

Untersuchungen zum Einfluss der Karbonatisierungstiefe auf Ergebnisse der Rückprallhammerprüfung zur verbesserten Ermittlung der Betondruckfestigkeit

Alexander TAFFE, BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung), Berlin
Sascha FEISTKORN, SVTI, Wallisellen
Christopher ICKERT, Fachhochschule Potsdam

Kurzfassung. Die Rückprallhammerprüfung ist seit Jahrzehnten ein national und international genormtes Prüfverfahren, aus dessen Messergebnissen die Betondruckfestigkeit abgeleitet werden kann. Bei Bestandsbauwerken ist jedoch der Einfluss der Karbonatisierung des Betons zu berücksichtigen. Dieser Einfluss beschränkt sich auf die Betonoberfläche und bewirkt eine Zunahme der Härte der Oberfläche, was sich auch in den Messwerten der Rückprallhammerprüfung – der Rückprallzahl – niederschlägt. Wird dieser Einfluss nicht korrigiert, so wird die – von der Karbonatisierung unbeeinflusste – Druckfestigkeit im Inneren des Betonbauteils überschätzt. In diesem Beitrag wird die Eignung eines Versuchskonzepts untersucht, den Einfluss der Karbonatisierung auf die Druckfestigkeit zu quantifizieren.

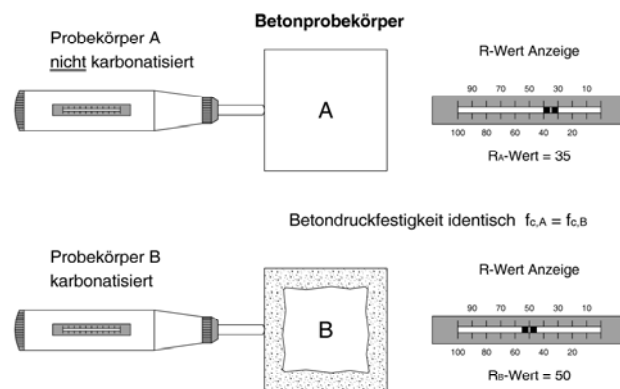
1 Normative Regelung der Rückprallhammerprüfung und ihre Grenzen

Die Rückprallhammerprüfung zur zerstörungsfreien Abschätzung der Druckfestigkeitsklasse am Bauwerk (Abbildung 1a) ist bereits seit Jahrzehnten normativ geregelt, zwischenzeitlich auch als europäische Norm [1]. Bei der Prüfung und der anschließenden Bewertung der Ergebnisse wird der Zusammenhang zwischen Oberflächenhärte und Betondruckfestigkeit ausgenutzt. Da Beton an frei bewitterten Bauwerken immer dem chemischen Prozess der Karbonatisierung durch Kohlendioxid der Atmosphäre ausgesetzt ist, führt dies zu einer Zunahme der Härte der Betonoberfläche, wobei die Druckfestigkeit im Betoninneren davon unbeeinflusst bleibt. Der Einfluss der Karbonatisierung auf die Messung der Rückprallzahl (R-Wert oder seit neuester Normfassung 2012-12 auch Q-Wert) ist in Abbildung 1b dargestellt.

Aufgrund der möglichen Überschätzung der Betondruckfestigkeit an Bestandsbauwerken, die i.d.R. Karbonatisierung aufweisen, erlaubt der nationale Anhang der DIN EN 13791 in Deutschland die alleinige Durchführung der Rückprallhammerprüfung zur Druckfestigkeitsermittlung nur bis zu einer Karbonatisierungstiefe von 5 mm [2]. In den übrigen Ländern der EU muss immer ein Zusammenhang zwischen Rückprallwerten und zerstörend ermittelten Betondruckfestigkeiten (Bohrkerne oder Würfel) in Form einer Umwertekurve aufgestellt werden. Obwohl der Einfluss der Karbonatisierung, der zu einer Überschätzung der tatsächlichen Betondruckfestigkeiten bei alleiniger

Rückprallhammerprüfung führt, jahrelang bekannt ist, existieren für europäische Betone keine Untersuchungen, die den Einfluss der Karbonatisierung des Betons auf die gemessenen Rückprallwerte quantifizieren. Das liegt u.a. an den sehr langfristig anzulegenden Versuchen, um eine ausreichende Karbonatisierung sicherzustellen.

