

# 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

## 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 → [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

# 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

# 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):

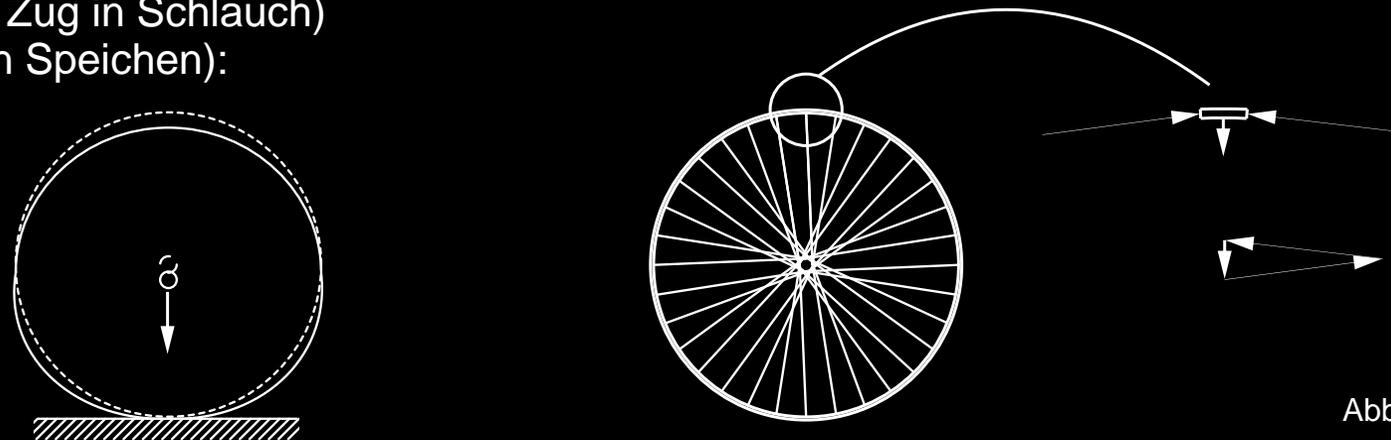


Abbildung aus [3]

# Vorspannung – Einführung



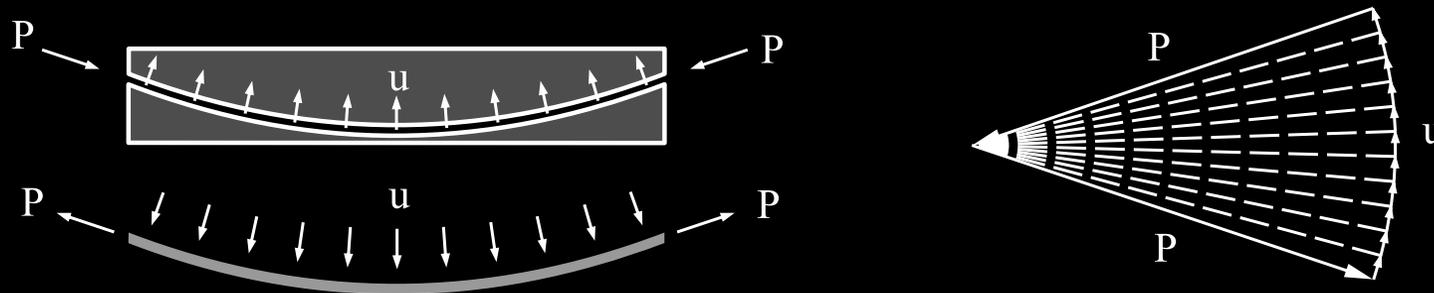
# Vorspannung – Einführung



# 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:

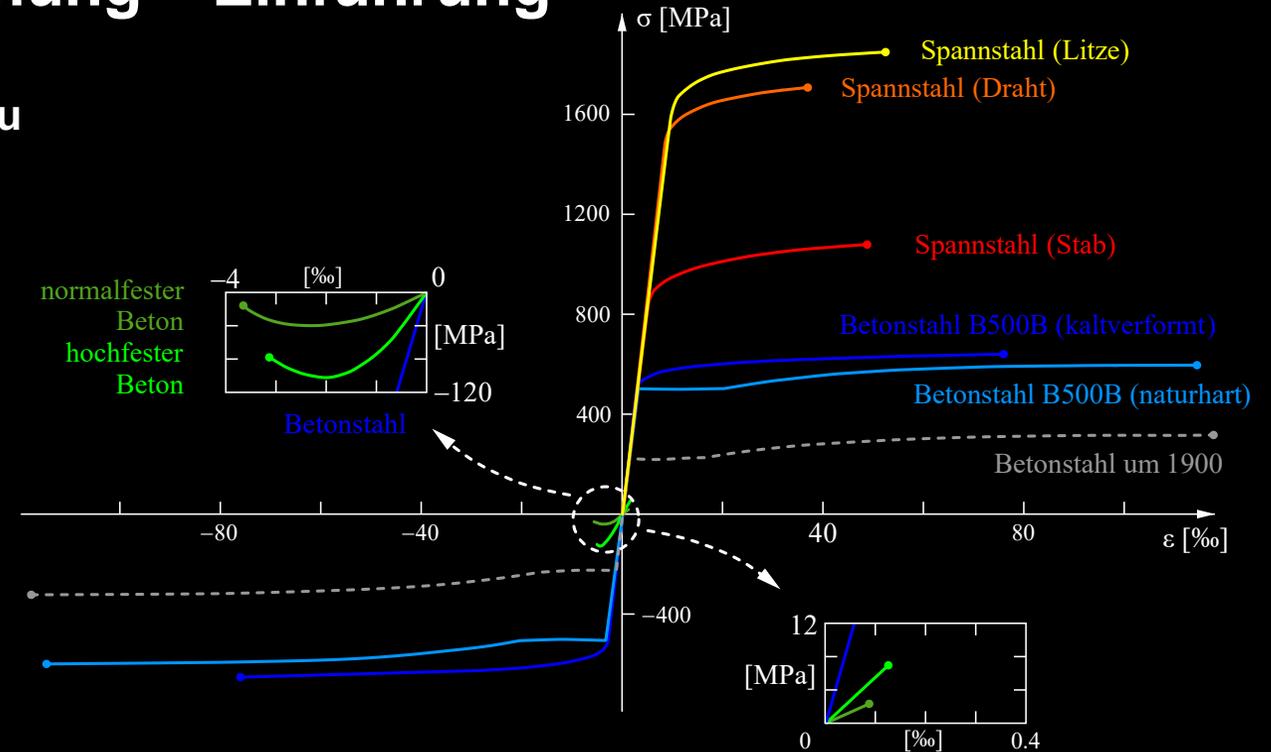


- zwischen dem Spannstahl und dem vom Spannstahl befreiten Tragwerk wirken Verankerungs-, Umlenk- und Reibungskräfte
- im Gesamt-Tragwerk (inkl. Spannstahl) resultiert ein Eigenspannungszustand

# Vorspannung – Einführung

## Ursprung und Prinzip der Vorspannung im Betonbau

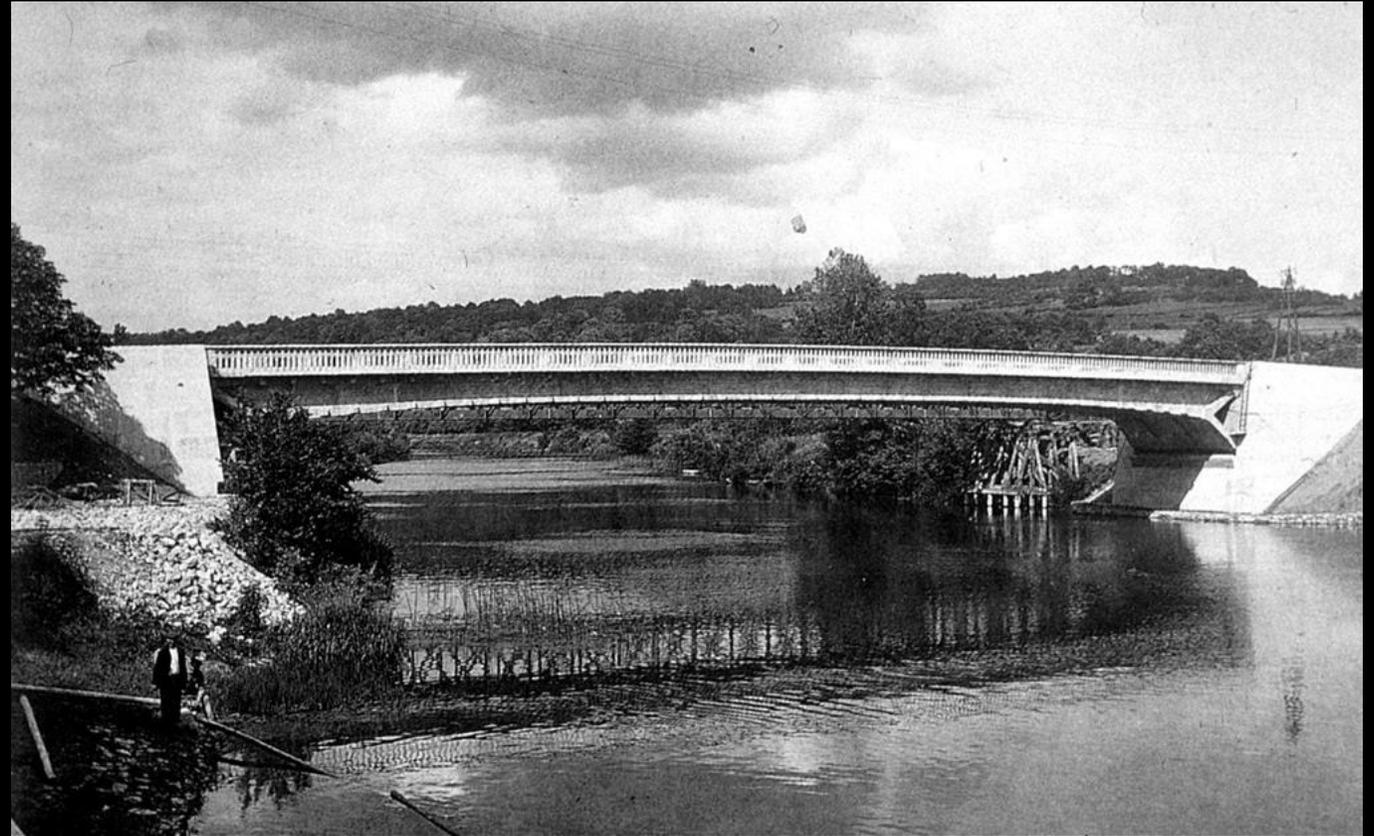
- Umsetzung: Hochfeste Stahldrähte oder Litzen mit Pressen gegen das Betontragwerk spannen



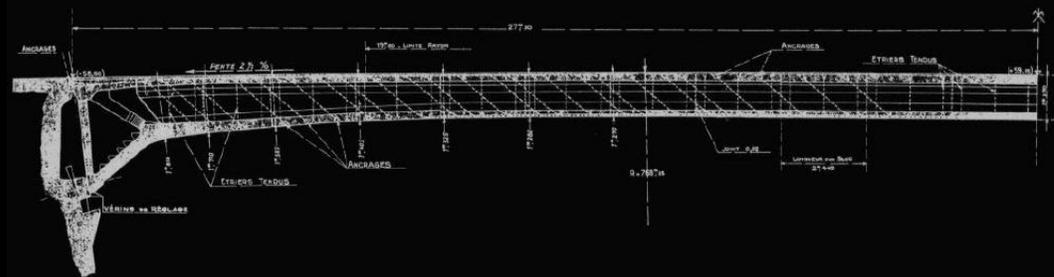
- Erste Versuche und Patente der Vorspannung im Betonbau – mit dem Ziel, Risse zu reduzieren – bereits Ende des 19./Anfang des 20. Jahrhunderts, Vorspannung aber praktisch wirkungslos, da die verwendeten, geringen Stahlspannungen durch Schwinden und Kriechen des Betons und Relaxation der Bewehrung praktisch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



