

Betonové a ocelové konstrukce

Ing. Josef Novák, Ph.D.
Katedra betonových a zděných konstrukcí

Ing. Břetislav Židlický, Ph.D.
Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí

České vysoké učení technické v Praze



Seznam přednášek

- Spoje: kloubové, tuhé a polotuhé; klasifikace styčníků, čepové spoje
- Kroucení, kombinace namáhání, únava ocelových konstrukcí
- Ocelové haly s jeřábovou dráhou – nosník dráhy, ztužení, detaily
- Požární odolnost ocelových a ocelobetonových konstrukcí
- **Zásobníky, nádrže, lanové a membránové konstrukce**
- Lešení, korozivzdorná ocel

Dělení úložných konstrukcí

- Zásobníky
 - Na sypké materiály
 - Bunkry (nízké)
 - Sila (vysoké)
- Nádrže
 - Na tekuté materiály
 - Nízkotlaké (do 2 kPa)
 - Vysokotlaké (kulové, válcové)
- Plynojemy
 - Na plyny
 - Stálého objemu, proměnného objemu
 - Suché, mokré
- Potrubí
 - Na plyny nebo kapaliny

NORMY:

- ČSN EN 1991-4 Zatížení zásobníků a nádrží
- ČSN EN 1993-1-5 Boulení stěn
- ČSN EN 1993-1-6 Skořepiny
- ČSN EN 1993-1-7 Deskostěnové konstrukce
- ČSN EN 1993-4-1 Zásobníky
- ČSN EN 1993-4-2 Nádrže
- ČSN EN 1993-4-3 Potrubí
- ČSN EN 1998-4 Zemětřesení – Zásobníky, nádrže a potrubí

Zásobníky

Zásobníky



Zásobník na sůl s řídicím centrem, Itálie



Velkokapacitní pozinkované zásobníky na obilí, 1 000 – 15 000t



Zásobník na 10 000 tun ocelových pilin, Austrálie

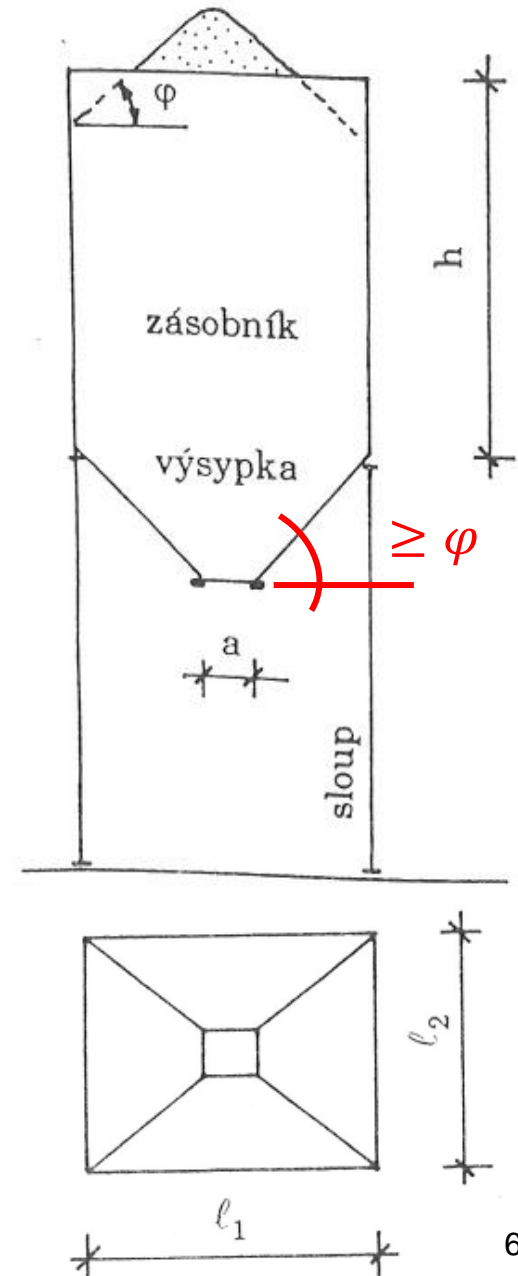
Zásobníky

- Skladování sypkých materiálů
 - Prachové (cement, vápno, mouka)
 - Zrnité (písek, uhlí, obilí)
 - Pícniny (senáž, siláž)

- Parametry materiálu
 - Objemová hmotnost
 - Součinitel tření o stěny μ
 - Úhel vnitřního tření skladovaného materiálu φ
 - Úhel sklonu výsypky větší než úhel vnitřního tření
 - Sléhavost, soudržnost atd.
 - Potřebný rozměr výpusti

$$a = 2,6(b + 80) \tan \varphi$$

Maximální
rozměr zrna



Zásobníky

■ Dělení

- Bunkry **x** Sila
- Bez výsypky **x** S výsypkou
- Volné **x** Zakryté
- Venkovní **x** Vnitřní
- Kruhové (válcové) **x** Rovinné (hranaté)
- S výztuhami **x** Bez výztuh
- Stojící na zemi **x** na podpěrné konstrukci **x** na protaženém plášti **x** zavěšené



$$h \geq 1,5\sqrt{A}$$

↑
Půdorysná plocha
zásobníku

Zásobníky

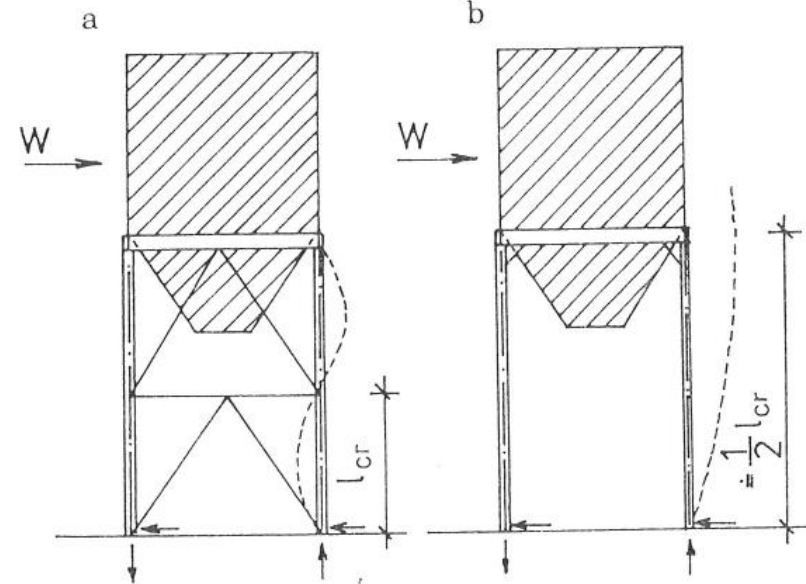
- Obvykle na sloupech z důvodu přepravy materiálu
- Výška odpovídá výšce dopravního prostředku pod výsypkou

Excentrická výsypka

Excentrická výsypka se společným dopravníkem

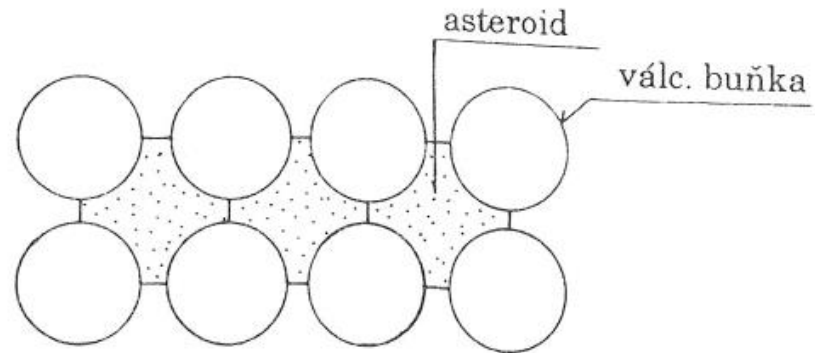
Příhradové ztužení mezi stojkami

Rámové ztužení mezi stojkami

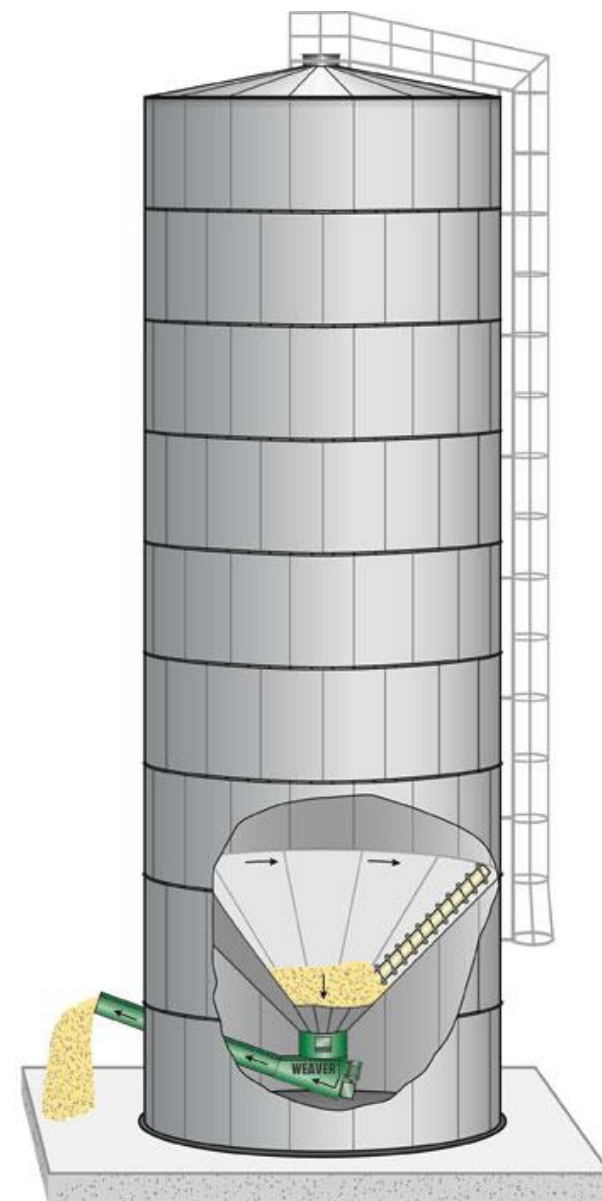


Zásobníky

- Podle geometrie
 - Samostatné
 - Sdružené
 - U válcových sil ze statických a ekonomických důvodů zaplněné i meziprostory