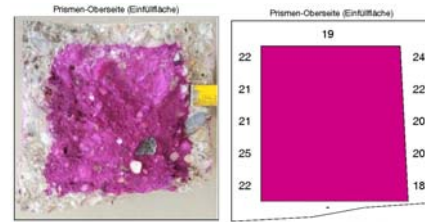
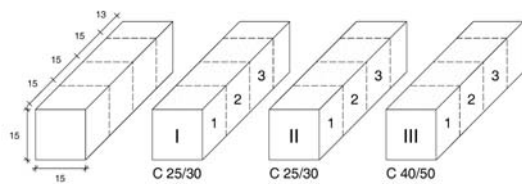
In diesem Beitrag wird ein Untersuchungskonzept vorgestellt, bei dem Betonprismen aus verschiedenen Betonmischungen mit erhöhter CO₂-Konzentration in einer Klimakammer beaufschlagt wurden. Innerhalb von etwa acht Monaten wurde eine Schnellkarbonatisierung mit nachfolgender Ermittlung der Rückprallzahl durchgeführt, Würfeldruckfestigkeiten und Karbonatisierungstiefen zerstörend bestimmt und daraus der Zusammenhang von Karbonatisierungstiefe und Rückprallzahl ermittelt. Die Ergebnisse geben auch Hinweise auf die Eindringtiefe der Schläge der Rückprallhammerprüfung und zeigen, wie groß die Überschätzung der tatsächlichen Betondruckfestigkeit ausfällt.



(a) (b)
Abbildung 1 (a) Messung der Rückprallzahl mit einem Rückprallhammer über Kopf an einer Brücke. (b) Wirkungsweise der Karbonatisierung auf die Messung der Rückprallzahl: Durch die Karbonatisierung des Betons an der Oberfläche (Würfel B) werden im Vergleich zum nicht karbonatisierten Beton (Würfel A) größere Rückprallzahlen (hier R-Wert) gemessen. Die Betondruckfestigkeit im Inneren des Betons wird dadurch überschätzt.

2 Versuchskonzept zur Ermittlung des Einflusses der Karbonatisierung auf die Rückprallzahl

Zum Nachweis der Eignung des Versuchskonzepts zur Ermittlung des Einflusses der Karbonatisierung auf die Rückprallzahl, das in [3] detailliert beschrieben ist, wurden drei Betonprismen mit einer Grundfläche von 15 x 15 cm² und einer Länge von 60 cm erstellt. Je Prisma konnten einschließlich Schnittverlust drei normgerechte Würfel geschnitten werden. Die Prismen wurden in einer Klimakammer bei 20°C, 65% rel. Luftfeuchte und mit einer konstanten CO₂-Konzentration von 3,0 Vol.-% eingelagert, was in etwa der 100-fachen Konzentration der normalen Atmosphäre entspricht.



(a) Herstellung der Betonwürfel aus Prismen, aus denen je nach Karbonatisierungsfortschritt Würfel geschnitten werden. Die Prismen bleiben im Klimaschrank unter erhöhter CO₂-Konzentration eingelagert. (b) Erzielte Karbonisierungstiefen an einem Würfel unter einer Konzentration von 3 Vol.-% CO₂ nach mehr als drei Monaten Schnellkarbonatisierung. [3]

