

Gutachterliche Stellungnahme

für die Beurteilung von Verankerungen mit Bolzenschubnägeln
in vorgespannten Hohldecken

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

Berichts-Nr.: 23-006a

Datum: 2024-09-09

Nr..	Datum	Seite	Kommentare	Autor
0	17.07.24	43	Erstellung des Dokuments	HOJ
1	22.07.24	43	Korrektur und Finalisierung	HOJ

Dieser Bericht enthält 44 Seiten.

INHALT SEITE

1	EINLEITUNG	4
2	LITERATUR	5
3	BESCHREIBUNG DES BAUPRODUKTS	6
3.1	HILTI XP 17 B3 NÄGEL MIT BX3 SETZGERÄT (NAGEL 1).....	6
3.2	SPIT HC 6-17 NAGEL MIT SPIT PULSA 65 SETZGERÄT (NAGEL 2).....	6
3.3	SPIT SC 9-70 NÄGEL MIT SPIT P370 SETZGERÄT (NAIL 3)	7
3.4	WÜRTH XZDP3065 NÄGEL MIT DIGA CSM-1 SETZGERÄT (NAIL 4)	8
3.5	WÜRTH NG CS-2/3 HFBX NAGEL MIT DIGA CS3 SETZGERÄT (NAGEL 5).....	9
3.6	VERWENDUNGSZWECK.....	9
4	WESENTLICHE MERKMALE, BEWERTUNGSMETHODEN UND KRITERIEN	11
4.1	ALLGEMEINE BEWERTUNGSGRUNDSÄTZE.....	11
4.1.1	Normierung von Bruchlasten auf die Nennfestigkeit.....	11
4.1.2	Bewertung der 5 %-Fraktile	12
4.2	DURCHGEFÜHRTE VERSUCHE MIT NAGEL 1 BIS NAGEL 5	12
4.2.1	Vorversuche F0	12
4.2.2	Funktionsversuche.....	13
4.3	ZUG- UND QUERLASTVERSUCHE	14
4.4	ZUSAMMENFASSUNG DES VERSUCHSPROGRAMMS	15
4.5	ZUSAMMENFASSUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	16
5	BEWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	17
5.1	ALLGEMEINES	17
5.2	AUSWERTUNG DER F0-VERSUCHE	17
5.3	AUSWERTUNG DER F4-VERSUCHE	22
5.4	AUSWERTUNG DER S0-VERSUCHE	23
5.5	AUSWERTUNG DER A2-VERSUCHE.....	24
5.6	AUSWERTUNG DER VERSUCHSREIHE A5 (QUERBELASTUNG).....	25
5.7	CHARAKTERISTISCHE TRAGFÄHIGKEIT DER BOLZENSCHUBNÄGEL	26
5.8	ABMINDERUNGSFAKTOR A FÜR DIE CHARAKTERISTISCHE TRAGFÄHIGKEIT	27
5.9	VARIATIONSKOEFFIZIENT DER TRAGFÄHIGKEIT	28
6	BERECHNUNG DER CHARAKTERISTISCHEN TRAGFÄHIGKEIT	30
6.1	BETONVERSAGEN UNTER ZUGBELASTUNG.....	30
6.2	STAHLVERSAGEN UNTER ZUGBELASTUNG	31
6.3	BETONVERSAGEN UNTER QUERBELASTUNG.....	31
6.4	STAHLVERSAGEN UNTER QUERBEANSPRUCHUNG	33
6.5	STAHLVERSAGEN UNTER QUERLAST MIT HEBELARM.....	33

6.6	CHARAKTERISTISCHE TRAGFÄHIGKEIT FÜR ALLE BELASTUNGSRICHTUNGEN	33
6.7	ACHS- UND RANDABSTÄNDE.....	34
6.8	CHARAKTERISTISCHE VERANKERUNGSTIEFE	35
6.9	CHARAKTERISTISCHE VERSCHIEBUNGEN	35
7	ZUSAMMENFASSUNG	36
8	ANHANG A	37
9	ANHANG B	39

1 EINLEITUNG

Der Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken e.V., die Forschungsgesellschaft VMM Spannbetonplatten GbR, der Bundesverband der Gipsindustrie e. V., die Adolf Würth GmbH & Co. KG, die Hilti Deutschland AG und die ITW Befestigungssysteme GmbH beauftragte das IWB mit der Durchführung von Untersuchungen an 5 verschiedenen Bolzenschub-Befestigungssystemen:

Nagel 1: Hilti X-P 17 B3 mit Hilti BX3 (batteriebetrieben),

Nagel 2: SPIT HC 6-17 mit SPIT Pulsa 65 (gasbetrieben),

Nagel 3: SPIT SC 9-70 mit SPIT P370 (pulverbetrieben),

Nagel 4: Würth NG CSM-1 HFBX mit DIGA CSM-1 (gasbetrieben) und

Nagel 5: Würth NG CS-2/3 HFBx mit DIGA CSM-3 (gasbetrieben)

Die Untersuchungen bestanden aus Vorversuchen (F0) nach EAD 330083-03-0601 für alle 5 Produkte. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde der Nagel 5 für weitere Untersuchungen ausgewählt. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Nagel zu den geringsten charakteristischen Widerständen führt. Zusätzliche Untersuchungen unter Zug (A2, F4), Querbelastung (A5) und mit unterschiedlicher Anbauteildicke (S0) wurden mit dem System Würth NG CS-2/3 HFBx System (Nagel 5) durchgeführt. Alle in diesem Bericht untersuchten Verankerungssysteme wurden bereits für die Anwendung in Normalbeton bewertet. Die Bewertungen der Nägel haben folgende ETA-Nummern:

Nagel 1: Hilti X-P 17 B3 mit **ETA 20/0886 vom 20.08.2021**

Nagel 2: SPIT HC 6-17 mit **ETA 23/508 vom 21.08.2023**

Nagel 3: SPIT SC 9-70 ohne **ETA**

Nagel 4: Würth NG CSM-1 HFBX mit **ETA 12/0452 vom 10.09.2021**

Nagel 5: Würth NG CS-2/3 mit **ETA 21/0703 vom 02.09.2022**

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, die Tragfähigkeit bei konkreten Anwendungen in vorgespannten Hohldeckenplatten zu beurteilen. Die Untersuchungen wurden an repräsentativen vorgespannten Hohldeckenplatten mit einer Nennfestigkeitsklasse des Betons von C45/55 durchgeführt. Die Beschreibung der Befestigungssysteme und der Verwendungszwecke sind in Kapitel 3 aufgeführt. Eine Zusammenfassung des Versuchsprogramms, das für die Bewertung herangezogen wurde, ist in Kapitel 4 enthalten. Die Auswertung und Bewertung der Versuchsergebnisse werden in Kapitel 5 dargestellt.

2 LITERATUR

- [1] Prüfbericht FAST 23-006B-R, Prüfungen mit Bolzenschubnägeln und Betonschrauben in vorgespannten Hohldeckenplatten, TTI GmbH@Universität Stuttgart, Stuttgart 14.06.2024.
- [2] Europäische Organisation für technische Zulassungen (EOTA): EAD 330083-03-0601, Kraftbetätigtes Befestigungselement für den mehrfachen Einsatz in Beton für nichttragende Anwendungen, März 2018.
- [3] ETAG 001 Leitfaden für die europäische technische Zulassung von Metallankern zur Verwendung in Beton, Anhang: A Details der Prüfungen, Brüssel, April 2013
- [4] Europäische Organisation für technische Bewertung (EOTA): EAD 330232-00-060: Europäisches Bewertungsdokument - Mechanische Befestigungselemente für den Einsatz in Beton, Oktober 2016.
- [5] Europäische Technische Zulassung (ETA): ETA-12/0452: Würth Nagel NG CSM-1 SLB, NG CSM-1 HFB und NG CS-2 HFB für gasbetriebene Bolzentreiber DIGA CSM-1 und DIGA CS-2 POWER, November 2012.
- [6] Owen, D.: Handbuch der statistischen Tabellen, Addison/Wesley Publishing Company Inc., 1962.
- [7] ICC-ES; AC70, Abnahmekriterien für Verbindungselemente, die in Beton-, Stahl- und Mauerwerkselemente eingetrieben werden, genehmigt im Dezember 2019.
- [8] Deutsches Institut für Normung: Eurocode 2 – Bemessung von Betonbauwerken, Teil 4: Bemessung von Befestigungselementen für die Verwendung in Beton; Deutsche Fassung EN 1992-4:2018, April 2019

3 BESCHREIBUNG DES BAUPRODUKTS

3.1 Hilti XP 17 B3 Nägel mit BX3 Setzgerät (Nagel 1)

Die Hilti X-P B3 Nägel eignen sich für die Verankerung in Beton oder Mauerwerksteinen. Um die Nägel in Beton zu installieren, ist ein batteriebetriebenes Setzgerät Hilti BX 3 erforderlich. Für die Montage sind keine vorgebohrten Löcher erforderlich. Ein Bild des Installationsgeräts ist in Abbildung 3-1 dargestellt.



Abbildung 3-1: Befestigungssystem Hilti XP 17B3 mit akkubetriebenem Setzgerät Hilti BX 3.

In dieser Untersuchung wurden Nägel mit einer Länge von 17 mm verwendet. Eine Abbildung der Hilti XP B3 Nägel und die zugehörigen Abmessungen sind in Abbildung 3-1b dargestellt. Die in dieser Untersuchung verwendeten Schubbolzen Hilti XP 17 B3 haben folgende Abmessungen:

- Schaftlänge $L_s = 17$ mm,
- Schaftdurchmesser $d_s = 3$ mm,
- Durchmesser des Kopfes $d_h = 6,8$ mm und
- Dicke des Kopfes $d_k = 1,8$ mm.

3.2 Spit HC 6-17 Nagel mit SPIT Pulsa 65 Setzgerät (Nagel 2)

Die SPIT HC 6-17 Bolzenschubnägel sind für den Einbau in Beton geeignet. Das gasbetriebene Setzgerät SPIT Pulsa 65 wird verwendet, um die Bolzenschubnägel ohne Vorbohren von Bohrlochern zu installieren.

Ein Bild dieses Installationsgeräts ist in Abbildung 3-2 dargestellt. In den Untersuchungen wurden die Nägel mit einer Länge von 17 mm verwendet.



Abbildung 3-2: Befestigungssystem SPIT HC6-17 mit gasbetriebenem Setzgerät SPIT Pulsa 65.

Eine Darstellung der SPIT HC6-17 Nägel sowie deren Abmessungen sind in Abbildung 3-2b dargestellt. Die in den Untersuchungen verwendeten Nägel SPIT HC6-17 haben folgende Abmessungen:

- Gesamtschaftlänge $L_t = 17$ mm,
- Schaftdurchmesser $d_s = 3$ mm,
- Durchmesser des Kopfes $d_h = 6,4$ mm.

3.3 SPIT SC 9-70 Nägel mit SPIT P370 Setzgerät (Nail 3)

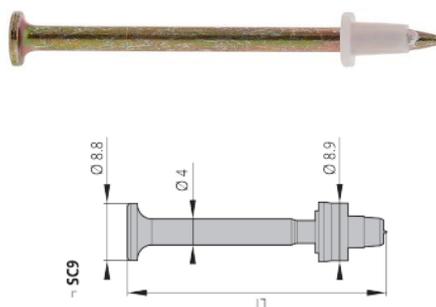
Die Nägel SPIT SC 9-70 eignen sich zur Herstellung von Holz-Beton-Verbindung und Stahl-Beton-Verbindungen. Für die Montage der Nägel ohne vorgebohrte Bohrlöcher in Beton wird eine pulverbetriebene SPIT P370 benötigt. Das Setzgerät ist in Abbildung 3-3 dargestellt.

In der Untersuchung wurden Nägel mit einer Länge von 70 mm verwendet. Die Nägel SPIT SC 9-70 und deren Abmessungen sind in Abbildung 3-3b dargestellt. Die in dieser Untersuchung verwendeten Nägel SPIT SC 9-70 haben folgende Abmessungen:

- Schaftlänge $L_t = 70$ mm,
- Schaftdurchmesser $d_s = 4$ mm,
- Durchmesser des Kopfes $d_h = 8,8$ mm.



ein)



b)

Abbildung 3-3: Befestigungssystem SPIT SC 9-70 mit pulverbetriebenem Setzgerät SPIT P370.

3.4 Würth XZDP3065 Nägel mit DIGA CSM-1 Setzgerät (Nail 4)

Die Bolzenschubnägel Würth XZDP3065 eignen sich für die Verankerung in Beton. Für den Einbau der Nägel ohne vorgebohrte Bohrlöcher wird ein gasbetriebenes Setzgerät Würth DIGA CSM-1 benötigt. Das Setzgerät ist in Abbildung 3-4 dargestellt.



a)



b)

Abbildung 3-4: Befestigungssystem Würth XZDP3065 mit gasgetriebenem Setzgerät DIGA CSM-1 .

In den Versuchen wurden Bolzenschubnägel mit einer Länge von 70 mm verwendet. Die Würth XZDP3065 Bolzenschubnägel sind in Abbildung 3-4b dargestellt und haben folgende Abmessungen:

- Schaftlänge $L_t = 65$ mm,
- Schaftdurchmesser $d_s = 4$ mm,
- Durchmesser des Kopfes $d_h = 8,8$ mm.

3.5 Würth NG CS-2/3 HFBx Nagel mit DIGA CS3 Setzgerät (Nagel 5)

Die Würth NG CS-2/3 HFBx Bolzenschubnägel eignen sich für die Verankerung in Beton. Für den Einbau der Nägel ohne vorgebohrte Bohrlöcher wird ein gasbetriebenes Setzgerät Würth DIGA CS3 benötigt (siehe Abbildung 3-5).



Abbildung 3-5: Befestigungssystem Würth NG CS-2/3HFBx mit gasgetriebenem Setzgerät DIGA CS3.

