

Vorlesung Stahlbeton II

Prof. Dr. W. Kaufmann
Frühlingssemester 2024

Vorlesung Stahlbeton II

Inhalt der Vorlesung
(Ziele siehe Stahlbeton I)

Inhalt Vorlesung Stahlbeton I / II

- 1. Einführung**
 - Entwicklung des Betonbaus
 - Baustoffe – Herstellung und Anforderungen
 - Bemessungskonzepte
 - 2. Materialverhalten**
 - Beton
 - Betonstahl
 - Verbund
 - 3. Stabtragwerke**
 - Normalkraft
 - Biegung
 - Biegung und Normalkraft
 - Druckglieder
 - Querkraft (inkl. Spannungsfelder /Bruchmechanismen)
 - Torsion
 - 4. Scheibenelemente**
- Stahlbeton I**
- 5. Vorspannung**
 - 6. Platten**
- Stahlbeton II**

Die Vorlesung *Stahlbeton II* baut auf den Kenntnissen der Lehrveranstaltung *Stahlbeton I* auf. Sie beinhaltet zwei Hauptgebiete des Stahlbetonbaus: Vorspannung und Platten.

Weiterführende Unterlagen

- [1] Marti, P., *Stahlbeton I/II*, Autographie, ETH Zürich, 2009/10 (Grundlage der Vorlesung) → online verfügbar
 - [2] Marti, P., *Baustatik*, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2011 → online verfügbar
 - [3] Marti, P., Monsch, O., Schilling, B., *Ingenieur-Betonbau*, vdf, ETH Zürich, 2005 (Grundlagen, historische Entwicklung etc.) → im ETH Store und in der Baubibliothek verfügbar
 - [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Normen:
 - SIA 262 *Betonbau*, Zürich, 2003 (Teilrev. 2013)
 - SIA 260 *Grundlagen der Projektierung von Tragwerken*, 2003 (Teilrev. 2013)
 - SIA 261 *Einwirkungen auf Tragwerke*, 2003 (Teilrev. 2020)
 - [5] Marti, P., Alvarez, M., Kaufmann, W., Sigrist, V., *Tragverhalten von Stahlbeton*, IBK, ETH Zürich, 1999 → online verfügbar
 - [6] Dokumentationen diverser Vorspannfirmer → online verfügbar
- Fachausdrücke und Bezeichnungen werden nach SIA 262 (Ziffer 1) verwendet

Wie die Vorlesung Stahlbeton I ist auch der Inhalt der Vorlesung Stahlbeton II weitgehend normunabhängig. Die Ausdrücke und Bezeichnungen werden gemäss den Swisscodes (Tragwerksnormen des SIA) verwendet; sie sind weitgehend kompatibel mit den Eurocodes.

Die Übungen und Prüfungsaufgaben basieren auf den Swisscodes. Diese wurden in der Vorlesung Stahlbeton I, Teil 2 (Baustoffe) und Teil 3 (Bemessungskonzepte) eingeführt.

Organisation Vorlesung Stahlbeton II

Vorlesung

- Dienstag 09:45-11:30 Uhr und Mittwoch, 09:45-11:30 Uhr, HIL E 3
- Detailliertes Semesterprogramm und Vorlesungsunterlagen online verfügbar unter <https://concrete.ethz.ch/sbe-ii/>
- Assistenz: Paul Merz, HIL E 41.3 (paul.merz@ibk.baug.ethz.ch)

Organisation Übungsbetrieb Stahlbeton II

Kolloquium

- 5 Kolloquien, jeweils Mittwoch, **08:00-09:35 Uhr**, in Gruppen (statt Vorlesung)
- Gruppeneinteilung wird nach Ablauf der Einschreibefrist am Ende der zweiten Semesterwoche bekannt gegeben, Infoblatt «Organisation des Übungsbetriebs»
- Kolloquien dienen der Vertiefung des Vorlesungsstoffes durch praktische Anwendung an Übungsbeispielen

Hausübungen

- 5 Hausübungen, jeweils während der Kolloquien ausgegeben und eingeführt
- Abgabe der Hausübungen ist freiwillig, aber sehr empfehlenswert. Abgegebene Übungen (an Hilfsassistenten, jeweils beim nächsten Kolloquium) werden korrigiert zurückgegeben.

Applikationen

- In der Vorlesung vorgestellt und zum Lösen der Hausübungen empfohlen
- Online verfügbar unter <https://concrete.ethz.ch/applikationen/>

Sprechstunden

- Ab der vierten Semesterwoche
- Bei Fragen zu Vorlesung, Kolloquien und Hausübungen
- gemäss Infoblatt «Organisation des Übungsbetriebs»

Vorspannung – Einführung

Wiederholung aus Stahlbeton I:

Die Spannweiten von Stahlbetonbauten sind wegen der Rissbildung und den Langzeitverformungen (Kriechen) begrenzt, da die Verformungen bei grossen Schlankheiten, wie sie weitgespannte Tragwerke erfordern, unzulässig gross werden.

Mit einer Vorspannung können diese Probleme gelöst werden, indem die Beanspruchung infolge ständiger Lasten – oder ein Teil davon – durch die Anker- und Umlenkkräfte der Vorspannung kompensiert wird. Die Vorspannung ist damit eine wesentliche Grundlage für weitgespannte, schlanke und wirtschaftliche Betontragwerke. Sie verhalf der Betonbauweise zum Durchbruch, insbesondere im Brückenbau.

Vorspannung – Einführung

Ursprung und Prinzip der Vorspannung allgemein

- Prinzip der Vorspannung ist schon sehr lange bekannt
- Grundidee: Mit der Vorspannung wird eine (Anfangs-)Beanspruchung im Tragwerk erzeugt, welche den Spannungs- und Verformungszustand günstig beeinflusst (dabei wird Energie im Tragwerk gespeichert):
→ Vorspannen = Beeinflussung des Tragverhaltens durch kontrolliertes Aufbringen von Kräften
- Die Vorspannung erlaubt insbesondere eine bessere Ausnutzung von Materialien oder Systemen mit asymmetrischen Festigkeitscharakteristiken
- Anwendung in verschiedensten Bereichen, alltägliche Beispiele:
 - Regenschirm (Druck in Stäben, Zug in Membran)
 - Geländer mit Seilausfachung (Druck in Rahmen, Zug in Seilen)
 - Daubenfass / Barrique (Druck in Holz / Daubenstoss, Zug in Stahlringen)
 - Pneu (Druck in Luftfüllung, Zug in Schlauch)
 - Rad (Druck in Felge, Zug in Speichen):

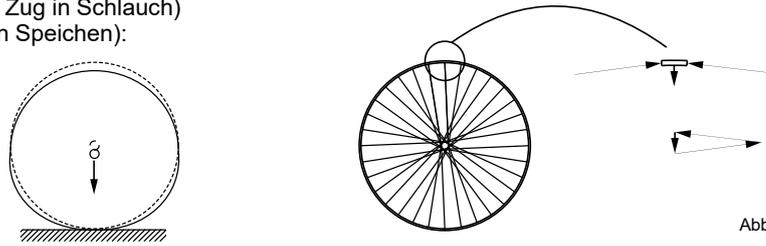


Abbildung aus [3]

(Erläuterungen siehe Folie)

Vorspannung – Einführung



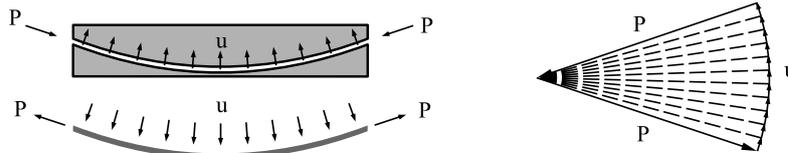
Vorspannung – Einführung



Vorspannung – Einführung

Ursprung und Prinzip der Vorspannung im Betonbau

- Beton weist eine ausgeprägt asymmetrische Festigkeitscharakteristik auf (Zugfestigkeit nur ca. 10% der Druckfestigkeit, zudem starke Streuung → meist ganz vernachlässigt).
- Im Stahlbetonbau werden daher die Zugkräfte durch eine Bewehrung aufgenommen. Im gerissenen Zustand treten jedoch bei schlanken Tragwerken relativ grosse Verformungen auf, welche durch das Kriechen des Betons nochmals vergrößert werden
→ Prinzip der Vorspannung für eine Anwendung im Betonbau prädestiniert
- Grundidee: Mit der Vorspannung wird eine (Anfangs-)Beanspruchung im Tragwerk erzeugt, welche die Zugspannungen infolge der Einwirkungen (teilweise) überdrückt und die Verformungen (teilweise) kompensiert:



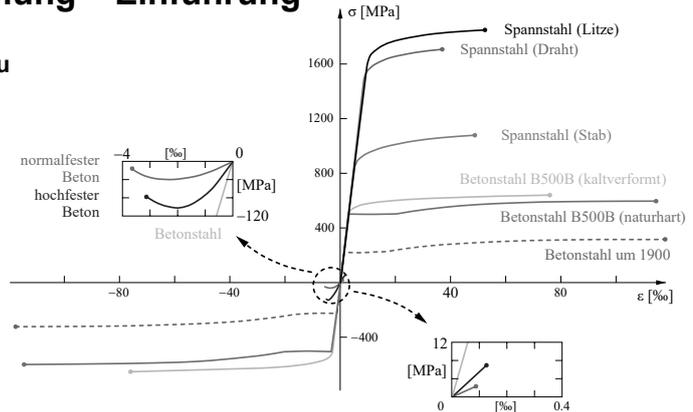
- zwischen dem Spannstaahl und dem vom Spannstaahl befreiten Tragwerk wirken Verankerungs-, Umlenk- und Reibungskräfte
- im Gesamt-Tragwerk (inkl. Spannstaahl) resultiert ein Eigenspannungszustand

(Erläuterungen siehe Folie)

Vorspannung – Einführung

Ursprung und Prinzip der Vorspannung im Betonbau

- Umsetzung: Hochfeste Stahldrähte oder Litzen mit Pressen gegen das Betontragwerk spannen



