

c/o

Universität Stuttgart

Institut für Werkstoffe im Bauwesen

Pfaffenwaldring 4

70569 Stuttgart

Ansprechpartner/in

Prof. Dr. Jan Hofmann

Gutachterliche Stellungnahme

zu nachträglichen Verankerungen in
vorgespannten Hohldeckenplatten

Kunde: Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken e.V.
Sitz: Paradiesstr. 208, 12526 Berlin
Geschäftsführer: Dr.-Ing. Stefan Seyffert

Berichts-Nr.: FAST 22-001

Datum: 22.03.2022

Rev.	Datum	Seite	Kommentare	Autor
0	28.02.2022	19	Entwurfsdokument	HOJ
1	22.03.2022	19	Finale Korrekturversion	POT/HOJ

This report comprises 19 pages. This document shall not be published, copied or shared with a third in whole or in extract and its use for promotional purposes is not permitted without the author's consent.

1	EINLEITUNG	3
2	LITERATUR	4
3	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	5
3.1	Allgemeines	5
3.2	Versuche zur Tragfähigkeit	7
3.3	Versuche zur Karbonatisierung	8
4	VERSUCHSERGEBNISSE	9
4.1	Versuche zur Tragfähigkeit	9
4.2	Versuche zur Karbonatisierung	13
4.3	Prognose der Karbonatisierungstiefe	16
5	ZUSAMMENFASSUNGEN	19

1 EINLEITUNG

Der Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken e.V. beauftragt das Technologie Transfer Zentrum der Universität Stuttgart mit der Auswertung und Bewertung der am Institut für Werkstoffe durchgeführten Versuche.

Nach den derzeitigen Regelungen dürfen Verankerungen in vorgespannten Hohldeckenplatten nur in einem Abstand von 50 mm zur Spannlitze angeordnet werden, da nach EN 1992-4, Anhang F die folgende Regelung gilt:

„Die Bewehrung in der Nähe des Bohrloches sollte während des Bohrens nicht beschädigt werden. In vorgespannten Betonbauteilen muss der Abstand zwischen dem Bohrloch und der vorgespannten Bewehrung mindestens 50 mm betragen; für die Bestimmung der Position der vorgespannten Bewehrung im Bauwerk darf ein geeignetes Gerät, z. B. ein Bewehrungssuchgerät, verwendet werden.“

In CEN/TR 17079 Z sind folgende Ergänzung für die Anwendung in Hohldeckenplatten enthalten:

„In vorgefertigten Spannbeton-Hohlbauteilen darf die Mindestverankerungslänge auf einen Wert verringert werden, der das ordnungsgemäße Funktionieren bei Einbau in einen Flansch (Wand) mit einer Mindestdicke von 17 mm sicherstellt. In diesem Fall wird die in der entsprechenden Europäischen Technischen Produktspezifikation angegebene Mindestverankerungslänge und die zulässige Lage des Befestigungsmittels in der Hohlplatte eingehalten.“

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, den minimalen Abstand von 50 mm zu den angeordneten Spannlitzen zu reduzieren. Dazu wurden 2 unterschiedliche Aspekte untersucht.

Zum einen wurde untersucht, ob die Tragfähigkeit der Hohldeckenplatten durch Verankerungen direkt unterhalb der Spannlitze reduziert, bzw. der Verbund gestört wird, zum anderen wurde die Karbonatisierung des Betons untersucht, um die Korrosionsgefahr der Spannlitze abzuschätzen. Beide Untersuchungen wurden im Labor des Instituts für Werkstoffe durchgeführt. Die Ergebnisse sind detailliert im Prüfbericht [5] zusammengefasst.

2 LITERATUR

- [1] ISO-1920-12 (2015): Testing of concrete-Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete-Accelerated carbonation method. International Organization for Standardization.
- [2] Christoph Gehlen: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, RWTH Aachen.
- [3] BAWMerkblatt: Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC) Ausgabe 2019.
- [4] Dr. Fritz Hunkeler; Dr. Stefanie von Greve-Dierfeld: Karbonatisierung von Beton und Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung im karbonatisierten Beton, Forschungsprojekt AGB 2013/005 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), April 2019.
- [5] Vinay Mahadik: Anchoring in vicinity of Prestressed Tendons Structural Behaviour and Carbonation Measurements, Test Report Institute of Construction Materials Fastening Technology Department, University of Stuttgart, 2022.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

3.1 Allgemeines

Eine Übersicht der erforderlichen Untersuchungen ergibt sich aus der Zielsetzung. Die durchgeführten Untersuchungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die Untersuchungen werden unterteilt in Untersuchungen zur Tragfähigkeit und zur Dauerhaftigkeit bezüglich Karbonatisierung.

Die Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Hohldeckenplatten, in denen Verankerungen direkt unterhalb der Spannmitte eingebaut werden, sind unterteilt in Versuche ohne Verankerungen (Referenzversuche) und Versuche mit vollständiger Verdübelung unterhalb einer Spannmitte (Maximalverankerung). Bei den Untersuchungen werden nur die Tragfähigkeit der Hohldeckenplatten untersucht und welchen Einfluss die vorhandenen Bohrungen auf die Tragfähigkeit haben. Der Einfluss einer zusätzlich angreifenden Belastung durch die Dübel wird nicht untersucht. Es wird vielmehr davon ausgegangen, dass diese Belastung bei der Bemessung der Hohldeckenplatten bereits berücksichtigt ist. Auch ein möglicher Spannkraftverlust und die damit verbundene Abnahme der Gesamtfestigkeit der vorgespannten Platte muss bewertet werden, da durch die vorhandenen Bohrungen die effektive Überdeckung des Spannstrahls verringert wird.

Tabelle 3-1: Durchgeführte Versuche zur Tragfähigkeit und zur Karbonatisierung von Hohldeckenplatten mit Verankerungen im Bereich der Spannmitte.