In den Untersuchungen wurden Nägel mit einer Länge von 16 mm und 38 mm verwendet. Die Würth NG CS-2/3 HFBx Bolzenschubnägel sind in Abbildung 3-5b dargestellt und haben folgende Abmessungen:

- Schaftlänge $L_s = 16 \text{ mm}$ und 38 mm ,
- Schaftdurchmesser $d_s = 3 \text{ mm}$,
- Durchmesser des Kopfes $d_h = 6,3 \text{ mm}$.

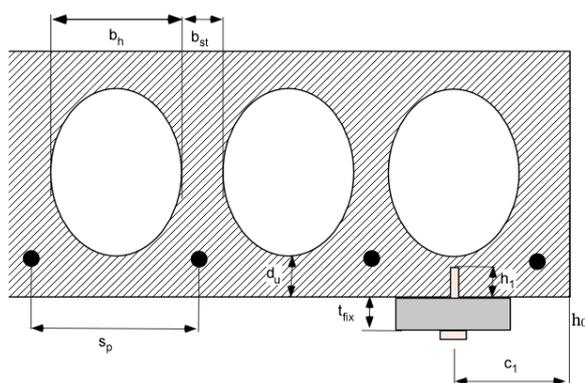
3.6 Verwendungszweck

Der Verwendungszweck der Bolzenschubnägel ist in der Regel in Normalbeton C20/25 und größer. Je nach System kann die Verwendung leicht variieren. Der Verwendungszweck soll auf die Anwendung in vorgespannten Hohlplatten erweitert werden. Der Anwendungsbereich jedes einzelnen Produkts muss berücksichtigt werden, auch wenn das entsprechende Produkt gemäß dieser Bewertung in vorgespannten Hohldeckenplatten eingebaut wird. Die wichtigsten Randbedingungen, die für vorgespannte Hohldeckenplatten zusätzlich zu beachten sind (sofern nicht bereits erforderlich), sind im Folgenden aufgeführt:

- Die Anforderungen an redundante Verankerungen sind für die Anwendung in vorgespannten Hohldeckenplatten zwingend erforderlich.
- Ungerissener Beton (vorgespannte Hohldeckenplatten).
- Festigkeitsklassen C45/55 oder größer. Bei einer vorhandenen Festigkeit $f_c \geq 80 \text{ N/mm}^2$ nimmt die Anzahl der Setzfehler stark zu, daher ist die Anwendung bei einer solchen Betondruckfestigkeit nicht zu empfehlen.
- Statische oder quasi-statische Belastung des Nagels.
- Trockene Innenraumbedingungen.
- Minimale Dicke des Anbauteils $t_{\text{fix,min}} = 2 \text{ mm}$
- Maximale Dicke des Anbauteils $t_{\text{fix,max}} = 50 \text{ mm}$

Die Bolzenschubnägel dürfen für Verankerungen unter **vorwiegend ruhender oder quasi-statischer Belastung** verwendet werden. Die Anwendung ist beschränkt auf die Verwendung in Spannbetonhohldeckenplatten der Festigkeitsklasse B55 nach DIN 4227-1:1988-07 oder C45/55 nach DIN EN 1992-1-1. **Die Verankerung des Schraubdübels ist nur in Spannbetonhohldeckenplatten zulässig, deren Kern das 6-fache der vertikalen Stegbreite ($b_h / b_{\text{St}} \leq 6,0$ siehe Bild 3 1) und eine Stegdicke von mindestens 30 mm aufweist.**

Die Bauteile sind so zu befestigen, dass bei einem Versagen oder übermäßigem Schlupf eines Schraubankers (oder eines Befestigungspunktes mit mehr als einem Bolzenschubnagel) die Last auf benachbarte Befestigungspunkte übertragen werden kann. Dies ist in der Regel erfüllt, wenn der Bemessungswiderstand der Schraubdübel auf $F_{\text{Rd}} = 0,6 \text{ kN}$ ($F_{\text{Rk}} = 1,0 \text{ kN}$) begrenzt wird. Der Bolzenschubnagel aus verzinktem Stahl darf nur in trockenen Innenräumen verwendet werden. Eine Anwendung mit $h_{\text{ef}} = 20 \text{ mm}$ im Außenbereich ist nicht erlaubt.



Legende:

S_p	= Abstand zur vorgespannten Bewehrung (Spannlitze)
t_{fix}	= Dicke des Anbauteils
d_u	= Dicke des Spiegels
T_{inst}	= Installationsdrehmoment
c	= Randabstand
b_{st}	= Breite bzw. Dicke des Stegs
b_h	= Lochbreite
h_1	= Eindringtiefe des Nagels

Bild 3-6: Verankerung der Bolzenschubnägel mit einer Verankerungstiefe von $h_1 = h_{\text{nom}} = 20 \text{ mm}$ in vorgespannten Hohlbetondeckenplatten.

4 WESENTLICHE MERKMALE, BEWERTUNGSMETHODEN UND KRITERIEN

4.1 Allgemeine Bewertungsgrundsätze

4.1.1 Normierung von Bruchlasten auf die Nennfestigkeit

In einigen Fällen ist es notwendig, die Ergebnisse der Versuchsreihen in die Betonfestigkeitsklasse C45/55 umzurechnen. Dabei wird die Art des Versagens berücksichtigt. Im Falle von Betonversagen erfolgt diese Normierung nach Gleichung 1:

$$F_{u,c} = F_{u,t} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,t}} \right)^{0,5} \quad \text{Gl. 1}$$

$F_{u,t}$ = In den Versuchen beobachtete Tragfähigkeit
 f_c = Betonfestigkeitsklasse, auf die normiert wird
 $f_{c,t}$ = Betonfestigkeit des Prüfkörpers

Da die Versuche in der gleichen Betoncharge durchgeführt wurden, wurden die Ergebnisse auf die Betonnennfestigkeit C45/55 der Spannbetonhohlbetonplatten normiert.

Beim Herausziehen kann der Einfluss der Betonfestigkeit auf die Versagenslast nach Gleichung 2 ermittelt werden. In Ermangelung besserer Informationen kann der Faktor n zur Normierung der Versuchsergebnisse mit $n = 0,5$ angenommen werden. Der Faktor darf $n = 0,5$ nicht überschreiten.

$$F_{u,c} = F_{u,t} \cdot \left(\frac{f_c}{f_{c,t}} \right)^n \quad \text{Gl. 2}$$

$F_{u,t}$ = In den Versuchen beobachtete Tragfähigkeit
 f_c = Betonfestigkeitsklasse, auf die normiert wird
 $f_{c,t}$ = Betonfestigkeit des Prüfkörpers

Im Fall von Stahlversagen ist die Versagenslast mit Gleichung 3 auf die Nennfestigkeit des Stahls zu normieren.

$$F_{u,s} = F_{u,t} \frac{f_{uk}}{f_{u,t}} \quad \text{Gl. 3}$$

$F_{u,t}$ = In den Versuchen beobachtete Tragfähigkeit
 f_{uk} = Nennbruchfestigkeit des Stahls
 $f_{u,t}$ = Stahlfestigkeit der Probe bzw. der Verankerung

4.1.2 Bewertung der 5 %-Fraktile

Die Berechnung der 5%-Fraktile erfolgt auf der Grundlage eines Konfidenzniveaus von 90 % unter Verwendung der nach Owen bereitgestellten statistischen Kennwerte. Die Berechnung kann mit der folgenden Gleichung erfolgen:

$$F_{u,5\%} = F_{u,m}(1 - k_s \cdot CV_F) \quad \text{Gl. 4}$$

$F_{u,5\%}$ = Charakteristischer Widerstand (5% Fraktile)

k_s = Statistischer Kennwert, siehe Owen

COV = Variationskoeffizient der Versuchsreihe

Bei der Auswertung kann ein k-Wert für ein Konfidenzniveau von 90 % oder 75 % verwendet werden, je nachdem welche Zuverlässigkeit angestrebt wird. Nach den Vorgaben des Eurocodes ist ein Konfidenzniveau von 75 % ausreichend, da die Bolzenschubnägel jedoch stark von der Zugfestigkeit des Betons abhängen, wird wie in EN 1992-4 ein Konfidenzniveau von 95 % empfohlen.

4.2 Durchgeführte Versuche mit Nagel 1 bis Nagel 5

4.2.1 Vorversuche F0

Die Bolzenschubnägel (Nagel 1 bis Nagel 5) wurden bereits für die Anwendung in Beton bewertet. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, die Tragfähigkeit bei Anwendungen in vorgespannten Hohldeckenplatten zu beurteilen. Aus diesem Grund wurden folgende Versuche durchgeführt:

Die durchgeführten Vorversuche (F0) sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst und wurden für alle Bolzenschubnägel in einer „repräsentativen“ vorgespannten Hohldeckenplatte durchgeführt. Die mittlere Druckfestigkeit des Betons betrug 66,3 N/mm². Die Versuche sind mit einer Mindestanbauteildicke durchzuführen.

Tabelle 4.1: Notwendige Vorversuche (F0) für die Anwendung von Bolzenschubnägeln in Beton.

Nr.	Zweck der Prüfung	Beton	Rissbreite Δw	Dicke der Vorrichtung	Min. Anzahl der Tests	Kriterien für die Streuung	Streu-klasse	Untersuchte Nägel
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
F0	Vorversuche	C50/60	0	min. t_{fix}	50	$v \leq 20 \%$	A	Nagel 1 Nagel 2 Nagel 3 Nagel 4 Nagel 5
						$v > 20 \%$	B	

Nach der Auswertung der F0-Versuche kann festgelegt werden, welcher der Bolzenschubnägeln der ungünstigste ist, die geringsten Lasten liefert und die größten Streuungen aufweist.

4.2.2 Funktionsversuche

In Tabelle 4-2 sind die notwendigen Funktionsversuche zusammengefasst. Die Versuche wurden in Anlehnung an die EAD für die Anwendung in Beton durchgeführt. Die Funktionsversuche wurden mit dem ungünstigsten Bolzenschubnagel, der sich aus der Bewertung der F0-Versuche ergibt, durchgeführt. Da alle Bolzenschubnägeln bereits eine ETA für Normalbeton besitzen, wurden die meisten Versuche bereits in Standardbetonplatten durchgeführt.

Tabelle 4.2: Notwendige Funktionsversuche für Bolzenschubnägeln in Beton.

Nr.	Zweck der Prüfung	Beton	Rissbreite Δw	Dicke des Anbauteils	Streubereich	Min. Anzahl der Tests	Erforderliche Kriterien. α	Referenz	Durchgeführte Versuche																																																												
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]																																																												
F1	Kontakt mit hartem Zuschlag	C50/60 AB32	0	min. t_{fix}	A	10	$\geq 0,95$ $\geq 0,8$ $\geq 0,7$	F0	Nicht erforderlich, hohle vorgespannte Platten haben eine definierte Sortierung																																																												
					B	20				F2	Kontakt mit Bewehrung	C20/25	0	min. t_{fix}	A	5	$\geq 0,85$ $\geq 0,7$ $\geq 0,6$	A1		B	10	F3	Funktion in niedrigfestem Beton	C20/25	0.35	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,75$	A3	Nicht notwendig, Festigkeit ist immer größer als C45	B	10	F4	Wiederholte Belastungen	C45/55 statt C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	≥ 1.0	A1	Durchgeführt mit Nagel 5 in C45/55	B	10	F5	Maximales Drehmoment	C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht erforderlich, es wird keine Gewindeversion bewertet	B	10	F6	Wasserstoffversprödung	C20/25	0	min. t_{fix}	-	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht notwendig, Nägel werden bereits für normalen Beton bewertet	F7	Dauerhaftigkeit
F2	Kontakt mit Bewehrung	C20/25	0	min. t_{fix}	A	5	$\geq 0,85$ $\geq 0,7$ $\geq 0,6$	A1																																																													
					B	10				F3	Funktion in niedrigfestem Beton	C20/25	0.35	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,75$	A3	Nicht notwendig, Festigkeit ist immer größer als C45	B	10	F4	Wiederholte Belastungen	C45/55 statt C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	≥ 1.0	A1	Durchgeführt mit Nagel 5 in C45/55	B	10	F5	Maximales Drehmoment	C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht erforderlich, es wird keine Gewindeversion bewertet	B	10	F6	Wasserstoffversprödung	C20/25	0	min. t_{fix}	-	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht notwendig, Nägel werden bereits für normalen Beton bewertet	F7	Dauerhaftigkeit	Bolzenschubnägeln wurden bereits für Normalbeton bewertet											
F3	Funktion in niedrigfestem Beton	C20/25	0.35	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,75$	A3	Nicht notwendig, Festigkeit ist immer größer als C45																																																												
					B	10				F4	Wiederholte Belastungen	C45/55 statt C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	≥ 1.0	A1	Durchgeführt mit Nagel 5 in C45/55	B	10	F5	Maximales Drehmoment	C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht erforderlich, es wird keine Gewindeversion bewertet	B	10	F6	Wasserstoffversprödung	C20/25	0	min. t_{fix}	-	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht notwendig, Nägel werden bereits für normalen Beton bewertet	F7	Dauerhaftigkeit	Bolzenschubnägeln wurden bereits für Normalbeton bewertet																							
F4	Wiederholte Belastungen	C45/55 statt C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	≥ 1.0	A1	Durchgeführt mit Nagel 5 in C45/55																																																												
					B	10				F5	Maximales Drehmoment	C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht erforderlich, es wird keine Gewindeversion bewertet	B	10	F6	Wasserstoffversprödung	C20/25	0	min. t_{fix}	-	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht notwendig, Nägel werden bereits für normalen Beton bewertet	F7	Dauerhaftigkeit	Bolzenschubnägeln wurden bereits für Normalbeton bewertet																																			
F5	Maximales Drehmoment	C20/25	0	max. t_{fix}	A	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht erforderlich, es wird keine Gewindeversion bewertet																																																												
					B	10				F6	Wasserstoffversprödung	C20/25	0	min. t_{fix}	-	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht notwendig, Nägel werden bereits für normalen Beton bewertet	F7	Dauerhaftigkeit	Bolzenschubnägeln wurden bereits für Normalbeton bewertet																																															
F6	Wasserstoffversprödung	C20/25	0	min. t_{fix}	-	5	$\geq 0,9$	A1	Nicht notwendig, Nägel werden bereits für normalen Beton bewertet																																																												
F7	Dauerhaftigkeit	Bolzenschubnägeln wurden bereits für Normalbeton bewertet																																																																			

¹⁾ Tatsächliche Anzahl der durchgeführten Versuche.

