

Vorlesung Stahlbeton II

Prof. Dr. W. Kaufmann
Frühlingssemester 2022

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

5. Vorspannung

6. Platten

Stahlbeton I

Stahlbeton II

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

- [3] Marti, P., Monsch, O., Schilling, B., *Ingenieur-Betonbau*, vdf, ETH Zürich, 2005
(Grundlagen, historische Entwicklung etc.)
→ [20% Rabatt im ETH Store mit Legi \(43.20 statt 54.00\)](#)

- [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. 2014)

- [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

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: Sophia Kuhn, HIL E 37.3 (sophia.kuhn@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 dritten Semesterwoche
- Bei Fragen zu Vorlesung, Kolloquien und Hausübungen
- gemäss Infoblatt «Organisation des Übungsbetriebs»

Vorspannung – Einführung

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):

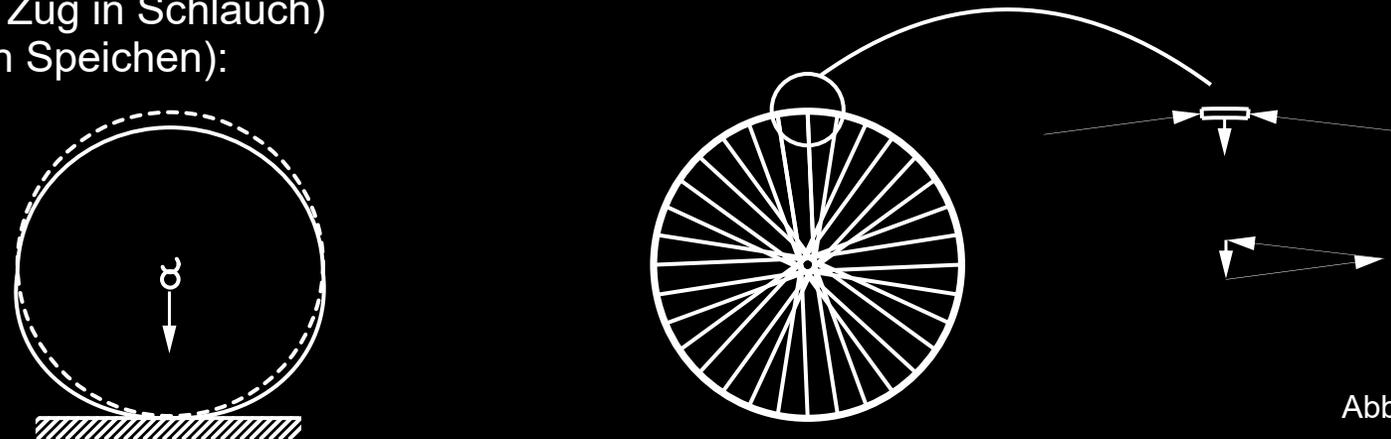
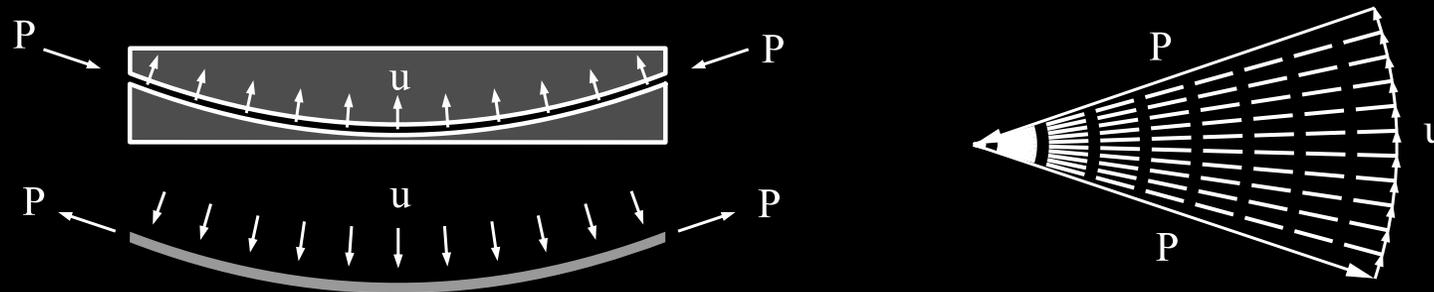


Abbildung aus [3]

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:

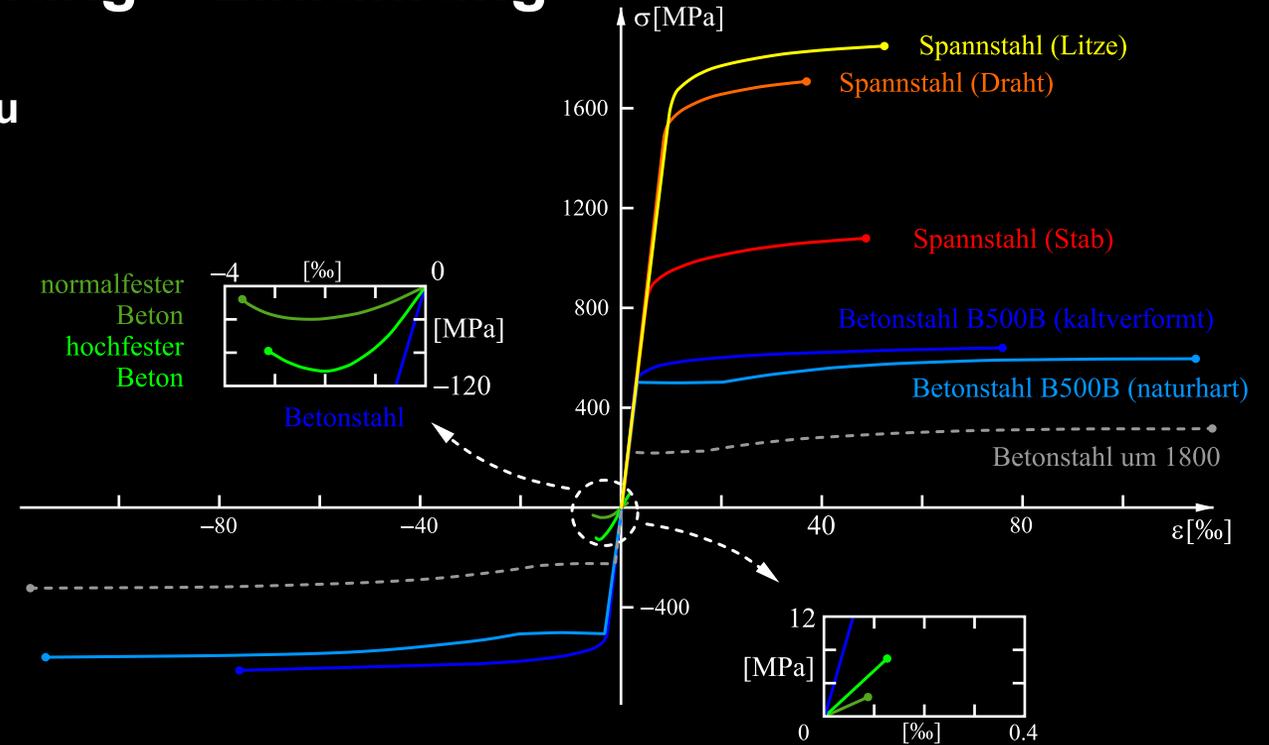


- zwischen dem Spannstahl und dem vom Spannstahl befreiten Tragwerk wirken Verankerungs-, Umlenk- und Reibungskräfte
- im Gesamt-Tragwerk (inkl. Spannstahl) resultiert ein Eigenspannungszustand

Vorspannung – Einführung

Ursprung und Prinzip der Vorspannung im Betonbau

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



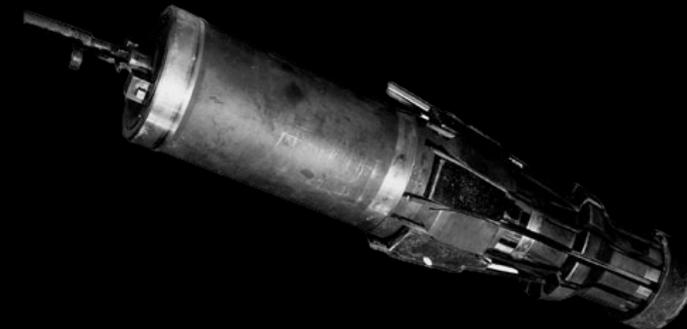
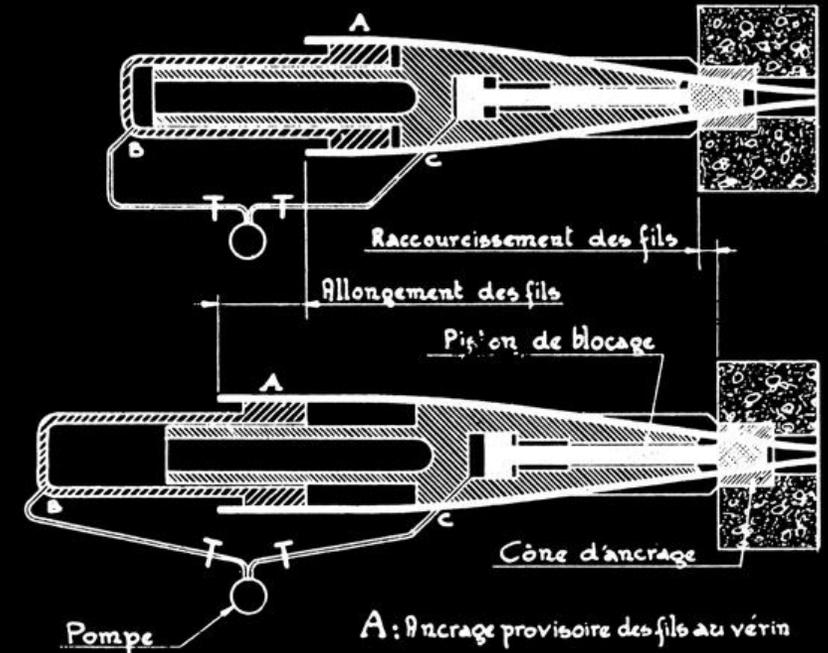
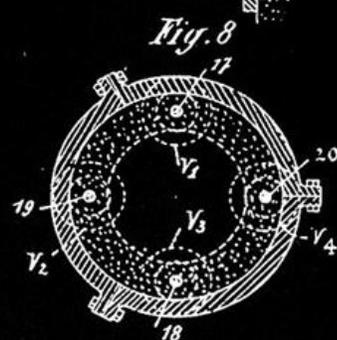
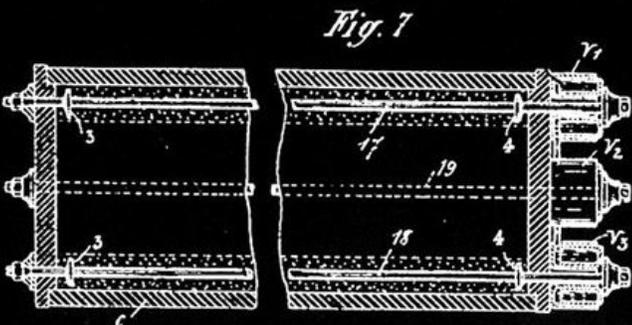
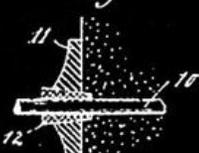
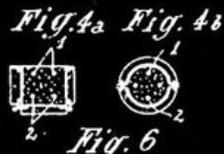
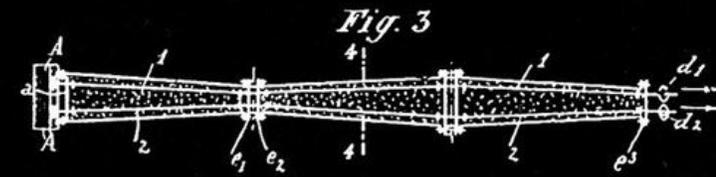
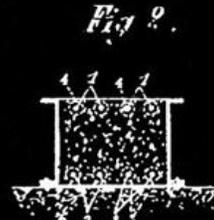
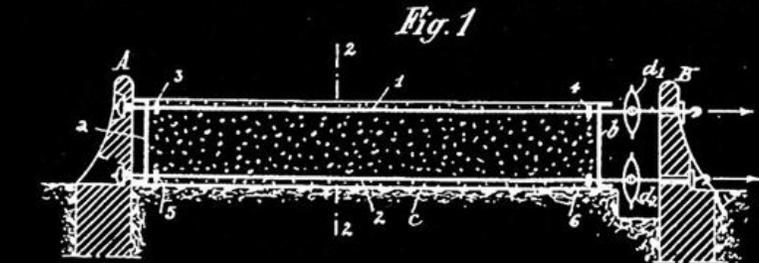
- Erste Versuche und Patente der Vorspannung im Betonbau – mit dem Ziel, Risse zu reduzieren – bereits Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts, Vorspannung aber praktisch wirkungslos, da die verwendeten, geringen Stahlspannungen durch Schwinden und Kriechen des Betons und Relaxation der Bewehrung praktisch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