Versuch zur Tragfähigkeit	n_{test}	Bezeichnung Prüfbericht
Tragfähigkeit ohne Bohrungen (Referenzversuch)	3	REF-1To3
Tragfähigkeit mit Bohrungen	3	HOLE-1To3
Versuche zur Dauerhaftigkeit		
nach 7 Tagen	5	N _{Otest} - N _{Ohole}
nach 30 Tagen	1	
nach 51 Tagen	5	
nach 72 Tagen	5	
nach 90 Tagen	8	

Bei den Untersuchungen zur Karbonatisierung ist zu beachten, dass der Karbonatisierungsfortschritt mit der Zeit auch von der Rezeptur und der Betonqualität, insbesondere der Porosität und dem Zementgehalt und Zementart (bzw. der Bindekapazität von CO₂) abhängt. Daher sind die in diesem Gutachten dargestellten Auswertungen und Bewertungen nur für den untersuchten Beton gültig. Die genaue Rezeptur des in den Versuchen verwendeten Betons ist dem Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken e.V. bekannt und wird hier aus Datenschutzgründen nicht aufgeführt.

Grundsätzlich sind jedoch die folgenden Werte einzuhalten:

w/z Wert:	0,40 +/- 0,1
Zementgehalt:	>300 kg/cbm
Rohdichte:	>2400 kg/cbm, mit sehr geringer Porosität
Größtkorn:	< 16 mm

3.2 Versuche zur Tragfähigkeit

Für die Versuche zur Tragfähigkeit wurden Ausschnitte aus Hohldeckenplatten verwendet, die jeweils eine Länge von 1,5 m hatten und 37,5 cm breit waren. Die Breite ergab sich aus der Geometrie der Hohlräume. Die Breite ergibt sich insgesamt aus der 2-fachen Breite der Hohlräume plus der Breite von 2 Stegen. In der Mitte des Querschnitts ist jeweils ein vollständiger Hohlraum angeordnet. An den jeweiligen Rändern ist dann jeweils ein halber Hohlraum vorhanden, sodass die Stege symmetrisch zur Breite im ca. $\frac{1}{4}$ Punkt angeordnet sind.

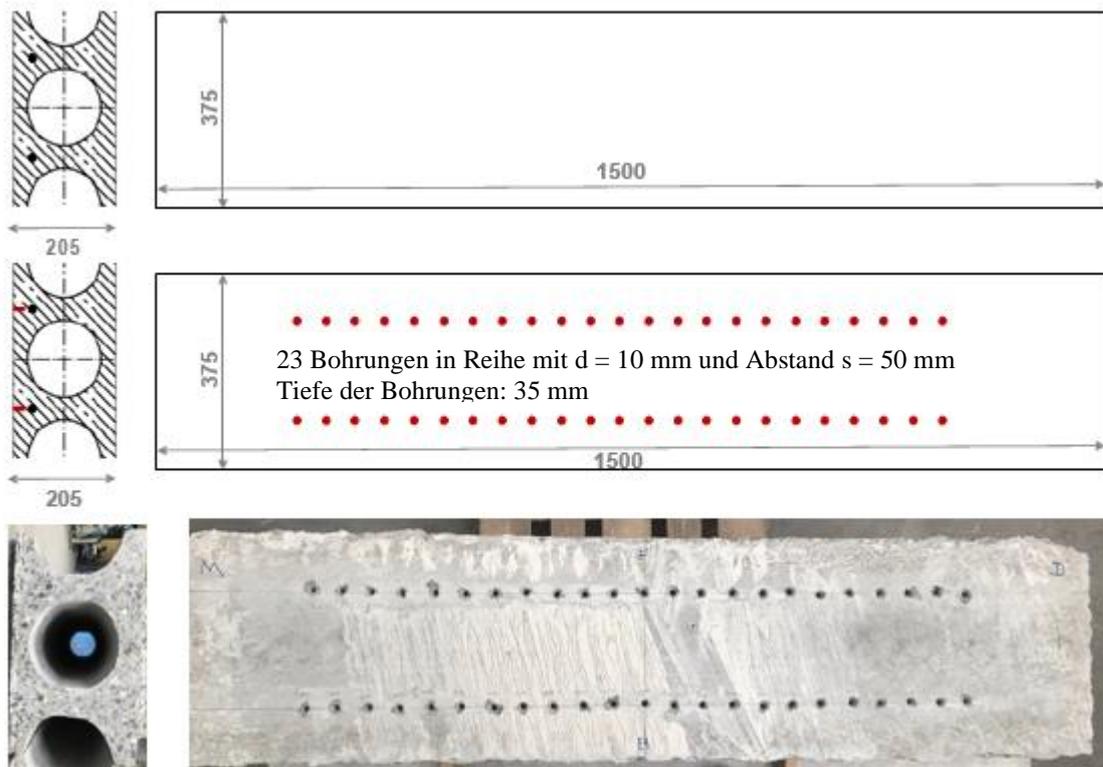


Bild 3-1: Darstellung der Ausschnitte aus den Hohldeckenplatten (oben ohne Bohrung, Mitte und unten mit Bohrungen).

Es wurden Versuche ohne Bohrungen (Referenzversuche) und Versuche mit Bohrungen durchgeführt. Dazu wurden Hohldeckenplatten aus der gleichen Fertigung verwendet. Bei den Versuchen mit Bohrungen wurden direkt unterhalb der Spannlitze Bohrungen mit einem Durchmesser $d_0 = 10$ mm und einer Tiefe $h_0 = 35$ mm angeordnet. Die Bohrungen wurden unterhalb beider Spannlitzen mit einem Abstand von $s = 50$ mm gebohrt (ca. 20 Bohrungen pro m Spannlitze).

