

P -1 - Předpjatý beton

Úvod

- Úvod
- Základní idea předpjatého betonu
- Napětí v MSP a v MSÚ
- Dráha předpínací výztuže
- Návrh a posouzení MSP
- Materiály

Kontakt: vitek@fsv.cvut.cz

Podklady:

- *fib* – International Federation for Structural Concrete

www.fib-international.org

Časopis Structural Concrete

Bulletiny (od 1998-2020 94 Bul.)

- ČBS – Česká betonářská společnost ČSSI

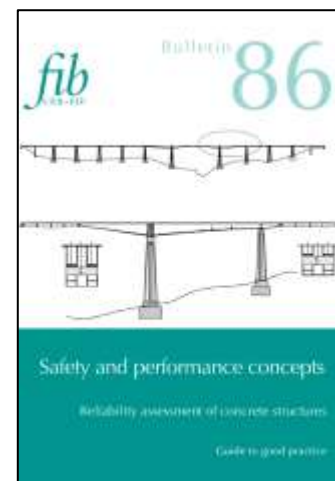
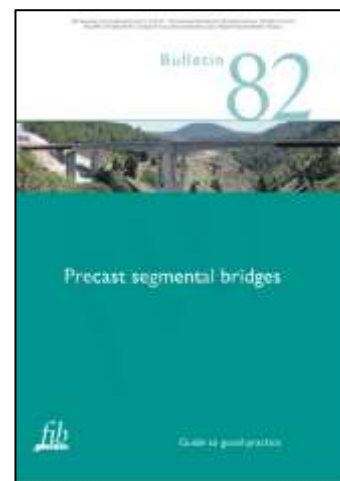
www.cbsbeton.eu

Studentské členství

dokumenty *fib* k dispozici

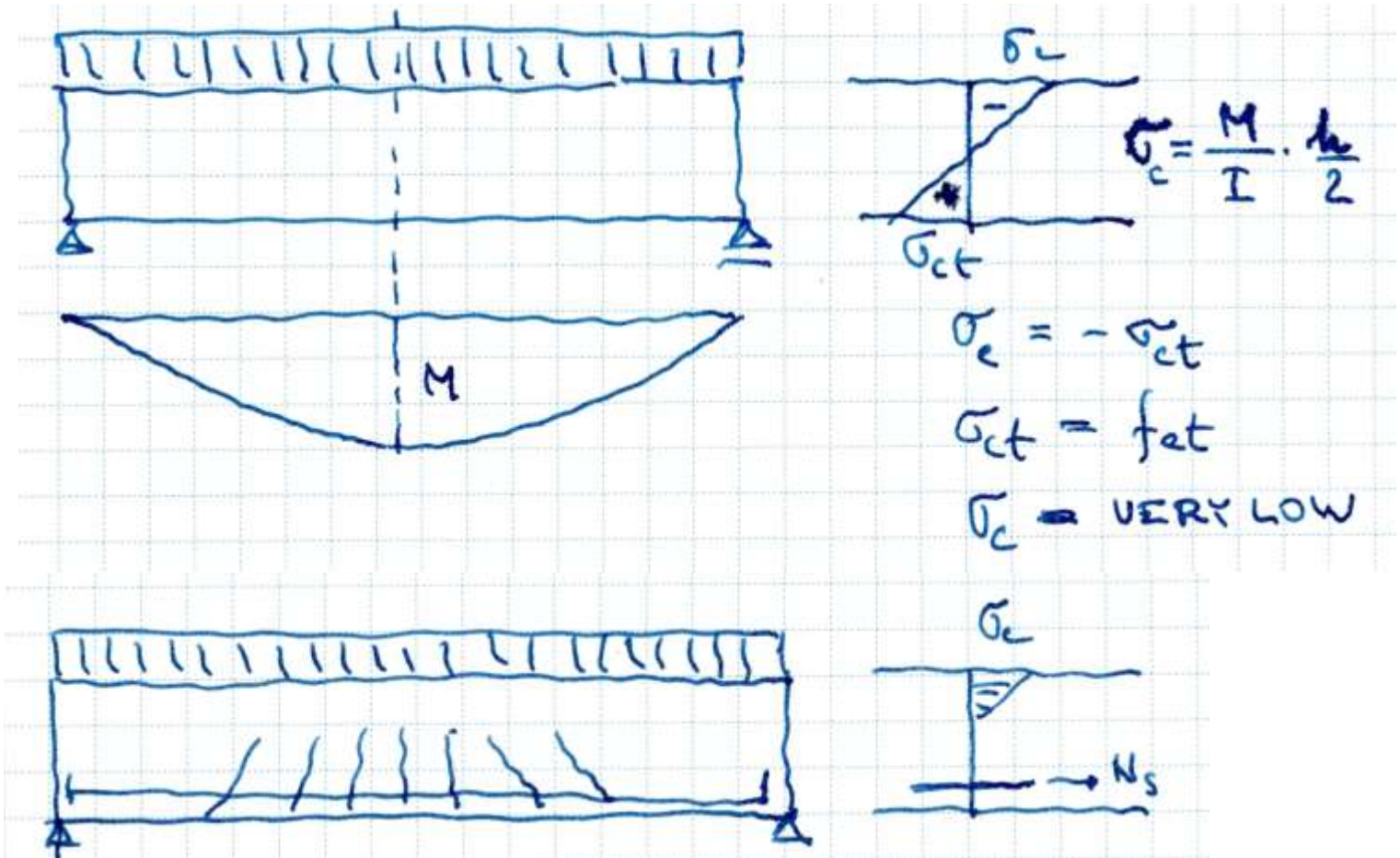
Časopis Beton

- Konference „Mosty“ – obvykle duben www.sekurkon.cz
- Kniha: Historie předpjatého betonu, J. Vítek, ČKAIT, 2016