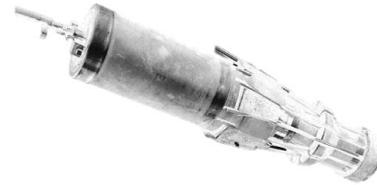
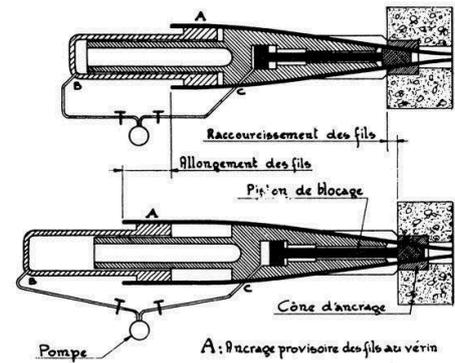
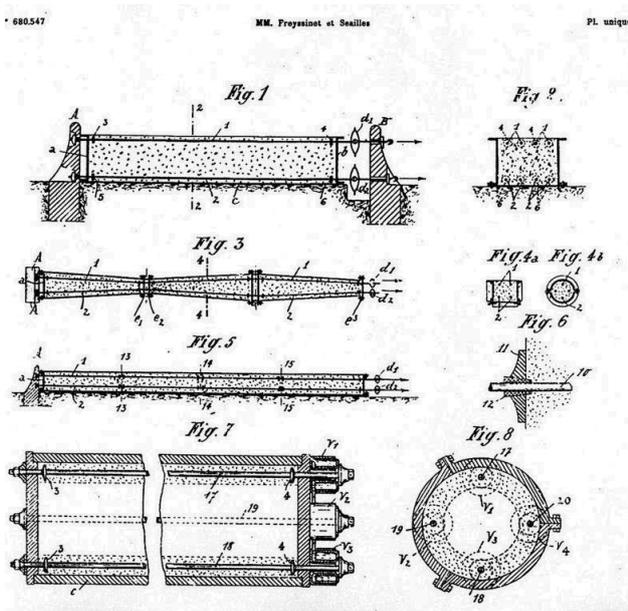
- Erste Versuche und Patente der Vorspannung im Betonbau – mit dem Ziel, Risse zu reduzieren – bereits Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts, Vorspannung aber praktisch wirkungslos, da die verwendeten, geringen Stahlspannungen durch Schwinden und Kriechen des Betons und Relaxation der Bewehrung praktisch auf Null reduziert wurden
- Pionier des Spannbetons: Eugène Freyssinet (Patente: Spannbettvorspannung 1928, Vorspannung mit nachträglichem Verbund 1939)

Damit durch Langzeiteffekte (Kriechen und Schwinden des Betons, Relaxation des Spannstahls) nicht der grösste Teil der Vorspannung zunichte gemacht wird, muss das Zugelement (Spannglied, in der Regel aus Spannstahl) eine möglichst grosse initiale Dehnung aufweisen.

Zum Vergleich: Heute übliche Spannstähle werden initial auf rund 1400 MPa vorgespannt, was einer Dehnung von rund 7‰ entspricht. Für typische Verhältnisse gehen infolge Kriech- und Schwindverkürzung (zusammen ca. 0.7‰) etwa 10% der initialen Spannkraft verloren ($0.7‰/7‰ = 10\%$), da das Spannglied die Verkürzung des Betons mitmacht. Würde man normalen Betonstahl verwenden, wären die Verluste viel grösser; mit einer Vorspannung auf 400 MPa = 2‰ würden die Verluste allein infolge Kriechen und Schwinden $0.7‰/2‰ = 35\%$ betragen. Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts verwendete man Stahl I (Fließgrenze 235 MPa), bei welchem eine Vorspannung auf maximal etwa 200 MPa = 1‰ möglich war, was mit dem angenommenen Wert der Kriech- und Schwindverkürzung Verluste von über 70% zur Folge hatte. Da damalige Betone zudem wesentlich kleinere Druckfestigkeiten und höhere W/Z-Werte aufwiesen, so dass entsprechend grössere Kriech- und Schwindverkürzungen auftraten, blieb von der initialen Vorspannung kaum etwas übrig.

Der Durchbruch der Vorspannung erfolgte daher erst zur Zeit des Zweiten Weltkriegs durch den Einsatz von (für damalige Verhältnisse) hochfestem Stahl, der auf rund 400 MPa vorgespannt werden konnte. Bekannte Pioniere des Spannbetonbaus sind Freyssinet (F), Dischinger (D), Leonhardt (D) und Torroja (E); in der Schweiz bekannt war beispielsweise Roš.

Vorspannung – Einführung



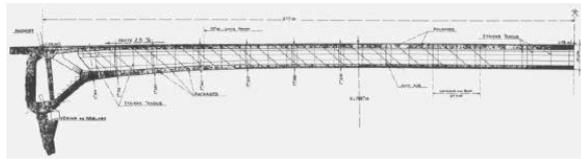
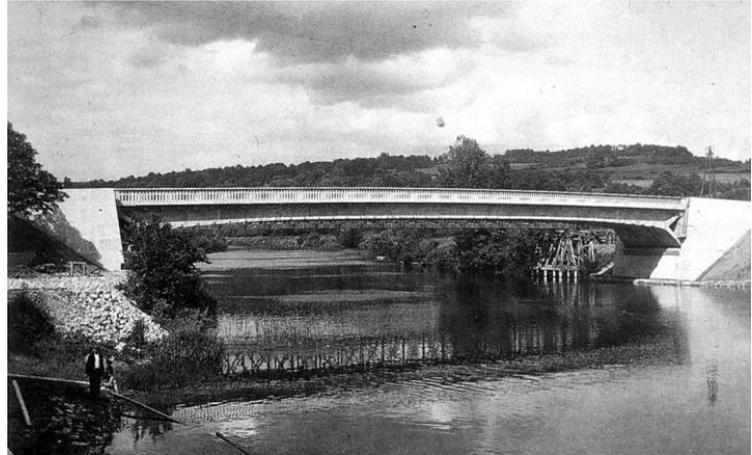
Wiederholung aus Stahlbeton I:

In der Anfangszeit des Spannbetonbaus entstanden verschiedene patentgeschützte Systeme. Eines der ersten war das System Freyssinet (patentiert 1928-1936: Kabel, Pressen, Verfahren). Insbesondere wurden auch in der Schweiz Systeme entwickelt, welche noch heute bestehen, beispielsweise BBR (= Birkenmaier, Brandestini, Roš), VSL (Vorspann-System Losinger) und Stahlton.

Vorspannung – Einführung



Marnebrücke Luzancy (1941-46)
Eugène Freyssinet



Wiederholung aus Stahlbeton I:

Die Abbildung zeigt die Marnebrücke in Luzancy (1941-1946) von Freyssinet, ein Meilenstein des Betonbrückenbaus: Die weitgehend aus vorgefertigten Elementen bestehende Spannbetonbrücke ist ausserordentlich schlank und dadurch elegant (Spannweite 55 m, Trägerhöhe lediglich 1.22 ... 1.75 m). Erwähnenswert ist auch das statische System und dessen konstruktive Umsetzung in den Widerlagerbereichen (Betongelenke).

Nach dem gleichen Prinzip (Serienfabrikation) wurden in den Jahren 1947-1951 fünf weitere Marnebrücken in Ussy, Anet, Trilbardou, Changis und Esbly gebaut, alle mit einer gegenüber Luzancy nochmals deutlich grösseren Spannweite von 74 m.

Vorspannung – Einführung

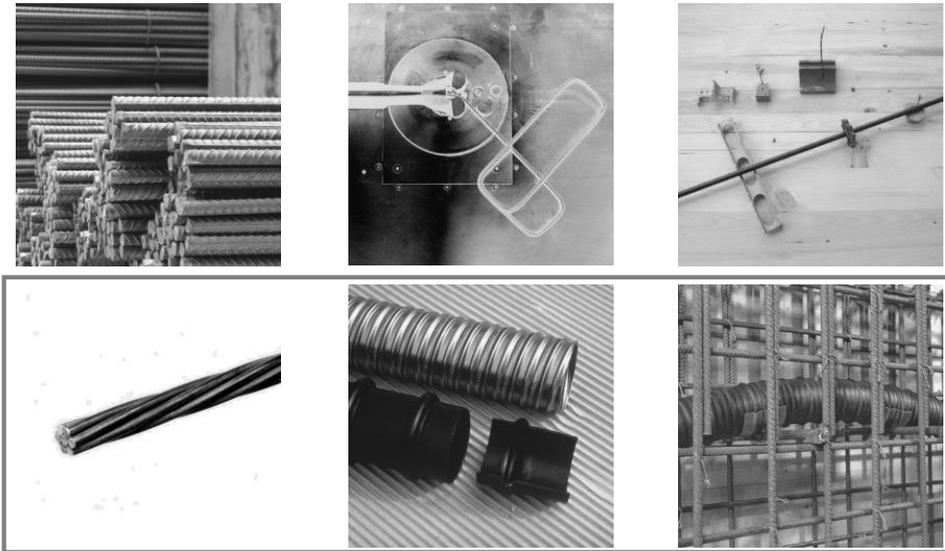
Vorteile vorgespannter Tragwerke

- Kompensation der ständigen Einwirkungen durch Umlenkkräfte
 - keine oder deutlich reduzierte Durchbiegungen unter ständigen Einwirkungen
 - insbesondere auch Kriechverformungen (Überhöhung problematisch) stark reduziert
- verzögerte Rissbildung und höhere Steifigkeit im Beton dank Druckspannungen
- kleinere Querschnittsabmessungen möglich mit Verwendung hochfester Stähle
 - weit gespannte, schlanke Tragwerke möglich
- verbesserte Dauerhaftigkeit durch eingeschränkte Rissbildung
- erhöhte Ermüdungssicherheit wegen kleinerer Spannungsamplituden
 - verbesserte Gebrauchstauglichkeit
- kurze Ausschulfristen dank Kompensation des Eigengewichts durch Umlenkkräfte
- Zusammenfügen vorfabrizierter Elemente möglich
 - optimierte Bauabläufe

(Erläuterungen siehe Folie)

Vorspannung – Einführung

Betonstahl - Spannstahl



13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

16

Wiederholung aus Stahlbeton I:

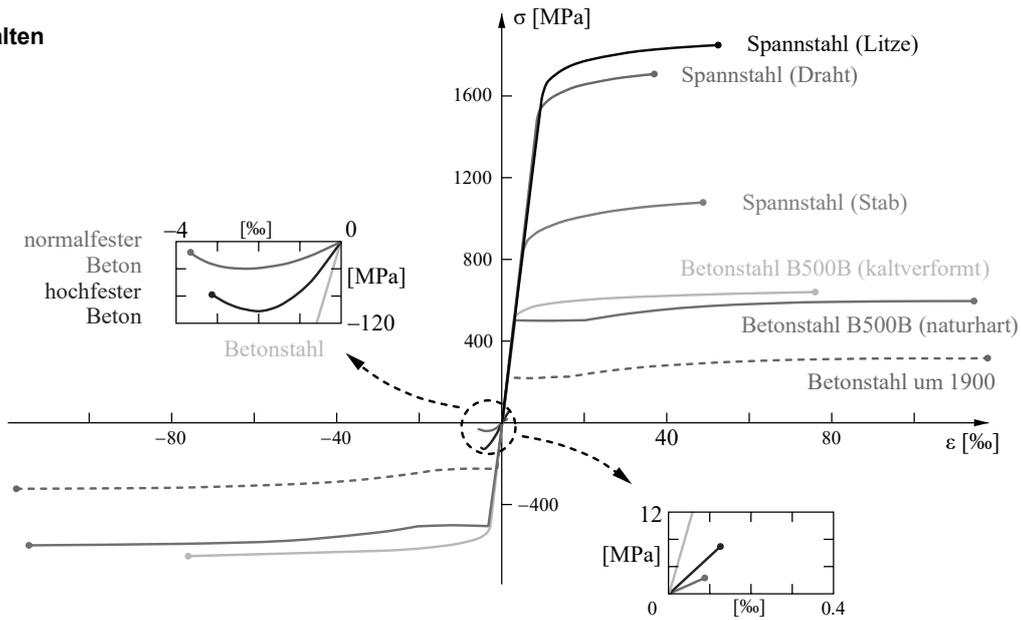
Im Spannbeton kommt zusätzlich zu Betonstahl vorgespannte Bewehrung zum Einsatz. Diese besteht heute in der Regel aus Litzen mit einem Durchmesser von 0.6" (0.5" wurde in den letzten Jahren verdrängt). In der Vorfabrikation kommen auch Drähte zum Einsatz, in Spezialfällen, beispielsweise kurzen Spanngliedern, werden auch Stäbe verwendet.

Spannstahl weist eine wesentlich höhere Festigkeit, dafür eine geringere Bruchdehnung auf als Betonstahl. Um die hohe Festigkeit ohne unzulässig grosse Verformungen und Risse aufnehmen zu können, muss der Spannstahl vorgespannt werden. Spannstahl weist kein Fließplateau auf; die Fließgrenze ist als Last, bei welcher nach Entlastung 0.1% Dehnung verbleibt, definiert.

Für Spannstahl, insbesondere Litzen, besteht ein weltweiter Markt. Die in der Schweiz eingesetzten Litzen stammen daher aus verschiedensten Ländern.

Vorspannung – Einführung

Materialverhalten



13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

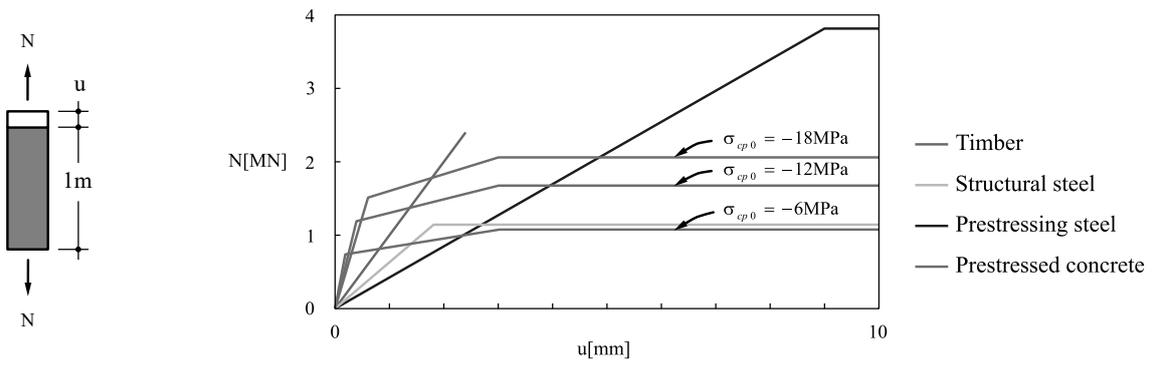
17

Die Abbildung illustriert den Unterschied der Kennlinien von Beton, Betonstahl und Spannstahl. Man erkennt, dass die Festigkeit des Spannstahl etwa um einen Faktor 3-4 grösser ist als diejenige des Betonstahls. Die Duktilität ist dagegen etwas geringer.

Ergänzende Bemerkungen:

- Abbildung adaptiert aus Buch Ingenieur-Betonbau
- Die Kennlinie des Spannstahls auf Druck ist nicht eingezeichnet, da dieser Baustoff immer unter Zugbeanspruchung ist. Die Kennlinie des Werkstoffs auf Druck entspricht grundsätzlich, wie beim Betonstahl, derjenigen für Zugbeanspruchung (sofern Knicken behindert ist).

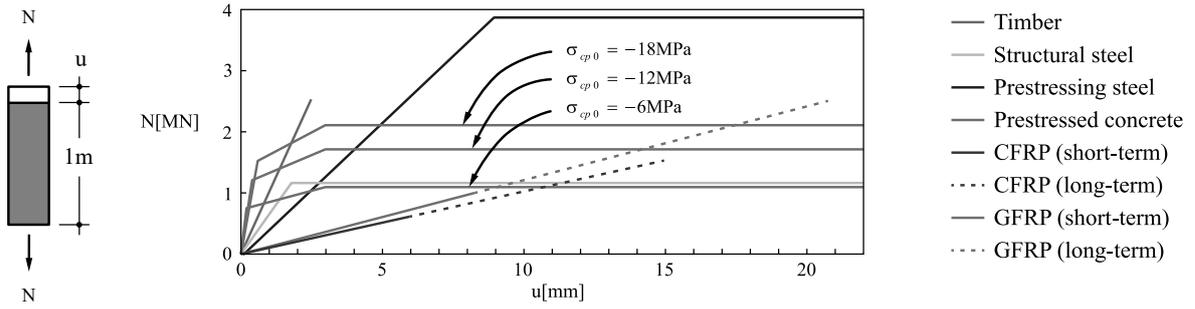
Tension chord for CHF 100 / m



Material	E [GPa]	f_y [MPa]	ρ [kg/m ³]	[CHF/kg]	[CHF/m ³]
Concrete	30	-	2400	0.25 ²⁾	600 ²⁾
Prestressing steel ¹⁾	200	1800	7850	6 ³⁾	47100 ³⁾
Structural steel	200	360	7850	4 ⁴⁾	31400 ⁴⁾
Timber	10	25	500	2 ⁵⁾	1000 ⁵⁾

- 1) $\sigma_{p0} = 1200$ MPa
- 2) incl. formwork and mild steel
- 3) incl. positioning on site and grouting
- 4) incl. coating and erection
- 5) incl. erection and connectors

Tension chord for CHF 100 / m

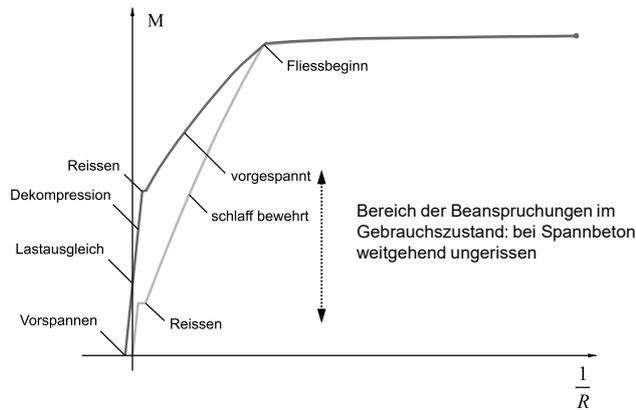


Material	E [GPa]	f_y [MPa]	ρ [kg/m ³]	CHF/kg	CHF/m ³
Concrete	30	-	2400	0.25 ²⁾	600 ²⁾
Prestressing Steel ¹⁾	200	1800	7850	6 ³⁾	47'100 ³⁾
Structural Steel	200	360	7850	4 ⁴⁾	31'400 ⁴⁾
Timber	10	25	500	2 ⁵⁾	10'000 ⁵⁾
CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)	140	2100 ⁶⁾	1550	23	139'500
GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer)	60	1250 ⁶⁾	2200	90	50'600

- 1) $\sigma_{p0} = 1200\text{ MPa}$
- 2) incl. formwork and mild steel
- 3) incl. positioning on site and grouting
- 4) incl. coating and erection
- 5) incl. erection and connectors
- 6) short-term strength;
long-term strength significantly lower:
 $f_{y, long-term} \approx 40\% f_{y, short-term}$

Vorspannung – Einführung

Biegetragverhalten



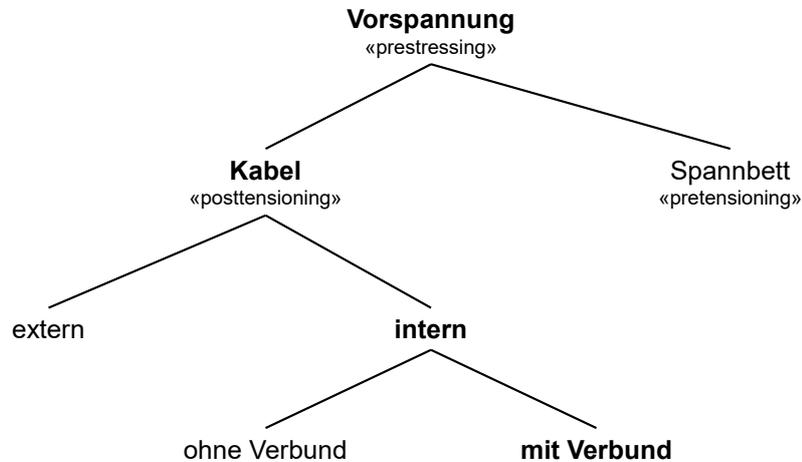
- ungerissen-elastisches Verhalten ist bei Spannbeton viel wichtiger als bei Stahlbeton
- Spannungen am ungerissenen Querschnitt sind für das Verständnis des Tragwerkszustands zentral
- Zusätzlich zum Tragsicherheitsnachweis wird deshalb stets ein Nachweis der Spannungen im Beton und im Spannstahl geführt

Aufgrund der Druckbeanspruchung infolge der Spannkkräfte sind vorgespannte Träger über einen viel grösseren Bereich ihrer Momenten-Krümmungsbeziehung ungerissen. Das ungerissen-elastische Verhalten ist daher wesentlich relevanter als bei schlaff bewehrten Tragwerken.