Für die verwendeten Hohldeckenplatten betrug die Betondeckung zur Spannlitze nominell $c_{\text{nom}} = 35 \text{ mm}$.

3.3 Versuche zur Karbonatisierung

Die Versuche zur Karbonatisierung wurden mit der Methode der beschleunigten Karbonatisierung nach ISO-1920-12 (2015) [1] durchgeführt. Für den zu untersuchenden Beton wird empfohlen, die Versuche unter kontrollierten Bedingungen durchzuführen. Die Bedingungen sind wie folgt:

- Temperatur sollte zwischen 18 °C und 29 °C liegen
- Die relative Luftfeuchtigkeit sollte zwischen 50% und 70% liegen
- Die CO_2 -Konzentration sollte bei $3,0 \% \pm 0,5 \%$. Diese Umgebung sorgt für das beschleunigte Karbonatisieren des Betons.

Es wird empfohlen, die Karbonisierungstiefe nach einer Expositionsdauer von 56, 63 und 70 Tagen zu messen. Im Falle einer einmaligen Messung ISO-1920-12 (2015) [1] wird die Ermittlung der Karbonisierungstiefe nach 70 Tagen und ein Aufspalten der Probekörper für die Messung empfohlen.

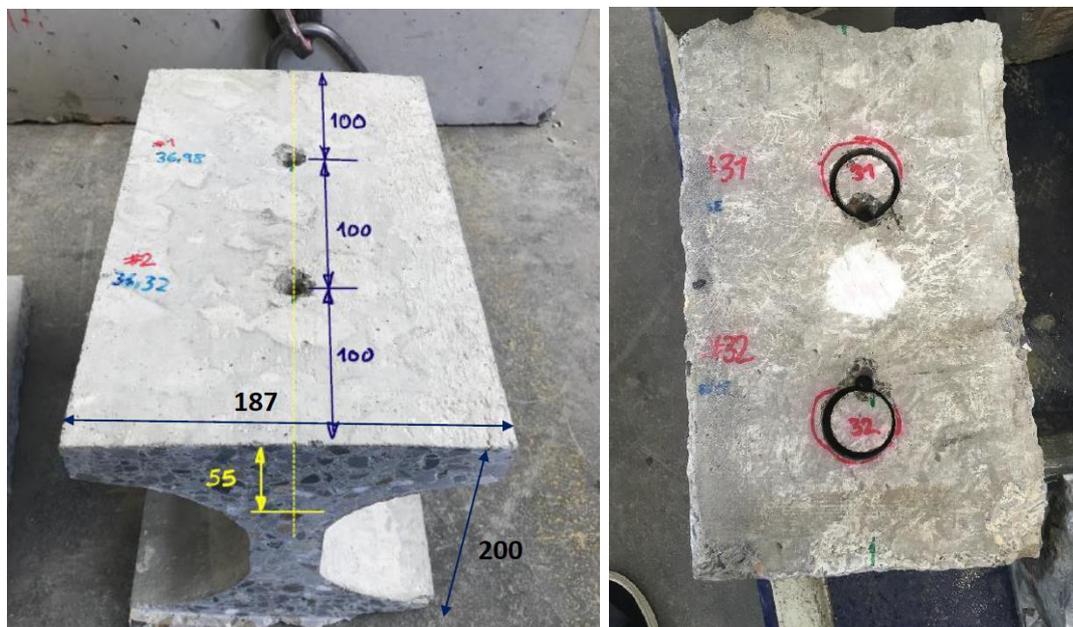


Bild 3-2: Darstellung der Ausschnitte aus den Hohldeckenplatten für die Messung der Karbonisierungstiefe unter beschleunigter Karbonatisierung nach DIN ISO-1920-12; **links:** gesamter Ausschnitt mit Bohrungen im Bereich der Spannlitze, **rechts:** Bohrkernanordnung im Bereich der Messungen.

4 VERSUCHSERGEBNISSE

4.1 Versuche zur Tragfähigkeit

In der folgenden Tabelle sind die Versuchsergebnisse zur Ermittlung der Tragfähigkeit mit und ohne Bohrungen zusammengefasst. In den ersten Versuchen mit und ohne Bohrungen unterhalb der Spannlitze wurde der Schlupf der Spannlitze nicht gemessen. Im Zuge der ersten Untersuchungen wurde jedoch beobachtet, dass der Schlupf der Spannlitze im Bereich der Bruchlast signifikant ist. Daher wurde er bei den folgenden Versuchen die Verschiebung der Spannlitze und die Durchbiegung des Balkens gemessen und dokumentiert.

Die Ergebnisse der Versuche zur Tragfähigkeit sind in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Die Verschiebungsmessungen wurden in Balkenmitte im Bereich der Belastung vorgenommen. Die Versuche wurden an einem 3-Punkt Biegebalken, wie im Prüfbericht [5] ausführlich beschrieben, ermittelt. Die Verschiebung der Spannlitze wurde über dem Auflager am Ende des Probekörpers gemessen.