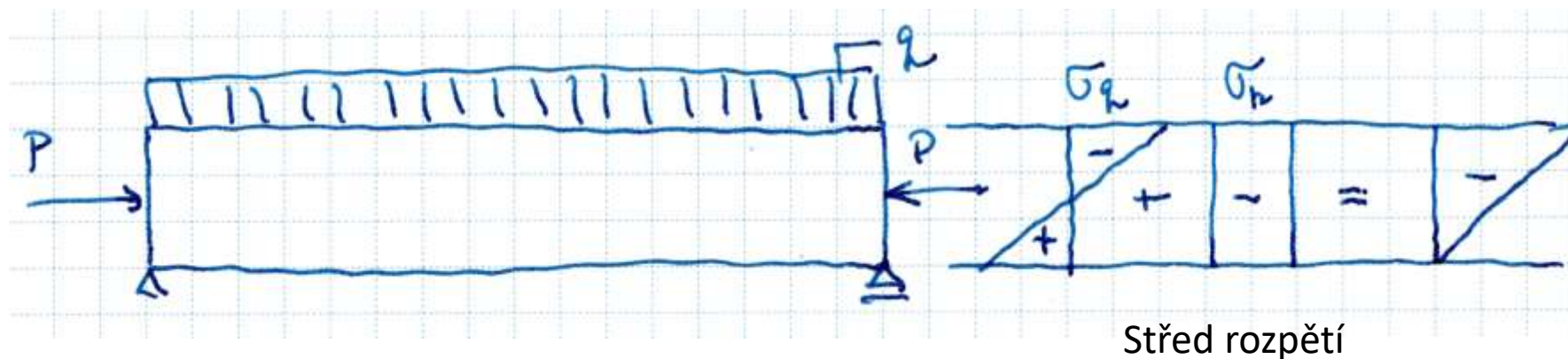
Základní idea předpjatého betonu

- Nízká pevnost betonu v tahu
 - Řešení 1 - Železobeton

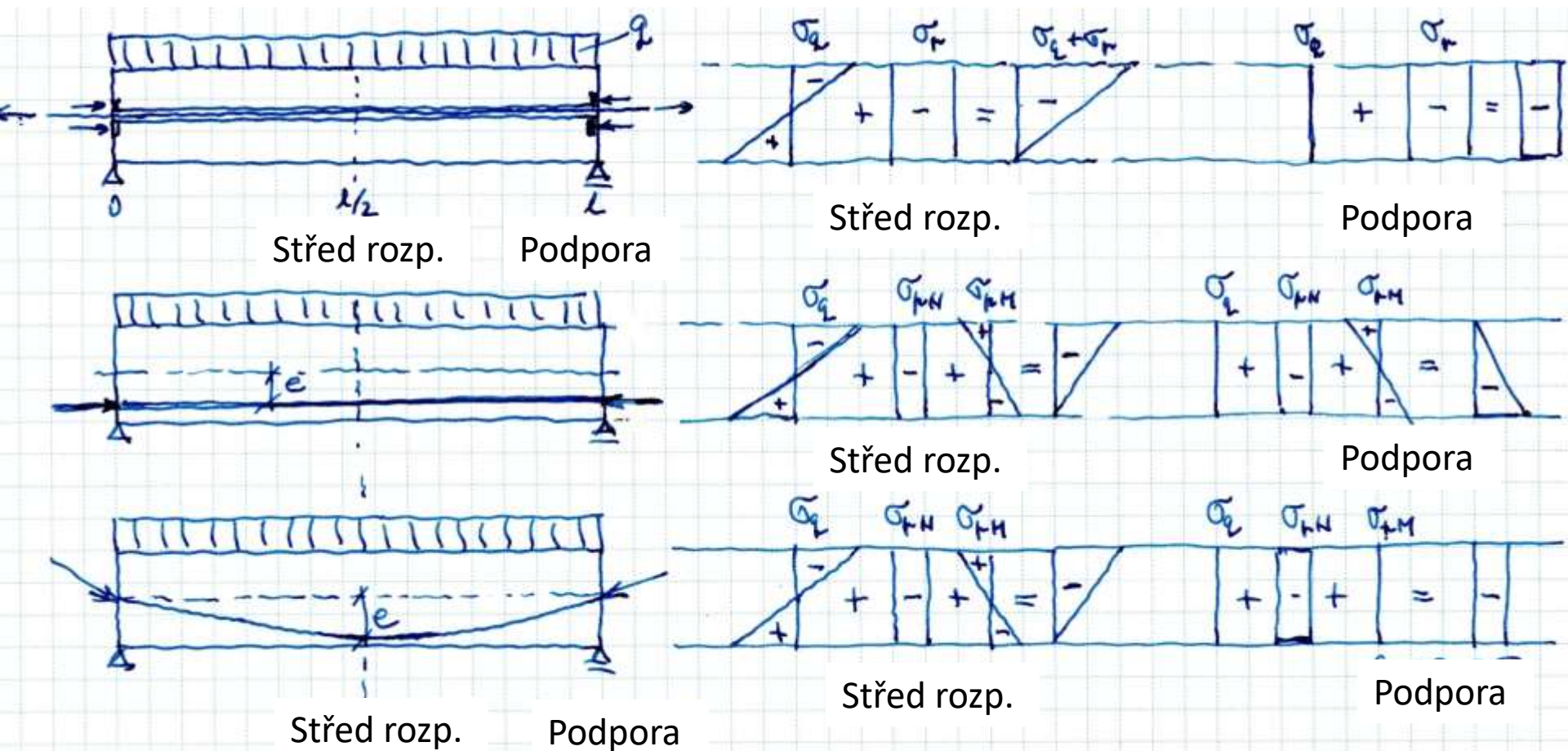


Základní idea předpjatého betonu

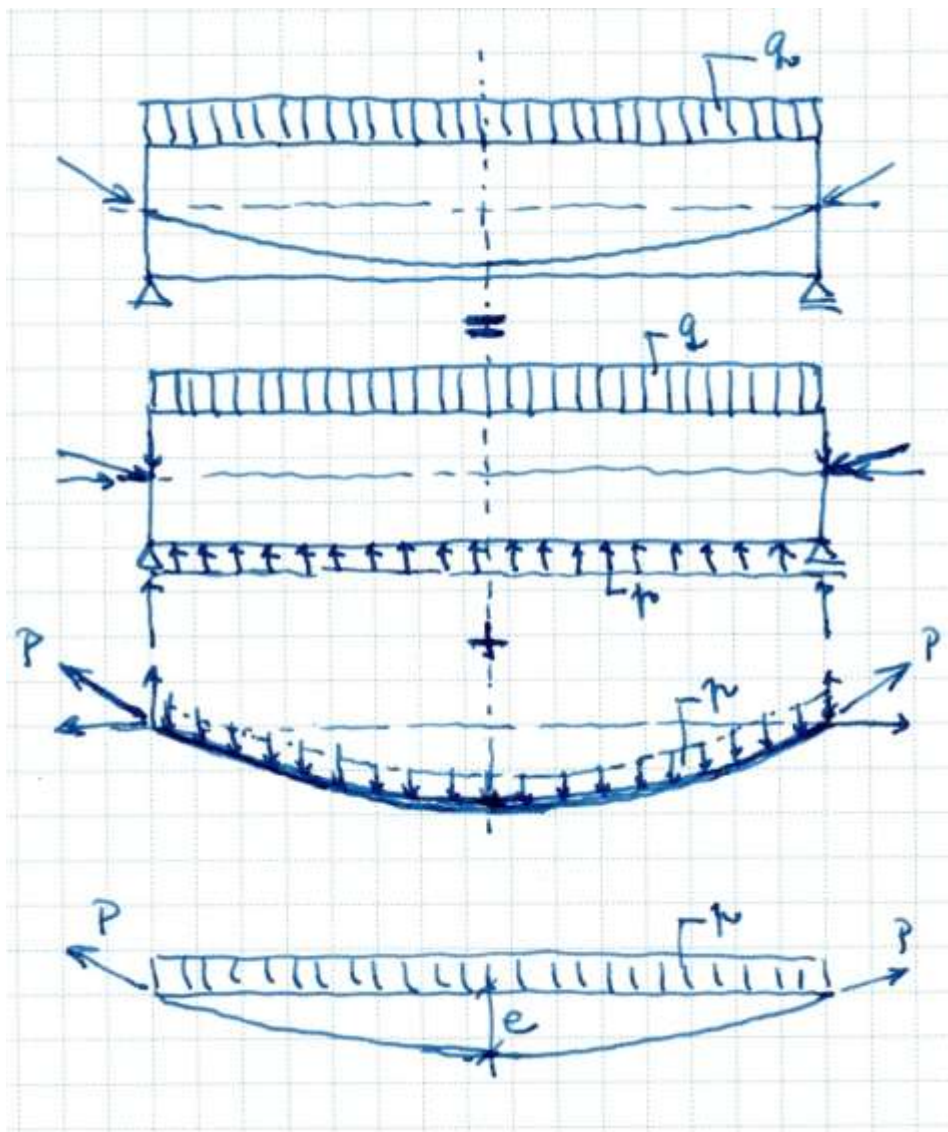
- Beton – nízká tahová pevnost, vysoká tlaková pevnost
 - Řešení 2 – Eliminace tahu = předpjatý beton