Je nach Karbonatisierungsfortschritt wurden dann Würfel vom Prisma abgeschnitten und die Reste der Prismen wieder eingelagert. Da der Platz in der Klimakammer nur auf drei Prismen beschränkt war, konnte zunächst keine größere Anzahl an Würfeln realisiert werden. Um die Gleichmäßigkeit zwischen den Würfeln aus zwei unterschiedlichen Prismen zu überprüfen, wurden zwei Prismen der Betonfestigkeitsklasse C25/30 gefertigt. Um auch Rückprallzahlen an Würfeln höherer Betondruckfestigkeit messen zu können, wurde ein Prisma der Betondruckfestigkeitsklasse C40/50 hergestellt. Es wurde ein schnell erhärtender CEM I (32,5 R bzw. 42,5 R) mit w/z-Werten von 0,55 und 0,45 verwendet, um den Einfluss der Hydratation (Nacherhärtung) des Betons auf dessen Festigkeitseigenschaften weitgehend ausschließen zu können. Der erste Prüftermin wurde daher mehr als 100 Tage nach Herstellung der Betonprismen gewählt. Die nachfolgende Ermittlung der Betondruckfestigkeit zeigte, dass die Zunahme der Rückprallwerte primär auf die zunehmende Karbonatisierung und nicht mehr auf die nur noch sehr geringe zeitliche Zunahme der Betondruckfestigkeit zurückzuführen war. Die Prüfung der Rezeptur A (C25/30) erfolgte anschließend planmäßig 28-tägig, die von Rezeptur B erfolgte 56-tägig. Eine Übersicht der Prüftermine bzw. das daraus resultierende Alter der Würfel (Dauer der erhöhten CO₂-Beaufschlagung) bietet Tab. 1.

Tabelle 1: Übersicht der Prüftermine und Lagerungsdauer [3]

Prüftermin	Herstelldatum	Prüfdatum	Umlagerung	Alter [d]	Rezeptur
1	26.10.2011	15.02.2011	14.12.2011	112	C 25/30 u. C 40/50
2	26.10.2011	14.03.2011	14.12.2011	140	C 25/30
3	26.10.2011	11.04.2011	14.12.2011	168	C 25/30 u. C 40/50
4	26.10.2011	09.05.2011	14.12.2011	196	C 25/30
5	26.10.2011	06.06.2011	14.12.2011	224	C 25/30 u. C 40/50
6	26.10.2011	04.07.2011	14.12.2011	252	C 25/30

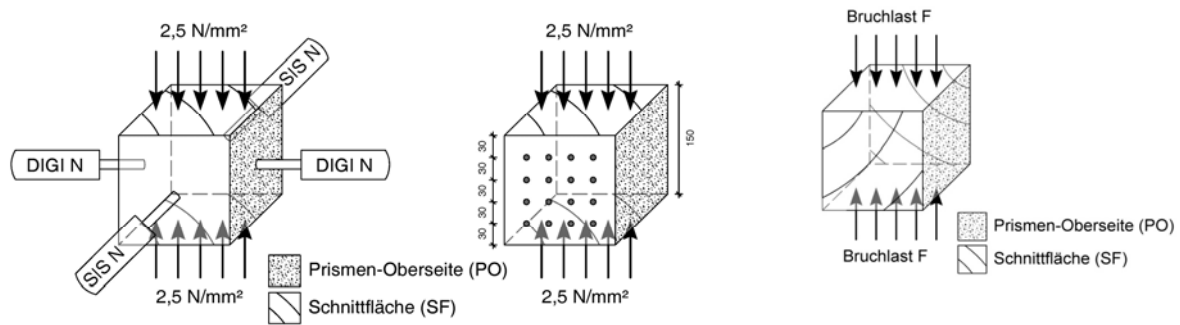


Abbildung 3 Konzept zur Messung der Rückprallzahl an vier Seiten des Würfels mit zwei Rückprallhämern (DIGI N => R-Wert und SIS N => Q-Wert) mit anschließender Messung der Betondruckfestigkeit durch eine Betonpresse [3]

