

6. Verbundeigenschaften von Litzen unter einmaliger und wiederholter Beanspruchung

Ir. J. A. DEN UIJL

6.1 Einleitung

Bei Spannbeton mit sofortigem Verbund wird die Verankerung von Verbundspannungen zwischen Stahl und Beton geliefert. Im Gegensatz zum Betonstahl ist das Verbundverhalten der Litzen weniger bekannt, insbesondere das Verhalten unter wiederholter Beanspruchung. Dennoch können diese Fragen eine wichtige Rolle spielen, zum Beispiel im Verankerungsbereich der Litzen in Balken mit abgesetztem Auflager [6.1]. Eine umfassende Studie wurde von Stocker und Sozen [6.2] verrichtet, die darauf hinwies, dass der Verbundmechanismus die zwei Anteile beinhaltet:

- Erstens eine physikalische Bindung. In dieser Phase treten keine messbaren Verschiebungen zwischen Stahl und Beton auf. (Hier genannt: Haftverbund).
- Zweitens ein Reibungsmechanismus, der sich einstellt, nachdem die erste Bindung zerstört ist. Dieser Anteil war grösser als auf Grund der Verbundeigenschaften der glatten Einzeldrähte der Litzen zu erwarten war. Stocker und Sozen schreiben dieses den Unregelmässigkeiten im Stahlquerschnitt (Bild 6.1) zu, wodurch eine Querschnitt nach dem Verschieben nicht genau in die folgende Stelle passt („Lack of fit“).



Bild 6.1. Querschnitt einer Litze $7 \varnothing 4,1$ bildet kein regelmässiges Sechseck.

6.2 Forschungsarbeit [6.4]

6.2.1 Problemstellung

Unsere Forschung lagen folgende Fragen zugrunde:

- Was ist die Einleitungslänge bei einer Litze ($7 \varnothing 4,1$)
- Wie sind die Verbundspannungen entlang der Litze verteilt.
- Welche Kraft im Stahl kann noch abgetragen werden, wenn die Verankerungslänge weniger oder gleich gross ist wie die Einleitungslänge.

Wichtige Einflussfaktoren sind dabei:

- Betonfestigkeit
- Lage der Litze im Betonquerschnitt
- Spannungen im Beton quer zu den Litzen
- Art der Beanspruchung
- Betonalter bei der Prüfung.

6.2.2 Experimentelle Untersuchungen

Die Forschungsarbeit wurde wie folgt aufgebaut:

I-120 zentrische Ausziehkörper mit kurzen Einbettungslängen (20 bis 50 mm) (Bild 6.2). Die Verschiebung am unbelasteten Ende wurde gemessen.

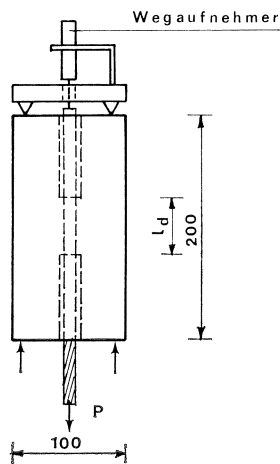


Bild 6.2. Prüfkörper für zentrische Ausziehversuche.

II-6 zentrische vorgespannte Balken, an denen die Einleitungslänge durch Messung der Betonverformung bestimmt wurde. (Bild 6.3). Die Prüfausführung war in Übereinstimmung mit den FIP-Richtlinien [6.3].

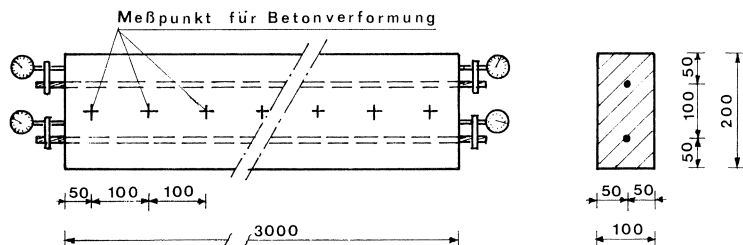


Bild 6.3. Zentrisch vorgespannter Balken.