Uspořádání předpětí



Dráha předpínací výztuže



2 části konstrukce

- Betonový nosník
- Předpjatý kabel
- Zatížení ve vzájemné rovnováze

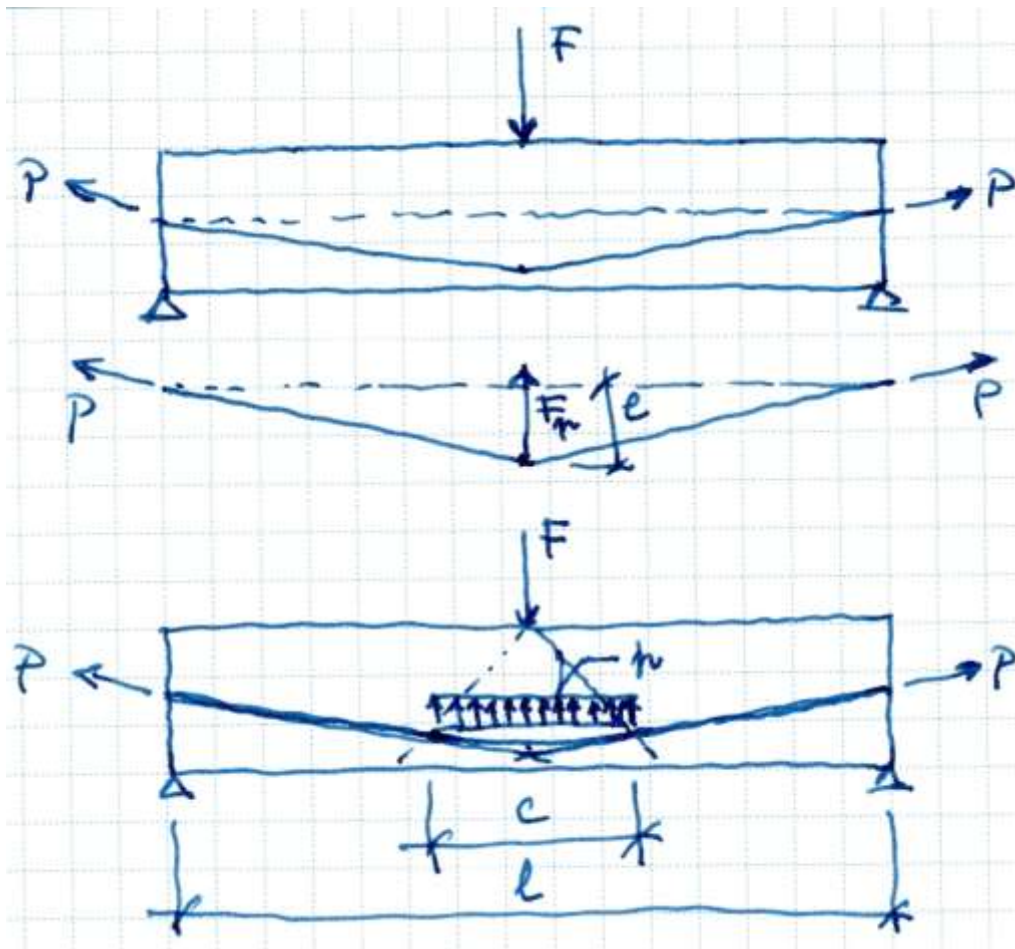
$$P e = M = \frac{1}{8} p l^2$$

$$p = \frac{8 P e}{l^2}$$

Dráha předpínací výztuže

2 části konstrukce

- Betonový nosník
- Předpjatý kabel
- Síly ve vzájemné rovnováze



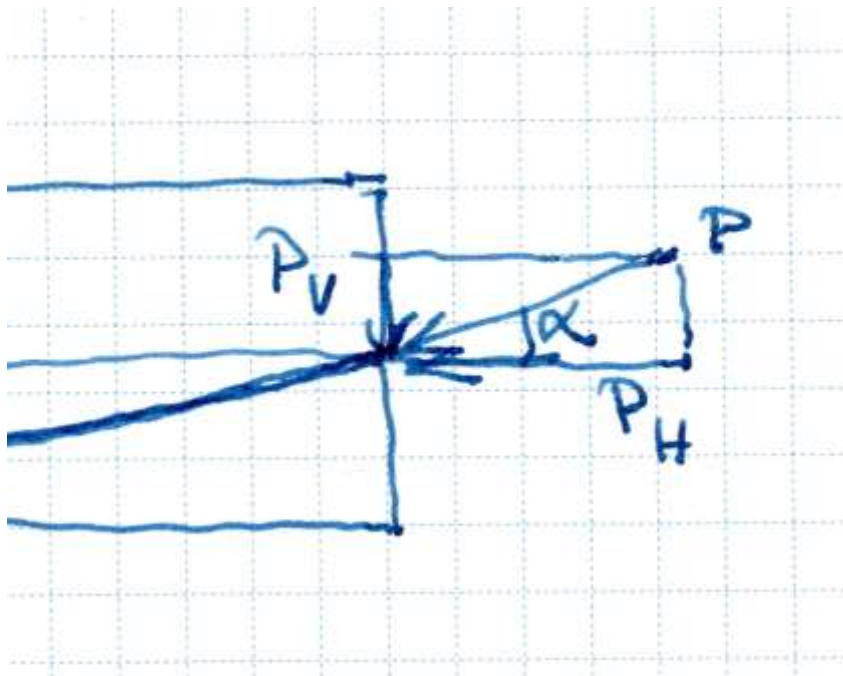
$$P e = \frac{F_p l}{4}$$

$$F_p = \frac{4Pe}{l}$$

$$p c = F_p$$

Uspořádání předpětí

Úhel α - vliv na předpínací sílu



$$\alpha = 3 - 10 \text{ deg} \cong 0$$

$$\cos \alpha \cong 1$$

$$P_H = P \cos \alpha = P$$

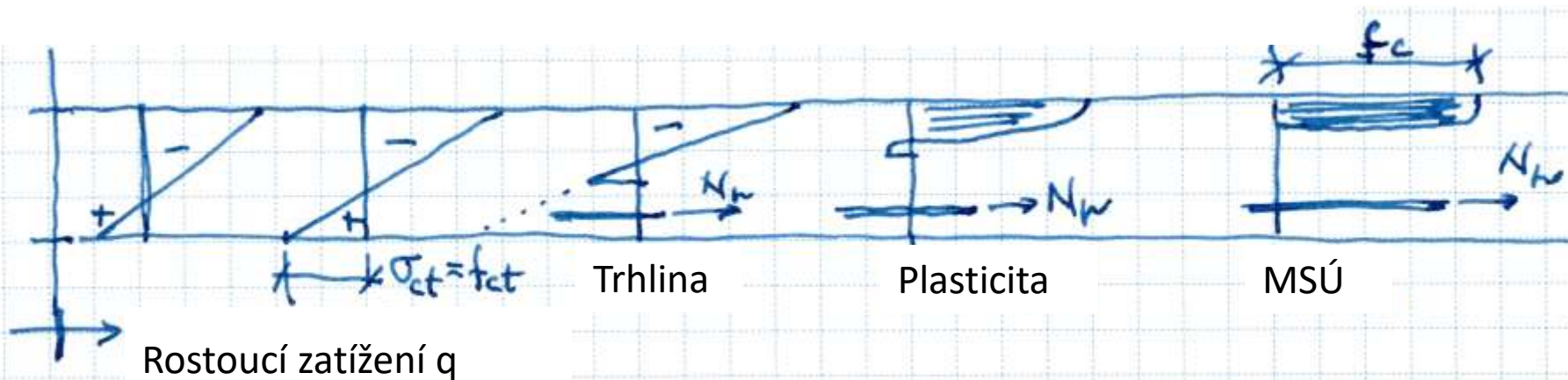
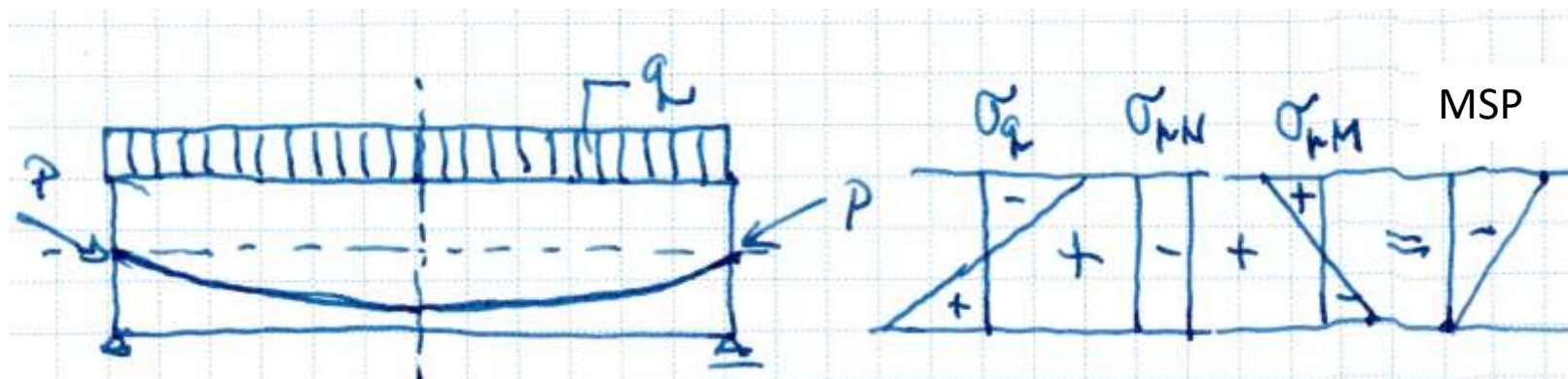
$$P_V = P \sin \alpha \neq 0$$

Principy předpínání

- Předpětí působí proti zatížení
- Předpětí vyrovnává část zatížení
- Předpětí je dlouhodobé zatížení
- Předpětí je vhodné pro konstrukce, kde velká část zatížení je dlouhodobé zatížení. (Je vhodné pro konstrukce s větším rozpětím)
- Pokud se předpětím vyrovná celé zatížení konstrukce, je jenom tlačena
- Stupeň vyrovnání zatížení je rozhodující pro deformace
- Trajektorie předpětí je závislá na působícím zatížení

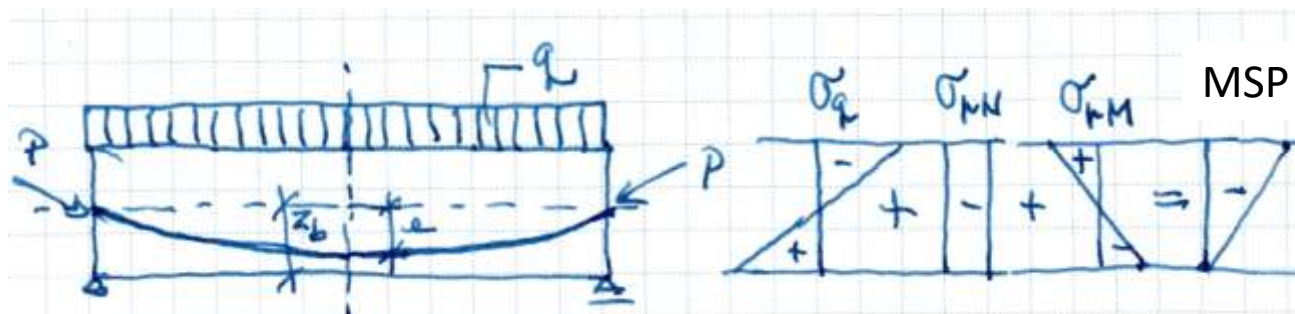
MSP a MSÚ (použitelnost a bezpečnost)

Zatížení se zvětšuje (Předpětí zůstává konstantní)



Návrh předpětí

1. Stanovení rozměrů konstrukce (průřezu)
 - Za základě zkušenosti a analogických konstrukcí
2. Předpětí se navrhne na základě kritérií MSP (na rozdíl od železobetonu)