Um das Versuchsprogramm an die Anforderungen an vorgespannte Hohldeckenplatten anzupassen, wurden die unterschiedlichen Versuchsreihen als notwendig oder nicht notwendig beurteilt. Die Ergebnisse der Überlegungen sind im Folgenden zusammengefasst:

- Die Versuchsserien F1 und F2 sind nicht erforderlich, da vorgespannte Hohldeckenplatten eine definierte Verteilung der Gesteinskörnungen aufweisen.
- Die Versuche F3 sind nicht notwendig, da vorgespannte Hohldeckenplatten eine Mindestfestigkeit von C45/55 aufweisen.
- Die Versuche F5 wurden nicht durchgeführt, da eine Gewindeausführung der Bolzenschubnägeln nicht Gegenstand der vorliegenden Bewertung ist.
- Die Versuche F6 und F7 wurden nicht durchgeführt, da bereits alle 5 Nagelsysteme für Normalbeton bewertet wurden. Die Ergebnisse dieser Versuche hängen nicht vom Verankerungsgrund ab, in dem das Befestigungselement installiert wurde. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse, die für Normalbeton ermittelt wurden, weiterhin gültig und können für die Bewertung in vorgespannten Hohldeckenplatten herangezogen werden.

Die F4-Versuche wurden nur für den Bolzenschubnagel Nr. 5 durchgeführt, da die F0-Versuche gezeigt haben, dass dieser der ungünstigste Bolzenschubnagel hinsichtlich Streuung und Tragfähigkeit ist.

4.3 Zug- und Querlastversuche

Die erforderlichen Zug- und Querlastversuche sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst. Die Versuche wurden durchgeführt, um die charakteristische Tragfähigkeit zu ermitteln. Daher müssen die Zugversuche in niedrigstem Beton mit und ohne Risseinfluss durchgeführt werden. Die Randbedingungen der vorgespannten Hohldeckenplatten sind jedoch abweichend, da diese in der Regel ungerissen bleiben.

Tabelle 4.3: Zugversuche und Querzugversuche zur Ableitung der Tragfähigkeit.

Nr.	Zweck der Prüfung	Beton	Rissbreite Δw	Dicke der Vorrichtung	Richtung der Belastung	Streuereich	Min. Anzahl Versuche	Bemerkung
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
A1	Charakteristische Beständigkeit gegen Zugbelastung	C20/25	0	max. tfix	N	A	10	Nicht notwendig, Festigkeit ist immer größer als C45
						B	20	
A2	Charakteristische Beständigkeit gegen Zugbelastung	C45/55	0	max. tfix	N	A	10	Durchgeführt mit Nagel Nr. 5
						B	20	
A3	Charakteristische Beständigkeit gegen Zugbelastung	C20/25	0.2	max. tfix	N	A	10	Nicht notwendig, vorgespannte Hohldeckenplatten bleiben ungerissen
						B	20	
A4	Charakteristische Beständigkeit gegen Zugbelastung	C50/60	0.2	max. tfix	N	A	10	
						B	20	
A5	Charakteristische Widerstandsfähigkeit gegen Schubbelastung	C45/55	0	max. tfix	V	A	5	Durchgeführt mit Nagel Nr. 5
						B	10	

Um das Versuchsprogramm an die Anforderungen an vorgespannte Hohldeckenplatten anzupassen, wurden die unterschiedlichen Versuchsreihen in Tabelle 4-3 als notwendig oder nicht notwendig beurteilt. Die Ergebnisse der Überlegungen sind im Folgenden wiedergegeben.

- Versuche A1 wurden nicht berücksichtigt, da vorgespannte Hohldeckenplatten im Vergleich zu C20/25 immer eine höhere Betonfestigkeit aufweisen. Die Mindestfestigkeitsklasse ist C45/55.
- Für die Beurteilung der Leistung in gerissenem Beton sind A3 und A4-Versuche erforderlich. Gerissener Beton ist daher für Anwendungen in vorgespannten Hohldeckenplatten nicht relevant, da die Hohldeckenplatten unter Bemessungslast ungerissen bleiben.

Die Versuchsreihen A2 und A5 wurden jedoch in den vorgespannten Hohldeckenplatten durchgeführt. Die Versuchsserie A2 wurde in Hohldeckenplatten mit minimaler Betonfestigkeit (C45/55) durchgeführt.

4.4 Zusammenfassung des Versuchsprogramms

Die durchgeführten Versuche sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Die Tabelle zeigt, dass die erforderliche Mindestanzahl an Versuchen pro Versuchsserie durchgeführt wurde.

Tabelle 4.4: Zusammenfassung der durchgeführten Versuchsreihen (Anzahl der Prüfungen).

Nr.	Produkt	Zweck der Prüfung	Beton	Δw	Anbauteildicke	Min. Versuche nach EAD [2]	Anzahl der durchgeführten Versuche *
[-]	[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[-]	[-]
F0	Nagel 1	Vorversuche	C45/55	0	$t_{\text{fix}} = 0,6 \text{ bis } 1,0$	50	20 von 41 Versuchen
F0	Nagel 2		C45/55	0	$t_{\text{fix}} = 0,6 \text{ bis } 2,0$	50	20 von 29 Versuchen
F0	Nagel 3		C45/55	0	$t_{\text{fix}} = 11,0$	50	20 von 33 Versuchen
F0	Nagel 4		C45/55	0	$t_{\text{fix}} = 11,0$	50	20 von 37 Versuchen
F0	Nagel 5 16 mm		C45/55	0	$t_{\text{fix}} = 2,0$	50	41 von 66 Versuchen
S0	Nagel 5 38 mm	Setzversuche	C45/55	0	$t_{\text{fix}} = 2,0 \text{ (hart)}$ $t_{\text{fix}} = 20,0 \text{ (weich)}$	10	13 von 15 Versuchen
F4	Nagel 5 16 mm	Wiederholte Belastungen	C20/25	0	$t_{\text{fix}} = 2,0$	10	10 von 20 Versuchen
A2	Nagel 5 38 mm	Charakteristische Tragfähigkeit	C50/60	0	$t_{\text{fix}} = 21 \text{ oder } 23$	10	12 von 41 Versuchen
A5	Nagel 5 38 mm	Charakteristische Quertragfähigkeit	C20/25	0	$t_{\text{fix}} = 21,0$	10	10 von 20 Versuchen

* Anzahl der gültigen Versuche im Verhältnis zur Gesamtzahl der durchgeführten Versuche.

4.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Eine Zusammenfassung der mittleren Tragfähigkeit und der wichtigsten Versuchsparameter findet sich in Tabelle 4.5. Eine detaillierte Übersicht über die einzelnen Ergebnisse ist in Anhang A enthalten.

Tabelle 4.5: Ergebnisse der durchgeführten Versuche.

Versuche	Produkt	Beton	t_{fix}	n_{test}	HEF	Ausfall Last N_u	$s(N_u)$	COV(N_u)	Last $N_{u,45}$	$s(N_{u,45})$	COV($N_{u,45}$)
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[mm]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]	[%]
F0	Nagel 1	66.27	0.6-1	20	10.99	1.61	0.70	43.40	1.47	0.64	43.40
F0	Nagel 2	66.27	0.6-2	20	12.06	1.35	0.82	60.85	1.23	0.75	60.85
F0	Nagel 3	66.27	11.0	20	27.99	4.45	3.23	72.69	4.05	2.95	72.69
F0	Nagel 4	66.27	11.0	20	25.74	1.12	1.12	100.23	1.02	1.02	100.23
F0	Nagel 5	66.27	2.0	41	13.45	1.62	1.16	72.06	1.47	1.06	72.06
F4	Nagel 5	66.27	2.0	12	13.22	1.54	1.44	93.61	1.40	1.31	93.61
A2	Nagel 5	66.27	21.0	15	13.92	1.03	1.06	103.30	0.93	0.97	103.30
S0	Nagel 5	66.27	20.0	13	14.30	1.01	1.12	111.47	0.92	1.02	111.47
A5	Nagel 5	66.27	21.0	10	14.77	1.40	1.05	75.41	1.27	0.96	75.41

5 BEWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE

5.1 Allgemeines

Die Tragfähigkeiten wurden normiert, um die Beton- und Stahlfestigkeit der Versuchskörper und Bolzenschubnägeln zu berücksichtigen. Die Normierung erfolgt in Anlehnungen an EAD 330083-03-0601. Die Bruchlasten wurden dabei auf eine Betonfestigkeit C45/55, wie in Abschnitt 4.1.1 angegeben, normiert.

Bei den Versuchen mit Stahlversagen zeigte sich stets auch eine Schädigung des Betons. Aus diesem Grund wurden die Versuchsergebnisse ebenfalls auf eine Betonfestigkeit von C45/55 normiert. Es wird also davon ausgegangen, dass das beobachtete Stahlversagen ein sekundäres Versagen ist.

5.2 Auswertung der F0-Versuche

Ziel der F0-Versuche (Vorversuche) ist es, die minimale Versuchsanzahl zu bestimmen, die mit den Bolzenschubnägeln durchgeführt werden müssen. Abhängig vom ermittelten Variationskoeffizienten (COV) der Versuchsserie wird dem Bolzenschubnagel ein Streubereich (A bzw. B) zugeordnet. Die Anzahl der durchzuführenden Versuche hängt von diesem Streubereich ab.

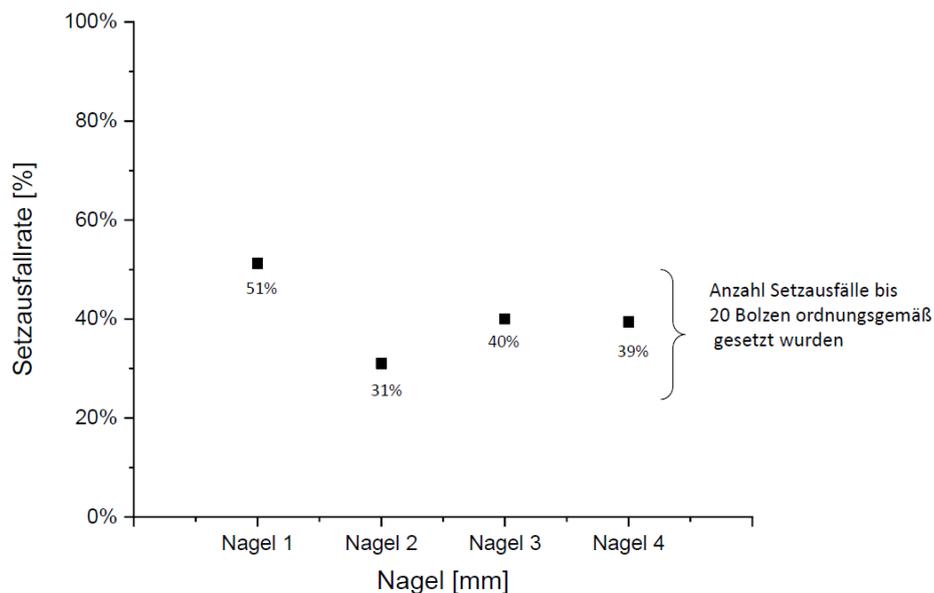


Abbildung 5-1: Setzausfallrate für die 5 untersuchten Bolzenschubnägeln.

In dieser Bewertung werden die F0-Versuche als Referenzversuche behandelt und entsprechend für die Auswertung berücksichtigt. Abbildung 5-1 zeigt die Anzahl der festgestellten Montagefehler für jeden untersuchten Bolzenschubnagel. Das „Verankerungssystem“ mit den meisten Setzausfällen war mit ca. 50 % der Bolzenschubnagel Nr. 1. Der Nagel mit der geringsten Anzahl an Setzausfällen war mit ca. 30 % der Bolzenschubnagel Nr. 2.

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 5.1 und 5.2 zusammengefasst. Die normierten Bruchlasten $N_{u,45}$ sind in Tabelle 5.1, die Ergebnisse für die Verankerungstiefen h_{ef} sind in Tabelle 5.2 aufgeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse hinsichtlich Setzfehler und Versagensart, die sich für jeden Nagel auf der Grundlage der F0-Versuche ergibt, ist in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Vorversuche ($N_{u,45}$) für alle 5 Bolzenschubnägel.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	Last Richtung	$n_{req.}$	n_{test}	$N_{u,45}$	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]
F0	Nagel 1	66.27	0.6-1	N	50	20	1.47	0.64	43.40	0.46	2.75
F0	Nagel 2	66.27	0.6-2	N	50	20	1.23	0.75	60.85	0.11	2.71
F0	Nagel 3	66.27	11.0	N	50	20	4.05	2.95	72.69	0.28	9.16
F0	Nagel 4	66.27	11.0	N	50	20	1.02	1.02	100.23	0.11	3.71
F0	Nagel 5	66.27	2.0	N	50	41	1.47	1.06	72.06	0.09	3.90

Tabelle 5.2: Ergebnisse der Vorversuche (h_{ef}) für alle 5 Bolzenschubnägel.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	h_{ef}	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
F0	Nagel 1	66.27	0.6-1	10.99	1.92	17.46	6.30	13.90
F0	Nagel 2	66.27	0.6-2	12.06	1.65	13.65	8.70	15.00
F0	Nagel 3	66.27	11.0	27.99	2.45	8.75	22.40	31.10
F0	Nagel 4	66.27	11.0	19,74	2,97	15,08	16,30	25,30
F0	Nagel 5	66.27	2.0	13.45	0.88	6.55	11.50	15.60

Tabelle 5.3: Unterschiedliche Setzfehler in den F0-Versuchen.