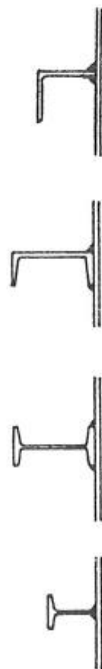
Zásobníky - Válcové



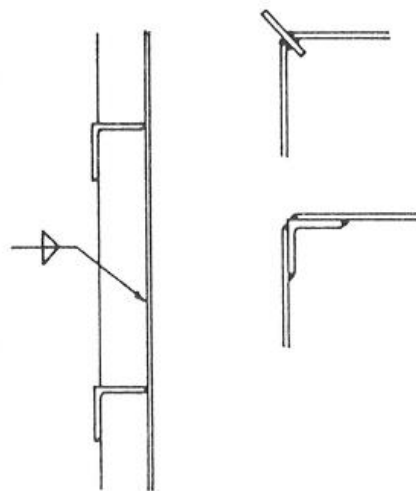
Zásobníky - Rovinné



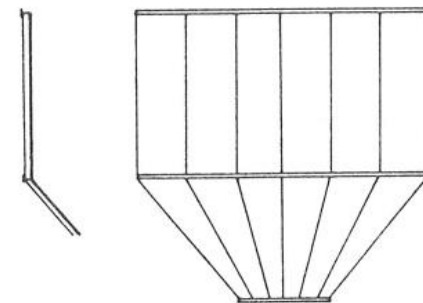
Tvary výztuh



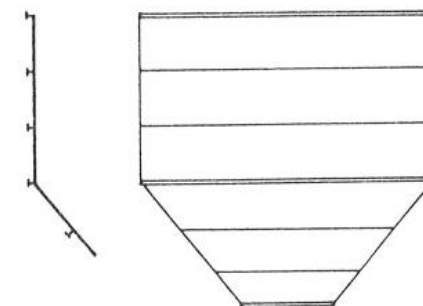
Napojení dvou stěn



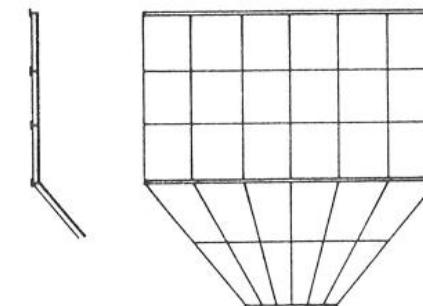
Vodorovné a svislé výztuhy - křížení



Svislé výztuhy



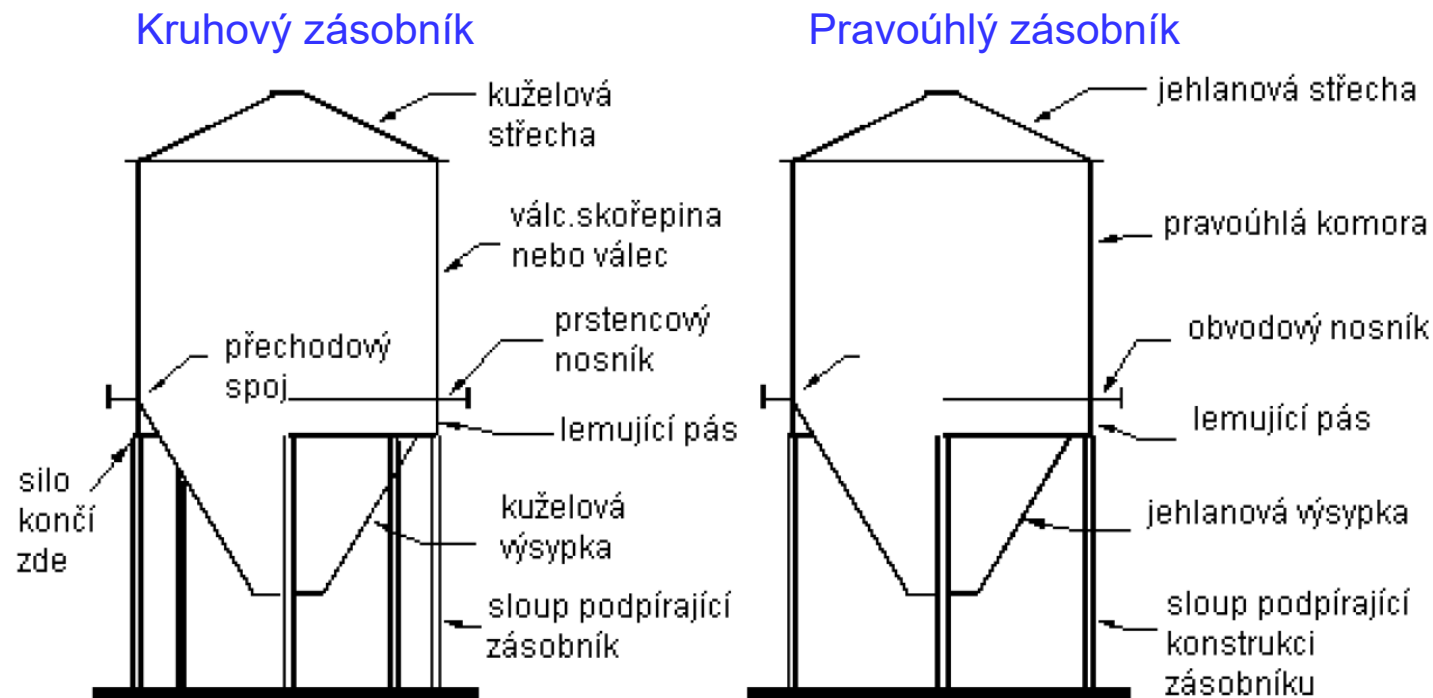
Vodorovné výztuhy



Křížující se výztuhy

Zásobníky

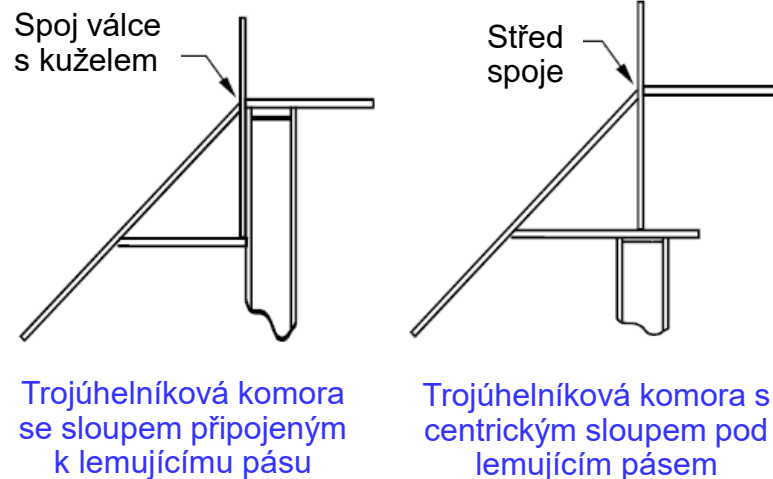
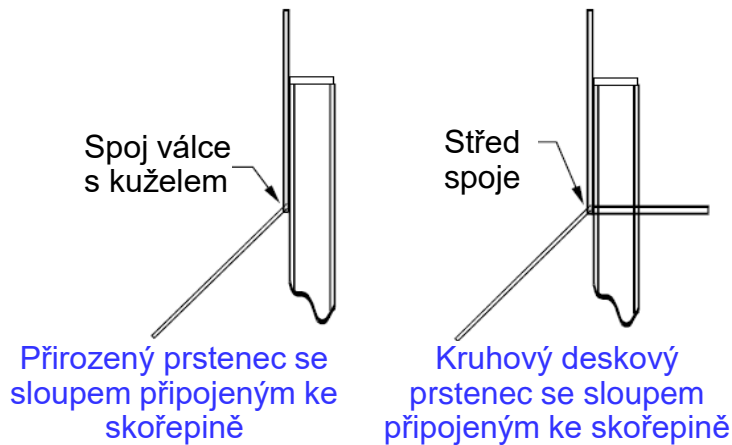
Terminologie



Zásobníky

- Plech → boulení (svislý, radiální tlak)
- Výztuhy
- Podpory

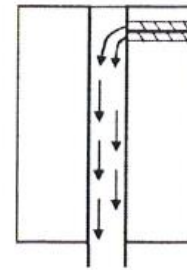
- Příklady tvarů prstenců



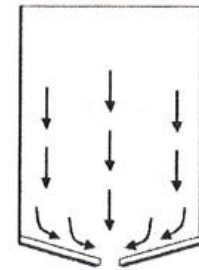
Zásobníky

- Vyprazdňování a plnění
 - Mechanické
 - Pneumatické

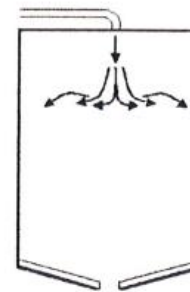
- Otěr vnitřního povrchu
 - Abrazivita skladovaného materiálu
 - → Obložení stěn
 - Pogumování
 - Vyměnitelné plechy
 - Dřevo
 - → Přídavek tloušťky
 - Běžně 2 až 4 mm



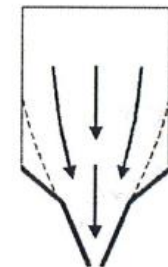
a) mechanické prázdnění se soustředným tlakem



b) vhánění vzduchu a pneumatické skluzu podporují plný tok



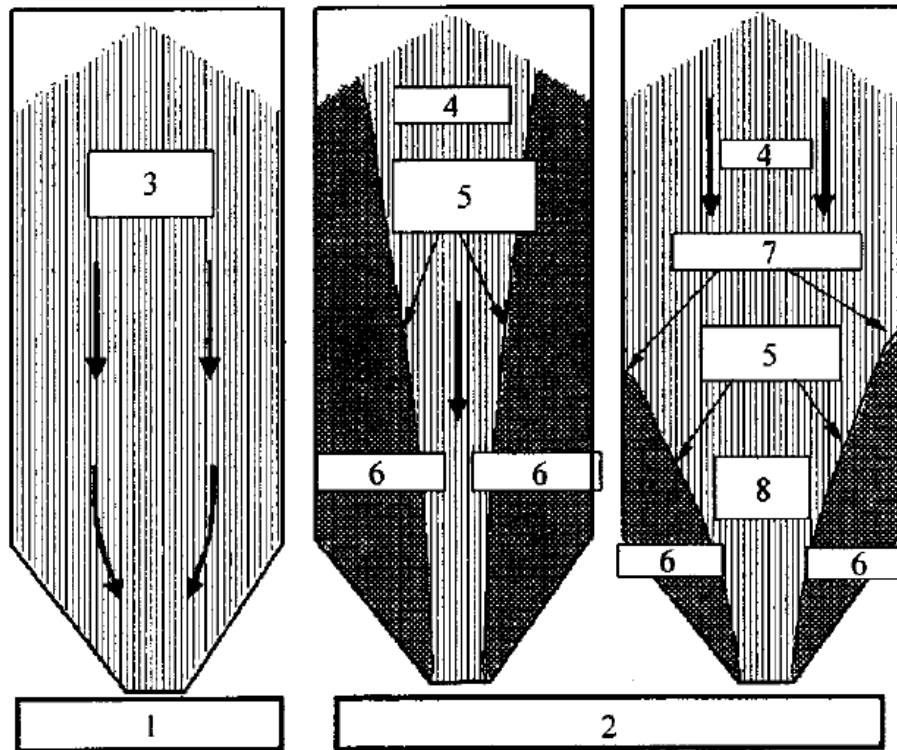
c) při pneumatickém plnění práškových látek zůstává horní povrch skladovaného materiálu téměř plochý



d) výsypka se zvýšeným tokem zajišťuje plný tok pouze v dolní části výsypky

Zásobníky

- Základní modely toku vyprazdňování
 - Plný tok obvykle příznivější (pozor na podtlak)
 - Trubkový tok – vznik nerovnoměrných tlaků



a) plný tok

b) trubkový tok

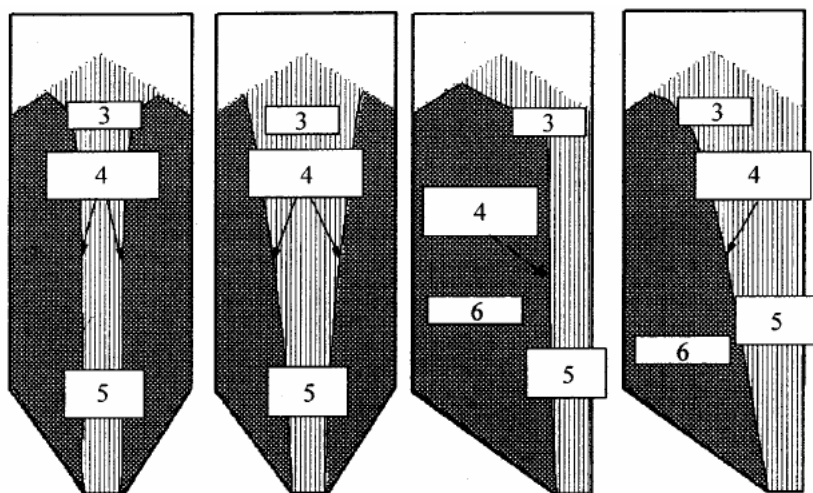
c) smíšený tok

1. plný tok
2. nálevkový / trubkový tok
3. všechna tuhá látka je v pohybu
4. tok (hmota v pohybu)
5. hranice tokového kanálu
6. nehybná tuhá látka
7. účinný přesun
8. účinná část výsyvky

