

# Verbundverankerung von Spannstählen bei Spannbetonfertigteilen aus hochfestem Beton

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Hegger, Dipl.-Ing. A. Nitsch

T 2946

95,7%

## Zusammenfassung

### 1 VORWORT

Hochfester Beton ermöglicht durch höhere Festigkeiten eine deutliche Verminderung der Querschnittsabmessungen. Bei Spannbettfertigteilen bestimmt allerdings das Konstruktionselement der Verbundverankerung weiterhin die Abmessungen der vorgedrückten Zugzone. Durch Mindestabmessungen muß eine rißfreie Spannkrafteinleitung sichergestellt werden, da Sprengrisse zu einer unkontrollierten Verlängerung des Spannkrafteinleitungsbereichs führen und die erforderliche Verankerung im Bruchzustand in Frage stellen.

Bei hochfestem Beton ist zu erwarten, daß aufgrund der höheren Verbundfestigkeit die Übertragungslängen der Vorspannkraft verringert werden. Hierbei stellt sich die Frage nach der erforderlichen Betondeckung und den Mindestabständen der Spannstähle zur rißfreien Spannkrafteinleitung. Bei dem produktionstechnisch bedingten früheren Vorspannen ist zu klären, mit welchen Übertragungslängen im jungen hochfesten Beton zu rechnen ist. Ein weiterer Gesichtspunkt ist die erforderliche Verankerungslänge der Spannstähle im rechnerischen Bruchzustand. Hierzu werden entsprechende Empfehlungen zur normativen Regelung gegeben.

### 2 VERBUNDVERHALTEN IN HOCHFESTEM BETON

Bei der Spannkrafteinleitung wird die Vorspannkraft im Bereich der Übertragungslänge durch Verbundkräfte auf den Beton abgegeben. Nach den durchgeführten Ausziehversuchen an hochfestem Beton kann das Verbundverhalten von Spannstählen im Übertragungsbereich mit den folgenden drei Anteilen der Verbundkraft zutreffend beschrieben werden:

- Starr-plastisches Verbundverhalten (konstanter Anteil:  $\tau = c_1$ )
- Querdehnungsabhängiges Verbundverhalten (linearer Anteil:  $\tau = c_2 \cdot \Delta\sigma_p$ )
- Verschiebungsabhängiges Verbundverhalten (Potenzansatz:  $\tau = c_3 \cdot s(x)^\alpha$ )

In Bild 1 ist das typische Verbundverhalten von Spannstählen im Übertragungsbereich anhand von Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen dargestellt. Hierbei erhöhen sich die Verbundkräfte durch Querdehnungen infolge Spannungsänderungen entsprechend der Spannkrafteinleitung im Spannbett.

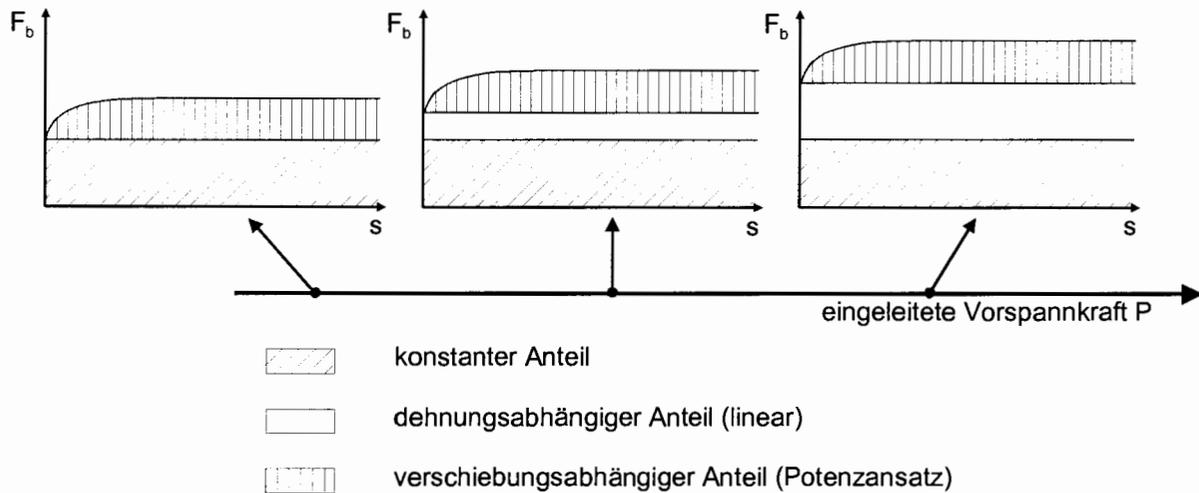


Bild 1: Schematische Darstellung des Verbundverhaltens von Spannstählen im Übertragungsbereich der Vorspannkraft