Vorspannung – Einführung

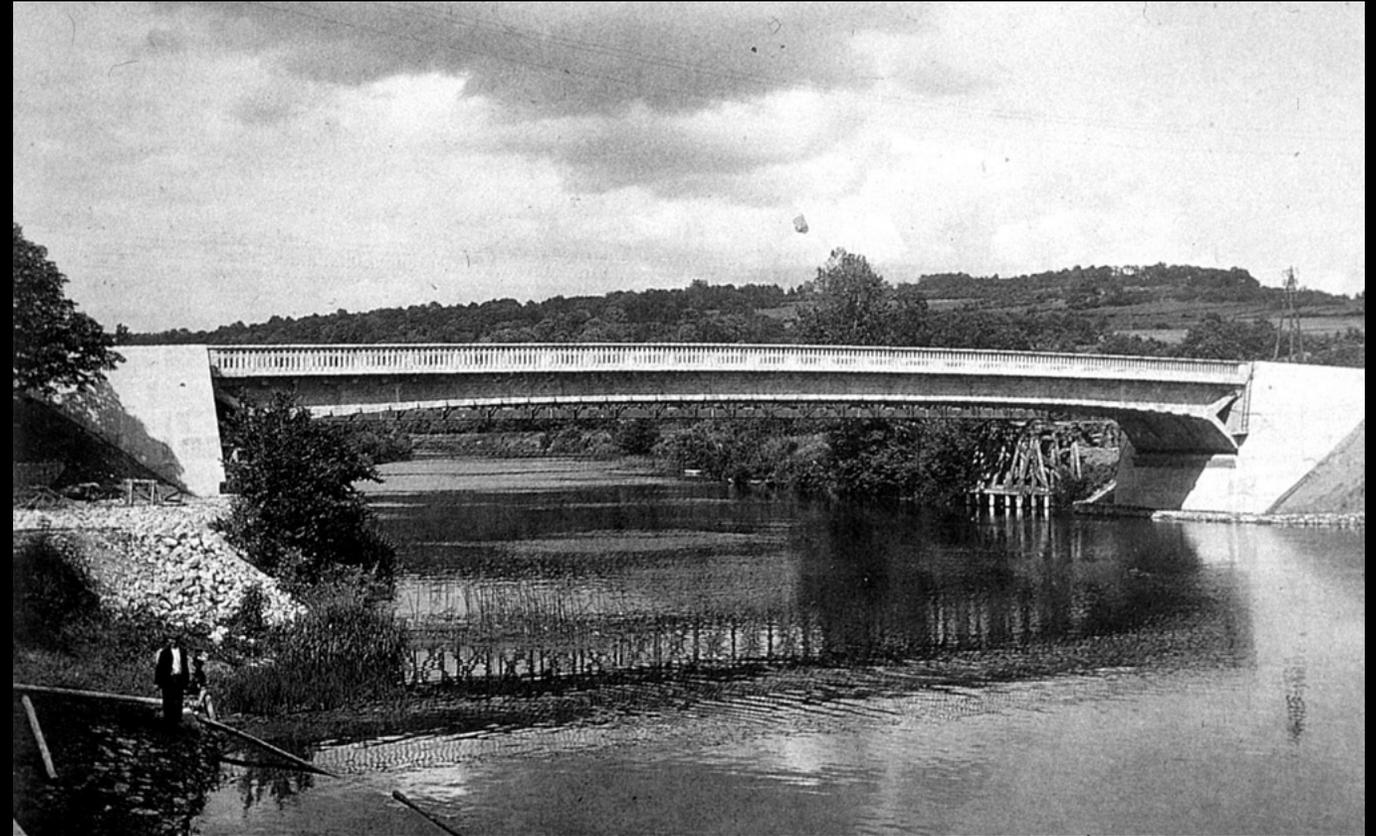
• 680.547

MM. Freyssinet et Seailles

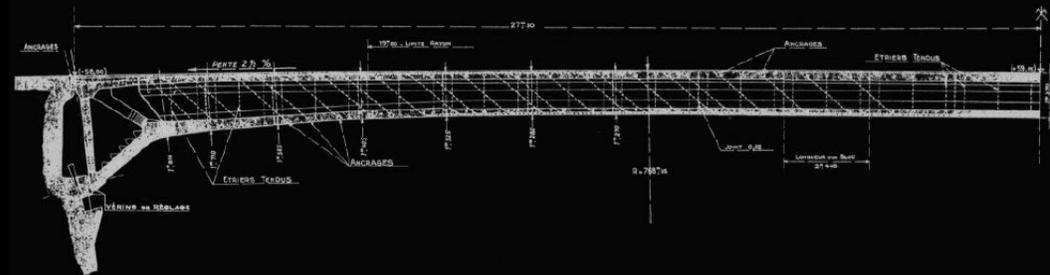
Pl. unique



Vorspannung – Einführung



Marnebrücke Luzancy (1941-46)
Eugène Freyssinet



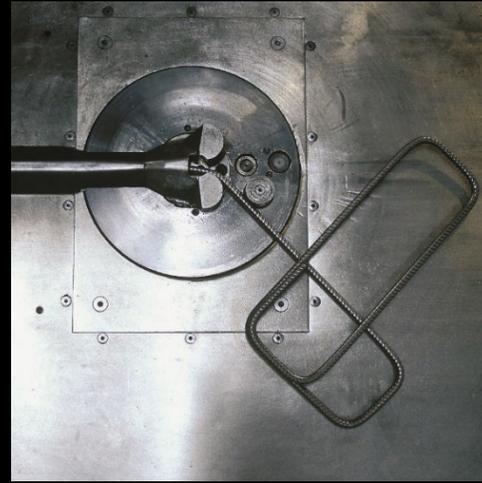
Vorspannung – Einführung

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 vorgefertigter Elemente möglich
 - optimierte Bauabläufe

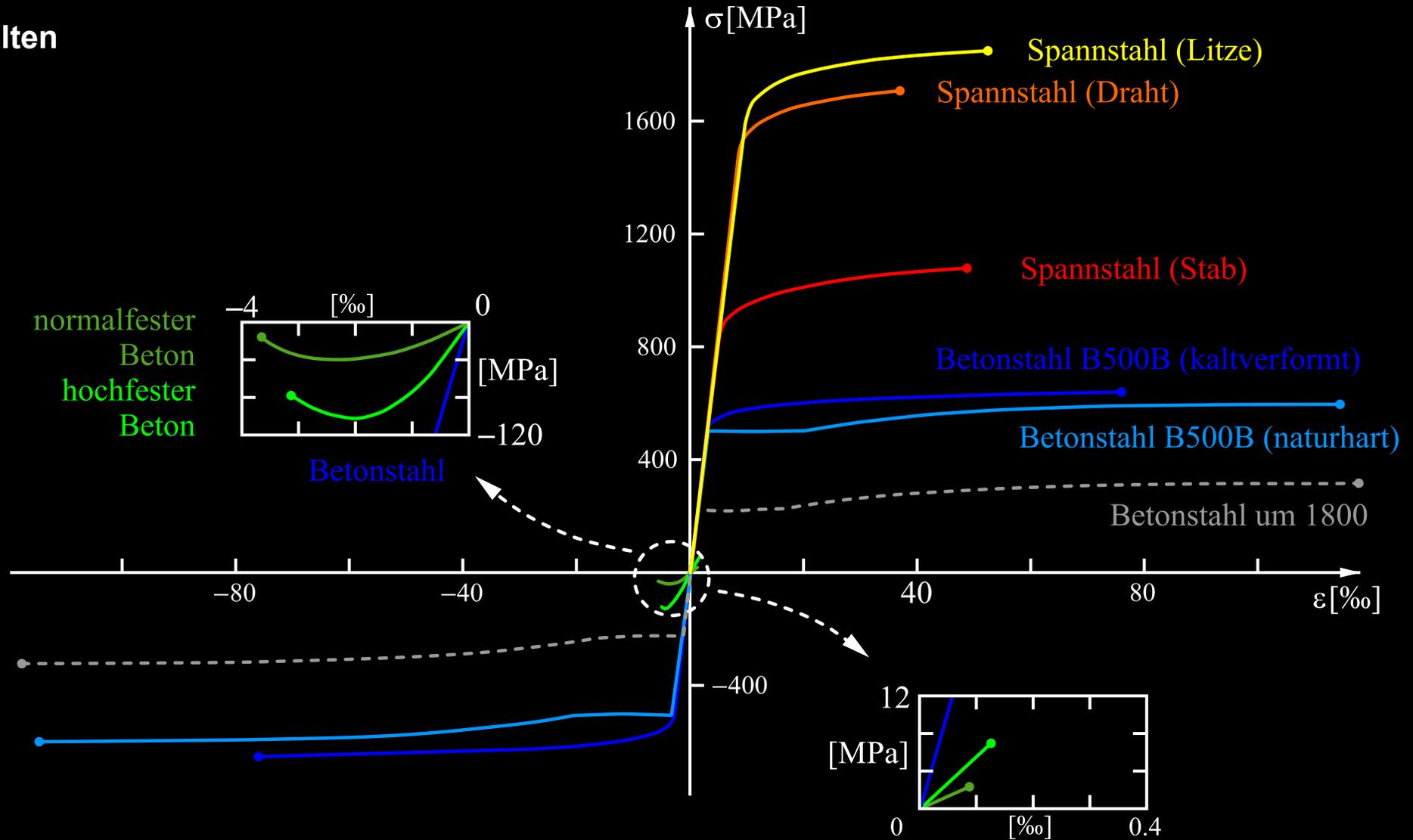
Vorspannung – Einführung

Betonstahl - Spannstahl

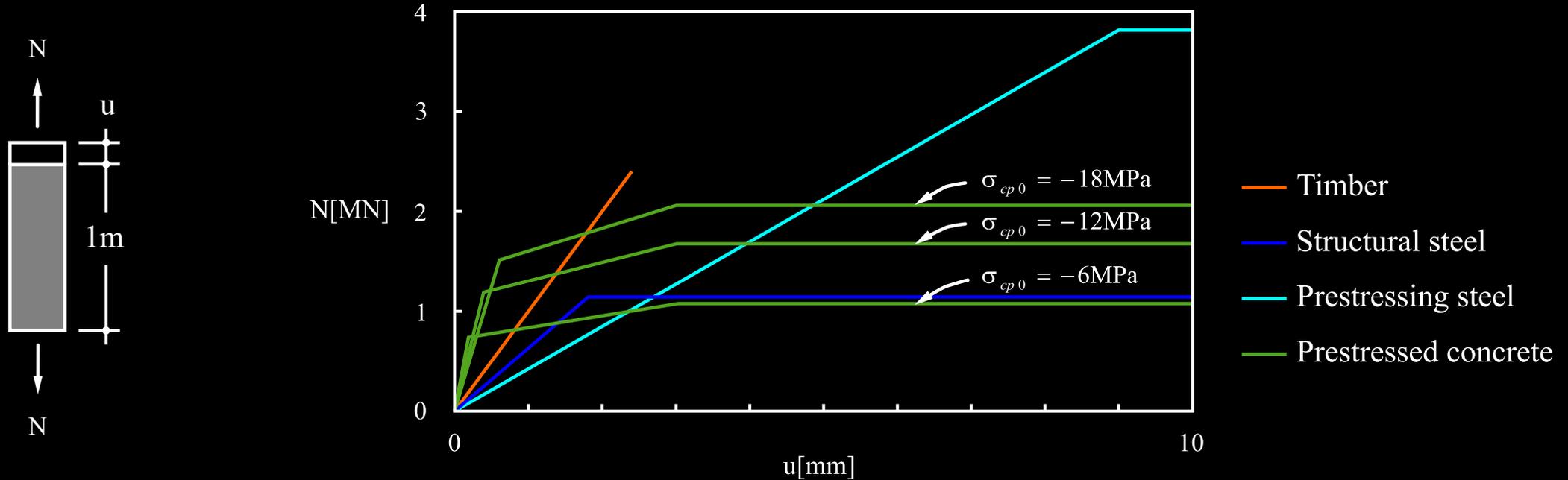


Vorspannung – Einführung

Materialverhalten



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

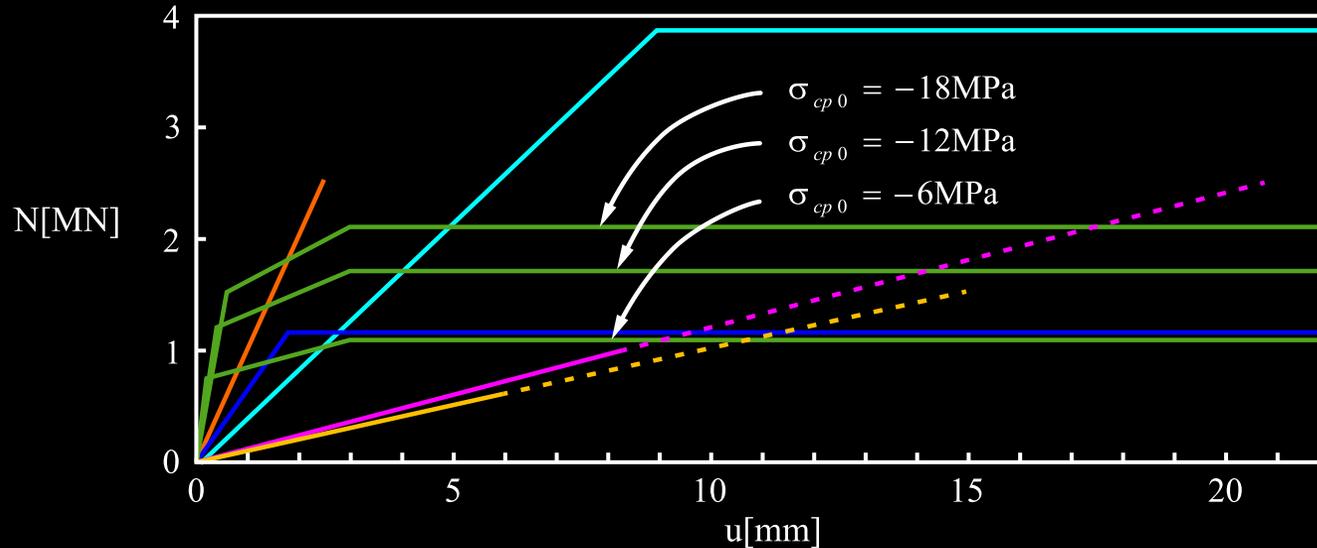
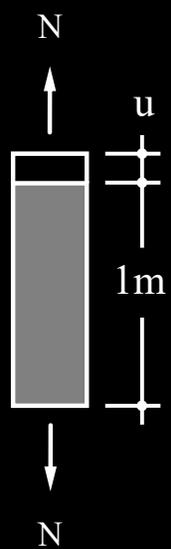
2) incl. formwork and mild steel