Zásobníky

Modely toků vyprazdňování

Modely trubkovitého toku



a) Přímý trubkový tok

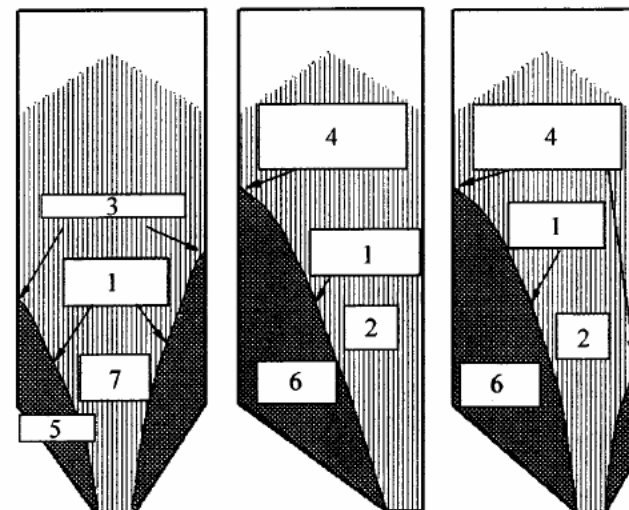
b) Kuželovitý trubkový tok

c) Výstředný přímý trubkový tok

d) Výstředný kuželovitý trubkový tok

- 1 Vnitřní trubkový tok
- 2 Výstředný trubkový tok
- 3 Tekoucí hmota
- 4 Hranice tokového kanálu
- 5 Trubka tekoucí hmoty
- 6 Nehybný materiál

Modely smíšeného toku



a) Soustředný smíšený tok

b) Plně výstředný smíšený tok

c) částečně výstředný smíšený tok

- 1 Hranice tokového kanálu
- 2 Pásmo toku
- 3 Účinný přesun
- 4 Účinný přenos proměnlivý podél obvodu zásobníku
- 5 Nehybná hmota
- 6 Nehybná hmota
- 7 Účinná výsypka

Geometrie zásobníků a Třídy zatížení

Tvary průřezu

Geometrická omezení

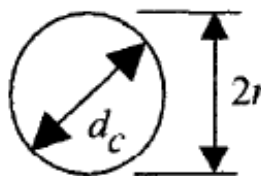
Výška zásobníku

$$\frac{h_b}{d_c} < 10$$

$$h_b < 100 \text{ m}$$

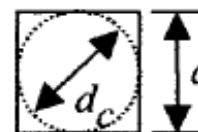
$$d_c < 60 \text{ m}$$

$$A/U = r/2$$

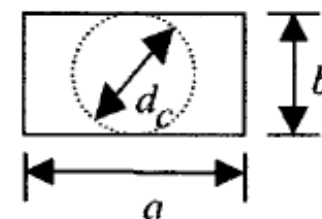


U – vnitřní obvod

$$A/U = a/4$$



$$A/U = (b/2) / (1+b/a)$$



$$A/U = \sqrt{3} (a/4) = d_c/4$$

- Zásobník se navrhuje pro určitý rozsah vlastností zrnité tuhé látky
- Skladovaná tuhá látka je volně tekoucí
- Max. průměr částice nepřesáhne $0,03d_c$

Klasifikace zásobníků podle zatížení

- Třída 1
 - Obsah > 10 000 t
 - Obsah > 1 000 t, výstředné vyprazdňování/plnění s $e/d > 0,25$
- Třída 2
 - Ostatní
- Třída 3
 - Obsah < 100 t

Zatížení zásobníků – ČSN EN 1991-4

▪ Zatěžovací stavy

- Vlastní tíha a technologie
- Užité zatížení obslužných zařízení
- **Náplň**
- Sníh
- Vítr
- Teplota
- Podtlak / přetlak
- Výbuch
- Zemětřesení
- Náraz vozidla
- Požár

**Mimořádná
zatížení**

▪ Návrhové situace

- Nejnepríznivější zatížení pro různé mezní stavy konstrukce
- Maximální kolmý tlak na svislé stěny zásobníku
 - Maximální tahová složka tření o svislé stěny zásobníku
 - Maximální svislý tlak na dno zásobníku
 - Maximální zatížení výsypky zásobníku

▪ Vlastností tuhé látky

- γ Objemová tíha
- μ Součinitel tření o stěnu
- K Poměr bočních tlaků
- φ_i Úhel vnitřního tření

MSÚ a MSP – modely zatížení pro plnění a vyprazdňování

Zatížení zásobníků – ČSN EN 1991-4

■ Zatížení svislých stěn podle štíhlosti

- Štíhlé zásobníky

$$2,0 \leq \frac{h_c}{d_c}$$

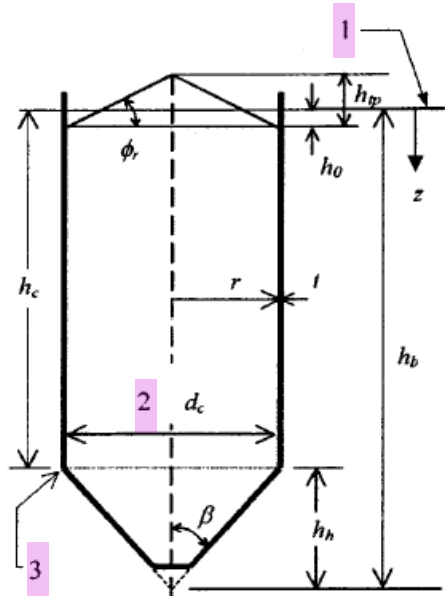
- Středně štíhlé zásobníky

$$1,0 < \frac{h_c}{d_c} < 2,0$$

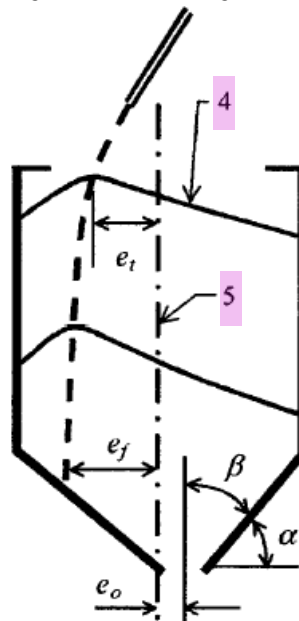
- Nízké zásobníky

$$0,4 < \frac{h_c}{d_c} \leq 1,0$$

- Uzavřené zásobníky s plochým dnem $\frac{h_c}{d_c} \leq 0,4$



a) Geometrie

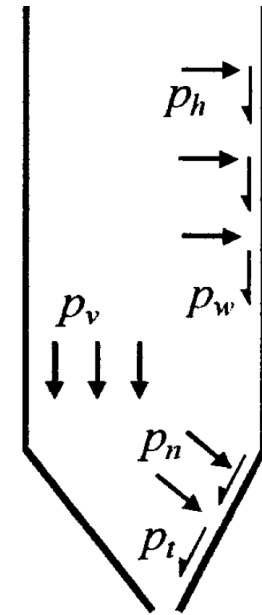


b) Výstřednost

1. ekvivalentní povrch
2. vnitřní rozměry
3. přechod (přechodová oblast)
4. profil povrchu při plnění
5. osa zásobníku

Zatížení zásobníků – ČSN EN 1991-4

- Štíhlé zásobníky
 - Zatížení svislých stěn –základní situace
 - Vodorovný tlak
 - Tření → svislý tlak
 - Zatížení při plnění
 - Souměrné – základní situace
 - Místní zatížení – důsledek nerovnoměrnosti
 - Zatížení při vyprazdňování
 - Souměrné – základní situace + zvětšení
 - Místní zatížení – důsledek nerovnoměrnosti
 - Nerovnoměrnosti
 - Náhodné
 - Excentrické plnění / vyprazdňování



- p_v svislé napětí ve skladované látce
- p_h vodorovný tlak od skladované látky
- p_w tahová složka tření o svislou stěnu

- p_n kolmý tlak na stěnu výsypky od materiálu
- p_t tahová složka tření ve výsypce

Navrhování zásobníků

- Membránová teorie
 - Pouze membránová napětí v celém plášti
- Poloohybová teorie
 - Např. v jednom směru pouze normálové síly, v druhém směru kombinace s ohybem
 - Ohybově tuhé výztuhy přenášejí ohyb, plech mezi nimi uvážen jako membrána
- Ohybová teorie
 - Prakticky řešitelné pouze modelováním metodou konečných prvků s uvážením reálných tuhostí všech prvků konstrukce
- **Membránové poruchy**
 - Náhlé lomy střednice
 - Lokální zatížení
 - Zamezení volné deformace
- **Stabilita**
 - Zesílení stěny
 - Vyztužení stěny
 - Ne všechny výztuhy pomáhají
 - Spolupůsobící šířky
 - Ochabnutí smykem

Navrhování zásobníků – Třída významu

■ ČSN EN 1993-6 – Diferenciace spolehlivosti

Tabulka 2.1 – Klasifikace tříd významu podle velikosti a způsobu plnění

| Třída významu | Podmínky navrhování |
|--|---|
| 3 | Zásobníky o kapacitě nad W_{3a} tun, uložené na základu nebo podepřené úplným lemujícím pásem na základu. Zásobníky o kapacitě nad W_{3b} tun, podepřené na samostatných podporách Zásobníky o kapacitě nad W_{3c} tun, u kterých se vyskytuje některá z následujících návrhových situací: a) excentrické vyprazdňování b) místní plošné zatížení c) nesymetrické plnění |
| 2 | Všechny zásobníky, pro které platí tato norma a které nepatří do třídy 1 nebo 3 |
| 1 | Zásobníky o kapacitě od W_{1a} tun do W_{1b} tun ¹⁾ |
| ¹⁾ Zásobníky o kapacitě menší než W_{1a} tun tato norma nezahrnuje. | |

| Třída W | Doporučená kapacita zásobníku (tuny) |
|-----------|--------------------------------------|
| W_{3a} | 5 000 |
| W_{3b} | 1 000 |
| W_{3c} | 200 |
| W_{1b} | 100 |
| W_{1a} | 10 |

Navrhování zásobníků – Válcové

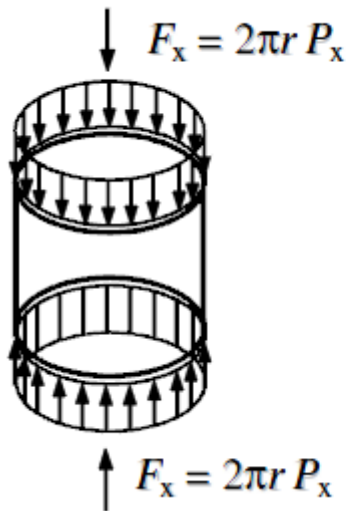
- ČSN EN 1993-1-6 – Pevnost a stabilita ocelových skořepin
- Posouzení
 - Stabilita polohy zásobníku
 - Pevnost konstrukce, styků
 - Stabilita - celková, lokální boulení
 - Opakované zplastizování
 - Únava
 - MSP – deformace, kmitání
- Stanovení napětí od zatížení
 - Osová membránová napětí od svislé tíhy, tření σ_x
 - Obvodová membránová napětí od vodorovného tlaku σ_θ

$$\sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_\theta + \sigma_\theta^2} \leq f_{yd}$$

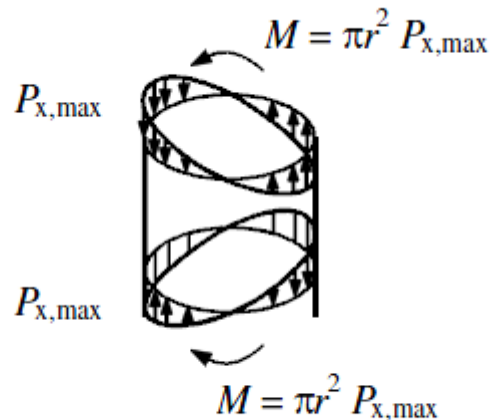
Navrhování zásobníků – Válcové

- ČSN EN 1993-1-6 – Pevnost a stabilita ocelových skořepin
- Nevzdušené válcové skořepiny