Insgesamt kann das Verbundverhalten von Litzen in 24 Stunden altem hochfesten Beton mit folgender Beziehung zutreffend beschrieben werden:

$$\tau = \beta_{w150} \cdot (0,037 - 1/1,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta\sigma_p + 0,0055 \cdot \beta_{w150}^{0,7} \cdot s(x)^{0,08}) \quad (1)$$

Der Vergleich der Verbundkräfte in 24 Stunden und in 14 Tage altem hochfesten Beton zeigt, daß die Verbundkraft nicht in demselben Maße anwächst wie die zeitabhängige Betondruckfestigkeit. Die Auswertung der Ausziehversuche nach 14 Tagen ergibt für den verschiebungsabhängigen Anteil eine Abminderung der Betondruckfestigkeit um 40 % gegenüber den 24 Stunden-Versuchen. Hiermit kann die Verbundspannung im Spannkrafteinleitungsbereich von 14 Tage altem hochfesten Beton wie folgt errechnet werden:

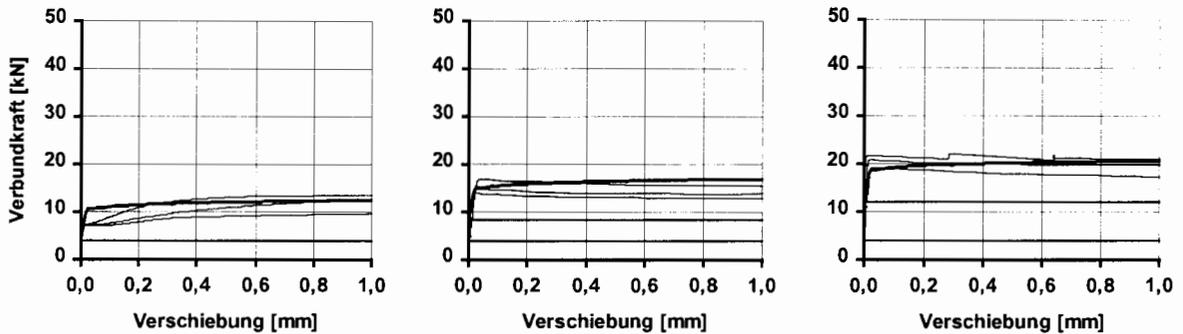
$$\tau = \beta_{w150} \cdot (0,037 - 1/1,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta\sigma_p + 0,0033 \cdot \beta_{w150}^{0,7} \cdot s(x)^{0,08}) \quad (2)$$

Bei gerippten Spanndrähten wird für den konstanten und den querdehnungsabhängigen Anteil der Verbundkraft derselbe Ansatz wie bei den Litzen zugrunde gelegt.

$$\tau = \beta_{w150} \cdot (0,037 - 1/1,5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta\sigma_p + 0,42 \cdot s(x)^{(0,78 - 0,0043 \cdot \beta_{w150})}) \quad (3)$$

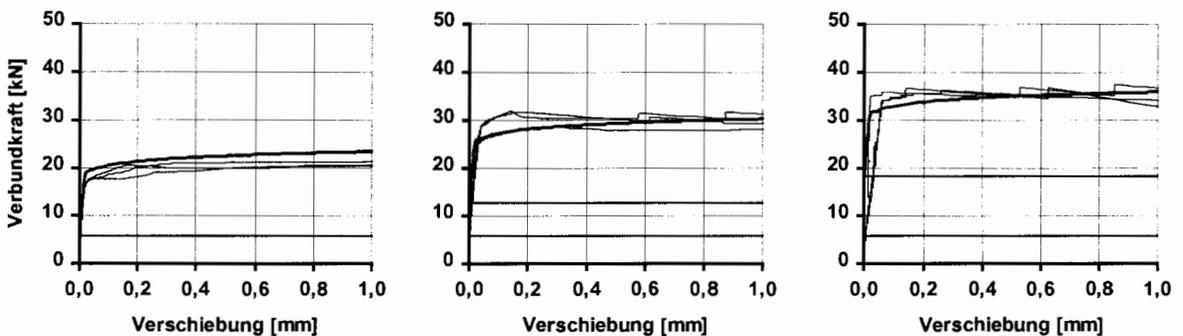
In den Bildern 2 bis 4 sind exemplarisch die nach Gleichung (1) mit dem wirksamen Umfang der Litzen von  $u_v = 1,6 \cdot \pi \sqrt{A_v}$  und der wirksamen Verbundlänge von  $l_{v,Netto} = 45$  mm errechneten Verbundkräfte und die bei einem Betonalter von 24 Stunden gemessenen Verbundkräfte der untersuchten Spanndrahtlitzen  $\varnothing 12,5$  mm für drei hochfeste Betonsorten zusammengestellt. Dabei werden die Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen aus jeweils drei Ausziehversuchen mit denselben Untersuchungsparametern in einem Diagramm dargestellt.