III-20 exzentrische Ausziehkörper, um das Verhalten des Balkenendes studieren zu können (Bild 6.4).

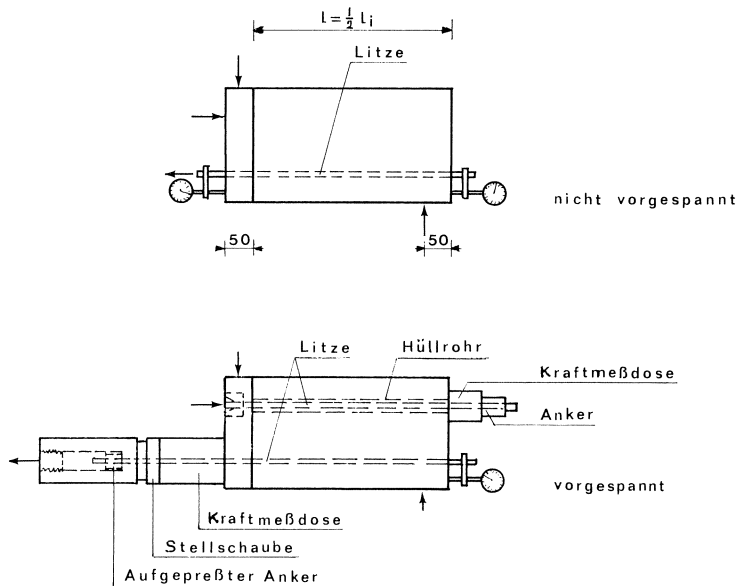


Bild 6.4. Prüfkörper für exzentrische Ausziehversuche.

Die Einbettungslänge betrug 350 bis 700 mm. Es wurden Prüfkörper ohne und mit Vorspannung untersucht.

Die Beanspruchung war:

- Einmalig bis zum Bruch, oder
- Oftmals wiederholt, wobei die Stahlspannung wie folgt variiert wurde:
- Bei den nicht vorgespannten Prüfkörper wurde die mittlere Stahlspannung (σ_{am}) auf 60% der Bruchfestigkeit eines einmalig belasteten Körpers eingestellt und die Amplitude wurde variiert. Die kleinste Schwingbreite $\Delta\sigma_a$ betrug 100 N/mm^2 bei $\sigma_{am} = 500 \text{ N/mm}^2$, die grösste war $\Delta\sigma_a = 250 \text{ N/mm}^2$ bei $\sigma_{am} = 900 \text{ N/mm}^2$.
- Bei den Prüfkörpern mit Vorspannung wurde die Belastung so gewählt, dass die Schwingbreite $\Delta\sigma_a = 24 \text{ N/mm}^2$ betrug und dass unter der Oberlast 90% des Rissmomentes erreicht wurden.

Während diesen Versuchen wurden die Stahlkraft (oder Vorspannung) und Verschiebungen am belasteten und unbelasteten Ende gemessen. Die Frequenz betrug 10 Hz, die höchste Lastwechselzahl war $3,2 \times 10^6$.

6.2.3 Versuchsergebnisse

Ausziehversuche mit kurzer Einbettungslänge

Der Einfluss der Einbettungslänge l_d ergibt sich aus Bild 6.5.