# Vorspannung – Einführung



Marnebrücke Luzancy (1941-46)  
Eugène Freyssinet



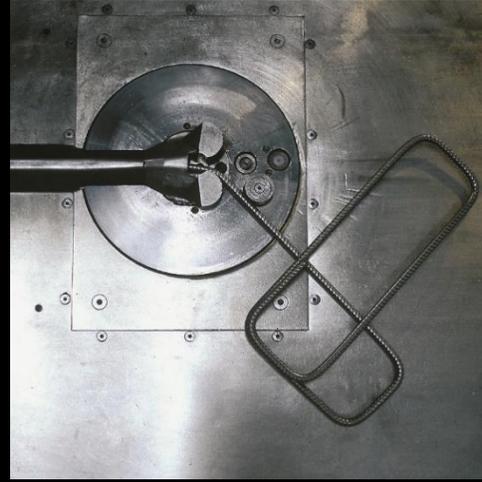
# Vorspannung – Einführung

## 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 vorfabrizierter Elemente möglich
  - **optimierte Bauabläufe**

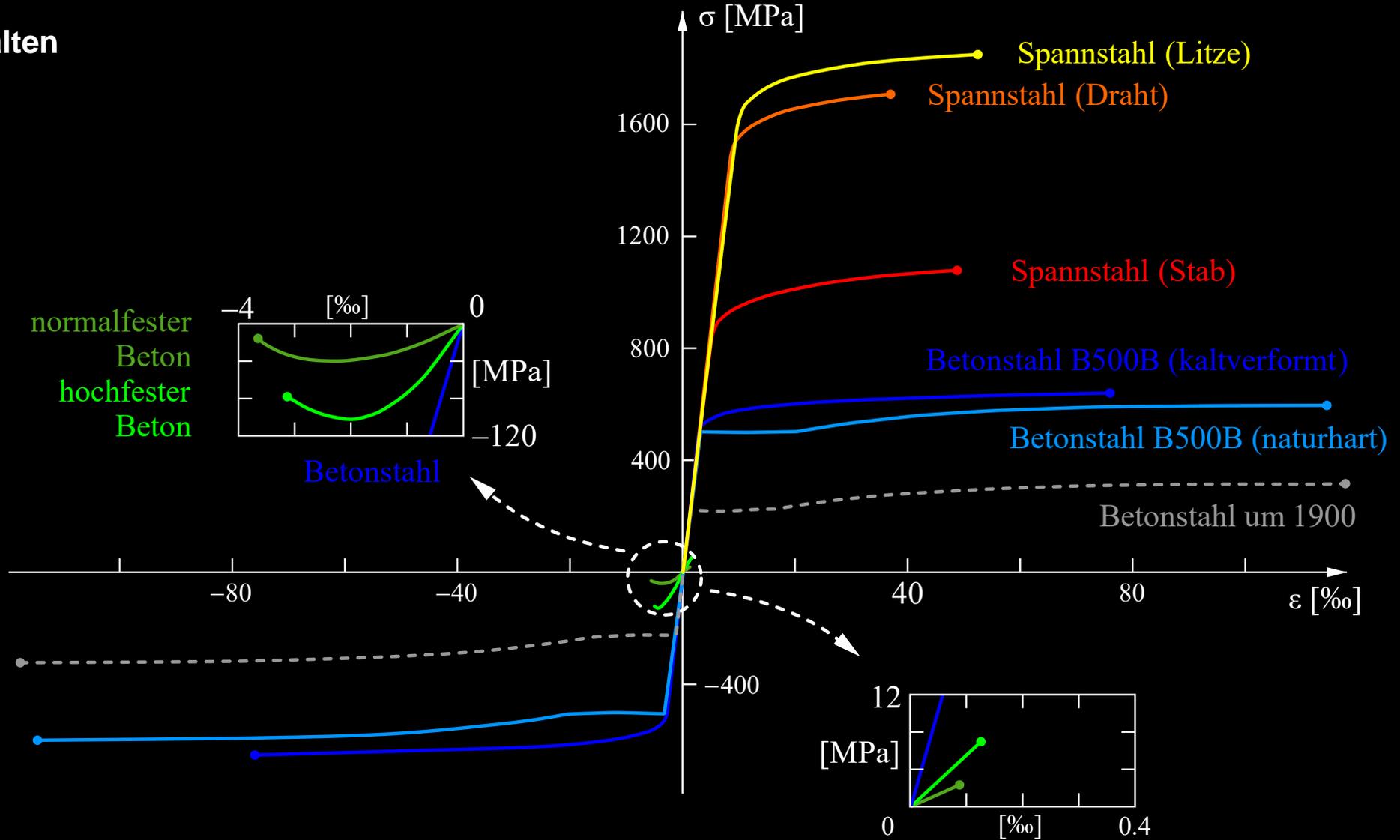
# Vorspannung – Einführung

## Betonstahl - Spannstahl

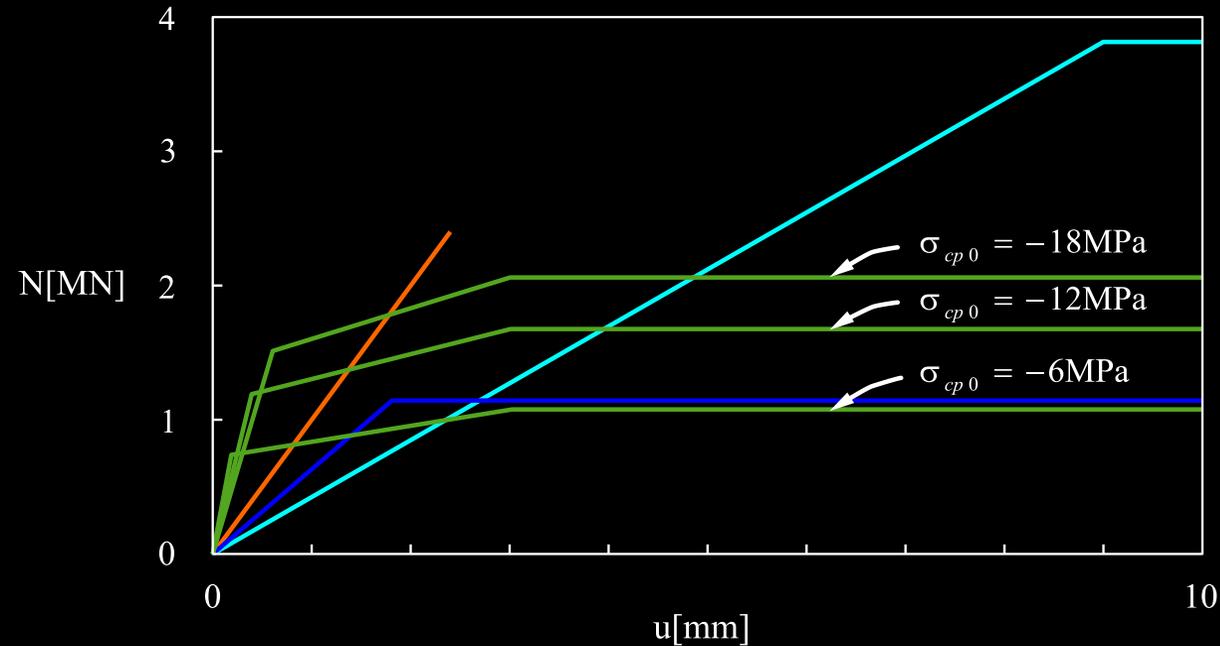
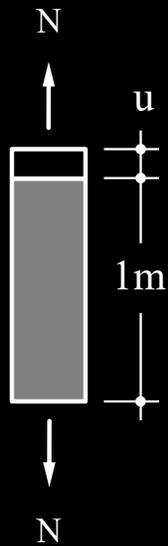


# Vorspannung – Einführung

## Materialverhalten



## Tension chord for CHF 100 / m



- Timber
- Structural steel
- Prestressing steel
- Prestressed concrete

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

1)  $\sigma_{p0} = 1200$  MPa

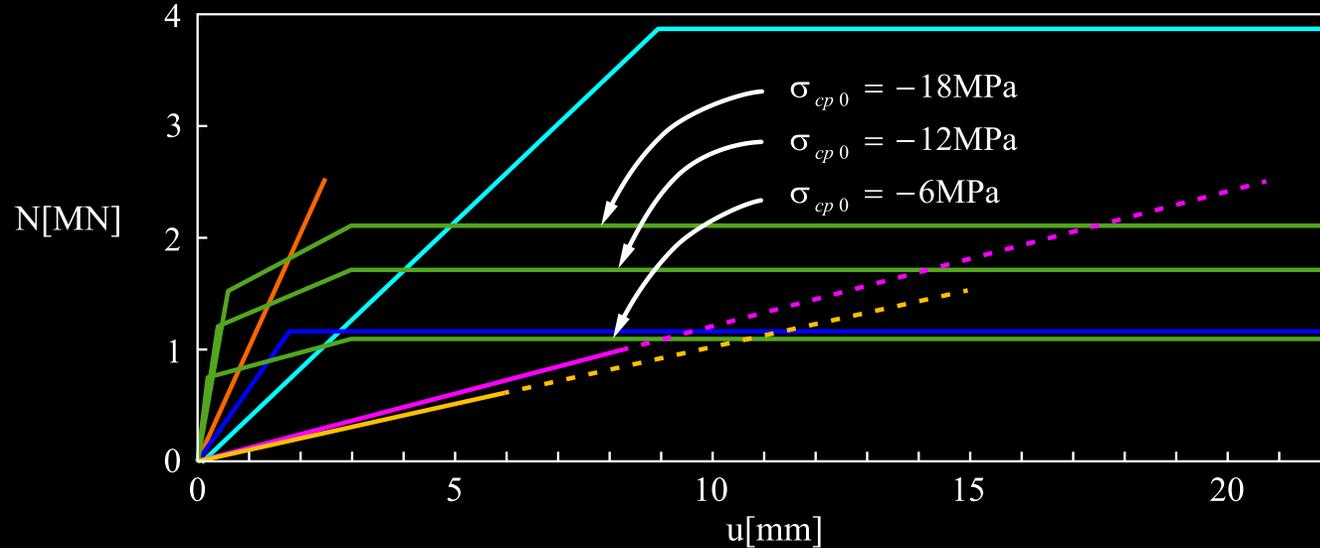
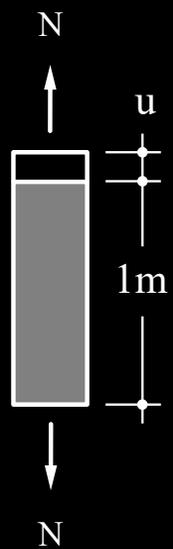
2) incl. formwork and mild steel

3) incl. positioning on site and grouting

4) incl. coating and erection

5) incl. erection and connectors

## Tension chord for CHF 100 / m



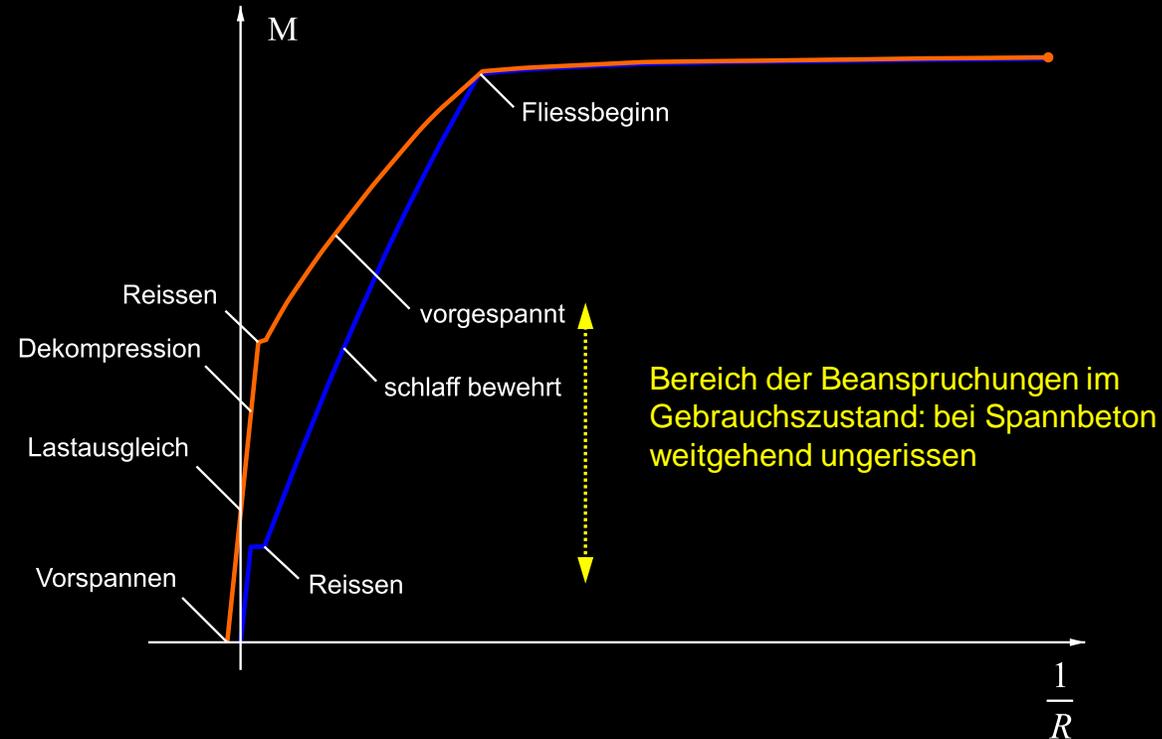
- Timber
- Structural steel
- Prestressing steel
- Prestressed concrete
- CFRP (short-term)
- ⋯ CFRP (long-term)
- GFRP (short-term)
- ⋯ GFRP (long-term)