Für das Verständnis des Tragverhaltens vorgespannter Träger ist die Untersuchung der Spannungsverteilung am ungerissenen Querschnitt zentral, weshalb dieses Thema in der Vorlesung eingehend behandelt wird.

Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung

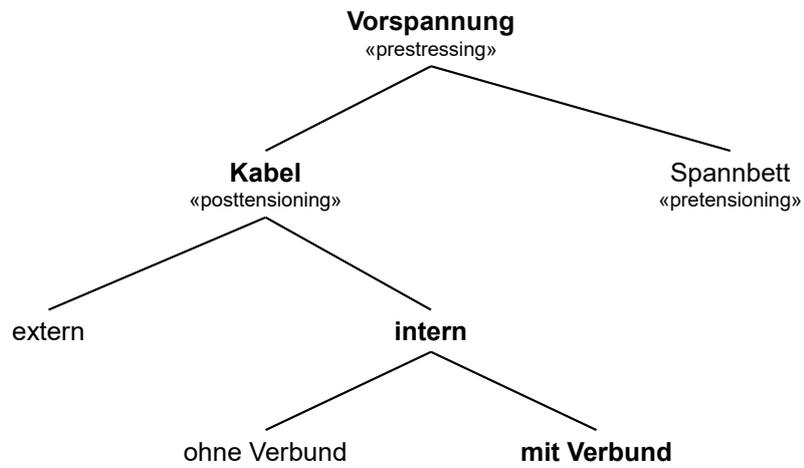


Die Vorspannung («prestressing») kann nach dem Zeitpunkt des Spannens (vor dem Betonieren = «Spannbettvorspannung» = «pretensioning», nach dem Betonieren = «Kabelvorspannung» = «posttensioning»), nach der Lage der Spannglieder (innerhalb des Querschnitts = «internal», ausserhalb des Querschnitts = «external») und nach dem vorhandenen Verbund zwischen Beton und Bewehrung (mit Verbund = «bonded», ohne Verbund = «unbonded») eingeteilt werden.

Der Schwerpunkt der Vorlesung liegt auf dem am häufigsten eingesetzten Fall: Nach dem Erhärten des Betons aufgebrachte, interne Vorspannung mit Verbund (internal, bonded posttensioning). Die übrigen Verfahren werden nachfolgend der Vollständigkeit halber kurz erläutert.

Vorspannung – Einführung

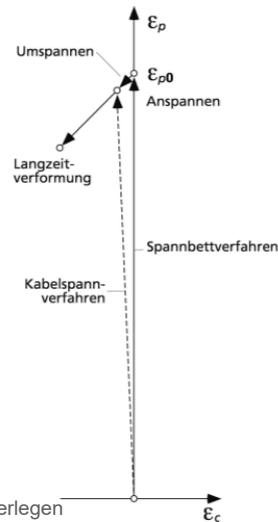
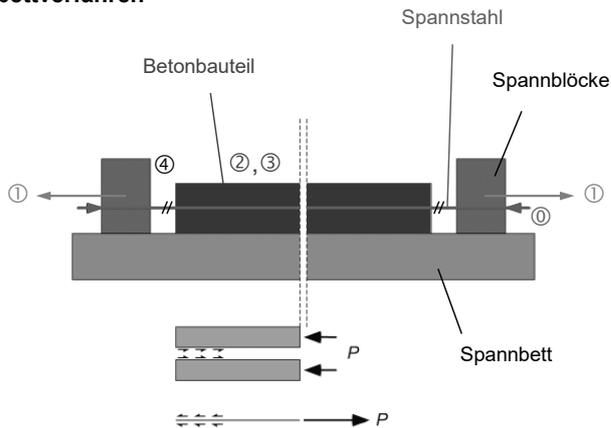
Arten von Vorspannung



In der Vorfabrikation kommt häufig eine Spannbettvorspannung zum Einsatz.

Vorspannung – Einführung

Spannbettverfahren



- ④ Spannstahl (Drähte oder Litzen) in Spannblöcken verankern, ggf. schlaffe Bewehrung verlegen
- ① Spannblöcke auseinanderpressen → Zugkraft in Spannstahl, Druckkraft im Spannbett da Reaktion an dieses abgegeben wird
- ② Betonieren, ③ (Dampf-)Erhärtung des Betons
- ④ Umspannen = Durchtrennen der Spanndrähte → Abgabe der Spannkraft an den Beton über Verbund an den Elementenden
→ Druckkraft im Beton = Zugkraft in Spannstahl

13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

23

Bei der Spannbettvorspannung wird der Spannstahl (üblicherweise Einzellitzen oder Drähte) gegen Spannblöcke, welche an den Enden des sogenannten *Spannbetts* angeordnet sind, vorgespannt (durch Pressen gegen starre Spannblöcke oder Verschieben der Spannblöcke).

Anschliessend wird das Bauteil im Spannbett betoniert; die vorgespannten Litzen oder Drähte werden dabei durch den Beton umhüllt. Nach dem Erhärten des Betons (im Werk oft durch Dampferhärtung beschleunigt) werden die Litzen oder Drähte durchgetrennt.

Die Verankerung der Litzen oder Drähte an den Bauteilenden muss über Verbundspannungen erfolgen. Sie wird durch den sogenannten Hoyer-Effekt begünstigt: Die im gespannten Zustand, also beim Betonieren vorhandene Querkontraktion des Spannstahls, geht beim Durchtrennen (Abfall der Zugspannung) verloren, wodurch sich der Spannstahl in Querrichtung ausdehnen will. Da diese Ausdehnung durch den Beton behindert wird, resultieren Druckspannungen, welche deutlich grössere Verbundspannungen bewirken als bei schlaff einbetonierten Drähten oder Litzen.

Vorspannung – Einführung

Spannbettverfahren – Vorfabrikation allgemein



13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

24

Die Spannbettvorspannung ist eine etablierte Technologie. Mit Ausnahme höherer Festigkeiten von Beton und Spannstahl haben in den letzten Jahrzehnten kaum Entwicklungen stattgefunden. Dies könnte sich durch neue Baustoffe und digitale Fabrikation in naher Zukunft ändern.

Vorspannung – Einführung

Spannbettverfahren – Vorfabrikation allgemein



[Video: PAULSpannbeton über YouTube]

Vorspannung – Einführung

Spannbettverfahren – Industrielle Produktion (Hohlkörperdeckenelemente)



[Fotos: Mabetón, Spiroll]

13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

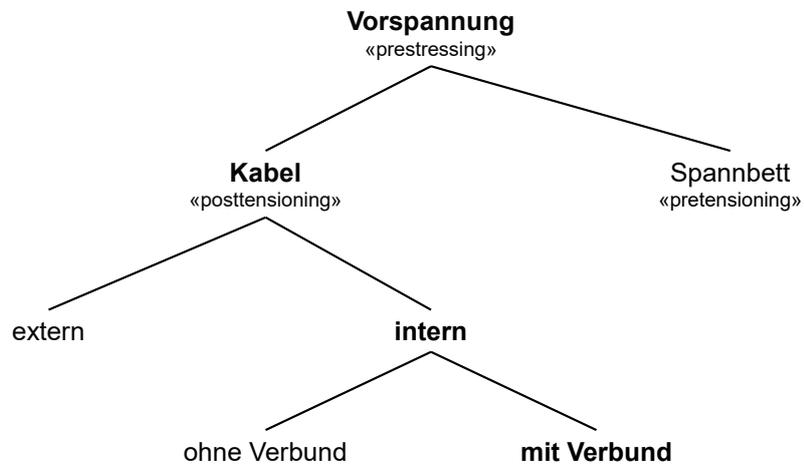
26

Ein weltweit sehr erfolgreiches Produkt, welches auf der Spannbett-Technologie basiert, sind Hohlkörperdeckenelemente.

Diese werden in sehr langen Anlagen mittels weitgehend automatisierter Extruder, die das Einbringen und Verdichten des Betons übernehmen und auch die Schalung inkl. Hohlkörper mitführen, hergestellt.

Vorspannung – Einführung

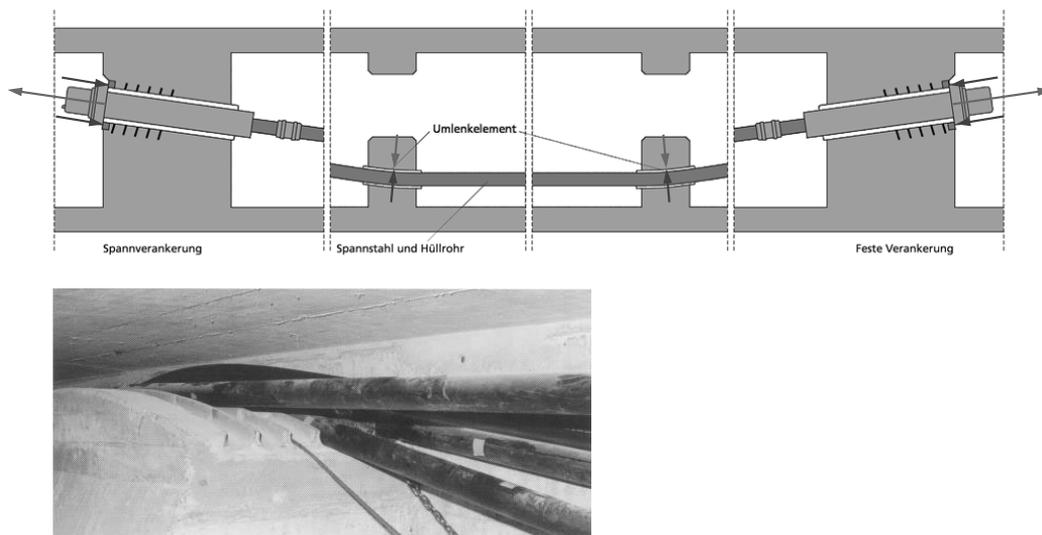
Arten von Vorspannung



Externe Vorspannung kommt vor allem im Brückenbau zum Einsatz. Neben der Längsvorspannung von Brückenträgern sind externe Spannkabel insbesondere auch als Zugglieder von Schrägseilbrücken verbreitet.