3. Podmínka: vyloučit tah v průřezu
(Příklad prostého nosníku)



$$\sigma_{ct} = -\frac{P}{A} - \frac{Pe}{I} z_d + \frac{M}{I} z_d \leq 0$$

2 neznámé: předpínací síla P , excentricita e

Odhad excentricity e , výpočet předpínací síly P

Posouzení konstrukce

1. Stanovení zatížení (stálá a proměnná zatížení, kombinace dle ČSN EN 1990 pro MSP a MSÚ)
2. Posouzení MSP
 - Výpočet napětí ve „všech“ průřezech
 - Kontrola napětí

$$\sigma_c \leq 0.6 f_{ck} \quad (\text{char. komb.})$$

$$\sigma_c \leq 0.45 f_{ck} \quad (\text{kvazistálá komb.})$$

$$\sigma_{ct} \leq 0 \quad (\text{častá kombinace})*)$$

*) Podrobnější kritéria (ČSN EN 1992-1-1)

$$\sigma_s \leq 0.8 f_{yk}$$

$$\sigma_p \leq 0.75 f_{pk}$$

Posouzení konstrukce

- Posouzení šířky trhlin – Platí ČSN EN 1992-1-1

Tabulka 7.1N – Doporučené hodnoty $w_{\max}$ (mm)

Stupeň vlivu prostředí	Železobetonové prvky a prvky předpjaté nesoudržnou výztuží	Prvky předpjaté soudržnou výztuží
	Kvazi-stálá kombinace zatížení	Častá kombinace zatížení
X0, XC1	0,4 ¹⁾	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²⁾
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		Dekomprese
¹⁾ Pro stupně vlivu prostředí X0, XC1 nemá šířka trhliny vliv na trvanlivost a uvedená hodnota má vést k obecně přijatelnému vzhledu. Pokud nejsou kladeny požadavky na vzhled, lze uvedenou hodnotu zvětšit.		
²⁾ Pro tyto stupně vlivu prostředí má být kromě toho posouzena dekomprese při kvazi-stálé kombinaci zatížení.		