Die geraden Linien stellen die rechnerische Verbundkraft aus dem konstanten und dem querdehnungsabhängigen Anteil durch die Änderung der Litzenkraft dar. Die dicken Linien ergeben die rechnerischen Verbundkräfte aus der Summe dieser beiden Anteile und dem verschiebungsabhängigen Anteil. Die dünnen Linien zeigen das im Versuch gemessene Verbundverhalten der Litzen.



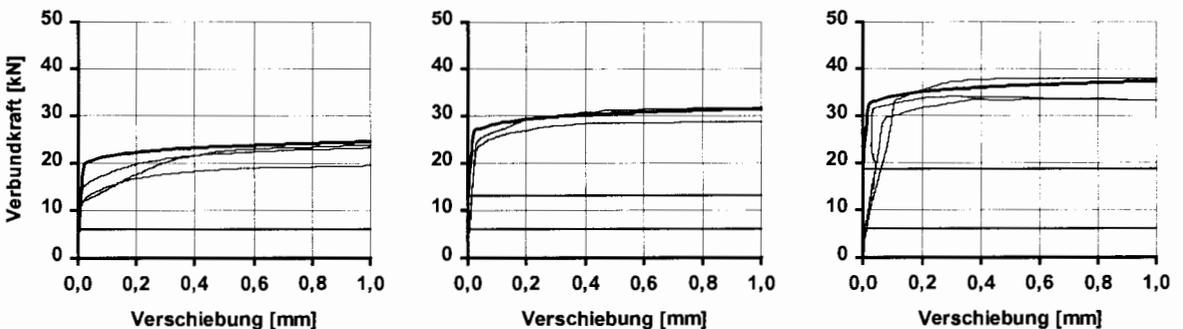
a) ohne Änderung der Litzenkraft      b) Änderung der Litzenkraft um -60 kN      c) Änderung der Litzenkraft um -110 kN

Bild 2: Vergleich der Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen für Serie 7 (M 65 K, ohne Silikastaub, 24 Stunden:  $\beta_{w150} = 48,3 \text{ N/mm}^2$ )



a) ohne Änderung der Litzenkraft      b) Änderung der Litzenkraft um -60 kN      c) Änderung der Litzenkraft um -110 kN

Bild 3: Vergleich der Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen für Serie 5 (M 105 KS, mit 45 kg/m<sup>3</sup> Silikastaub, 24 Stunden:  $\beta_{w150} = 73,5 \text{ N/mm}^2$ )



a) ohne Änderung der Litzenkraft      b) Änderung der Litzenkraft um -60 kN      c) Änderung der Litzenkraft um -110 kN

Bild 4: Vergleich der Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen für Serie 6 (M 105 BS, mit 65 kg/m<sup>3</sup> Silikastaub, 24 Stunden:  $\beta_{w150} = 75,6 \text{ N/mm}^2$ )

In Bild 5 und 6 werden die rechnerischen Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen der untersuchten gerippten Spannstahldrähte  $\varnothing 12$  mm nach Gleichung (3) den gemessenen Verläufen im Betonalter von 14 Tagen gegenübergestellt.

