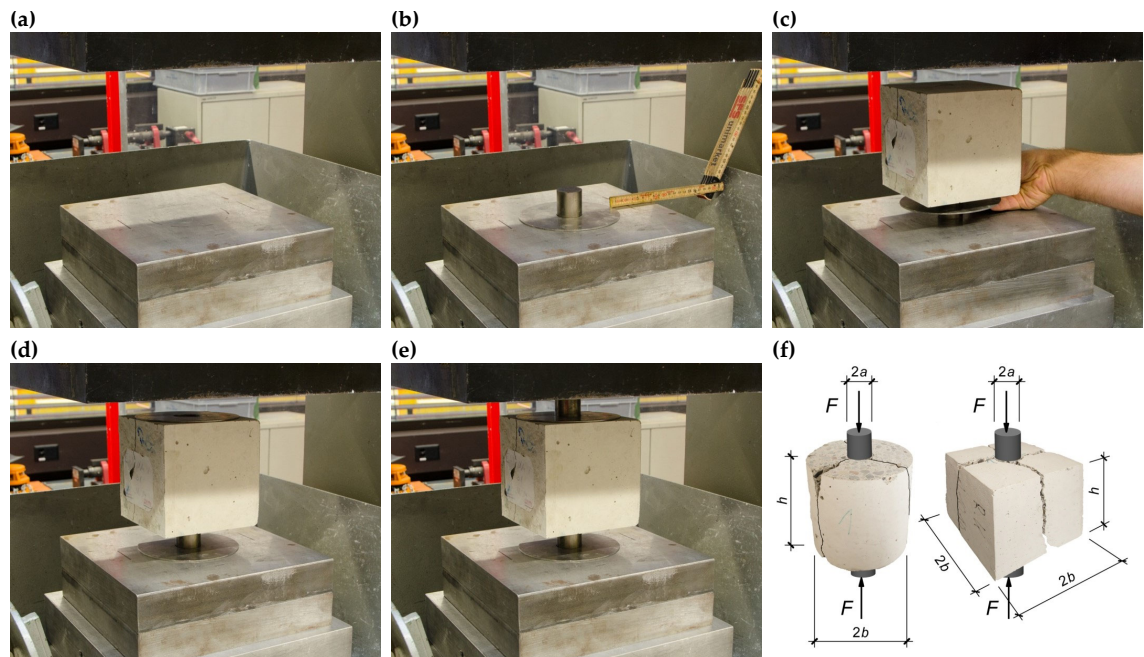


Bild A.41: Bestimmung der Betonzugfestigkeit mittels Double Punch Versuch: (a) Vorbereitung der Prüfmaschine, (b) Einbau des unteren Stahlstempels, (c) Einbau des Probekörpers, (d) und (e) Einbau des oberen Stahlstempels, (f) Definitionen zur Versuchsauswertung.

1 – Vorbereitung des Probekörpers gemäss SN EN 12390-3

Die Probenabmessungen sind mit einer Schiebelehre zu bestimmen. Die Probekörpermasse ist zwecks Kontrolle der Rohdichte zu bestimmen. Die Anordnung der Würfelprobe hat so zu erfolgen, dass sie senkrecht zur Einfüllrichtung des Betons mit den Stahlstempeln auf Druck beansprucht werden kann. Bei Zweisäulenprüfmaschinen ist die Würfelprobe so einzusetzen, dass die geglättete Fläche zur Säule zeigt.

2 – Vorbereitung der Prüfmaschine gemäss SN EN 12390-3

Der Einbau der Prüfanordnung erfordert mindestens eine lichte Höhe von ca. 240 mm. Zur Minimierung des erforderlichen Schlittenhubs bis zum Erreichen des Kraftschlusses

können zusätzliche Stahlplatten zentrisch in die Maschine eingebaut werden, siehe Bild A.41 (a). Damit wird die Prüfzeit optimiert und das komprimierte Hydrauliköl-Volumen minimiert.

3 – Einbau des unteren Stahlstempels

Eine gelochte Zentrierscheibe mit Aussendurchmesser 150 mm erleichtert die mittige Anordnung des Stahlstempels und somit der einzubauenden Probe, siehe Bild A.41 (b).

4 – Einbau des Probekörpers

Der Probekörper wird mit Hilfe der gelochten Zentrierscheibe desselben Nenndurchmessers zentrisch auf dem unteren Stahlstempel positioniert. Im Bild A.41 (c) stellt die linke Seitenfläche die Einfüllseite der Würfelprobe dar.

5 – Einbau des oberen Stahlstempels

Der Einbau des Stahlstempels oberhalb des Probekörpers erfolgt analog, indem zuerst eine zweite gelochte Zentrierscheibe auf dem Würfel mittig positioniert wird und im Anschluss der Stahlstempel in das Loch der Zentrierscheibe eingesetzt wird, siehe Bild A.41 (d) und (e).

6 – Versuchsdurchführung

Der Prüfkörper wird in einem kraftgesteuerten Versuch kontinuierlich bis zum Bruch belastet. Das Aufbringen der Prüflast erfolgt analog zu SN EN 12390-3 [110], wobei die auf die gesamte Querschnittsfläche des Prüfkörpers bezogene (konstante) Belastungsgeschwindigkeit 10 % der für den Würfeldruck gewählten Geschwindigkeit beträgt: 0.06 ± 0.02 N/mm²/s.

Unter Annahme von $f_{ct}/f_c = 0.1$ ergibt sich somit dieselbe Versuchsdauer wie beim Würfeldruckversuch.

7 – Versuchsauswertung

Die Berechnung der Betonzugfestigkeit erfolgt mit der angegebenen Formel¹ für die Maximalkraft F_u und den gemessenen Werten für h und b :

$$f_{ct} = f_{ct,DP} = \frac{F_u}{\pi \cdot (1.2 \cdot b \cdot h - a^2)} \quad \left(\text{für } h = 2b = 8a = 150 \text{ mm} \quad f_{ct,DP} \approx \frac{F_u [\text{N}]}{41\,300 \text{ mm}^2} \right)$$

Beim Würfel werden die beiden horizontalen Kantenlängen zur Bestimmung von b gemittelt, siehe Bild A.41 (f).

¹Die Formel kann für Würfel mit einer Seitenlänge von 100 mm wie folgt angepasst werden: $f_{ct} = f_{ct,DP} \approx F_u [\text{N}]/18\,300 \text{ mm}^2$ bzw. für Würfel mit Seitenlänge 200 mm $f_{ct} = f_{ct,DP} \approx F_u [\text{N}]/73\,400 \text{ mm}^2$.

A.5 Validation des r-Konzepts

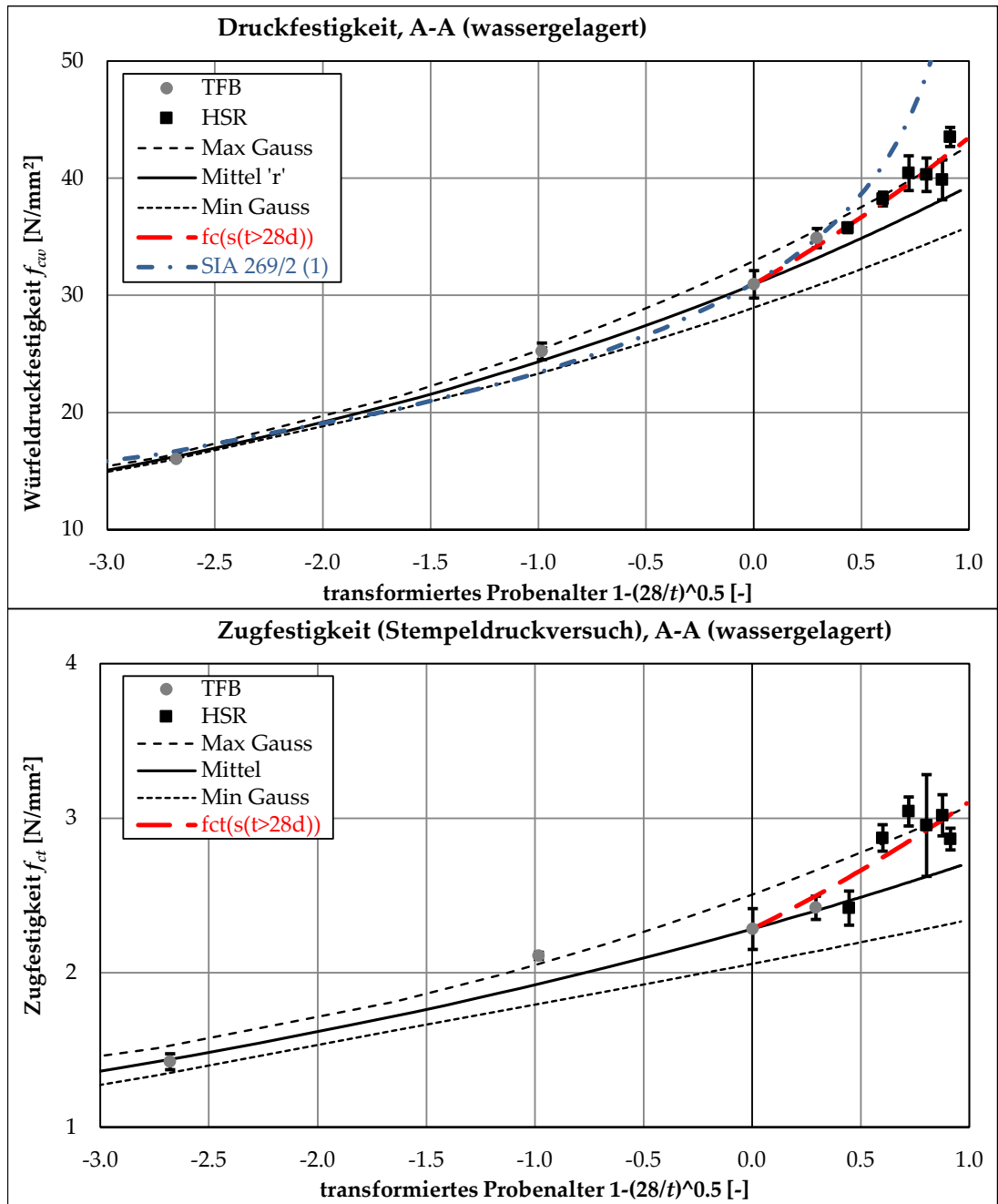


Bild A.42: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: A-A.

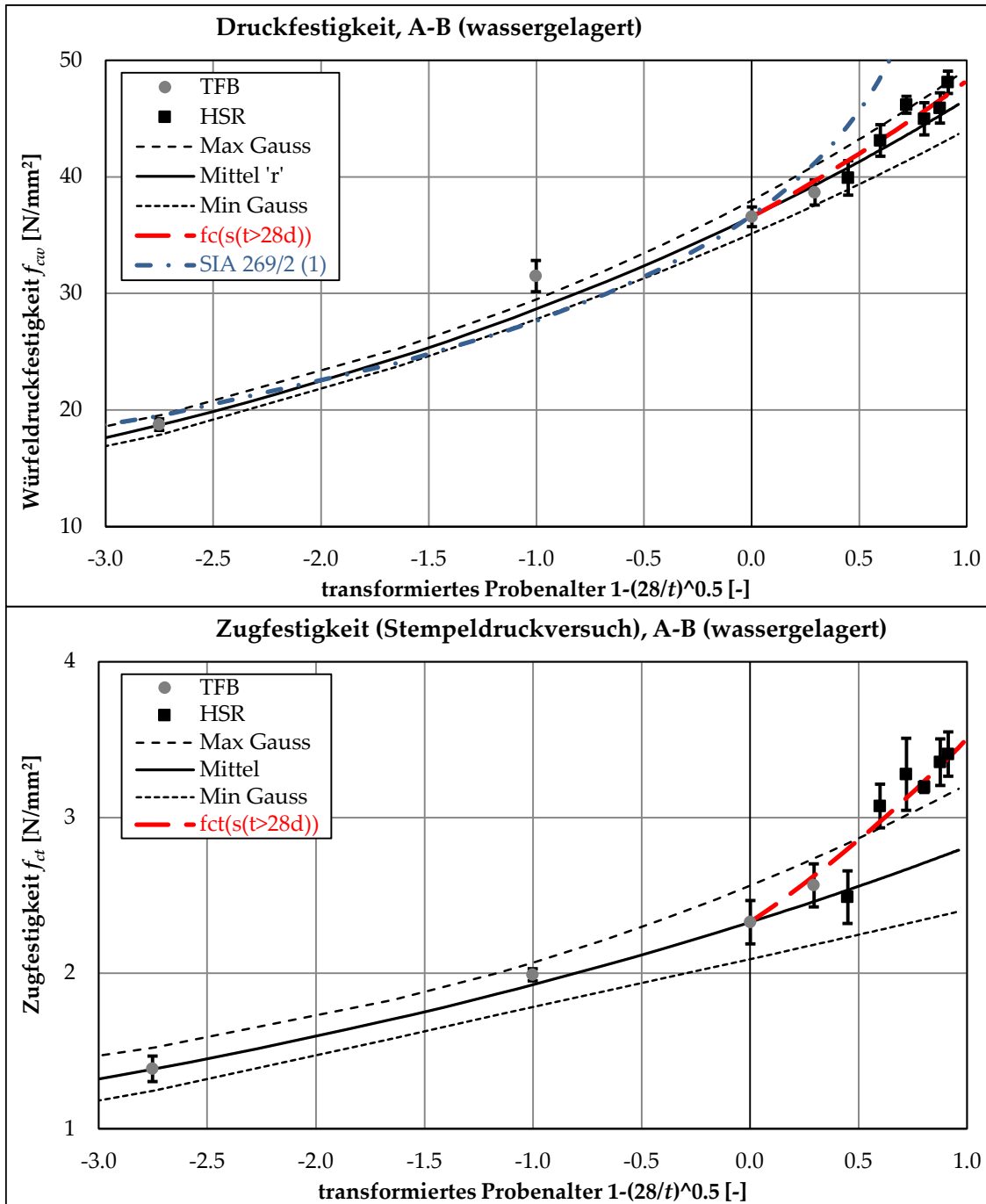


Bild A.43: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: A-B.