- Omezení průhybu
 - Pravidla pro pozemní stavby
 - Pravidla pro mosty

Materiály pro předpjatý beton

Beton (železobeton) a součásti předpínacího systému

Předpínací systém

- Předpínací ocel (dráty, lana, tyče)
- Kotvy
- Kabelové kanálky
- Injektáž (cementová malta, tuky, vosky)

Beton

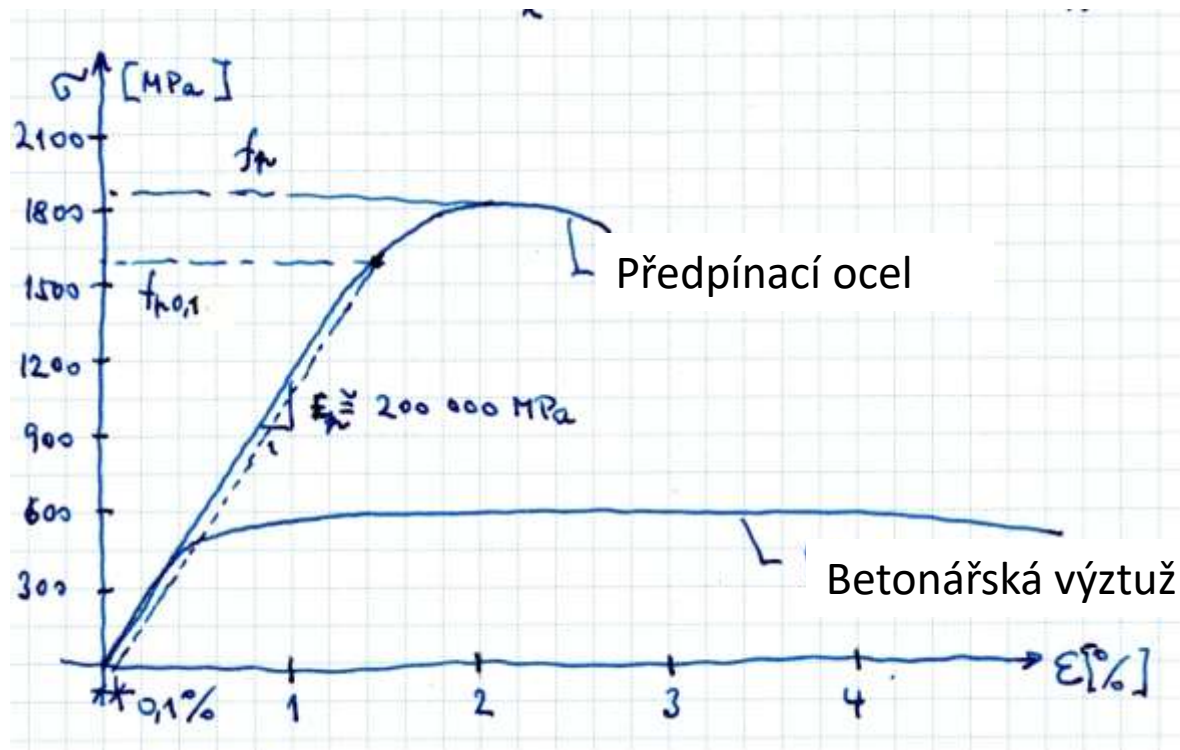
- Min. tlaková pevnost C30/37, LC 35/38
- Rychlý nárůst pevnosti v čase – předpínání je možné při dosažení 80% of 28-denní pevnosti
- Malé objemové změny, dle možností (male dotvarování a smršťování)
- Pokud je beton v kontaktu s předpínací ocelí – $P_h > 12$ (cement CEM I je požadován)
- Dostatečné krytí a minimum trhlin
- Pevnostní parametry – f_{ck} – char. pevnost, f_{cm} – průměrná pevnost

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad [MPa]$$

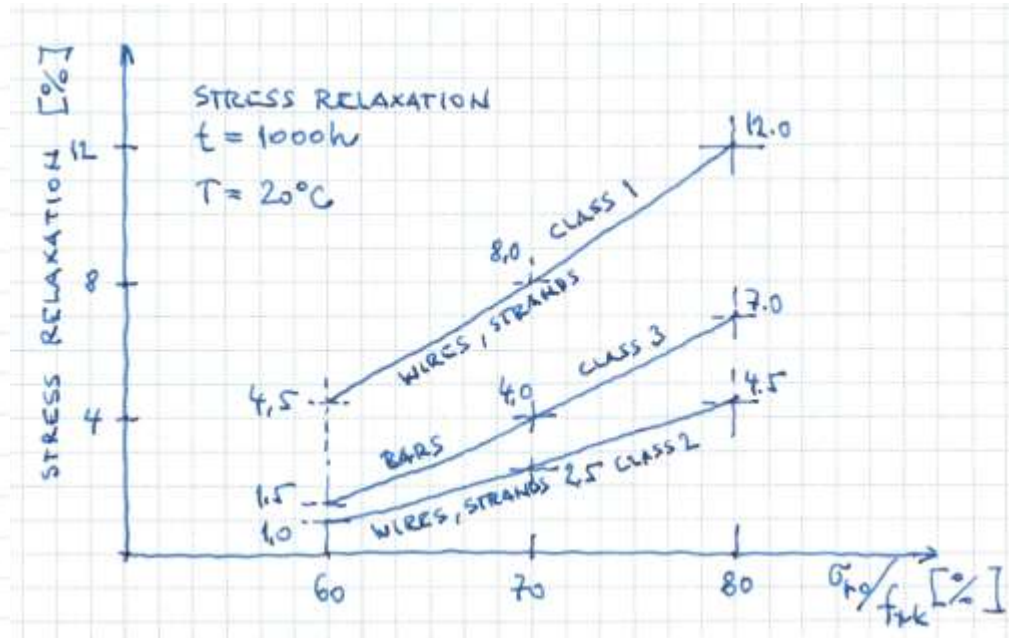
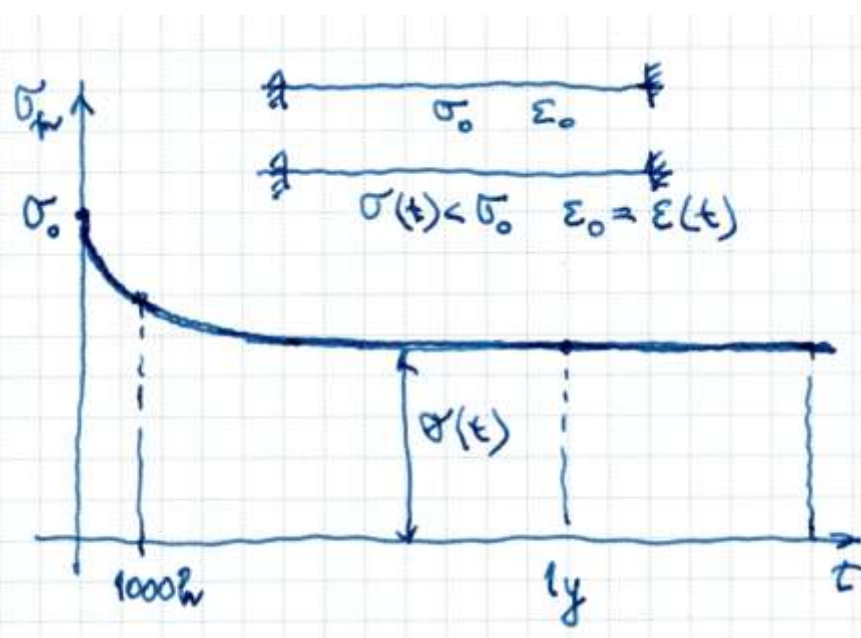
- Modul pružnosti – důležitý pro deformace, specifikace nutná

Předpínací ocel

- Vysokopevnostní ocel – menší duktilita
 - Tahová pevnost– f_p (1770 – 1960 MPa) - lana
 - Mez kluzu – $f_{p0.1}$ – trvalá deformace po odtížení = 0.1%
 - Modul pružnosti 190 – 205 GPa
 - Relaxace napětí – měří se v době 1000 hodin