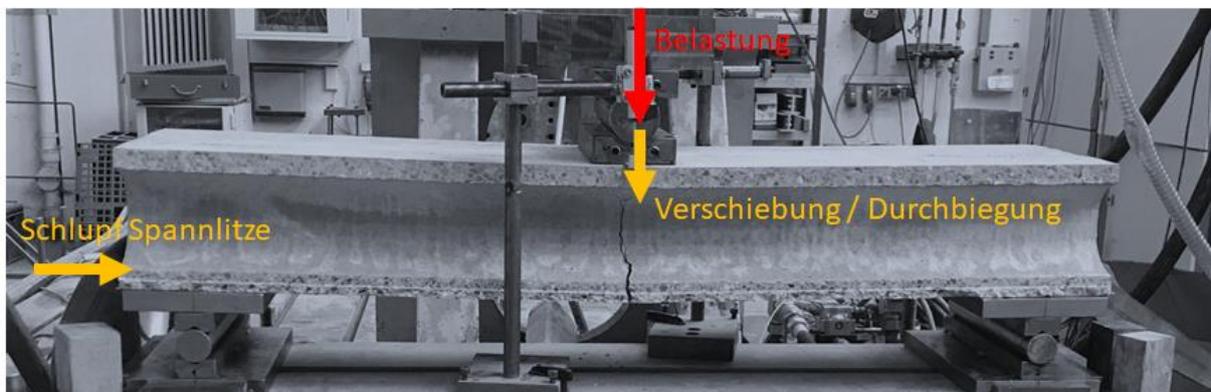


Bild 4-1: Darstellung des Versuchsaufbaus mit Belastung und Messung der Verschiebungen und des Schlupfs der Spannlitze (3-Punkt-Biegebalken).

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Versuche zur Tragfähigkeit von Hohlplattendecken mit Verankerungen im Bereich der Spannlitze.

	Erstrissbildung		Bruchlast		Durchbiegung bei Verschiebung an der Spannlitze	
	Last	Weg	Last	Weg	bei 0,1 mm	Maximal
	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[mm]	[mm]
REF-01	11,946	1,696	18,814	11,952	x	x
REF-02	12,697	1,317	17,396	13,033	4,821	3,878
REF-03	12,061	1,219	17,199	13,511	4,077	4,985
H-01	12,024	2,097	15,652	12,830	x	x
H-02	11,766	1,296	16,991	13,747	3,540	4,923
H-03	11,699	1,160	16,744	14,184	3,915	4,283

x: keine Messung vorhanden

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche mit und ohne Bohrungen unterhalb der Spannlitzen ausgewertet und gegenübergestellt. Dabei können die Last über der Verschiebung, der Schlupf der Spannlitze über der Verschiebung und der Schlupf der Spannlitze über der Kraft aufgetragen werden.

In Bild 4-2 sind die Last-Verschiebungskurven der untersuchten Biegebalken dargestellt. Die schwarzen Last-Verschiebungskurven stellen die Referenzversuche dar, die am Originalsystem ohne Bohrung ermittelt wurden. Die roten Last-Verschiebungskurven sind die Proben, bei denen unterhalb der Spannlitze 23 Bohrungen mit einer Tiefe von 35 mm und einem Durchmesser von 10 mm angeordnet wurden.

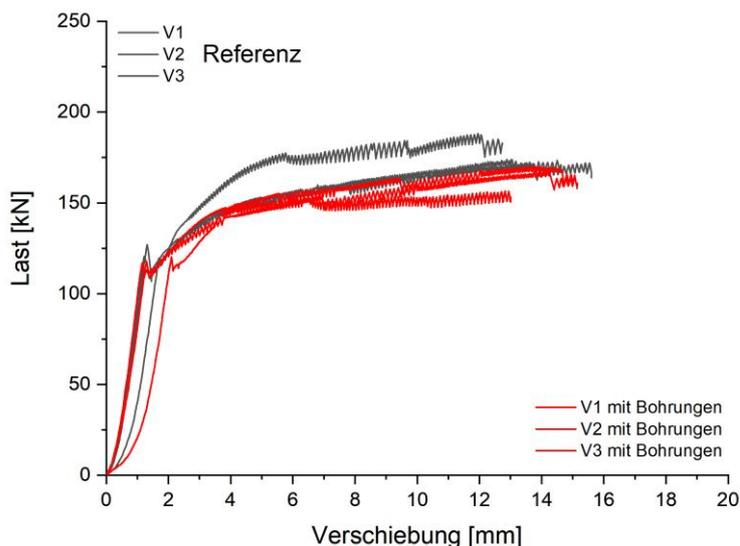


Bild 4-2: Darstellung Last-Verschiebungskurven der geprüften Hohldeckenplatten mit und ohne Bohrungen unterhalb der Spannlitze.

In den Versuchen ist bei einer Belastung von ca. 110 kN bis 120 kN ein Lastabfall zu erkennen. Dieser ist dadurch begründet, dass sich bei dieser Last ein Riss im Bereich des maximalen Moments bildet und damit die Steifigkeit des Biegebalkens deutlich reduziert wird. Dies zeigt auch die anschließende Last-Verschiebungskurve, die deutlich flacher verläuft. Hier ist die Abnahme der Steifigkeit signifikant zu erkennen. Die Verschiebung bei Erreichen der Erstrisslast liegt bei ca. 1,5 – 2 mm. Die Verschiebung bei Bruchlast hingegen beträgt mehr als 10 mm.

Wird die Verschiebung der Spannlitzen über der Verformung aufgetragen, so ist in Bild 4-3 zu erkennen, dass diese ab einer Balkendurchbiegung von 3 bis 4 mm linear zunimmt. Die maximale Verschiebung der Spannlitzen liegt zwischen 5 – 6 mm für eine Durchbiegung von 10 – 12 mm.