Zur Bestimmung der Rückprallzahl – geräteabhängig als R- bzw. Q-Werte - wurden an vier Würfelseiten (mit Ausnahme der Schnittflächen) je 16 Messwerte aufgenommen. Von den vier Würfelseiten wurden jeweils die beiden gegenüberliegenden mit dem DIGISCHMIDT Typ N (R-Werte) bzw. dem SILVERSCHMIDT Typ N (Q-Werte) gemessen wie in Abbildung 3 dargestellt. Die Messwerte wurden i. d. R. in einem Raster von je vier Schlägen in vier Reihen aufgenommen (3 cm Randabstand, 3 cm zueinander). Im Bereich von Lunkern, freiliegender Gesteinskörnung oder ähnlichen Inhomogenitäten der oberflächlichen Zementmatrix wurden keine Schläge ausgeführt. Die Untersuchung der Prismen-Oberseite (PO) erfolgte mit Ausnahme des ersten Prüftermins mit dem DIGISCHMIDT Typ N. Die Prismen-Oberseite weist als Einfüllseite aufgrund des Herstellungsprozesses eine rauere Oberfläche auf. Dieser Umstand wurde bei der Auswertung der Messdaten beachtet. Während der Rückpralluntersuchungen waren die Probewürfel in einer Betonprüfmaschine unter einer Belastung von rd. 56 kN (2,5 N/mm²) eingespannt. Die Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3 durchgeführt.

Zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe wurde an jedem Messtermin nach Abdrücken des Würfels zunächst eine frische Betonbruchfläche durch Spaltung des Würfels orthogonal zur Prismenlängsrichtung mittels Hammer und Meißel hergestellt. Anschließend wurde die Phenolphthaleinlösung (1 %ig in 70 %igem Alkohol) auf die Bruchfläche aufgesprüht und Messungen der Farbumschlagsgrenze (farblos/violett) zur jeweiligen Prismenoberfläche vorgenommen. Zur Ermittlung der mittleren Karbonatisierungstiefe wurden je fünf Einzelwerte an den Prismenlängsseiten aufgenommen und aus den zehn Einzelwerten der arithmetische Mittelwert errechnet. Einen Eindruck der durchgeführten Bestimmung der Karbonatisierungstiefe vermittelt Abbildung 2b.

3 Rückprallzahlen an karbonatisiertem Beton vs. Betondruckfestigkeit

Die an den vier Seitenflächen gemäß Abbildung 3 der künstlich karbonatisierten Betonprüfkörpern ermittelten Medianwerte der Rückprallzahlen sind in Korrelation mit der zugehörigen, zerstörend ermittelten Betondruckfestigkeiten in Abbildung 4 dargestellt. Um die Messwerte (R- bzw. Q-Wert) beider verwendeter Rückprallhämmer (DIGI N und SIS N) im Folgenden vergleichend auszuwerten zu können, wurden die ermittelten Q-Werte in R-Werte umgerechnet. Die umgerechneten Q-Werte werden als R(Q)-Werte bezeichnet. Als Umrechnungsgleichung wurde $R=0,75*Q$ nach [4] auf der Basis von [5] gewählt. Da sich die Einfüllseite, hier auch Prismenoberseite (PO) genannt, in ihrer Oberflächenbeschaffenheit, verursacht durch den Herstellungsprozess, deutlich von den

anderen drei Seitenflächen unterscheidet, wurde sie durch das Kürzel PO und die Würfelnummer gekennzeichnet.