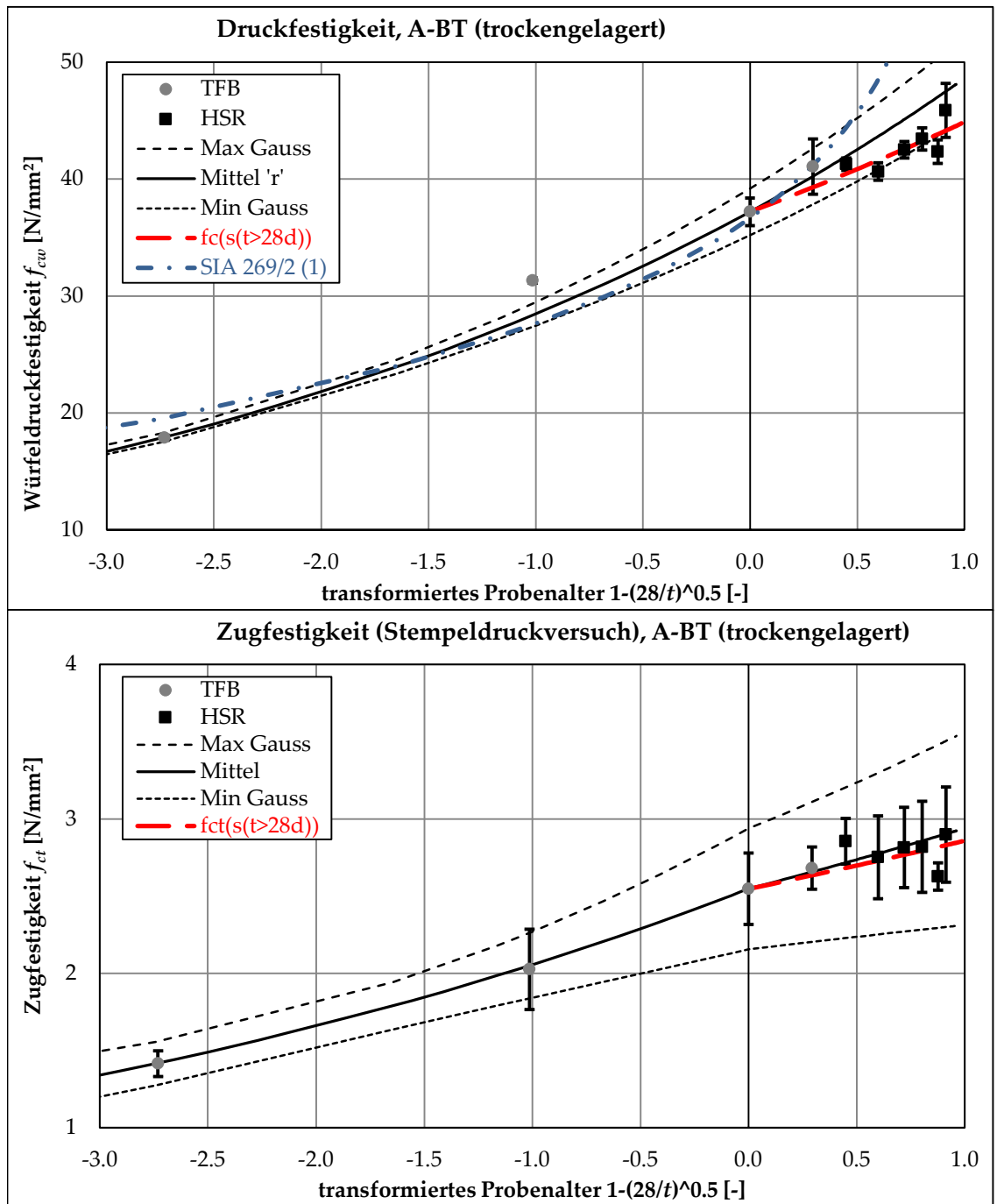


Bild A.44: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: A-BT.

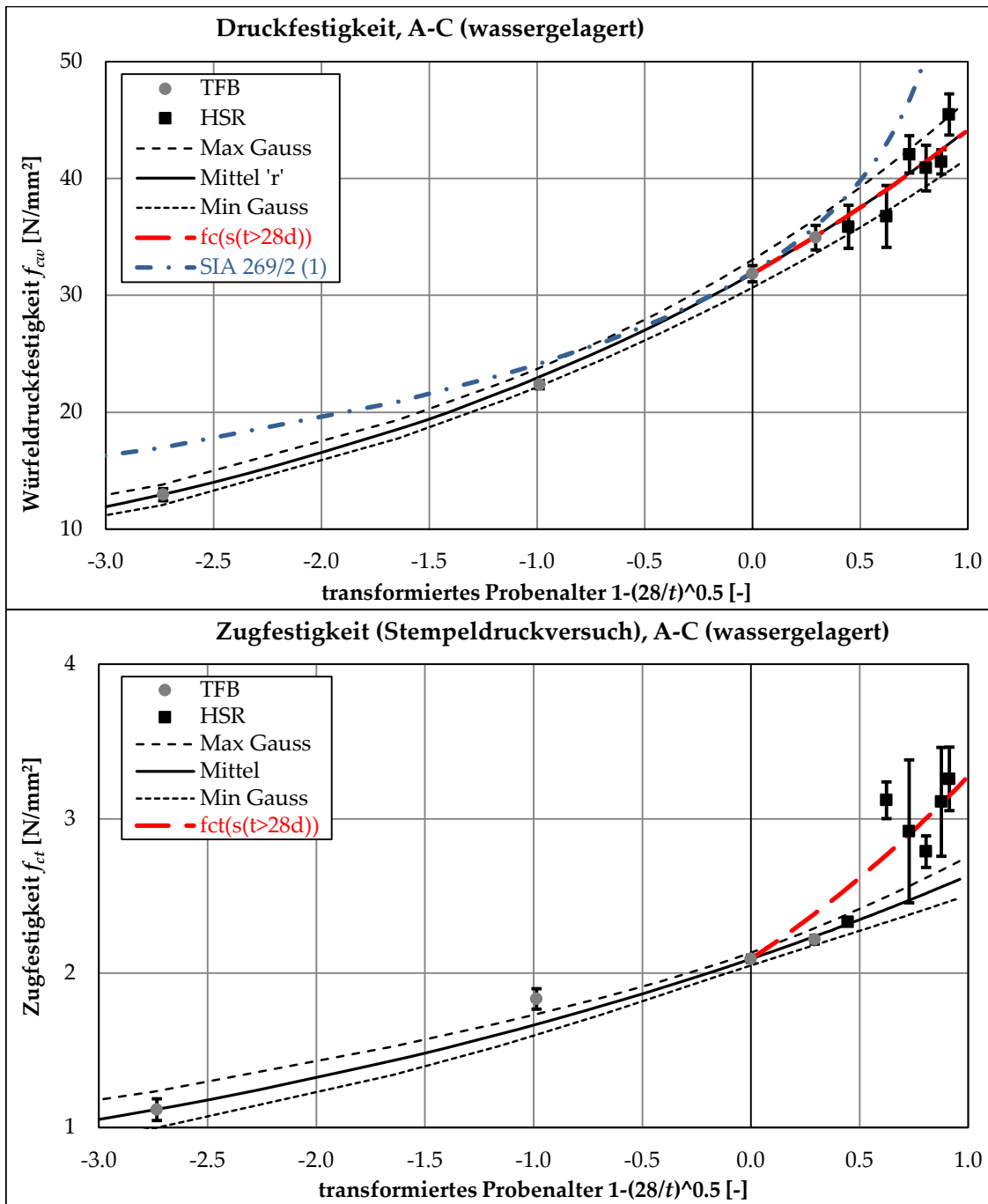


Bild A.45: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: A-C.

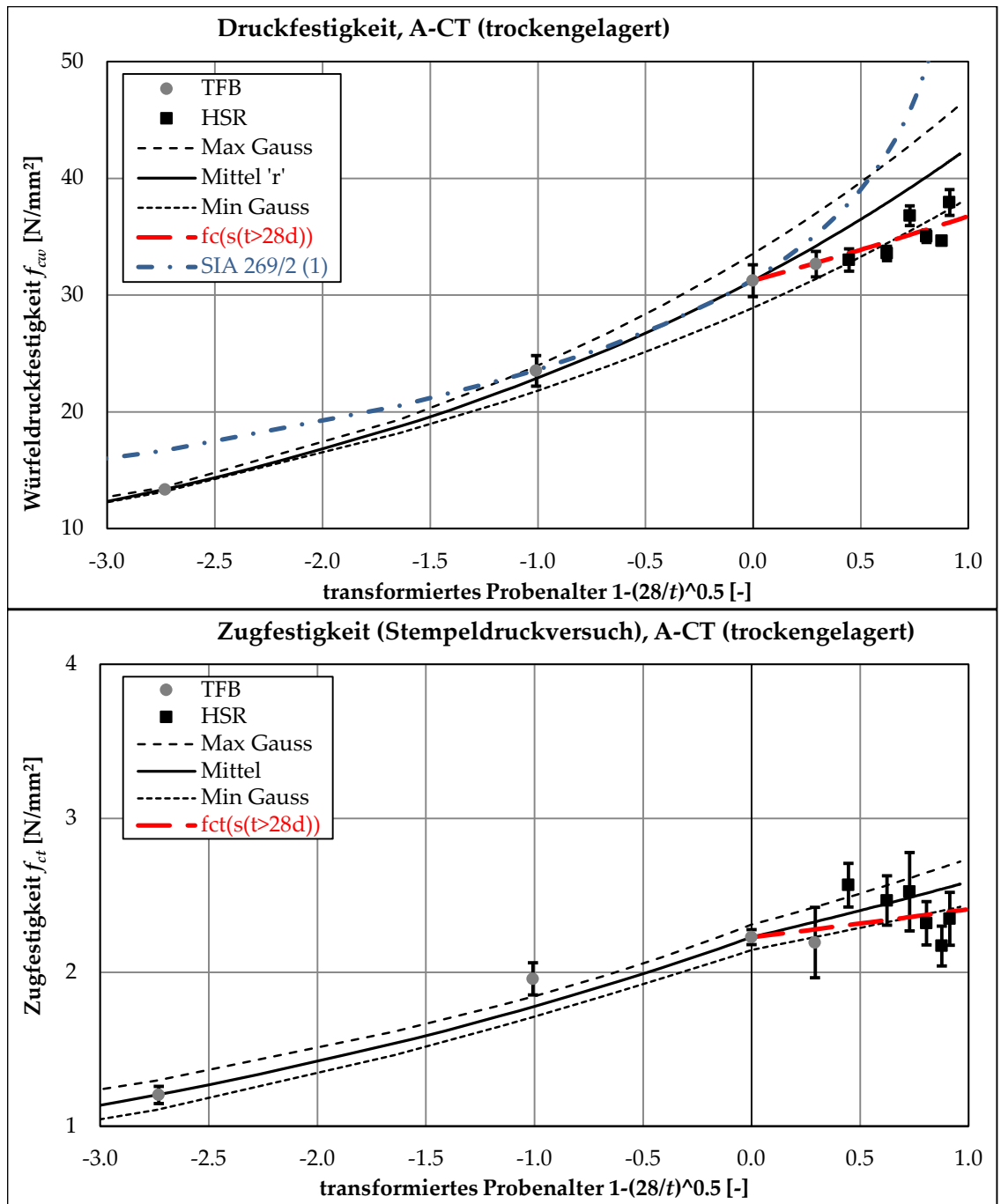


Bild A.46: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: A-CT.

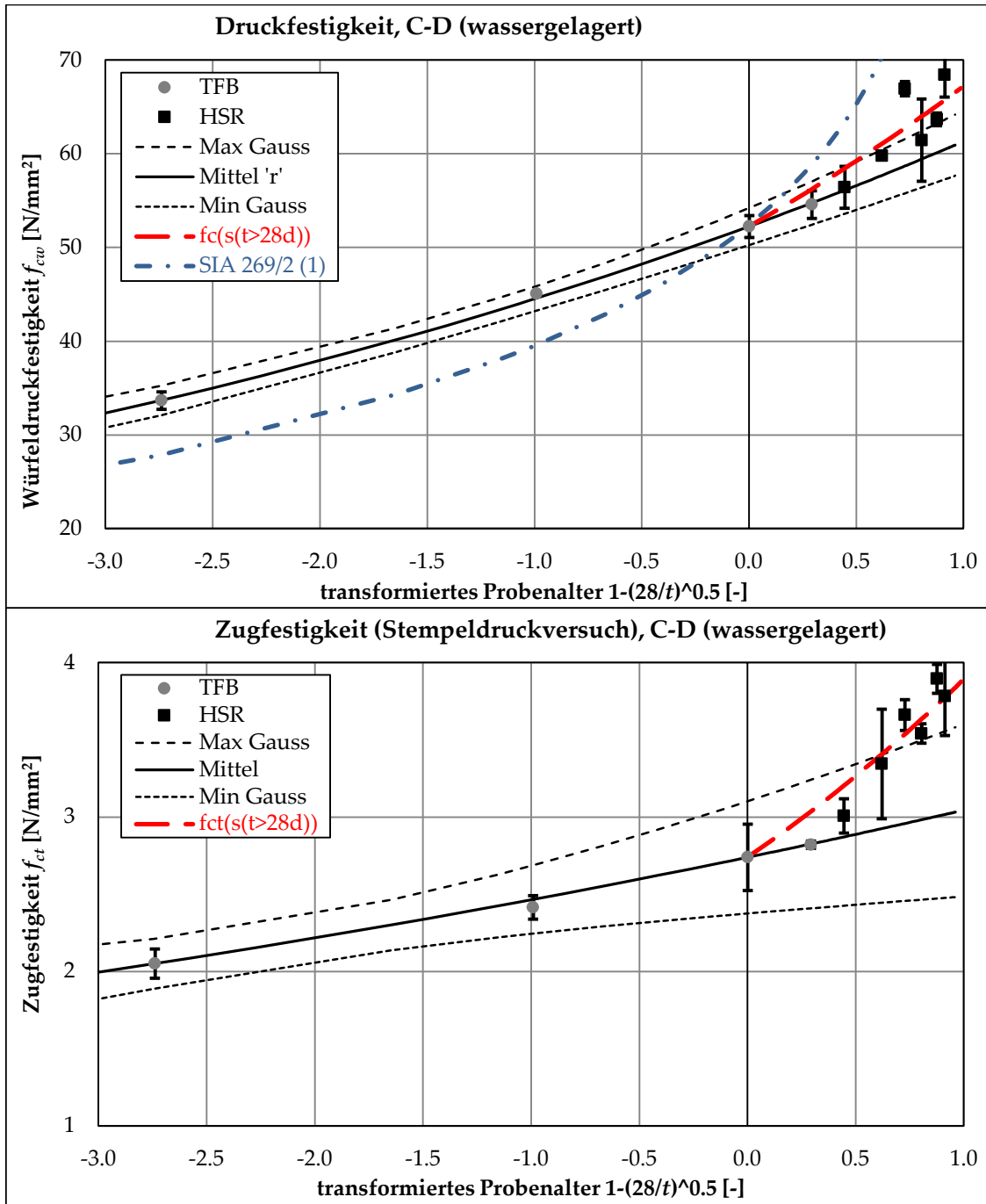


Bild A.47: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-D.