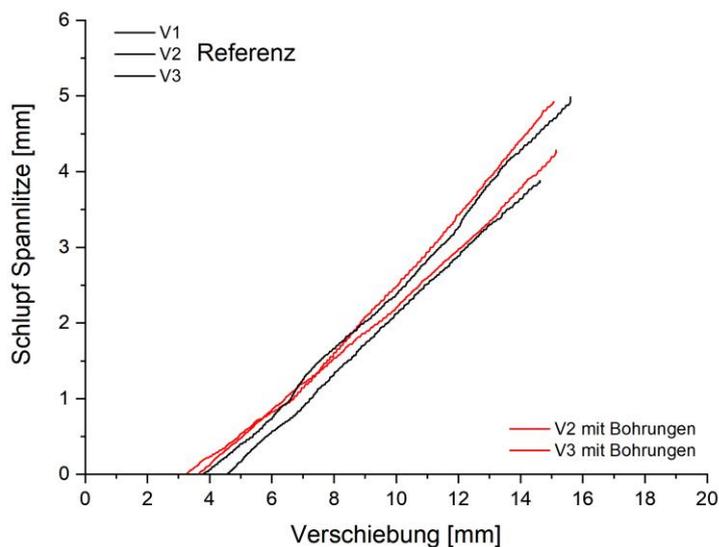


Bild 4-3: Darstellung des Schlupfs am Ende der Spannlitze für die geprüften Hohldeckenplatten, mit und ohne Bohrungen unterhalb der Spannlitze in Abhängigkeit der Verschiebung.

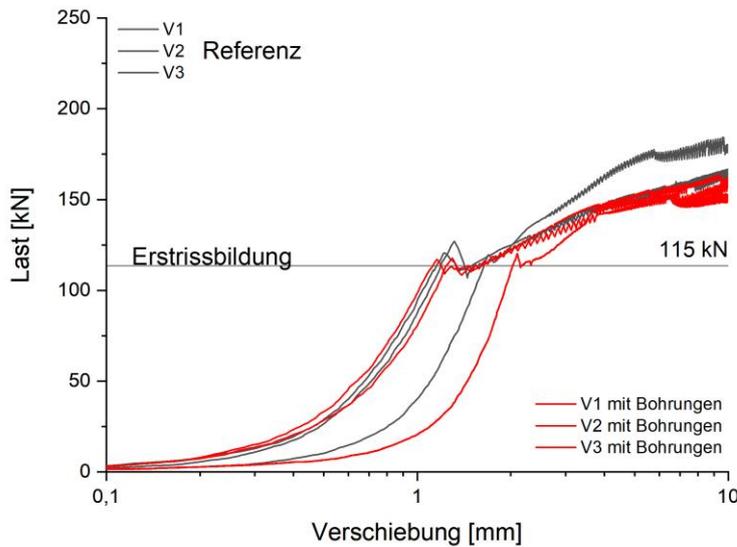


Bild 4-4: Darstellung Last-Verschiebungskurven und Erstrissbildung der geprüften Hohldeckenplatten mit und ohne Bohrungen unterhalb der Spannritze.

Da die Erstrissbildung bei 115 kN stattfindet und hier die Durchbiegung lediglich zwischen 1 mm und 2 mm liegt (Bild 4-4), findet bis zur Erstrissbildung keine nennenswerte Verschiebung der Spannritze statt. Diese setzt erst ab einer Belastung von rund 140 kN ein (Bild 4-5), also deutlich nach der Erstrissbildung.

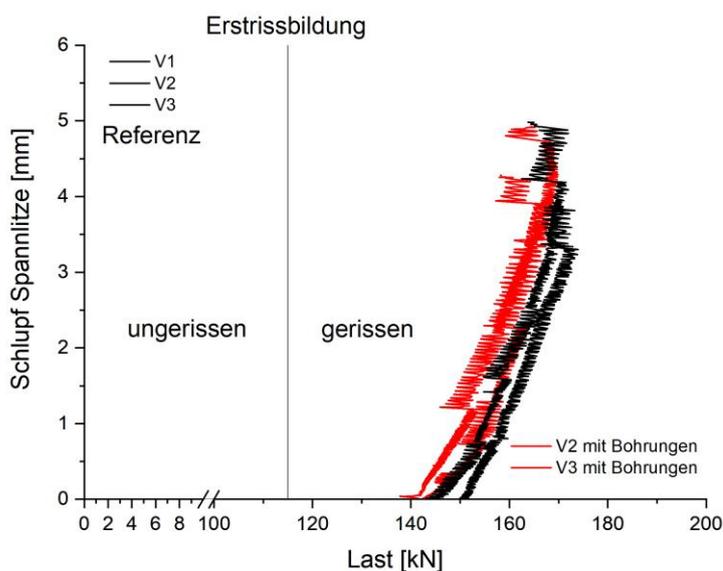


Bild 4-5: Darstellung des Schlupfs am Ende der Spannritze für die geprüften Hohldeckenplatten, mit und ohne Bohrungen unterhalb der Spannritze in Abhängigkeit der Belastung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass trotz 23 Bohrungen mit einem Abstand von $s = 50$ mm, einer Tiefe von 35 mm und einem Durchmesser von 10 mm die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten der Hohldeckenplatte nicht negativ beeinflusst wird. Dies gilt für die Höchstlasten, die Erstrisslasten sowie die zugehörigen Verschiebungen. Zudem zeigt sich kein Unterschied im Schlupf der Spannlitzen, was darauf hindeutet, dass das Verbundverhalten der Spannlitze durch die Bohrungen nicht beeinträchtigt wird. Die vorhergehenden Ausführungen beziehen sich ausschließlich auf den kalten Bemessungszustand.

4.2 Versuche zur Karbonatisierung

In den Versuchen wurden Ausschnitte aus handelsüblichen Hohldeckplatten verwendet, die in einem normalen Produktionsprozess gefertigt wurden. Die Probekörper werden in einer Lagerkammer untergebracht, die normativen Bedingungen entspricht und in der eine Kohlendioxidkonzentration von $(3,0 \pm 0,5)$ Volumenprozent, eine Temperatur von (22 ± 2) °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von (55 ± 5) % vorherrschen.

