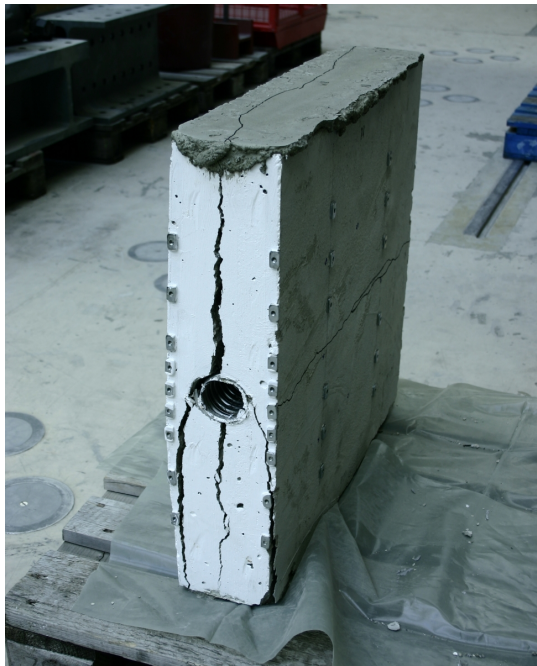


# **Prismenversuche zur Untersuchung der Spanngliedpräsenz**

## **Essais sur prisme pour l'évaluation de l'effet de la présence d'une gaine de précontrainte**



**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Institut des Structures  
Laboratoire de Construction en Béton (IS-BETON)**

**Eckart Hars  
Prof. Dr Aurelio Muttoni**

**Rapport 01.03-R2**

**Juni 2006**

**Diese Forschung ist durch das Bundesamt für Strassen ASTRA grosszügig unterstützt und finanziert worden. Die VSL International, Bern hat das Vorspannmaterial grosszügig zur Verfügung gestellt und die Injektion vorgenommen.**

# 1 Einleitung

Bei Spannbetonträgern kann die Spanngliedpräsenz im Steg zu einer inneren Rissbildung im Steg führen, die schliesslich zum Stegdruckbruch entlang des Kabels führen kann [1].

Um diesen Effekt isoliert betrachten zu können, wurden Stegscheiben oder Prismen hergestellt, die Hüllrohre enthielten und auf Druck bis zum Bruch belastet worden sind.

Im folgenden werden die Versuchsergebnisse präsentiert. Dabei ist insbesondere der bezogene Bruchwiderstand  $\eta_D$  von Interesse, der das Verhältnis der Bruchspannung  $\sigma_c$  zur Zylinderfestigkeit darstellt:

$$\eta_D = \frac{\sigma_c}{f_c} \quad (1.1)$$

Die Ziele der Versuchsserie sind:

1. Quantifizierung des Effekts  $\eta_D$  der Spanngliedpräsenz;
2. Einfluss des Hüllrohrtyps auf  $\eta_D$ : nicht injizierte Hüllrohre, injizierte Kunststoffhüllrohre und injizierte Stahlhüllrohre;
3. Vergleich Stahlhüllrohre älteren Typs mit modernen Fabrikaten;
4. Interaktion von  $\eta_D$  mit einer vorab aufgeprägten Schubrissbildung.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe werden auch in [2] beschrieben.



## 2 Beschreibung der Versuche

Zwei Versuchsserien wurden an Prismen unternommen. Die erste Serie ("Laborprismen") umfasste 12 Versuchskörper, die im Versuchslabor hergestellt worden waren. Die zweite Serie ("Brückenprismen") umfasste 4 Versuchskörper gleicher Abmessung, die aus Brückenträgern eines Viadukts, das 1967 erbaut und 2003 ersetzt wurde, ausgesägt worden waren [1].

### 2.1 Laborprismen

Die erste Serie enthielt unterschiedliche Hüllrohre: leer (Versuchskörper W7 und W8), injiziertes Stahlhüllrohr (W5, und W6), injiziertes HDPE-Hüllrohr (W1, W2, W9 und W10), und ein Spannglied, das aus den Brückenträgern ausgebaut worden war (W11 und W12) (Bild 2.1 und Tabelle 2.1). Von den Prismen mit HDPE-Hüllrohr besaßen zwei ein geneigtes Hüllrohr. Zwei Referenzprismen ohne Hüllrohr (W3 und W4) wurden auch getestet.