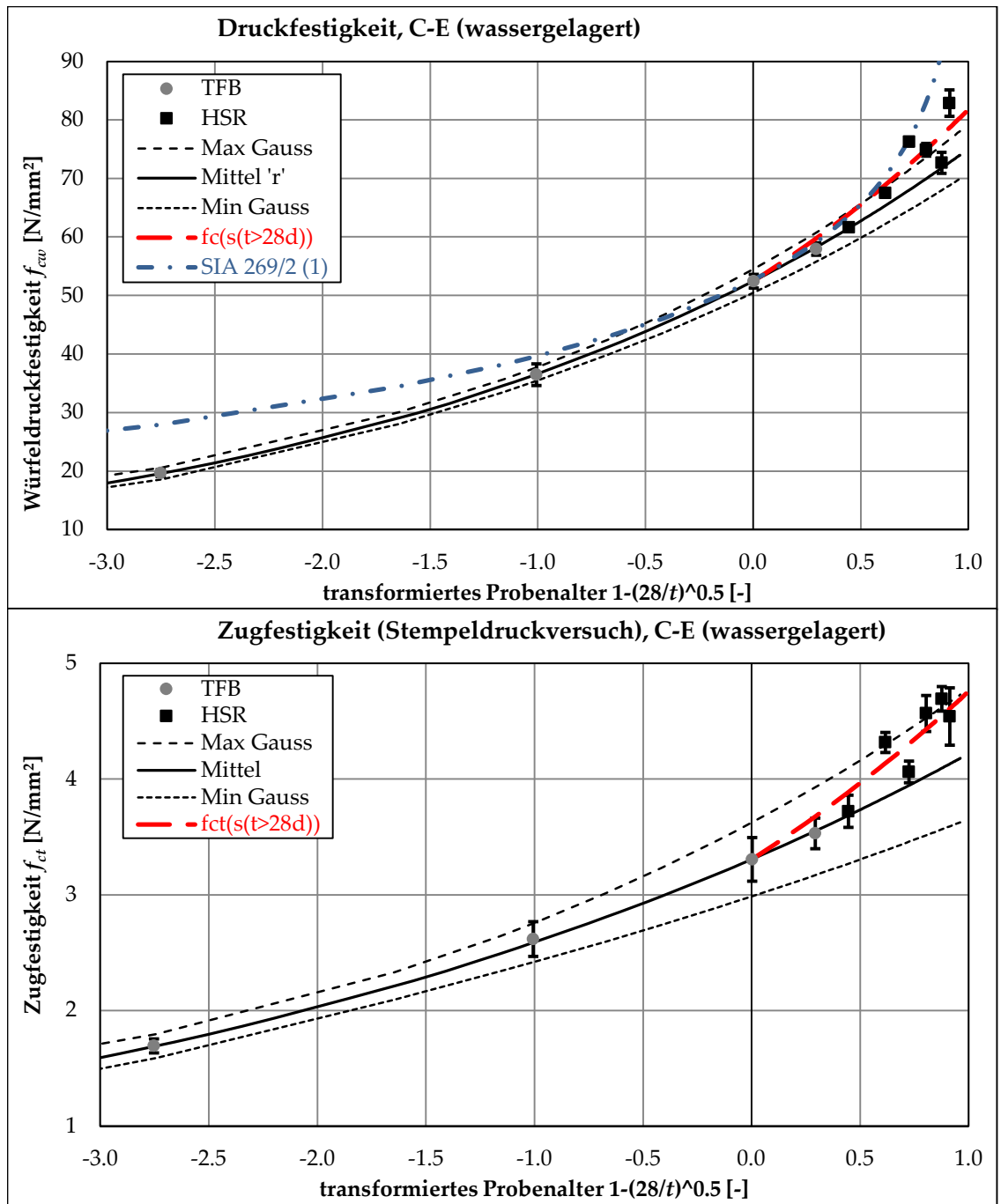


Bild A.48: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-E.

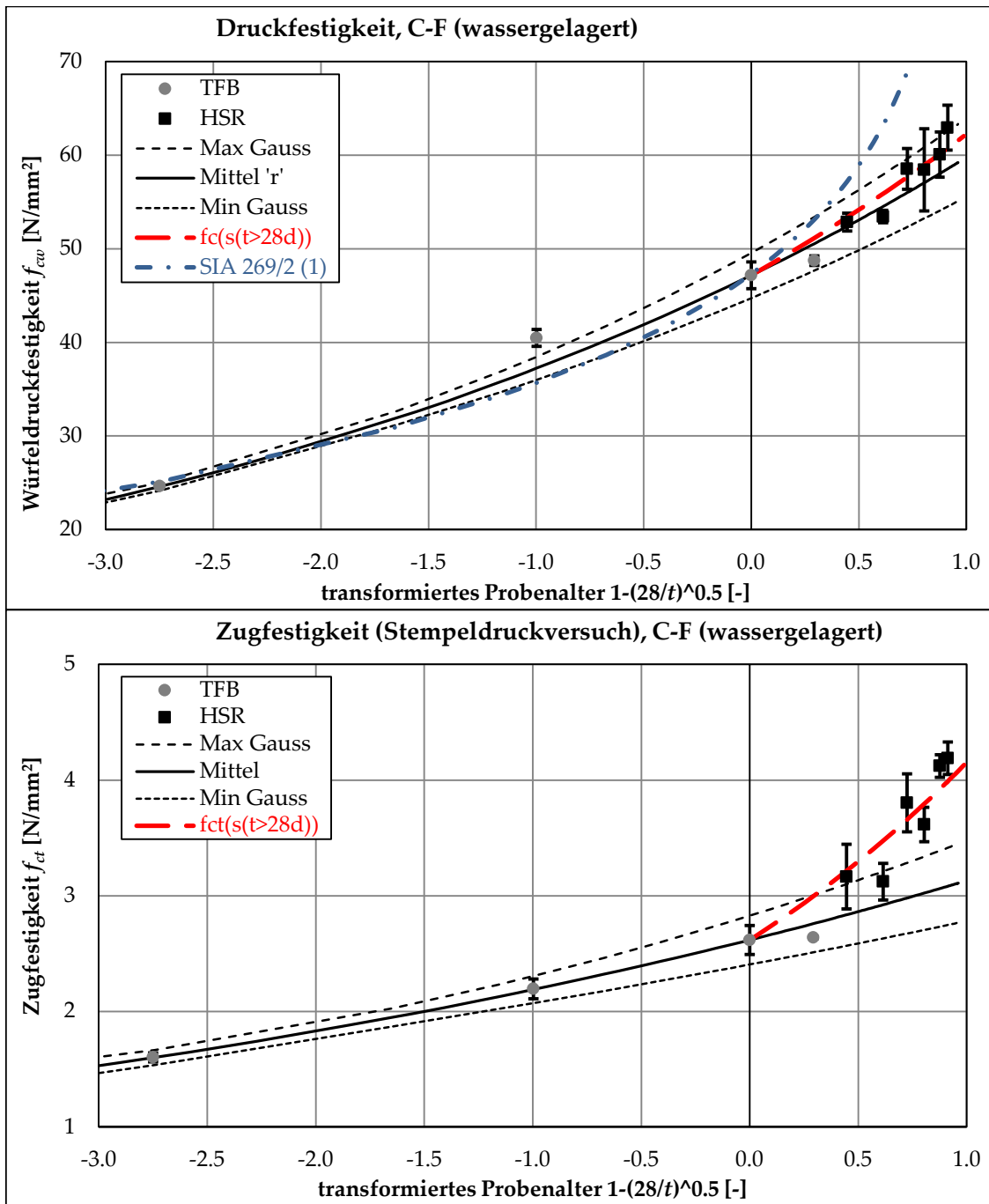


Bild A.49: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-F.

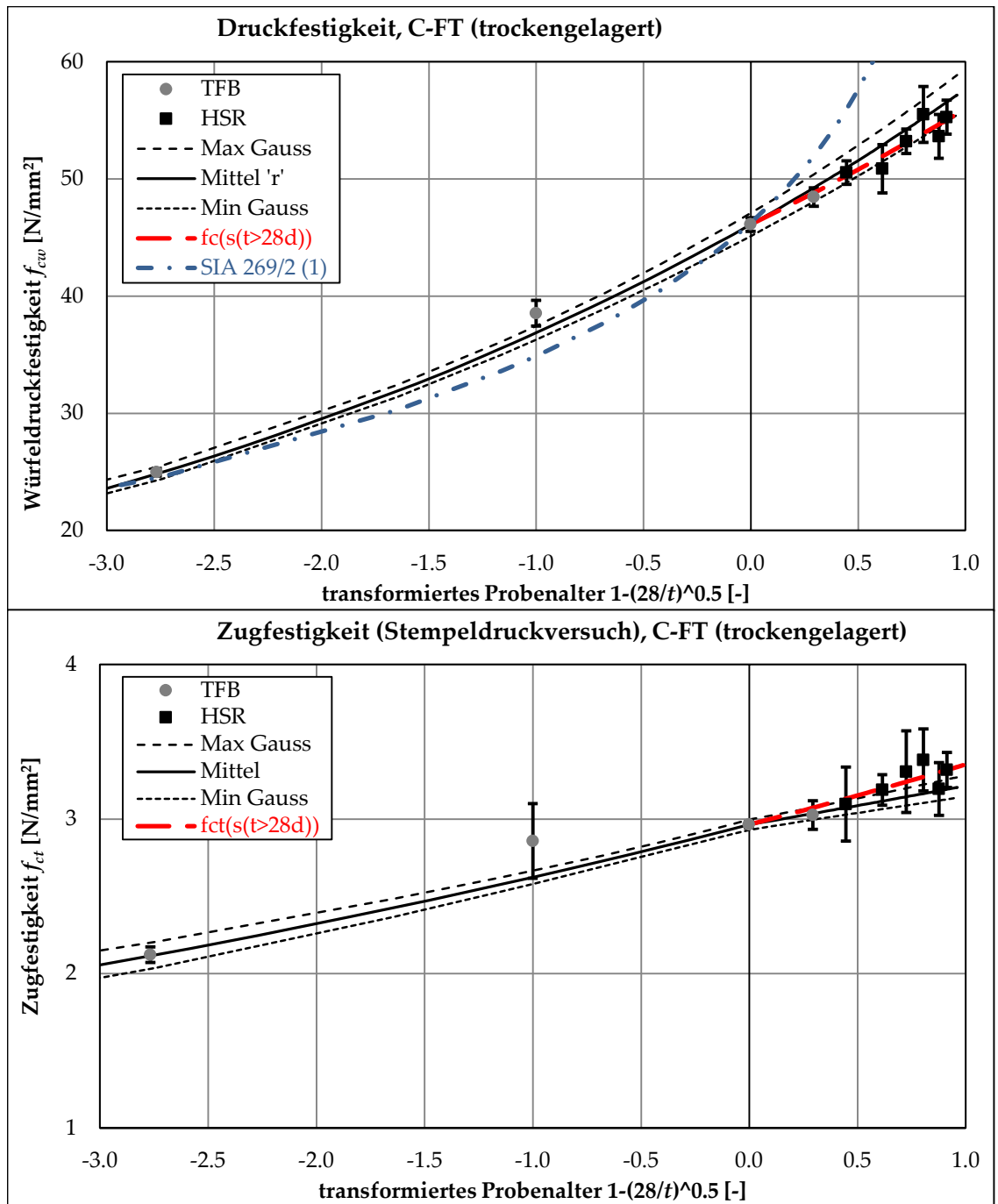


Bild A.50: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-FT.