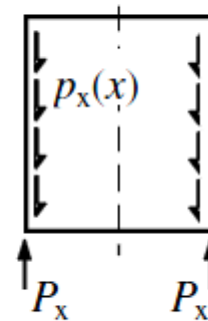
Rovnoměrné osové zatížení



Osové zatížení ohybem



Zatížení třením



Osová membránová napětí

$$\sigma_x = -\frac{F_x}{2\pi r t}$$

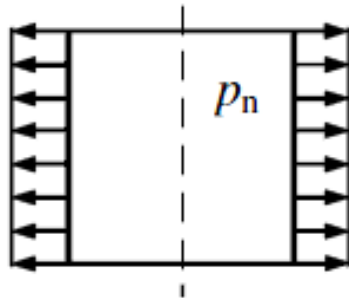
$$\sigma_x = \pm \frac{M}{\pi r^2 t}$$

$$\sigma_x = -\frac{1}{t} \int_0^l p_x dx$$

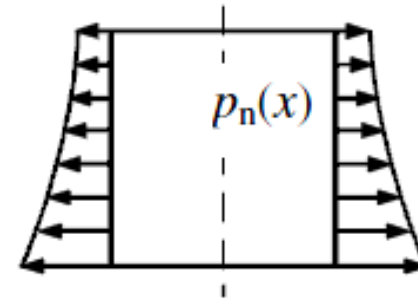
Navrhování zásobníků – Válcové

- ČSN EN 1993-1-6 – Pevnost a stabilita ocelových skořepin
- Nevyztužené válcové skořepiny

Rovnoměrný vnitřní tlak



Proměnný vnitřní tlak



Obvodová membránová napětí

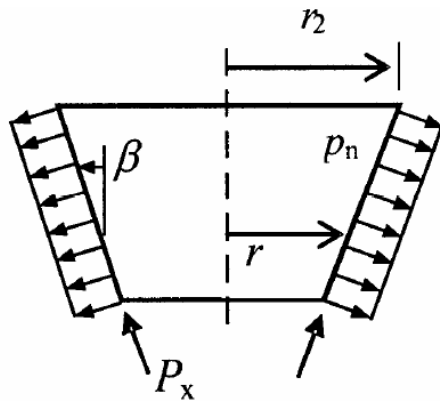
$$\sigma_{\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

$$\sigma_{\theta}(x) = p_n(x) \frac{r}{t}$$

Navrhování zásobníků – Válcové

- ČSN EN 1993-1-6 – Pevnost a stabilita ocelových skořepin
- Nevzdušené kuželové skořepiny

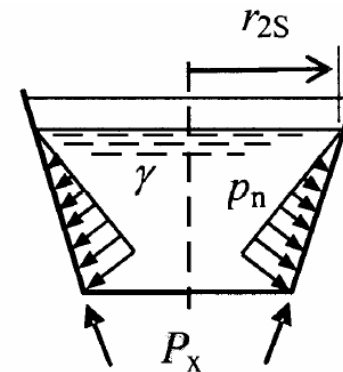
Rovnoměrný vnitřní tlak



$$\sigma_x = -p_n \frac{r}{2t \cos \beta} \left[\left(\frac{r_2}{r} \right)^2 - 1 \right]$$

$$\sigma_\theta = p_n \frac{r}{t \cos \beta}$$

Proměnný vnitřní tlak



r_{2s} je poloměr na hladině tekutiny

$$\sigma_x = -\frac{\gamma r}{t \sin \beta} \left\{ \frac{r_{2s}}{6} \left[\left(\frac{r_{2s}}{r} \right)^2 - 3 \right] + \frac{r}{3} \right\}$$

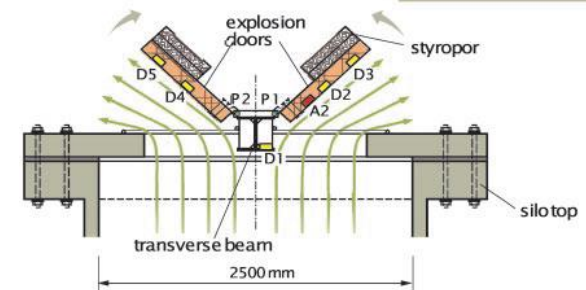
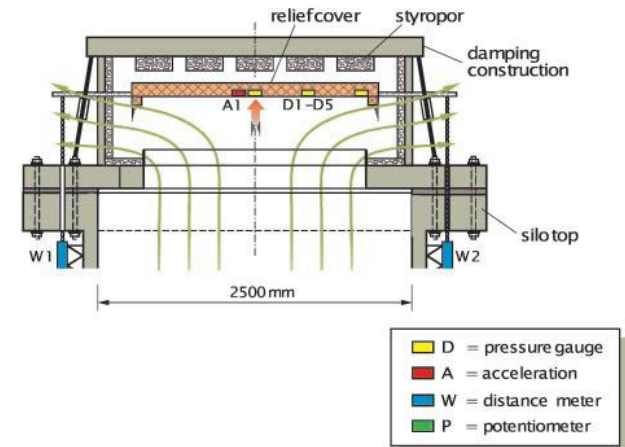
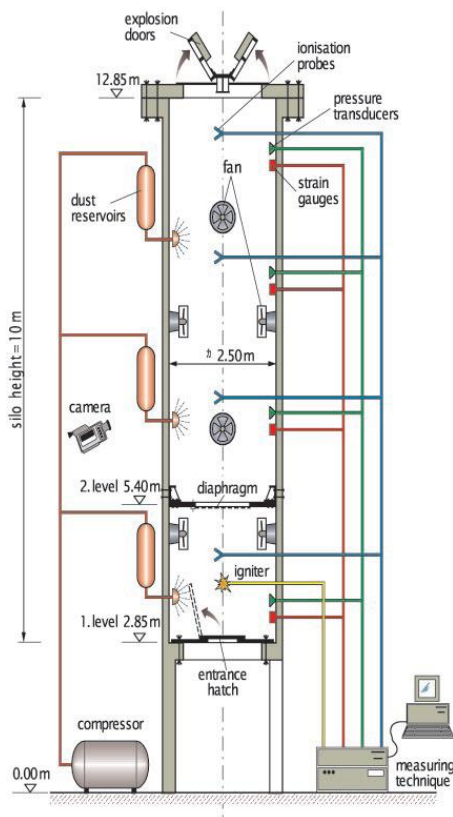
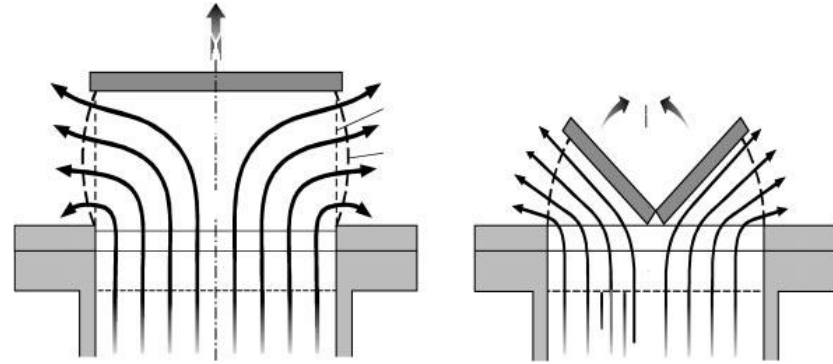
$$\sigma_\theta = +\frac{\gamma r}{t \sin \beta} (r_{2s} - r)$$

Zásobníky

- Některé faktory komplikující návrh
 - Společné podpěrné konstrukce
 - Součást nosné konstrukce budovy
 - Vnitřní příčky
 - Vnitřní táhla
 - Prostupy pro kontrolní průlezy a čidla
 - Otvory ve stěně a vnější technologie
 - Speciální zařízení pro plnění či vyprazdňování (skluzy, čeření, vibrace, provzdušňování)
 - Přetlak / podtlak
 - Teplota
 - Výbuch

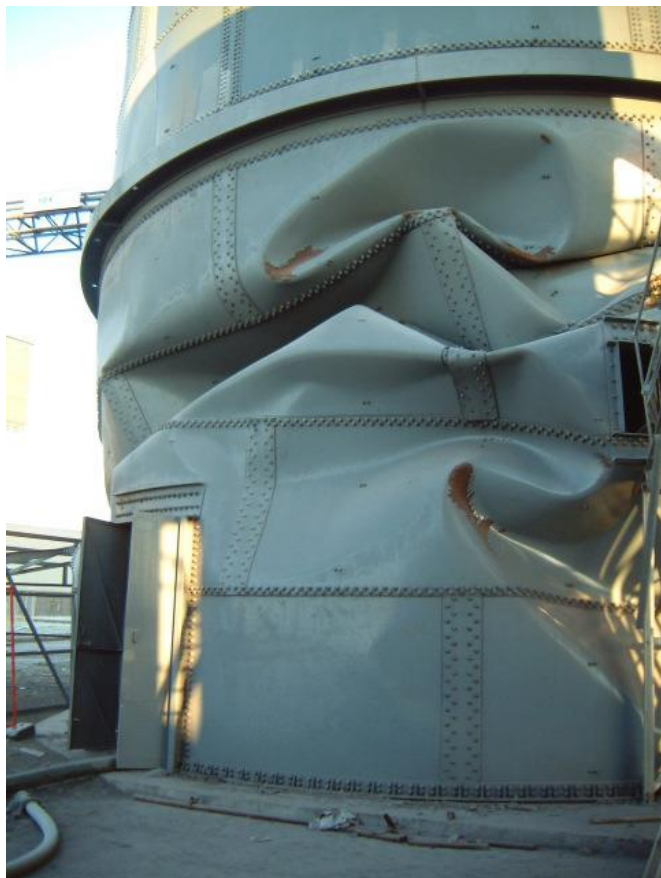
Poruchy zásobníků – Výbuch

- Možnosti řešení
 - Zabránění výbuchu
 - Konstrukce odolné proti výbuchu
 - Uvolnění tlaku

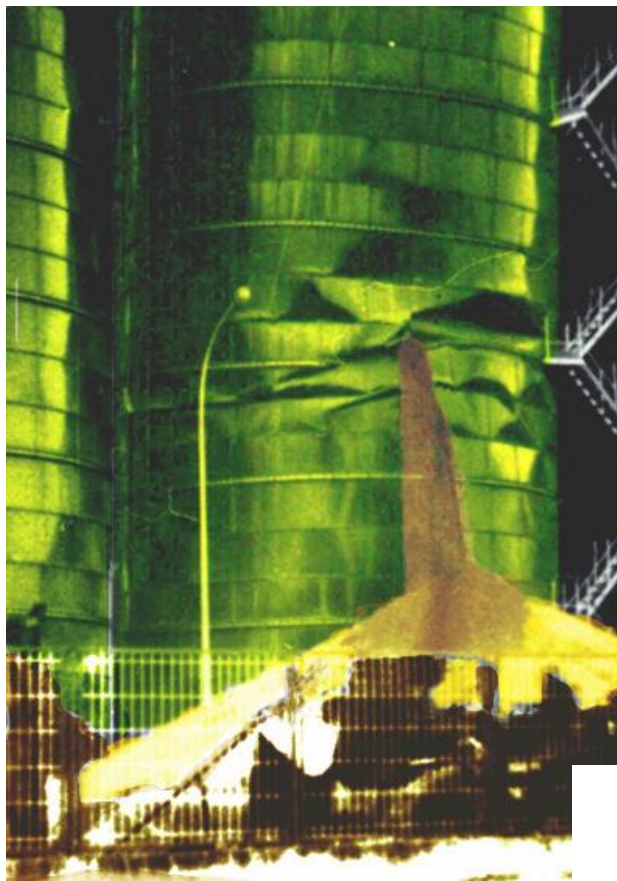


Bezpečnostní ventil, klapka

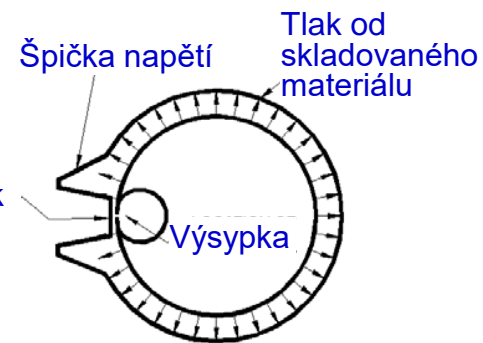
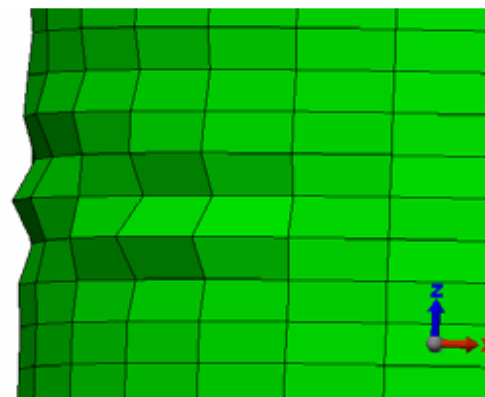
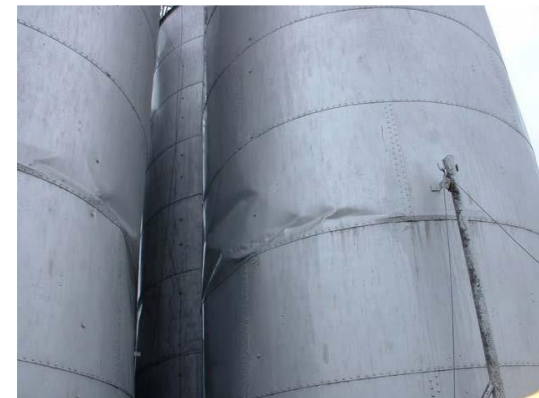
Poruchy zásobníků