3) incl. positioning on site and grouting

4) incl. coating and erection

5) incl. erection and connectors

Tension chord for CHF 100 / m



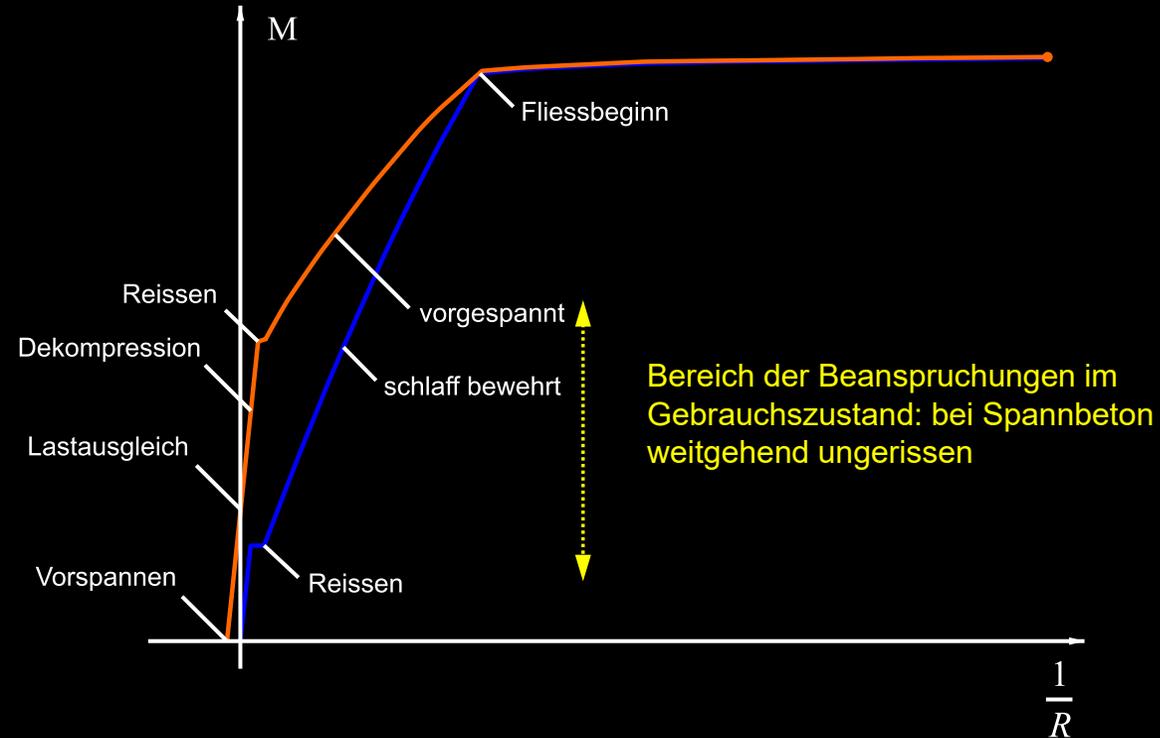
- Timber
- Structural steel
- Prestressing steel
- Prestressed concrete
- CFRP (short-term)
- - - CFRP (long-term)
- GFRP (short-term)
- - - GFRP (long-term)

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) $\sigma_{p0} = 1200$ 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

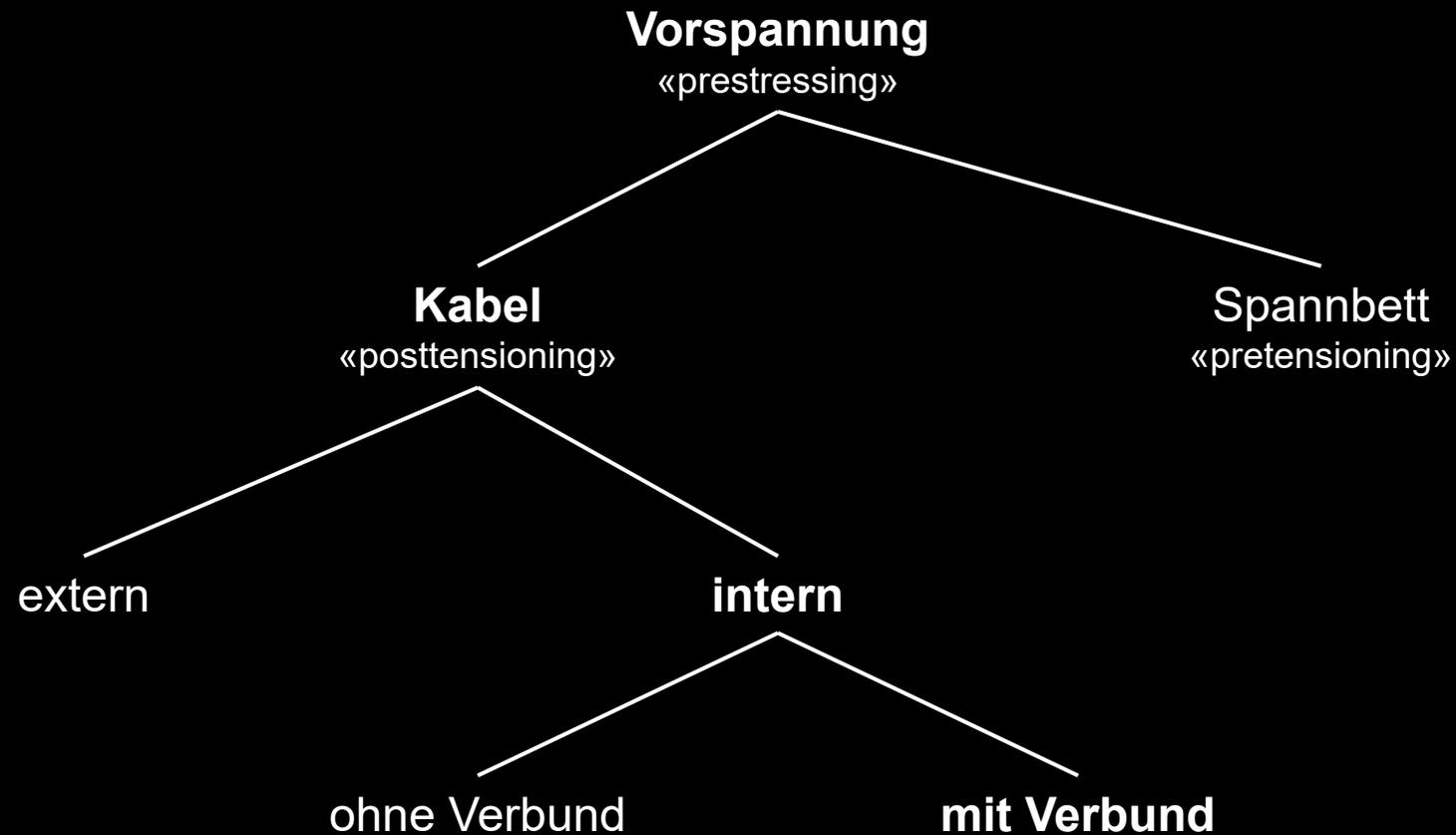
Biegetragverhalten



- 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

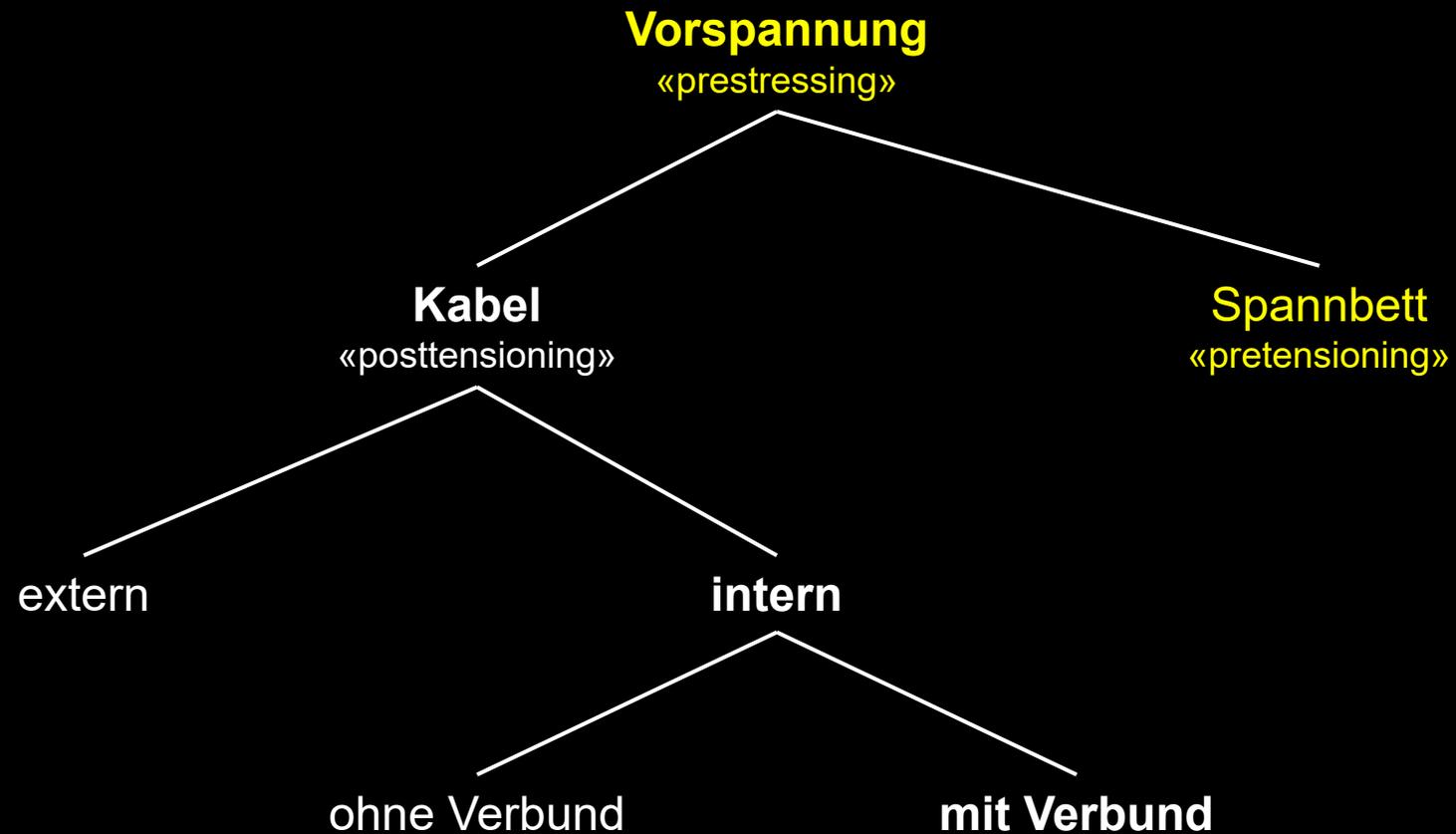
Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



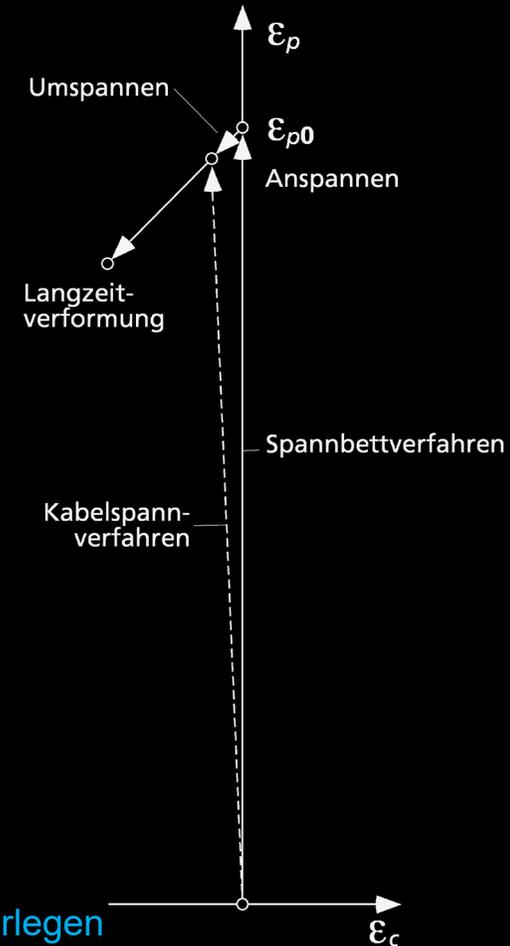
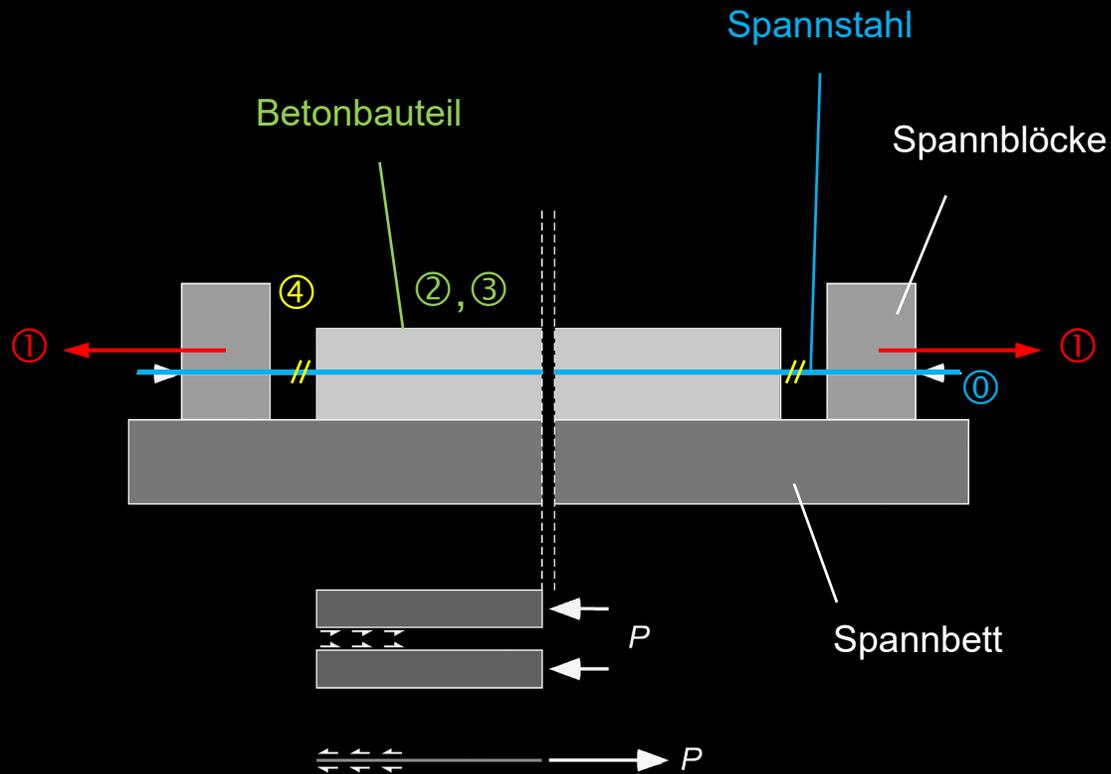
Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