**Bild 2.1: Hüllrohrtypen des Versuchsprogramms**

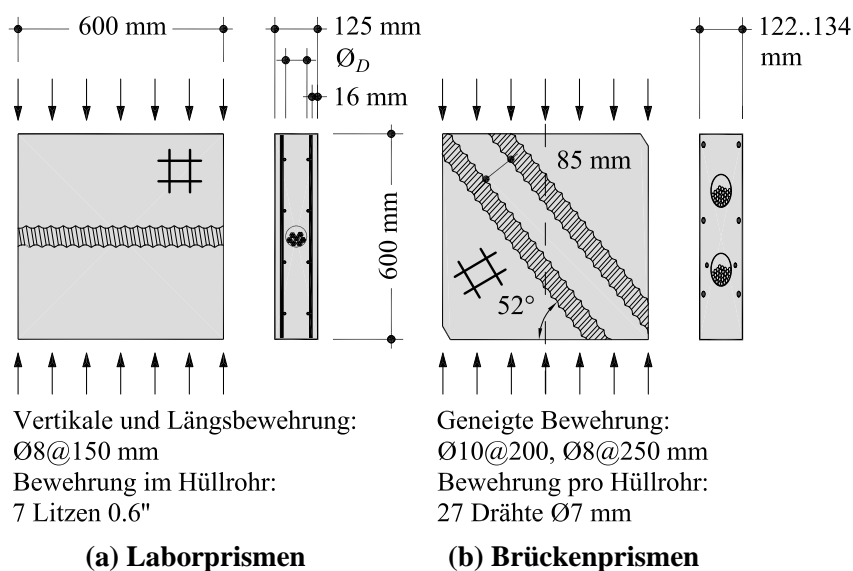
**Tabelle 2.1: Aussendurchmesser und Wanddicke der Hüllrohre**

Hüllrohrtyp	$\varnothing_D$ [mm]	$t$ [mm]
Stahl	62	0.5
Stahl 1967	60	0.5
HDPE	63	2.0

Jedes Prisma der ersten Serie hatte die Abmessungen  $h \times c \times b_w = 600 \times 600 \times 125 \text{ mm}^3$  (Bild 2.2 (a)). Sie besaßen eine ähnliche schlaffe Bewehrung wie die Prismen der zweiten Serie (Bild 2.2 (b)). Tabelle 2.2 zeigt die gemessenen Eigenschaften der schlaffen Bewehrung der Laborprismen. Alle Laborprismen wurden liegend in einem Durchgang betoniert, wobei eine gewöhnliche Zylinderfestigkeit erreicht wurde ( $f_c \approx 36 \text{ MPa}$ ,  $E_c = 31500 \text{ MPa}$ ). Das Grösstkorn der Gesteinskörnung betrug  $D_{\max} = 16 \text{ mm}$  und der Wasser-Zementwert 0.55. Alle Laborprismen wurden im Alter von 14 bis 30 Tagen getestet. Tabelle 2.3 zeigt die gemessene

## 2 BESCHREIBUNG DER VERSUCHE

Betonfestigkeit für ein Alter von 14, 21 und 28 Tagen. Sieben 7-drähtige Litzen 0.6'' wurden in die Hüllrohre eingeführt. Letztere wurden mit Injektionsmörtel mit einem Wasser-Zementwert von 0.33 drei Tage nach Betonieren injiziert, ausser den Versuchskörpern, die mit leeren Hüllrohren getestet wurden (W7 und W8). Die gemessene Festigkeit  $f_g$  des Injektionsmörtels wird in Tabelle 2.3 angegeben. Die Versuchskörper W11 und W12 enthielten aus den Brückenträgern ausgebaute, injizierte Spannglieder mit 27 Einzeldrähten  $\text{Ø} 7 \text{ mm}$ . Ziel dieser zwei Versuchskörper war es, den Einfluss der Verwendung älterer Spannglieder zu untersuchen, und um die Resultate der ersten Versuchsserie mit denen der zweiten Versuchsserie vergleichbar zu machen.



**Bild 2.2: Abmessungen und Bewehrung der getesteten Versuchskörper**

**Tabelle 2.2: Gemessene Stahleigenschaften der Laborprismen**

$f_s$ [MPa]	$f_t$ [MPa]	$f_t/f_s$ [-]	$E_s$ [MPa]
509	597	1.17	202000

**Tabelle 2.3: Gemessene Zylinderfestigkeit der Laborprismen und des Injektionsmörtels**

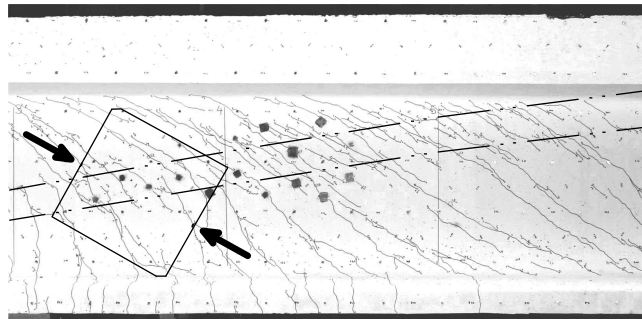
Alter [Tage]	$f_c$ [MPa]	$f_g$ [MPa]
14	34.7	27.0
21	36.6	28.7
28	37.3	32.2