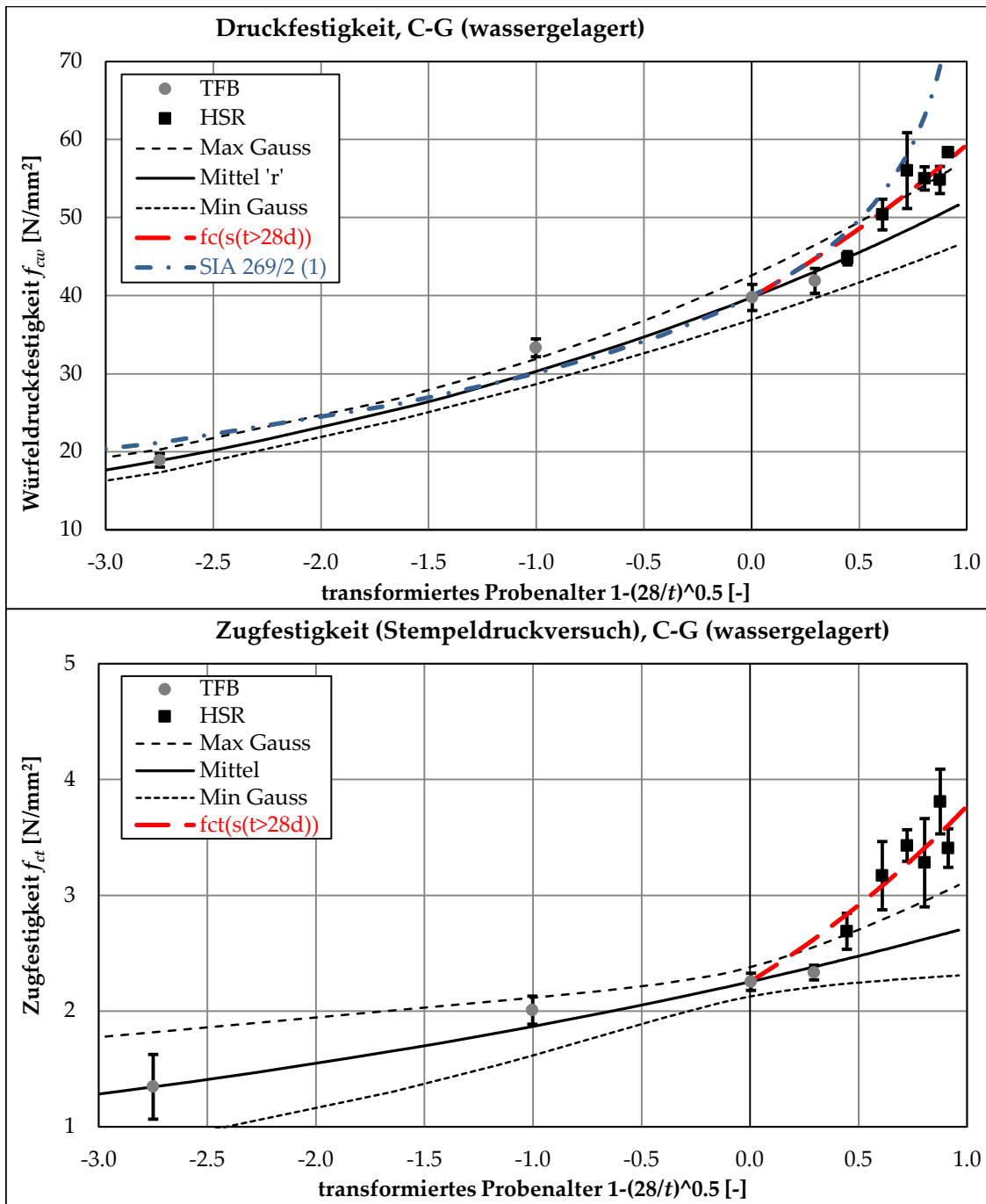


Bild A.51: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-G.

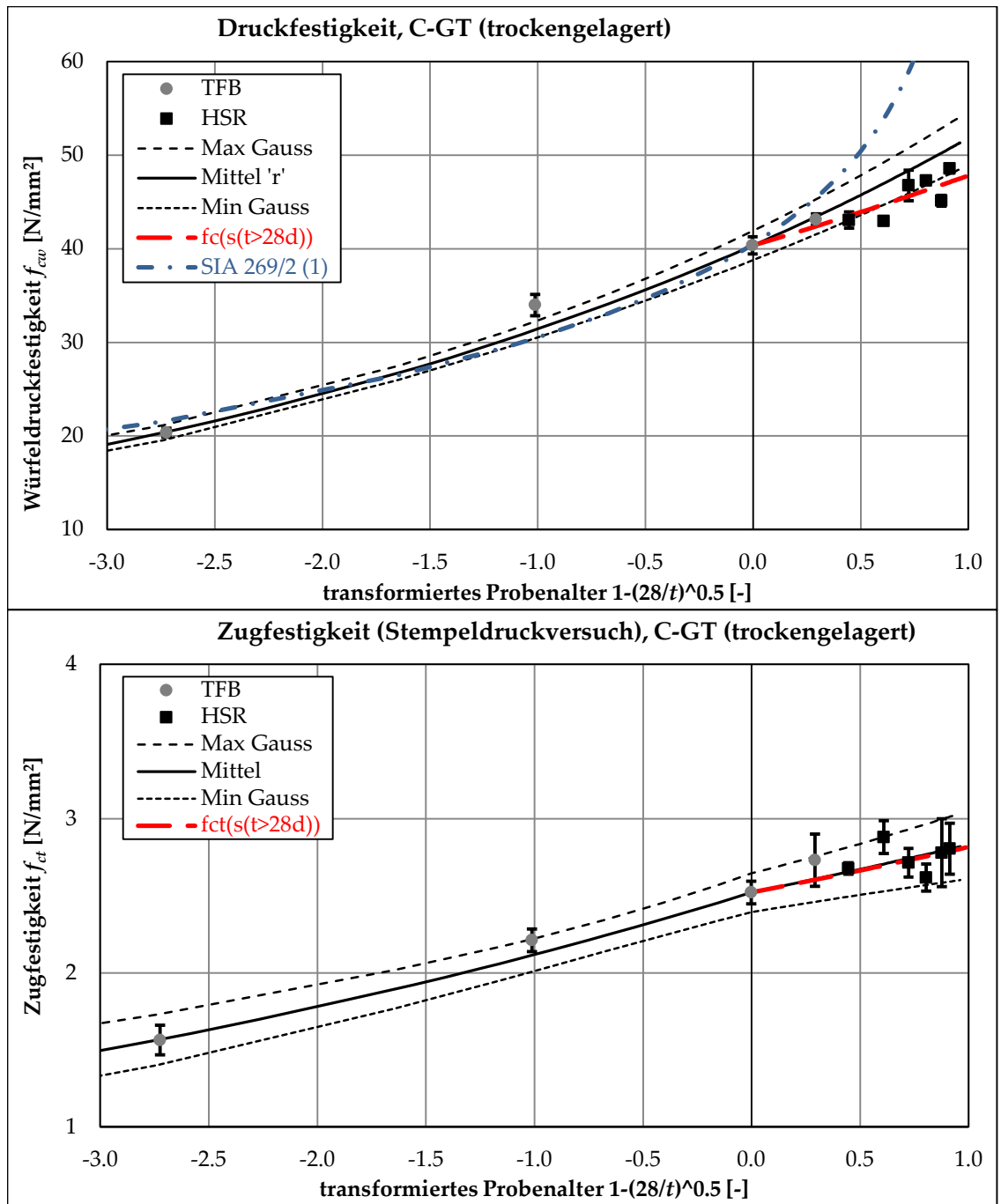


Bild A.52: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-GT.

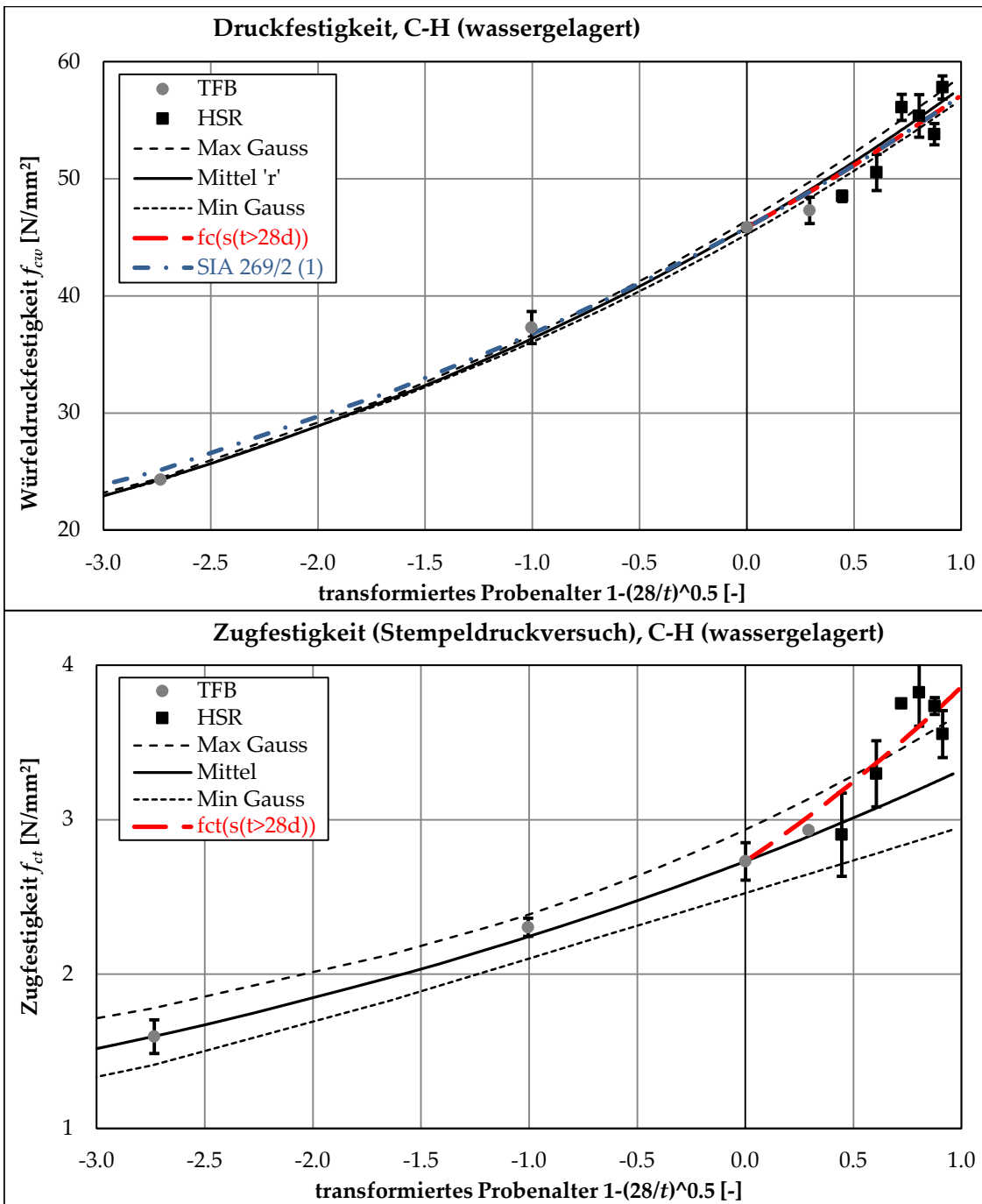


Bild A.53: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-H.

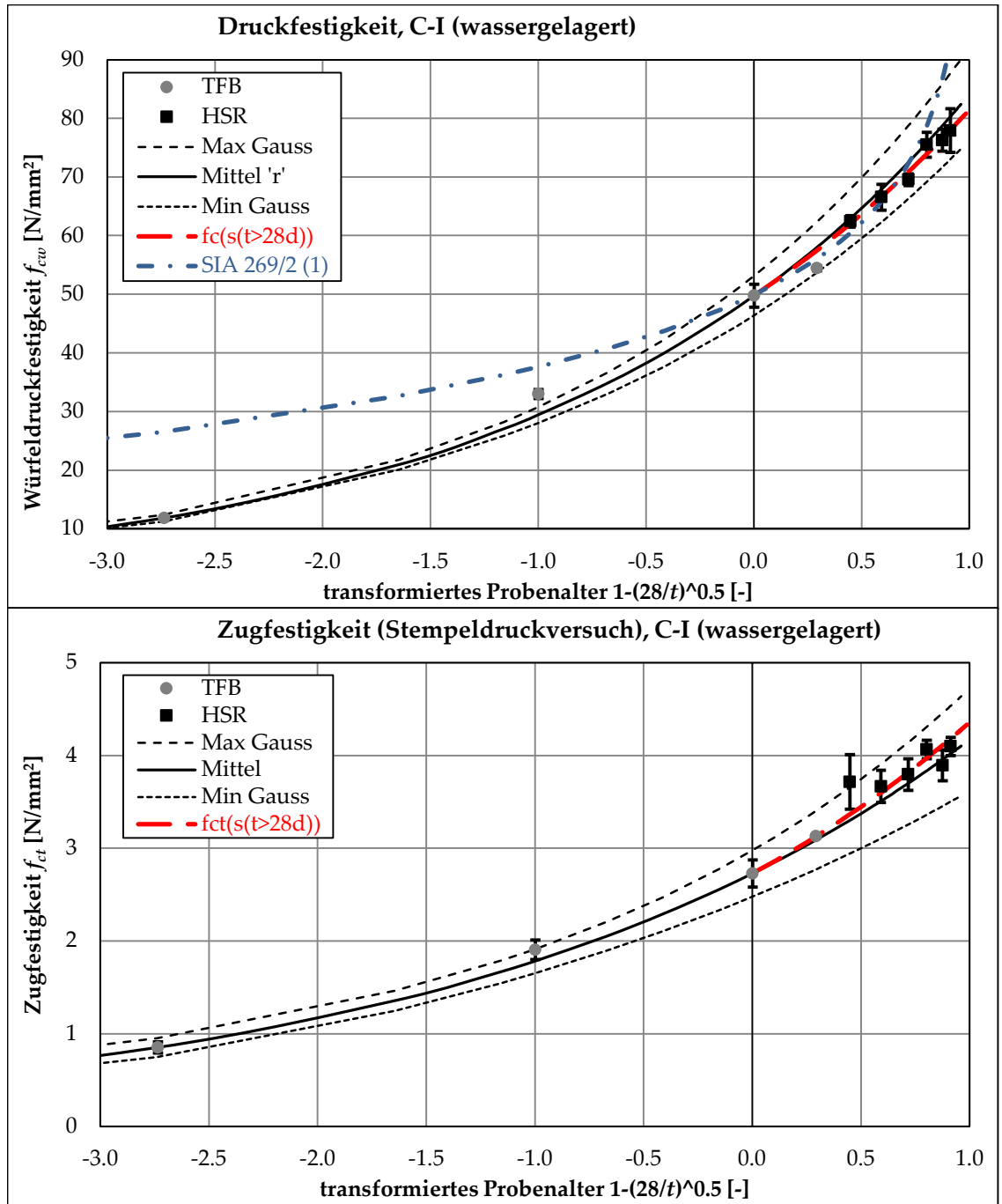


Bild A.54: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-I.