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

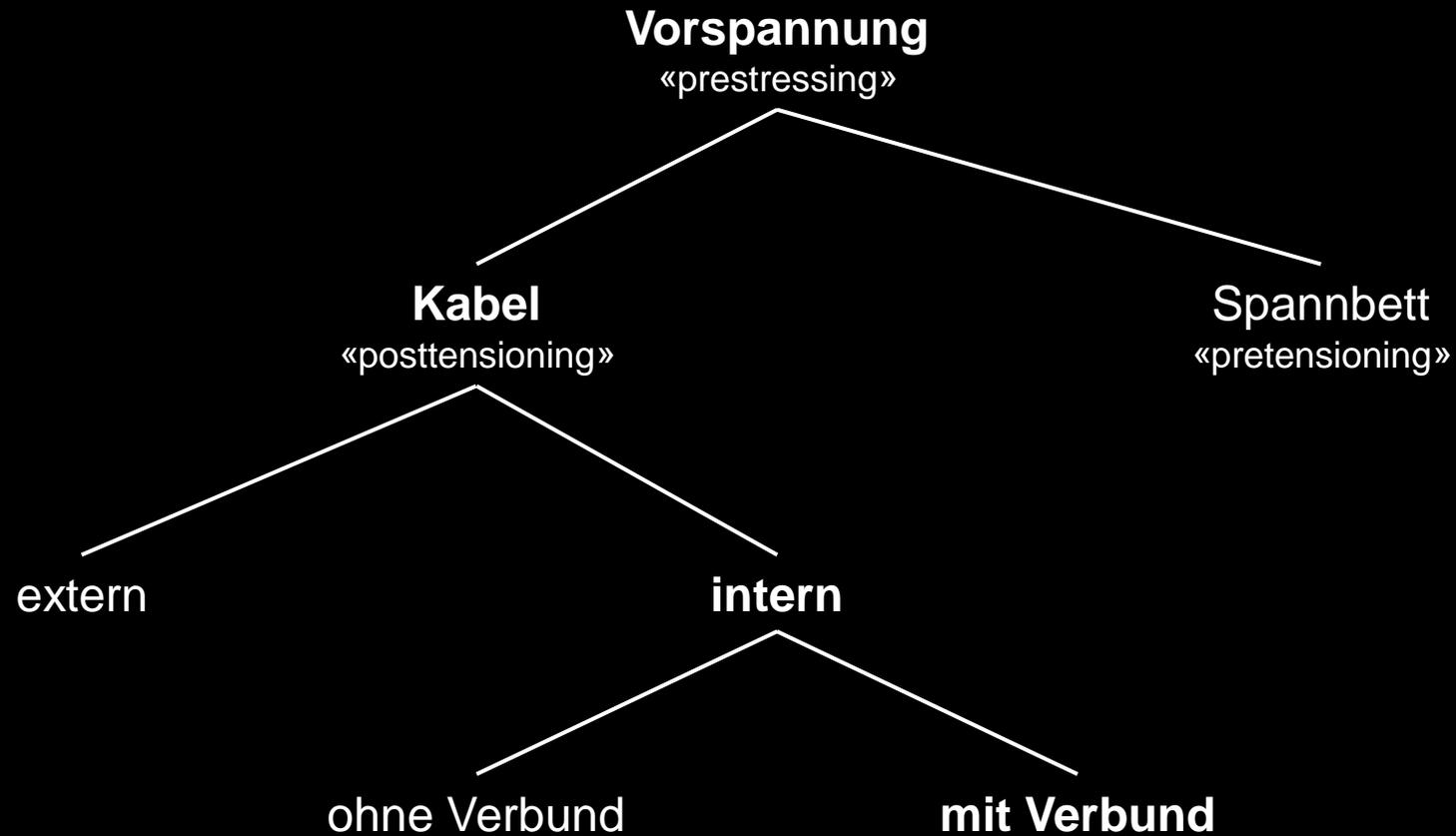
## Biegetragverhalten



- 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

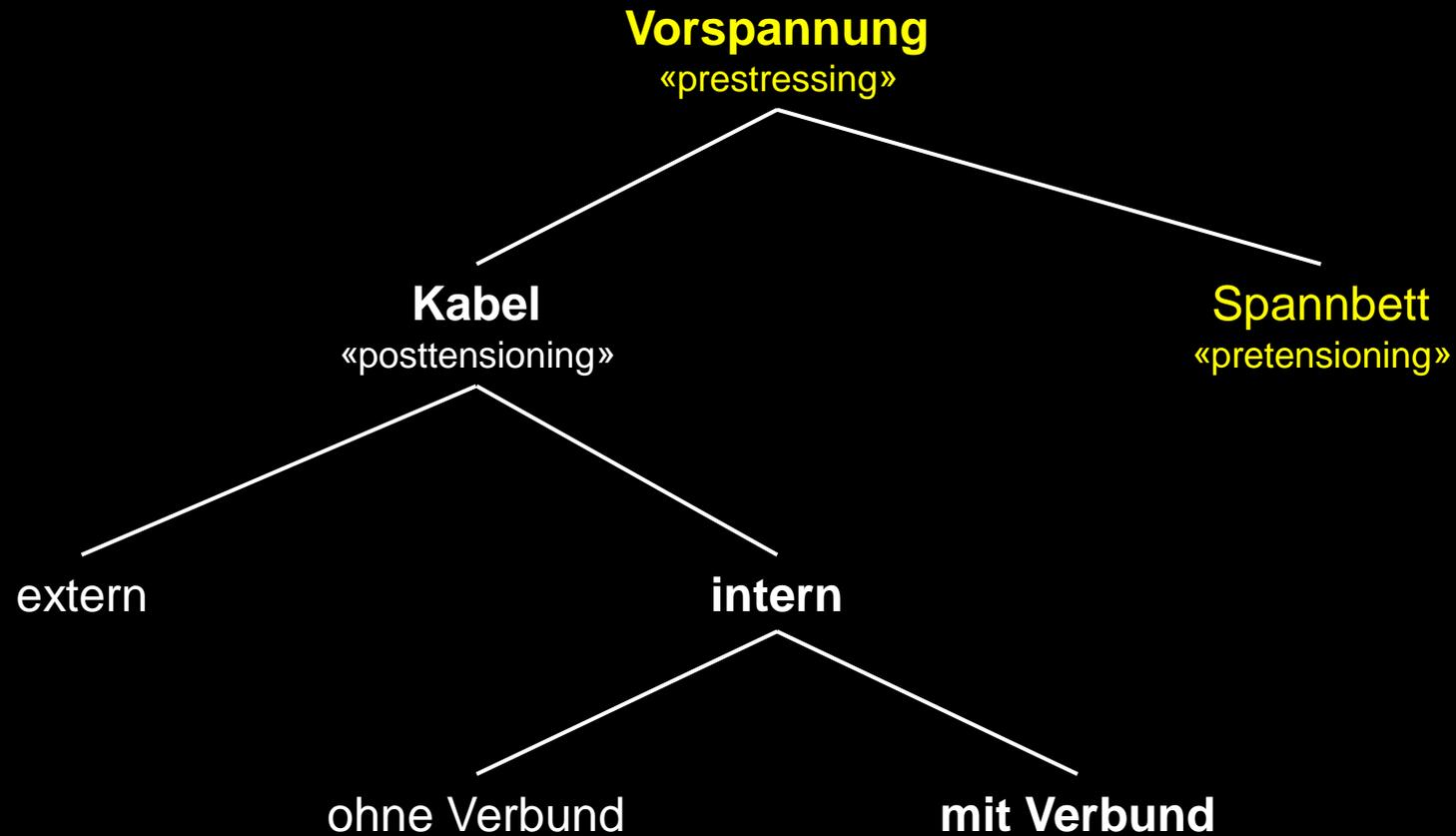
# Vorspannung – Einführung

## Arten von Vorspannung



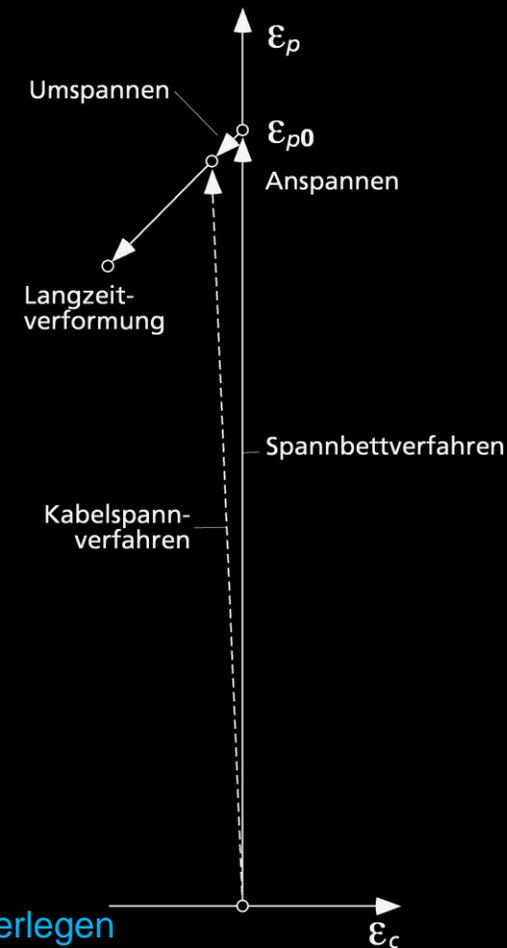
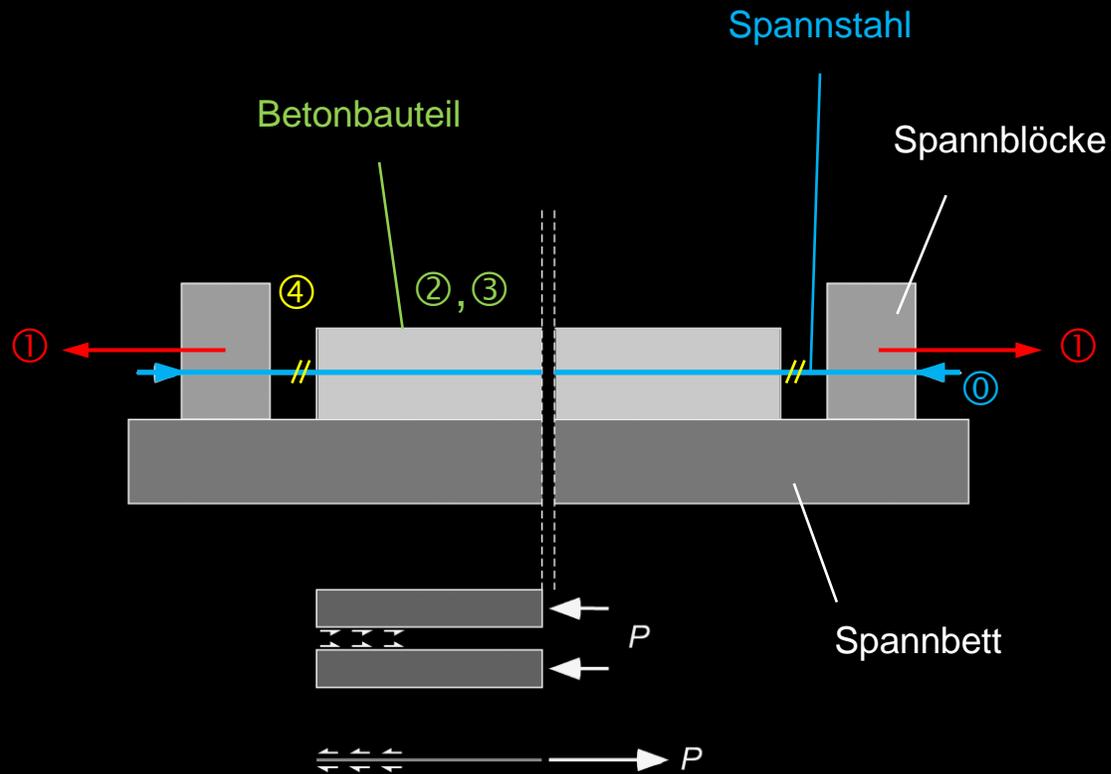
# Vorspannung – Einführung

## Arten von Vorspannung



# Vorspannung – Einführung

## Spannbettverfahren



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

# Vorspannung – Einführung

## Spannbettverfahren – Vorfabrikation allgemein



# Vorspannung – Einführung

## Spannbettverfahren – Vorfabrikation allgemein



[Video: PAULSpannbeton über YouTube]

# Vorspannung – Einführung

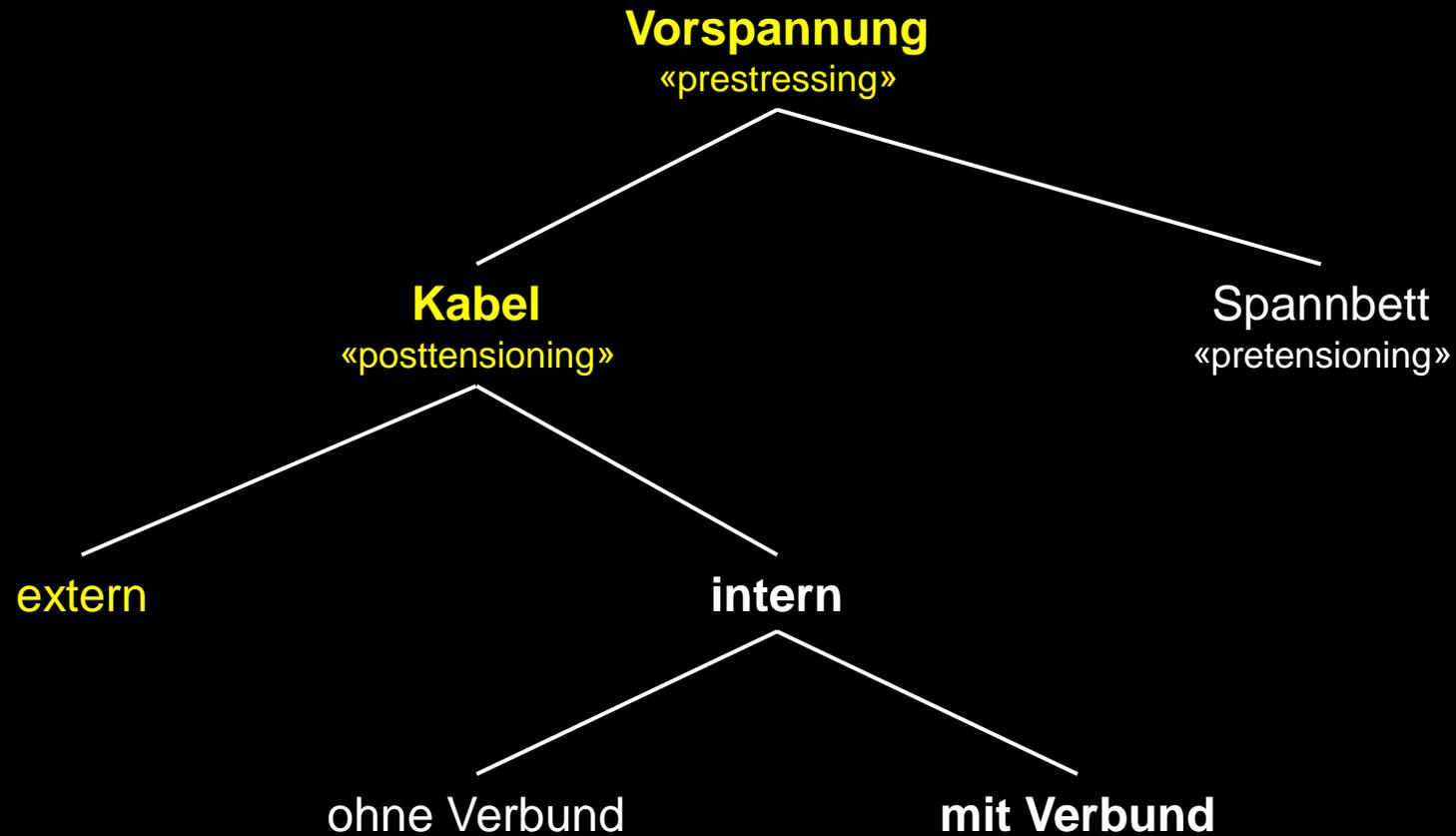
## Spannbettverfahren – Industrielle Produktion (Hohlkörperdeckenelemente)



[Fotos: Mabetón, Spiroll]