Předpínací ocel



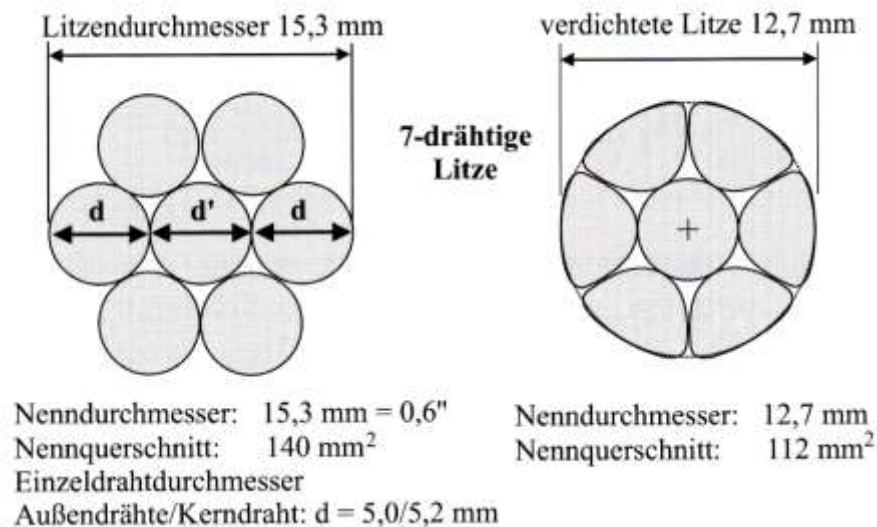
Relaxace napětí

- Měření v čase 1000 h při úrovni zatížení $0.7 f_{pk}$
- Dlouhodobá relaxace se extrapoluje
- Relaxace napětí závisí na
 - době zatížení
 - úrovni předpětí

Předpínací ocel



Dráty $\varnothing = 3 - 7 \text{ mm}$
 Lana složeny obvykle ze 7 drátů
 Kabely soustava paralelních lan (2 – 55)



Předpínací ocel – Lana

Technical Data

Type		12.9 mm (0.5")		15.3 mm (0.6")		15.7 mm (0.62")	
Code		ASTM A 416	prEN 10138	ASTM A 416	prEN 10138	prEN 10138	prEN 10138
Specification		Grade 270	BS 5896	Grade 270		BS 5896	
Yield Strength $f_{p0.1k}$	[N/mm ²]	1,670 ¹⁾	1,640 ²⁾	1,670 ¹⁾	1,636 ²⁾	1,560 ²⁾	1,640 ²⁾
Ultimate Strength f_{pk}	[N/mm ²]	1,860	1,860	1,860	1,860	1,770	1,860
Nominal Diameter	[mm]	12.70	12.90	15.24	15.3	15.70	15.70
Cross-Sectional Area	[mm ²]	98.71	100.00	140.00	140.00	150.00	150.00
Weight	[kg/m]	0.775	0.785	1.102	1.093	1.180	1.172
Ultimate Load	[kN]	183.7	186.0	260.7	260.0	265.5	279.0
Modulus of Elasticity	[N/mm ²]	~195,000					
Relaxation ³⁾ after 1,000 h at 0.7 x Ultimate Strength f_{pk}	[%]	max. 2.5					

1) yield measured at 1% effective elongation

2) yield measured at 0.1% residual elongation

3) applicable for relaxation class 2 according to Eurocode prEN 10138/BS 5896: or low relaxation complying with ASTM A 416, respectively.

Předpínací ocel – závitové tyče

Threadbars

Threadbars are available in diameters 17.5, 26.5, 32, 36, 40 and 47 mm.

The threadbars feature continuous hot-rolled ribs providing a right-handed thread along the entire length.

The threadbar can be cut anywhere and is threadable without further preparation.

The threadbars are specified by nominal diameter and WR, e.g. 26 WR



Předpínací ocel – hladké tyče

Plain bars

Plain bars are available in diameters 32 and 36 mm.

Both ends of a plain bar cut to the length specified in the project are provided with special cold-rolled threads.

The thread lengths are manufactured in the shop according to the specifications of the project.

The plain bars are specified by nominal diameter and WS, e.g. 32 WS.



Předpínací ocel – tyče

Technical data

Designation			THREADBAR®						Plain bar	
			18 WR	26 WR	32 WR	36 WR	40 WR	47 WR	32 WS	36 WS
Nominal diameter	d_s	[mm]	17.5	26.5	32	36	40	47	32	36
Cross section area	S_n	[mm ²]	241	552	804	1,018	1,257	1,735	804	1,018
Nominal mass per metre ¹	M	[kg/m]	1.96	4.48	6.53	8.27	10.20	14.10	6.31	7.99
Pitch	c	[mm]	8	13	16	18	20	21	3	3
Characteristic breaking load	F_m	[kN]	255	580	845	1,070	1,320	1,820	845	1,070
Max. initial stressing force ² $P_{m0,max} = S_n \times 0.8 \times f_{p,k}$		[kN]	204	464	676	856	1,056	1,457	676	856
Max. overstressing force ³ $P_{0,max} = S_n \times 0.95 \times f_{p0,1k}$		[kN]	219	499	722	912	1,131	1,566	722	912

¹The nominal mass per metre includes 3.5% not load bearing portion of ribs.

²The given values are maximum values according to Eurocode 2, i.e. $\min(k_1 \times f_{pk}, k_2 \times f_{p0,1k})$ applies. The fulfillment of the stabilization criteria and the requirements for cracks width in the load transfer tests were verified at $0.8 \times F_{pk}$.

$$F_{pk} = S_n \times f_{pk}$$

$$F_{p0,1k} = S_n \times f_{p0,1k}$$

³Overstressing is permitted if the force in the prestressing jack can be measured to an accuracy of $\pm 5\%$ of the final value of the prestressing force.

Přibližné hodnoty:

$$f_{p0,1k} = 950 \text{ Mpa}, f_{pk} = 1050 \text{ MPa}$$

Kabelové kanálky

- Profilované ocelové
- Plastové
- Silnostěnná ocelová trubka
- Betonové

Profilované ocelové kanálky

- Lehké
- Levné
- Nejsou dokonale těsné
- Součinitel tření ≈ 0.2



Kabelové kanálky

Plastové

- Lehké
- Dražší než ocelové profilované
- Těsné
- Elektricky izolační
- Souč. tření $\approx 0.12-0.14$



Kabelové kanálky

Ocelové trubky

- Těžké
- Drahé
- Použití jen tam, kde je to nezbytně nutné
- Snadnější protahování lan
- Souč. tření ≈ 0.15