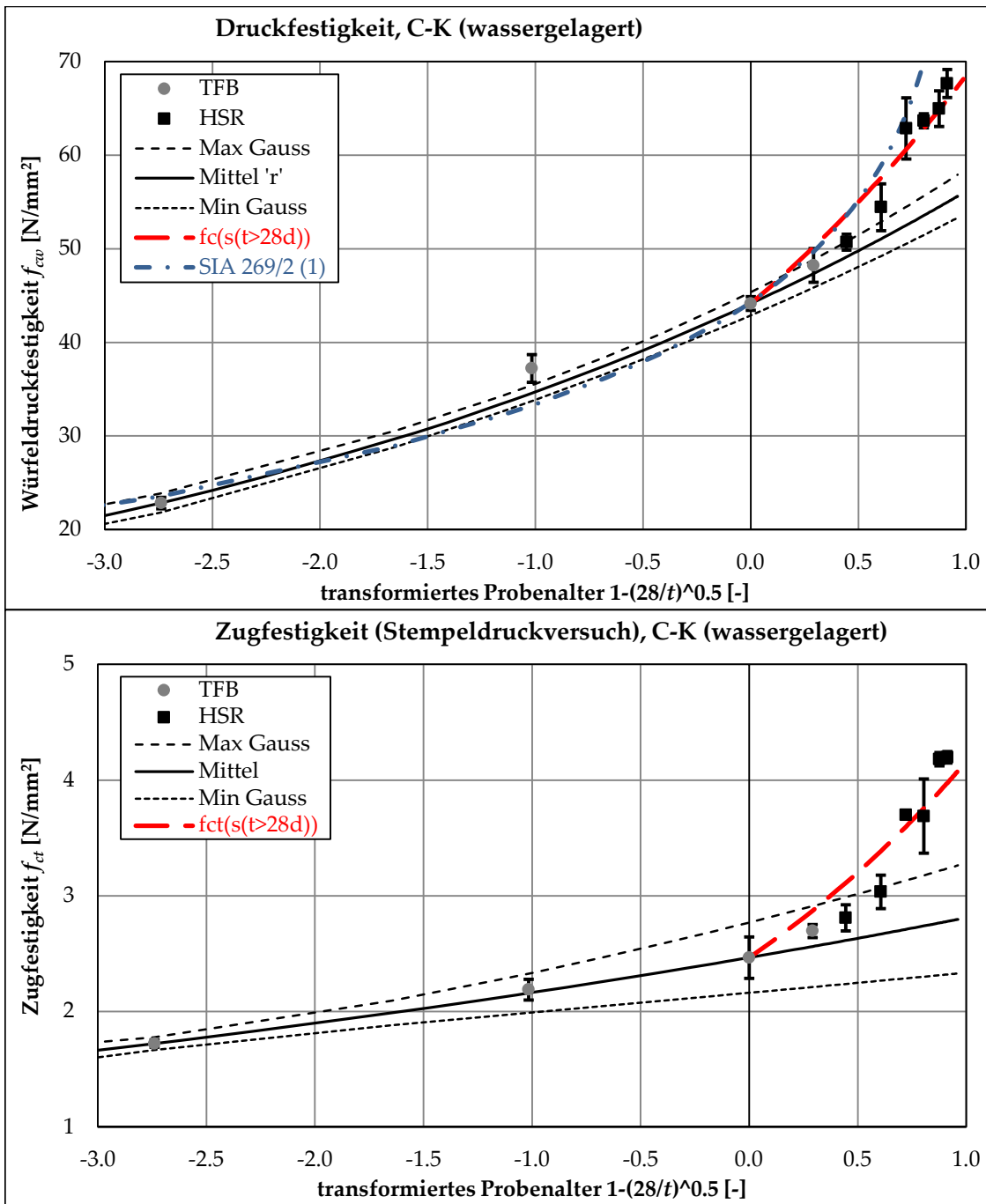


Bild A.55: Zeitliche Druck- und Zugfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken: C-K.

A.6 Validation des r-Konzepts an «alten» Betonen

A.6.1 Inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken

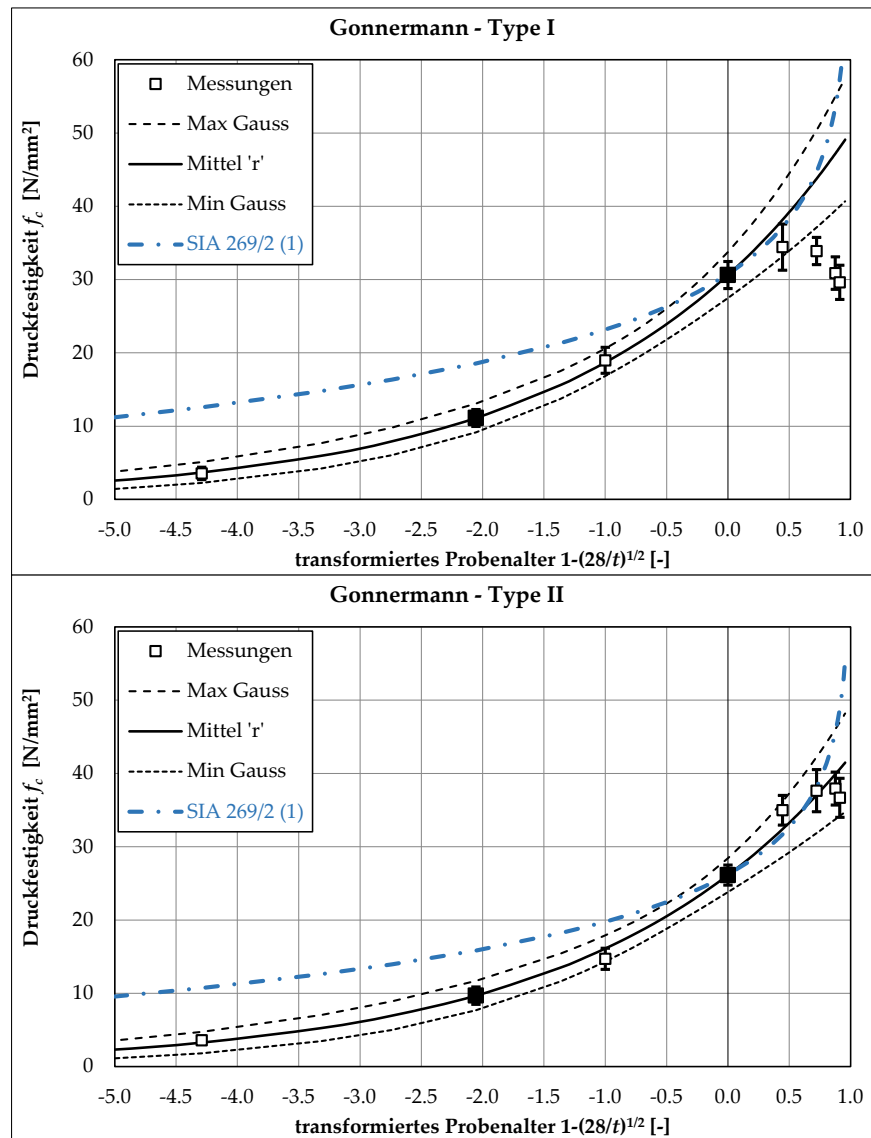


Bild A.56: Gonnermann und Lerch: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Teil 1; Daten aus [27].

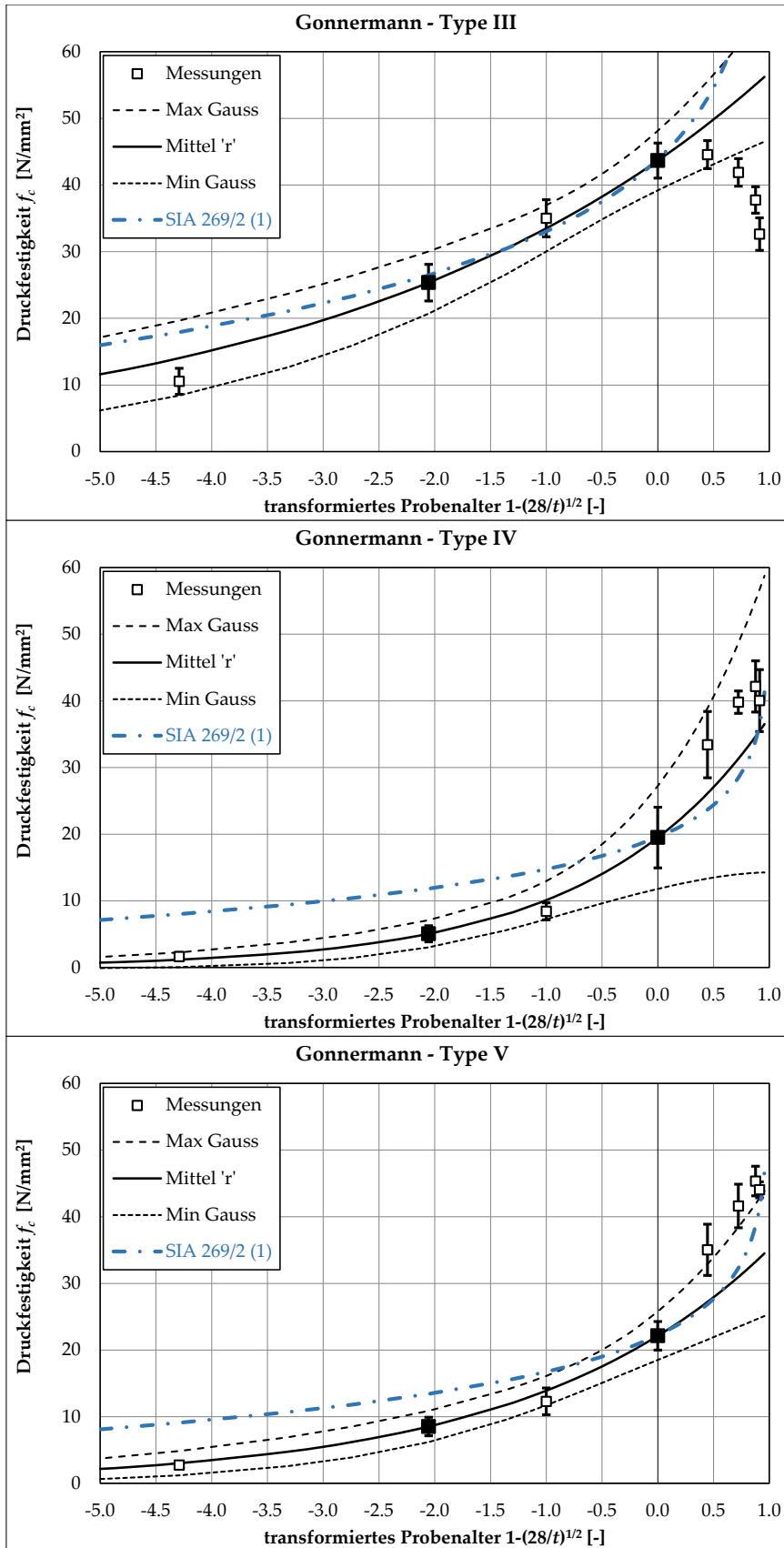


Bild A.57: Gonnermann und Lerch: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Teil 2; Daten aus [27].

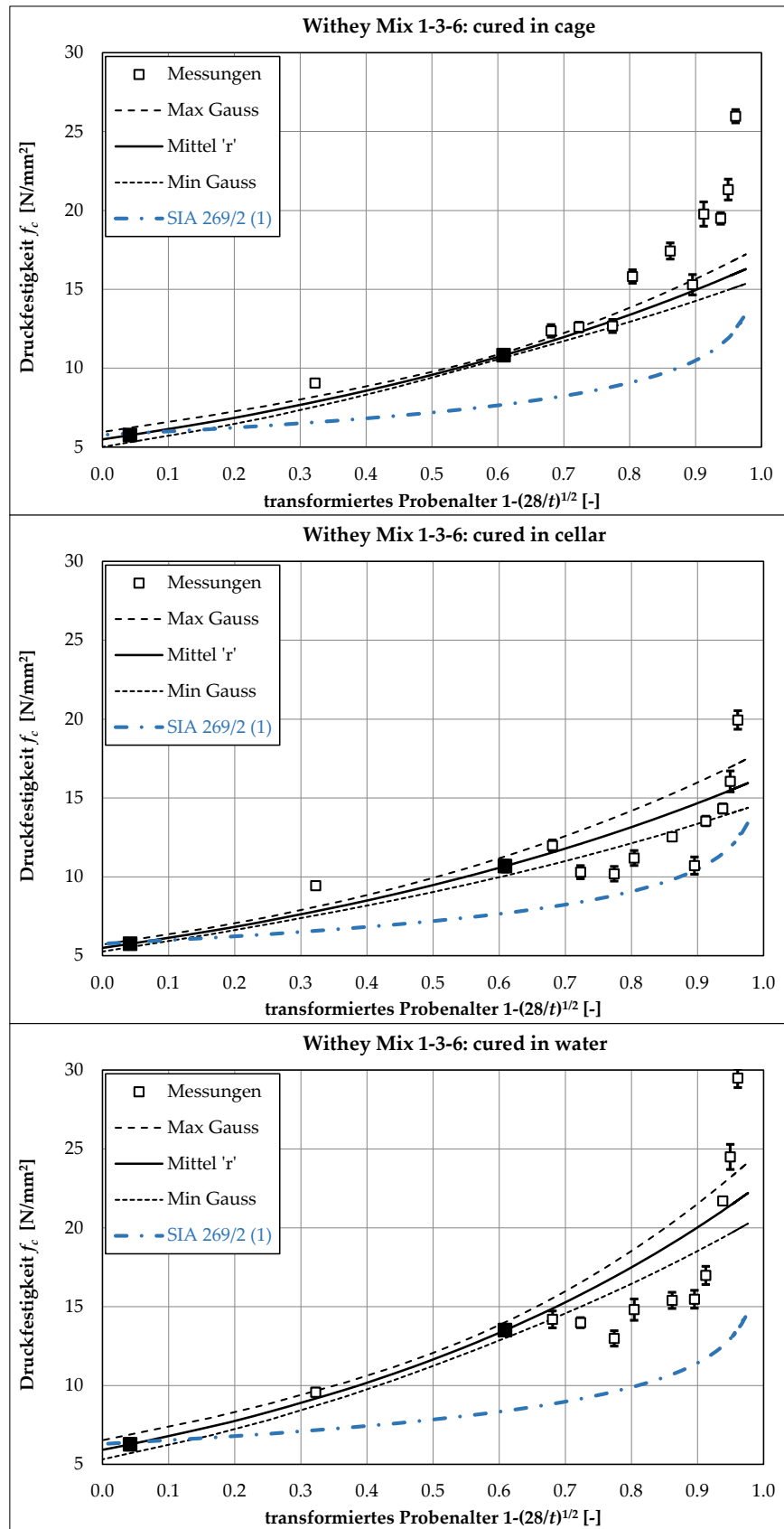


Bild A.58: Withey: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Teil 1; Daten aus [93].