Vorspannung – Einführung

Spannbettverfahren



- ④ Spannstahl (Drähte oder Litzen in Spannblöcken verankern, ggf. schlaife 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

Vorspannung – Einführung

Spannbettverfahren – Vorfabrikation allgemein



Vorspannung – Einführung

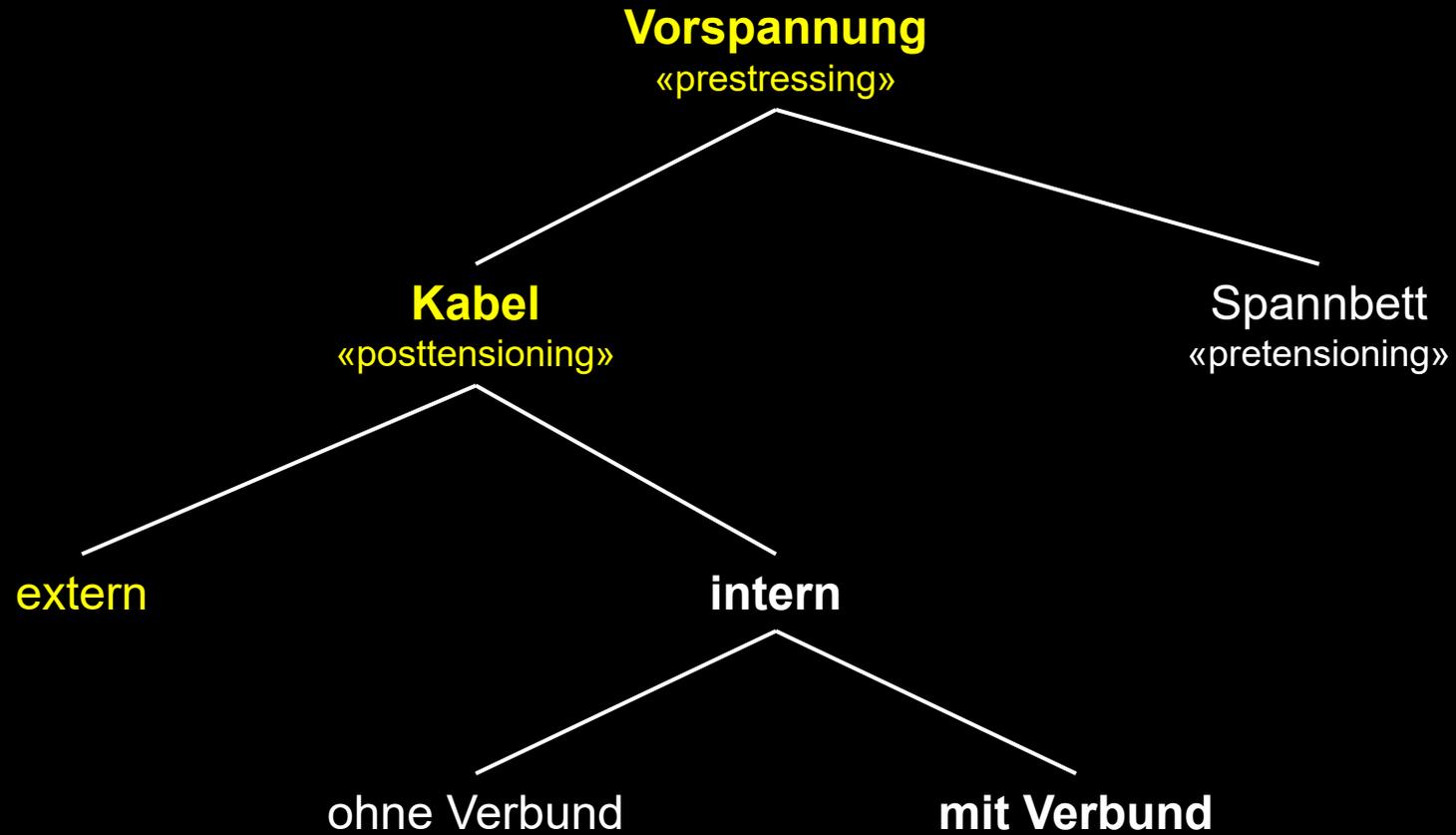
Spannbettverfahren – Industrielle Produktion (Hohlkörperdeckenelemente)



[Fotos: Mabetón, Spiroll]

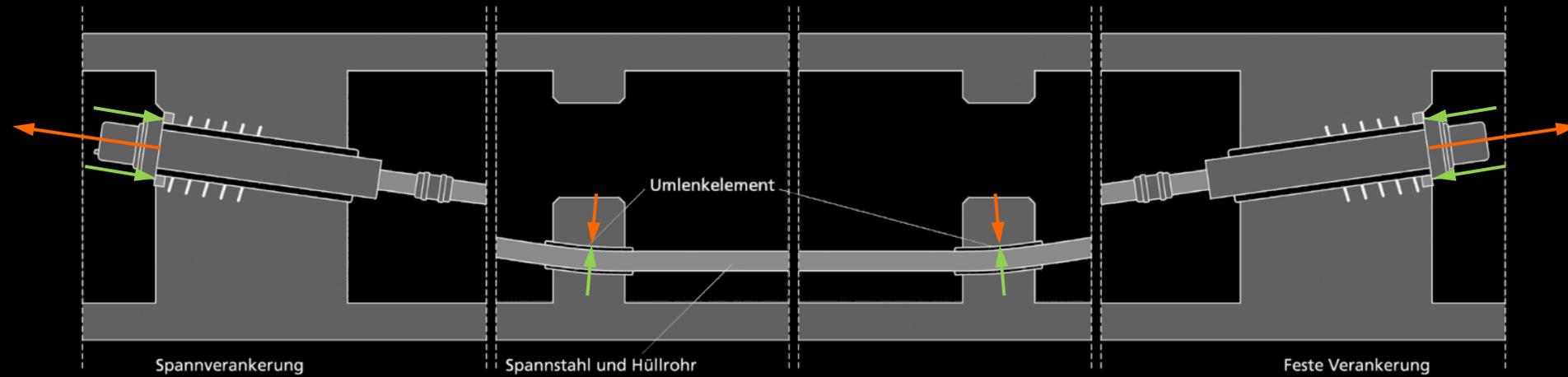
Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



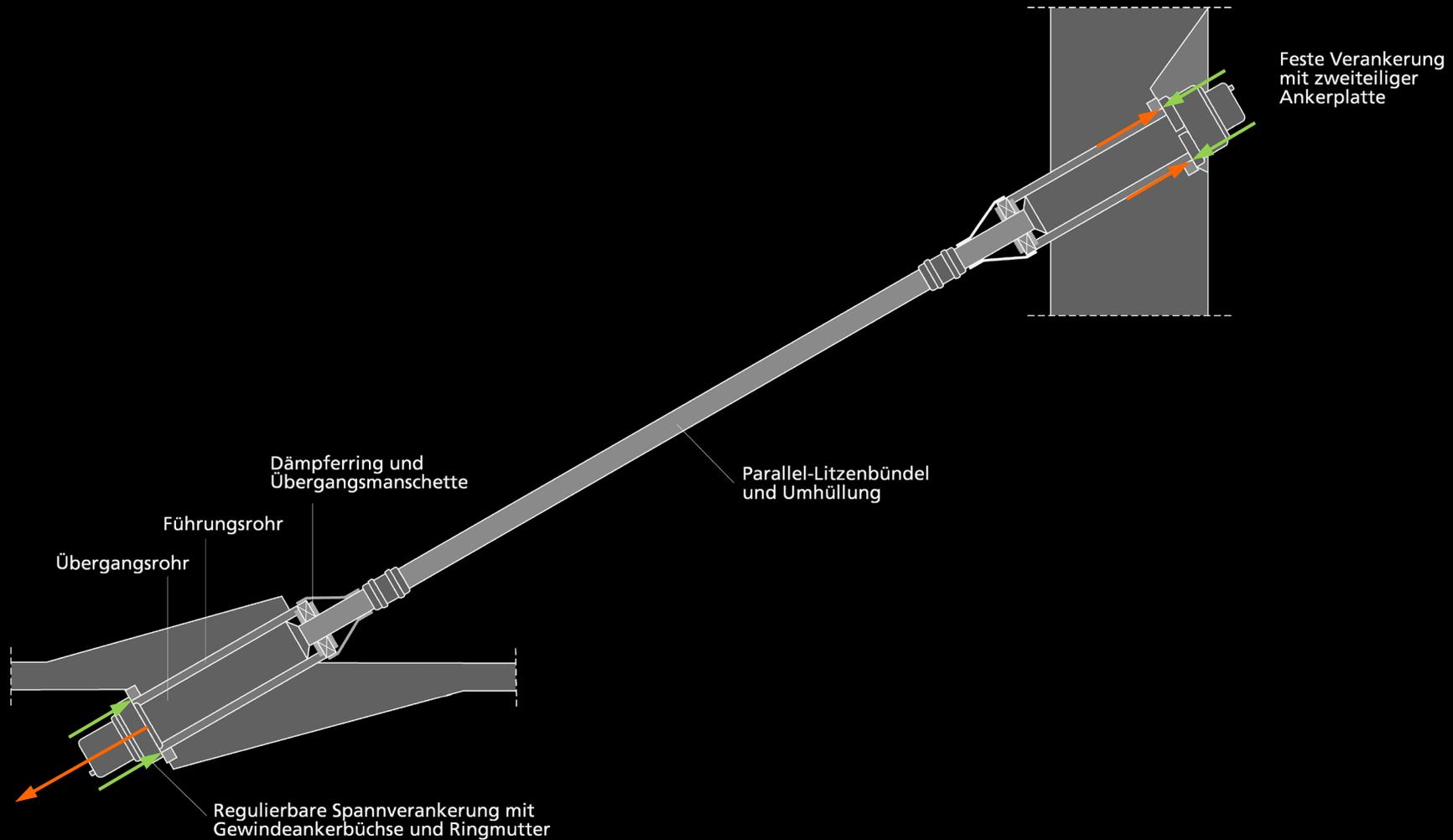
Vorspannung – Einführung

Externe Kabelvorspannung



Vorspannung – Einführung

Schrägekabel



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.

Vorspannung – Einführung

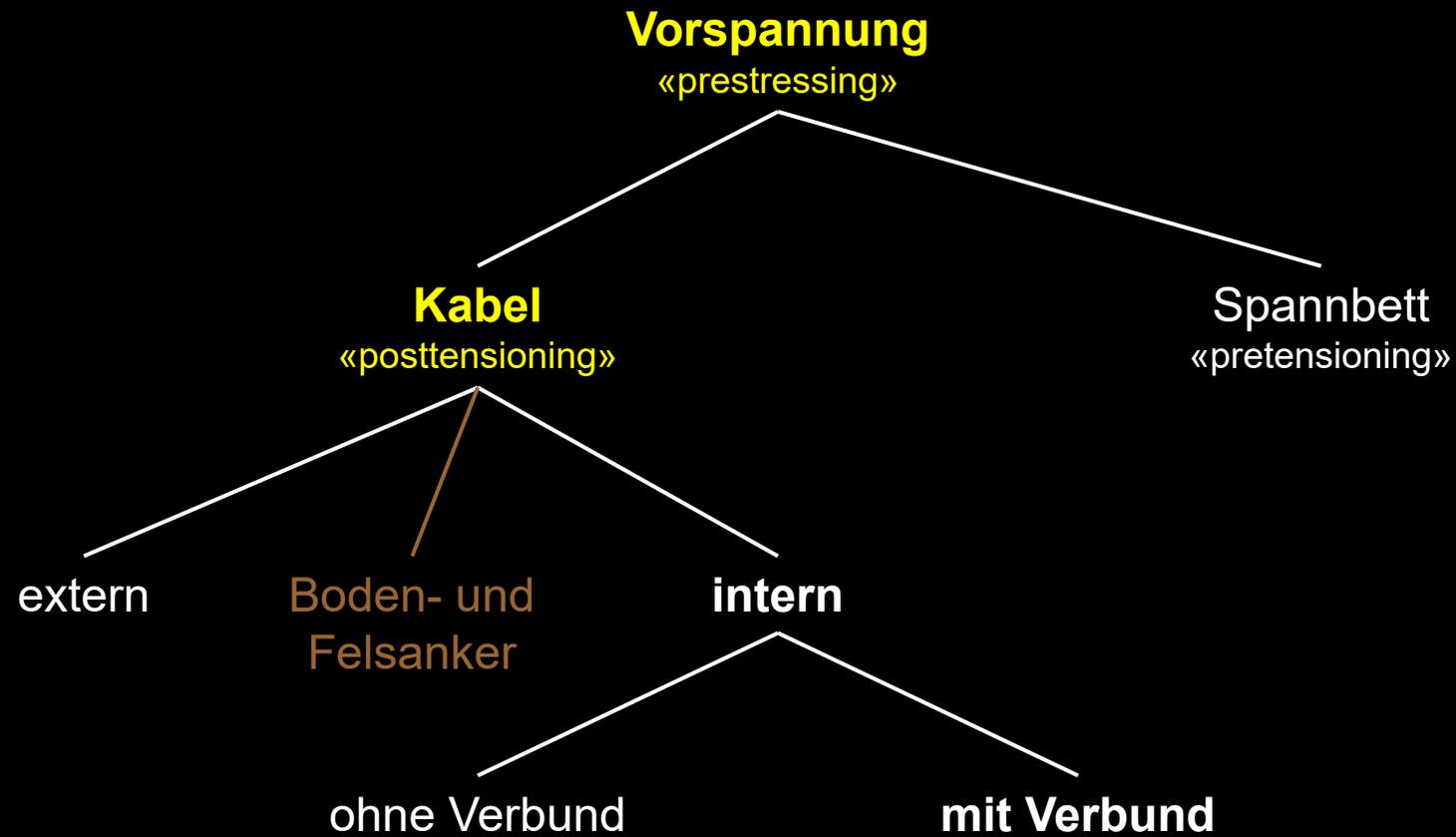
Schrägseilbrücken / Schrägkabel: Sunnibergbrücke



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 Ausnutzung zulässig, dafür konservativere Lastkombinationen zu berücksichtigen).