Kabelové kanálky

Betonové

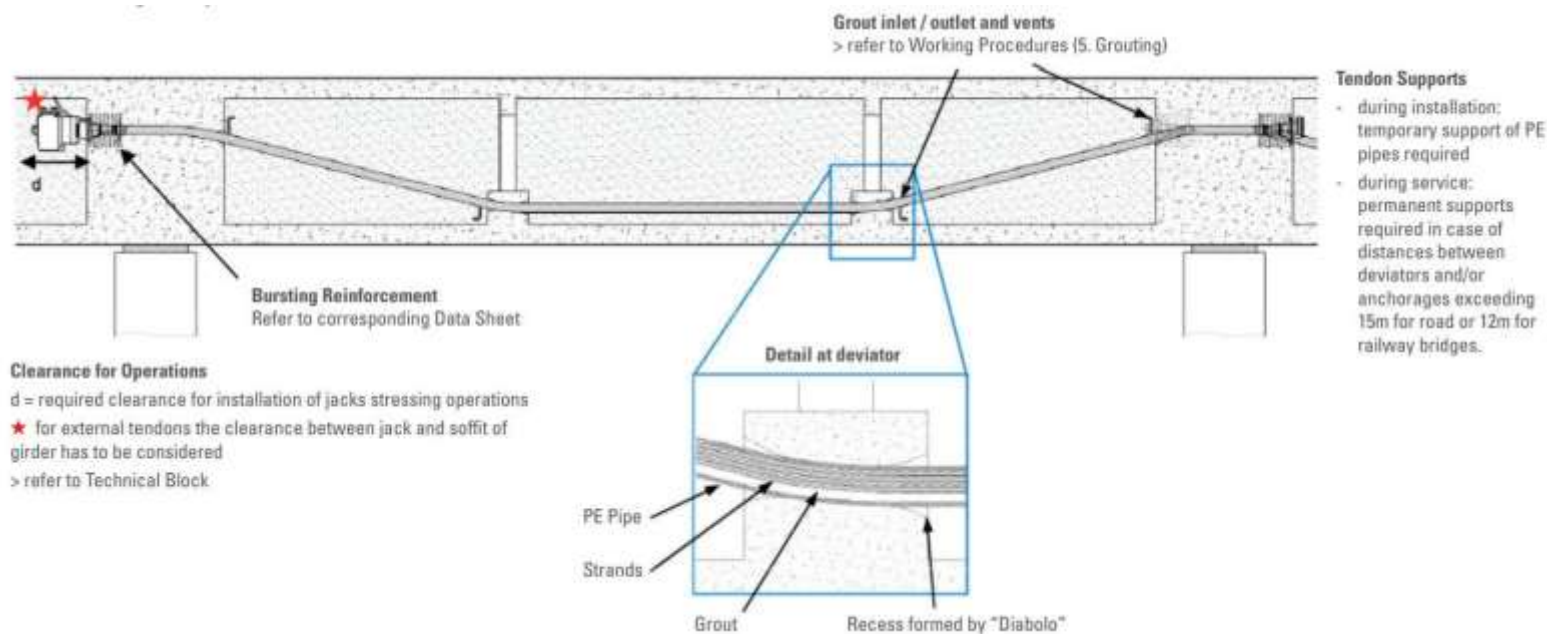
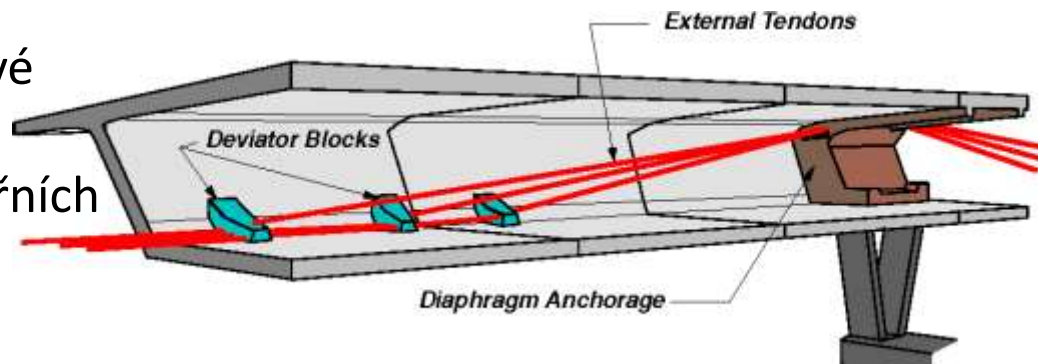
- Dříve u segmentových konstrukcí
- Součinitel tření ≈ 0.3
- Malá ochrana proti korozi
nedoporučeno!



Vnější kabely

Mimo průřez

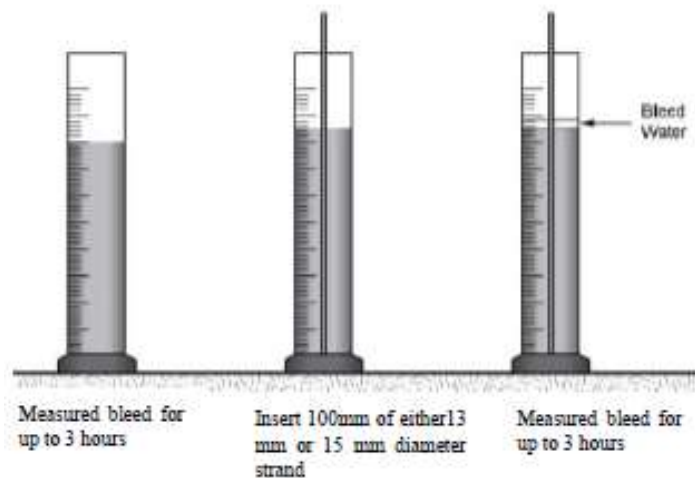
- Působí jako vnější zatížení betonové konstrukce
- Lepší možnosti kontroly než u vnitřních kabelů
- Lehčí průřezy
- Složitější statické působení



Injektážní malta

Cementová malta

- Pevnost min 30 Mpa
- Schopnost vyplnit prostor (tekutost)
- Nízké odlučování vody 0% po 3 h.



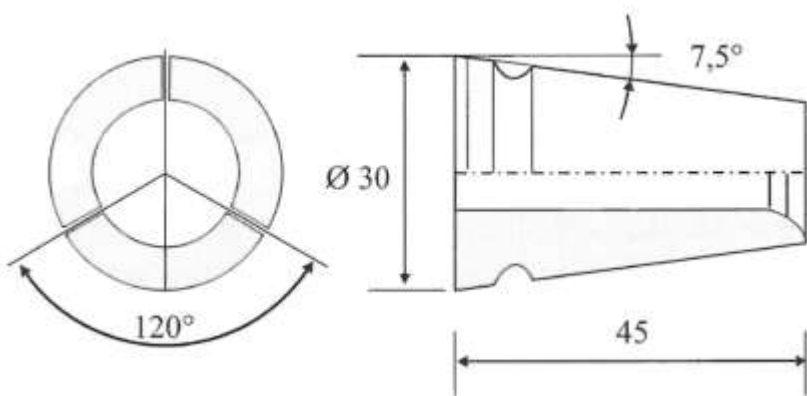
Složení

- Cement
- Popílek, struska, mikrosilika
- Chemické přísady
- Voda ($w/c < 0.45$)

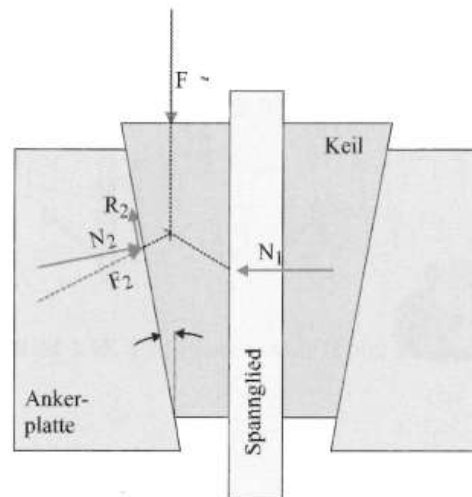


Kotvy - lana

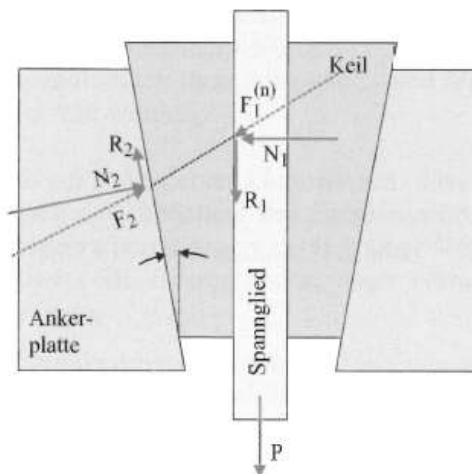
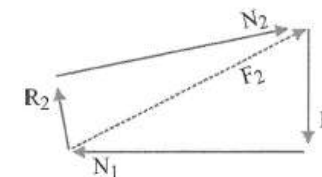
Princip kotvení – kotva s kuželovým otvorem a čelistmi