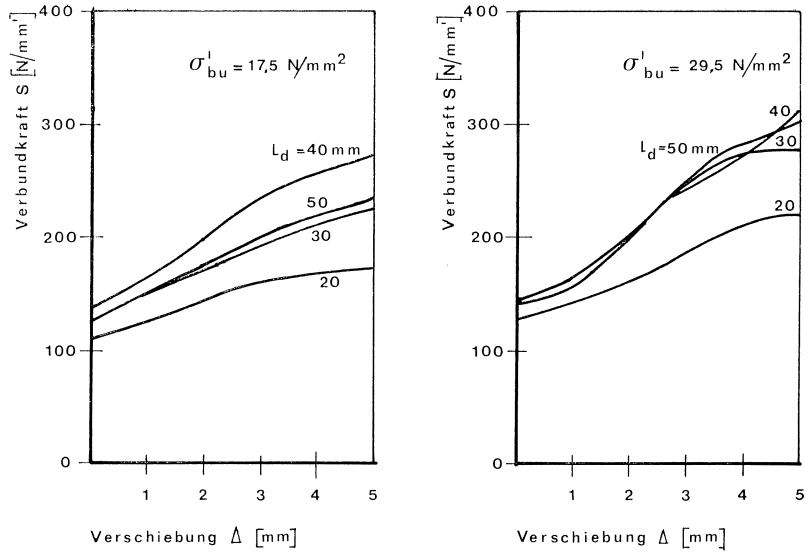


Bild 6.5. Einfluss der Einbettungslänge auf das $S-\Delta$ Verhalten.

In den folgenden Versuchen wurde l_d auf 25 mm ($2\varnothing$) festgelegt. Bild 6.6 gibt den Einfluss der Querdruckspannung auf das $P-\delta$ Diagramm wieder.

Es zeigte sich, dass nach dem Versagen des Haftverbundes der Verbundwiderstand zunimmt oder mindestens gleich bleibt. Dies steht im Gegensatz zu glatten Drähten, bei denen der Verbund stark abgemindert wird, nach dem die erste Verschiebung aufgetreten ist (Bild 6.8).

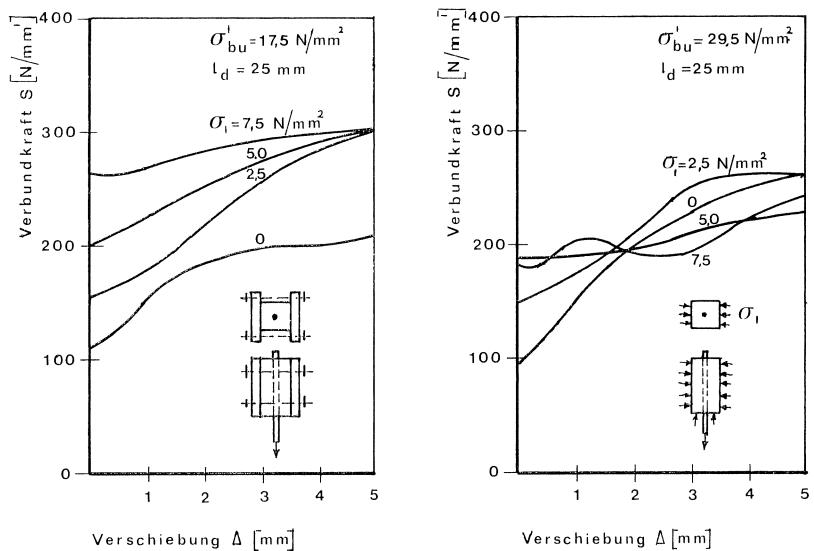


Bild 6.6. Einfluss der Querdruckspannungen auf das $S-\Delta$ Verhalten.

Prüfkörper 1.2. | 2435 | 2735 | 3015 | N
 Bezeichnung 3.4. | 2275 | 2575 | 2855 | N Belastung