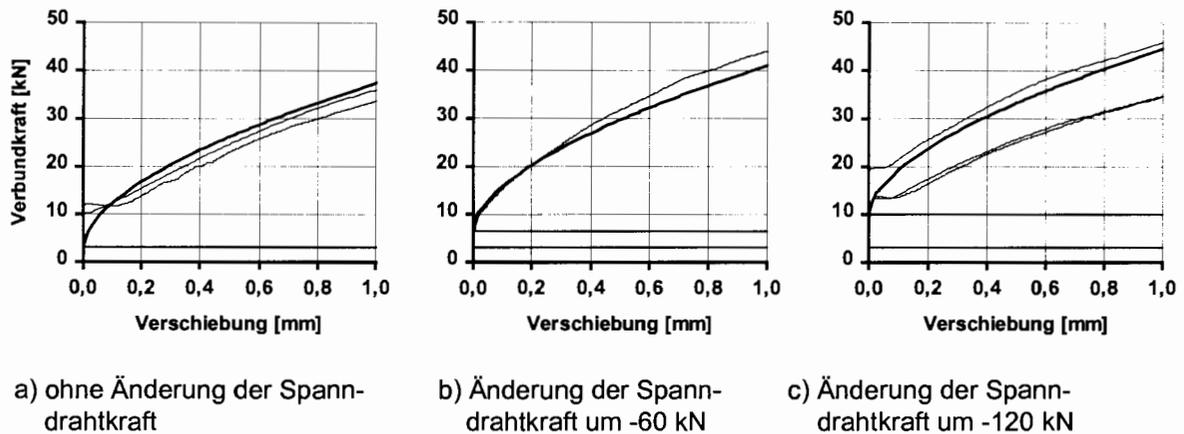


Bild 5: Vergleich der Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen für Serie 13  
 (M 45 K, ohne Silikastaub, Betonalter 14 Tage:  $\beta_{w150} = 48,4 \text{ N/mm}^2$ )

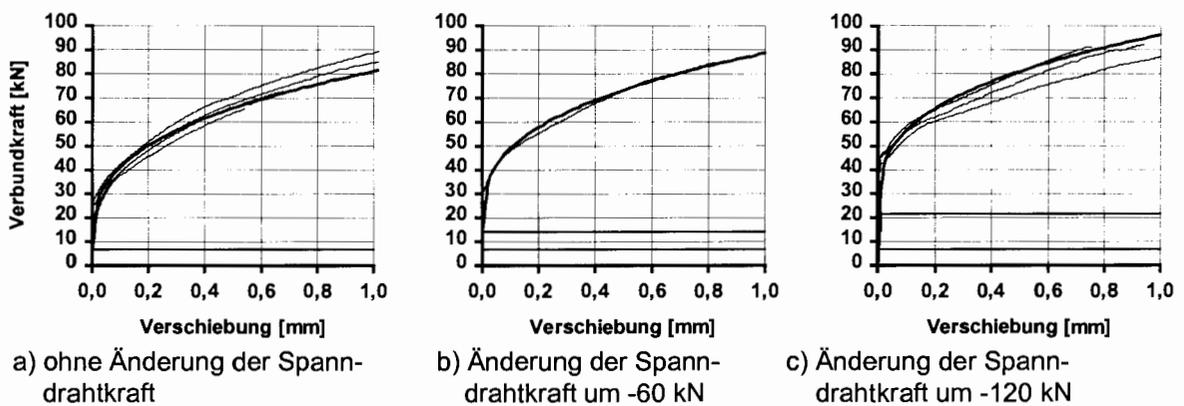


Bild 6: Vergleich der Verbundkraft-Verschiebungsbeziehungen für Serie 14  
 (M 105 KS, mit  $45 \text{ kg/m}^3$  Silikastaub, 24 Stunden:  $\beta_{w150} = 104,6 \text{ N/mm}^2$ )

Insgesamt belegen die Bilder 2 – 6, daß mit den Verbundgesetzen das im Versuch ermittelte Verbundverhalten gut beschrieben werden kann.

Auch konnten die Ergebnisse der Spannkrafteinleitungsversuche durch FE-Berechnungen verifiziert werden. Mit den Verbundgesetzen nach den Gleichungen 1 und 3, die aus den Ausziehversuchen abgeleitet wurden, kann die Spannkrafteinleitung in jungem hochfesten Beton zutreffend abgebildet werden.