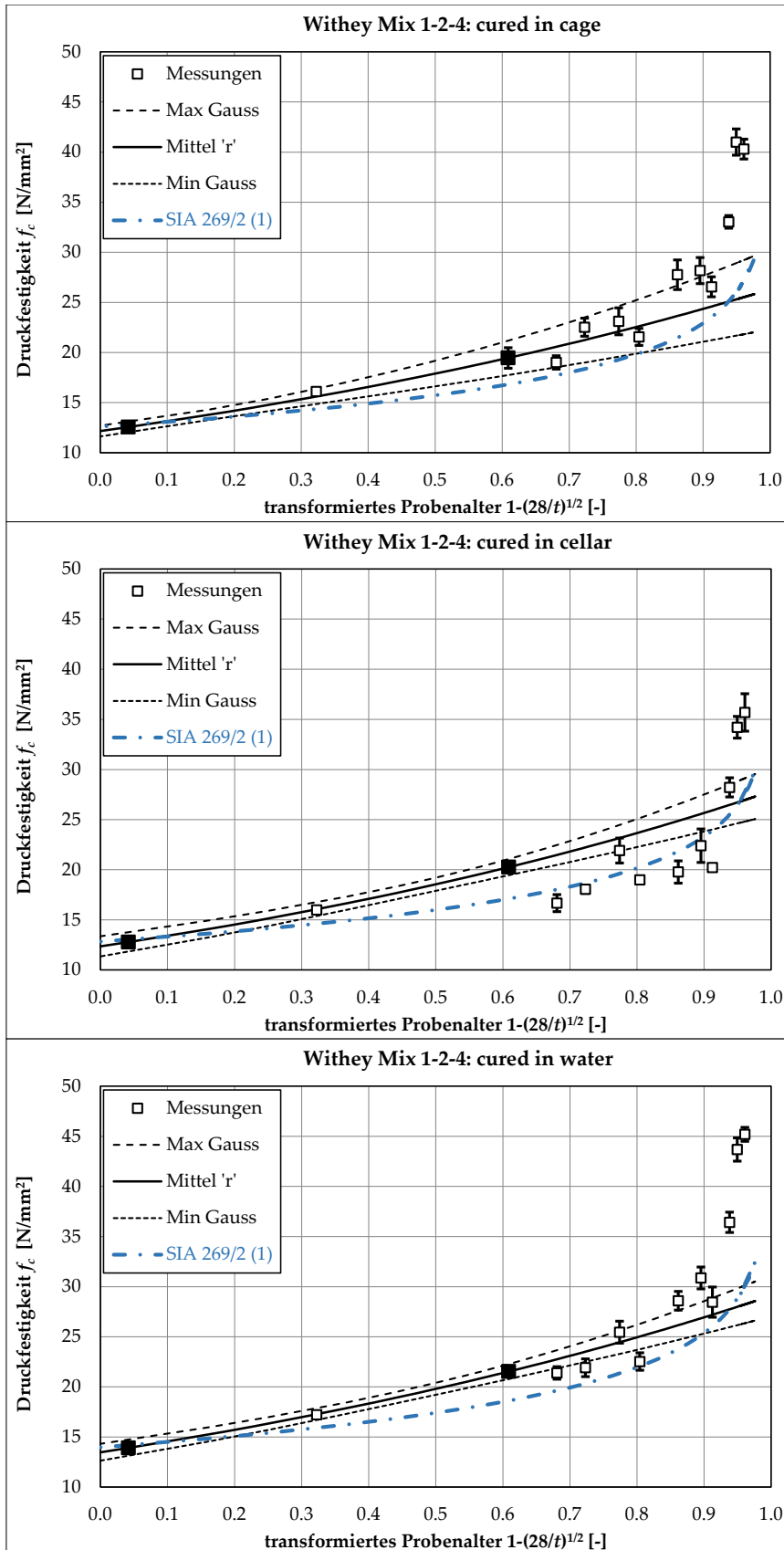


Bild A.59: Withey: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Teil 2; Daten aus [93].

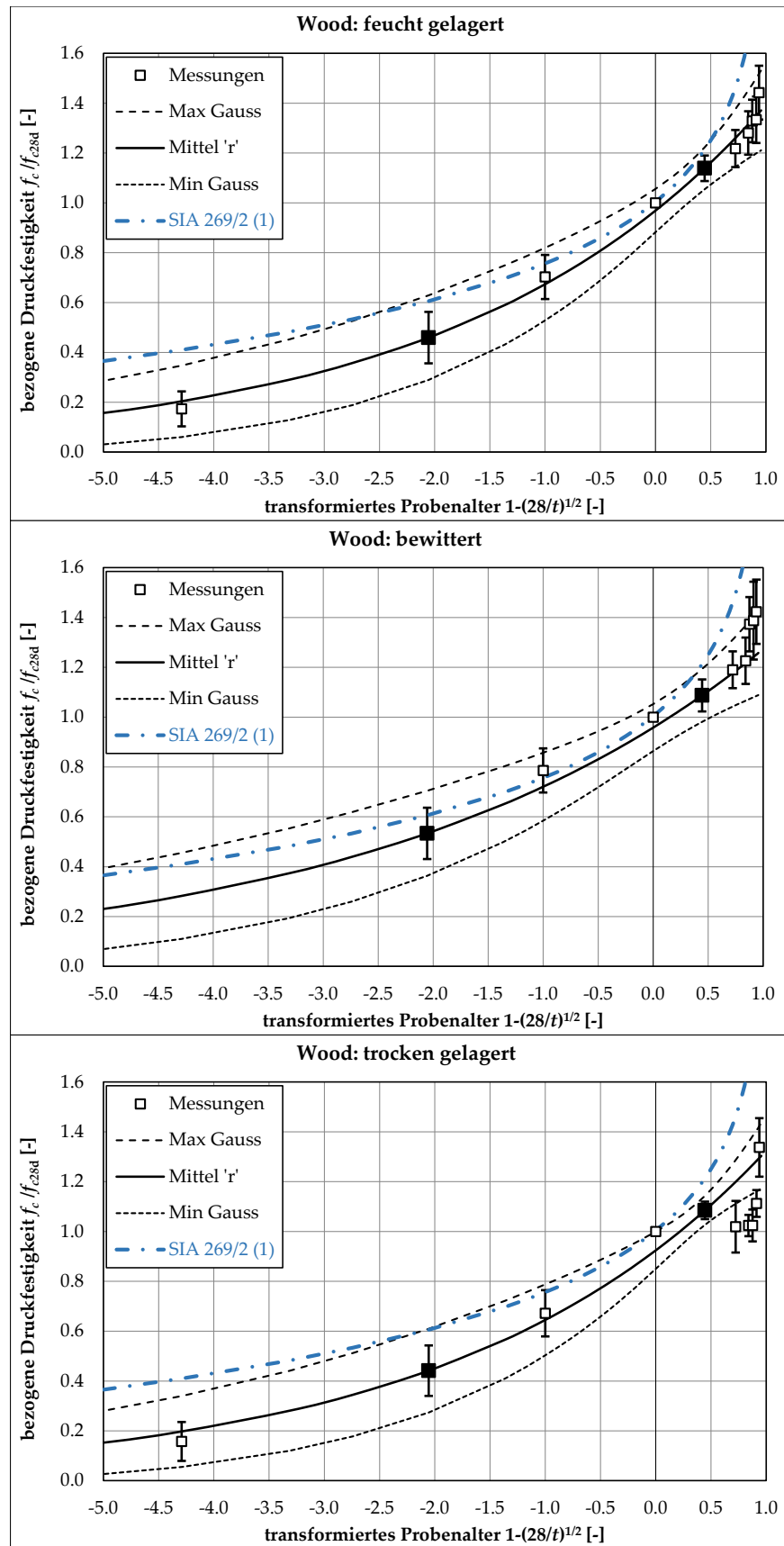


Bild A.60: Wood: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Daten aus [94].

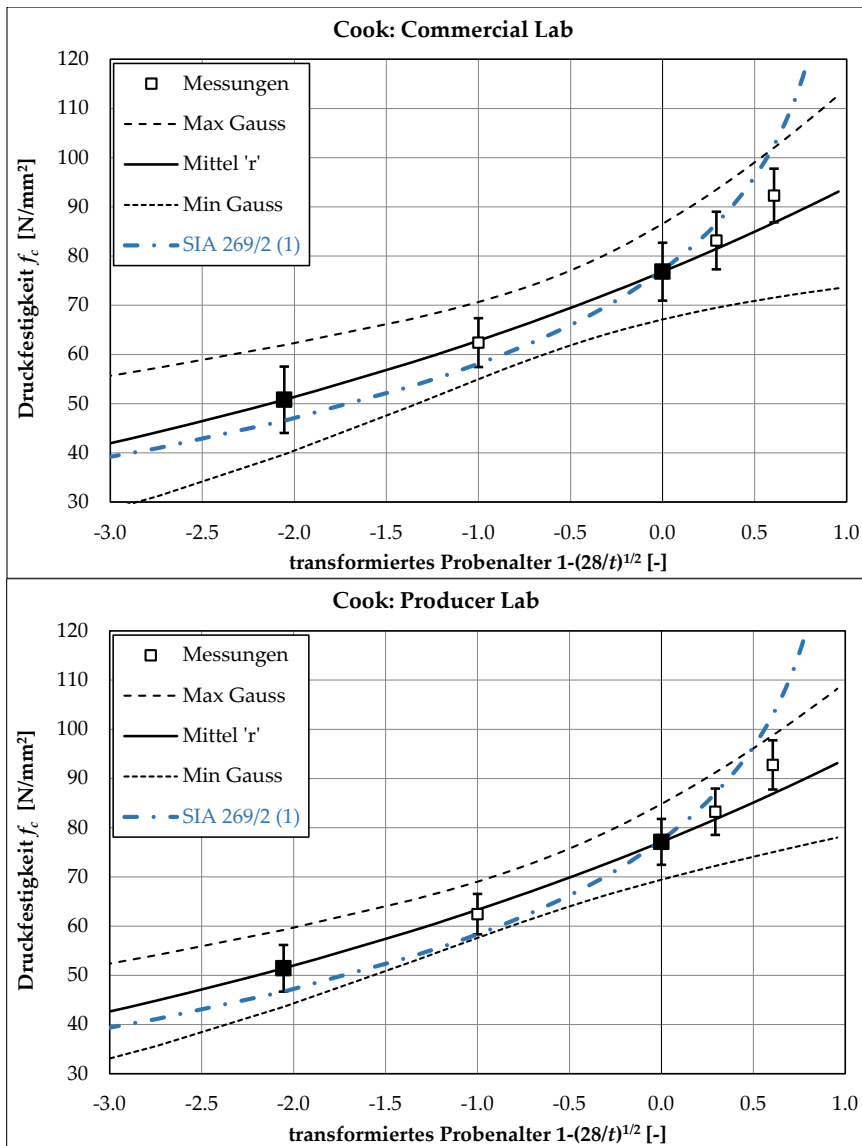


Bild A.61: Cook: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Daten aus [17].

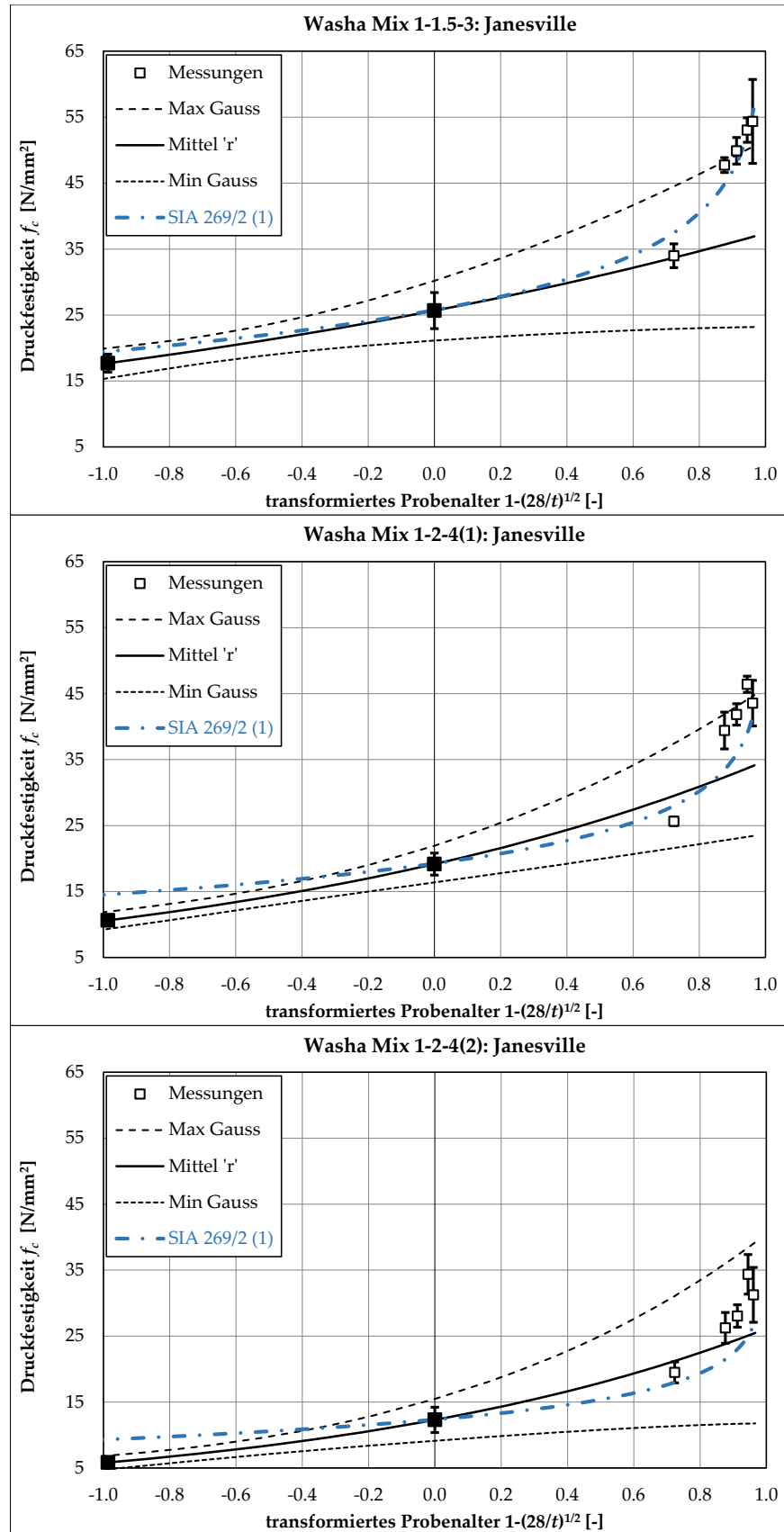


Bild A.62: Washa und Wendt: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Teil 1; Daten aus [88].