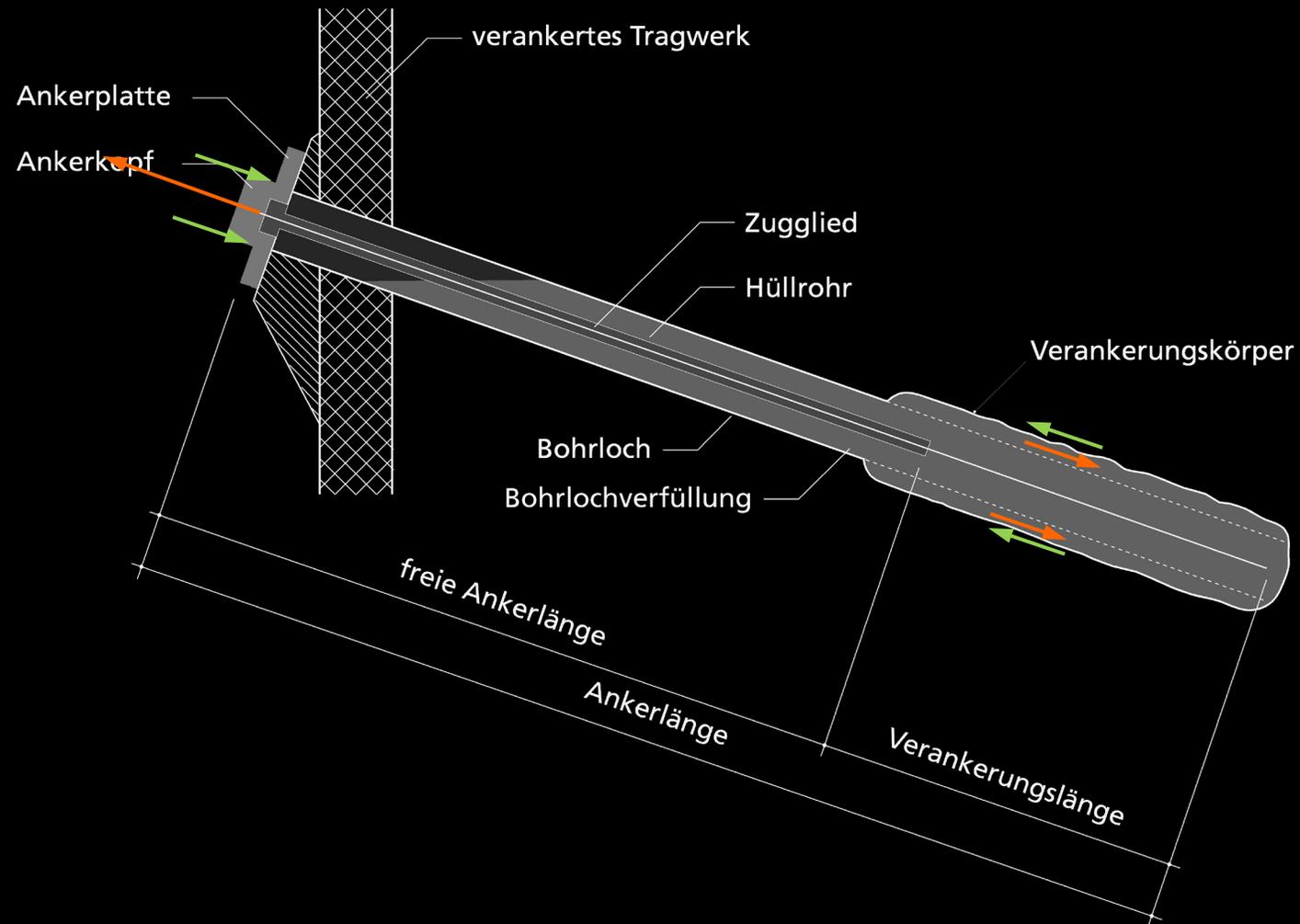
Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



Vorspannung – Einführung

Boden- und Felsanker



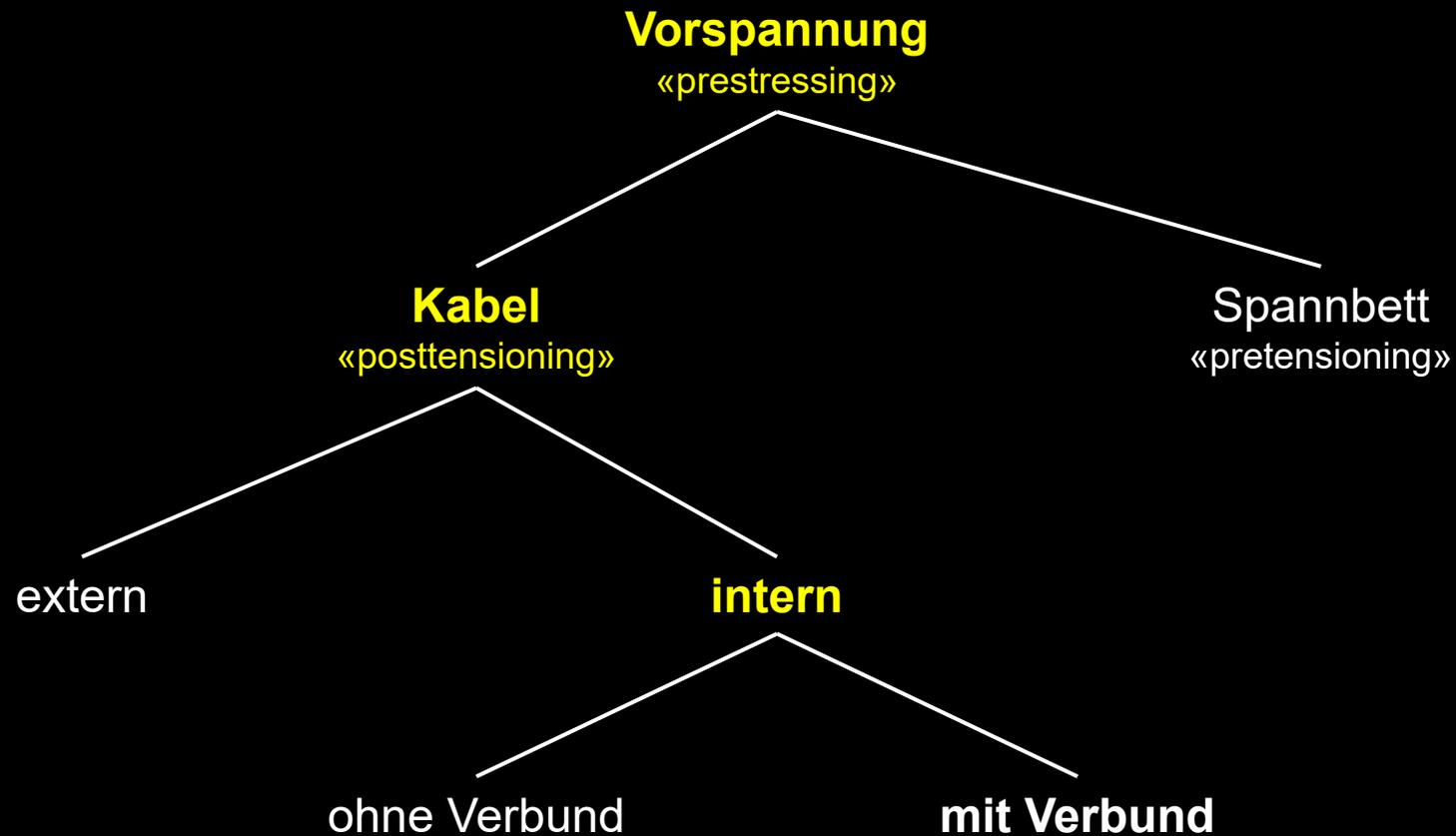
Vorspannung – Einführung

Boden- und Felsanker: verankerte Bohrpfehlwand, Bhf. Stadelhofen, Zürich



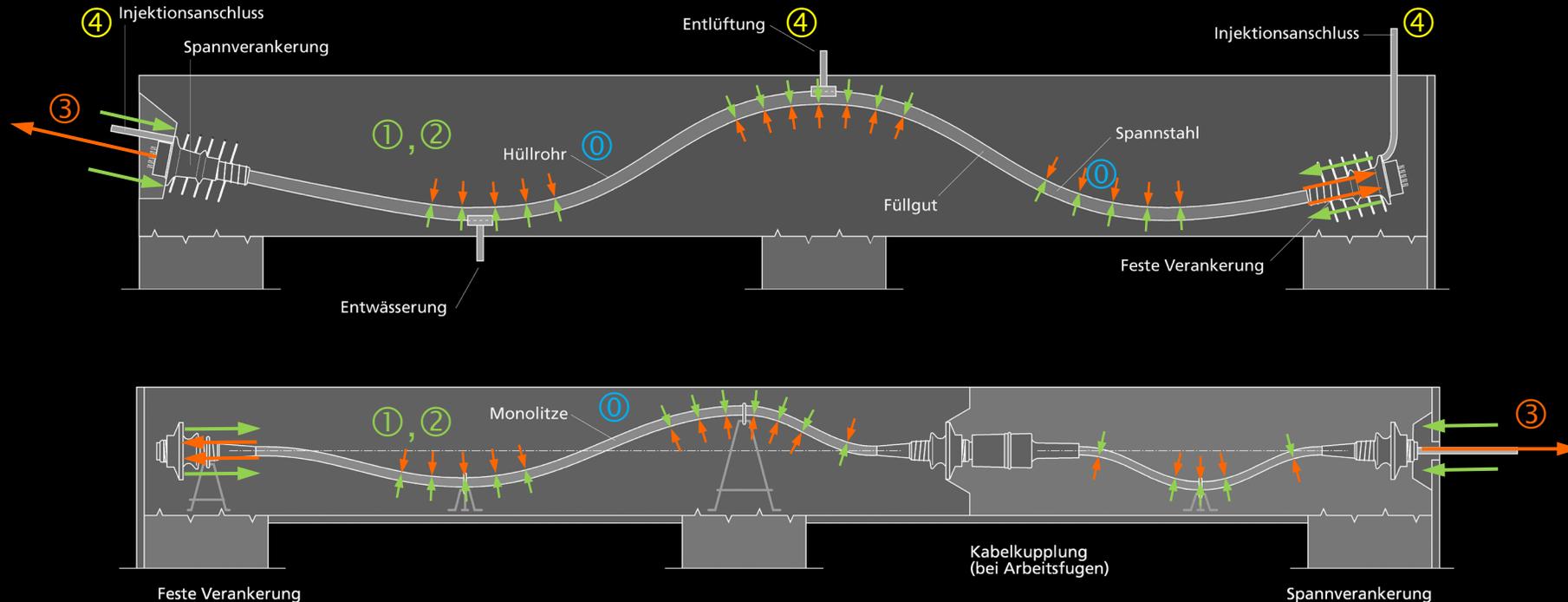
Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



Vorspannung – Einführung

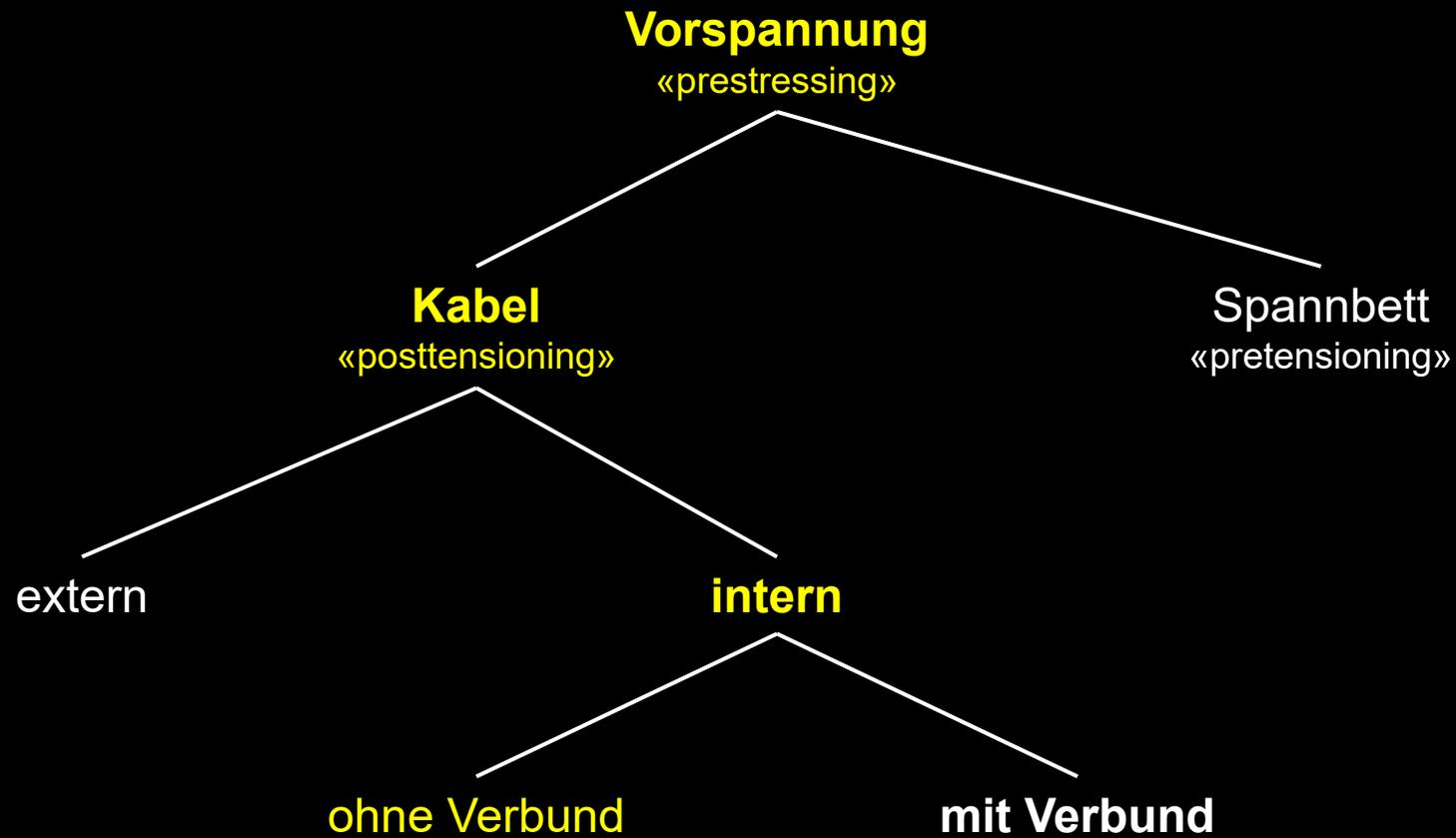
Interne Kabelvorspannung mit Verbund / ohne Verbund (Monolitzen)