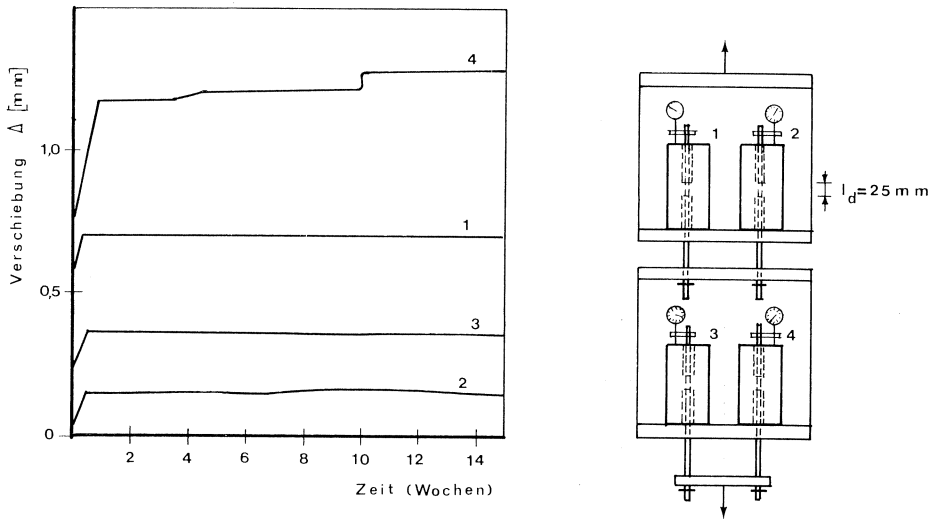


Bild 6.7. Verschiebung unter Dauerlast.

Eine Steigerung der Würfelfestigkeit von 18 auf 30 N/mm^2 gab eine 18% höhere Verbundfestigkeit.

Querdruck beeinflusst die Verbundfestigkeit günstig bei geringen Verschiebungen.

Unter Dauerstandsbeanspruchung zeigte sich keine Abminderung der Verbundgüte (Bild 6.7).

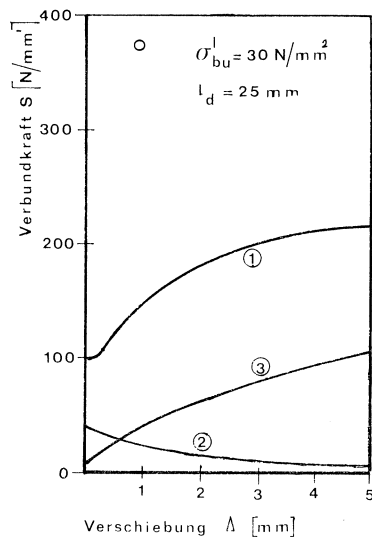


Bild 6.8. Vergleich zwischen dem S - Δ Verhalten einer Litze 1, eines glatten Drahts 2 und einer mit Schalungsöl verschmutzten Litze 3.

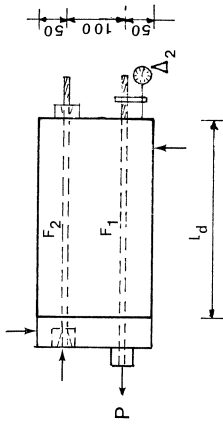


Tabelle 6.1 Übersicht der Ergebnisse der exzentrischen Ausziehversuche

Bezeichnung	Einbet- tungs- länge l_d mm	Vor- span- nung F_1 kN	F_2 kN	Theor. Riss- Last P_r kN	Wieder- holte Beans- pruchung		Last- wechsel- zahl	nach der Beans- pruchung		Anfang der Verschie- bung am unbelasteten Ende		Bruch- belastung	Versagensweise
					P_{mitt} kN	P_{max} kN		F_1 kN	Δ_2 mm	P kN	S_{mitt} N/mm		
1	350	-	-	-	-	-	-	-	-	20	57	70	Abspalten der Betonüberdeckung
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	86	85	Abspalten der Betonüberdeckung
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	86	90	Abspalten der Betonüberdeckung
4	-	65	41	-	-	-	-	-	-	50	140	100	Ausziehen der Litze
5	-	56,5	45	-	-	-	-	-	-	60	170	80	Ausziehen der Litze
6	700	-	-	-	-	-	-	-	-	70	100	150	Abspalten der Betonüberdeckung
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70	100	150	Abspalten der Betonüberdeckung
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50	57	100	Abspalten der Betonüberdeckung
9	-	96	98	-	-	-	-	-	-	80	115	-	kein Versagen
10	-	88	67	-	-	-	-	-	-	110	155	-	kein Versagen
11	350	-	-	-	44	58	0,15	-	2,600	-	-	-	Versagen der Litze
12	-	-	-	-	50	55	2,4	-	0,660	40	114	90	Abspalten der Betonüberdeckung
13	-	-	-	-	50	60	1,1	-	0,300	-	-	-	Versagen der Litze
14	-	55	40	44	29	39	1,9	49,0	0,003	60	170	120	Abspalten der Betonüberdeckung
15	-	65	35	50	35	45	3,2	58,0	0,160	60	170	120	Abspalten der Betonüberdeckung
16	700	-	-	-	95	102,5	0,88	-	0,077	-	-	-	Versagen der Litze
17	-	-	-	-	90	102,5	1,8	-	0,327	-	-	-	Versagen der Litze
18	-	-	-	-	90	107,5	0,17	-	0,600	-	-	-	Versagen der Litze
19	-	90	87	60	22,5	39	1,8	88,3	0,156	110	150	-	kein Versagen
20	-	93	65	70	46,5	63	2,5	87,0	0,390	90	130	-	kein Versagen