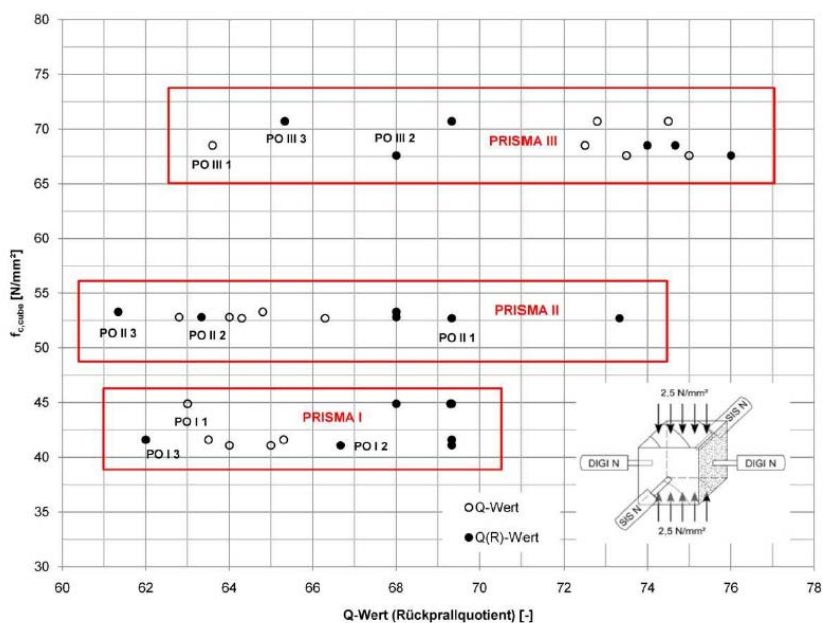
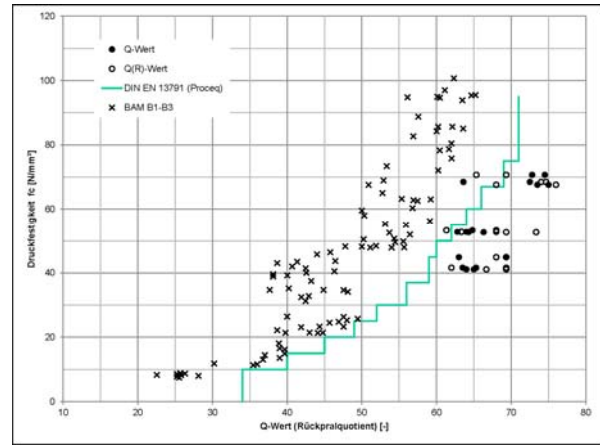
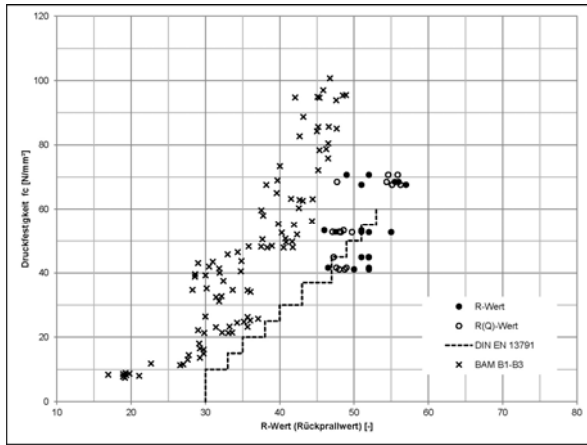


Abbildung 4 Zusammenhang von R-Wert und Betondruckfestigkeit f_c aufgelöst nach Prisma und Oberflächenbeschaffenheit (PO: Prismen-Oberseite) [3]

Die Datenpunkte in Abbildung 4 gruppieren sich aufgrund der verschiedenen Würfeldruckfestigkeiten in drei Cluster der einzelnen Prismen I bis III. Die Rückprallzahlen am Prisma höherer Betondruckfestigkeit sind erwartungsgemäß größer. Es fällt weiterhin auf, dass die an der Prismenoberseite (PO), d.h. der Einfüllseite, gemessenen mittleren Rückprallzahlen deutlich niedriger sind, als die an den übrigen Seiten ermittelten Werte. Der Einfluss der raueren Oberfläche scheint mit zunehmender Betondruckfestigkeit zuzunehmen. Aufgrund der begrenzten Anzahl von Probekörpern ist es nicht möglich, aus den ermittelten Wertepaaren eine eigene Umwertekurve zu erstellen.