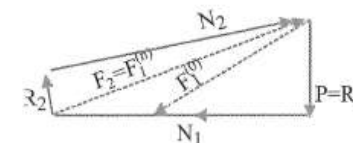
Čelisti



Čelisti se vtlačí mezi lano a kotvu
(žádný pohyb mezi čelistmi a lanem)



Konečný stav – lano
zakotveno



Kotvy - lana

Desková kotva ED (DSI)



Ultimate Load
[kN]
from 721 to 1,395

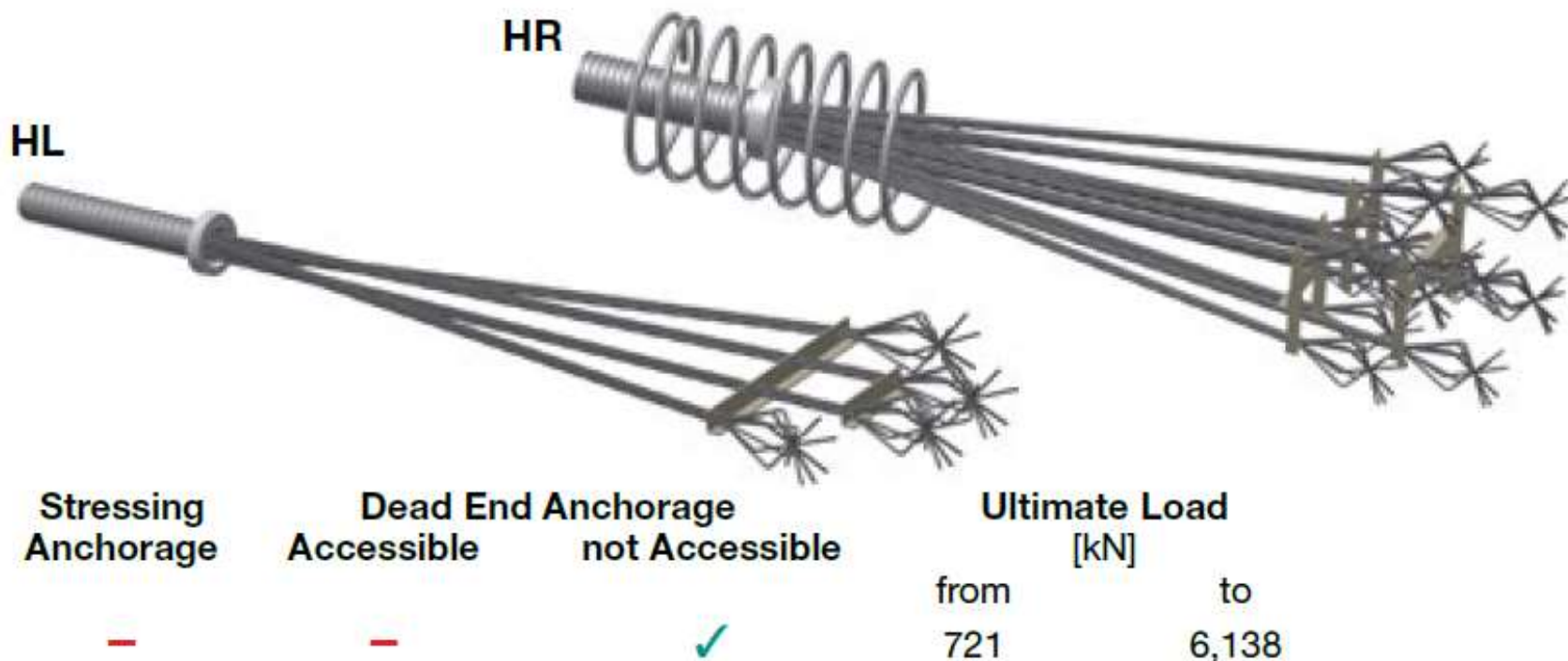
Víceúrovňová kotva MA (DSI)



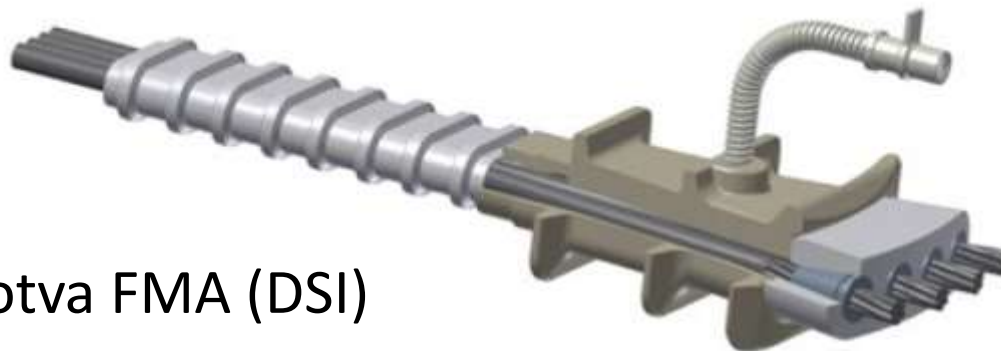
Stressing Anchorage	Dead End Anchorage Accessible	not Accessible	Ultimate Load [kN]
✓	✓	✓	from 1,201 to 15,345

Kotvy - lana

Pasivní (mrtvá) kotva HL/HR (DSI)



Kotvy - lana

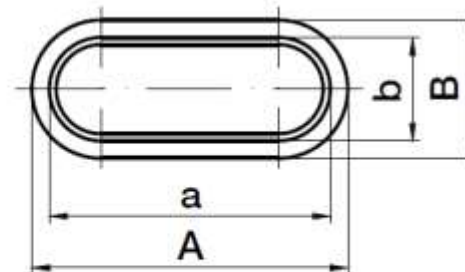
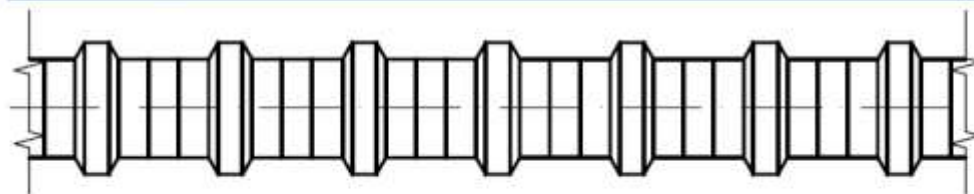


Plochá víceúrovňová kotva FMA (DSI)

Stressing Anchorage ✓
Dead End Anchorage Accessible ✓
Dead End Anchorage not Accessible ✓

Ultimate Load [kN]
from 551 to 1,395

Flat PE/PP Duct



Tendon Type		A	B	a	b	Wall Thickness
0.5"	0.6"	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
5902	6802	52.5	36.5	37.5	21.5	2.0
5904	6803	85.5	36.0	71.0	21.0	2.0
5905	6804	90.0	40.0	75.5	25.0	2.0
5907	6805	105.0	40.0	91.0	22.0	2.0