Prüfkörper, die erst nach 14 Wochen beansprucht wurden, zeigten eine Zunahme der Verbundfestigkeit von etwa 100%. Wahrscheinlich wirkt sich das Schwinden hier günstig aus.

Mit Schalöl verschmutzte Litzten haben deutlich ungünstigere Verbundeigenschaften, wie in Bild 6.8 gezeigt wird.

Bestimmung der Einleitungslänge

Bei einer Würfel Festigkeit von 18 N/mm^2 und einer Vorspannung $\sigma'_b = 10,5 \text{ N/mm}^2$ betrug die Einleitungslänge l_i rund 1000 mm. Bei einer Würfel Festigkeit von 30 N/mm^2 und einer Vorspannung $\sigma'_b = 10,5 \text{ N/mm}^2$ war diese 655 mm. Die Einbettungslänge der exzentrischen Ausziehkörper wurde auf Grund dieses letzten Ergebnisses bestimmt.

Exzentrische Ausziehkörper (Tabelle 6.1)

a. Prüfkörper ohne Vorspannung

Unter einmaliger Belastung traten bei rund 65% der Bruchfestigkeit grosse Verschiebungen auf.

Versagen wurde meistens durch Absprengen der Betonüberdeckung verursacht.

Unter wiederholter Beanspruchung war die Ermüdungsfestigkeit der Litzten massgebend.

b. Prüfkörper mit Vorspannung

Unter einmaliger Belastung fingen die Verschiebungen am unbelasteten Ende bei höherer Belastung an als bei nicht vorgespannten Prüfkörpern. Versagen geschah nie durch Abspalten der Betonüberdeckung, sondern durch Ausziehen der Litzten.

Unter wiederholter Belastung war die Abnahme der Vorspannung sehr niedrig: 8% für Prüfkörper mit einer Einbettungslänge $l_i = 350 \text{ mm}$ und 4% für Prüfkörper mit $l_i = 700 \text{ mm}$.

Verschiebungen am unbelasteten Ende blieben kleiner als 0,4 mm. Die Bruchfestigkeit wurde nicht nachteilig beeinflusst und Vorspannen wirkte sich darauf vorteilhaft aus.

Bei Prüfkörpern mit einer Einbettungslänge $l_i = 700 \text{ mm}$ wurde das Versagen wegen der beschränkten Kapazität der Presse (150 kN) nicht erreicht.

6.2.4 Rechnerische Ermittlung der Übertragungslänge

Wenn die Verschiebung zwischen Stahl und Beton gleich $\Delta(x)$ angenommen wird, dann ist die Zunahme der Verschiebung über dx

$$\frac{d\Delta(x)}{dx} = \varepsilon_a - \varepsilon_b \quad (6.1)$$

Da die Betonverformung klein ist im Vergleich zur Stahlverformung, kann auch geschrieben werden:

$$\frac{d\Delta(x)}{dx} = \varepsilon_a \quad \text{mit} \quad \varepsilon_a = \frac{\sigma_{aa} - \sigma_{ax}}{E_a} \quad (6.2)$$

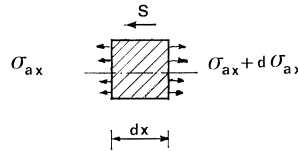


Bild 6.9. Spannungen an einem Element.