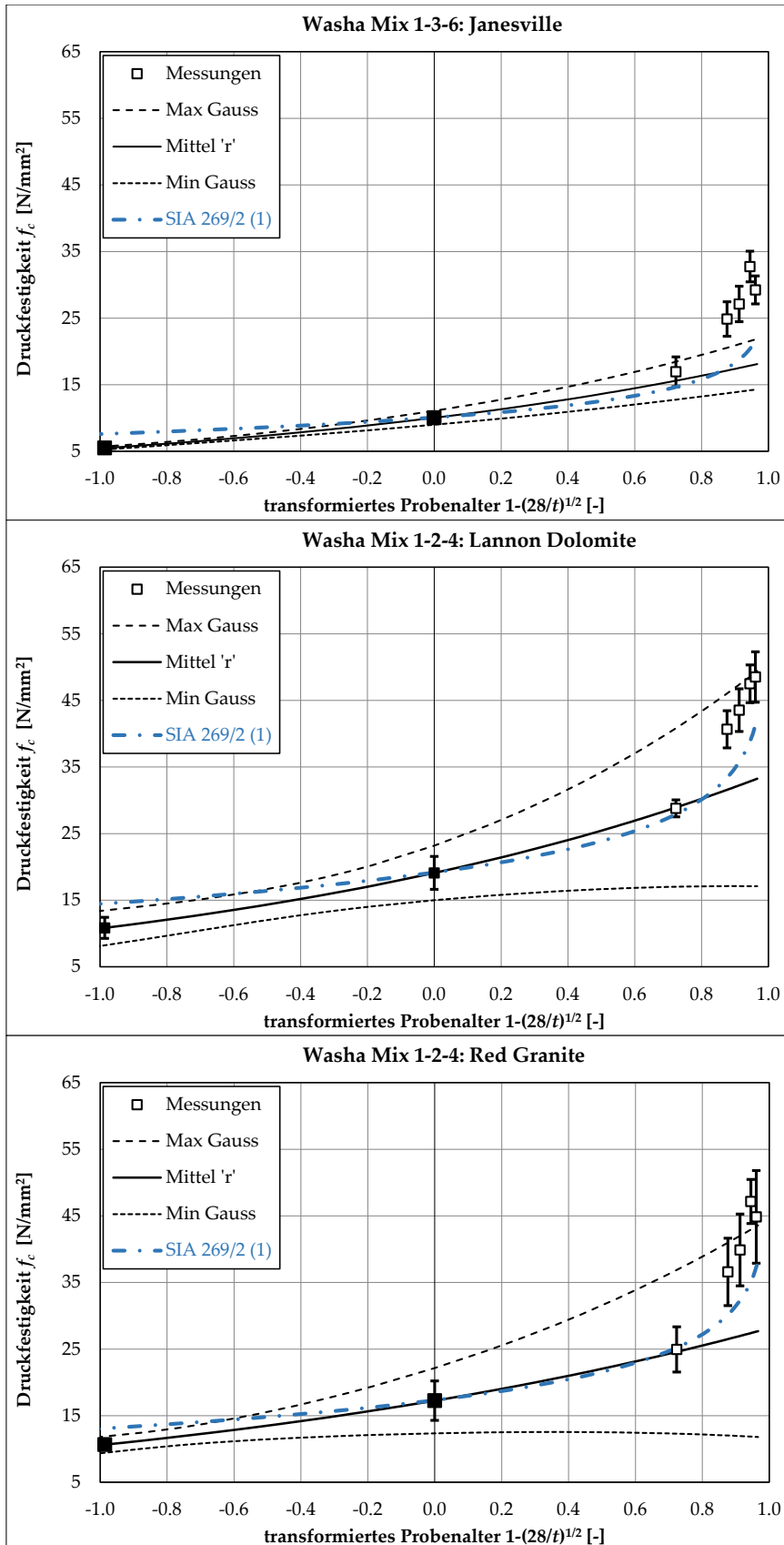


Bild A.63: Washa und Wendt: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; inklusive Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken; Teil 2; Daten aus [88].

A.6.2 Ohne Gauss'schem Fehlerband und Fehlerbalken

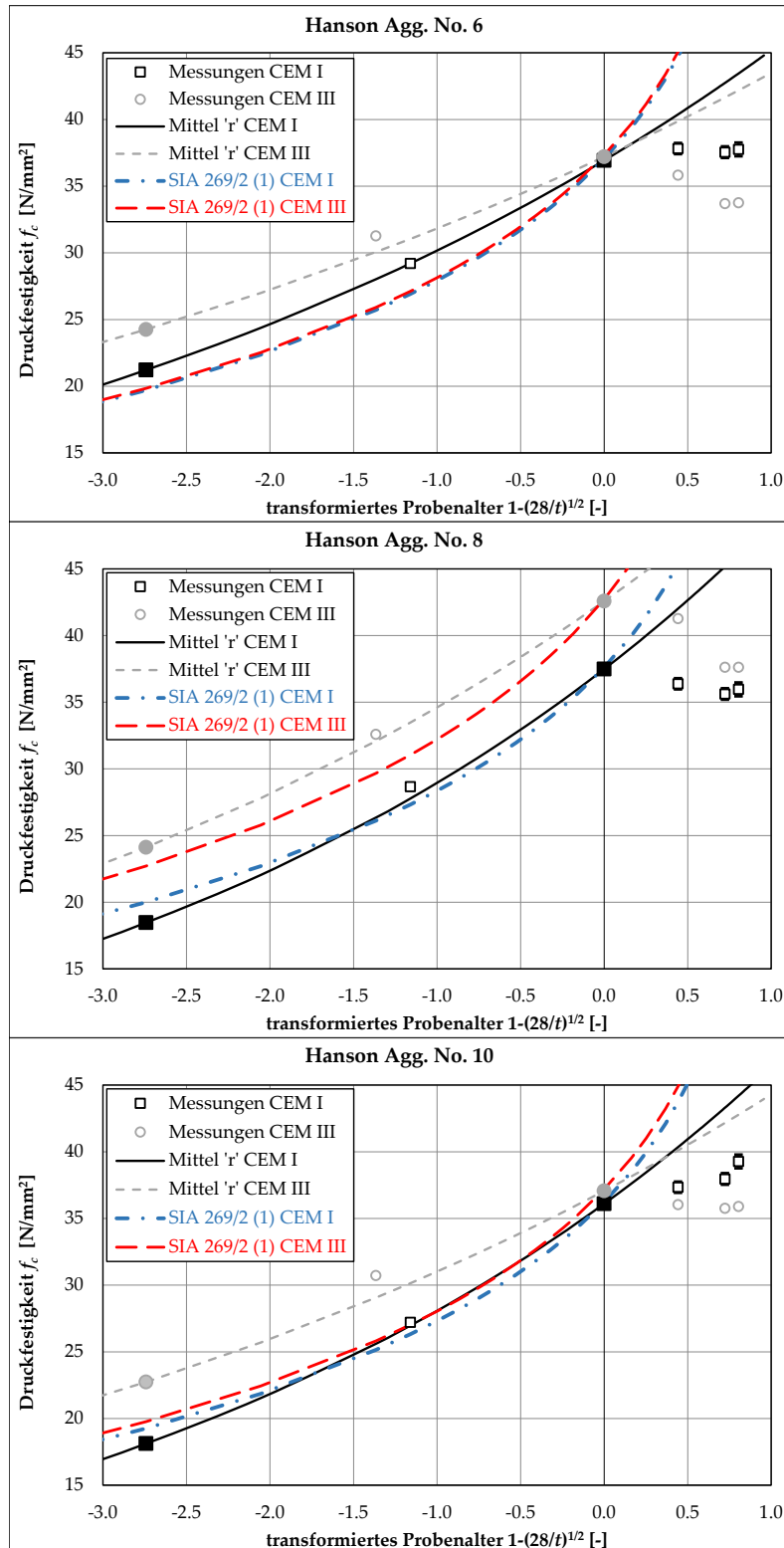


Bild A.64: Hanson: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; Daten aus [40].

A.6 Validation des r -Konzepts an «alten» Betonen

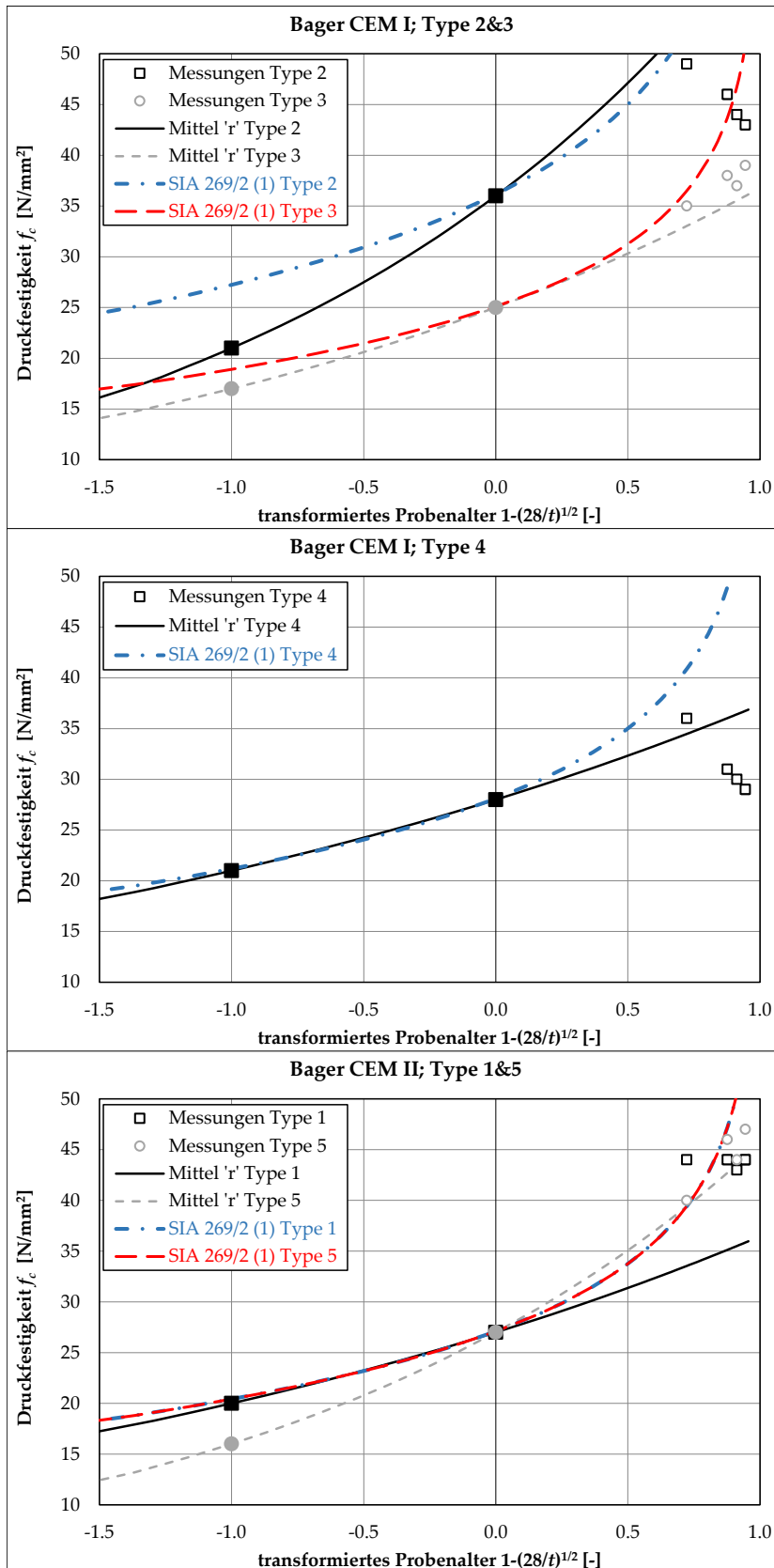


Bild A.65: Bager: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; Teil 1; Daten aus [4].