Svislý rovnoměrný tlak,
Skotsko



Svislý nerovnoměrný tlak,
Skotsko

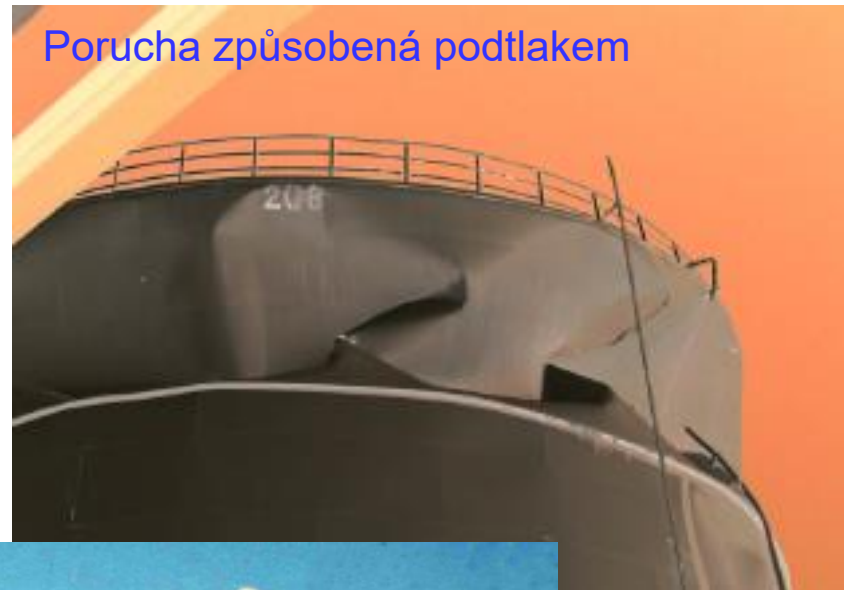


Poruchy zásobníků

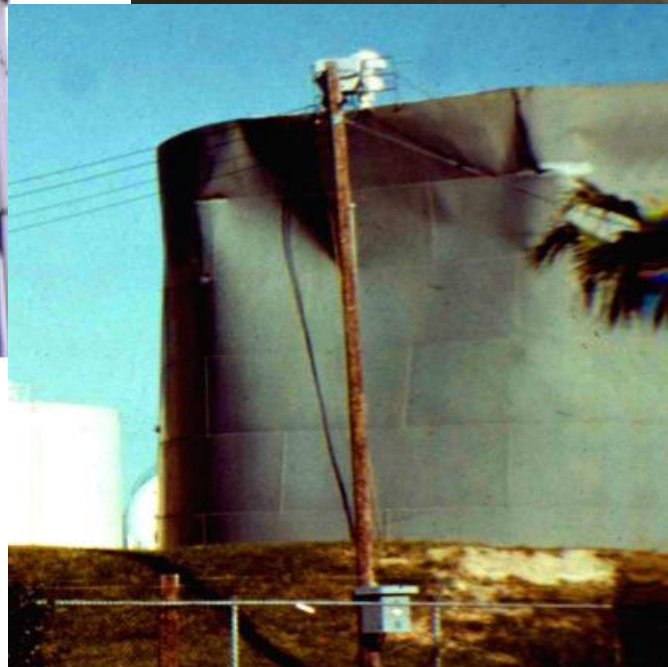


Nesymetrické vyprazdňování, Polsko

Kolaps konstrukce nevhodně navrženého zásobníku je pravděpodobnější, než u jiného výrobního zařízení.

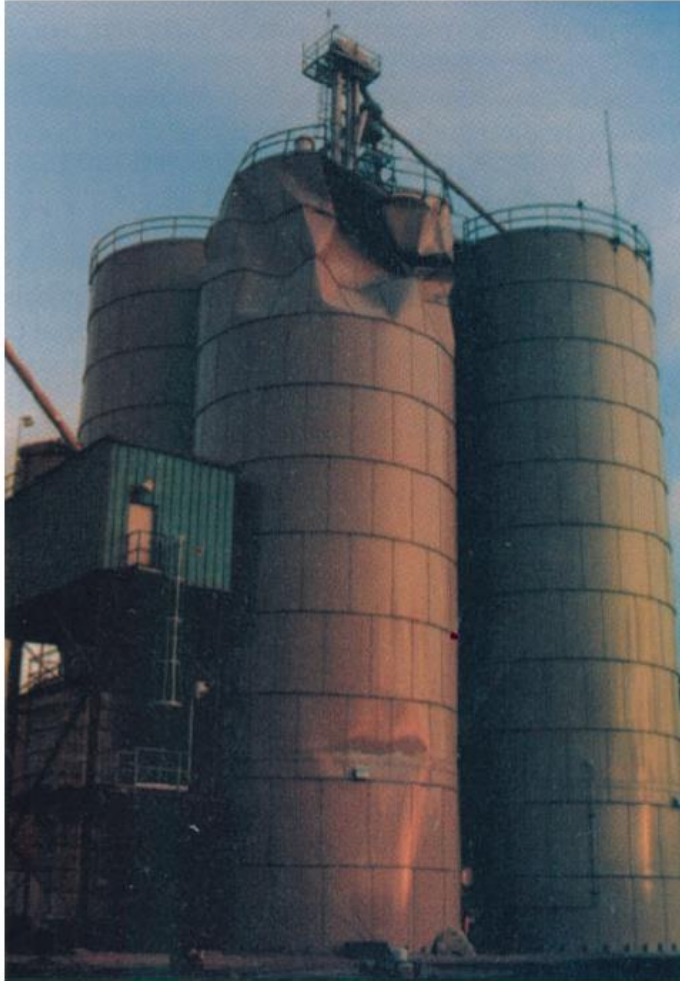


Porucha způsobená podtlakem



Porucha způsobená větrem

Poruchy zásobníků



Výsledek plného toku v silu konstrukčně navrženém na nálevkový tok



Silo na obilné zrno – po porušení v místě výsyvky vytvořila padající zrna vakuum, které nasálo vršek sila dovnitř.

Poruchy zásobníků



Pád zásobníků
způsobený větrem



Oddělení nádrže od základu,
porucha způsobená větrem



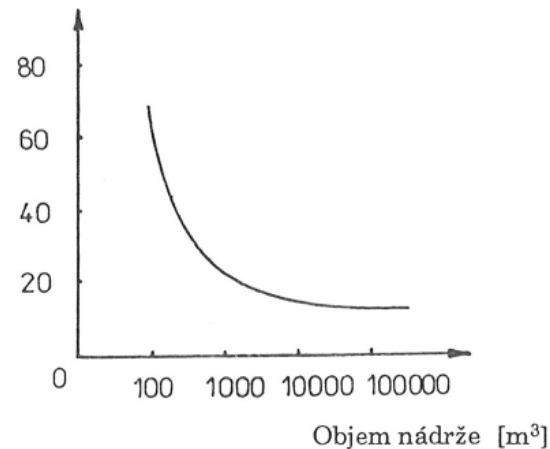
Porucha způsobená
seizmicitou

Nádrže

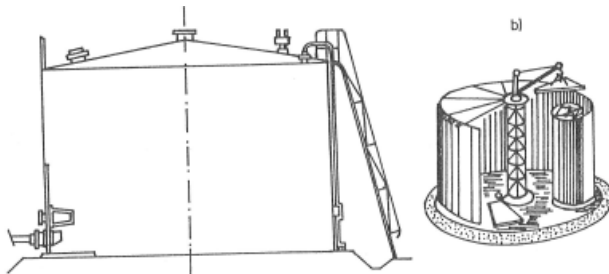
Nádrže

- Nejčastější nádrže na ropné produkty a zkapalněný plyn
- Voda, víno, jiné chemikálie
- Dělení podle tvaru
 - Válcové svislé s plochým dnem
 - Válcové vodorovné
 - Kulové
 - Pravoúhlé
 - Jiné
- Dělení podle tlaku
 - Nízkotlaké do 20 mbar = 2 kPa
 - Vysokotlaké (4 – 10 kPa)

Spotřeba oceli [kg/m³]

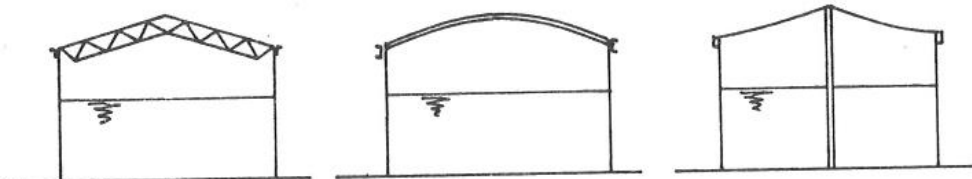


Svislé válcové nádrže: ekonomicky výhodné nádrže o velkém objemu → nad 100 000m³



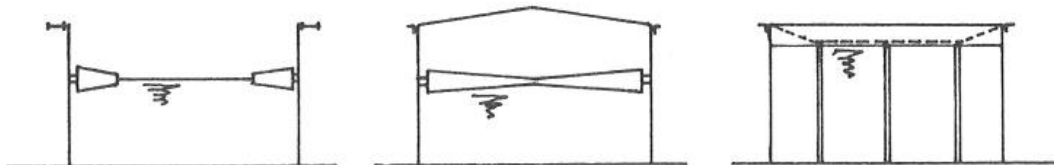
Nádrže

- Svislé válcové nádrže
 - Pevná střecha uložena na obvodovém prstenci



Visutá střecha z tenkého plechu

- Plovoucí střecha
 - Externí **x** Interní
 - Na dně nádrže speciálně tvarované



Ztužující prstenec na horním obvodu

Plovoucí střecha + další zastřešení

„Dýchající střecha“ – vyrovnává malé změny objemu

Kónická střecha nádrže



Kónická střecha nádrže podpíraná sloupy - montáž

Nádrže

- Svislé válcové nádrže

Plovoucí střecha



Nádrže

- Dimenzování stěny nádrže – zjednodušené vztahy
 - Membránová napětí vyvolaná hydrostatickým tlakem náplně + vlastní hmotnost

- Vodorovná složka napětí

$$\sigma_h = \frac{pD}{2t} = \frac{\gamma h D}{2t} \rightarrow t = \frac{\gamma h D}{2f_{yd}}$$

Objemová hmotnost ropy $\gamma = 0,86 \text{ t/m}^3$

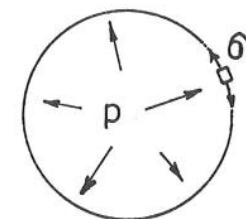
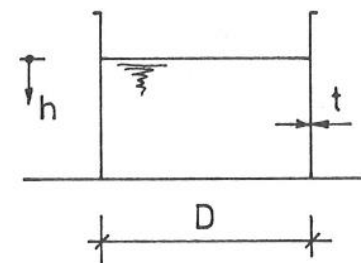
- Nádrže stojící na otevřeném prostranství → účinek větru
- Ke stanovené tloušťce stěny t přídavek kvůli korozi
- Návrhová pevnost f_{yd} se obvykle uvažuje jako $\frac{2}{3} f_y$
- Konstrukční minima pro tloušťky plechu stěny

- Dno obvykle 6 mm

| průměr [m] | do 15 | 15 - 36 | 36 - 60 | nad 60 |
|---------------|-------|---------|---------|--------|
| tloušťka [mm] | 5 | 6 | 8 | 10 |