Aus dem Gleichgewicht der Kräfte (Bild 6.9) folgt:

$$\frac{d\sigma_{ax}}{dx} = S(\Delta) \quad (6.3)$$

Aus (6.2)

$$\frac{d\Delta(x)^2}{dx^2} = -\frac{1}{E} \cdot \frac{d\sigma_{ax}}{dx}$$

mit (6.3)

$$\frac{d\Delta(x)^2}{dx^2} = -\frac{1}{E} \cdot S(\Delta)$$

Randbedingungen:

$$x = 0 \rightarrow \sigma_{ax} = \sigma_{aa}$$

$$x = l_0 \rightarrow \Delta(x) = 0$$

Im allgemeinen wird eine Lösung dieser Differentialgleichung schwierig und nur für

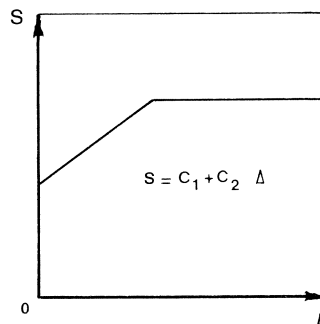


Bild 6.10. Schematisierter Zusammenhang zwischen S und Δ .

Tabelle 6.2 Vergleich zwischen berechneter und gemessener Übertragungslänge (bzw Einleitungslänge)

Einbet- tungs- länge l_d	Würfel- festigkeit σ'_{bu}	Betonverfor- mung in der Berechnung berücksichtigt	Übertra- gungslänge nach Berechnung	Einleitungs- länge nach Messung	Verschiebung der Litzenenden nach	
			l_0	l_i	Berechnung r	Messung r
mm	N/mm ²		mm	mm	mm	mm
25	30	×	810	655	2,00	1,56
30		×	700	655	1,86	1,56
40		×	685	655	1,84	1,56
40		—	690	655	1,84	1,56
20	17,5	×	890	955	2,2	2,43
30		×	850	955	2,0	2,43

bestimmte Verhältnisse zwischen S und Δ möglich sein, wobei das Verhältnis zwischen S und Δ schematisiert wurde, wie in Bild 6.10 angegeben. Tabelle 6.2 zeigt, dass auf diese Weise gute Übereinstimmung mit den Messwerten bekommen wurde.

6.3 Schlussfolgerungen

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Forschung sind:

- Das Verbundverhalten von Litzen zeigt keinen Abfall, eher eine Steigerung des Verbundwiderstands, nachdem die erste Gleitung aufgetreten ist.
 - Unter wiederholter Beanspruchung werden die Einleitungslänge und Vorspannung nicht nachteilig beeinflusst, wenn die Oberlast kleiner als die Risslast ist.
- Bei der Fortsetzung dieser Forschung werden folgende Fragen an die Reihe kommen:
- Was ist die Verankerungslänge einer Litze?
 - Wie wirkt sich eine Querbewehrung (Bügel-, Wendelbewehrung) darauf aus?
 - Was ist der mindestzulässige Abstand zwischen mehreren Litzen?
 - Auf welche Weise wirken Betonstahl und Spannstahl im Verankerungsbereich zusammen?

Literatur

- 6.1 ZAALBERG, P. H., GRÜNDEHNER, W. B., BOON D. und DEKKER, A. J. CHR.: Onderzoek aan balken voor Stads-gewestelijk Viaduct in de Zoetermeerlijn. Cement (1974) nr. 4, S. 150–157 und Cement (1974) nr. 5, S. 209–211.
- 6.2 STOCKER, M. F. und SOZEN, M. A., Bond characteristics of prestressing strand, Teil VI von Investigation of prestressed reinforced concrete for Highway bridges. University of Illinois Structural Research Series No. 344, 1969.
- 6.3 FIP Recommendations for the Approval, Supply and Acceptance of Steel for Prestressing Tendons.
- 6.4 EBERWIJN, J. J.: Aanhechtingseigenschappen van halfduims voorspanstrengen onder eenmalige en wisselende belasting. Diplomarbeit TU Delft, 1975.