Nach 70 Tagen werden die Proben normalerweise in zwei Hälften geteilt und die Karbonatisierungstiefe nach dem in Abschnitt 7 beschriebenen Verfahren gemessen. Im vorliegenden Fall wurde im Bereich der Bohrung ein Bohrkern erstellt, um an diesem die Karbonatisierungstiefe zu messen. Die Prüfung dauert damit ca. 112 Tage, was sich als Summe aus dem Mindestalter der Probe von 28 Tagen vor der Konditionierung, aus der Mindestkonditionierungsdauer von 14 Tagen und aus der Mindestdauer der Exposition bei erhöhtem Kohlendioxidgehalt von 70 d ergibt.

Wenn die Karbonatisierungstiefe an demselben Probekörper bei mehr als einer Expositionszeit gemessen werden soll, so wird die Probe anschließend wieder in die Konditionierungskammer gelegt. Dabei ist strikt zu beachten, dass die Bohrkernentnahme, die noch zu Untersuchungen Bereiche nicht beeinflusst und diese auch sonst ungestört bleiben.

Die Karbonatisierungstiefe der Proben wird normalerweise nach ISO 1920 nach den folgenden Expositionszeiten gemessen: 56 d, 63 d und 70 d. In den vorliegenden Untersuchungen an Hohldeckenplatten wird die Karbonatisierungstiefe nach 51 d, 72 d und 90 d gemessen. Nach jeder Expositionszeit werden an jedem Probekörper 10 Einzelpunkt-Karbonatisierungstiefen ($d_{K,Point}$)

gemessen. Die Karbonatisierungstiefe ($d_{K,Point}$) wird dann als Mittelwert der 10 Messwerte ausgedrückt.

Die Bruchfläche ist sofort nach dem Brechen von Staub und losen Partikeln zu befreien und anschließend mit einer Indikatorlösung zu besprühen. Die Bildung von Fließkanälen auf der Prüffläche ist zu vermeiden. Wenn nur eine schwache Färbung oder gar keine Färbung auf der behandelten Oberfläche auftritt, wird die Oberfläche nach 30 s erneut eingesprüht. Die Messungen werden durchgeführt, nachdem sich die Farbe stabilisiert hat.

Tabelle 4-2: Durchgeführte Messungen zur beschleunigten Karbonatisierung bei 3 % CO₂ und definierter Luftfeuchtigkeit.

Probennummer gemäß Prüfbericht	Auslagerungsdauer [Tage]	Gemessene Karbonatisierungstiefe		
		Min. [mm]	Max. [mm]	Mittel [mm]
S1H1	7	0,5		
S2H5				
S3H9				
S4H13				
S5H17				
S1H3	51	5,3	10,0	7,3
S2H6		0,7	2,6	1,5
S2H7		1,9	13,4	6,7
S3H10		0,5	0,5	0,5
S3H11		1,0	9,7	6,1
S4H14	72	2,3	6,9	3,4
S4H15		4,7	14,4	8,7
S5H18		0,5	0,5	0,5
S5H19		5,3	11,8	9,2
S6H21		0,5	0,5	0,5
S6H22		1,1	2,1	1,4
S6H23	90	4,4	12,0	8,7
S7H25		0,5	0,5	0,5
S7H26		0,5	0,5	0,5
S7H27		0,5	0,5	0,5
S7H28		0,5	0,5	0,5
S8H29		0,5	0,5	0,5
S8H30		0,5	0,5	0,5
S8H31	1,0	7,0	4,2	
S8H32	1,1	9,4	6,6	

Die mittlere Karbonatisierungstiefe für jede Probestelle (Bohrung) ist zu berechnen und zu dokumentieren. Das arithmetische Mittel der mittleren Karbonatisierungstiefe von mindestens 5 Proben ist nach einer Expositionszeit von 70 d als Karbonatisierungstiefe anzugeben.



Bild 4-6: Exemplarische Darstellung der Karbonatisierungstiefe nach einer Auslagerungszeit von 72 Tagen bei 3 % CO₂ Gehalt.

In Abbildung 4-6 sind die gemessenen Karbonatisierungstiefen in Abhängigkeit der Auslagerungsdauer aufgetragen. Die Werte streuen sehr stark. Die Messungen zeigen jedoch deutlich, dass die Karbonatisierungstiefe mit der Zeit zunimmt. Dies gilt für die maximalen Tiefen als auch die mittleren Tiefen.

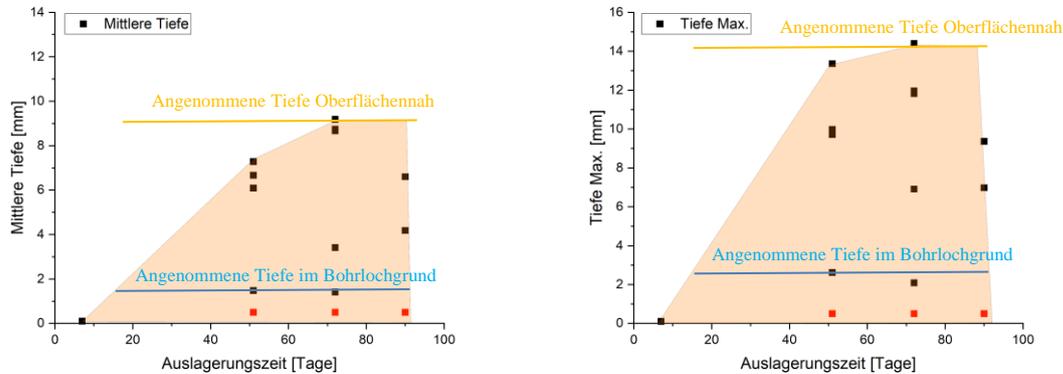


Bild 4-7: Gemessene Karbonatisierungstiefen (links: Mittelwert, recht: Maximalwerte) für die untersuchten Probekörper nach 56 Tagen, 72 Tagen und 90 Tagen.