Art	n_{test}	$N_{u,45}$	$s(N_{u,45})$	COV ($N_{u,45}$)	h_{ef}	$s(h_{ef})$	KURVE (h_{ef})
[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]	[mm]	[mm]	[%]
Nagel 1: Hilti XP 17 B3 Nägel mit BX3 Setzgerät							
Mängel	20	1.47	0.64	43.40	10.99	1.92	17.46
Gesamt	41						
Nagel 2: SPIT HC6-17 mit Pulsa 65 Setzgerät							
Mängel	20	1.23	0.75	60.85	12.06	1.65	13.65
Gesamt	29						
Nagel 3: SPIT SC 9-70 Nägel mit P370 Setzgerät							
Mängel	20	4.05	2.95	72.69	27.99	2.45	8.75
Gesamt	33						
Nagel 4: Würth XZDP3065 Nägel mit der DIGA CSM-1 Setzgerät							
Mängel	20	1.02	1.02	100.23	25.74	16.23	63.07
Gesamt	37						
Nagel 5a: Würth NG CS-2/3 HFBx Nagel mit DIGA CS3 Setzgerät							
Mängel	41	1.47	1.06	72.06	13.45	0.88	6.55
Gesamt	66						

In Abbildung 5-3 wird der Einfluss der Verankerungstiefe für die F0-Versuche auf die normierte Versagenslast dargestellt. Die Versuche wurden mit allen 5 Bolzenschubnägeln durchgeführt. Die Verankerungstiefe hängt dabei von der Art des Nagels ab. Die Streuung der Versagenslast ist bei den verschiedenen Nägeln ebenfalls unterschiedlich, allerdings kommt es bei größeren Verankerungstiefen nur zu einer geringen Lastzunahme.

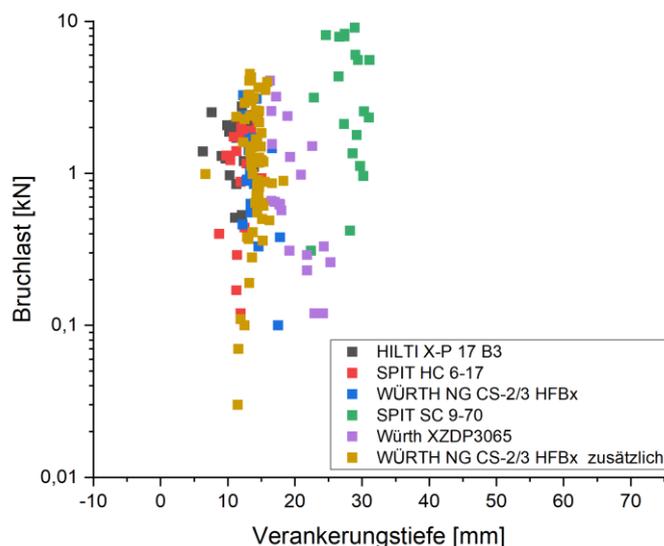


Abbildung 5-2: Einfluss der Verankerungstiefe auf die normierte Versagenslast $N_{u,45}$, unterschieden nach Nageltypen.

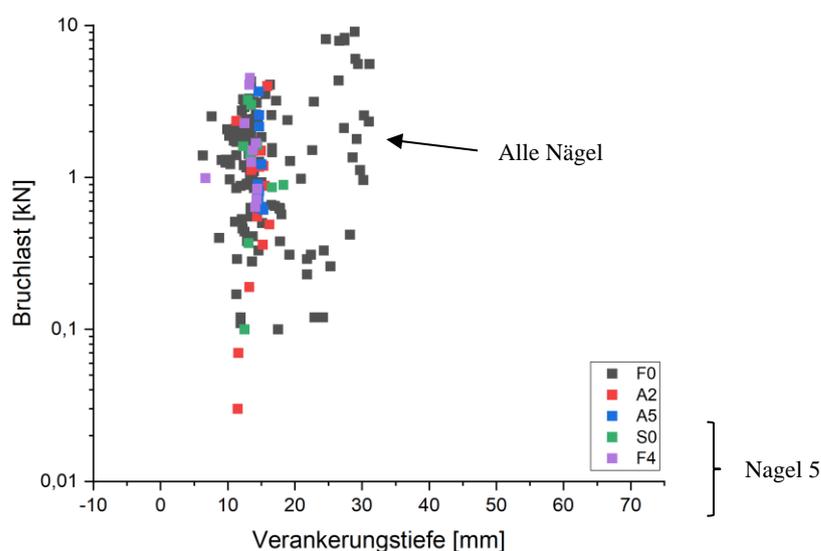


Abbildung 5-3: Einfluss der Verankerungstiefe auf die normierte Versagenslast $N_{u,45}$, unterschieden nach Versuchsserien.

Die Verteilung der normierten Bruchlasten, die sich aus allen Versuchsserien und aus den F0-Versuchen ergibt, ist in Abbildung 5-3 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass Nagel 5 die geringste Streuung bezüglich der Verankerungslänge, jedoch eine relativ hohe Streuung bei der Bruchlast, aufweist. Die Auswertung einer logarithmischen Normalverteilung zeigt, dass die F0-Versuchsserie brauchbar passt und die logarithmische Normalverteilung statistisch angenommen werden kann.

Eine deutlich bessere Anpassung der Ergebnisse ist für eine Weibull-Verteilung zu erkennen. Die Anpassung der Ergebnisse ist in Abbildung 5-3 dargestellt.

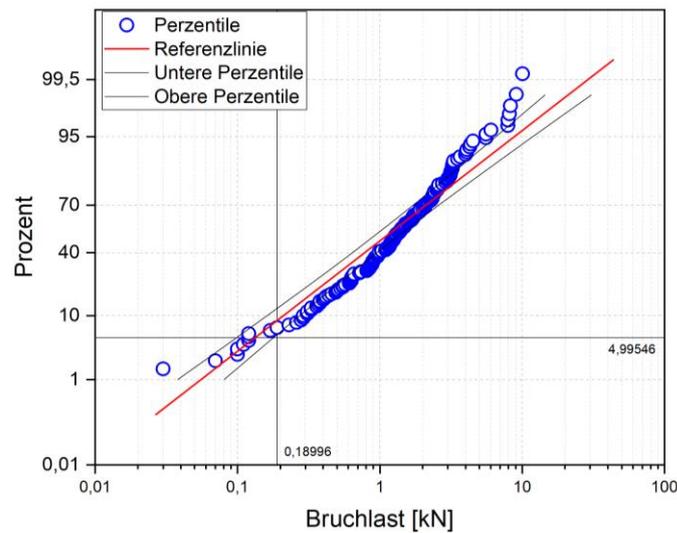


Abbildung 5-4: Logarithmische Normalverteilung der normierten Bruchlasten $N_{u,45}$ unter Verwendung aller Versuche.

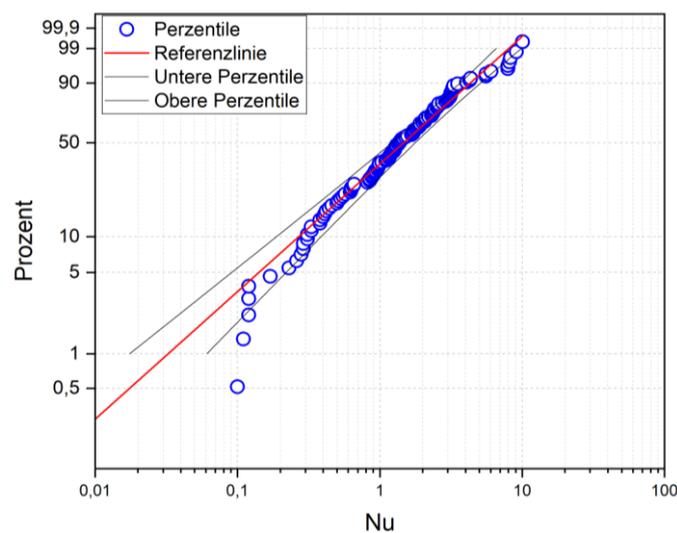


Abbildung 5-5: Weibull-Verteilung der normierten Bruchlasten $N_{u,45}$ unter Verwendung aller Versuche.

Betrachtet man die Versuchsergebnisse der verschiedenen Nageltypen hinsichtlich der Tragfähigkeit und Verankerungstiefe, so ist zu erkennen, dass Nagel Nr. 5 (Würth NG CS-2/3 HFBx mit DIGA CSM-3) auch sehr niedrige Werte von ca. 0,1 kN aufweist. Die geringste in den Versuchen beobachtete Versagenslast betrug 0,09 kN. Die Ergebnisse zeigen eine Streuung von ca. 70 %, auch wenn die Streuung der Einbettungstiefe selbst nur in etwa 6,6 % beträgt und somit am geringsten von allen untersuchten Nägeln ist. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass Nagel Nr. 5 der ungünstigste Nagel für die weitere Bewertung anhand von Versuchen ist.

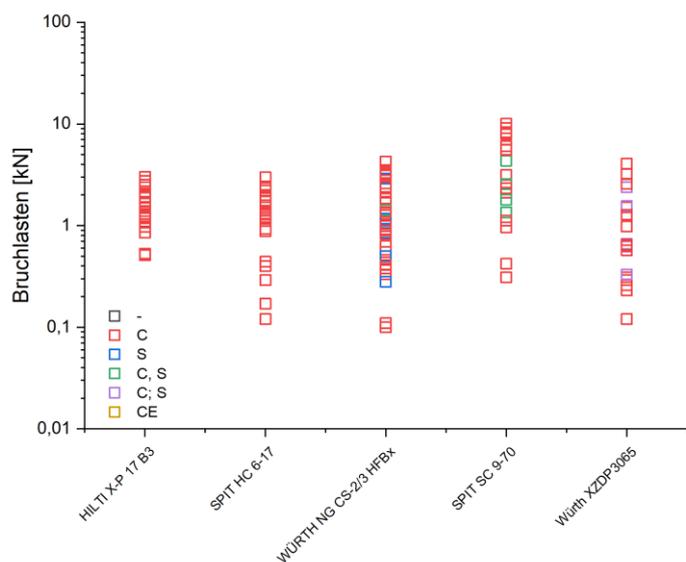


Abbildung 5-6: Bewertung der Tragfähigkeit für die untersuchten Nageltypen unterschieden nach Versagensart (Bezeichnung der Versagensarten siehe Prüfbericht).

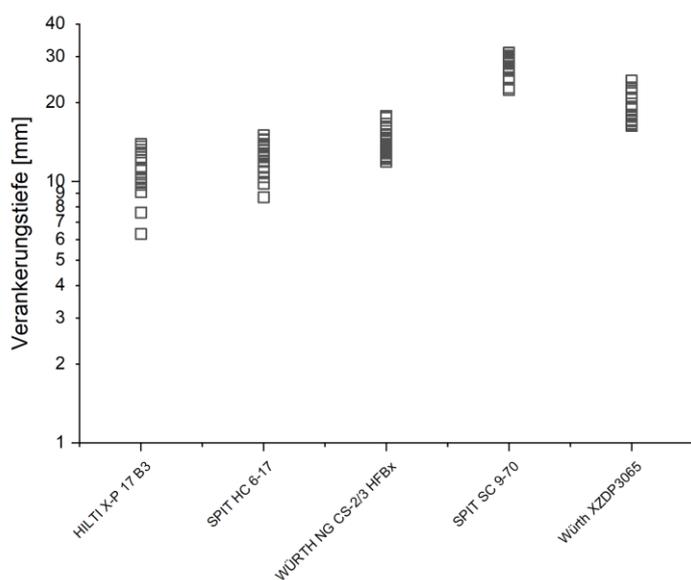


Abbildung 5-7: Bewertung der Verankerungstiefe für die untersuchten Nageltypen.

Basierend auf der Auswertung der F0-Versuche wurde festgestellt, dass alle fünf Verankerungssysteme im Streubereich B ($COV > 20\%$) liegen und Nagel Nr. 5 der für die weiteren Versuche kritischste Nagel ist.

5.3 Auswertung der F4-Versuche

Die Auswertung der Resttragfähigkeit nach den Funktionsversuchen (F4), die den Einfluss einer zyklischen Belastung simulieren, ist in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Die Tragfähigkeiten wurden auf die Festigkeitsklasse C45/55 normiert. In Tabelle 5.5 ist die Auswertung für die ermittelte Verankerungstiefe zusammengefasst.

Zwei von 12 Proben zeigten ein Versagen während der zyklischen Belastung, was auf einen Montagefehler hinweist, der direkt nach der Installation nicht erkennbar war. Für diese Versuche wird die Tragfähigkeit gemäß EAD 330083-03-0601 mit 0,001 kN angenommen. Es wird darauf hingewiesen, dass die F4-Versuche und F0-Versuche mit Nagel Nr. 5 (Länge 16 mm) und einer Anbauteildicke von 2 mm durchgeführt wurden.

Die mittlere Verankerungslänge in den beiden Versuchsserien (13,45 mm bzw. 13,22 mm in den F0-Versuchen bzw. F4-Versuchen) ist vergleichbar. Die mittlere normierte Tragfähigkeit in den F4-Versuchen (1,4 kN) ist im Vergleich zu den Ergebnissen der F0-Versuche (1,47 kN) leicht geringer. So ermittelt sich ein Reduktionsfaktor für die Tragfähigkeit von 0,95 (Mittelwertvergleich) für den Einfluss einer zyklischen Belastung.