Vorspannung – Einführung

Externe Kabelvorspannung



13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

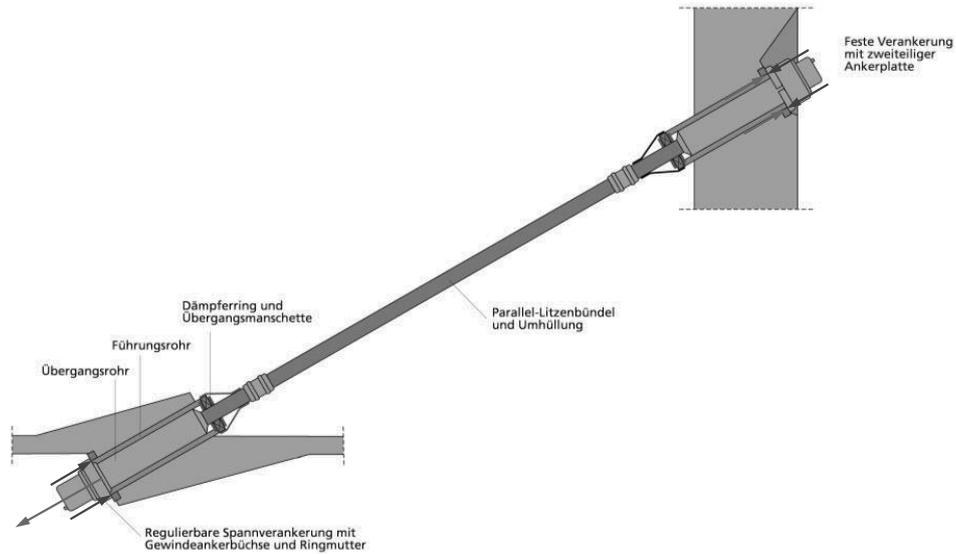
28

Bei einer externen Vorspannung verlaufen die Kabel abschnittsweise gerade. An den Umlenkpunkten sind relativ aufwändige Konstruktionen (Umlenksättel) erforderlich, da grosse Ablenkkkräfte auftreten und eine kontinuierliche Umlenkung der Kabel gewährleistet werden muss. Knicke, insbesondere an den Enden der Umlenksättel (wenn diese zu kurz sind), sind unter allen Umständen zu vermeiden, da sonst die Spannglieder beschädigt werden.

Meist werden die Kabel in Hüllrohren geführt, welche je nach System mit einer Zementinjektion oder Fett verfüllt werden.

Vorspannung – Einführung

Schrägkabel



13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

29

Schrägkabel kommen insbesondere in Schrägseilbrücken zum Einsatz.

Aufgrund der statischen Verhältnisse erfahren solche Kabel in der Regel grössere Spannungsdifferenzen infolge von ermüdungsrelevanten Lasten als interne oder externe Spannglieder in Brückenträgern. Daher werden Schrägkabel weniger stark vorgespannt als andere Spannglieder, und es kommen spezielle, für Ermüdungsbeanspruchung optimierte Verankerungen zum Einsatz.

Vorspannung – Einführung

Schrägseilbrücken / Schrägkabel: Rheinbrücke, Diepoldsau



Bei der Rheinbrücke Diepoldsau wurde erstmals ein von Prof. René Walther entwickeltes Konzept umgesetzt, das einen schlanken Versteifungsträger in Kombination mit einer grossen Anzahl von Schrägkabeln kombiniert. Diese elegante Lösung ermöglicht eine effiziente Bauausführung eines Betonüberbaus im Freivorbau und wurde weltweit bei sehr vielen Brücken eingesetzt.

13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

30

Wie in vielen anderen Bereichen des Ingenieurbaus waren Schweizer Ingenieure auch bei der Entwicklung der Schrägseilbrücken prominent vertreten. Leider haben sie es nicht geschafft, daraus langfristig Kapital zu schlagen, so dass bei den zahlreichen Schrägseilbrücken, die heute weltweit projektiert und gebaut werden, nur vereinzelt Schweizer Ingenieure beteiligt sind (Ausnahme: VSL International AG).

International führend sind in diesem Bereich Büros aus anderen Ländern, beispielsweise das Büro Leonhardt, Andrä und Partner (Stuttgart), welches von Prof. Leonhardt gegründet wurde.

Vorspannung – Einführung

Schrägseilbrücken / Schrägkabel: Sunnibergbrücke



Die von Prof. Ch. Menn entworfene Sunnibergbrücke war eine der weltweit ersten Schrägseilbrücken mit sehr flachen Kabeln. Solche «Cable Stayed Bridges» mit steifem Überbau und flachen Kabeln werden international oft als «Extradosed Bridges» bezeichnet. Die Unterscheidung macht höchstens dann Sinn, wenn die Schrägseile bei der Bemessung ähnlich wie externe Vorspannkabel behandelt werden (höhere Ausnützung zulässig, dafür konservativere Lastkombinationen zu berücksichtigen).

13.02.2024

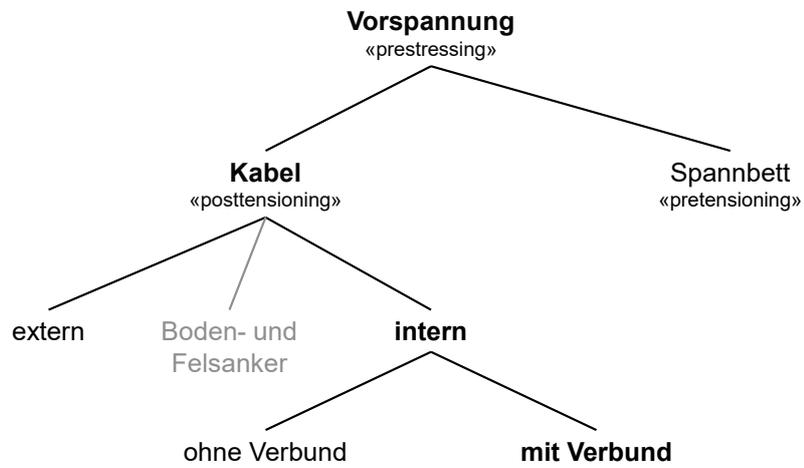
ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

31

Siehe Bemerkungen auf der vorhergehenden Folie.

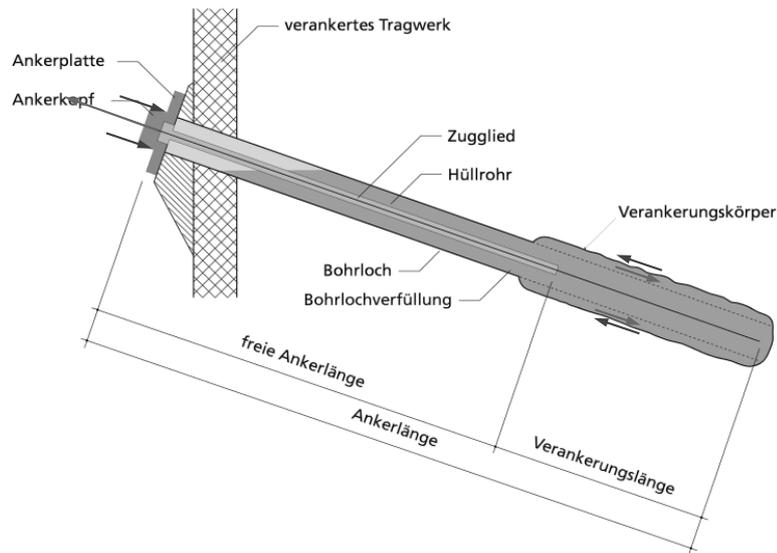
Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



Vorspannung – Einführung

Boden- und Felsanker

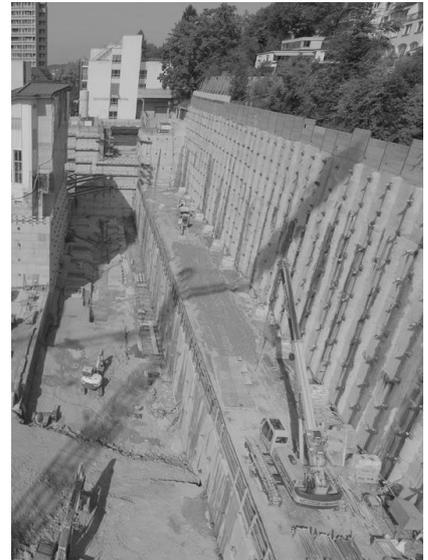
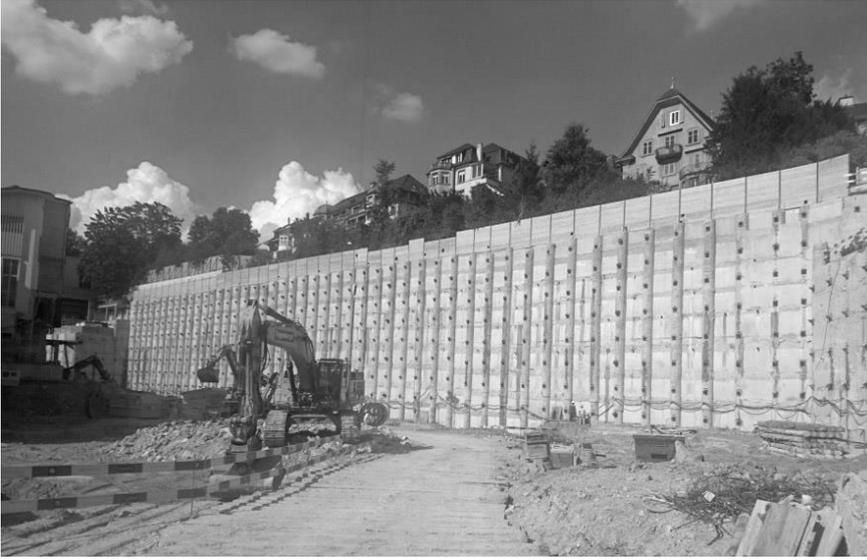


Spannglieder kommen auch in der Geotechnik zum Einsatz.