Wird aus den gemessenen Tiefen und der Auslagerungszeit der Karbonatisierungsfaktor berechnet, ergibt sich Bild 4-8. Hier wurden die Werte nach Gleichung 4-3 berechnet, wobei d_k die gemessene Karbonatisierungstiefe ist und t_s die Auslagerungsdauer bis zum Zeitpunkt der Messung. Die Korrektur der CO₂ Konzentration erfolgt entsprechend den Versuchsbedingungen mit 30.000 ppm zu 400 ppm. Die so ermittelten K_{SN} – Werte können zur Prognose der Karbonatisierungstiefe nach 50 Jahren herangezogen werden (siehe Abschnitt 4.3).

4.3 Prognose der Karbonatisierungstiefe

Die beschleunigende Wirkung von höheren CO₂-Gehalten auf die Karbonatisierung kann mit dem relativen CO₂-Gehalt r_{Acc} beschrieben werden. Die Beschleunigung bezieht sich auf den Referenzwert von 400 ppm CO₂ [4].

$$r_{Acc} = c \sqrt{\frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_N}} = c \sqrt{\frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_{Ref}}} = c \sqrt{\frac{[CO_2]_S}{400}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

[CO ₂] _S	= Erhöhter CO ₂ -Gehalt, hier 30.000 ppm CO ₂
[CO ₂] _N	= CO ₂ -Gehalt unter natürlichen Bedingungen, Vol.-%
[CO ₂] _{Ref}	= Referenzwert für den natürlichen CO ₂ -Gehalt, hier 400 ppm CO ₂
c	= Korrekturfaktor (siehe [4])
	= 1 für CO ₂ -Gehalte unter 1%
	= 1,24 für einen CO ₂ -Gehalt von 3 % (30.000 ppm)
	= 1,36 für einen CO ₂ -Gehalt von 4.0 % (40.000 ppm)

Zur Umrechnung der Versuchszeit bei der beschleunigten Karbonatisierung in die Zeit mit normalen CO₂-Gehalten t_N dient folgende Gleichung:

$$t_N = t_S \frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_{Ref}} \cdot \left(\frac{1}{c}\right)^2 \quad \text{Gl. 4-2}$$

t_S	= 72 d = 0,1944 Jahre
[CO ₂] _S	= Erhöhter CO ₂ -Gehalt, hier 30.000 ppm CO ₂
[CO ₂] _{Ref}	= Referenzwert für den natürlichen CO ₂ -Gehalt, hier 400 ppm CO ₂
c	= 1,24 für einen CO ₂ -Gehalt von 3% (30.000 ppm)

Für die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen kann die Prüfdauer von 72 Tagen in eine Karbonatisierungsdauer unter natürlichen Bedingungen umgerechnet werden. Diese beträgt dann: $t_N = 72 \cdot 30.000 / 400 \cdot (1/1,24)^2 = 72 \cdot 75 \cdot 0,64 = 3456 \text{ d} = 9,5 \text{ Jahre}$

Für die Umrechnung des Karbonatisierungskoeffizienten aus der beschleunigten Prüfung auf Werte bei natürlichen Bedingungen gilt:

$$K_{SN} = \frac{d_K}{\sqrt{t_S}} \cdot c \cdot \sqrt{\frac{[CO_2]_{Ref}}{[CO_2]_S}} \quad \text{Gl. 4-3}$$

K_{SN}	= Karbonatisierungskoeffizient bei erhöhten CO ₂ -Gehalten [mm/Jahr ^{1/2}]
d_K	= Karbonatisierungstiefe nach Abzug vom Nullwert (d_K bei $t_S = 0$), mm
t_S	= Versuchszeit bei der beschleunigten Karbonatisierung, Jahre.
[CO ₂] _S	= Erhöhter CO ₂ -Gehalt, hier 30.000 ppm CO ₂
[CO ₂] _{Ref}	= Referenzwert für den natürlichen CO ₂ -Gehalt, hier 400 ppm CO ₂
c	= 1,24 für einen CO ₂ -Gehalt von 3 % (30.000 ppm)

Die verwendeten K_{SN} – Werte können aus den Versuchen berechnet werden und sind in Bild 4-8 über die Auslagerungsdauer aufgetragen.

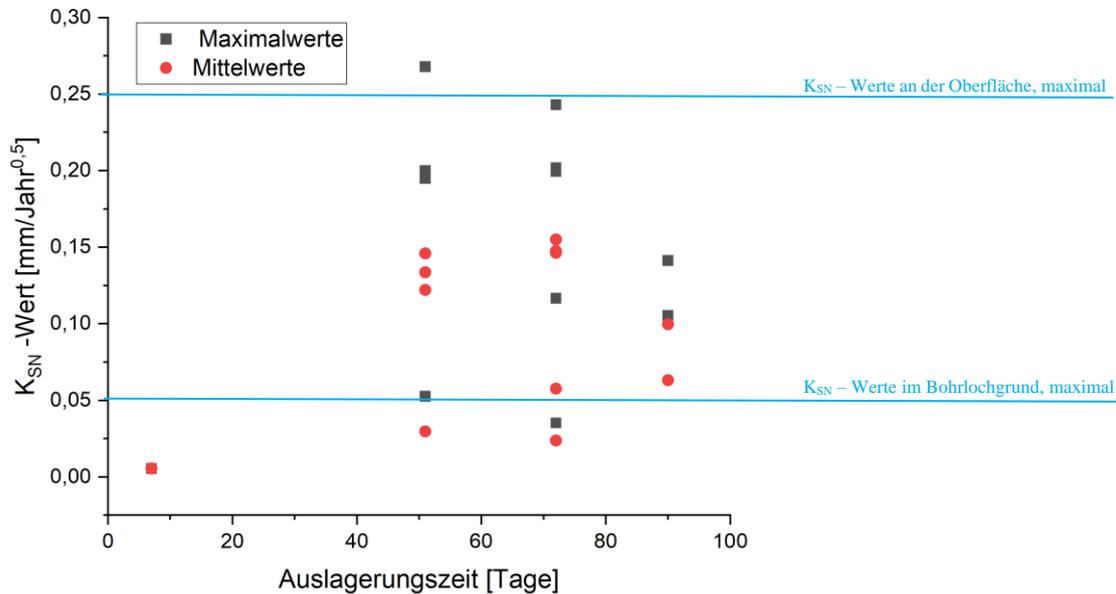


Bild 4-8: Berechnete natürliche Karbonatisierungsfaktoren [mm/Jahr^{0,5}] für die untersuchten Probekörper unter Verwendung der Messergebnisse einer beschleunigten Karbonatisierungen bei 3 % CO₂.