Tabelle 5.4: Ergebnisse der Funktionsversuche F4 ($N_{u,45}$) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	Last- richtung	n_{req}	n_{rest}	$N_{u,45}$	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]
F4	Nagel 5	66.27	2.0	N	10	12	1.40	1.31	93.61	0.001	4.11
F0	Nagel 5	66.27	2.0	N	50	41	1.47	1.06	72.06	0.09	3.90

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Funktionsversuche F4 (h_{ef}) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	h_{ef}	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
F4	Nagel 5	66.27	2.0	13.22	2.14	16.17	6.70	14.50
F0	Nagel 5	66.27	2.0	13.45	0.88	6.55	11.50	15.60

5.4 Auswertung der S0-Versuche

Die Setzversuche (S0) wurden mit dem Nagel Nr. 5 mit einer Länge von 38 mm durchgeführt. Die Versuche sollten den Einfluss eines weichen Anbauteils und der Anbauteildicke selbst ermitteln. Aufgrund eines weichen Anbauteils kann die Einbettungstiefe, und damit auch die Streuung der Einbettungstiefe, zunehmen. Zudem kann der Nagel, da er weniger geführt wird, beim Setzvorgang abknicken und verbogen werden.

Dieser Effekt ist typisch, wenn der Nagel nur zur Befestigung dünner Anbauteile (z. B. 2 mm) verwendet wird. Um diesen Effekt zu simulieren, wurde in den S0-Versuchen eine Gesamtanbauteildicke von 22 mm (2 mm Stahlanbauteil + 20 mm weiches Anbauteil) verwendet. Die Auswertung der normierten Bruchlasten und der Verankerungstiefen in den S0-Versuchen ist in den beiden folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 5.6: Versuchsergebnisse zum Einfluss des Anbauteils ($N_{u,45}$) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	Last- richtung	$n_{\text{req.}}$	n_{test}	$N_{u,45}$	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]
S0	Nagel 5	66.27	2.0 (schwer) 20,0 (weich)	N	13	0	0.92	1.02	111.47	0.001	2.94
F0	Nagel 5	66.27	2.0	N	50	41	1.47	1.06	72.06	0.09	3.90

Tabelle 5.7: Versuchsergebnisse zum Einfluss des Anbauteils (h_{ef}) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	h_{ef}	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
S0	Nagel 5	66.27	2.0 (schwer) 20,0 (weich)	14.30	1.75	12.27	12.30	18.30
F0	Nagel 5	66.27	2.0	13.45	0.88	6.55	11.50	15.60

Bei 4 von 13 Proben wurde ein Montagefehler bei der Montage und der Befestigung des Anbauteils festgestellt. Diese Montagefehler waren nach der Montage nicht direkt sichtbar. Für diese Proben wird die Tragfähigkeit gemäß EAD 330083-03-0601 mit 0,001 kN angenommen.

Die mittlere Verankerungstiefe in den S0-Versuchen (14,3 mm) ist größer als in den F0-Versuchen. Dies kann auf den Unterschied in der Nagellänge und der Dicke des Anbauteils zurückgeführt werden. Die theoretische Verankerungstiefe bei einer Anbauteildicke von 22 mm und einer Nagellänge von 38 mm beträgt 16 mm. Da das Anbauteil „weich“ war, erhöhte sich bei gleichbleibender Montageintensität die Verankerungstiefe des Nagels um ca. 2,5 mm.

Die mittlere normierte Bruchlast der S0-Versuche (0,92 kN) ist im Vergleich zu den F0-Versuchen (1,47 kN) deutlich geringer. Dies liegt daran, dass die Montagefehler mit einer Bruchlast

von 0,001 kN berücksichtigt werden. Werden diese Versuche nicht berücksichtigt, würde die mittlere Bruchlast 1,35 kN betragen und damit in etwa dem Ergebnis der F0-Versuche entsprechen. Daher muss ein Abminderungsfaktor von 0,62 (bezogen auf den Mittelwert) für den Einfluss weicher Anbauteile berücksichtigt werden.

5.5 Auswertung der A2-Versuche

Die A2-Versuche wurden gemäß EAD 330083-03-0601 mit einer maximalen Anbauteildicke von 20 mm unter Verwendung des Nagels Nr. 5 mit einer Länge von 38 mm durchgeführt. Der Unterschied zwischen den A2- und F0-Versuchen besteht lediglich in der Länge des Nagels, der Dicke des Anbauteils und der daraus resultierenden Verankerungslänge.

Eine Auswertung der Tragfähigkeiten der A2-Versuche ist in Tabelle 5.8 zusammengefasst. Eine Auswertung der normierten mittleren Bruchlasten, die die Anzahl der Versuche incl. Montagefehler beinhaltet, sind in den folgenden Tabellen aufgeführt.

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Zugversuche A2 ($N_{u,45}$) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	Last Richtung	n_{req}	n_{test}	$N_{u,45}$	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]
A2	Nagel 5	66.27	21.0/23.0	N	20	15	1,16	0,95	82,08	0.17	3.64
F0	Nagel 5	66.27	2.0	N	50	41	1.47	1.06	72.06	0.09	3.90

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Zugversuche A2 (h_{ef}) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	h_{ef}	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
A2	Nagel 5	66.27	21.0/23.0	14,48	1,37	9,48	11,30	16,20
F0	Nagel 5	66.27	2.0	13.45	0.88	6.55	11.50	15.60

Tabelle 5.10: Montagefehler und mittlere Ausfalllast $N_{u,45,m}$ für die Zug- und Querlastversuche.

Versuchsreihe	Setzfehler			Mittlere Ausfalllast [kN]		
	1	2	3	1	2	3
A2	26	12	3	0	1.16	0.031

1 = Fehler bei der Installation, 2 = geneigt, 3 = ohne sichtbaren Fehler

Bei einem von 15 A2-Versuchen wurde ein Montagefehler beobachtet. Der Montagefehler war nach Abschluss der Installation nicht erkennbar. Für diesen Versuch wird die Bruchlast gemäß EAD 330083-03-0601 mit 0,001 kN angenommen.

Die mittlere Verankerungslänge war in den A2-Versuchen (13,92 mm) im Vergleich zur Versuchsreihe F0 geringfügig höher. Die mittlere normierte Bruchlast der A2-Versuche (0,93 kN) ist im Vergleich zu den F0-Versuchen (1,47 kN) deutlich geringer. Es gilt ein Abminderungsfaktor von 0,64 (bezogen auf den Mittelwert).

5.6 Auswertung der Versuchsreihe A5 (Querbelastrung)

Die A5-Versuche wurden gemäß EAD 330083-03-0601 mit einer maximalen Anbauteildicke von 20 mm und Nagels 5 mit einer Länge von 38 mm durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Bruchlasten ist in der folgenden Tabelle gegeben.

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Querlastversuche ($N_{u,45}$) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	Last Richtung	n_{req}	n_{test}	$N_{u,45}$	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[%]	[kN]	[kN]
A5	Nagel 5	66.27	21.0	V	10	10	1.27	0.96	75.41	0.556	3.34
F0	Nagel 5	66.27	2.0	N	50	41	1.47	1.06	72.06	0.09	3.90

Tabelle 5.12: Ergebnisse der Querlastversuche (h_{ef}) für Nagel 5.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	h_{ef}	s	COV	Min.	Max
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]
A5	Nagel 5	66.27	21.0	14,77	0,25	1,69	14,50	15,30
F0	Nagel 5	66.27	2.0	13.45	0.88	6.55	11.50	15.60

Tisch 5.13: Montagefehler und mittlere Bruchlast $N_{u,45,m}$ für die Querzugversuche.

Versuchsreihe	Setzfehler			Mittlere Ausfalllast [kN]		
	1	2	3	1	2	3
A5	10	10	0	0	1.27	0

1 = Fehler bei der Installation, 2 = geneigt, 3 = ohne sichtbaren Fehler

Bei den Querlastversuchen (A5) wurden keine Montagefehler beobachtet. Die mittlere Verankerungslänge ist in den A5-Versuchen (14,77 mm) im Vergleich zu den F0-Versuchen etwas höher. Die mittlere normierte Tragfähigkeit der A5-Versuche (1,27 kN) ist im Vergleich zu den F0-Versuchen (1,47 kN) ebenfalls um 0,2kN geringer. Dies liegt an der unterschiedlichen Belastungsrichtung und dem anzunehmenden inneren Hebelarm. Durch diesen kann die einwirkende Zugkraftkomponente verstärkt werden, so dass unter Querbelastrung die Tragfähigkeit geringer ausfällt als unter Zugbelastrung. In diesem Fall werden die Querlastversuche getrennt von den Zugversuchen ausgewertet, um die charakteristische Tragfähigkeit direkt anhand der Versuchsreihe A5 zu ermitteln.

5.7 Charakteristische Tragfähigkeit der Bolzenschubnägel

Eine Bewertung der 5%-Fraktile (charakteristischer Widerstand) der normierten Tragfähigkeiten erfolgt unter Annahme der logarithmischen Normalverteilung gemäß EAD 330083-03-0601. Die Bewertung der 5%-Fraktile aller Versuchsreihen ist in der Tabelle 5.14 aufgeführt.

Für die Referenzversuche (A2) beträgt die 5 %-Fraktile der Tragfähigkeit, je nach Annahme, 0,16 kN bis 0,22 kN. Dieser Wert aus den F0-Versuchen wird als Referenztragfähigkeit für Nagel 5 und damit auch für alle anderen Nageltypen herangezogen, da Nagel Nr. 5 im Vergleich zu den anderen Nageltypen als ungünstigster Nagel hinsichtlich Tragfähigkeit identifiziert wurde. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass auch Nagel Nr. 4 im gleichen Tragfähigkeitsbereich bzw. etwas niedriger als Nagel Nr. 5 liegt. Da die Streuung beim Nagel 4 geringer ist, und die Abminderung für die unterschiedlichen Einflüsse ebenfalls geringer ausfällt als beim Nagel Nr. 5 (siehe Abschnitt 5.8), ist die charakteristische Tragfähigkeit etwas höher.

Tabelle 5.14: Auswertung der 5%-Fraktile der durchgeführten Versuchsserien, **einschließlich nicht sichtbarer Montagefehler** ($N_{u, \text{Montagefehler}} = 0,01 \text{ kN}$).

Nr.	Produkt	Beton	tfix	Δw	ntest	$\ln(N_{u,45})$	s	k	$\ln(N5\%)$	N5%
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[kN]
F0	Nagel 1	66.27	0.6-1	0	20	0,28	0,49	2,21	-0,81	0,44
F0	Nagel 2	66.27	0.6-2	0	20	-0,08	0,91	2,21	-2,10	0,12
F0	Nagel 3	66.27	11.0	0	20	1,01	1,04	2,21	-1,27	0,28
F0	Nagel 4	66.27	11.0	0	20	-0,47	1,05	2,21	-2,78	0,06
F0	Nagel 5	66.27	2.0	0	56	-0,24	1,41	1,97	-3,01	0,05
F4	Nagel 5	66.27	2.0	0	12	-0,92	2,91	2,45	-8,04	0,000323
A2	Nagel 5	66.27	23.0/21.0	0	15	-1,01	2,11	2,33	-5,92	0,002687
S0	Nagel 5	66.27	20.0	0	13	-2,22	3,44	2,40	-10,47	0,000028
A5	Nagel 5	66.27	21.0	0	10	0,03	0,66	2,57	-1,66	0,190353

Tabelle 5.15: Auswertung der 5%-Fraktile der durchgeführten Versuchsserien **ohne nicht sichtbarer Montagefehler** ($N_{u, \text{Montagefehler}} = 0,01 \text{ kN}$).

Nr.	Produkt	Beton	tfix	Δw	ntest	$\ln(N_{u,45})$	s	k	$\ln(N5\%)$	N5%
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[kN]
F0	Nagel 1	66.27	0.6-1	0	20	0,28	0,49	2,21	-0,81	0,44
F0	Nagel 2	66.27	0.6-2	0	20	-0,08	0,91	2,21	-2,10	0,12
F0	Nagel 3	66.27	11.0	0	20	1,01	1,04	2,21	-1,27	0,28
F0	Nagel 4	66.27	11.0	0	20	-0,47	1,05	2,21	-2,78	0,06
F0	Nagel 5	66.27	2.0	0	56	-0,11	1,08	1,97	-2,24	0,11
F4	Nagel 5	66.27	2.0	0	10	0,30	0,68	2,57	-1,45	0,23
A2	Nagel 5	66.27	23.0/21.0	0	12	-0,15	0,84	2,45	-2,19	0,11
S0	Nagel 5	66.27	20.0	0	9	-0,09	1,09	2,65	-2,98	0,051
A5	Nagel 5	66.27	21.0	0	10	0,03	0,66	2,57	-1,66	0,19

Tabelle 5.16: Auswertung der 5%-Fraktile der durchgeführten Versuchsserien **ohne** nicht sichtbarer Montagefehler ($N_{u, \text{Montagefehler}} = 0,01 \text{ kN}$) und unter Annahme einer Normal-Verteilung ($k = 1,654$).

Nr.	Produkt	Beton	tfix	Δw	ntest	$\ln(N_{u,45})$	s	k	$\ln(N5\%)$	N5%
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[kN]
F0	Nagel 1	66.27	0.6-1	0	20	0,28	0,49	1,65	-0,53	0,59
F0	Nagel 2	66.27	0.6-2	0	20	-0,08	0,91	1,65	-1,59	0,20
F0	Nagel 3	66.27	11.0	0	20	1,01	1,04	1,65	-0,69	0,50
F0	Nagel 4	66.27	11.0	0	20	-0,47	1,05	1,65	-2,19	0,11
F0	Nagel 5	66.27	2.0	0	56	-0,11	1,08	1,65	-1,90	0,16
F4	Nagel 5	66.27	2.0	0	10	0,30	0,68	1,65	-0,82	0,44
A2	Nagel 5	66.27	23.0/21.0	0	14	-0,15	0,84	1,65	-1,52	0,22
S0	Nagel 5	66.27	20.0	0	9	-0,09	1,09	1,65	-1,88	0,15
A5	Nagel 5	66.27	21.0	0	10	0,03	0,66	1,65	-1,05	0,35

Unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung mit einem zugehörigen k-Wert von 1,645 und ohne Berücksichtigung nicht sichtbarer Setzfehler **beträgt der kleinste charakteristische Widerstand $N_{Rk} = 0,11 \text{ kN}$ (110 N)** für alle Nageltypen bzw. Befestigungssysteme.