In Abbildung 5 werden die an karbonatisierten Würfeln gewonnenen Wertepaare (\bullet , \circ) mit Würfeln ohne Karbonatisierung (\times) verglichen. Die hier genutzten und mit (\times) gekennzeichneten Referenzwerte wurden einem im Jahr 2009 an der BAM ermittelten Datensatz entnommen. Dieser besteht aus insgesamt 105 Probekörpern (3 Rezepturen á 35 Probekörper). Ausführliche Informationen zu diesem Datensatz sind in [Fei2010] enthalten. Zusätzlich sind in Abbildung 5 die Tabellenwerte des Nationalen Anhangs der DIN EN 13791 zur direkten Einordnung von R-Werten in Betondruckfestigkeitsklassen als Treppenkurve eingearbeitet. Die an den karbonatisierten Probewürfeln ermittelten Rückprallzahlen unterscheiden sich erheblich von denen des Referenzdatensatzes. Alle an karbonatisierten Würfeln ermittelten Rückprallzahlen sind, bei gleicher Betondruckfestigkeit, größer als die Rückprallzahlen der nicht karbonatisierten Würfel. Würde man, ungeachtet der nach Norm [2] maximal zulässigen Karbonatisierungstiefe von 5 mm, die mit dem Rückprallhammer geprüften Betonprobewürfel in Betondruckfestigkeitsklassen einordnen, so wäre die ermittelte Betondruckfestigkeit bei fast allen Rückprallzahlen rechts von der Treppenkurve, d.h. auf der unsicheren Seite. Die Betondruckfestigkeiten würden demnach überschätzt werden. Dies gilt insbesondere für die an den Schalseiten der Würfel ermittelten Werte. Da die untersuchten Würfel mit Karbonatisierungstiefen von mehr als 15 mm deutlich über dem 5-mm-Kriterium nach DIN EN 13791 liegen, liefert das einen Hinweis darauf, dass dieses Kriterium eine Bewertung der Betondruckfestigkeit auf der sicheren Seite liefert.



(a) (b)
Abbildung 5 Die R-Werte (a) und Q-Werte (b) des karbonatisierten Betons (●,○) liegen bei gleicher Betondruckfestigkeit deutlich höher als an nicht karbonatisiertem Beton (x). Die meisten Messwerte liegen rechts der gestrichelten Treppenkurve der DIN EN 13791, d.h. im unsicheren Bereich. [3]

4 Rückprallzahlen an karbonatisiertem Beton vs. Karbonisierungstiefe

Die Auswertung der Karbonisierungstiefen gemäß Kap. 2 ergab eine Zunahme mit der Zeit. Der ermittelte Zusammenhang zwischen Karbonisierungstiefe und Rückprallzahl ist in Abbildung 6 dargestellt. Man erkennt deutlich, dass eine Zunahme der Karbonisierungstiefe für den hier untersuchten Bereich zwischen 15 und 25 mm nicht zu einer Zunahme der Rückprallzahl führt. Dieser fehlende Zusammenhang für Karbonisierungstiefen von mehr als 15 mm lässt Rückschlüsse auf die Eindringtiefe der verwendeten Rückprallhämmer zu.

Es wäre zu erwarten, dass Rückprallzahlen bis zu einer bestimmten Grenztiefe der Karbonisierung zunehmen. Ab dieser Grenze sollte keine Zunahme der Werte trotz erhöhter Karbonisierungstiefe zu beobachten sein. Die Messergebnisse legen den Schluss nahe, dass bei einer Karbonisierungstiefe von 15 mm diese Grenztiefe bereits erreicht ist, weil für größere Karbonisierungstiefen keine Zunahme der Rückprallzahl mehr erfolgt.

Oftmals ist in der Literatur von einer Eindringtiefe von 30 mm zu lesen. Dieser Wert geht auf Untersuchungen von *Chefdeville* zurück, die in [6] beschrieben werden. Im Rahmen seiner Versuchsreihe wurden Probekörper bestehend aus einem Kernbeton geringerer Betondruckfestigkeit und einer Beton-Oberschicht höherer Betondruckfestigkeit ($R=48$) untersucht. Dabei wurde die Dicke der Oberschicht variiert. Es wurde festgestellt, dass der Rückprallwert bei einer Dicke der Oberschicht von weniger als 3 cm sowohl vom Beton der Oberschicht, als auch des Kerns beeinflusst wird (R-Werte kleiner als 48). Diese Ergebnisse zeigen aber auch, dass eine Zunahme der Dicke der Oberschicht bis 15 mm einen Zuwachs der Rückprallzahl R von 24 auf 44 und damit rd. 85% des Zuwachses ausmacht. Eine Zunahme der harten Beton-Oberschicht um weitere 15 mm führt nur noch zu einer Zunahme der Rückprallwerte R von 44 auf 48. Über Streuungen wird in den Versuchen nicht berichtet.