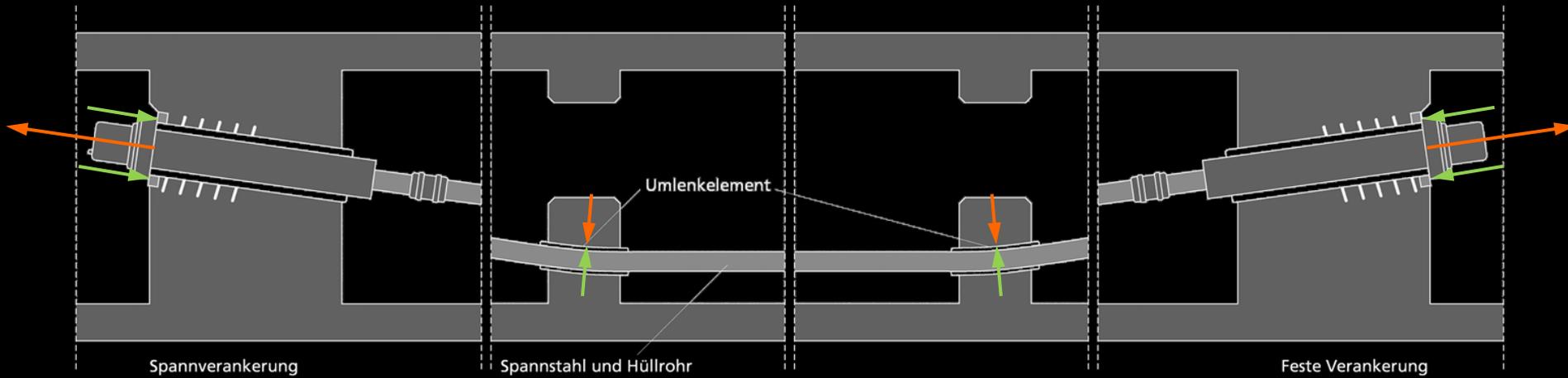
# Vorspannung – Einführung

## Arten von Vorspannung



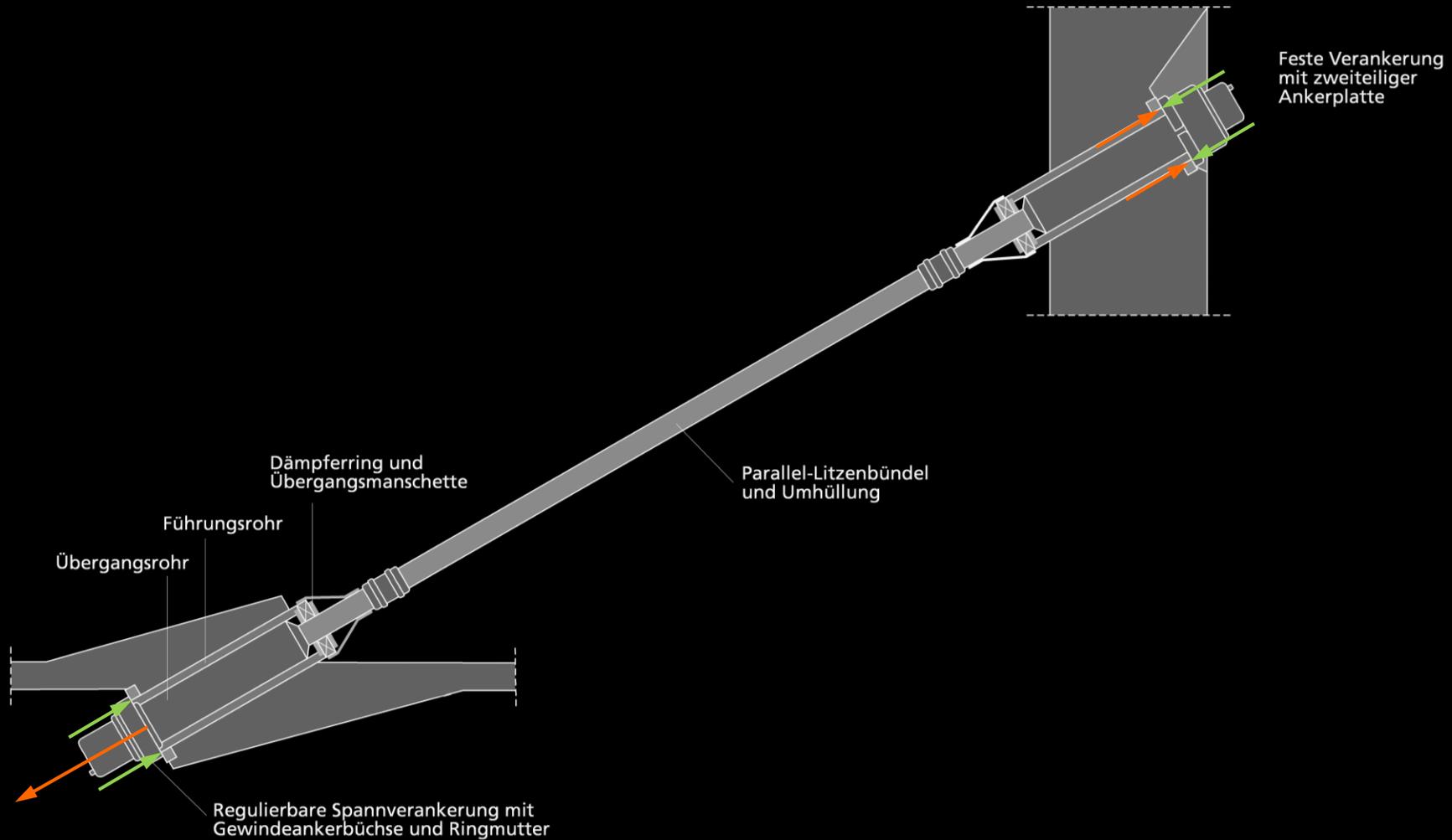
# Vorspannung – Einführung

## 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

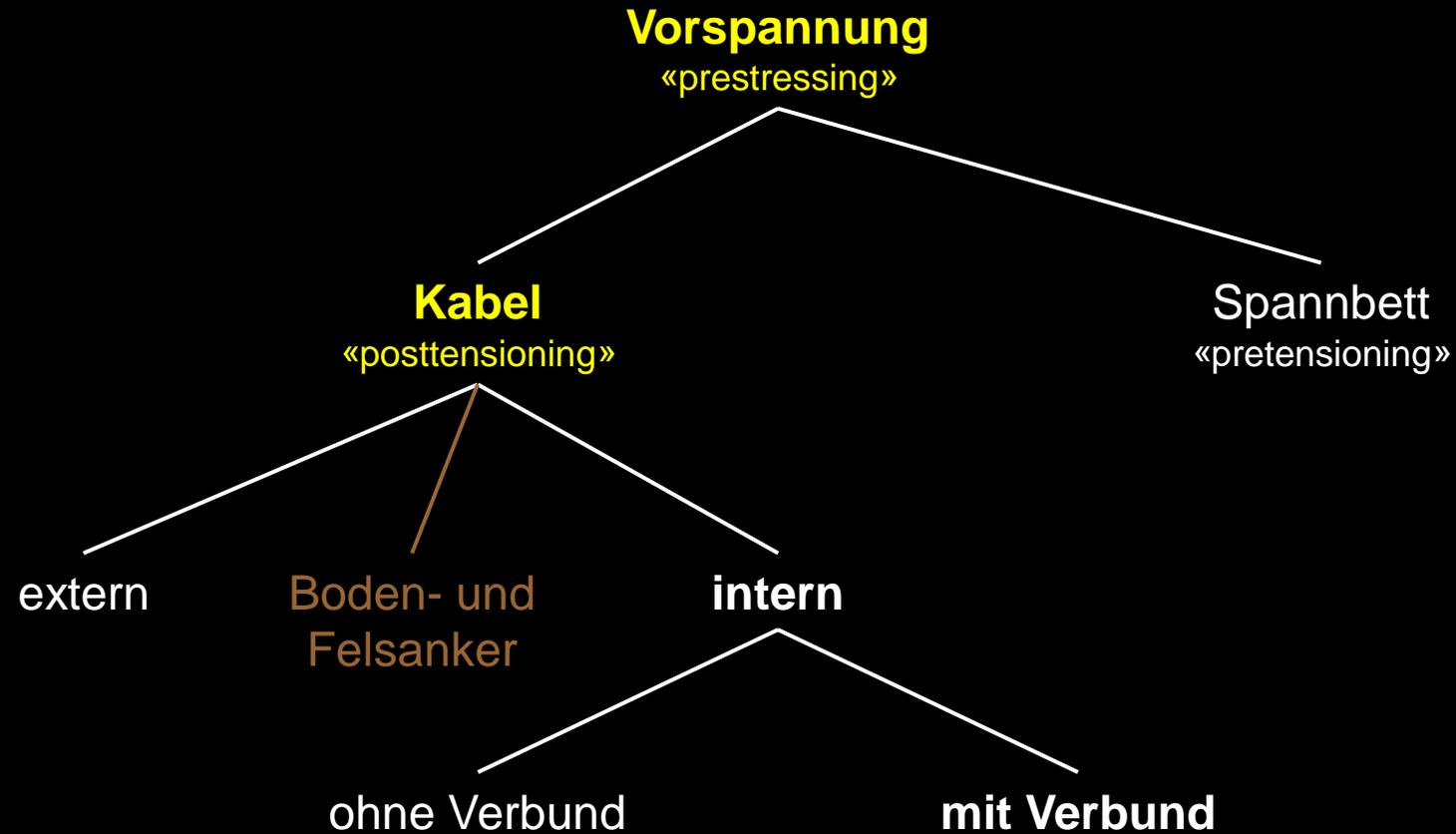
## Schrägseilbrücken / Schrägkabel: Sunnibergbrücke



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).