5.8 Abminderungsfaktor α für die charakteristische Tragfähigkeit

Es wurden unterschiedliche Bedingungen untersucht, um die Abminderungsfaktoren bei Anwendungsbedingungen ermitteln zu können, die von den untersuchten und geplanten Standardbedingungen abweichen. Die α Abminderungsfaktoren werden wie folgt berechnet:

$$\alpha = \min\left(\frac{F_{u,m,t}}{F_{u,m,r}} ; \frac{F_{u,5\%,t}}{F_{u,5\%,r}}\right) \quad \text{Gl. 5}$$

mit:

$F_{u,m,t}$: Mittlere Tragfähigkeit der betrachteten Versuchsreihe

$F_{u,m,r}$: Mittlere Tragfähigkeit der Referenzversuche

$F_{u,5\%,t}$: 5%-Fraktile der betrachteten Versuchsreihe

$F_{u,5\%,r}$: 5%-Fraktile der Referenzversuche

Da die Anzahl der Versuche für die unterschiedlichen Funktionstests von der Anzahl der Referenztests abweicht, werden die Abminderungsfaktoren nur für die Mittelwerte der Versuchsreihen berechnet. Tabelle 5.17 fasst den Abminderungsfaktor für die verschiedenen Funktionsversuche zusammen.

Tabelle 5.17: Mittlerer Abminderungsfaktor für die durchgeführten Funktionsversuche.

Versuchsserie	$N_{u,25}$	5%-Fraktile	β_{in}	α	Kriterium α	$\alpha_{Vorgeschlagen}$
[-]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[-]
F0	1,47	0,15	-	-	-	-
F4	1,40	0,44	0,95	2,93	1,0	1,0
A2	0,93	0,22	0,63	1,47	1,0	
S0	0,92	0,15	0,63	1,00	1,0	
A5	1,27	0,19	-	-	-	-

Im Rahmen der Untersuchungen für die Abminderungsfaktoren werden die Auswirkungen einer wechselnden Belastung (F4), eines weichen Anbauteils (S0) und unterschiedliche Nagellängen bzw. Nageltypen sowie Anbauteildicken (A2) berücksichtigt.

Es ist zu beachten, dass die 5%-Fraktile für die Versuchsreihen F4, A2 und S0 höher ist als die der Referenzversuche, wenn die nicht sichtbaren Montagefehler vernachlässigt werden. Berücksichtigt man die nicht sichtbaren Montagefehler, reduziert sich der Fraktilwert aufgrund der geringen Versuchsanzahl auf nahezu 0 kN. Aus diesem Grund werden nur die Abminderungsfaktoren für die mittleren Bruchlasten berechnet.

5.9 Variationskoeffizient der Tragfähigkeit

In jeder Versuchsserie, mit Ausnahme der Versuchsserien F5 und F6, ist der Variationskoeffizient der Bruchlasten zu berechnen. Dieser muss kleiner als $\beta_{CVu} = 20\%$ sein. Überschreitet der Variationskoeffizient in den Referenzversuchen den Wert von 15 %, muss die charakteristische Tragfähigkeit verringert werden. Wenn der Variationskoeffizient in den Funktionsversuchen den Wert von 20 % übersteigt, muss eine zusätzliche Abminderung berücksichtigt werden. Die Abminderung aufgrund eines erhöhten Variationskoeffizienten kann mit der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$\beta_{CV} = \frac{1}{1 + 0,03 \cdot (COV - CVF)} \leq 1 \quad \text{Gl. 6}$$

COV = Variationskoeffizient der Versuchsserie
 CVF = Grenzwert für COV; 15 % für Referenzversuche
 20 % für Funktionsversuche

Zur Bestimmung der Abminderungsfaktoren infolge erhöhter Streuung wurden die Versuchsergebnisse der einzelnen Versuchsreihen zusammengefasst und ausgewertet. Der Variationskoeffizient ist für alle Versuchsserien größer als 20 %. Die größte Streuung wurde für die

Versuchsserie S0 mit einem Wert von 111,47 % beobachtet. Für eine gemeinsame Auswertung mit einer Versuchsanzahl von > 100 ist jedoch eine Abminderung aufgrund einer erhöhten Streuung nicht mehr notwendig. Daher wird ein Wert $\beta_{CV} = 1,0$ vorgeschlagen.

Tabelle 5.18: Streuung der Ergebnisse und Bewertung des entsprechenden Reduktionsfaktors.

Versuchs- serie	Produkt	$N_{u,45}$	ΔW_{crack}	s	COV_{Test}	$CvF_{,max}$	n_{test}	β_{CV}	β_{CV} vorgeschlagen
[-]	[-]	[kN]	[mm]	[kN]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]
F0	Nagel 1	1.47	0	0.64	43.40	20	20	0.59	1,0
F0	Nagel 2	1.23	0	0.75	60.85	20	20	0.45	
F0	Nagel 3	4.05	0	2.95	72.69	20	20	0.39	
F0	Nagel 4	1.02	0	1.02	100.23	20	20	0.29	
F0	Nagel 5	1.47	0	1.06	72.06	20	20	0.39	
F0	Alle	1,78	0	1,76	99,21	keine Anforde- rung	120	1,00	
F4	Nagel 5a	1.40	0	1.31	93.61	20	10	0.31	
A2	Nagel 5b	0.93	0	0.97	103.30	20	12	0.29	
S0	Nagel 5b	0.92	0	1.02	111.47	20	9	0.27	
A5	Nagel 5b	1.27	0	0.96	75.41	20	10	0.38	0,4

6 BERECHNUNG DER CHARAKTERISTISCHEN TRAGFÄHIGKEIT

6.1 Betonversagen unter Zugbelastung

Das Herausziehen bzw. Betonversagen eines einzelnen Nagels unter Zugbelastung wird anhand des charakteristischen Widerstands der Versuchsreihen F0 und A2 berechnet. Der charakteristische Widerstand wird auf der Grundlage einer logarithmischen Verteilung und der Annahme berechnet, dass unsichtbare Montagefehler keinen nennenswerten Widerstand aufweisen und durch das Aufbringen einer Prüflast erkannt werden. Die Ergebnisse der Montagefehler werden bei der Bewertung nicht berücksichtigt, daher ist auch in der Anwendung mit einem Ausfall einzelner Bolzenschubnägeln zu rechnen und das System entsprechend redundant zu planen. Auf dieser Grundlage sind die berechneten Werte in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 6.1: Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit auf der Grundlage der 5%-Fraktile der jeweiligen Versuchsreihen.

Nr.	Produkt	Beton	t _{fix}	Δw	N _{u,45}	s	ln(N _{u,45})	Stabw.	n _{test}	k	ln(N5%)	N _{Rk,0}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[kN]
F0	Nagel 5	66.27	2.0	0	1.47	1.06	0.045	0.942	41	2.010	-1.848	0.16
F0	ALLE	66.27	2.0	0	1,78	1,76	0,138	1,00	120	1,64	-1,51	0,22
A2	Nagel 5	66.27	23.0 /21.0	0	0.93	0.97	-0,15	0,84	12	1,64	-1,52	0,22
Reduktionsfaktor für die 5%-Fraktile												1,0
Reduktion durch Streuung (n > 50 Tests)												1,0
Charakteristischer Widerstand unter Zug												0,22

Unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung mit einem k-Wert von 1,97 und ohne Berücksichtigung nicht sichtbarer Montagefehler sowie einer gemeinsamen Auswertung der Versuchsreihen F0 und A2 ergibt sich ein charakteristischer Widerstand von N_{Rk} = 0,22 kN (220 N).

Tabelle 6.2: Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit auf der Grundlage der 5%-Fraktile der jeweiligen Versuchsreihen auf Basis des reduzierten Mittelwerts.

Nr.	Produkt	Beton	t _{fix}	Δw	N _{u,45}	s	ln(N _{u,45})	Stabw.	n _{test}	k	ln(N5%)	NR _{k,0}
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]	[-]	[kN]
F0	Nagel 5	66.27	2.0	0	1.47	1.06	0.045	0.942	41	2.010	-1.848	0.16
F0	ALLE	66.27	2.0	0	1,78	1,76	0,138	1,00	120	1,64	-1,51	0,22
A2	Nagel 5	66.27	23.0 /21.0	0	0.93	0.97	-0,15	0,84	12	1,64	-1,52	0,22
Reduzierter Mittelwert mit α = 0,63					1,12	1,11	-0,32	1,00	120	1,645	-1,98	0,14
Reduktion durch Streuung (n > 50 Tests)												1,0
Charakteristischer Widerstand unter Zug												0,15

Unter der Annahme einer logarithmischen Normalverteilung mit einem k-Wert von 1,97 und ohne Berücksichtigung nicht sichtbarer Montagefehler sowie einer gemeinsamen Auswertung der Versuchsreihen F0 und A2 und einer Abminderung von 0,63 (Tabelle 5.17) **ergibt sich ein charakteristischer Widerstand N_{Rk} = 0,15 kN (150 N).**

6.2 Stahlversagen unter Zugbelastung

Der charakteristische Widerstand eines einzelnen Bolzenschubnagels unter Zugbeanspruchung wird anhand Gleichung 7 berechnet:

$$V_{Rk,s} = A_s \cdot f_{uk} \quad \text{Gl. 7}$$

mit:

- A_s – beanspruchter Querschnitt des Befestigungselements
- f_{uk} – charakteristische Zugfestigkeit des Stahls

Da das Versagen des Stahlnagels unter Zug nicht vom Verankerungsgrund abhängt, kann die charakteristische Tragfähigkeit anhand des Querschnitts und der Zugfestigkeit des Stahls berechnet werden. Diese Werte sind jedoch für Nagel 1 bis Nagel 5 unterschiedlich. Vereinfachend kann auf der sicheren Seite die Tragfähigkeit für Betonversagen (Herausziehen) angesetzt werden, da in den Versuchen kein Stahlversagen auftrat. Es wird folgender charakteristischer Widerstand vorgeschlagen: $N_{Rk,s} = N_{Rk,p} = 0,15 \text{ kN (150)}$.

6.3 Betonversagen unter Querbelastung

Die Ergebnisse für die Querlastversuche A5 wurden in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Der charakteristische Widerstand für die Querbelastung wird auf Basis einer logarithmischen Normalverteilung zu $V_{Rk,c} = 0,19 \text{ kN}$ berechnet. Für den Fall, dass die Versagenslast unter Querbelastung von den Zugtragfähigkeiten abweicht, wurde eine Prüfung der statistischen Gleichwertigkeit durchgeführt. Dabei ist die Hypothese, dass der Nagel unter Querbelastung real unter Zugbelastung versagt, da die Querlast durch den inneren Hebelarm in eine Zuglast umgewandelt wird. Die Bewertung der statistischen Gleichwertigkeit ist in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 6.3: Parameter für den Nachweis der statistischen Gleichwertigkeit der Versuchsergebnisse A2 und A5.

		N	Bedeuten	Stabw	SEM	Median
"Nu45"	A2	14	1,00146	0,96553	0,25805	0,91101
	A5	10	1,27086	0,95836	0,30306	0,77892
	Unterschied		-0,2694	x	0,39855	x
	Gesamt	24	1,11371	0,95117	0,19416	0,8108

Tabelle 6.4: Parameter für den Nachweis der statistischen Gleichwertigkeit der Versuchsergebnisse F0 und A5.

		N	Bedeut	Stabw	SEM	Median
"Nu45"	F0	121	1,78204	1,76793	0,16072	1,23897
	A5	10	1,27086	0,95836	0,30306	0,77892
	Unterschied		0,51118	x	0,5672	x
	Gesamt	131	1,74302	1,72258	0,1505	1,19342

Tabelle 6.5: Nachweis der statistischen Gleichwertigkeit der Versuchsserien A2 und A5.

	t-Statistik	DF	Wahrsch.> t
Die gleiche Varianz wird angenommen	-0,67594	22	0,50612
Die gleiche Varianz wird angenommen	-0,67594	22	0,50612
Gleiche Varianz NICHT angenommen (Welch-Korrektur)	-0,67682	19,63556	0,50641
Gleiche Varianz NICHT angenommen (Welch-Korrektur)	-0,67682	19,63556	0,50641
Versuchsreihen unterscheiden sich nicht wesentlich			

Tabelle 6.6: Nachweis der statistischen Gleichwertigkeit der Versuchsserien F0 und A5.

	t-Statistik	DF	Wahrsch.> t
Die gleiche Varianz wird angenommen	0,90123	129	0,36914
Die gleiche Varianz wird angenommen	0,90123	129	0,36914
Gleiche Varianz NICHT angenommen (Welch-Korrektur)	1,49015	14,68726	0,15734
Gleiche Varianz NICHT angenommen (Welch-Korrektur)	1,49015	14,68726	0,15734
Versuchsreihen unterscheiden sich nicht wesentlich			

Der Nachweis der statistischen Gleichwertigkeit zeigt, dass die Ergebnisse der Querlastversuche mit den Ergebnissen der Versuchsserien F0 und A2 als gleichwertig angesehen werden können und damit aus einer Grundgesamtheit stammen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Versagen unter Querbelastung durch eine induzierte Zugkraft verursacht wird. Aus diesem Grund wird ebenfalls β_{CV} zu 1,0 angenommen, da unter Zugbelastungen mehr als 50 Versuche zur Verfügung stehen.

Tabelle 6.7: Charakteristische Tragfähigkeit in den A5-Versuchen.