Boden- und Felsanker sind weit verbreitet. Permanente Anker werden heute meist überwachbar (elektrisch isoliert, Messung des Widerstands, sowie Kraftmessung) und auswechselbar ausgeführt.

Vorspannung – Einführung

Boden- und Felsanker: verankerte Bohrpfehlwand, ETH Neubau Gloriastrasse (Fotos © Lüchinger Meyer / WLW Ingenieure)



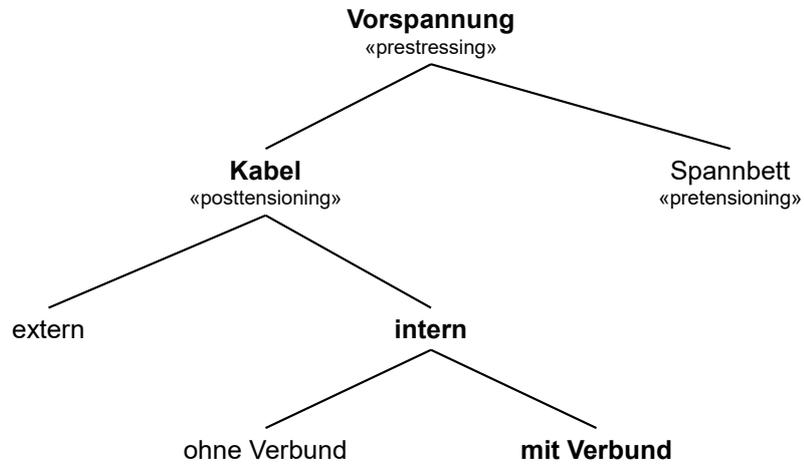
13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

35

Vorspannung – Einführung

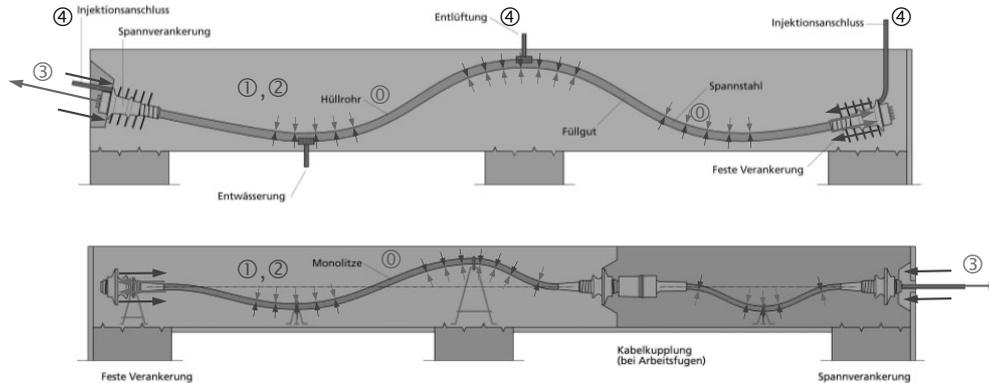
Arten von Vorspannung



Wie erwähnt liegt der Schwerpunkt der Vorlesung auf dem am häufigsten eingesetzten Fall: Nach dem Erhärten des Betons aufgebrachte, interne Vorspannung mit Verbund (*internal, bonded posttensioning*). Diese ist – sofern nicht anders vermerkt – Gegenstand aller folgenden Folien.

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund / ohne Verbund (Monolitze)



- ④ Hüllrohre und Anker verlegen, Litzen einschiessen / Monolitze und Anker verlegen
- ① Betonieren, ② Erhärtung des Betons
- ③ Litzen mit Spannpressen gegen Beton vorspannen → Zugkraft in Spannstahl, Druckkraft in Beton (bei behinderungsfreier Verkürzung Druckkraft im Beton = Zugkraft in Spannstahl)
- ④ Hüllrohre ausinjizieren (nur bei Vorspannung mit Verbund)

13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

37

Die Vorspannung gelangt als System zum Einsatz, welches alle Komponenten, die für eine Vorspannung benötigt werden, beinhaltet. Bis vor kurzem war in der Schweiz eine separate Zulassung erforderlich (Anforderung SBB und ASTRA). Heute können Spannsysteme mit Europäischer Technischer Zulassung (ETA), ergänzt durch eine Schweizerische Anwendungszulassung, in der Schweiz eingesetzt werden. Zulassungsstelle in der Schweiz ist die EMPA.

Die Bestandteile eines Spannsystems (Kabelvorspannung) sind, in der Reihenfolge der Bauausführung:

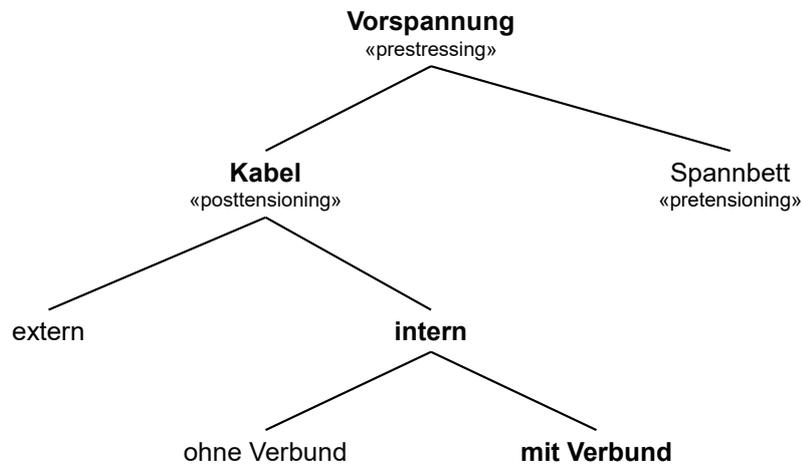
- Hüllrohre (aus Metall oder Kunststoff)
- Anker (feste Teile)
- Litzen
- Anker (Ankerbüchse, Keile)
- Injektion

Hüllrohre und feste Teile der Anker werden vor dem Betonieren verlegt. Die Litzen können vor oder nach dem Betonieren eingestossen werden; in letzterem Fall (und bei nicht ausgenützten Hüllrohren, d.h. weniger Litzen als maximal möglich) ist das Aufschwimmen der Hüllrohre beim Betonieren zu verhindern.

Bei der Injektion von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund muss die Entlüftung gewährleistet sein, wozu mindestens an allen Hochpunkten der Hüllrohre und bei den Ankern Entlüftungsanschlüsse vorzusehen sind.

Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



Meist werden Spannglieder mit nachträglichem Verbund eingesetzt. Bei diesen wird das Hüllrohr nach dem Vorspannen ausinjiziert. In Ausnahmefällen kommt eine Vorspannung ohne Verbund zum Einsatz.

Bei einer Vorspannung mit Verbund erfahren der Spannstahl und der Betons auf der Höhe des Spannglieds ab dem Zeitpunkt der Injektion die gleichen Dehnungsänderungen. Bei einer Vorspannung ohne Verbund ist dies nicht gewährleistet, weshalb im Bruchzustand in der Regel nicht die volle Fließzugkraft im Spannglied in Rechnung gestellt werden kann (siehe Tragverhalten).

Vorspannung – Einführung

Interne Vorspannung ohne Verbund: Flachdecke (Monolitzen)



13.02.2024

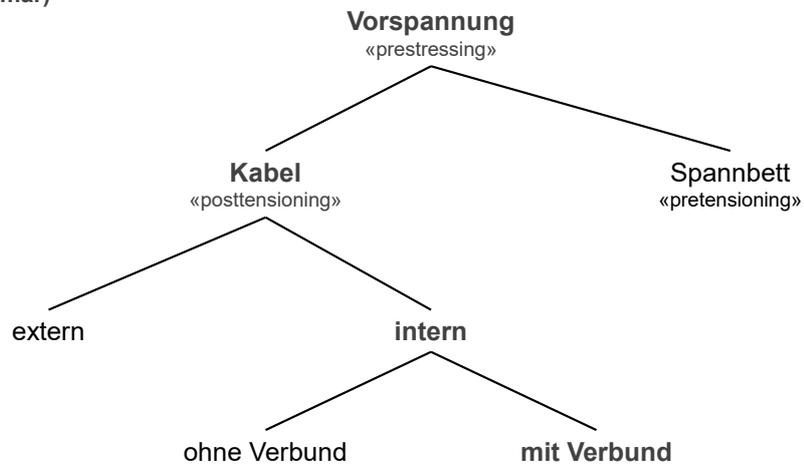
ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

39

(Erläuterungen siehe vorhergehende Folie)

Vorspannung – Einführung

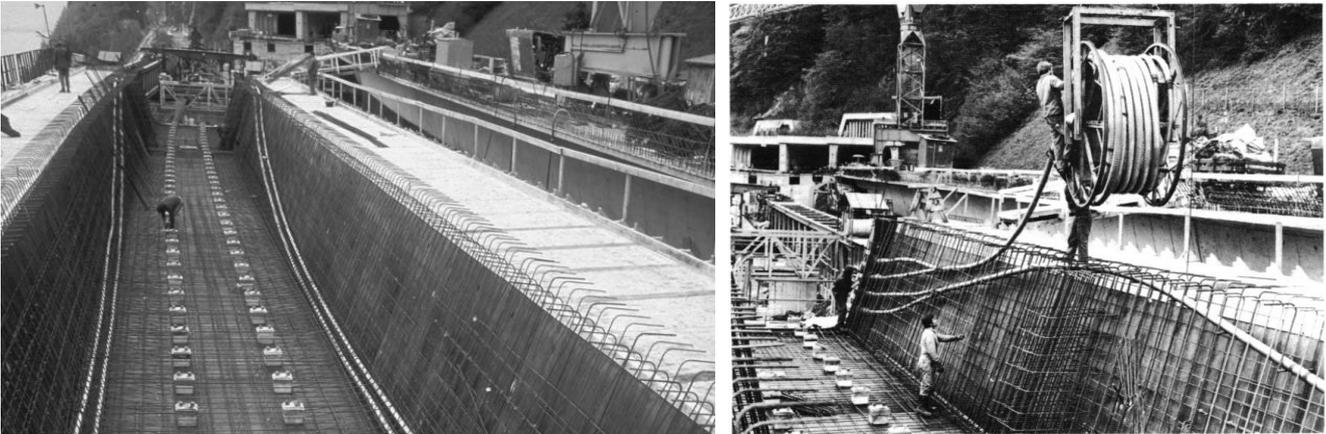
Arten von Vorspannung
Vorlesungsstoff (primär)



(Erläuterungen siehe vorhergehende Folie)

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund: Brückensteg



Früher wurden die Spannglieder meist vorkonfektioniert (Spannstahl, Hüllrohr und Anker) und auf sogenannten Bobinen auf die Baustelle geliefert. Bei einer Vorspannung mit Drähten, die über aufgestauchte Enden verankert werden (System Stahlton) wird dies noch heute gemacht.