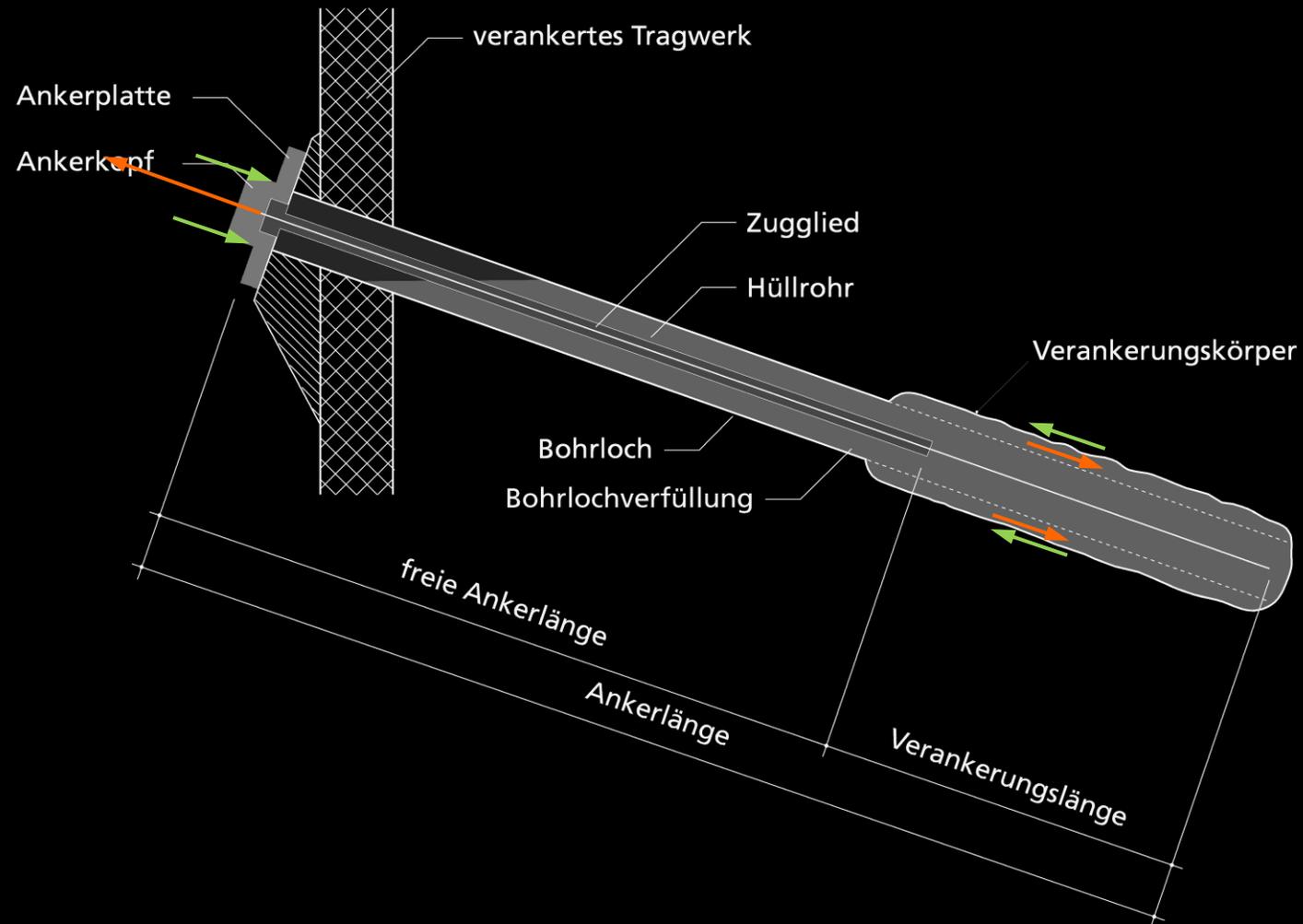
# Vorspannung – Einführung

## Arten von Vorspannung



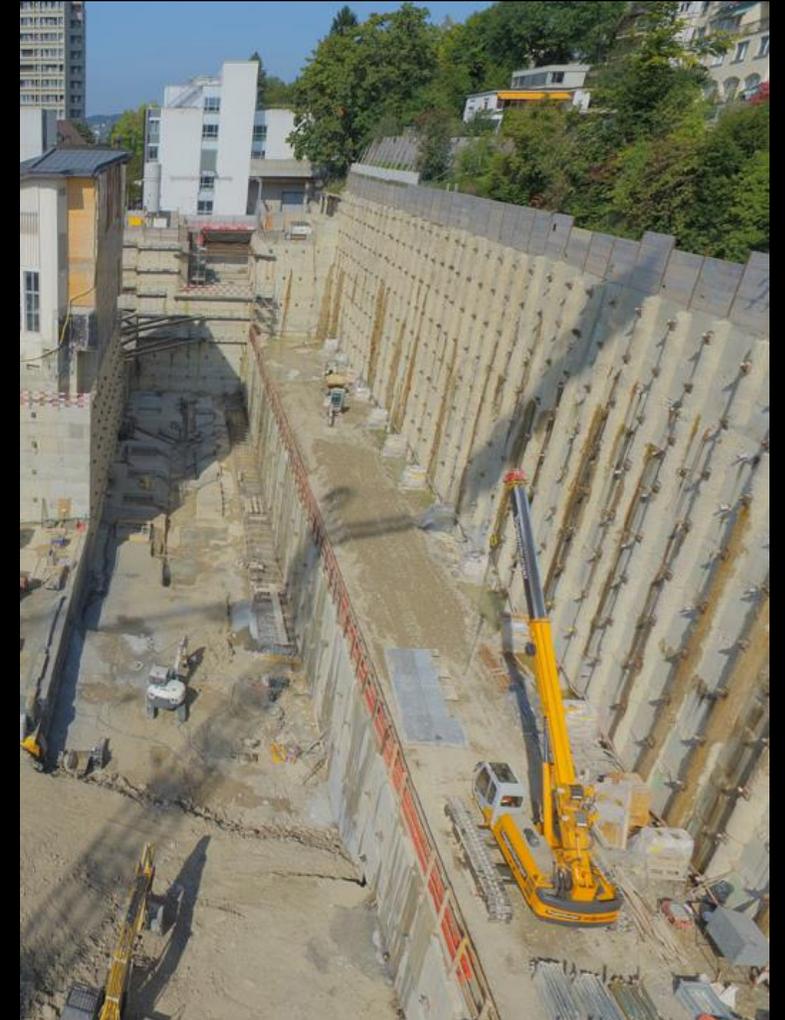
# Vorspannung – Einführung

## Boden- und Felsanker



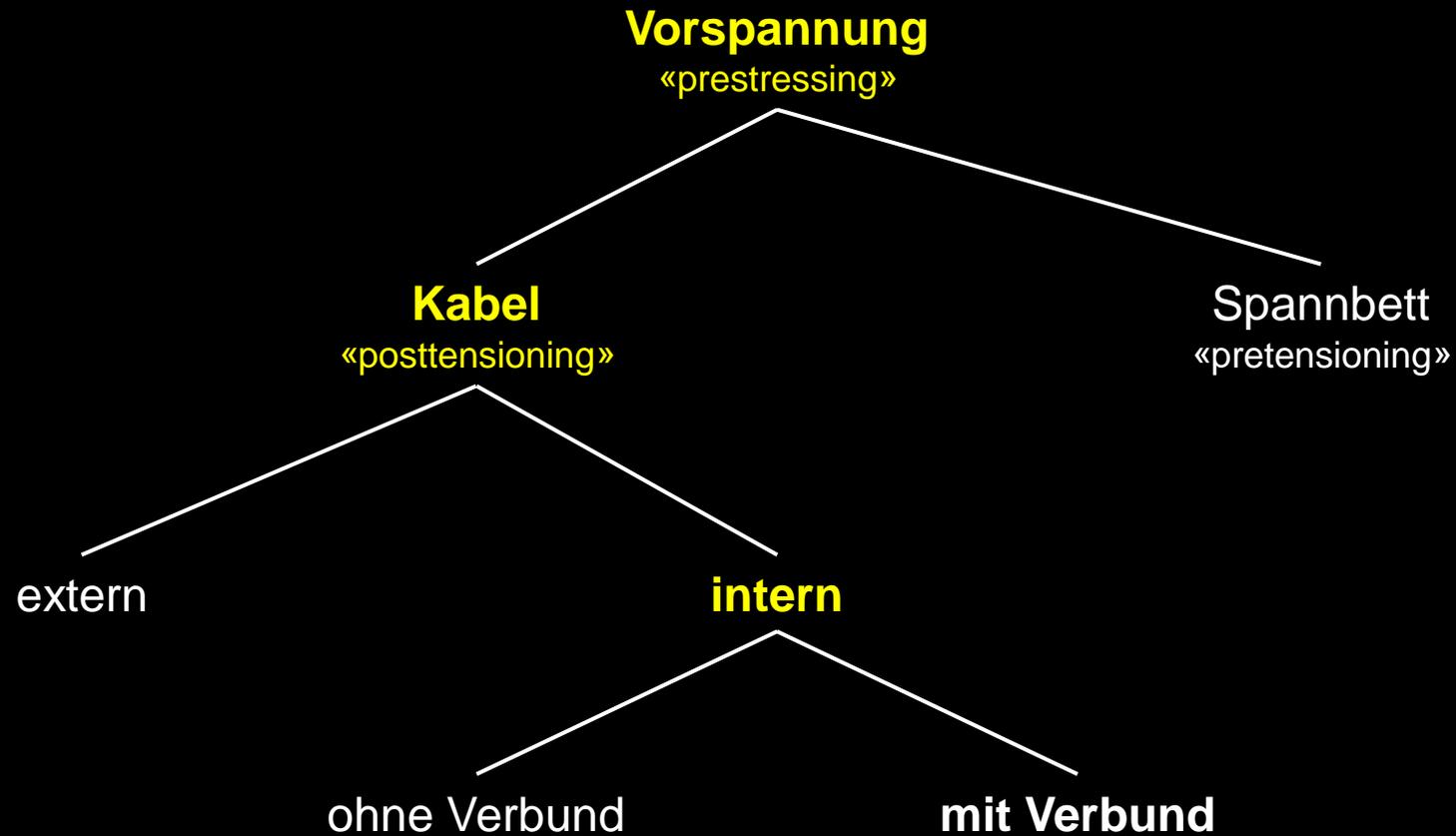
# Vorspannung – Einführung

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



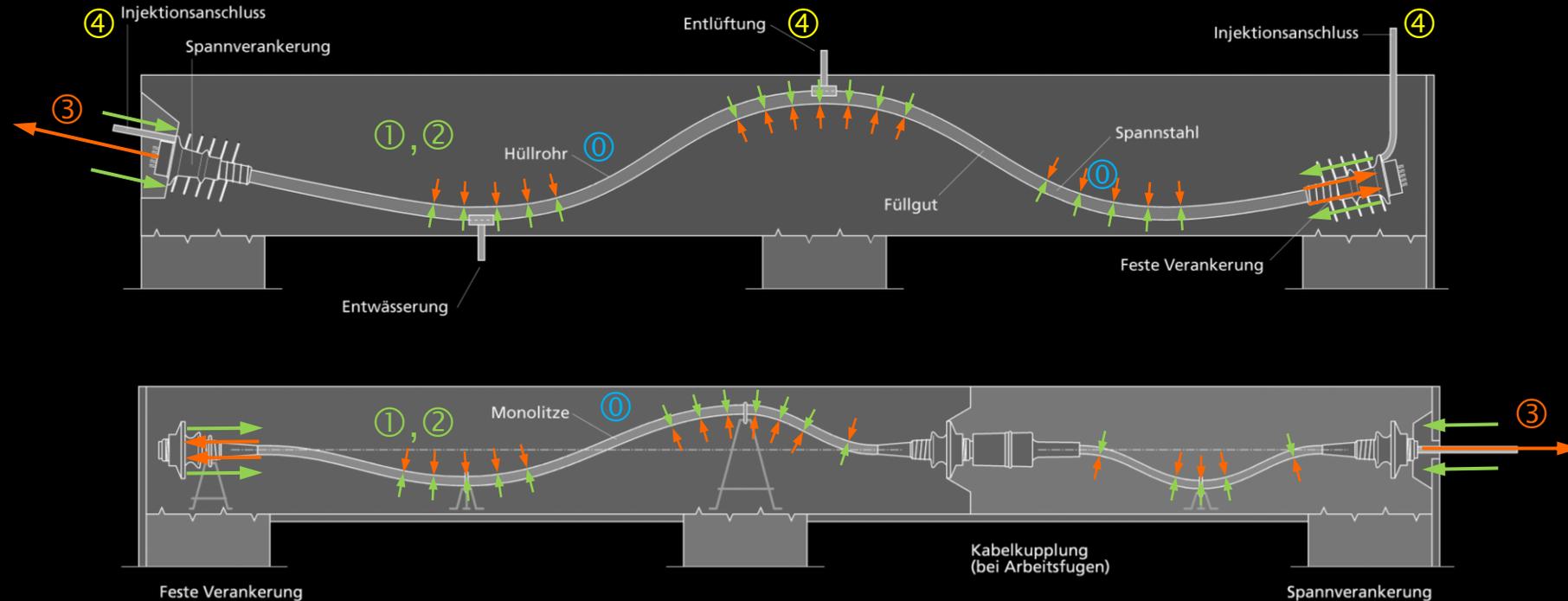
# Vorspannung – Einführung

## Arten von Vorspannung



# Vorspannung – Einführung

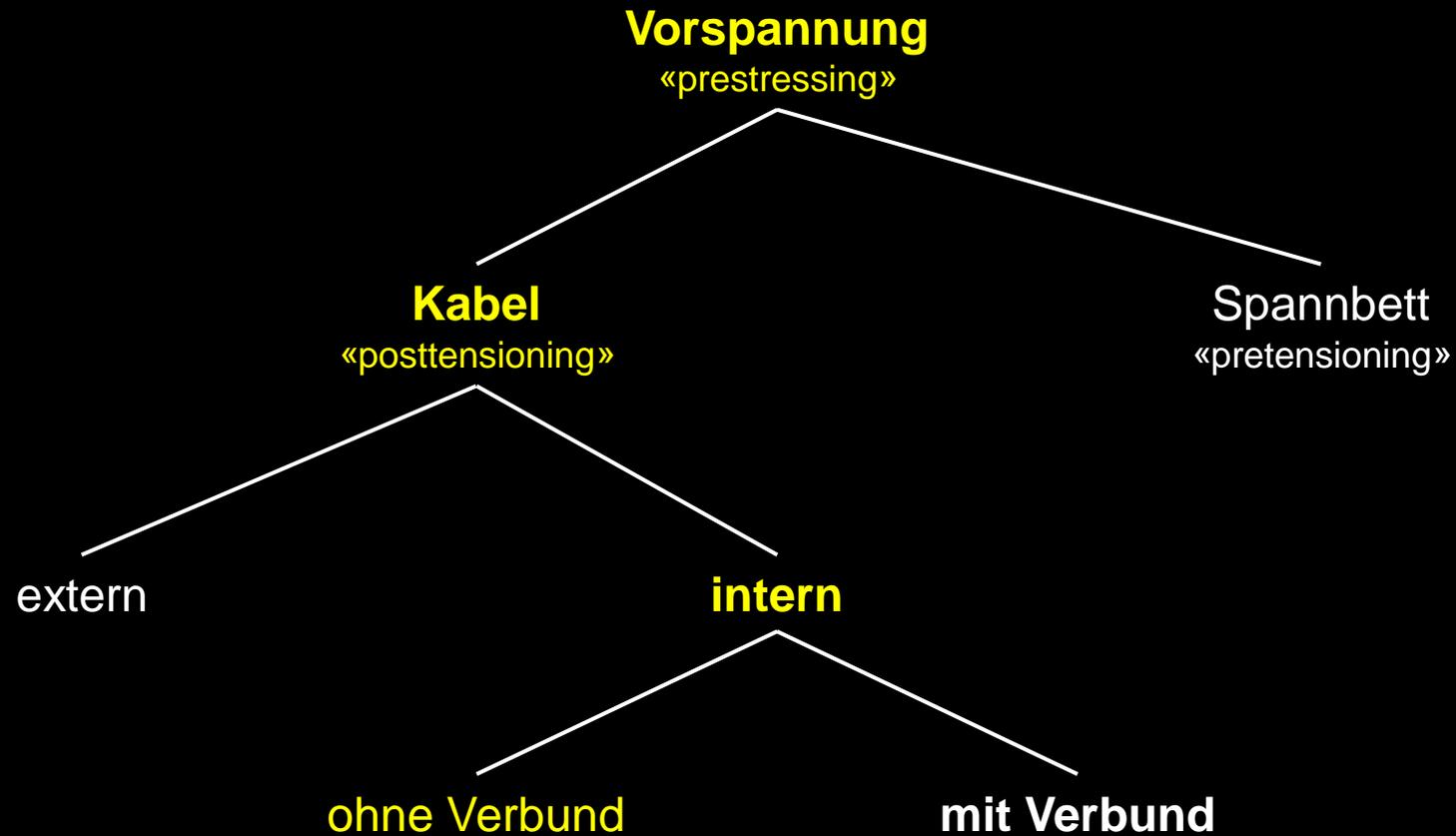
## Interne Kabelvorspannung mit Verbund / ohne Verbund (Monolitzen)



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

# Vorspannung – Einführung

## Arten von Vorspannung



# Vorspannung – Einführung

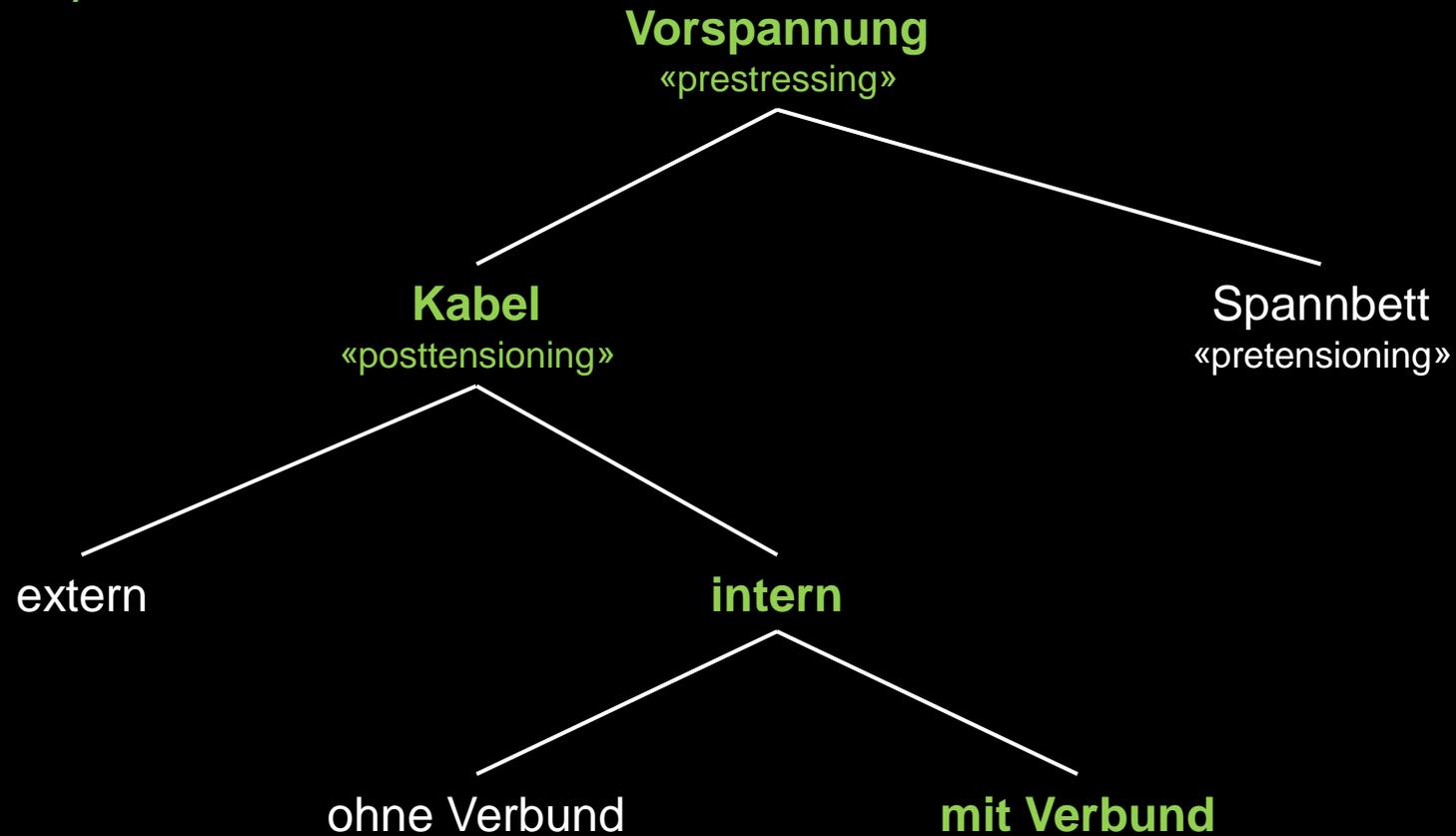
Interne Vorspannung ohne Verbund: Flachdecke (Monolitzen)