## 2.2 Brückenprismen

Die zweite Versuchsserie (Brückenprismen) bestand aus vier Prismen, die aus Brückenträgern ausgesägt worden waren.

Zwei vorgerissene Prismen enthielten jeweils zwei Spannglieder übereinander, mit einem Abstand grösser als der Hüllrohrdurchmesser (W21 und W22, Bild 2.2 (b)). Aufgrund des Schnittwinkels ergaben sich ellipsenförmige Schnitte der Spannglieder.

Zwei Referenzprismen ohne Spannglied und ohne sichtbare Risse wurden ebenfalls aus den Brückenträgern ausgesägt (W23 und W24). Die Brückenträger waren zuvor im Versuchslabor getestet und zum Schubbruch geführt worden, so dass die Prismen mit den Spanngliedern (W21 und W22) stark vorgerissen waren, wenn sie auch der Balkenhälfte entnommen worden waren, die vom Schubbruch unbetroffen blieb. Die Orientierung dieser Prismen war so gewählt worden, dass die Belastung während der Prismenversuche parallel zur Vorrissbildung verlief (Bild 2.3). Die Referenzprismen (W23 und W24) waren vertikal ausgebaut worden. Die Eigenschaften der schlaffen Bewehrung der Brückenprismen gibt Tabelle 2.4 an.



**Bild 2.3: Profilierter Balken mit I-Querschnitt mit zwei parabolischen Spanngliedern im Steg; Extraktion der Prismen und Lastrichtung im anschliessenden Prismenversuch**

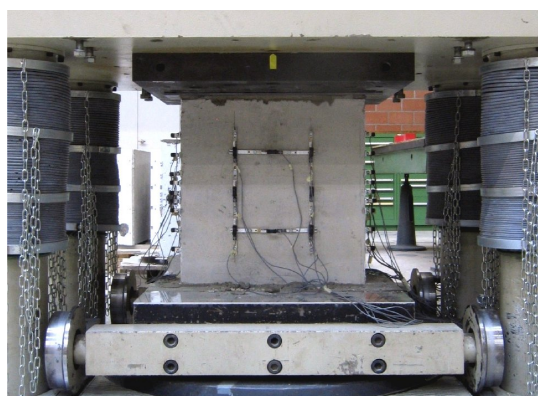
**Tabelle 2.4: Gemessene Stahleigenschaften der Brückenprismen**

Versuchskörper [-]	$f_s$ [MPa]	$f_t$ [MPa]	$f_t/f_s$ [-]
W23	582	730	1.25
W24	624	747	1.20

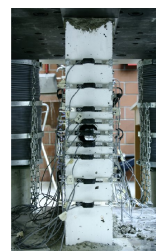
Tabelle 2.5 zeigt die Hauptparameter für alle Versuchskörper, einschliesslich der geschätzten Zylinderfestigkeit am jeweiligen Versuchstag. Die Prismen wurden in einer universellen Versuchsmaschine vom Typ "Trebel Schenck" mit einer Kapazität von 10 MN getestet (Bild 2.4). Die Versuchsgeschwindigkeit betrug ca.  $0.9 \cdot 10^{-3}$  mm/s, was im linearen Bereich der Belastungskurve etwa 1.3 kN/s entsprach. Die Lasteinleitung erfolgte durch eine 10..15 mm dünne Zementmörtelschicht hoher Festigkeit, die ober- und unterhalb der Versuchskörper angebracht worden war. Pro Prisma wurden insgesamt 34 Wegaufnehmer an allen Seitenflächen des Prismas oberflächlich befestigt (Bild 2.4). Die Messlänge betrug 125 mm in vertikaler Richtung, 250 mm in horizontaler Richtung und 115 mm in transversaler Richtung, mit einem Messbereich von  $\pm 2$  mm und einer Nichtlinearität von 1 %. Die Umgebungstemperatur während der Versuche betrug ungefähr 20 °C.