Da das Handling der Bobinen auf der Baustelle umständlich ist, haben sich die Spannsysteme mit Litzen durchgesetzt. Diese können nachträglich in die Hüllrohre eingestossen werden, die Verankerung erfolgt mittels Keilen (die erst beim Vorspannen angebracht werden).

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund



[Video: LMK HiSCS über YouTube]

13.02.2024

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

42

Vorspannung – Einführung

Spanngliedkategorien

- a gewellte Stahlhüllrohre
- b Kunststoffhüllrohre
- c Kunststoffhüllrohre mit elektrischer Isolation

Drahtspannsysteme (heute selten, ausser für Schrägkabel)

Drahtbündel mit Drähten $\text{Ø}3.0 \dots 10.0 \text{ mm}$

Verankerung über aufgestauchte Köpfe (aufwändig in der Herstellung, daher meist im Werk)

Zugfestigkeiten $f_{pk} = 1570 \dots 1860 \text{ MPa}$, Fließsgrenze $f_{pd} = 1130 \dots 1390 \text{ MPa}$

Litzenspannsysteme (heute üblich)

Litzenbündel mit Litzen à 7 Drähte, Durchmesser der Litzen meist $\text{Ø}0.6''$ (15.7 mm), seltener $\text{Ø}0.5''$ (12.9 mm)

Verankerung über Klemmen (einfaches System, baustellentauglich)

Zugfestigkeiten $f_{pk} = 1770$ resp. $f_{pk} = 1860 \text{ MPa}$, Fließsgrenze $f_{pd} = 1320$ resp. $f_{pd} = 1390 \text{ MPa}$

Stabspannsysteme

Glatte oder gerippte Stäbe mit Durchmesser zwischen 20 und 36 mm

Zugfestigkeiten $f_{pk} = 1030\text{-}1230 \text{ MPa}$, Fließsgrenze $f_{pd} = 720 \dots 940 \text{ MPa}$

Höhe der Vorspannung (nach SIA 262; in anderen Normen sind teilweise höhere Spannungen zulässig)

Während dem Spannen $\sigma_{p0} \leq 0.75 \cdot f_{pk}$, unmittelbar nach Ablassen $\sigma_{p0} \leq 0.7 \cdot f_{pk}$, bei $t = \infty$ $\sigma_{px} \geq 0.45 \cdot f_{pk}$

Alle nötigen Angaben können den Technischen Dokumentationen der Spannfirmer entnommen werden.

Wiederholung aus Stahlbeton I:

Spannstahl kommt im Betonbau als System zum Einsatz. Ein Spannsystem besteht aus den Komponenten Hüllrohre, Verankerungen, Kupplungen, Pressen und Injektion.

Die Spannsysteme benötigen eine schweizerische technische Zulassung (STA) oder eine europäische technische Zulassung (ETA) mit schweizerischer Anwendungszulassung (SA).

Die auf dem Markt erhältlichen Spannsysteme sind heute, da die Patente aus der Entwicklungszeit abgelaufen sind, sehr ähnlich. Die meisten Systeme sind in allen drei Kategorien des Korrosionsschutzes erhältlich:

- Kategorie a (Stahlhüllrohr)
- Kategorie b (Kunststoffhüllrohr)
- Kategorie c (Kunststoffhüllrohr, Spannglied elektrisch isoliert).

Die Kategorie c (höchster Korrosionsschutz) kommt vor allem bei Bahnbrücken zum Einsatz, um Korrosion durch Kriechströme zu vermeiden. Das System der Kategorie c, welches sich in den letzten Jahren weltweit durchgesetzt hat, wurde an der ETH Zürich entwickelt (Prof. Bernhard Elsener, IfB).

Vorspannung – Einführung

- Hochfester Stahl (Fließgrenze 2...4 mal höher als Betonstahl)
- Niedrige Relaxation und ausreichende Duktilität → anspruchsvoll, in letzten Jahren immer höhere Festigkeiten (aktuell: Litzen mit $f_{pk} = 1860$ MPa)
- Stäbe
Ø20 / 26 / 32 / 36 mm



→ kurze Spannglieder

Drähte
Ø3 ... 11 mm



→ Vorfabrikation
→ Vorfabrikation (einzeln)

Litzen
Ø15.7 / 15.3 / 12.9 mm



→ Ortsbeton (in Kabeln)

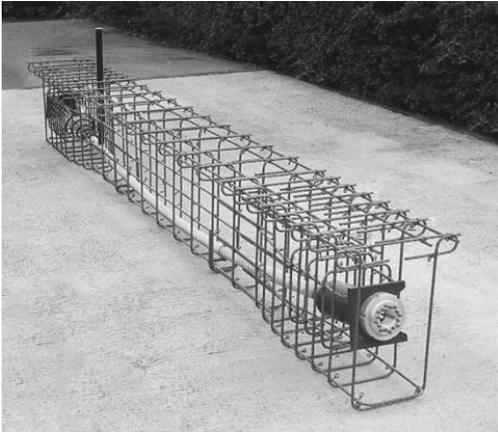
- Für besondere Anforderungen (Schrägseilbrücken) Korrosionsschutz durch Verzinkung und / oder Ummantelung oder (billiger) Epoxidharzbeschichtung der Drähte oder Litzen
- Weitere Formen (vollverschlossene Seile etc.) → Hängebrücken etc.
- Herstellung weltweit, Litzenspannsysteme heute sehr verbreitet

Spannstahl weist eine höhere Festigkeit auf als Betonstahl, die Bruchdehnung ist jedoch geringer (rechnerisch nach SIA 262: 2% Bemessungswert). Dies wird dadurch relativiert, dass Spannglieder in der Regel einen weicheren Verbund haben als Betonstahl, wodurch sich die Dehnungen im Bruchzustand weniger stark konzentrieren (weniger ausgeprägte Reduktion der Bruchdehnung durch Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen).

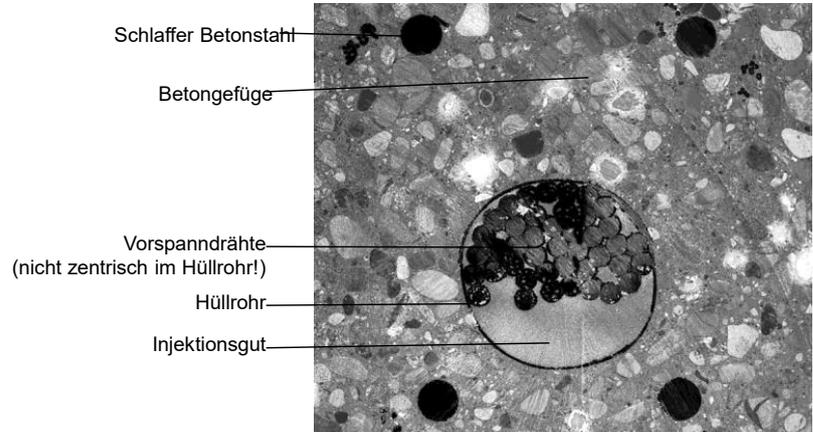
In den letzten Jahrzehnten wurden Spannstähle mit immer höherer Festigkeit entwickelt. Während vor einigen Jahren noch Litzen mit $f_{pk}=1'590$ MPa üblich waren, ist heute $f_{pk}=1'860$ MPa üblich. In Südkorea werden vereinzelt bereits Litzen mit $f_{pk}=2'400$ MPa eingesetzt.

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund



Querschnitt durch ein Spannglied

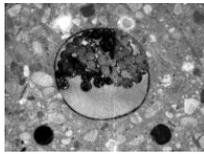
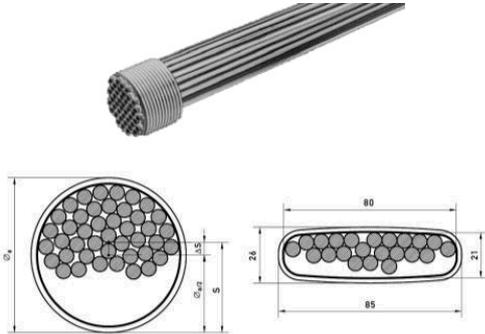


(Erläuterungen siehe Folie)

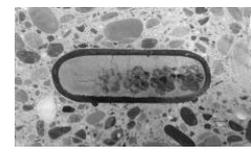
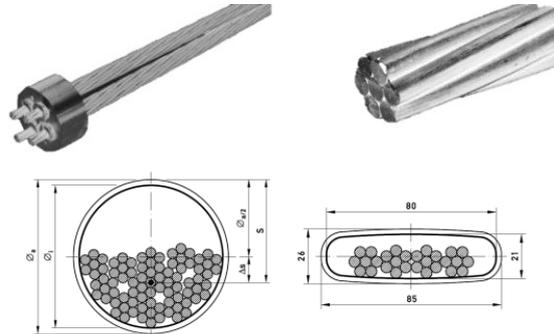
Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Draht- und Litzensysteme

Drahtspannsysteme (heute selten)



Litzenspannsysteme (heute üblich)



NB. Spannstahl liegt **nicht** zentrisch im Hüllrohr, sondern auf der Krümmungsinnenseite.

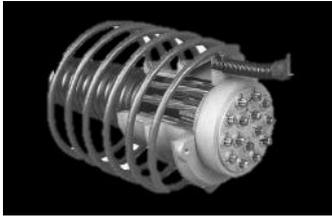
Bei der Berechnung ist die Exzentrizität zu berücksichtigen (wirkt meist ungünstig).