Nr.	Produkt	Beton	t_{fix}	ΔW	$V_{u,45}$	s	$\ln(V_{u,25})$	s	n_{test}	$V_{Rk,0}$
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
A5	Nagel 5	66,27	21,0	0	1,27	0,96	0,026	0,656	10	0,19
Standardabminderung durch Streuung (n < 50 Tests)										0,4
Verringerung unter der Annahme der statistischen Gleichwertigkeit (n > 50 Tests)										1,0
Charakteristischer Widerstand eines einzelnen Befestigungselements unter Zugbelastung										0,19

Unter Annahme eines Abminderungsfaktors für Querlastversuche von $\alpha_v = 1,0$, wird auf der Grundlage einer logarithmischen Normalverteilung die charakteristische Quertragfähigkeit zu $V_{Rk,c} = 0,19 \text{ kN (190 N)}$ berechnet.

6.4 Stahlversagen unter Querbeanspruchung

Der charakteristische Widerstand eines einzelnen Bolzenschubnagels unter Querbelastung ohne Hebelarm kann mit Gleichung 8 berechnet werden:

$$V_{Rk,s} = \alpha \cdot A_s \cdot f_{uk} \quad \text{Gl. 8}$$

wo:

- α – Faktor für die Berücksichtigung der Schubspannungsverteilung ($\alpha = 0,5$)
- A_s – beanspruchter Querschnitt des Befestigungselements
- f_{uk} – charakteristische Zugfestigkeit des Stahls

Da das Versagen des Stahlnagels unter Querbelastung nicht vom Verankerungsgrund abhängt, kann die charakteristische Stahltragfähigkeit nur anhand des Querschnitts und der Zugfestigkeit des Stahls berechnet werden.

In den meisten Querlastversuchen wurde Herausziehen und Stahlversagen beobachtet. Bei allen Versuchen lag jedoch eine Schädigung des Betons vor, so dass davon ausgegangen wird, dass es sich bei dem Stahlversagen um ein sekundäres Versagen handelt, das im gleichen Streubereich wie die Zugtragfähigkeit liegt. Es wird daher folgender charakteristischer Widerstand unter Querbelastung vorgeschlagen: $V_{Rk,s} = V_{Rk,p} = 0,2 \text{ kN (200N)}$.

6.5 Stahlversagen unter Querlast mit Hebelarm

Eine Anwendung unter Querbelastung mit Hebelarm wurde nicht untersucht. Das Verankerungssystem mit Bolzenschubnägeln ohne Gewinde ist daher für eine solche Anwendung nicht geeignet. Der Spalt zwischen Anbauteil und Betonoberfläche muss kleiner als 0,5 mm betragen.

6.6 Charakteristische Tragfähigkeit für alle Belastungsrichtungen

Der charakteristische Widerstand für alle Belastungsrichtungen kann als Minimum der Tragfähigkeit aus allen Versagensarten und Belastungsrichtungen berechnet werden:

$$F_{Rd,min} = \min\left(\frac{N_{Rk,p}}{\gamma_{Mc}} ; \frac{V_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}}\right) \quad \text{Gl. 9}$$

mit $\gamma_{Mc} = 1,5$ nach Eurocode 2, Teil 4 [8].

Die charakteristische Tragfähigkeit für jede Belastungsrichtung beträgt für alle Versagensarten in ungerissenem Beton $F_{Rk} = 150 \text{ N}$. Der Bemessungswert der Tragfähigkeit für ungerissenen Beton beträgt $F_{Rd} = 100 \text{ N}$.

Tabelle 6.8: Vergleich der ermittelten charakteristischen Tragfähigkeiten für vorgespannte Hohldeckenplatten ($h_{ef} \sim 15$ mm) mit den bereits vorhandenen technischen Bewertungen für Normalbeton ($h_{ef} > 18$ mm).

	N_{Rk}	V_{Rk}	Anwendungseinschränkung gemäß Hersteller oder Zulassung
Nagel 1: Hilti X-P 17 B3 mit Hilti BX3 (batteriebetrieben),	x	0,80	Nur Querbelastung
Nagel 2: SPIT HC 6-17 mit SPIT Pulsa 65 (gasbetrieben),	x	0,56	Nur Querbelastung
Nagel 3: SPIT SC 9-70 mit SPIT P370 (pulverbetrieben),	1,00	1,00	Berechnet unter Verwendung eines globalen Sicherheitsfaktors von 2,1
Nagel 4: Würth NG CSM-1 HFBX mit DIGA CSM-1 (gasbetrieben)	0,42	0,42	Nur ungerissener Beton
Nagel 5: Würth NG CS-2/3 HFBx mit DIGA CSM-3 (gasbetrieben)	0,42	0,74	Nur ungerissener Beton
Bewertet für vorgespannte Hohldeckenplatten	0,15	0,20	Nur vorgespannte Hohldecken mit C45/55 oder größer

6.7 Achs- und Randabstände

Es wurden keine Versuche durchgeführt, um den Einfluss von Rand- und Achsabständen zu bewerten. Daher gelten die Standardwerte nach EAD 330083-03-0601 [2]. Die maximale Verankerungstiefe kann aus der Versuchsreihe F0 zu $h_{ef,max} = 20$ mm ermittelt werden. Daher werden die folgenden Abstände vorgeschlagen:

- Minimaler Abstand $s_{min} = \text{Max}(200 \text{ mm}; 4 \cdot h_{ef,max} = 80 \text{ mm})$
- Minimaler Kantenabstand $c_{min} = \text{Max}(150 \text{ mm}; 3 \cdot h_{ef,max} = 60 \text{ mm})$
- Minimale Dicke des Betonbauteils $h_{min} = \text{Max}(80 \text{ mm}; 2 \cdot h_{ef,max} = 40 \text{ mm})$

Für die untersuchten Bolzenschubnägel werden daher folgende Rand- und Achsabstände maßgebend:

- **$s_{min} = 200$ mm**
- **$c_{min} = 150$ mm**
- **$h_{min} = 80$ mm.**

6.8 Charakteristische Verankerungstiefe

Die minimale Verankerungstiefe wird als 95 % Fraktile der gemessenen Verankerungstiefe jeder Versuchsserie unter Verwendung eines Vertrauensniveaus von 75 % und einer unbekanntem Standardabweichung berechnet. Tabelle 6.9 fasst die berechneten Verankerungstiefen für jede einzelne Versuchsserie zusammen.

Tabelle 6.9: Maximal zu erwartende Verankerungstiefen.

Nr.	Produkt	Beton	Mittlere h_{ef}	Standardabweichung	n Versuche	k-Wert	95% Fraktile	$h_{ef,5\%} < 20$ mm	Bemerkung
[-]	[-]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[-]
F0	Nagel 1	66,27	10,99	1,92	20	2,208	15,23	i.O.	Die Höhe des Anbauteils muss auf der Grundlage der Nagellänge so gewählt werden, dass $h_{ef} < 20$ mm bleibt
F0	Nagel 2	66,27	12,06	1,65	20	2,208	15,70	i.O.	
F0	Nagel 3	66,27	27,99	2,45	20	2,208	33,40	n.i.O.	
F0	Nagel 4	66,27	25,74	1,62	20	2,208	29,32	n.i.O.	
F0	Nagel 5	66,27	13,45	0,88	41	2,010	15,22	i.O.	
F4	Nagel 5	66,27	13,22	2,14	12	2,448	18,46	i.O.	
A2	Nagel 5	66,27	13,92	1,69	15	2,329	17,86	i.O.	
S0	Nagel 5	66,27	14,30	1,75	13	2,403	18,51	i.O.	
A5	Nagel 5	66,27	14,77	0,25	10	2,568	15,41	i.O.	

Die so berechnete minimale Verankerungstiefe beträgt $h_{ef,min} = 15,2$ mm und $h_{ef,max} = 18,5$ mm, wenn die Nagellänge passend für die gewählte Anbauteildicke wird. Dies bedeutet eine maximale Nagellänge von $l_{nail} < t_{fix} + 20$ mm. Für diese Nagellängen ist die notwendige Bedingung einer maximalen Verankerungstiefe von 20 mm erfüllt.

6.9 Charakteristische Verschiebungen

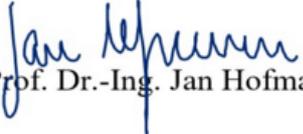
Spezielle Anforderungen an die Last-Verschiebungs-Kurven werden nicht gestellt, da die Verschiebungen vernachlässigbar klein sind und daher in den Versuchen nicht gemessen werden.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Der Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken e.V., die Forschungsgesellschaft VMM Spannbetonplatten GbR, der Bundesverband der Gipsindustrie e. V., die Adolf Würth GmbH & Co. KG, die Hilti Deutschland AG und die ITW Befestigungssysteme GmbH beauftragte das IWB mit der Durchführung von Untersuchungen an 5 unterschiedlichen Befestigungssystemen mit Bolzenschubnägeln. Die Untersuchungen umfassen Vorversuche (F0), zusätzliche Zugversuche (A2, F4), Querkzugversuche (A5) und Versuche mit unterschiedlicher Anbauteildicke (S0). Die Versuche wurden mit Nagel Nr. 5 durchgeführt.

Alle in dieser Stellungnahme betrachteten Bolzenschubnägeln wurden bereits für Normalbeton bewertet und sind für die Anwendung in Normalbeton qualifiziert. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, die Tragfähigkeit bei einer Anwendung in vorgespannten Hohldeckenplatten zu beurteilen. Die Untersuchungen wurden daher an vorgespannten Hohldecken mit einer Nennfestigkeit des Betons C45/55 durchgeführt.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die charakteristische Tragfähigkeit für alle Belastungsrichtungen mit $F_{Rk} = 0,15 \text{ kN}$ (15kg) und der Bemessungswiderstand mit $F_{Rd} = 0,1 \text{ kN}$ (10kg) angenommen werden kann. Die Bolzenschubnägeln sind durch eine Probelastung oder andere geeignete Verfahren auf nicht sichtbare Setzfehler zu prüfen.


Prof. Dr.-Ing. Jan Hofmann


Dr.-Ing. Vinay Mahadik

8 ANHANG A

Die Ermittlung der Verteilung für alle Versuchsergebnisse, unabhängig von der Versuchsserie und vom Nageltyp, zeigt, dass die Weibull-Verteilung die wahrscheinlichste Verteilung ist, und die Versuchsergebnisse am besten beschreibt. Der Formfaktor kann mit 1,12 und der Skalierungsfaktor mit 1,899 angenommen werden.

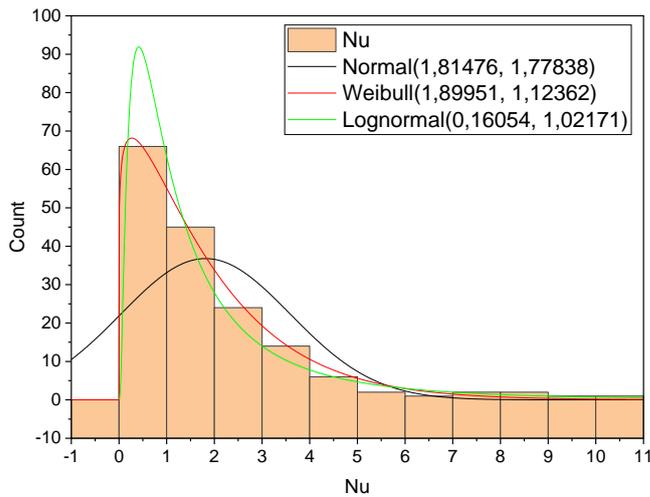


Abbildung 8-1: Anpassung der Versuchsdaten unter Verwendung einer Normalverteilung, einer logarithmischen Normalverteilung und einer Weibull-Verteilung.

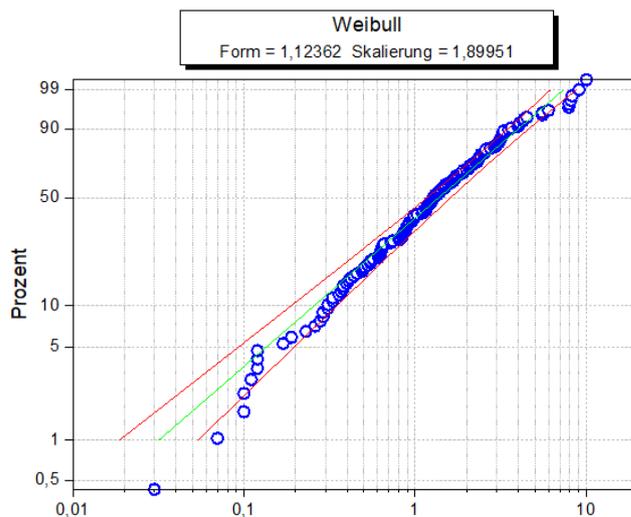


Abbildung 8-2: Vergleich der Weibull-Verteilung mit den Versuchsdaten.

Aus der Verteilung kann abgeleitet werden, dass die 5%-Fraktile der Grundgesamtheit zwischen 0,1 kN (obere Grenze der Verteilung) und 0,2 kN (untere Grenze der Verteilung) liegt. Dies stimmt gut mit den ermittelten Werten für Zug (0,15 kN) und Querzug (0,2 kN) überein.