### 3 MINDESTABMESSUNGEN IM SPANNKRAFTEINLEITUNGSBEREICH

Die Ergebnisse zur Sprengrißbildung aus 15 Spannkrafteinleitungsversuchen sind zusammenfassend in Bild 7 in Abhängigkeit von der Betondeckung  $c$  und dem lichten Abstand  $s$  der Litzen untereinander dargestellt. Hierbei kennzeichnet der angelegte Bereich die Abmessungen, bei denen die resultierenden Sprengkräfte aus der Einleitung der Vorspannkraft durch den Beton rißfrei aufgenommen werden können.

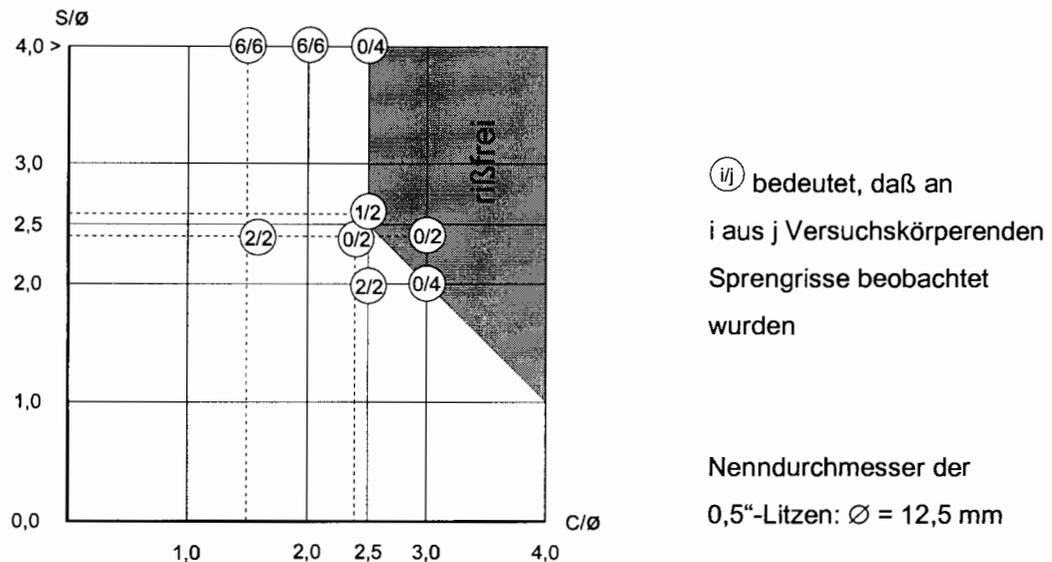


Bild 7: Sprengrißbildung in Abhängigkeit von der Betondeckung  $c$  und dem lichten Abstand  $s$  bezogen auf den Nenndurchmesser der Litzen

Die Auswertung ergibt, daß unabhängig von der Betonfestigkeit folgende Mindestabmessungen erforderlich sind, um die rißfreie Einleitung der zulässigen Vorspannkraft nach DIN 1045-1 für Spanndrahtlitzen sicherzustellen:

- für  $s \geq 2,5 \varnothing$ :  $c \geq 2,5 \varnothing$  oder
- für  $s = 2,0 \varnothing$ :  $c \geq 3,0 \varnothing$

Für gerippte Spanndrähte sind die Werte um  $0,5 \varnothing$  zu erhöhen.

Bei mehr als zwei Spannstäben in einer Lage können auch größere Mindestabmessungen erforderlich werden.

Die Zunahme der Betonzugfestigkeit bei hochfesten Betonen ist ausreichend, um ohne eine Vergrößerung der Betondeckung die Vorspannkraft bei kürzeren Übertragungslängen sicher einzuleiten. Die empfohlenen Mindestabmessungen gelten deshalb für normalfesten und hochfesten Beton. Die im Vergleich zur DIN 4227-1 größeren Betondeckungen ergeben sich zum einen aus den höheren zulässigen Spannungen des Spannstahls. Andererseits kann mit den Regelungen nach DIN 4227-1 eine Sprengrißbildung nicht ausgeschlossen werden.

## 4 ÜBERTRAGUNGSLÄNGEN

In Bild 8 sind die beim Spannkrafteinleitungsversuch mit Litzen  $\varnothing 12,5$  mm gemessenen Übertragungslängen in 24 Stunden altem hochfestem Beton in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit  $\beta_{W150}$  unmittelbar nach dem Vorspannen, nach 13 Tagen und nach 23 bis 27 Tagen dargestellt.