**Tabelle 2.5: Getestete Prismen: Hauptparameter**

Prisma [-]	Typ [-]	$\varnothing_D$ [mm]	$\delta = \varnothing_D/b_w$ [-]	Injiziert [-]	$f_c$ [MPa]	Alter [Tage]	$\beta$ [°]
W1	HDPE	63	0.50	Ja	36.4	22	0
W2	HDPE	63	0.50	Ja	37.6	30	0
W3	-	0	0	-	36.2	21	-
W4	-	0	0	-	37.3	28	-
W5	Stahl	62	0.50	Ja	35.0	16	0
W6	Stahl	62	0.50	Ja	35.5	18	0
W7	Stahl / leer	62	0.50	Nein	36.9	25	0
W8	Stahl / leer	62	0.50	Nein	35.3	17	0
W9	HDPE	63	0.50	Ja	37.5	29	34
W10	HDPE	63	0.50	Ja	36.6	23	34
W11	Stahl 1967	60	0.48	Ja	34.4	14	0
W12	Stahl 1967	60	0.48	Ja	36.7	24	0
W21	Stahl 1967	60	0.45	Ja	53.9	36 Jahre	52
W22	Stahl 1967	60	0.45	Ja	47.2	36 Jahre	50
W23	-	0	0	-	48.0	36 Jahre	-
W24	-	0	0	-	47.2	36 Jahre	-



(a) Frontansicht



(b) Seitenansicht

**Bild 2.4: Prisma in der Versuchsmaschine mit Wegaufnehmern**



### 3 Versuchsergebnisse

Tabelle 3.1 zeigt die Bruchlast  $N_R$  sowie deren Aufteilung in den Anteil  $N_{R,s}$ , der von der parallel zur Druckbelastung verlaufenden Bewehrung übernommen wurde (mit den Dehnungsmessungen bestimmt), und den eigentlichen Anteil  $N_{R,c}$ , den der Beton übernommen hat. Letzterer wird dann durch die Gesamtfläche geteilt, was die Bruchspannung  $\sigma_c$  ergibt. Für die Prismen W21 und W22 war der Stahlanteil vernachlässigbar, da die Bewehrung diagonal zur Lastrichtung verlief und unzureichend verankert war. Die Koeffizienten  $\eta_D$  und  $\eta'_D$  sind in der Tabelle ebenfalls angegeben. Es wird  $\eta'_D = \sigma_c / \sigma_{c0}$  bezogen auf das Referenzprisma. Der Koeffizient  $\eta_D$  wird in Bild 3.1 graphisch repräsentiert.

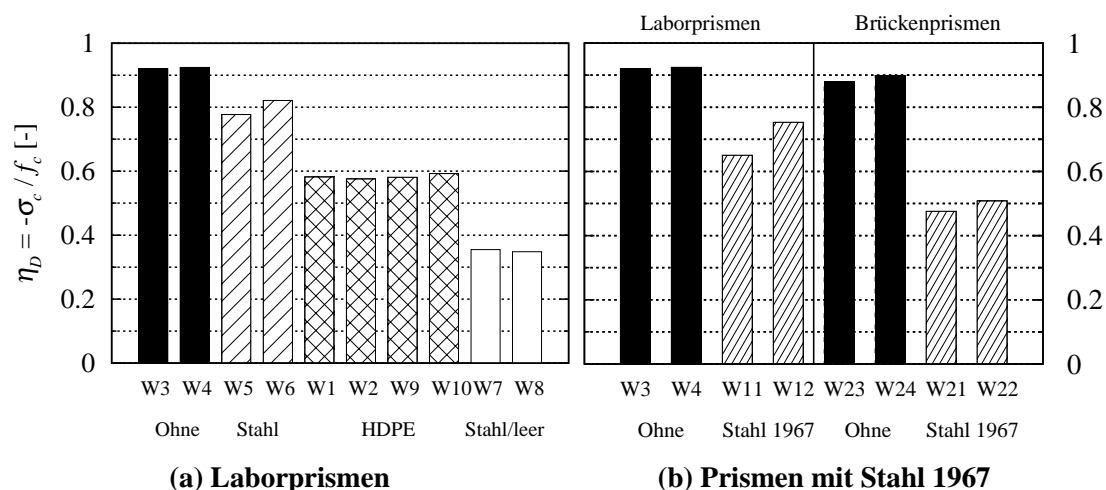
**Tabelle 3.1: Getestete Prismen: Versuchsergebnisse**