# Vorspannung – Einführung

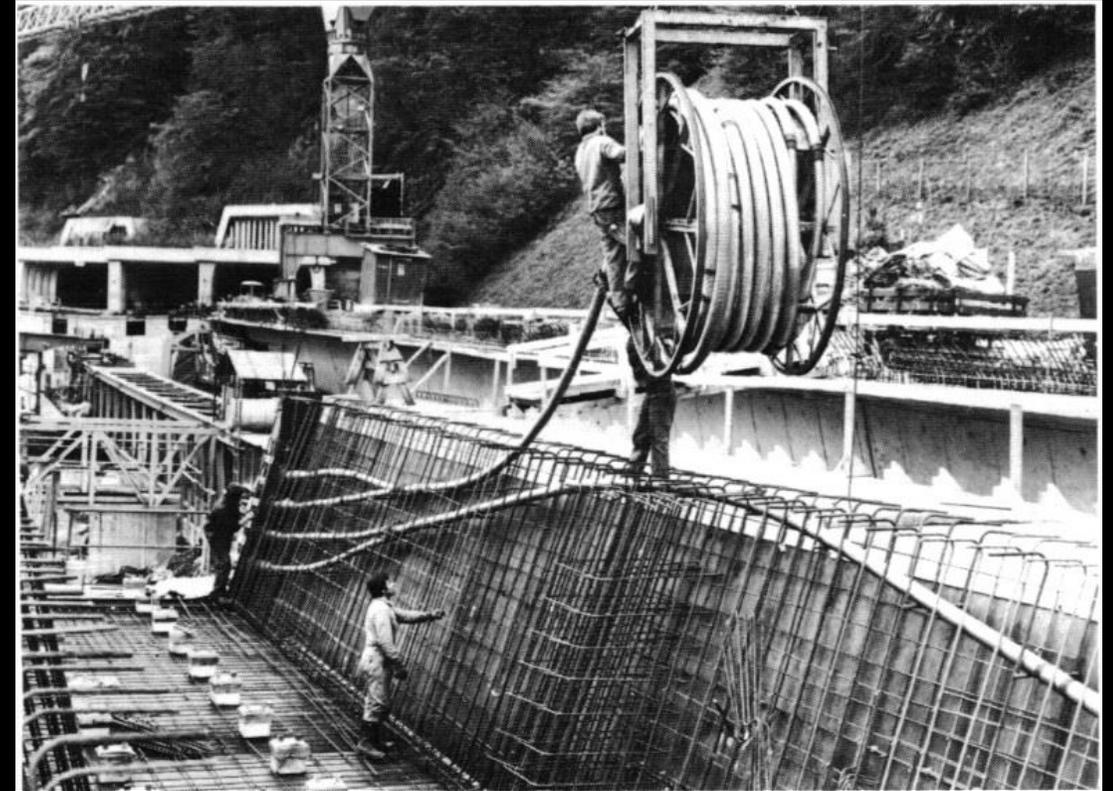
Arten von Vorspannung

Vorlesungsstoff (primär)



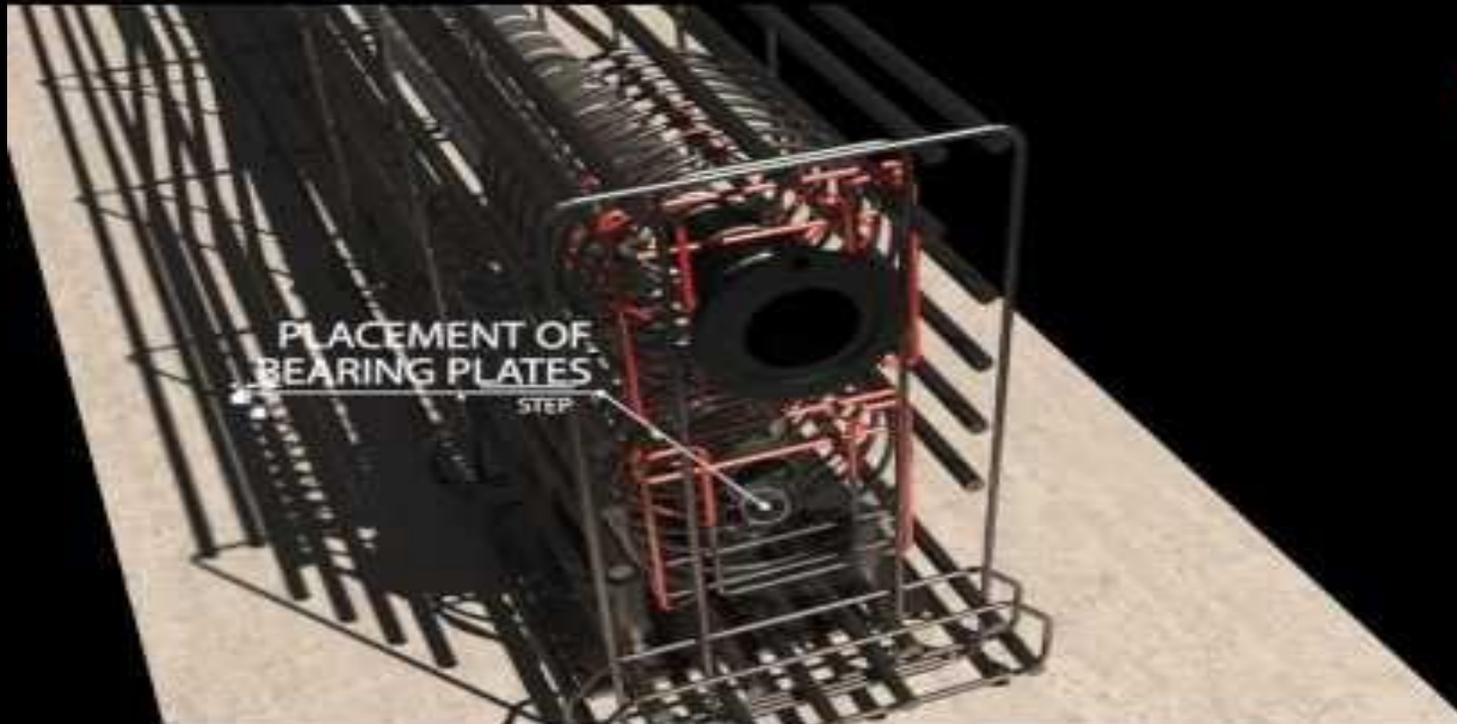
# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund: Brückensteg



# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund



[Video: LMK HiSCS über YouTube]

# Vorspannung – Einführung

## Spanngliedkategorien

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

## Drahtspannsysteme (heute selten, ausser für Schrägkabel)

Drahtbündel mit Drähten  $\text{Ø}3.0 \dots 10.0$  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 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.  $f_{pk} = 1860$  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 Spannfirmen 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

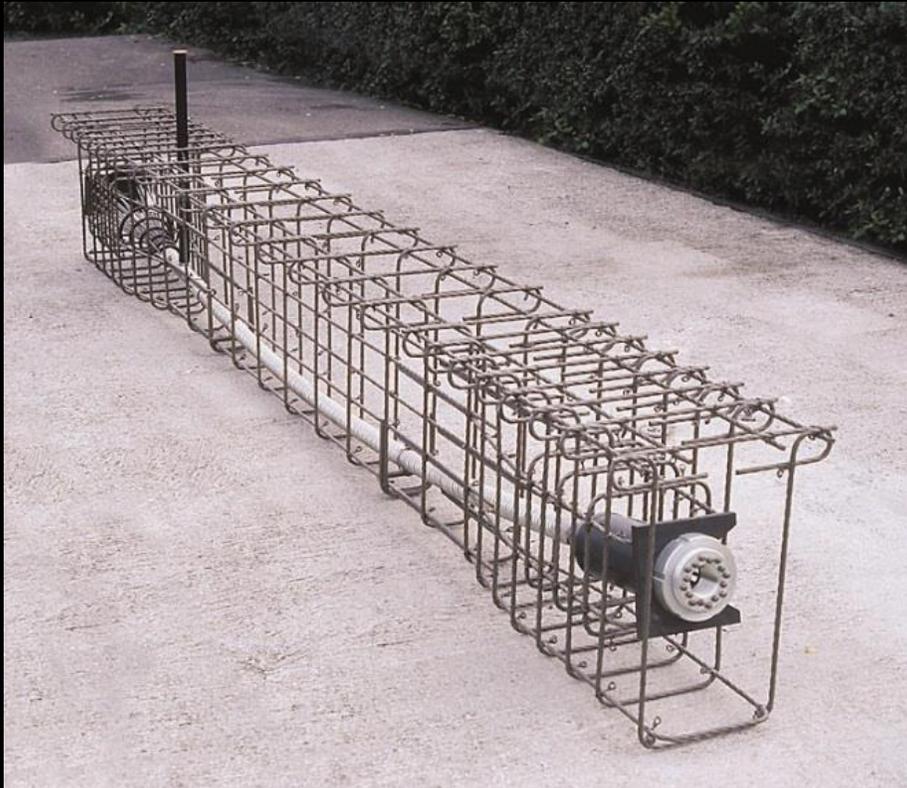


→ Ortsbeton (in Kabeln)

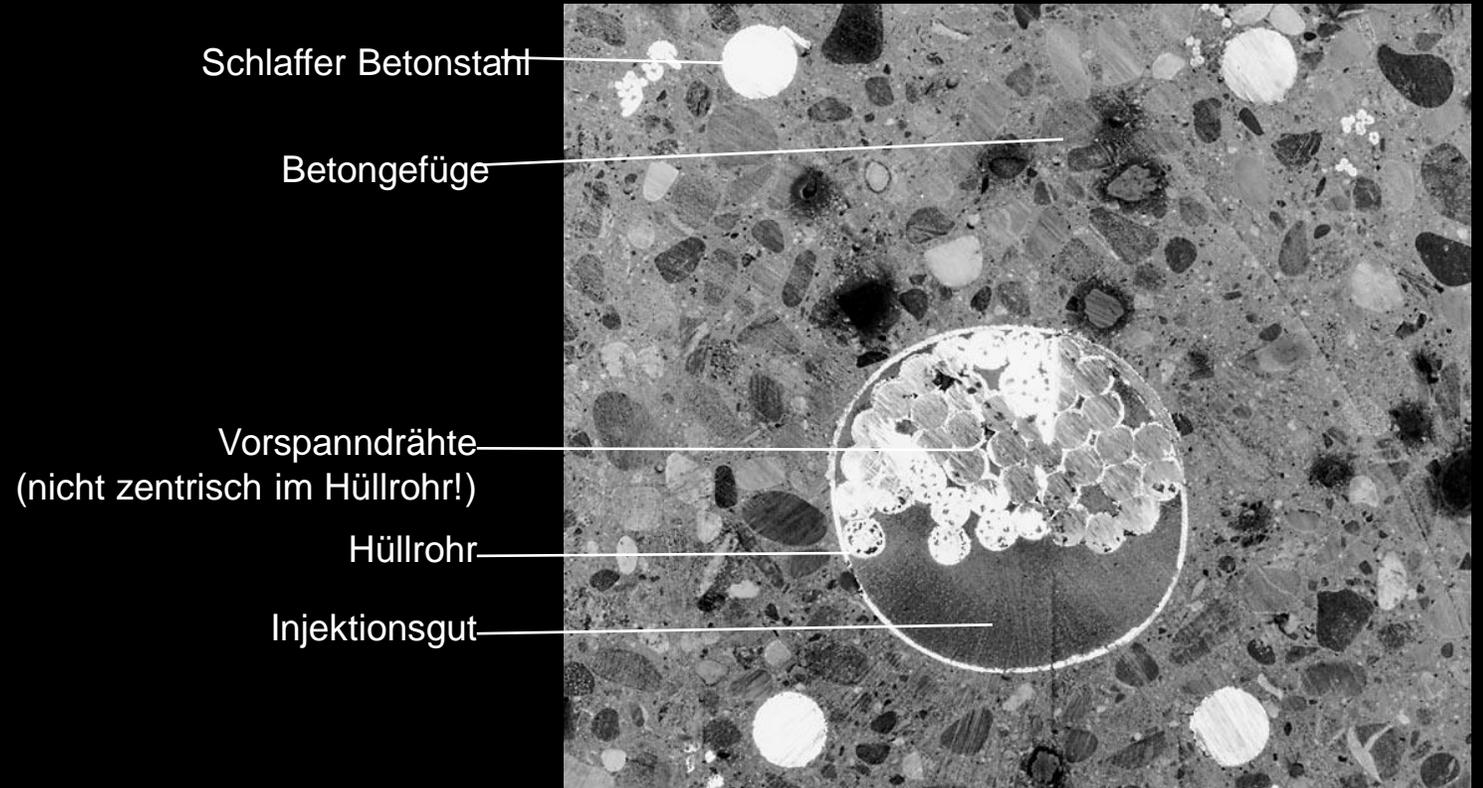
- Für besondere Anforderungen (Schrägseilbrücken) Korrosionsschutz durch Verzinkung und / oder Ummantelung oder (billiger) Epoxidharzbeschichtung der Drähte oder Litzen
- Weitere Formen (vollverschlossene Seile etc.) → Hängebrücken etc.
- Herstellung weltweit, Litzenspannsysteme heute sehr verbreitet

# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund



## Querschnitt durch ein Spannglied



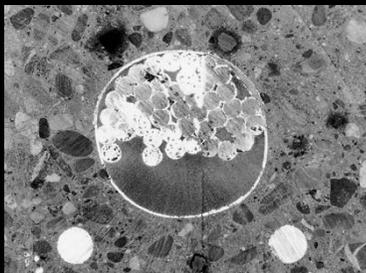
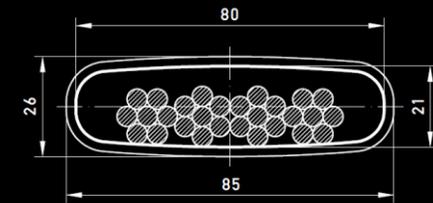
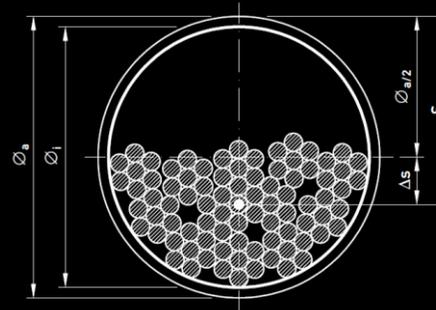
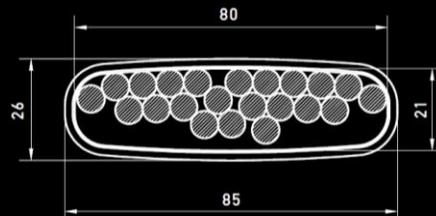
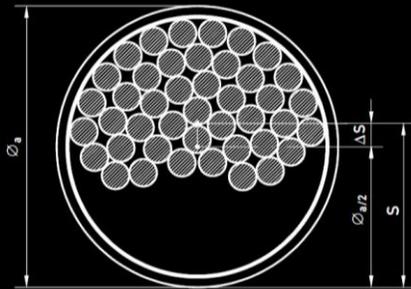
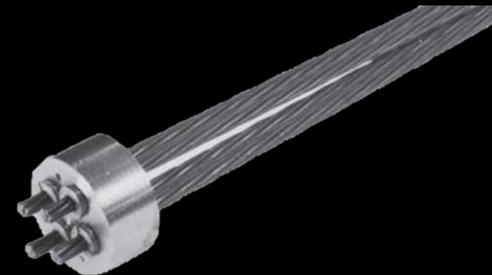
# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Draht- und Litzensysteme

**Drahtspannsysteme**  
(heute selten)

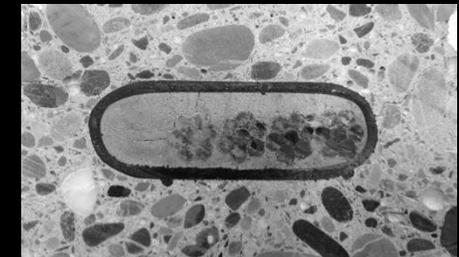


**Litzenspannsysteme**  
(heute üblich)



**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



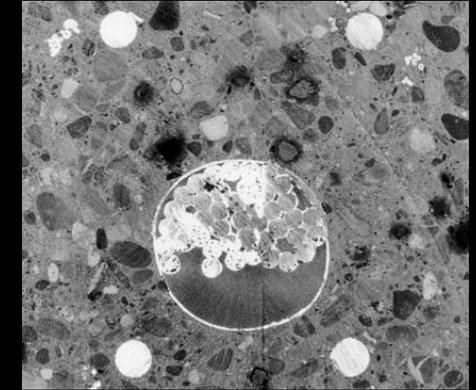
- Kupplung (fest)



- Hüllrohre



- Querschnitt

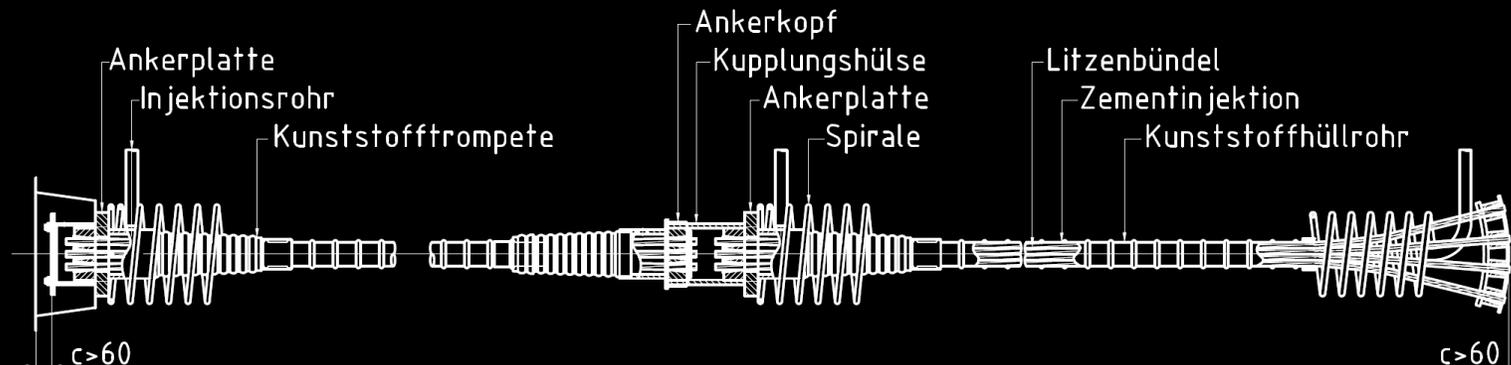


- Beispiel: Litzen-Spannglied Kategorie b (Quelle: Stahlton)

Spannbare Verankerung

Kupplung

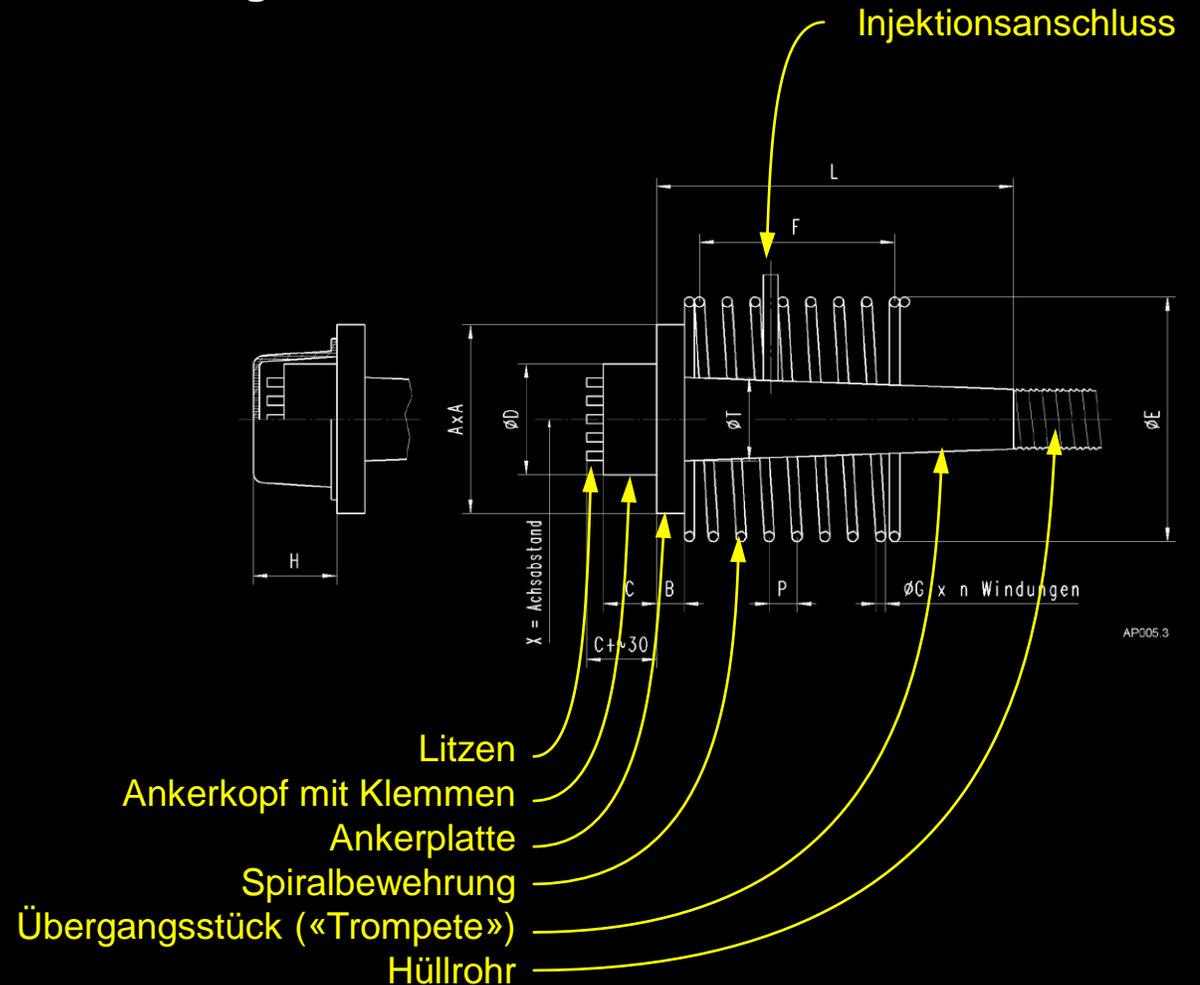
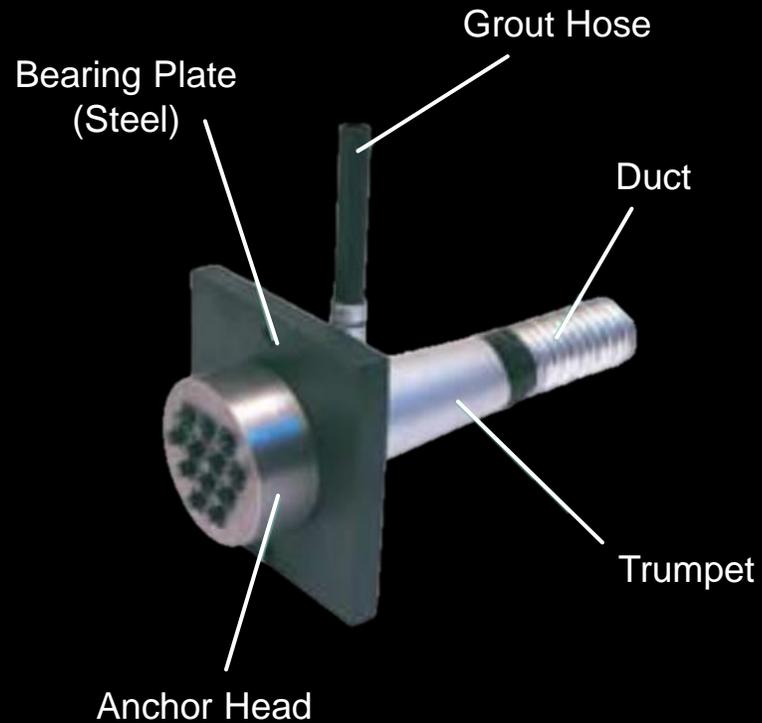
Feste Verankerung



# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Spannbare Verankerungen

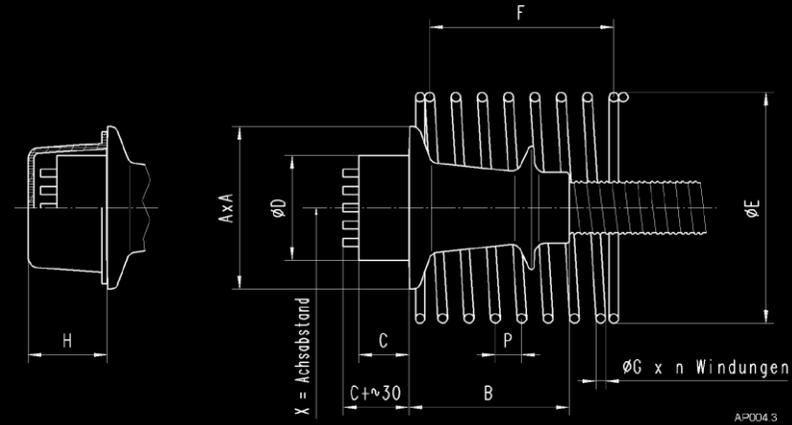
Verankerung mit Ankerplatte  
(VSL Typ E)



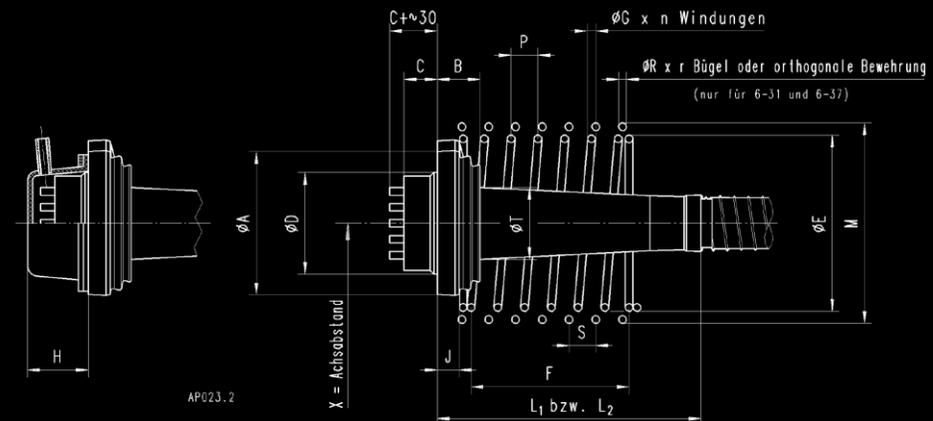
# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Spannbare Verankerungen