- Svislá složka napětí od vlastní hmotnosti nádrže G a od větru - moment M_w

$$\sigma_v = \frac{G}{\pi D t} + \frac{4M_w}{\pi D^2 t} \quad \text{a interakce } \sigma_h + \sigma_v$$



Nádrže

- Zemětřesení
 - U nádrží jde o specifický faktor návrhu
 - Netuhá hmota náplně hraje významnou roli v dynamickém chování soustavy
 - Řešení pomocí hydrodynamických rovnic

- Hydrodynamické účinky
 - Konvektivní složka pohybu kapaliny
 - Impulzní složka pohybu kapaliny
 - Deformace pláště vlivem hydrodynamických tlaků
 - Interakce deformace pláště s impulzní složkou
 - Poddajnost základové půdy a její vliv na odezvu
 - Účinky plovoucí střechy

- Tlumení
 - Konstrukční tlumení
 - Tlumení vlivem náplně
 - Tlumení vlivem podloží

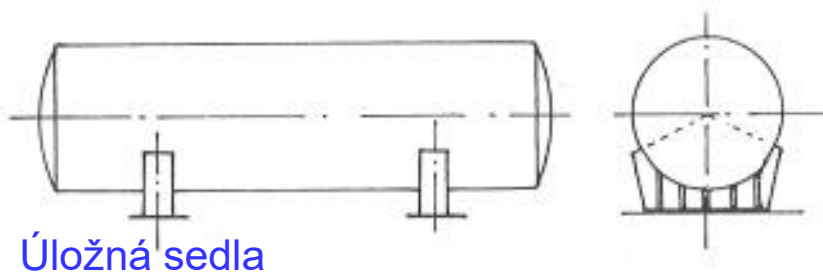
Nádrže

- Vodorovně uložené válcové nádrže
 - Polokulová čela
 - Membránová napětí od vnitřního přetlaku skladované tekutiny + napětí od ohybu nádrže uložené na podporách
 - Zesílení pláště v oblasti podpor - MKP

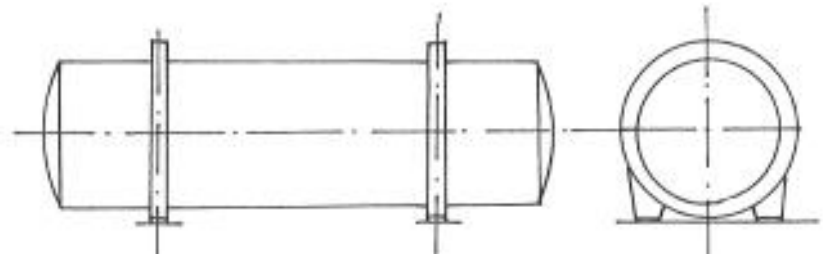


- Kulové nádrže

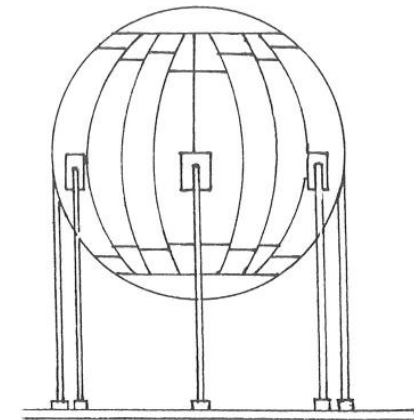
- Běžně průměr 10 – 16 m
- Největší nádrž má průměr 48 m



Úložná sedla



Podporové prstence



Lanové konstrukce

Konstrukce lana



Konstrukce lana

■ Dráty



Kruhový

Dělicí
(H-drát)

Klínový
(T-drát)

Z-drát

Trojúhelníkový

Plošný

Oválný

■ Průměr drátu (0,2 – 8,0 mm)

- Malé průměry (do 2,2 mm) odstupňovány po 0,05 mm
- Střední průměry (2,2 až 4,0 mm) po 0,1 mm
- Velké průměry (od 4,0 mm) po 0,2 mm

■ Zpravidla použití patentovaných drátů

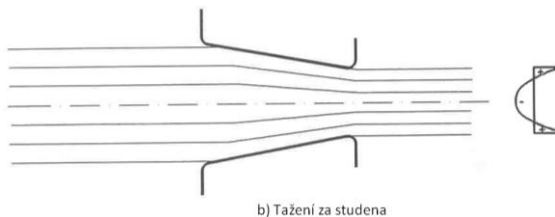
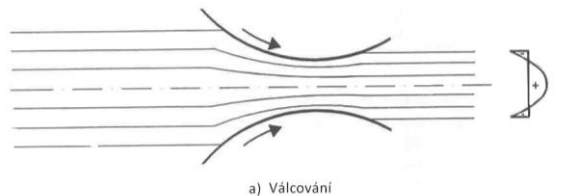
Výroba ocelových lan

■ Patentovaný drát

- Dráty zušlechtěné tzv. patentováním
- Patentování = izotermické kalení (Vysoká houževnatost vhodné pro tváření za studena)
 - Ohřátí na cca 920 °C
 - Kalení (prudké ochlazení) do olověné nebo solné lázně ohřáté na teplotu cca 550 °C
 - Pomalé ochlazování

■ Tažení drátu za studena (válcování x tažení)

- Zvýšení |

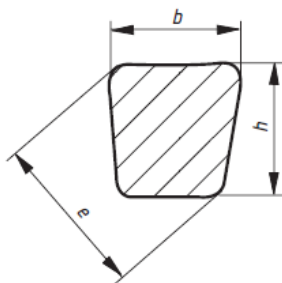


Konstrukce lana

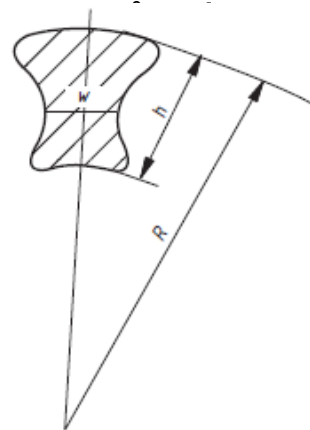
- Dráty – speciální průřezy
 - Klínový, H-drát, Z-drát
 - Použití do obvodových vrstev lan

- Výhody při použití u pramenů a lan
 - Odolnější proti korozi – menší rezervy
 - Na stejné ploše je více materiálu – vyšší tuhost
 - Odolnější při lokálním příčném tlaku (např. ... -ívěsu)

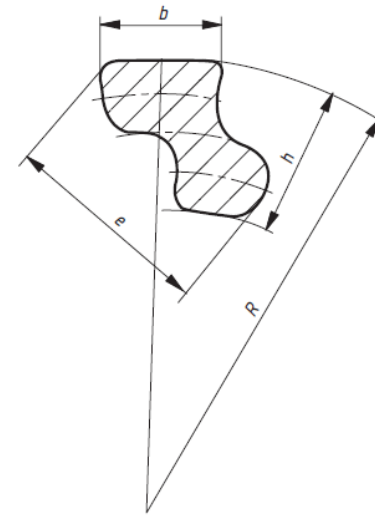
- Nevýhody při použití u
 - Menší ohebnost



Klínový – (T)



H-drát (H)



Z-drát (Z)

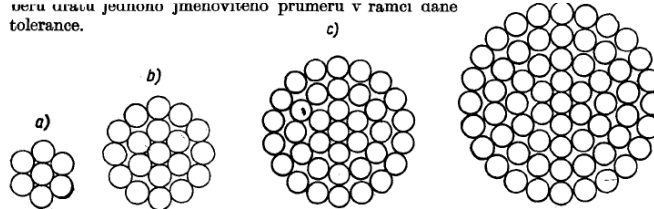
Konstrukce lana

■ Prameny (jednopramenná lana)

■ Vinuté

■ Otevřená

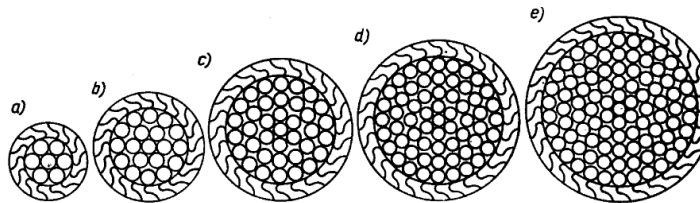
Uzavřená lana jsou jmenovitě prumeru v rámci dány tolerance.



Obr. 10. Jednopramenná lana otevřená — typy podle ČSN

a — ČSN 02 4310 (1 + 6),
 b — ČSN 02 4311 (1 + 6 + 12),
 c — ČSN 02 4313 (1 + 6 + 12 + 18),
 d — ČSN 02 4314 (1 + 6 + 12 + 18 + 24)

■ Uzavřená

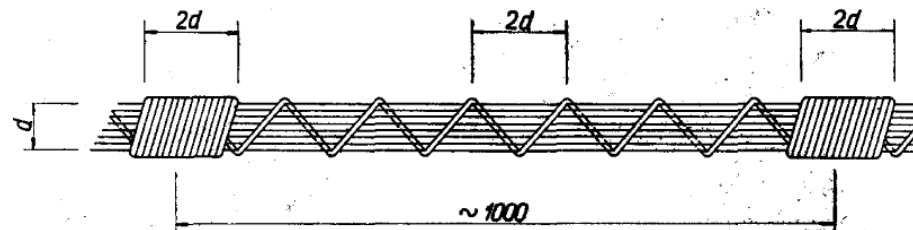


Obr. 13. Jednopramenná lana uzavřená — konstrukce podle ON 02 4392

a — 1 + 6 + Z (\varnothing 22,4),
 b — 1 + 6 + 12 + Z (\varnothing 23,6 až \varnothing 33,5),
 c — 1 + 6 + 12 + 18 + Z (\varnothing 35,5 až \varnothing 42,5),
 d — 1 + 6 + 12 + 18 + 24 + Z (\varnothing 45 až \varnothing 50),
 e — 1 + 6 + 12 + 18 + 24 + 30 + Z (\varnothing 53 až \varnothing 60)



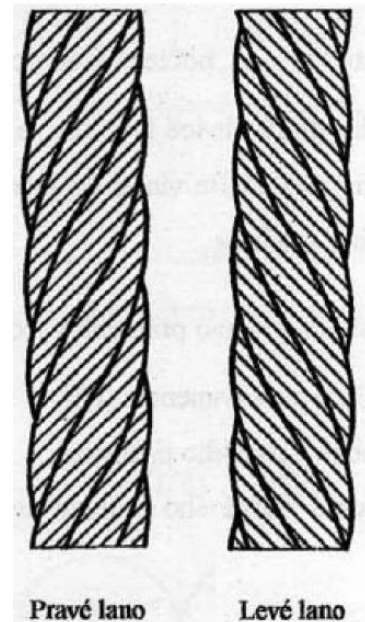
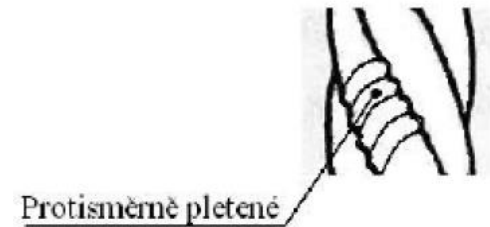
■ Skládání



Obr. 21. Bandážování skládaného pramene podle DIN 4131

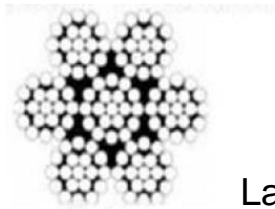
Konstrukce lana

- Směr vinutí
 - Stejnoseměrný způsob pletení
 - Krouživý účinek – zohlednit při manipulaci
 - Vyšší životnost než protiseměrná
 - Mají tendenci se roztočit
 - Musí být stále zatížena
 - Protiseměrný způsob pletení
 - Menší krouživost na úkor životnosti
 - Menší ohebnost
- Levým, či pravým vinutím lze lano zbavit krouživého účinku