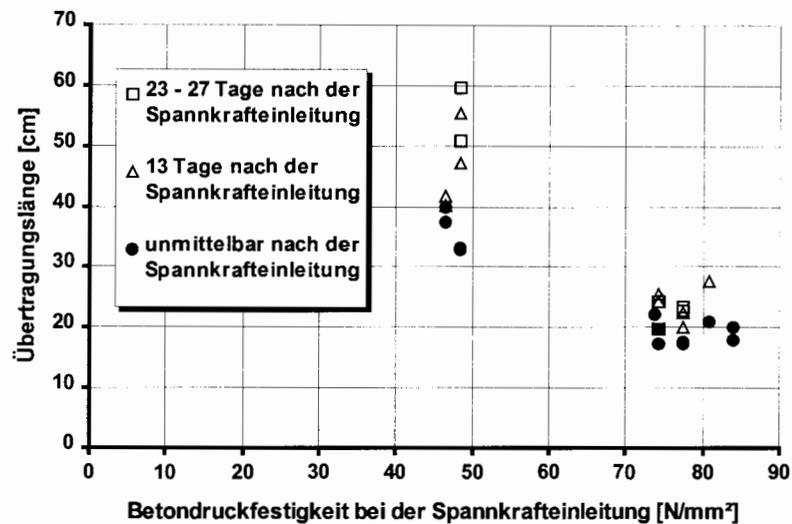


Bild 8: Übertragungslängen der Vorspannung in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit  $\beta_{W150}$  bei der Spannkrafteinleitung

Durch die große Verbundfestigkeit, die bereits bei den Ausziehversuchen an den hochfesten Betonsorten mit Silikastaub gemessen wurde, ergeben sich sehr kurze Übertragungslängen für diese Betonsorten ( $\beta_{W150} > 70$  N/mm<sup>2</sup>). Die zeitabhängigen Zuwächse der Übertragungslängen sind gering.

Die Übertragungslänge für Litzen und gerippte Spanndrähte in rißfreiem Beton kann in Abhängigkeit von der Zylinderfestigkeit bei der Spannkrafteinleitung angegeben werden. In Tabelle 1 sind die empfohlenen Beiwerte  $\beta_b$  zur Berechnung der Übertragungslängen  $l_{bp}$  in normalfestem und hochfestem Beton zusammengestellt.

Tatsächliche Betonfestigkeit bei der Spannkraftübertragung $f_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_b = l_{bp} / \varnothing$						
	25	30	40	50	60	70	$\geq 75$
Litzen	75	70	60	50	40	30	25
Gerippte Drähte	55	50	40	30	26	22	20

Tabelle 1: Beiwerte  $\beta_b$  der Übertragungslänge in Abhängigkeit von der Betonfestigkeit zum Zeitpunkt des Vorspannens



$$V_{sd} \leq \frac{z}{l_{bpd}} P_0 \leq P \quad (4)$$

mit  $V_{sd}$  = Auflagerkraft senkrecht zur Spannstahlachse,  
 $P_0$  = zulässige Vorspannkraft,  
 $P$  = vorhandene Vorspannkraft

Auf eine auch in DIN 1045-1 vorgesehene Extrapolation der Verankerungslänge über die Übertragungslänge hinaus sollte bei Litzen grundsätzlich verzichtet werden, da gemäß den durchgeführten Ausziehversuchen die Übertragungslängen von günstig wirkenden Querdehnungen bei der Spannkrafteinleitung abhängen. Übersteigt die Verankerungskraft die Vorspannkraft, wird eine deutliche Verminderung der spannungsabhängigen Verbundkräfte verursacht. Die mögliche Verankerungskraft wird deshalb auf die tatsächlich eingeleitete Vorspannkraft  $P$  begrenzt.

Für  $V_{sd} > \frac{z}{l_{bpd}} P_0$  ist bei Überschreiten der Betonzugfestigkeit mit Rissen im Übertragungs- bzw. im Verankerungsbereich zu rechnen. Die aufnehmbare Verankerungskraft der Spannbewehrung ergibt sich dann zu:

$$F_{pd} \leq \frac{x}{l_{bpd}} P_0 \leq P \quad \text{mit } x = \text{Abstand vom Balkenende bis zum ersten Ri\ss} \quad (5)$$

Die über  $F_{pd}$  hinausgehende Zugkraft  $\Delta F_{sd} = V_{sd} a_1/d + N_{sd} - F_{pd}$  ist entsprechend den Regeln für Betonstahlbewehrung am Endauflager zusätzlich zu verankern.