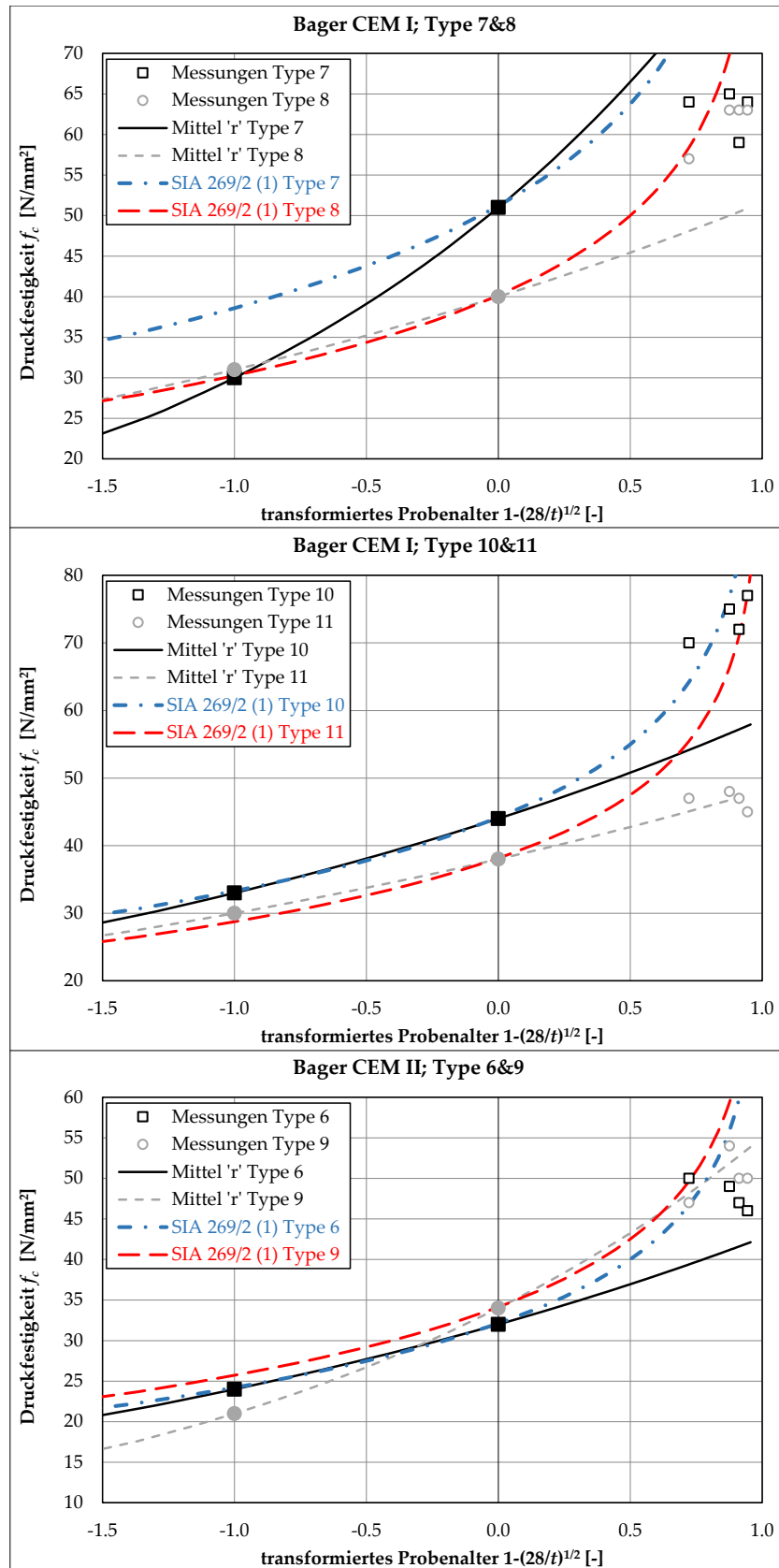


Bild A.66: Bager: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; Teil 2; Daten aus [4].

A.6 Validation des r -Konzepts an «alten» Betonen

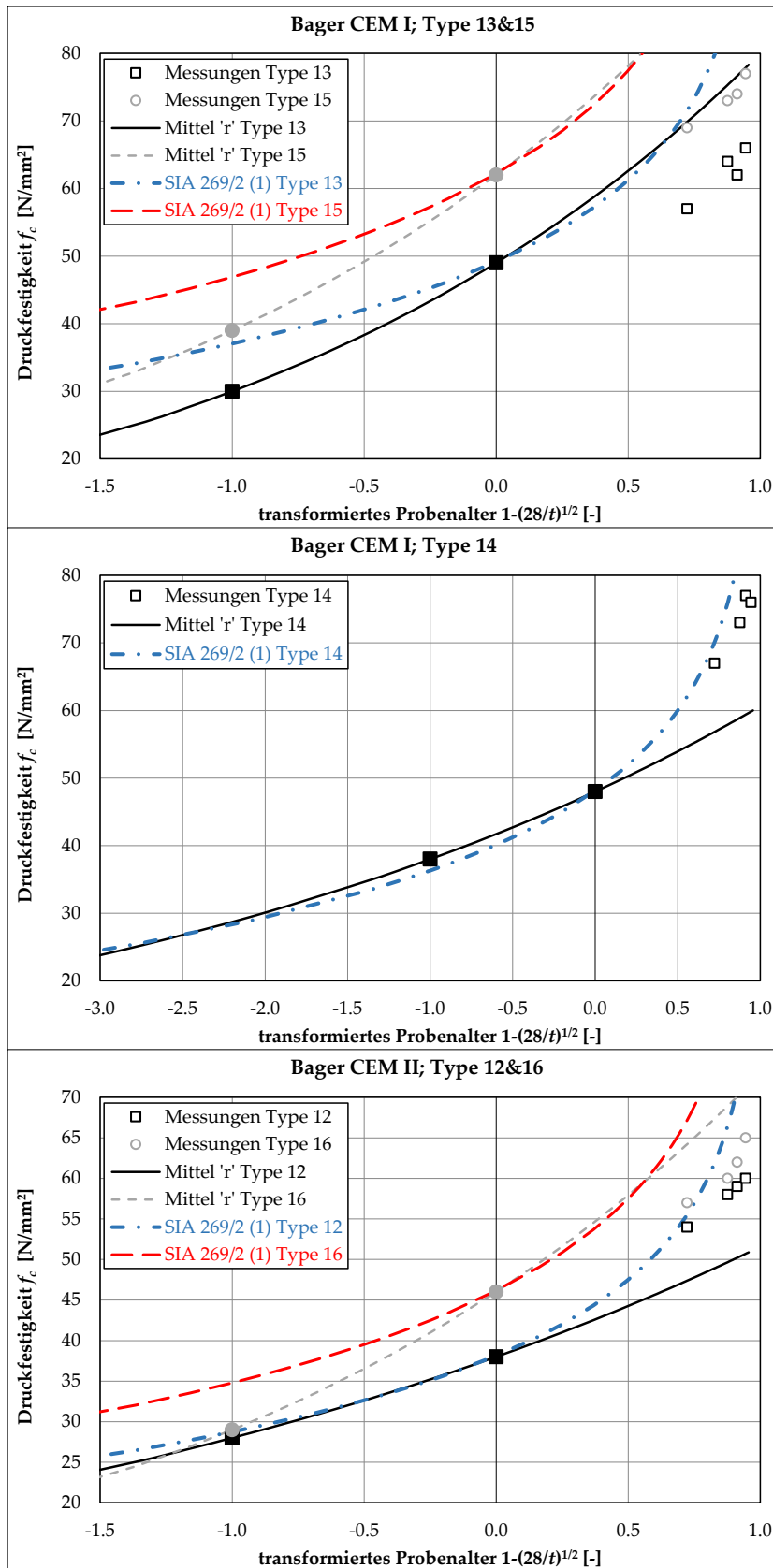


Bild A.67: Bager: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; Teil 3; Daten aus [4].

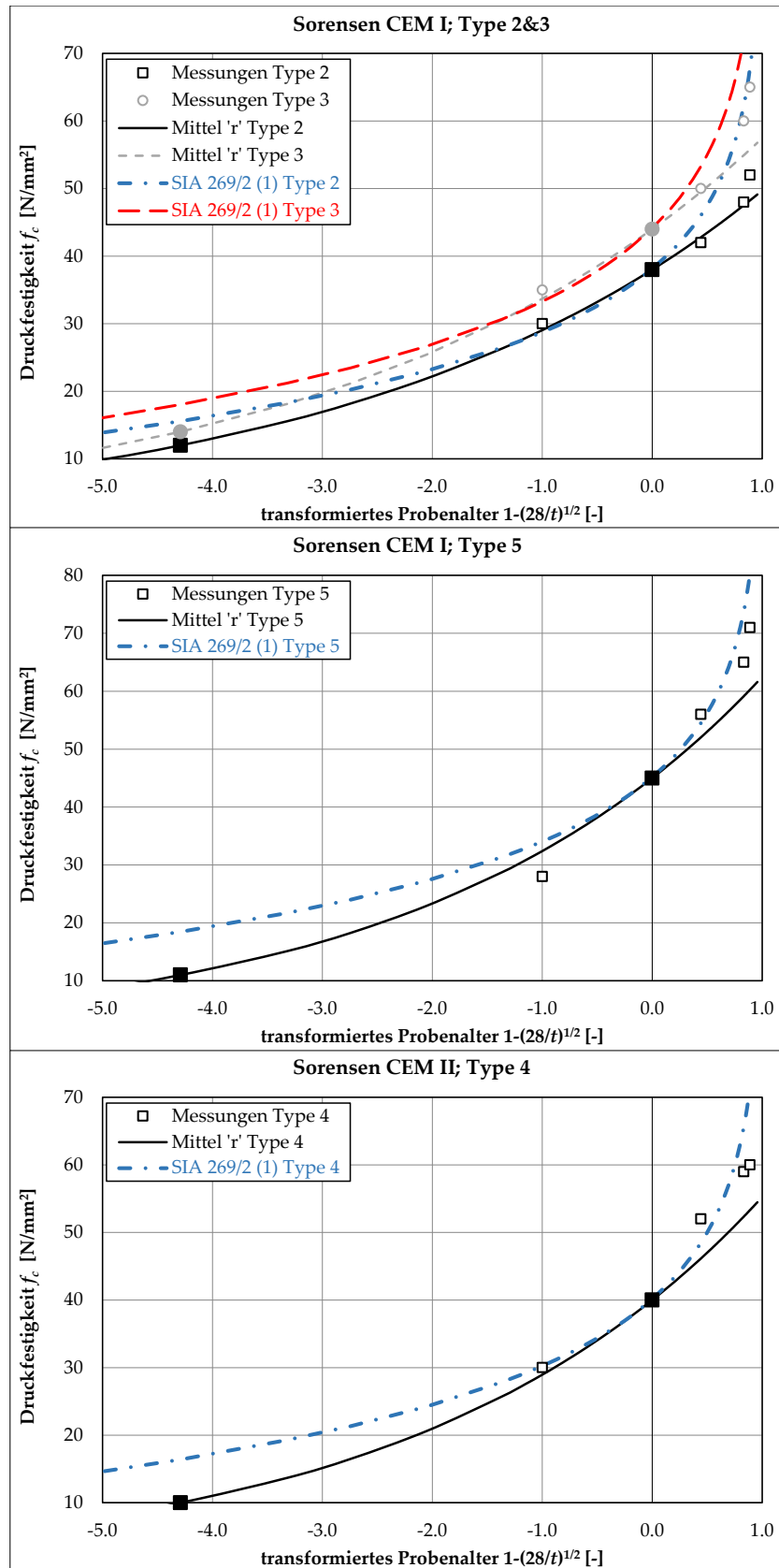


Bild A.68: Sorensen: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; Teil 1; Daten aus [82].

A.6 Validation des r -Konzepts an «alten» Betonen

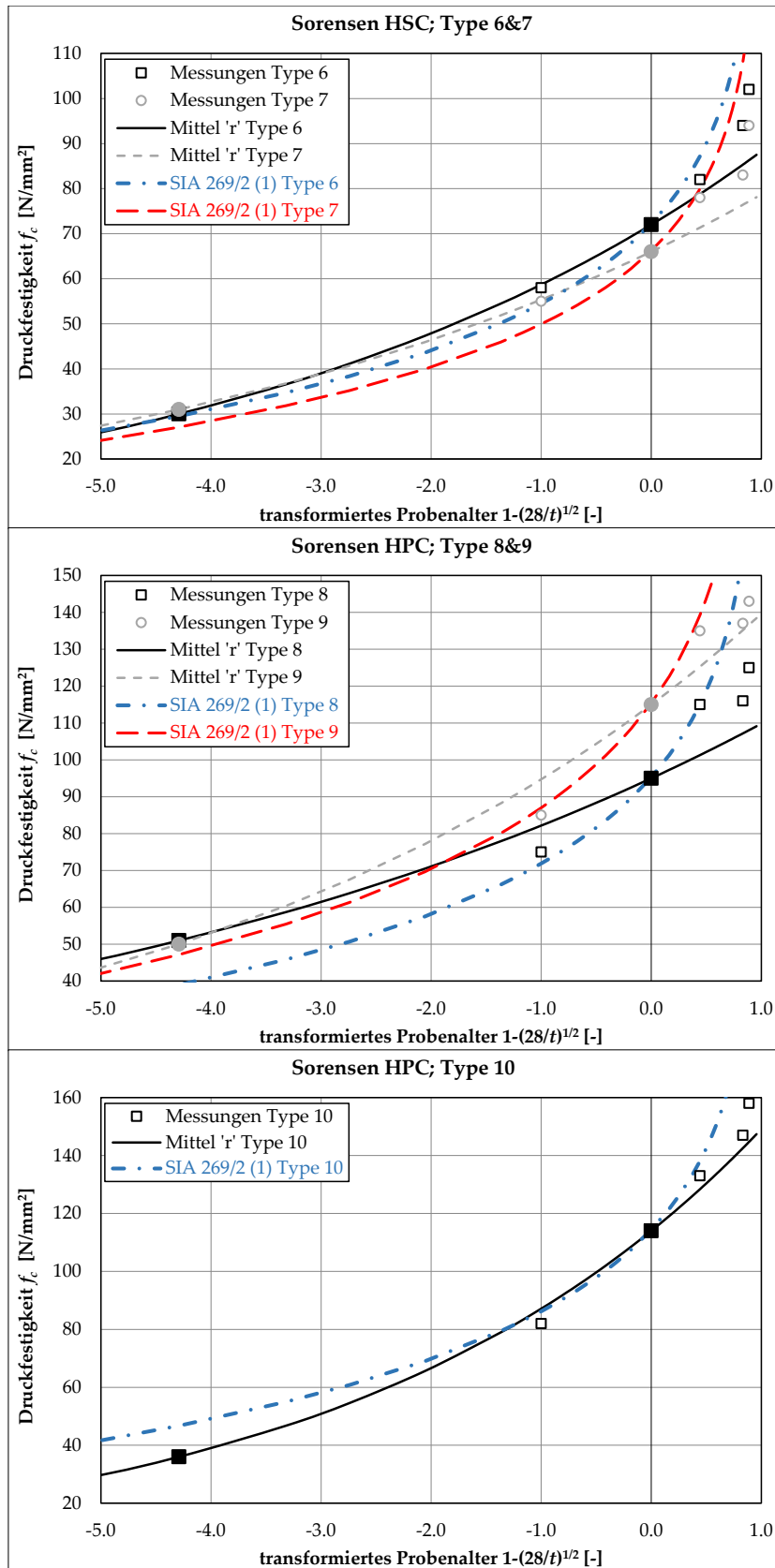


Bild A.69: Sorensen: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung; Teil 2; Daten aus [82].