Mehrflächenverankerung (Guss)  
(VSL Typ EC)



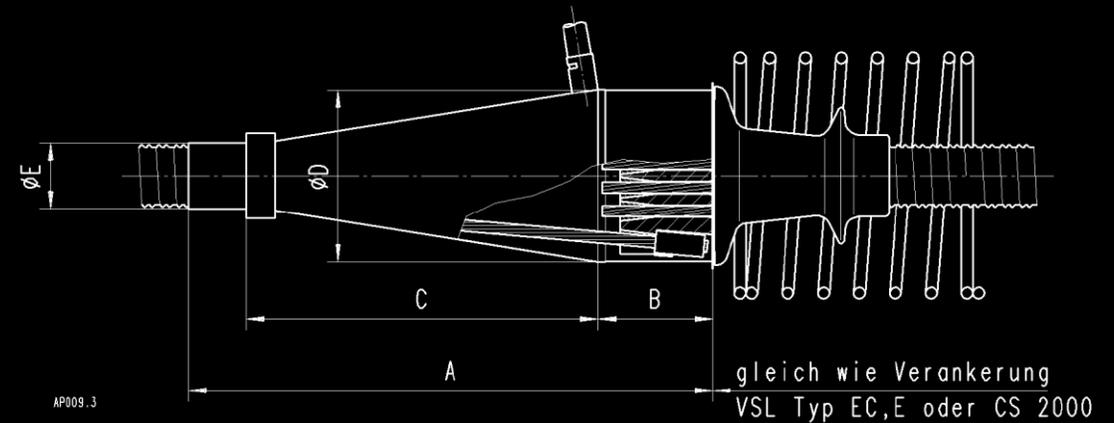
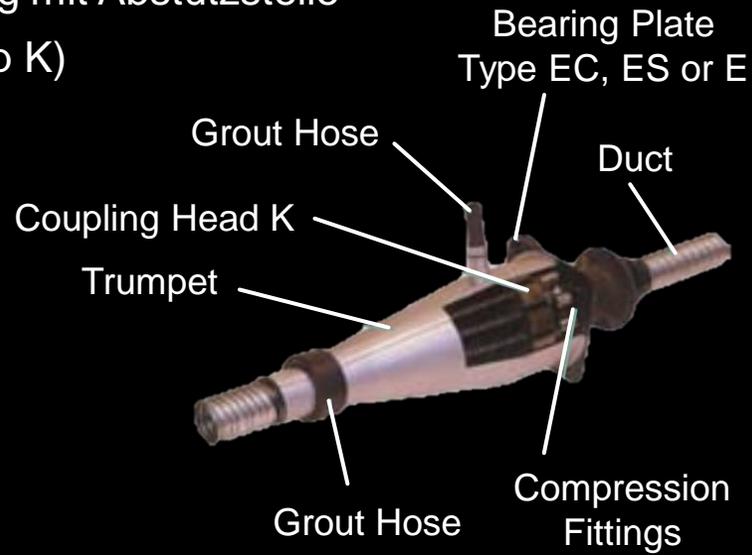
VSL Typ CC  
(Composite)



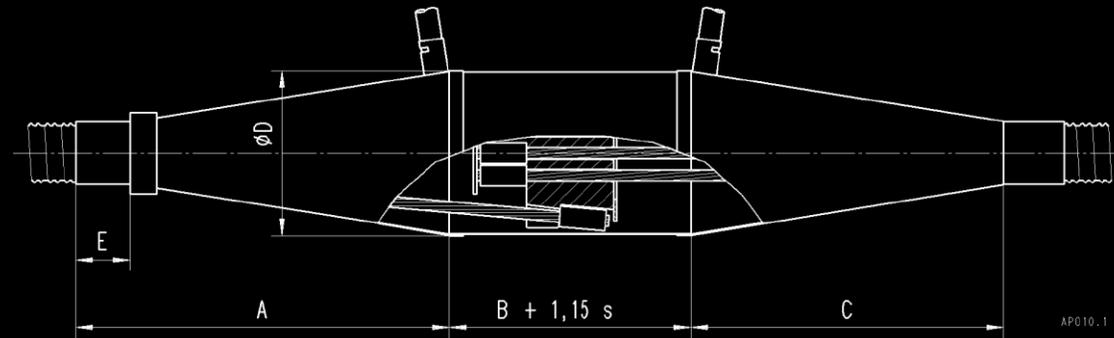
# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Kupplungen

Kupplung mit Abstützstelle  
(VSL Typ K)



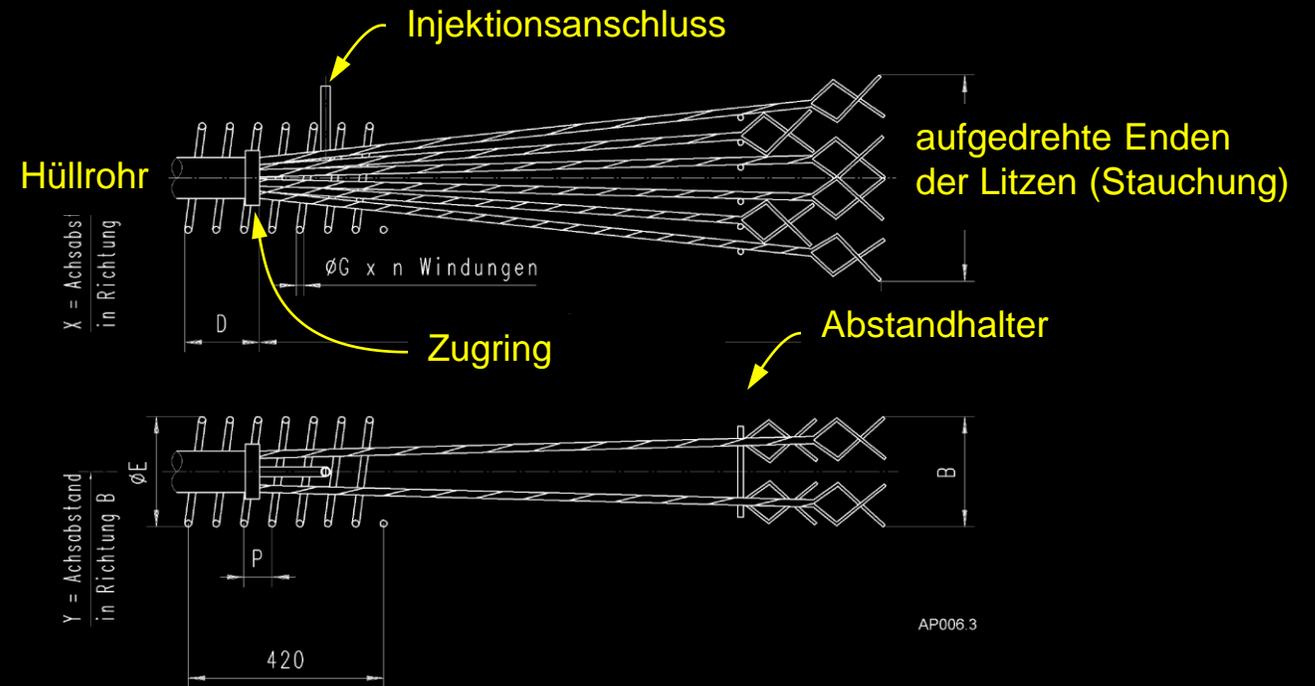
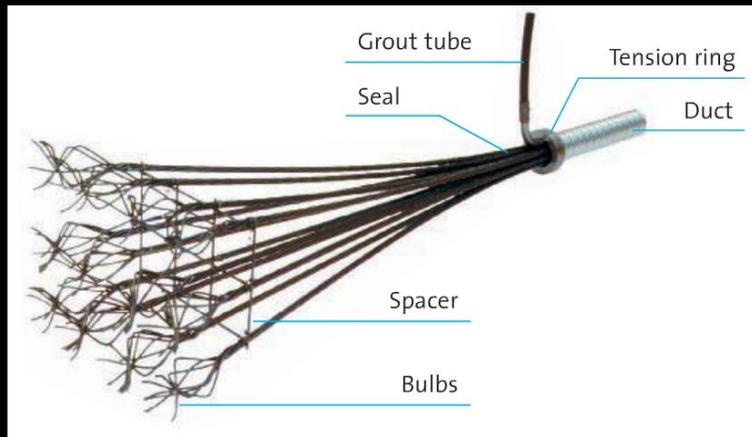
Gleitkupplung (selten)  
(VSL Typ V)



# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Feste Verankerungen

Verbundanker  
(VSL Typ H)

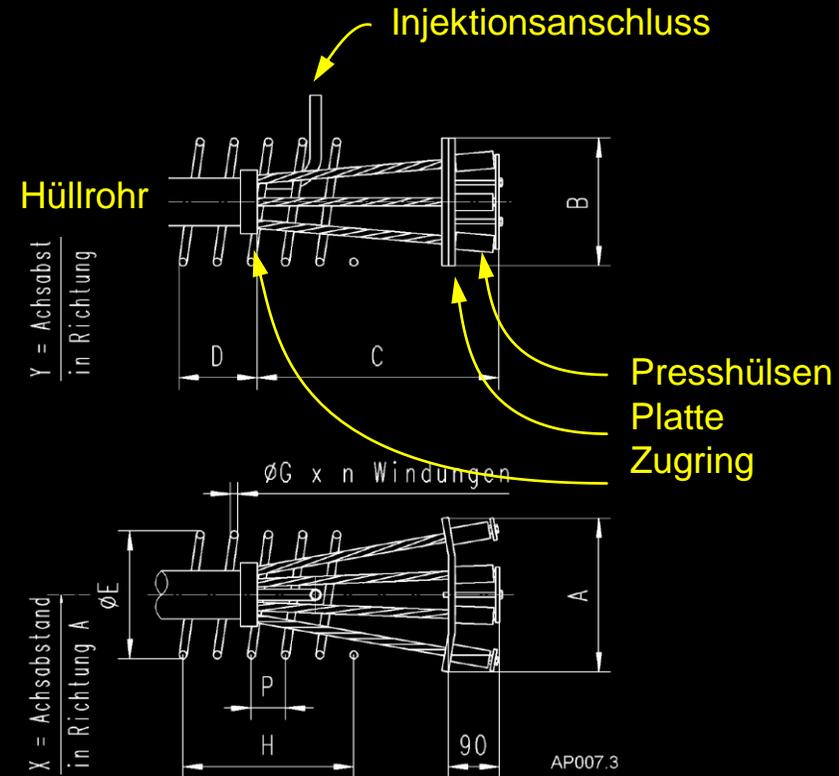
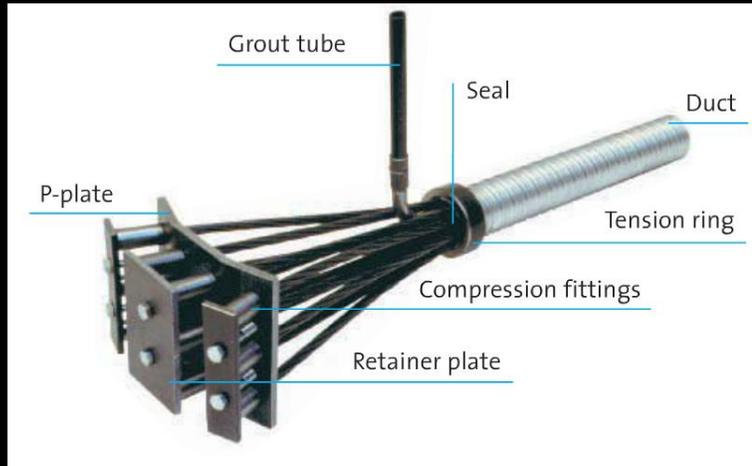


AP006.3

# Vorspannung – Einführung

## Interne Kabelvorspannung mit Verbund – Feste Verankerungen

### Anker mit Platte (VSL Typ P)

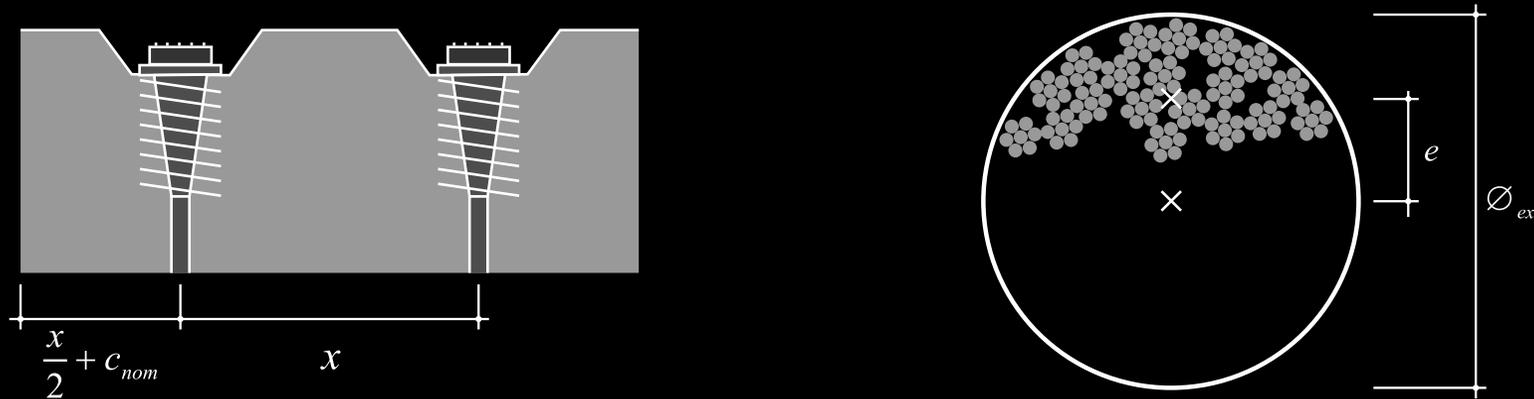


# Vorspannung – Einführung

## 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:  $e \approx 0.3 \cdot \sqrt{A_p}$  (gegenüber dem Hüllrohrmittelpunkt)
- Minimaler Krümmungsradius:  $R_{min} \approx 125 \cdot \sqrt{A_p}$
- Minimale gerade Länge bei Anker:  $l_{min} \approx 25 \cdot \sqrt{A_p}$