Für die Verankerungskraft  $\Delta F_{sd}$  kann die erforderliche Verankerungslänge  $l_b$  der Spannbewehrung hinter der Auflagervorderkante aus der Übertragungslänge der Vorspannkraft errechnet werden:

$$l_b = \frac{\Delta F_{sd}}{P_0} l_{bpd} \quad (6)$$

Auf eine Abminderung auf 2/3 bei direkter Lagerung sollte bei glatten Litzen verzichtet werden, da die Querpressungen im Spannkrafteinleitungsbereich durch Zusatzdehnungen aus der Verankerungskraft vermindert werden.

Mit diesem Vorschlag liegt ein einheitliches Bemessungskonzept der Verankerung am Endauflager für alle Vorspanngrade vor, das gleichermaßen für volle und teilweise Vorspannung sowie für Stahlbeton gültig ist.

In Bild 10 wird das vorgeschlagene Bemessungskonzept für eine teilweise Vorspannung und unterschiedliche Übertragungslängen  $l_b$  erläutert. In Bild 10 a) sind die Verhältnisse bei einer großen Übertragungslänge vorh.  $l_b$  für normalfesten Beton dargestellt. Bei geringen Vorspanngraden ist in normalfestem Beton mit einer Rißbildung im Verankerungsbereich zu rechnen. Hierdurch vermindert sich die für die Verankerungskraft anrechenbare Strecke auf die Länge  $x$  bis zum ersten Riß. Die aufnehmbare Verankerungskraft  $F_{pd}$  nach Gleichung (5) ist deutlich kleiner als die Vorspannkraft  $P$ . Die über  $F_{pd}$  hinausgehende Zugkraft  $\Delta F_{sd}$  ist zusätzlich hinter der Auflagervorderkante zu verankern.

Die Anwendung von hochfestem Beton führt zu einer Verminderung der Übertragungslänge vorh.  $l_b$ , so daß die gesamte Vorspannkraft als Verankerungskraft nach Gl. (4) angesetzt werden kann.

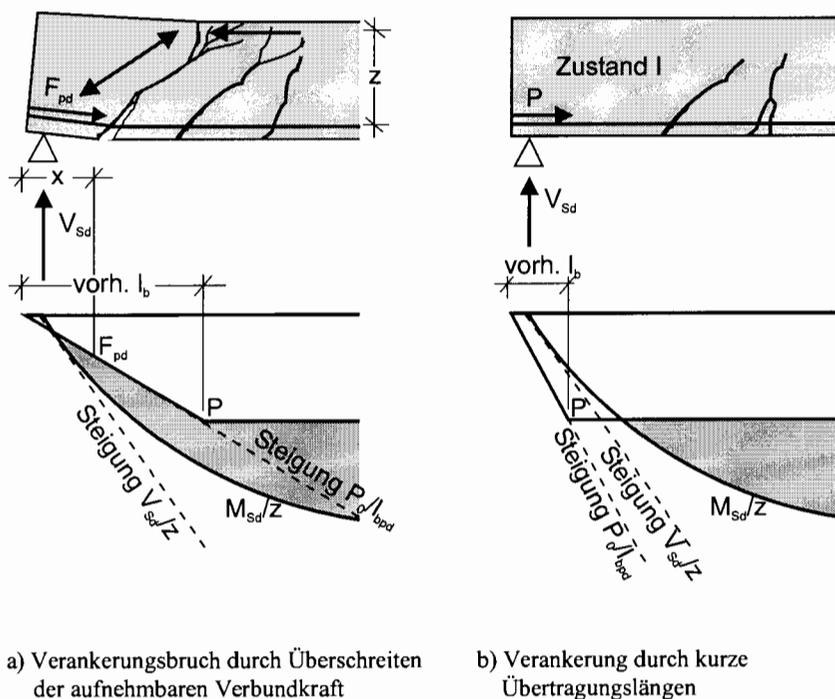


Bild 10: Vergleich der Endverankerung im rechnerischen Bruchzustand für unterschiedliche Übertragungslängen der Vorspannkraft

Durch das vorgeschlagene Bemessungskonzept kann auch bei geringen Vorspanngraden in den meisten Anwendungsfällen auf größere Auflagerüberstände und zusätzliche Betonstahlbewehrung verzichtet werden.