Prisma [-]	Typ [-]	$N_R$ [kN]	$N_{R,s}$ [kN]	$N_{R,c}$ [kN]	$-\sigma_c$ [MPa]	$\eta_D = -\frac{\sigma_c}{f_c}$ [-]	$\eta'_D = -\frac{\sigma_c}{\sigma_{c0}}$ [-]
W1	HDPE	1718	129	1589	21.2	0.58	0.63
W2	HDPE	1763	139	1624	21.6	0.58	0.62
W3	-	2700	203	2497	33.3	0.92	1.00
W4	-	2790	202	2588	34.5	0.92	1.00
W5	Stahl	2228	187	2040	27.2	0.78	0.84
W6	Stahl	2393	205	2188	29.2	0.82	0.89
W7	Stahl / leer	1103	120	982	13.1	0.35	0.38
W8	Stahl / leer	1013	91	921	12.3	0.35	0.38
W9	HDPE	1733	100	1633	21.8	0.58	0.63
W10	HDPE	1725	100	1625	21.7	0.59	0.64
W11	Stahl 1967	1838	161	1677	22.4	0.65	0.71
W12	Stahl 1967	2258	181	2076	27.7	0.75	0.82
W21	Stahl 1967	2066	0	2066	25.6	0.48	0.54
W22	Stahl 1967	1924	0	1924	24.0	0.51	0.57
W23	-	3200	102	3098	42.2	0.88	0.99
W24	-	3276	94	3182	42.4	0.90	1.01

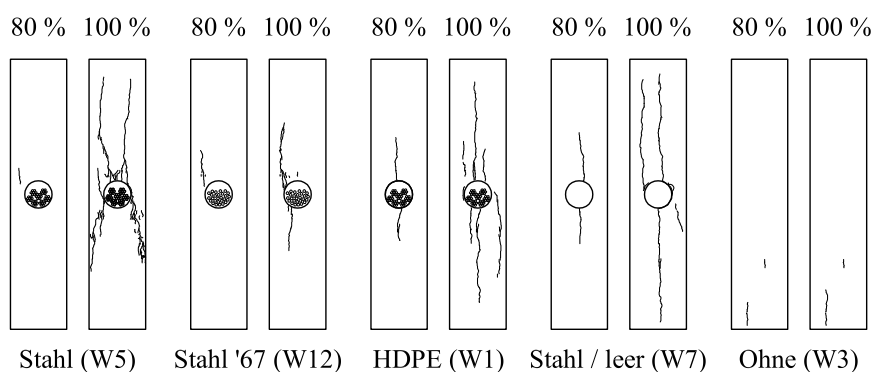
Bild 3.2 zeigt das Rissbild für 80 % und 100 % der Bruchlast für die unterschiedlichen Hüllrohrtypen der Laborprismen. Bild 3.3 zeigt die Laborprismen, und die Brückenprismen mit Hüllrohr, für den postkritischen Bereich, nach Entlastung.

Bild 3.4 zeigt die Spannungs-Vertikaldehnungsbeziehung für alle getesteten Prismen. Der erste Teil dieser Beziehung ist für alle Prismen linear, gefolgt von Steifigkeitsverlusten bis zur Bruchfestigkeit. In Bild 3.5 ist die Spannung gegen die Dickenzunahme des Prismas, gemessen auf Hüllrohrhöhe, aufgetragen. Bezogen auf die jeweilige Bruchlast ist das Verhalten für alle Prismen mit Hüllrohr vergleichbar.

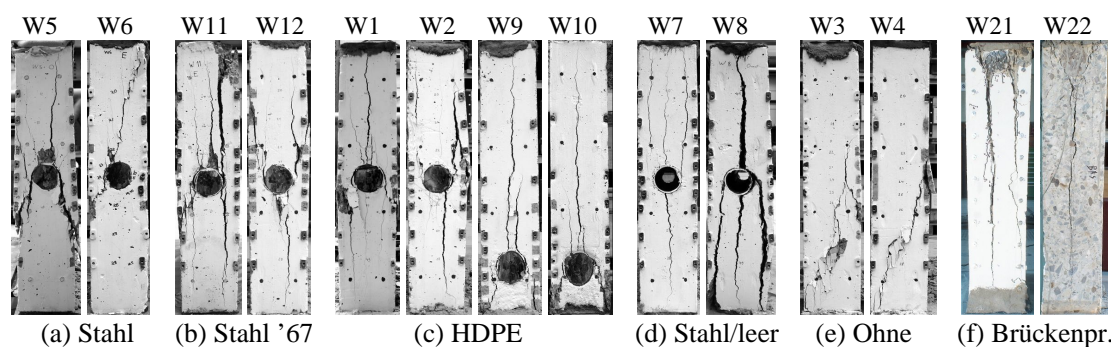
Bild 3.6 zeigt die Verteilung der Vertikaldehnung über die Höhe für ausgewählte Lastniveaus.