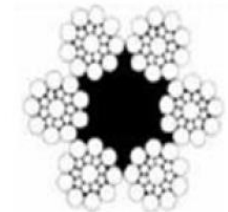


Výroba ocelových lan

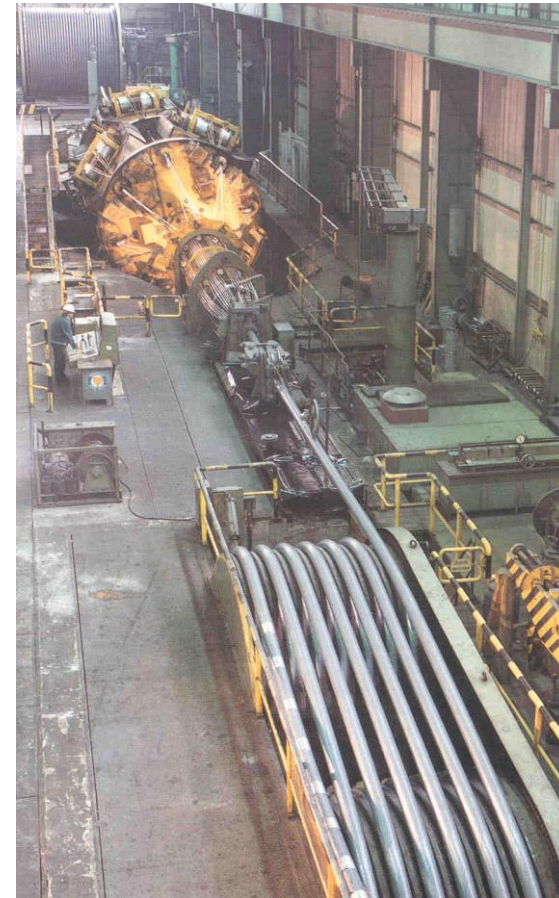
- Vinutí pramene a lana



Lano Standard



Lano Seal

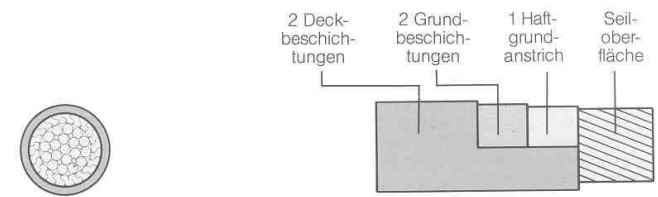


Drát → Patentování → Drátotah (tažení) → Patentovaný drát → Vinutí → Pramen → Lano

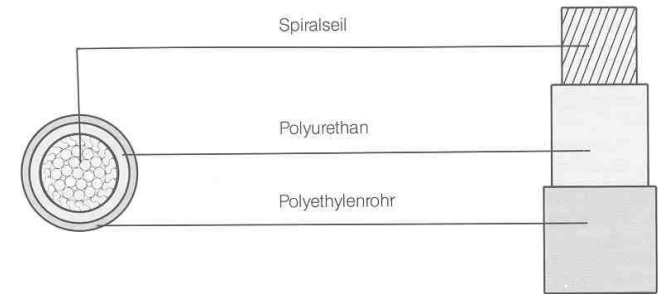
Výroba lana - <https://www.youtube.com/watch?v=eDVf71xd2cQ>

Ochrana ocelových lan

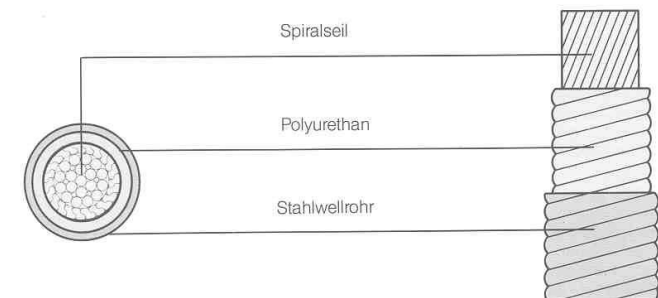
- Ochranná vrstva na povrchu lana
 - Pozinkované dráty
 - Mezery vyplněny plnidly
 - Pvlak lana (nátěr, trubky)



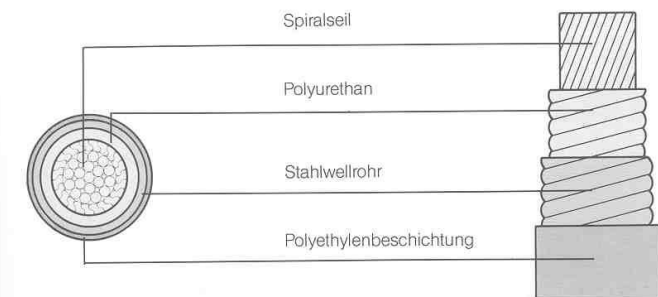
Lano
PU
PE



Lano
PU
Ocel

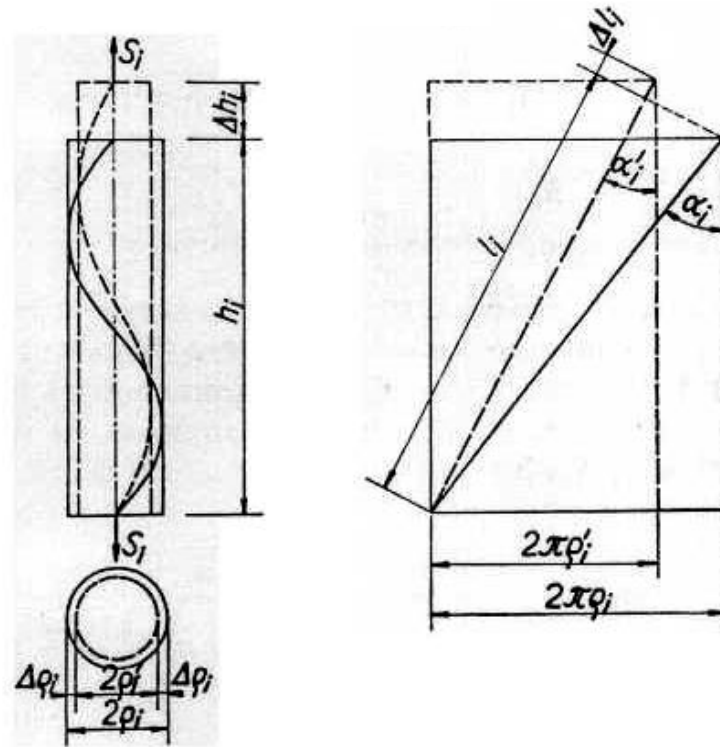


Lano
PU
Ocel
PE



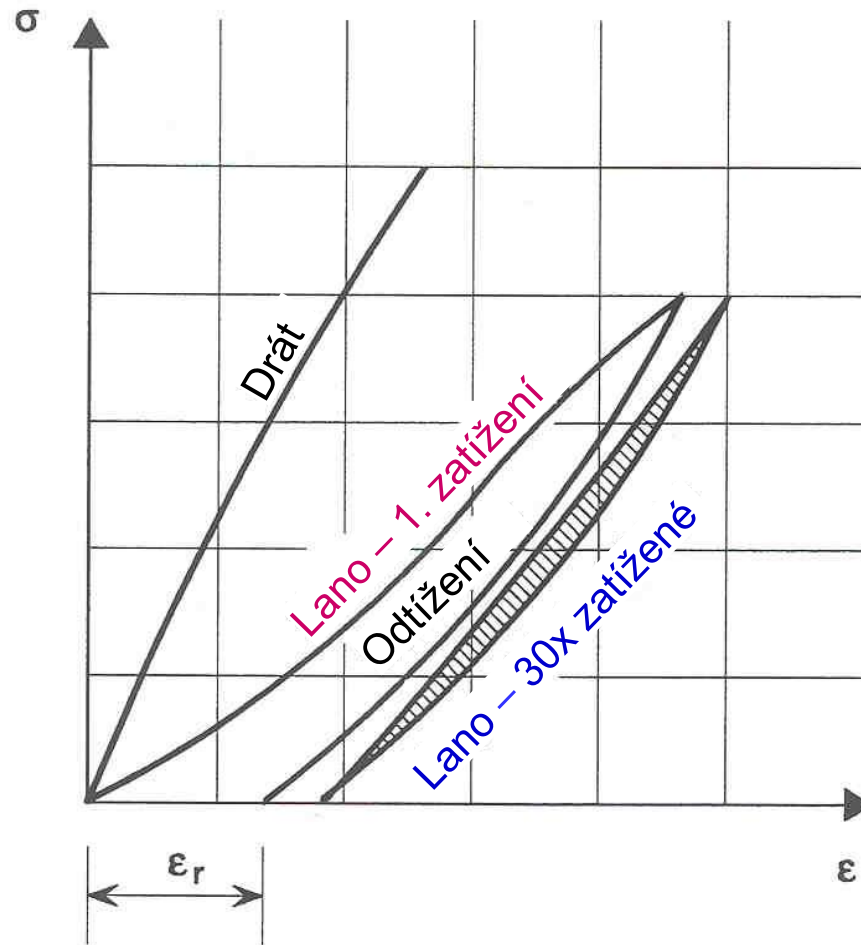
Mechanické vlastnosti ocelových lan

- Deformace drátu ve vinutém laně pod zatížením
 - Výška vinutí
 - Vzdálenost rovnoběžná s podélnou osou lana. Výška závitu (spirály) kolem osy lana
 - Úhel vinutí drátu v prameni



Mechanické vlastnosti ocelových lan

- Modul pružnosti
 - Získán z pracovního diagramu
 - Rozdílný pro drát a lano



Materiálové vlastnosti drátu

- Modul pružnosti

- Rovnoběžné dráty $E = 200 \text{ GPa}$
- Uzavřená jednopramenná lana $E = 160 \text{ GPa}$
- Otevřená vícepramenná lana $E = 150 \text{ GPa}$ (Někdy i jen 80 GPa)

- Dle ČSN EN 1993-1-11

Tabulka 3.1 – Modul pružnosti E_Q odpovídající proměnným zatížením Q

| | Vysokopevnostní tažený prvek | $E_Q \text{ [kN/mm}^2\text{]}$ | |
|---|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | | ocelové dráty | dráty z korozivzdorné oceli |
| 1 | Spirálové pramenné lano | 150 ± 10 | 130 ± 10 |
| 2 | Plně uzavřené spirálové lano | 160 ± 10 | – |
| 3 | Pramenné drátěné lano s CWR | 100 ± 10 | 90 ± 10 |
| 4 | Pramenné drátěné lano s CF | 80 ± 10 | – |
| 5 | Svazek rovnoběžných drátů | 205 ± 5 | – |
| 6 | Svazek rovnoběžných pramenů | 195 ± 5 | – |

Materiálové vlastnosti drátu

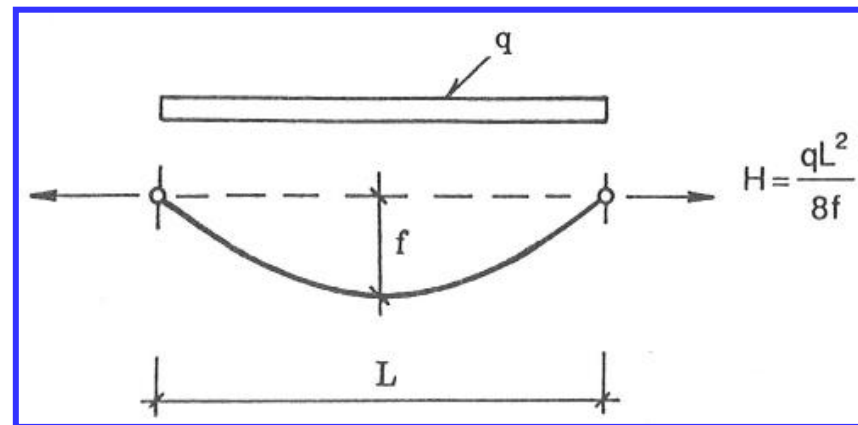
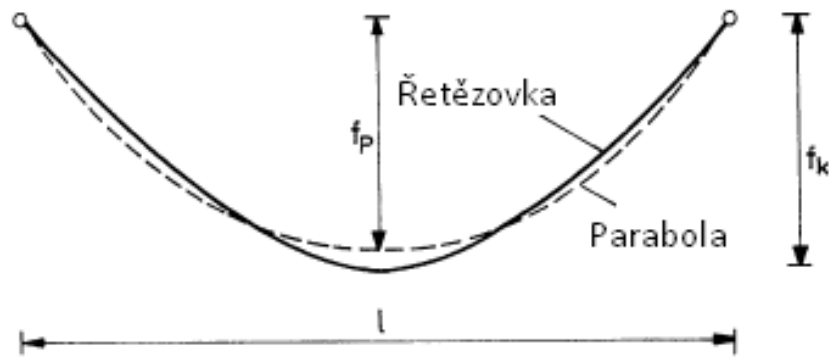
- Pevnostní třídy (charakteristická pevnost v tahu)
 - Ocelové dráty kruhového průřezu $f_{uk} = 1770 \text{ MPa}$
 - Ocelové dráty Z-průřezu $f_{uk} = 1570 \text{ MPa}$
 - Dráty kruhového průřezu z korozivzdorné oceli $f_{uk} = 1450 \text{ MPa}$