- ① Hüllrohre und Anker verlegen, Litzen einschleusen / Monolitzen und Anker verlegen
- ② Betonieren, ③ Erhärtung des Betons
- ③ Litzen mit Spannpresse 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)

Vorspannung – Einführung

Arten von Vorspannung



Vorspannung – Einführung

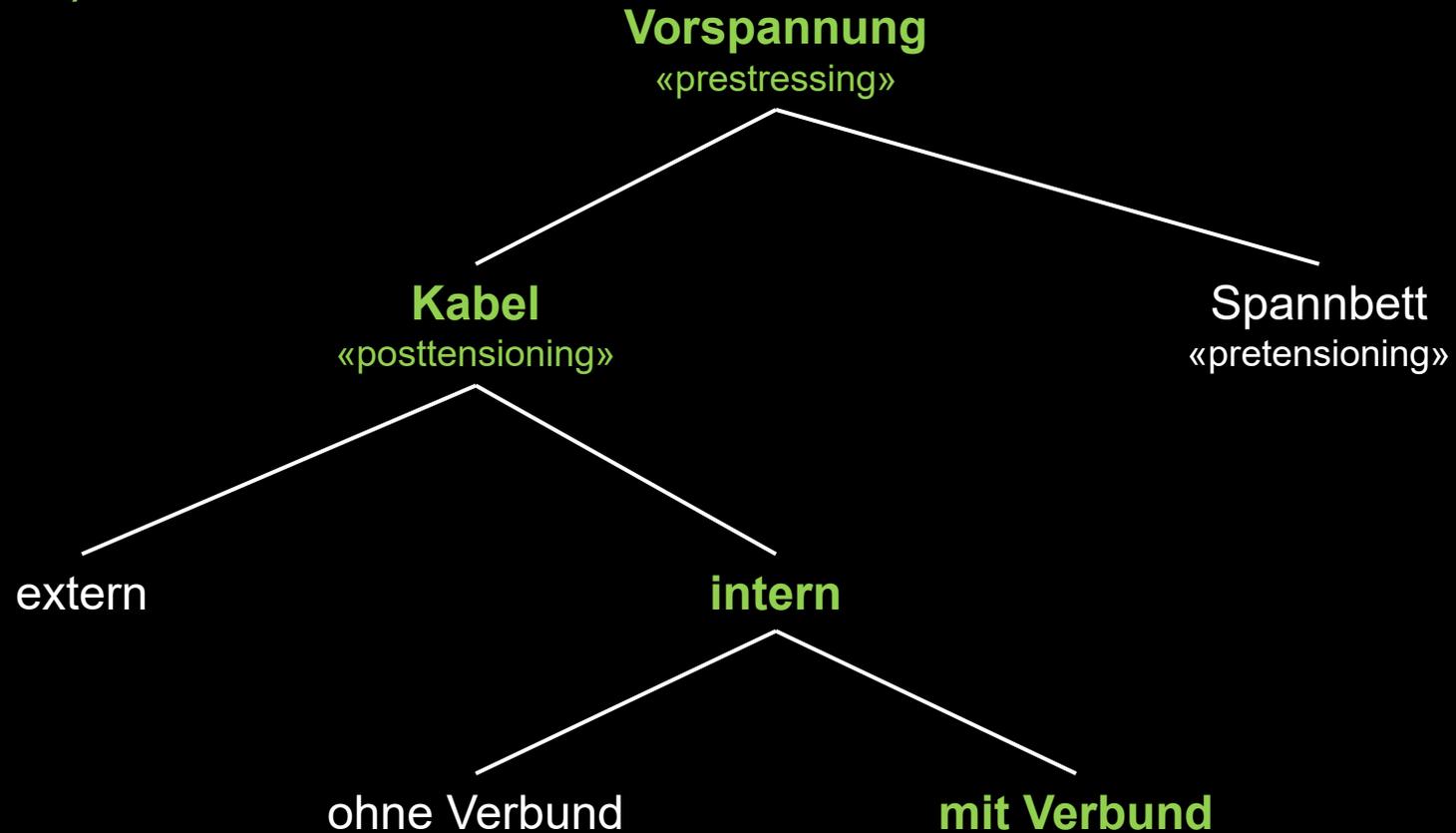
Interne Vorspannung ohne Verbund: Flachdecke (Monolitzen)



Vorspannung – Einführung

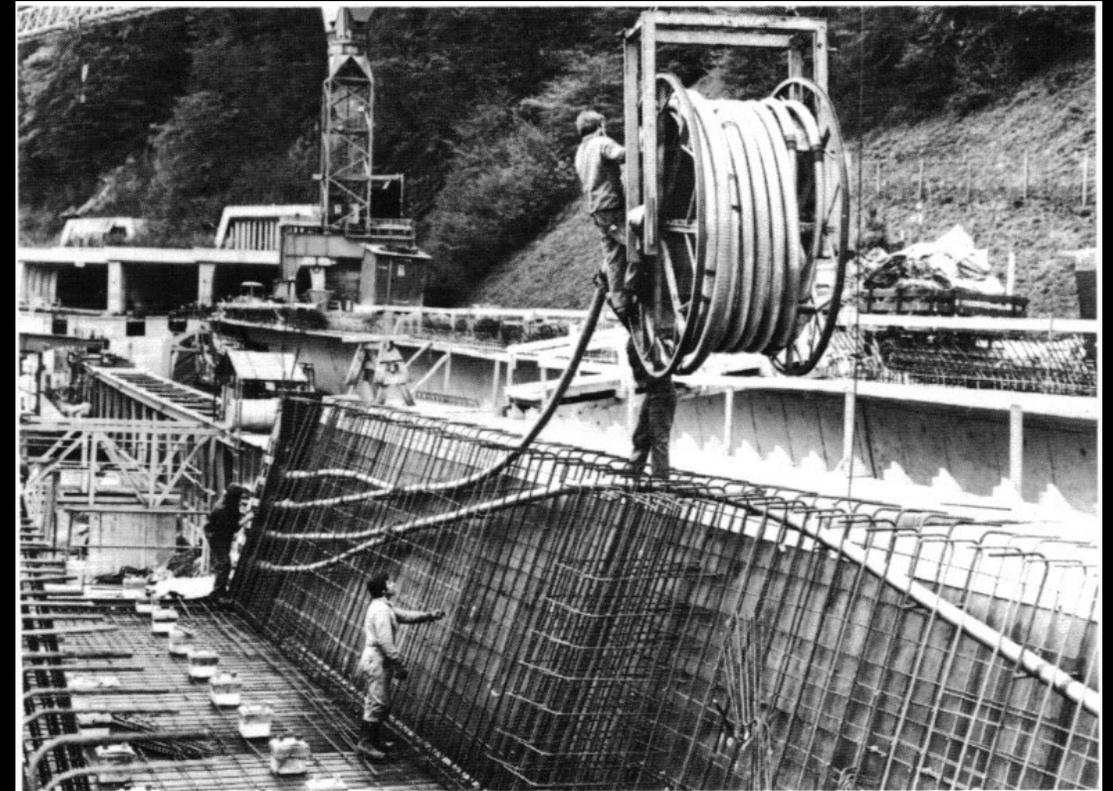
Arten von Vorspannung

Vorlesungsstoff (primär)



Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund: Brückensteg



Vorspannung – Einführung

Spanngliedkategorien

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

Drahtspannsysteme (heute selten, ausser für Schrägkabel)

Drahtbündel mit Drähten Ø3.0...10.0 mm

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

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

Litzenspannsysteme (heute üblich)

Litzenbündel mit Litzen à 7 Drähte, Durchmesser der Litzen Ø0.5" (12.9 mm) oder Ø0.6" (15.7 mm)

Verankerung über Klemmen (einfaches System, baustellentauglich)

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

Stabspannsysteme

Glatte oder gerippte Stäbe mit Durchmesser zwischen 20 und 36 mm

Zugfestigkeiten $f_{pk} = 1030 \dots 1230$ MPa, Fließgrenze $f_{pd} = 720 \dots 940$ 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 $t = \infty$ $\sigma_{p\infty} \geq 0.45 \cdot f_{pk}$

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

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)

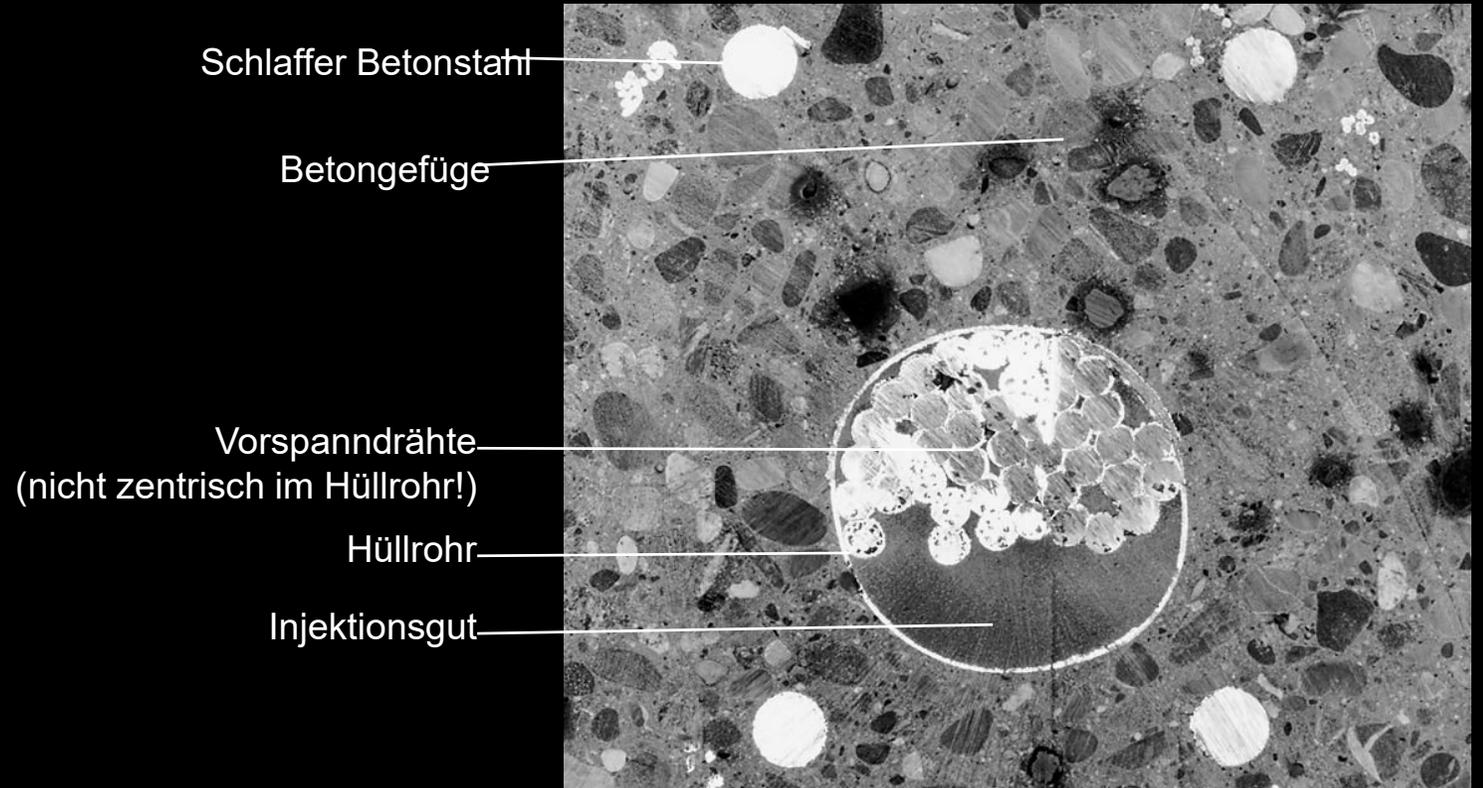
- Für besondere Anforderungen (Schrägseilbrücken) Korrosionsschutz durch Verzinkung und / oder Ummantelung oder (billiger) Epoxidharzbeschichtung der Drähte oder Litzen
- Weitere Formen (vollverschlossene Seile etc.) → Hängebrücken etc.
- Herstellung weltweit, Litzenspannsysteme heute sehr verbreitet

Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund



Querschnitt durch ein Spannglied



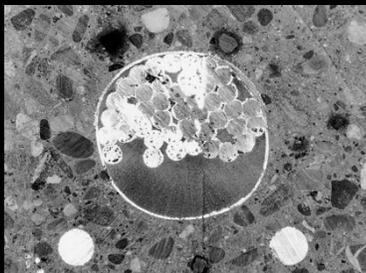
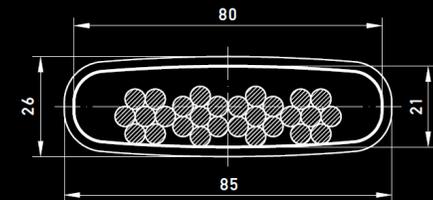
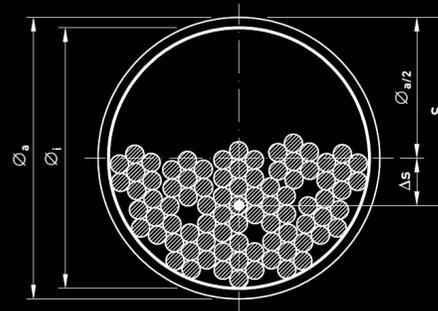
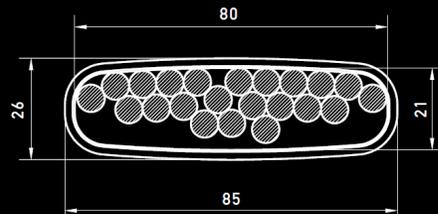
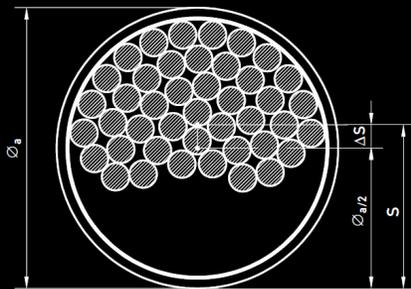
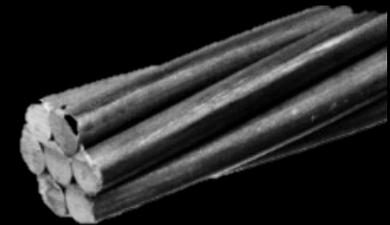
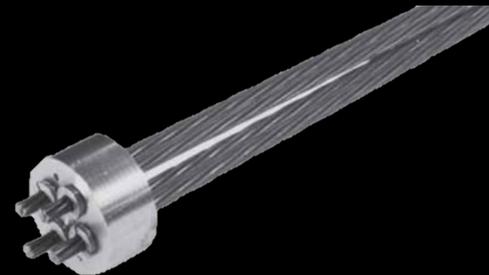
Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Draht- und Litzensysteme

Drahtspannsysteme
(heute selten)

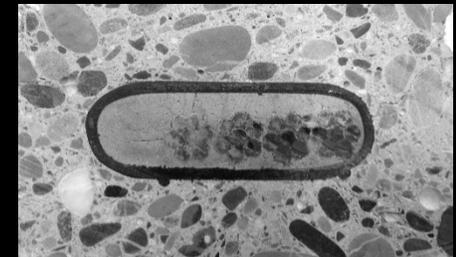


Litzenspannsysteme
(heute üblich)



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

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



Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Komponenten

- Bewegl. Verankerung



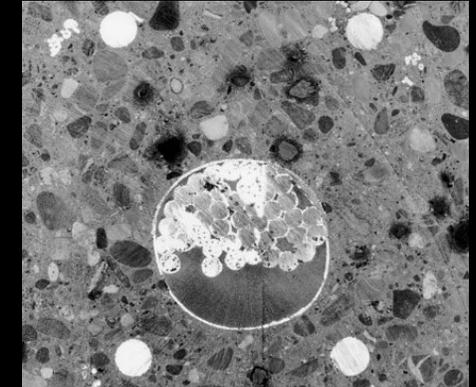
- Kupplung (fest)



- Hüllrohre



- Querschnitt

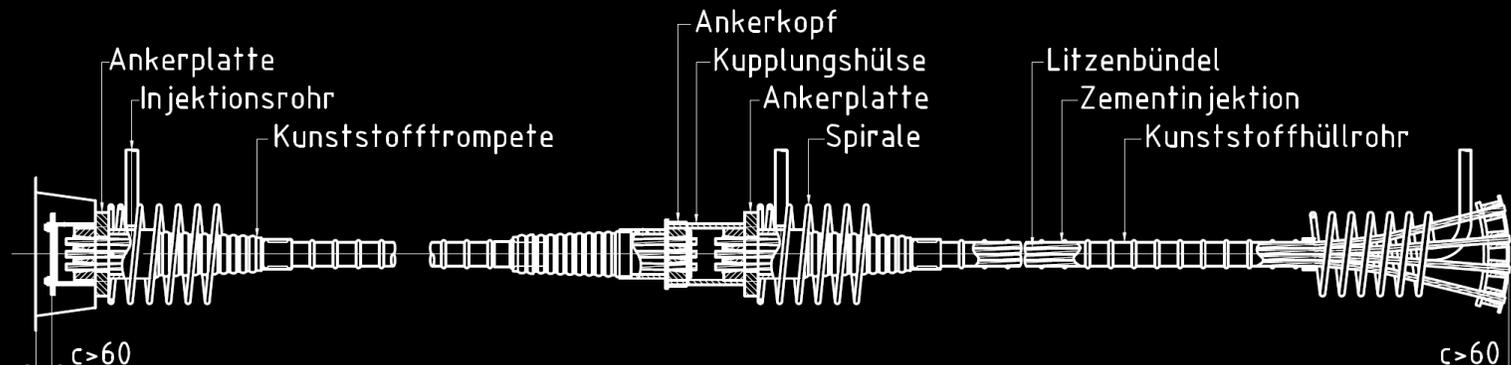


- Beispiel: Litzen-Spannglied Kategorie b (Quelle: Stahlton)

Spannbare Verankerung

Kupplung

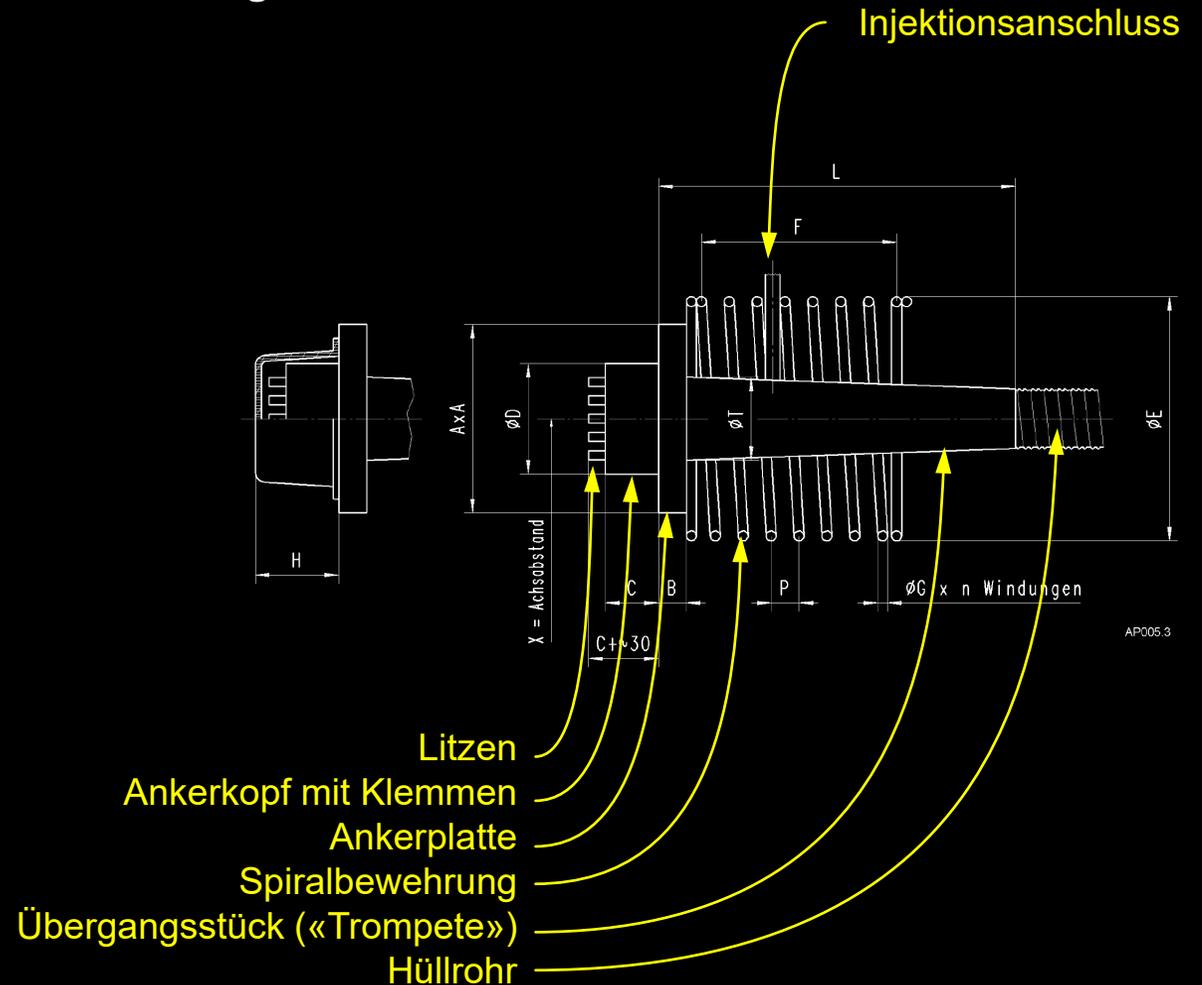
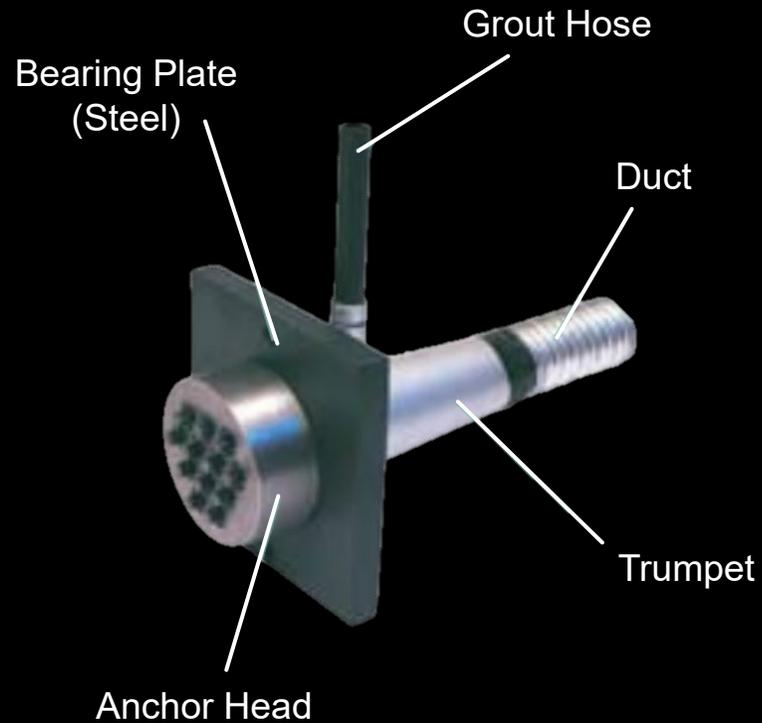
Feste Verankerung



Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Spannbare Verankerungen

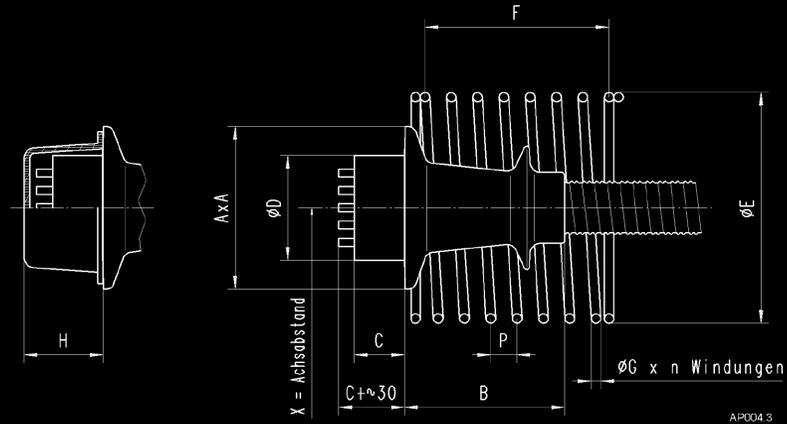
Verankerung mit Ankerplatte
(VSL Typ E)



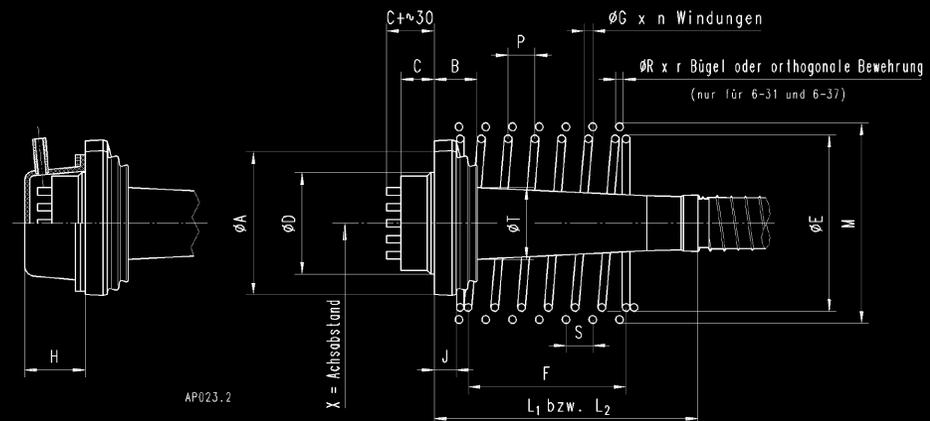
Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Spannbare Verankerungen