**Bild 3.1: Faktor  $\eta_D$  zur Beschreibung der Spanngliedpräsenz**



**Bild 3.2: Rissbild für 80 % und 100 % der Bruchlast für die unterschiedlichen Hüllrohrtypen der Laborprismen (ausgewählte Prismen)**

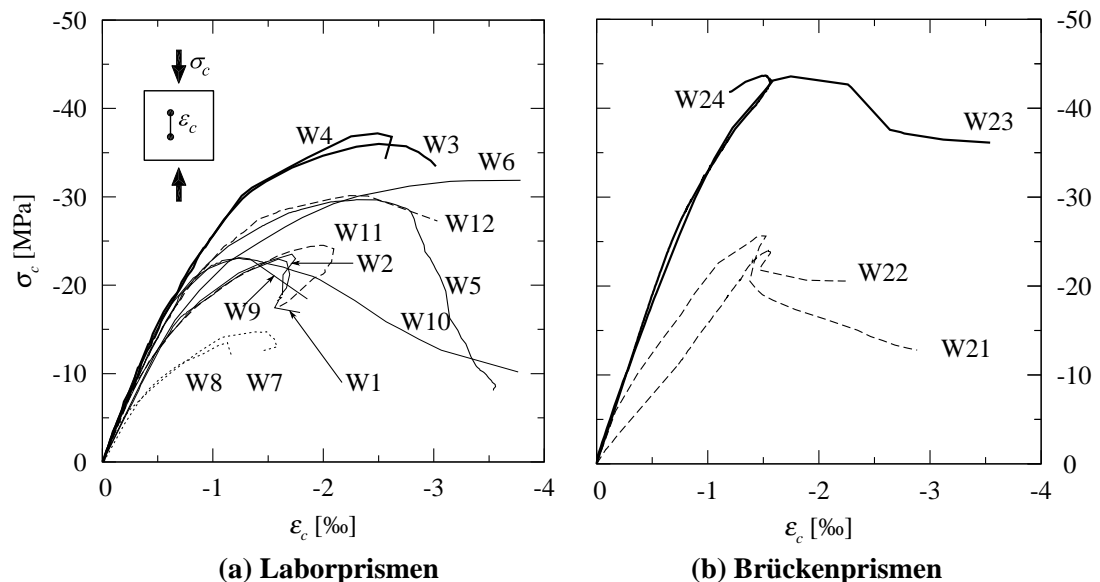


**Bild 3.3: Laborprismen und Brückenprismen für den postkritischen Bereich, nach Versuchsende (nicht gezeigt: W23 und W24); für die Laborprismen ist die schlaffe Horizontalbewehrung eingezeichnet**

### 3.1 Ergebnisse der Laborprismen

Die zwei massiven Prismen (W3 und W4) erreichten die höchste Bruchlast, die 92 % der Zylinderfestigkeit  $f_c$  am Versuchstag entsprach. Diese Reduktion ist auf die Schlankheit ( $h/b_w =$