Für die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen kann die natürliche Karbonisierungstiefe nach 72 Tagen wie folgt berechnet werden:

$$K_{SN,max} = 15 / (72^{1/2}) \cdot 1,24 \cdot (400 / 30.000)^{1/2} = 15 / 8,48 \cdot 1,24 \cdot 0,1155 = 0,25 \text{ mm/d}^{1/2}$$

$$K_{SN,hole} = 9 / (72^{1/2}) \cdot 1,24 \cdot (400 / 30.000)^{1/2} = 3 / 8,48 \cdot 1,24 \cdot 0,1155 = 0,05 \text{ mm/d}^{1/2}$$

Darauf aufbauend kann die natürliche Karbonisierungstiefe nach 50 Jahren wie folgt berechnet werden:

$$d_{k,max} = K_{SN} \cdot (t_{target})^{1/2} = 0,25 \text{ mm/d}^{1/2} \cdot (18250 \text{ d})^{1/2} = 0,25 \cdot 135,1 = 33,8 \text{ mm}$$

$$d_{k,hole} = K_{SN} \cdot (t_{target})^{0,5} = 0,05 \text{ mm/d}^{1/2} \cdot (18250 \text{ d})^{1/2} = 0,05 \cdot 135,1 = 6,8 \text{ mm}$$

Daraus resultiert eine maximale Bohrlochtiefe von rund 35 mm – 10 mm = 25 mm. Dabei ist vorteilhaft zu beobachten, dass die Messungen am Bohrlochgrund innerhalb von 72 Tagen eine maximale Karbonisierungstiefe von ca. 0,5 mm bis 1,0 mm zeigen. Bezogen auf den an der Oberfläche gemessene Wert ist dieser Wert deutlich geringer.

Im Bohrloch liegt die Karbonatisierungstiefe damit voraussichtlich bei 7 mm – 10 mm, was eine maximale Bohrlochtiefe von 25 mm ermöglicht.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Toleranzen für die Bohrlochtiefe und die Lage der Spannlitze ebenfalls berücksichtigt werden muss. Für ein Vorhaltemaß von $\Delta c = 5$ mm und eine Toleranz des Bohrlochtiefe von $\Delta l_{\text{Bohr}} = 3$ mm ergäbe sich eine minimal notwendige Überdeckung von:

$$c_{\text{min}} = \Delta c + \Delta l_{\text{Bohr}} + 6,8 \text{ mm} = 14,8 \text{ mm} \sim \mathbf{15,0 \text{ mm}}.$$

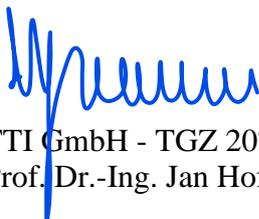
5 ZUSAMMENFASSUNGEN

Nach den derzeitigen Regelungen dürfen Verankerungen in vorgespannten Hohldeckenplatten nur in einem Abstand von 50 mm zur Spannlitze angeordnet werden. Um zu untersuchen, welche Risiken entstehen, wenn im Bereich unterhalb der Spannlitzen Verankerungen angeordnet werden, wurden Versuche am Institut für Werkstoffe im Bauwesen durchgeführt. Die Versuche unterteilen sich in Versuche zur Tragfähigkeit und Versuche zum Karbonatisierungsfortschritt.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Tragfähigkeit der Hohldeckenplatten durch Verankerungen direkt unterhalb der Spannlitze nicht beeinflusst wird. Dies gilt insbesondere bei Belastungen vor Erreichen der Erstrisslast. Diese Aussage gilt für Verankerungen mit einem Bohrdurchmesser von $d_0 = 10$ mm und einer Bohrlochtiefe $h_0 = 30$ mm, selbst wenn diese in einem Abstand von 50 mm direkt unterhalb der Spannlitze angeordnet sind.

Die Untersuchungen zum beschleunigten Karbonatisierungsfortschritt zeigen, dass die innerhalb von 70 Tage gemessenen Karbonisierungstiefen bei rd. 14 mm liegt. Bezogen auf eine natürliche Karbonisierung liegt die Karbonisierungstiefe für 50 Jahre zwischen 10 mm und 15 mm. Dieses Vorhaltemaß unterhalb der Spannlitze sollte daher nicht unterschritten werden, um einen ausreichenden Korrosionsschutz zu gewährleisten. Bei Zweifeln, ob der verwendete Beton die gleiche Bindekapazität an CO_2 aufweist wie der hier untersuchte Beton, müssen Karbonisierungsversuche durchgeführt werden.

Aufgrund der Versuche wird empfohlen, die Bohrlochtiefe so zu begrenzen, dass unterhalb der Spannlitze eine reale Mindestbetondeckung für übliche Toleranzen von $c_{\min} \geq 15$ mm gewährleistet ist. Für diesen Fall darf auch näher und im Bereich der vorhandenen Spannlitzen von Hohldeckenplatten verankert werden.



TTI GmbH - TGZ 2075
Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann

TTI GmbH - TGZ 2075
Dr.-Ing. Michael Potthoff