Mehrflächenverankerung (Guss)
(VSL Typ EC)



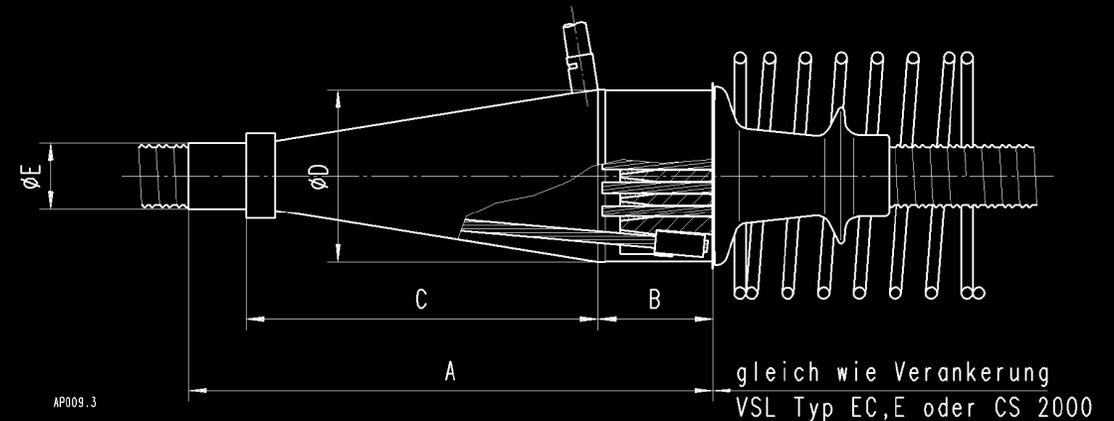
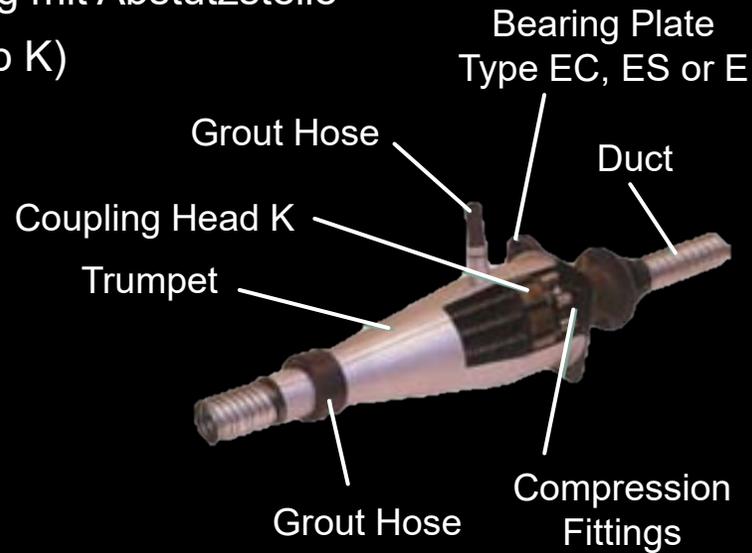
VSL Typ CC
(Composite)



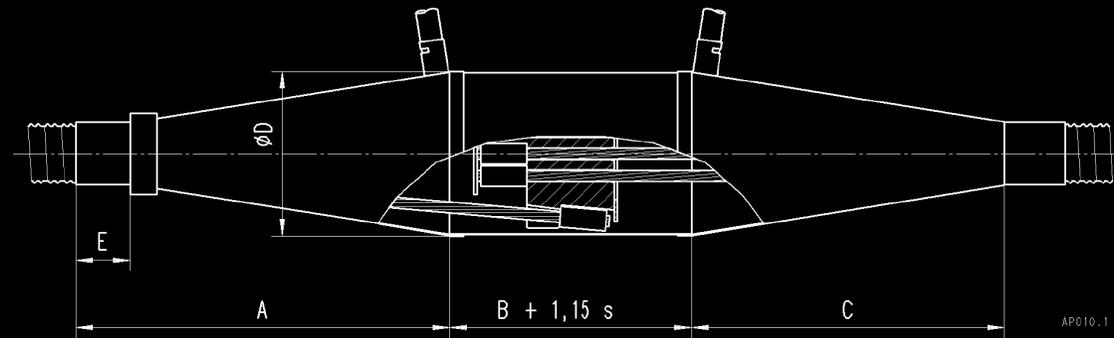
Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Kupplungen

Kupplung mit Abstützstelle
(VSL Typ K)



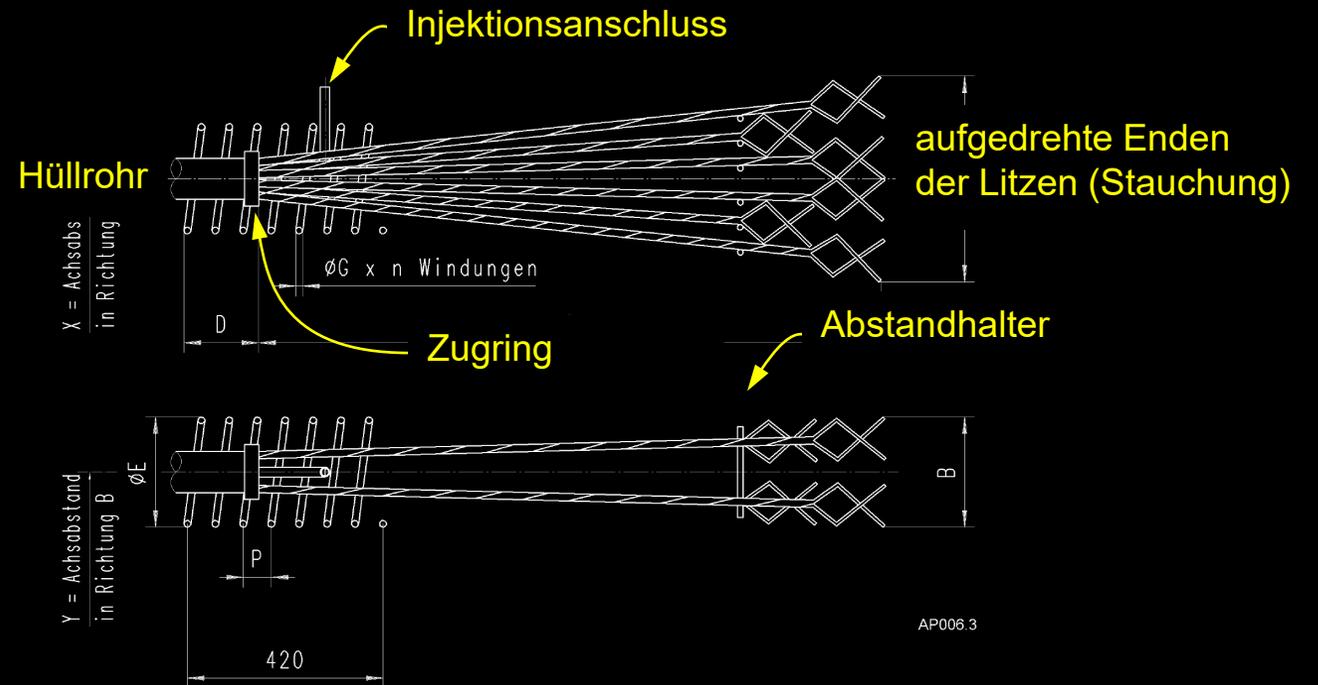
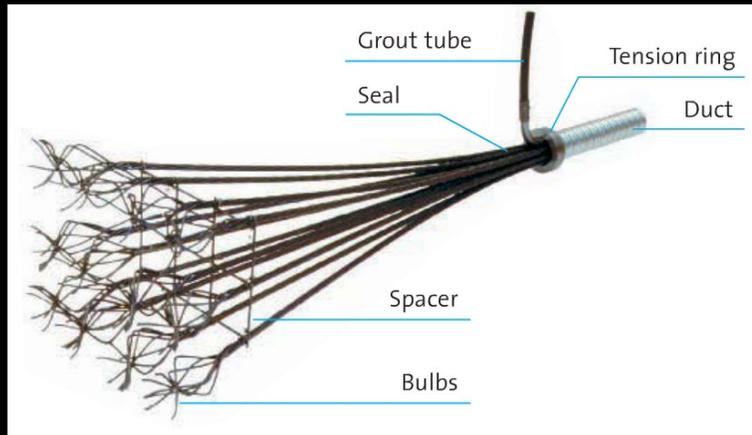
Gleitkupplung (selten)
(VSL Typ V)



Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Feste Verankerungen

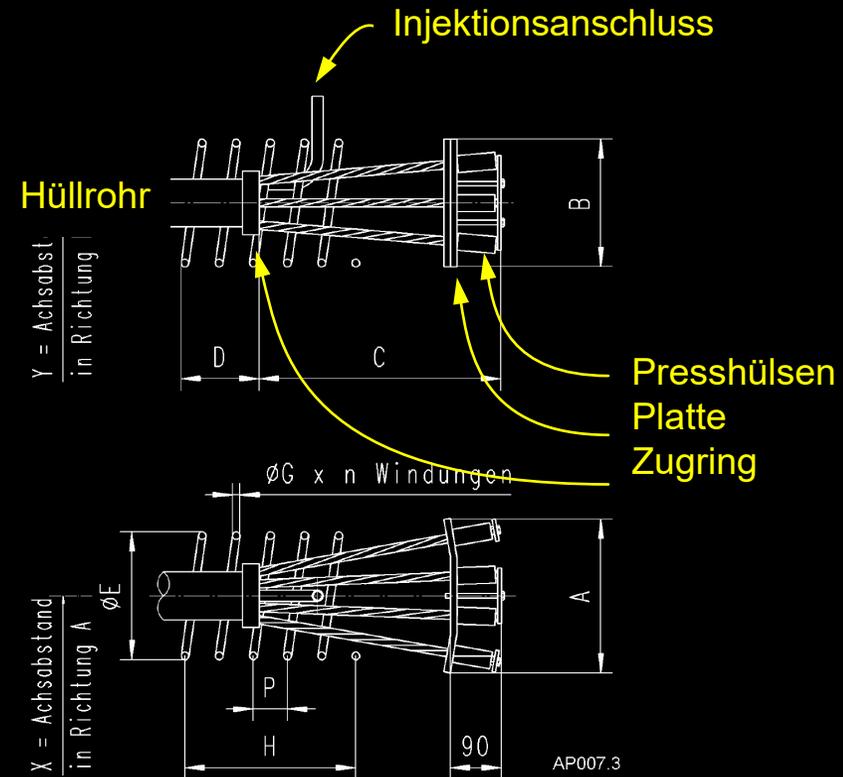
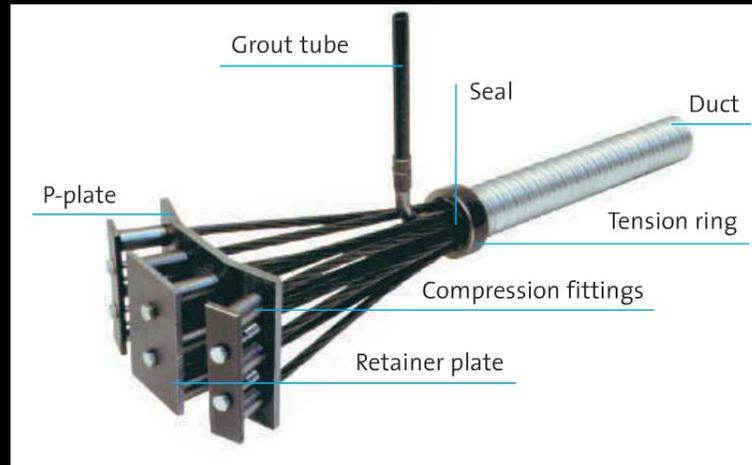
Verbundanker (VSL Typ H)



Vorspannung – Einführung

Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Feste Verankerungen

Anker mit Platte (VSL Typ P)

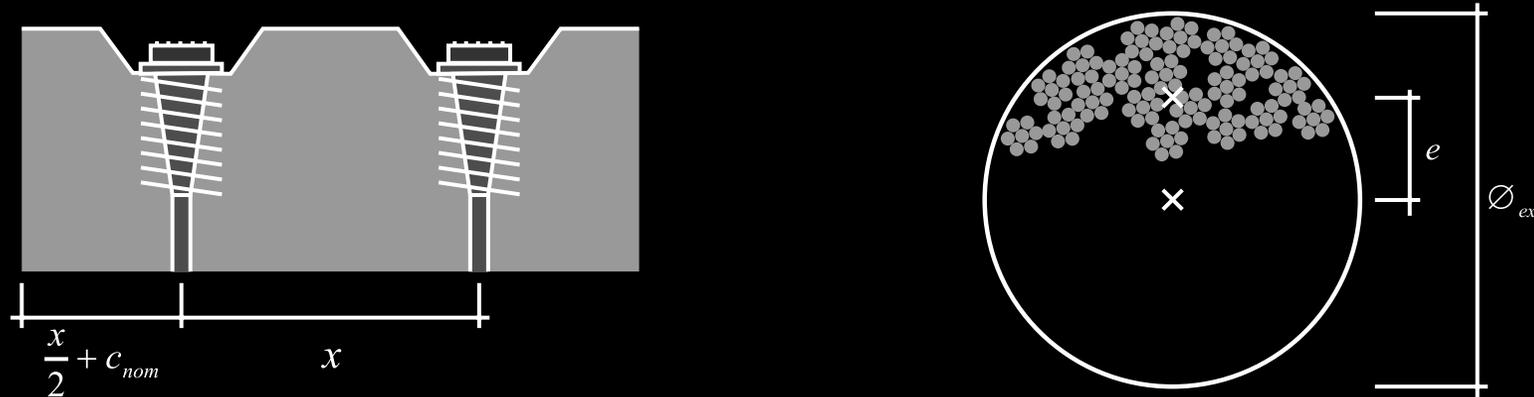


Vorspannung – Einführung

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:

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