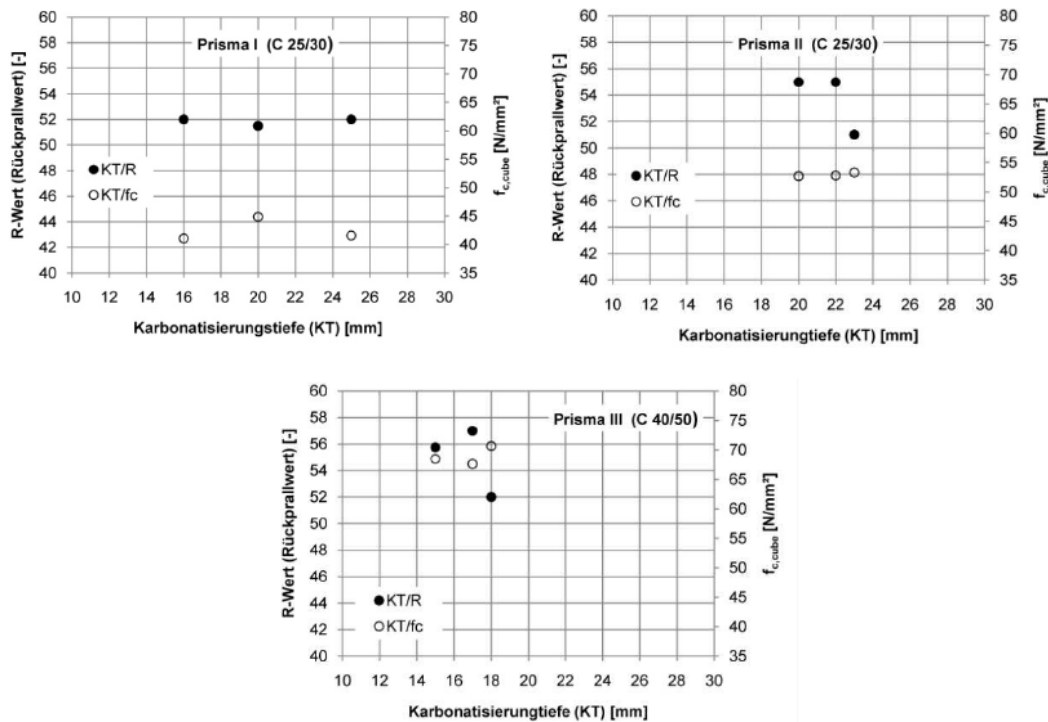


Abbildung 6 Darstellung der gemessenen Rückprallzahlen (Q-Werte wurden der besseren Übersicht halber in R-Werte umgerechnet) und der zugehörigen Karbonatisierungstiefen für alle Würfel aus den drei Prismen. Für die hier vorhandenen Karbonatisierungstiefen von mehr als 15 mm konnte kein Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe und Rückprallzahl festgestellt werden. Ein funktionaler Zusammenhang ergibt sich möglicherweise für geringere Karbonatisierungstiefen. [3]