Der Spannstahl liegt in den für die Biegebemessung massgebenden Querschnitten (Hoch- und Tiefpunkte) nie zentrisch im Hüllrohr, sondern stets auf der Krümmungsinnenseite. Die entsprechenden Exzentrizitäten sind zu berücksichtigen; man findet sie in der technischen Dokumentation des verwendeten Spannsystems.

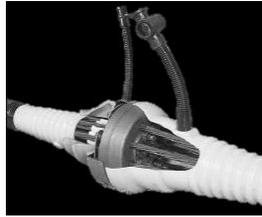
Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Komponenten

- Bewegl. Verankerung



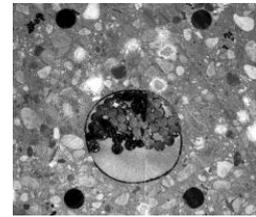
- Kupplung (fest)



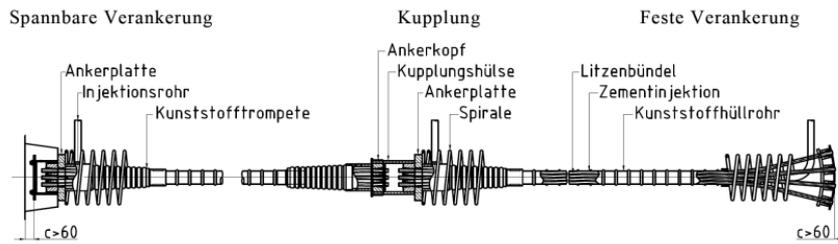
- Hüllrohre



- Querschnitt



- Beispiel: Litzen-Spannglied Kategorie b (Quelle: Stahlton)

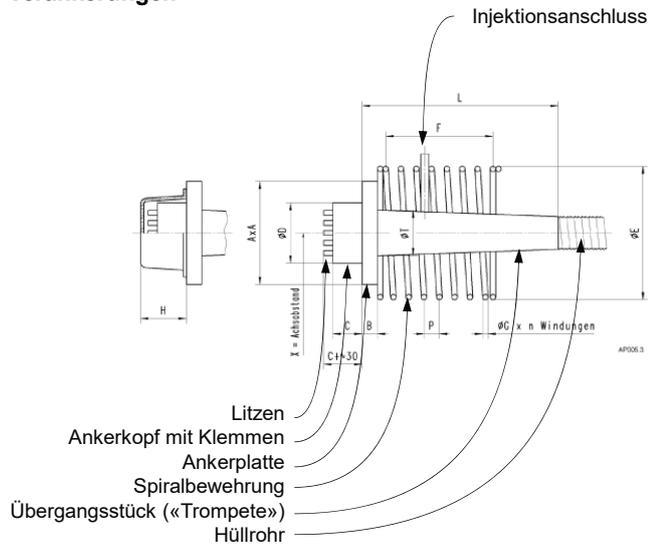
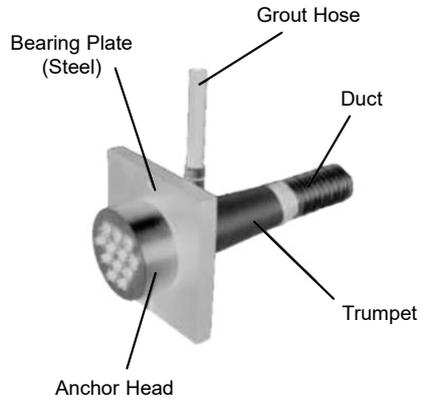


Die Abbildung zeigt ein Beispiel eines Spannsystems resp. die einzelnen Komponenten.

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Spannbare Verankerungen

Verankerung mit Ankerplatte
(VSL Typ E)

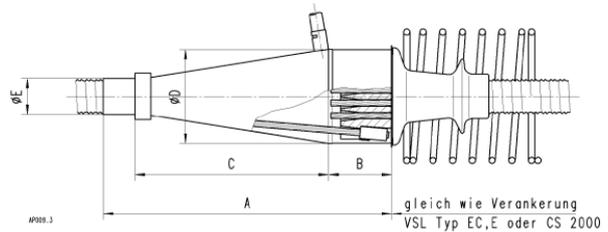
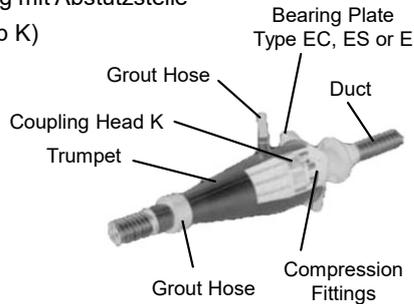


(Erläuterungen siehe Folie)

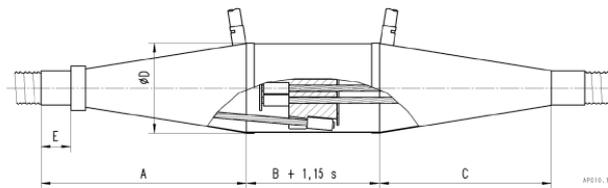
Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Kupplungen

Kupplung mit Abstützstelle
(VSL Typ K)



Gleitkupplung (selten)
(VSL Typ V)



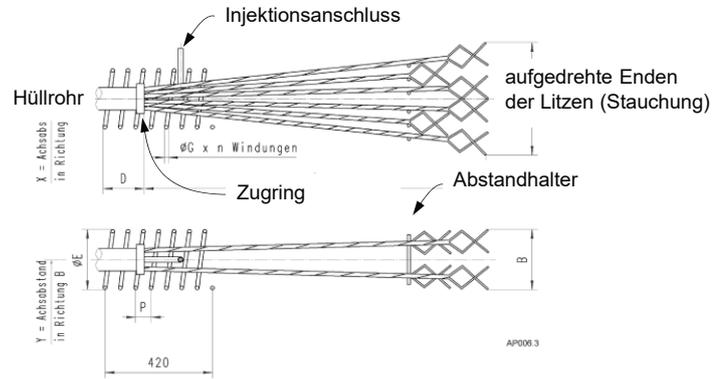
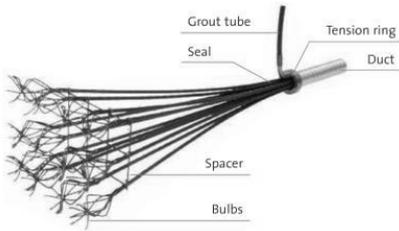
Die obere Abbildung zeigt eine Spanngliedkupplung mit Abstützstelle. Diese kommt bei Betonierfugen zum Einsatz: Das Kabel wird nach dem Erhärten des Betons der ersten Etappe gespannt (→ Kupplung resp. Abstützstelle als Verankerung wirkend, Vorspannung ab entferntem Ende und/oder Abstützstelle möglich). Mit der Bewehrung der zweiten Betonieretappe wird die Kupplung verlegt; dabei werden die Litzen der 2. Etappe in der Ankerbüchse der 1. Etappe verkeilt. Nach dem Erhärten des Betons der 2. Etappe wird das Spannglied vom entfernten Ende gespannt.

Die untere Abbildung zeigt eine Spanngliedkupplung ohne Abstützstelle. Diese Lösung wird insbesondere bei Litzenspanngliedern nur in Ausnahmefällen eingesetzt; üblicherweise werden bei Kabeln, die in einer Etappe nicht gespannt werden, lediglich die Hüllrohre gestossen und die Litzen erst nach dem Betonieren der 2. Etappe eingestossen.

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Feste Verankerungen

Verbundanker
(VSL Typ H)

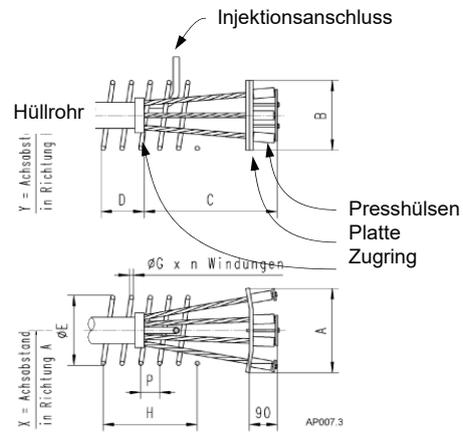
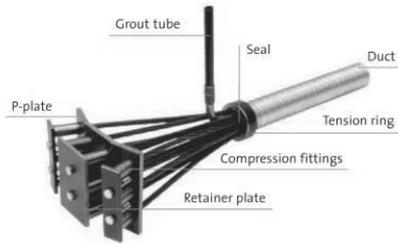


(Erläuterungen siehe Folie)

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Feste Verankerungen

Anker mit Platte
(VSL Typ P)



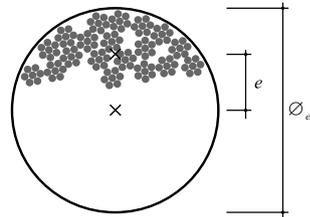
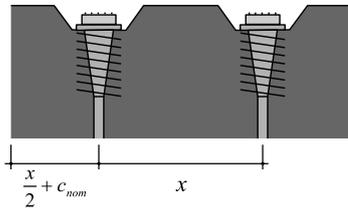
(Erläuterungen siehe Folie)

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Abmessungen

Die Abmessungen müssen der technischen Dokumentation des Spannsystems entsprechen (Zulassung).

Bei der Vorbemessung können folgende Abschätzungsformeln in Abhängigkeit der pro Kabel vorhandenen Spannstahlquerschnittsfläche verwendet werden:



Min. Achsabstand der Spannglieder:

$$X \approx 8 \cdot \sqrt{A_p}$$

Durchmesser des Hüllrohrs:

$$\varnothing_{ext} \approx 2 \cdot \sqrt{A_p}$$

Exzentrizität des Litzenbündels:

$$e \approx 0,3 \cdot \sqrt{A_p} \quad (\text{gegenüber dem Hüllrohrmittelpunkt})$$

Minimaler Krümmungsradius:

$$R_{min} \approx 125 \cdot \sqrt{A_p}$$

Minimale gerade Länge bei Ankern:

$$l_{min} \approx 25 \cdot \sqrt{A_p}$$

Die technische Zulassung eines Spannsystems enthält alle geometrischen Vorgaben, die zu beachten sind. Ausführungspläne sind mit diesen Werten zu zeichnen.

Für die Vorbemessung können die in der Folie angegebenen Näherungswerte – welche für alle Spannsysteme gut zutreffen – verwendet werden.