9 ANHANG B

Tabelle 9.1: Ergebnisse der F0-Versuch – Nagel 1.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t _{fix}	h _{ef}	Δw	f _{cc}	N _y	N _{u,45}
1	F0	N	Nagel 1	0.6-1	11.1	0	66.27	0.51	0.46
2	F0	N	Nagel 1	0.6-1	7.6	0	66.27	2.52	2.30
3	F0	N	Nagel 1	0.6-1	9.7	0	66.27	1.25	1.14
4	F0	N	Nagel 1	0.6-1	9.9	0	66.27	2.07	1.89
5	F0	N	Nagel 1	0.6-1	10.2	0	66.27	1.88	1.71
6	F0	N	Nagel 1	0.6-1	11.3	0	66.27	1.71	1.56
7	F0	N	Nagel 1	0.6-1	12.1	0	66.27	2.75	2.51
8	F0	N	Nagel 1	0.6-1	10.3	0	66.27	0.97	0.88
9	F0	N	Nagel 1	0.6-1	10.4	0	66.27	1.92	1.75
10	F0	N	Nagel 1	0.6-1	13.6	0	66.27	1.18	1.07
11	F0	N	Nagel 1	0.6-1	6.3	0	66.27	1.39	1.27
12	F0	N	Nagel 1	0.6-1	13.2	0	66.27	2.08	1.89
13	F0	N	Nagel 1	0.6-1	9.1	0	66.27	1.30	1.18
14	F0	N	Nagel 1	0.6-1	11.2	0	66.27	1.92	1.75
15	F0	N	Nagel 1	0.6-1	12.4	0	66.27	1.20	1.09
16	F0	N	Nagel 1	0.6-1	12.9	0	66.27	3.02	2.75
17	F0	N	Nagel 1	0.6-1	11.1	0	66.27	2.08	1.89
18	F0	N	Nagel 1	0.6-1	11.3	0	66.27	0.85	0.77
19	F0	N	Nagel 1	0.6-1	12.1	0	66.27	0.53	0.48
20	F0	N	Nagel 1	0.6-1	13.9	0	66.27	1.10	1.00

Tabelle 9.2: Ergebnisse der F0-Versuch – Nagel 2.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t _{fix}	h _{ef}	Δw	f _{cc}	N _y	N _{u,45}
1	F0	N	Nagel 2	0.6-2	12.0	0	66.27	1.72	1.57
2	F0	N	Nagel 2	0.6-2	12.8	0	66.27	1.16	1.06
3	F0	N	Nagel 2	0.6-2	11.4	0	66.27	0.29	0.26
4	F0	N	Nagel 2	0.6-2	11.3	0	66.27	1.40	1.28
5	F0	N	Nagel 2	0.6-2	11.9	0	66.27	0.88	0.80
6	F0	N	Nagel 2	0.6-2	10.9	0	66.27	1.74	1.59
7	F0	N	Nagel 2	0.6-2	9.8	0	66.27	1.31	1.19
8	F0	N	Nagel 2	0.6-2	15.0	0	66.27	0.93	0.85
9	F0	N	Nagel 2	0.6-2	13.5	0	66.27	1.91	1.74
10	F0	N	Nagel 2	0.6-2	12.5	0	66.27	0.44	0.40
11	F0	N	Nagel 2	0.6-2	10.4	0	66.27	1.22	1.11
12	F0	N	Nagel 2	0.6-2	11.9	0	66.27	0.12	0.11
13	F0	N	Nagel 2	0.6-2	13.9	0	66.27	2.42	2.20
14	F0	N	Nagel 2	0.6-2	14.5	0	66.27	2.33	2.12
15	F0	N	Nagel 2	0.6-2	14.4	0	66.27	2.20	2.00
16	F0	N	Nagel 2	0.6-2	12.6	0	66.27	2.98	2.71
17	F0	N	Nagel 2	0.6-2	8.7	0	66.27	0.40	0.36
18	F0	N	Nagel 2	0.6-2	10.4	0	66.27	1.28	1.17
19	F0	N	Nagel 2	0.6-2	12.0	0	66.27	2.00	1.82
20	F0	N	Nagel 2	0.6-2	11.3	0	66.27	0.17	0.15

Tabelle 9.3: Ergebnisse der F0-Versuch – Nagel 3.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t _{fix}	h _{ef}	Δw	f _{cc}	N _y	N _{u,45}
1	F0	N	Nagel 3	11.0	22.8	0	66.27	3.15	2.87
2	F0	N	Nagel 3	11.0	27.4	0	66.27	7.94	7.23
3	F0	N	Nagel 3	11.0	30.2	0	66.27	0.96	0.87
4	F0	N	Nagel 3	11.0	22.4	0	66.27	0.31	0.28
5	F0	N	Nagel 3	11.0	26.5	0	66.27	4.34	3.95
6	F0	N	Nagel 3	11.0	24.6	0	66.27	8.13	7.41
7	F0	N	Nagel 3	11.0	30.3	0	66.27	2.56	2.33
8	F0	N	Nagel 3	11.0	27.3	0	66.27	2.11	1.92
9	F0	N	Nagel 3	11.0	28.9	0	66.27	9.09	8.28
10	F0	N	Nagel 3	11.0	28.2	0	66.27	0.42	0.38
11	F0	N	Nagel 3	11.0	29.4	0	66.27	5.56	5.07
12	F0	N	Nagel 3	11.0	28.6	0	66.27	1.35	1.23
13	F0	N	Nagel 3	11.0	29.0	0	66.27	6.03	5.49
14	F0	N	Nagel 3	11.0	31.1	0	66.27	5.57	5.07
15	F0	N	Nagel 3	11.0	29.2	0	66.27	1.79	1.63
16	F0	N	Nagel 3	11.0	29.7	0	66.27	1.12	1.02
17	F0	N	Nagel 3	11.0	27.4	0	66.27	8.27	7.53
18	F0	N	Nagel 3	11.0	29.1	0	66.27	10.05	9.16
19	F0	N	Nagel 3	11.0	31.0	0	66.27	2.33	2.12
20	F0	N	Nagel 3	11.0	26.6	0	66.27	7.92	7.22

Tabelle 9.4: Ergebnisse der F0-Versuch – Nagel 4.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t _{fix}	h _{ef}	Δw	f _{cc}	N _y	N _{u,45}
1	F0	N	Nagel 4	11.0	59.2	0	66.27	0.31	0.28
2	F0	N	Nagel 4	11.0	18.0	0	66.27	0.57	0.52
3	F0	N	Nagel 4	11.0	16.5	0	66.27	0.66	0.60
4	F0	N	Nagel 4	11.0	16.3	0	66.27	4.07	3.71
5	F0	N	Nagel 4	11.0	22.6	0	66.27	1.51	1.38
6	F0	N	Nagel 4	11.0	18.9	0	66.27	2.38	2.17
7	F0	N	Nagel 4	11.0	16.6	0	66.27	1.56	1.42
8	F0	N	Nagel 4	11.0	65.3	0	66.27	0.26	0.24
9	F0	N	Nagel 4	11.0	17.8	0	66.27	0.62	0.56
10	F0	N	Nagel 4	11.0	16.5	0	66.27	2.57	2.34
11	F0	N	Nagel 4	11.0	17.0	0	66.27	0.65	0.59
12	F0	N	Nagel 4	11.0	17.2	0	66.27	3.19	2.91
13	F0	N	Nagel 4	11.0	21.8	0	66.27	0.23	0.21
14	F0	N	Nagel 4	11.0	64.2	0	66.27	0.12	0.11
15	F0	N	Nagel 4	11.0	19.3	0	66.27	1.28	1.17
16	F0	N	Nagel 4	11.0	21.8	0	66.27	0.29	0.26
17	F0	N	Nagel 4	11.0	22.9	0	66.27	0.12	0.11
18	F0	N	Nagel 4	11.0	20.9	0	66.27	0.98	0.89
19	F0	N	Nagel 4	11.0	17.7	0	66.27	0.63	0.57
20	F0	N	Nagel 4	11.0	24.3	0	66.27	0.33	0.30

Tabelle 9.5: Ergebnisse der F0-Versuch – Nagel 5.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t_{fix}	h_{ef}	Δw	f_{cc}	N_y	$N_{u,45}$
1	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.2	0	66.27	1.67	1.52
2	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.7	0	66.27	0.99	0.90
3	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.7	0	66.27	1.71	1.56
4	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.9	0	66.27	0.85	0.77
5	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.8	0	66.27	0.89	0.81
6	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.4	0	66.27	0.55	0.50
7	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.6	0	66.27	3.12	2.84
8	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.5	0	66.27	2.41	2.20
9	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.9	0	66.27	0.91	0.83
10	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.3	0	66.27	3.27	2.98
11	F0	N	Nagel 5a	2.0	14.4	0	66.27	0.82	0.75
12	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.3	0	66.27	1.03	0.94
13	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.6	0	66.27	0.92	0.84
14	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.1	0	66.27	1.42	1.29
15	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.8	0	66.27	3.24	2.95
16	F0	N	Nagel 5a	2.0	14.6	0	66.27	0.33	0.30
17	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.4	0	66.27	0.63	0.57
18	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.2	0	66.27	0.46	0.42
19	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.4	0	66.27	0.10	0.09
20	F0	N	Nagel 5a	2.0	11.5	0	66.27	1.46	1.33
21	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.7	0	66.27	0.38	0.35
22	F0	N	Nagel 5a	2.0	14.3	0	66.27	3.09	2.82
23	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.3	0	66.27	2.39	2.18
24	F0	N	Nagel 5a	2.0	14.7	0	66.27	1.27	1.16
25	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.7	0	66.27	1.17	1.07
26	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.4	0	66.27	1.36	1.24
27	F0	N	Nagel 5a	2.0	14.4	0	66.27	2.31	2.10
28	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.5	0	66.27	4.28	3.90
29	F0	N	Nagel 5a	2.0	15.6	0	66.27	3.52	3.21
30	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.5	0	66.27	2.90	2.64
31	F0	N	Nagel 5a	2.0	11.9	0	66.27	0.11	0.10
32	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.9	0	66.27	3.14	2.86
33	F0	N	Nagel 5a	2.0	15.0	0	66.27	1.84	1.68
34	F0	N	Nagel 5a	2.0	14.2	0	66.27	2.59	2.36
35	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.2	0	66.27	3.30	3.01
36	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.7	0	66.27	0.99	0.90
37	F0	N	Nagel 5a	2.0	15.1	0	66.27	0.50	0.46
38	F0	N	Nagel 5a	2.0	12.9	0	66.27	0.38	0.35
39	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.6	0	66.27	0.28	0.26
40	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.0	0	66.27	3.24	2.95
41	F0	N	Nagel 5a	2.0	13.7	0	66.27	0.41	0.37

Tabelle 9.6: Ergebnisse der S0-Versuche – Nagel 5.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t _{fix}	h _{ef}	Δw	f _{cc}	N _y	N _{u,45}
1	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	14.4	0	66.27	1.630	1.485
2	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	13.8	0	66.27	1.410	1.285
3	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	13.7	0	66.27	0.001	0.001
4	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	18.3	0	66.27	0.890	0.811
5	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	16.6	0	66.27	0.860	0.783
6	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	15.7	0	66.27	0.001	0.001
7	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	13.0	0	66.27	3.230	2.943
8	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	13.5	0	66.27	3.000	2.733
9	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	12.3	0	66.27	1.600	1.458
10	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	15.5	0	66.27	0.001	0.001
11	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	13.1	0	66.27	0.370	0.337
12	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	13.5	0	66.27	0.001	0.001
13	S0	N	Nagel 5b	2+20(s)	12.5	0	66.27	0.100	0.091

Tabelle 9.7: Ergebnisse der F4-Versuche – Nagel 5.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t _{fix}	h _{ef}	Δw	f _{cc}	N _y	N _{u,45}
1	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	13.7	0	66.27	1.51	1.38
2	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	14.1	0	66.27	0.64	0.58
3	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	13.5	0	66.27	1.26	1.15
4	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	14.2	0	66.27	0.00	0.00
5	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	13.2	0	66.27	4.08	3.72
6	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	13.3	0	66.27	4.51	4.11
7	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	14.4	0	66.27	0.84	0.77
8	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	14.2	0	66.27	1.68	1.53
9	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	14.5	0	66.27	0.00	0.00
10	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	12.5	0	66.27	2.27	2.07
11	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	14.3	0	66.27	0.72	0.66
12	F4	N	Nagel 5a	2+20(s)	6.7	0	66.27	0.99	0.90

Tabelle 9.8: Ergebnisse der A2-Versuche – Nagel 5.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	t _{fix}	h _{ef}	Δw	f _{cc}	N _y	N _{u,45}
1	A2	N	Nagel 5b	23	11.3	0	66.27	2.350	2.141
2	A2	N	Nagel 5b	23	11.5	0	66.27	0.030	0.027
3	A2	N	Nagel 5b	23	11.6	0	66.27	0.070	0.064
4	A2	N	Nagel 5b	23	11.9	0	66.27	0.001	0.001
5	A2	N	Nagel 5b	23	13.5	0	66.27	1.120	1.020
6	A2	N	Nagel 5b	21	14.9	0	66.27	1.500	1.367
7	A2	N	Nagel 5b	21	14.7	0	66.27	1.170	1.066
8	A2	N	Nagel 5b	21	15.5	0	66.27	0.880	0.802
9	A2	N	Nagel 5b	21	13.7	0	66.27	1.490	1.357
10	A2	N	Nagel 5b	21	14.4	0	66.27	0.550	0.501
11	A2	N	Nagel 5b	21	13.2	0	66.27	0.190	0.173
12	A2	N	Nagel 5b	21	15.2	0	66.27	0.360	0.328
13	A2	N	Nagel 5b	21	16.2	0	66.27	0.490	0.446
14	A2	N	Nagel 5b	21	15.9	0	66.27	4.000	3.644
15	A2	N	Nagel 5b	21	15.3	0	66.27	1.190	1.084

Tabelle 9.9: Ergebnisse der A5-Versuche – Nagel 5.

Nr.	Reihe	Last- richtung	Produkt	tfix	HEF	Δw	fcc	Ny	Nu,45
1	A5	V	Nagel 5b	23	14.7	0	66.27	2.57	2.34
2	A5	V	Nagel 5b	23	14.6	0	66.27	3.67	3.34
3	A5	V	Nagel 5b	23	14.7	0	66.27	2.16	1.97
4	A5	V	Nagel 5b	23	14.6	0	66.27	0.74	0.67
5	A5	V	Nagel 5b	23	15.3	0	66.27	0.61	0.56
6	A5	V	Nagel 5b	21	15.0	0	66.27	0.64	0.58
7	A5	V	Nagel 5b	21	14.7	0	66.27	0.81	0.74
8	A5	V	Nagel 5b	21	14.6	0	66.27	0.63	0.57
9	A5	V	Nagel 5b	21	14.5	0	66.27	0.90	0.82
10	A5	V	Nagel 5b	21	15.0	0	66.27	1.22	1.11