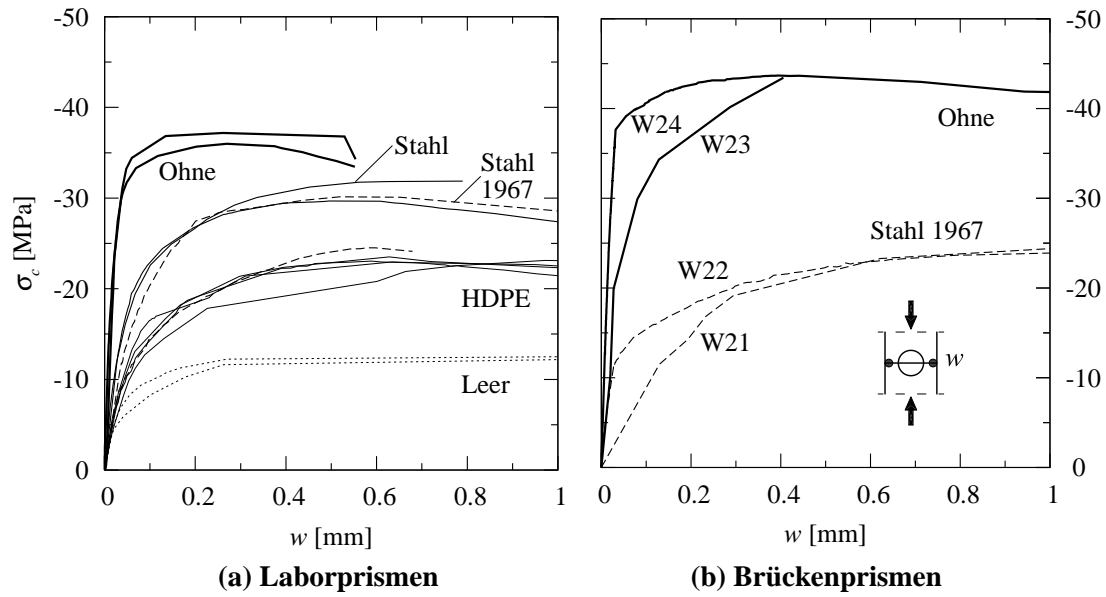
4.8) der Prismen zurückzuführen, und zeigt, dass die Lasteinleitung keinen laststeigernden Einfluss hatte. Schlankheitseffekte dürften bei den Prismen mit Hüllrohr eine untergeordnete Rolle spielen, da die Bruchspannung geringer ist. Die beiden Prismen mit leeren Hüllrohren (W7 und W8) erreichten mit  $35\% f_c$  den geringsten Wert. Die grösste Festigkeit wurde für die Prismen mit injizierten Stahlhüllrohren erreicht (W5 und W6; im Mittel  $80\% f_c$ ), während die Prismen mit injizierten HDPE-Hüllrohren nur  $58\% f_c$  erzielten. Der Einfluss der Neigung  $\beta$  des Hüllrohrs war vernachlässigbar (W1 und W2:  $58\% f_c$ , W9 und W10 mit  $\beta = 34^\circ$ :  $59\% f_c$ ). Schliesslich erreichte eines der Prismen mit dem aus dem Brückenträger ausgebauten Spannglied (W11) eine deutlich geringere Festigkeit ( $65\% f_c$ ) als die Prismen mit gewöhnlichem Stahlhüllrohr (W5 und W6). In diesem Fall hatten sich bei Bruch Spaltrisse im Injektionsmörtel zwischen den Einzeldrähten gebildet, die beim zweiten Prisma dieses Typs ausblieben, welches eine Festigkeit erreichte, die mit den Prismen mit gewöhnlichem Stahlrohr vergleichbar war (W12:  $75\% f_c$ ). Spaltrisse waren bei mehreren Prismen mit HDPE-Hüllrohren festzustellen.



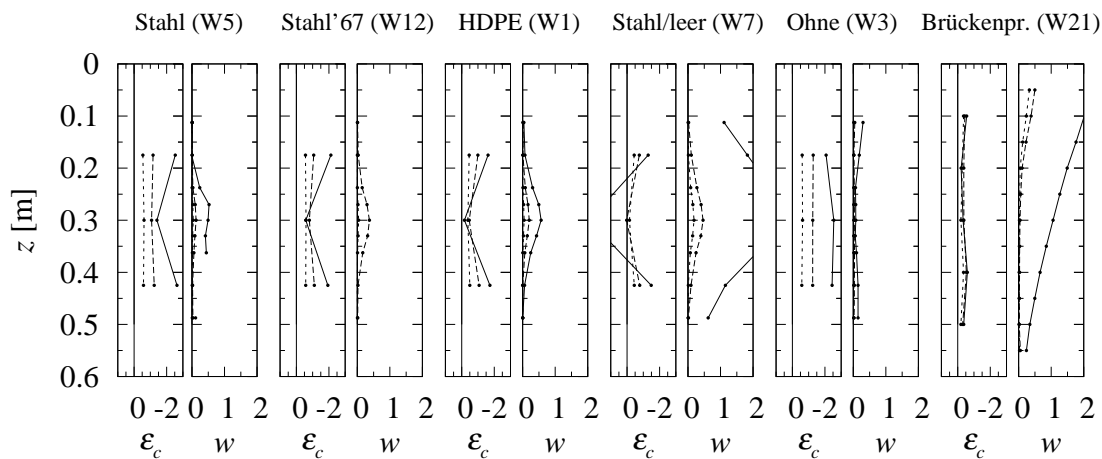
**Bild 3.4: Gemittelte vertikale Druckspannung, aufgetragen gegen die gemittelten vertikalen Stauchungen**

Die Messung der Querdehnung auf Höhe des Spannglieds gibt Aufschluss über die Rissbildung parallel zur Ebene, obwohl die meisten Risse noch bei hohen Lastniveaus fürs blosse Auge unsichtbar bleiben (Bild 3.2). Wie Bild 3.5 (a) zeigt, war die Querdehnung der Prismen ohne Hüllrohr bis in hohe Lastniveaus tatsächlich gering, und vor allem durch die Poissonzahl  $\nu$  bedingt. Bei Prismen mit Hüllrohr begann die Querdehnung dagegen schon bei geringer Belastung deutlich zuzunehmen, und betrug bei  $80\%$  der Bruchlast etwa  $0.15..0.30$  mm. Das Verhalten von Prismen mit HDPE-Hüllrohren unterscheidet sich deutlich von dem mit Stahlhüllrohren. Bei gleichem absoluten Lastniveau entwickelten erstere deutlich früher innere Risse.