Vor diesem Hintergrund sind die hier erzielten Ergebnisse, die auf eine Eindringtiefe von weniger als 15 mm hindeuten, plausibel. Insbesondere beim Rückprallhammer mit Messung des Q-Wertes ist die Kontaktzeit des Schlaggewichts gerätetechnisch bedingt kürzer als beim Rückprallhammer mit Messung des R-Werts, so dass geringere Eindringtiefen eher wahrscheinlicher sind.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das umgesetzte Versuchskonzept zur Ermittlung des Einflusses der Karbonatisierungstiefe auf die Rückprallzahl und die Betondruckfestigkeit hat sich in weiten Teilen als erfolgreich erwiesen [3]. Die Probenherstellung in Form von Prismen mit Würfeln, die mit zunehmendem Karbonatisierungsfortschritt vom Prisma abgeschnitten werden, hat sich aufgrund der geringen Streuung der Betondruckfestigkeiten der Betonwürfel bewährt. Die Erfassung von 16 Messwerten je Würfel fläche hat sich ebenfalls als vorteilhaft erwiesen, wobei bei der Auswertung unbedingt die Einfüllseiten von den drei geschalteten Seiten unterschieden werden müssen. Das Einspannen der Würfel mit den geschnittenen Seiten in die Betonpresse zur Messung der Rückprallzahl unter 2,5 N/mm² Last ist alternativlos. Zur Ermittlung der Würfel druckfestigkeit wird der Würfel mit zwei gegenüberliegenden geschalteten Seiten eingespannt.

Auch die Schnellbewitterung der Prismen mit einer CO₂-Konzentration von 3 Vol.-% hat sich bewährt. Die Verwendung von CEM I hat bewirkt, dass schon nach 90 bis 100 Tagen Probenlagerung der Zuwachs der Betondruckfestigkeit infolge Hydratation gering gegenüber dem Zuwachs durch Karbonatisierung des Betons ist. Allerdings wurde bereits nach 100 Tagen eine Karbonatisierungstiefe von 15 mm erreicht, was sich nachteilig auf die

Beantwortung der Frage nach einem Zusammenhang von Karbonatisierungstiefe und Zuwachs der Rückprallzahl ausgewirkt hat. Dazu wären Karbonatisierungstiefen von wenigen Millimetern geeigneter gewesen. Daher sollte bei weiteren Versuchen eine Wasserlagerung der Prismen erfolgen, bis der Einfluss der Hydratation abgeklungen ist. Erst nach der Wasserlagerung sollte die Schnellbewitterung erfolgen.

Für eine umfangreichere Versuchsreihe, die auch eine Aufstellung von Umwertekurven erlaubt, sind Betone mehrerer Betonfestigkeitsklassen erforderlich. In [3] wird basierend auf den hier vorgestellten Ergebnissen eine Versuchsreihe mit fünf Betondruckfestigkeitsklassen (C12/15, C20/25, C30/37, C40/50, C50/60) mit je zwei Prismen à vier Würfel vorgeschlagen. Daraus ergibt sich Platzbedarf in der Klimakammer für zehn Prismen mit Abmessungen von 15 x 15 cm² und einer Länge 65 cm (einschl. Schnittverlust für vier Würfel). In jedem Fall sollten die Ergebnisse in Abhängigkeit der Rauigkeit der Oberfläche (Unterscheidung Einfüll- oder Schalseite) aufgenommen werden.

6 Referenzen

- [1] DIN EN 12504-2 Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung; Bestimmung der Rückprallzahl; Deutsche Fassung EN 12504-2:2012, Ausgabe:2012-12, Beuth Verlag, Berlin
- [2] DIN EN 13791 Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen; Deutsche Fassung EN 13791:2007, Ausgabe:2008-05, Beuth Verlag, Berlin
- [3] Ickert, C.: Einfluss der Karbonatisierung auf die Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton mittels Rückprallhammer, Masterarbeit, FH Potsdam 2013
- [4] Proceq: Wertetabelle zum nationalen Normenanhang EN13791. Schwerzenbach 2011
- [5] Feistkorn, S.: Erstellung von Umwertekurven für Betonprüfhämmer der neuen Generation. BAM Berlin 2010 (nicht veröffentlicht)
- [6] Wesche, K.: Kritische Betrachtung der Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung des Betons im Bauwerk. In: Bau und Bauindustrie 10 (1960), H.1, S. 9-15