Erst kurz vor Erreichen der Bruchlast wurden diese Spaltrisse auf den Seitenflächen der Prismen sichtbar (Bild 3.2). Bei der Bruchlast waren die Prismen beinahe entzwei gespalten. Auf den Frontflächen wurden vor der Bruchlast keine Risse beobachtet, mit Ausnahme der Prismen mit leerem Hüllrohr, wo sich bei etwa  $70\%$  der Bruchlast Risse parallel zum Hüllrohr bildeten. Bild 3.6 zeigt die Verteilung der Querdehnung über die Höhe für ausgewählte Lastniveaus.



**Bild 3.5: Gemittelte vertikale Druckspannung, aufgetragen gegen die Dickenzunahme des Prismas in Querrichtung auf Höhe des Spannglieds**



**Bild 3.6: Verteilung der Vertikaldehnung  $\epsilon_c$  [%] und der Dickenzunahme  $w$  [mm] über die Prismenhöhe  $z$  für die verschiedenen Hüllrohrtypen (ausgewählte Prismen); für 50, 80 und 100 % der Bruchlast**

### 3.2 Ergebnisse der Brückenprismen

Das Verhalten der Brückenprismen war dem der Laborprismen ähnlich. Die zwei Prismen ohne Hüllrohre (W23 und W24) erreichten im Mittel 89 %  $f_c$ . Die zwei vorgerissenen Prismen mit Spanngliedern (W21 und W22) erzielten im Mittel nur 50 %  $f_c$ , deutlich weniger als die Laborprismen mit injizierten Hüllrohren aus Stahl. Diese Reduktion rührt wahrscheinlich von der Querdehnung her, die während des vorangegangenen Balkenversuchs eingetragen wurde. Eine Multiplizierung der Effekte aus dem Verzerrungszustand (Schubrissbildung) und der Spanngliedpräsenz  $\eta_D$  scheint angebracht.

## 4 Zusammenfassung und Folgerungen

Der Bruchwiderstand auf Druck von Prismen mit Hüllrohren wurde anhand von 16 Prismen untersucht.

Der Bruch tritt ein durch innere Rissbildung, die sich bei Bruch über den Grossteil der Prismenhöhe erstreckt.

Der Effekt der Spanngliedpräsenz  $\eta_D$  wurde für ein Verhältnis Hüllrohrdurchmesser zu Stegdicke von etwa 0.5 untersucht. Er setzt den Bruchwiderstand deutlich herab. Die relativ glatte Hüllrohroberfläche begünstigt die innere Rissbildung im umgebenden Beton.

Für injizierte Hüllrohre aus Stahl fällt die Abminderung mit etwa 25 % gegenüber der Zylinderdruckfestigkeit am geringsten aus. Für injizierte Hüllrohre aus Kunststoff ist sie deutlich höher und beträgt etwa 40 %. Bei leeren Hüllrohren ist die Abminderung mit 65 % am grössten.

Injizierte Stahlhüllrohre älteren Typs führen zu einer nur unwesentlich geringeren effektiven Festigkeit als moderne Fabrikate.

Der Bruchwiderstand von zwei Prismen mit einer vorab aufgeprägten Schubrissbildung deutet auf eine Multiplikativität der Effekte aus Verzerrungszustand (Schubrissbildung) und Spanngliedpräsenz  $\eta_D$  hin.



# Literaturverzeichnis

- [1] Hars, E. und Muttoni, A., *Essais à l'effort tranchant sur des poutres précontraintes à âme mince - Schubversuche an Spannbetonträgern mit dünnem Steg*, Bericht Vol. 01.03-R1, IS-BETON, EPFL, 108p., Lausanne, Schweiz, Apr. 2006.
- [2] Muttoni, A., Burdet, O.L., Hars, E., *Effect of Duct Type on the Shear Strength of Thin Webs*, ACI Structural Journal, Farmington Hills, USA, zur Veröffentlichung akzeptiert.