- Součinitel roztažnosti
 - Ocelové dráty $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ na } ^\circ\text{C}$
 - Dráty z korozivzdorné oceli $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ na } ^\circ\text{C}$

- Požadavky na vlastnosti drátů do lan
 - ČSN EN 10 264 – 1 až 4
 - ČSN EN 10218-1 (zkušební metody – všeobecně)
 - ČSN ISO 7800 (dráty – zkouška jednoduchým krutem)
 - ČSN ISO 7801 (dráty – zkouška střídavým ohýbáním)

Řetězovka

- Tvar prověšení lana



Ocelová lana – zatížení

- Vlastní tíha

$$g_k = wA_m$$

- Jednotková hmotnost w [N/mm³]
 - Bere v úvahu hustotu oceli a zahrnuje systém protikorozní ochrany a případnou výplň lana (udává výrobce nebo ČSN EN 1993-1-11)

- Průřezová plocha kovových částí A_m [mm²]

- Lana a prameny s rovnoběžnými dráty (bez vinutí)

$$A_m = na_m$$

n = počet stejných drátů a pramenů

a_m = plocha průřezu drátu nebo pramene (dle normy)

- Vinutá lana a prameny

$$A_m = f \frac{\pi d^2}{4}$$

d = vnější průměr lana nebo pramenu v *mm*, zahrnující obal protikorozní ochrany

f = součinitel plnosti (ČSN EN 1993-1-11)

Ocelová lana – zatížení

- Vlastní tíha
 - Součinitel plnosti f a jednotková tíha w
 - ČSN EN 1993-1-11

Tabulka 2.2 – Jednotková tíha w a součinitel plnosti f

| | | Součinitel plnosti f | | | | | | Jednotková tíha $w \times 10^{-7}$ $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^3} \right]$ | |
|---|--|---|---|--|---|------|------|--|-----|
| | | Duše, dráty + 1 vrstva z-drátů | Duše, dráty + 2 vrstvy z-drátů | Duše, dráty + >2 vrstvy z-drátů | Počet vrstev drátů kolem středního drátu | | | | |
| | | | | | 1 | 2 | 3-6 | | >6 |
| 1 | Spirálová jednopramenná lana | - | - | - | 0,77 | 0,76 | 0,75 | 0,73 | 830 |
| 2 | Plně uzavřená spirálová lana | 0,81 | 0,84 | 0,88 | - | - | - | - | 830 |
| 3 | Spirálová více- pramenná lana z kruhových drátů | - | - | - | 0,56 | | | | 930 |

Ocelová lana – nelineární účinky

- ČSN EN 1993-1-11 doporučuje zohlednění deformací
 - Vyplívajících z účinků řetězovky
 - Zkrácení nebo prodloužení prvků
 - Dotvarování lana
- Účinný modul pružnosti
 - Pro každé lano nebo jeho část

$$E_t = \frac{E}{1 + \frac{w^2 L^2 E}{12 \sigma^3}}$$

E_t = účinný modul pružnosti lana

E = modul pružnosti lana

w = tíha lana

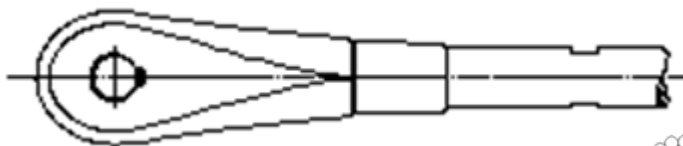
L = vodorovné rozpětí lana

σ = napětí v laně (včetně předpětí)

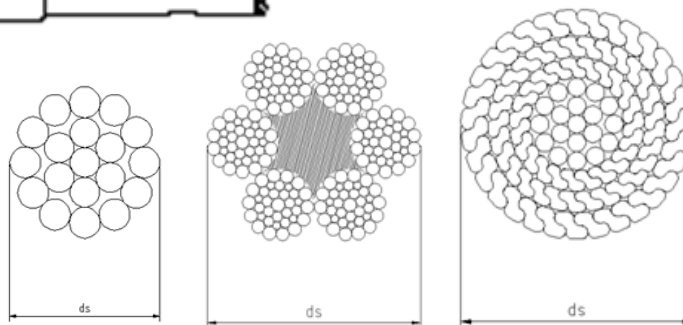
Tažené prvky – ČSN EN 1993-1-11

■ Rozdělení do tří skupin

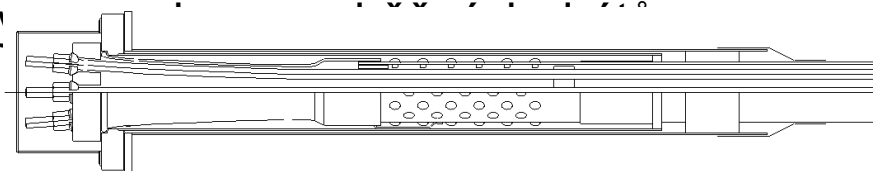
■ A – Tyče



■ B – Vinutá a uzavřená lana



■ C – Prameny



Tabulka 1.1 – Skupiny tažených prvků

| Skupina | Hlavní tažený prvek | Dílec |
|---------|----------------------------------|-----------------------------------|
| A | tyč | táhlo, předpjatá tyč |
| B | kruhový drát | spirálové pramenné lano |
| | kruhové a Z-dráty | uzavřené lano |
| | kruhový drát a drátový pramen | pramenné lano |
| C | kruhový drát | pramen s rovnoběžnými dráty (PWS) |
| | kruhový drát | svazek rovnoběžných drátů |
| | sedmistrátový (předpjatý) pramen | svazek rovnoběžných pramenů |

ČSN EN 1993-1-11 – MSÚ

- Prvky skupiny A (tažené tyče)
 - ČSN EN 1993-1-1

- Prvky skupiny B a C a předpínací tyče

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0$$

$$F_{Rd} = \min \left(\frac{F_{uk}}{1,5\gamma_R}; \frac{F_k}{\gamma_R} \right) \text{ je návrhová únosnost v tahu}$$

F_{uk} = charakteristická hodnota únosnosti při přetržení (odpovídá charakteristické hodnotě mezní pevnosti v tahu)

F_k = charakteristická hodnota zkušební únosnosti taženého prvku podle příslušné normy

γ_R = dílčí součinitel spolehlivosti (závisí na konstrukčním řešení kotvení)

Tabulka 6.1 – Charakteristické hodnoty zkušební pevnosti F_k tažených prvků

| Skupina | Odpovídající norma | F_k |
|--|--------------------|-----------------|
| A | EN 10138-1 | $F_{0,1k}^{*)}$ |
| B | EN 10264 | $F_{0,2k}$ |
| C | EN 10138-1 | $F_{0,1k}$ |
| *) Pro předpínací tyče viz EN 1993-1-1 a EN 1993-1-4 | | |

Tabulka 6.2 – Doporučené hodnoty γ_R

| Zařízení pro minimalizaci ohybových napětí u kotvení | γ_R |
|--|------------|
| je | 0,90 |
| není | 1,00 |

ČSN EN 1993-1-11 – MSÚ

- Charakteristická hodnota únosnosti při přetržení F_{uk}
 - Skupina B tažených prvků

$$F_{uk} = F_{min} k_e$$

F_{min} = minimální síla při přetržení (ČSN EN 12385-2)

$$F_{min} = d^2 R_r K$$

d = jmenovitý průměr lana

R_r = třída pevnosti lana (charakteristická hodnota meze pevnosti v tahu – f_{uk})

K = minimální koeficient síly při přetržení (udává výrobce, nebo dle ČSN EN 12385-2)

k_e = součinitel ztráty (závisí na typu ukončení lana)

Tabulka 6.3 – Součinitelé ztráty k_e

| Typ ukončení | Součinitel ztráty k_e |
|--|-------------------------|
| Koncovka vyplněná kovem | 1,0 |
| Koncovka vyplněná pryskyřicí | 1,0 |
| Oko zajištěné objímkou | 0,9 |
| Kovaná koncovka | 0,9 |
| Šroubovaná U svorka | 0,8 ^{*)} |
| *) Pro šroubovanou U svorku je možné redukovat předpětí. | |

ČSN EN 1993-1-11 – MSÚ

- Charakteristická hodnota únosnosti při přetržení F_{uk}
 - Skupina C tažených prvků

$$F_{uk} = A_m f_{uk}$$

A_m = plocha kovového průřezu

f_{uk} = Charakteristická hodnota pevnosti v tahu

ČSN EN 1993-1-11 – MSP

- Dvě kritéria použitelnosti
 - Deformace nebo kmitání
 - Konkrétní hodnoty omezení norma neudává, pouze konstrukční pokyny
 - Omezení napětí (podmínky pružného chování)
 - Vztaženo k pevnosti při přetržení σ_{uk}

$$\sigma_{uk} = \frac{F_{uk}}{A_m}$$

Tabulka 7.1 – Hodnoty omezených napětí f_{const} pro montážní fázi

| Stav montáže | f_{const} |
|--|--------------------|
| První napínané prvky pouze pro několik hodin | $0,60 \sigma_{uk}$ |
| Po montáži dalších tažených prvků | $0,55 \sigma_{uk}$ |

Nebo výpočtem

$$f_{const} = \frac{\sigma_{uk}}{1,50 \gamma_R \gamma_F} = \frac{0,66 \sigma_{uk}}{\gamma_R \gamma_F}$$

$$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,10 = 1,10 \text{ pro krátkodobé situace}$$

$$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,20 = 1,20 \text{ pro dlouhodobé situace}$$

Tabulka 7.2 – Hodnoty omezených napětí f_{SLS} pro provozní podmínky

| Podmínky zatížení | f_{SLS} |
|--|--------------------|
| Posouzení na únavu zahrnující ohybová napětí ^{*)} | $0,50 \sigma_{uk}$ |
| Posouzení na únavu bez ohybových napětí | $0,45 \sigma_{uk}$ |

*) Ohybová napětí lze snížit vhodným zařízením, viz 7.1(2).

Nebo výpočtem

$$f_{SLS} = \frac{\sigma_{uk}}{1,50 \gamma_R \gamma_F} = \frac{0,66 \sigma_{uk}}{\gamma_R \gamma_F}$$

$$\gamma_R \times \gamma_F = 0,9 \times 1,48 = 1,33 \text{ s ohybovými napětími}$$

$$\gamma_R \times \gamma_F = 1,0 \times 1,48 = 1,48 \text{ bez ohybových napětí}$$

$$\gamma_F \approx \gamma_Q = 1,50 \approx 1,48$$

Lanové konstrukce

■ Visuté konstrukce

- Netuhé nosné prvky (pouze tah)



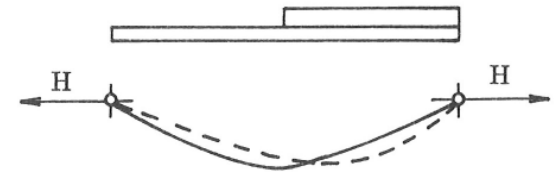
- Stabilizace zatížením nebo předpětím

■ Výhody

- Malá spotřeba materiálu
- Velká tvarová rozmanitost

■ Nevýhody

- Tvarová nestálost (tvar závisí na zatížení)
 - Řešit teorií II. řádu
 - Vysoké nároky na krytinu
- Při sání větru nebezpečí nadzdvihnutí (krytina)
- Velké horizontální reakce → nároky na podpory



Lanové konstrukce

■ Visuté konstrukce

■ Rovinné

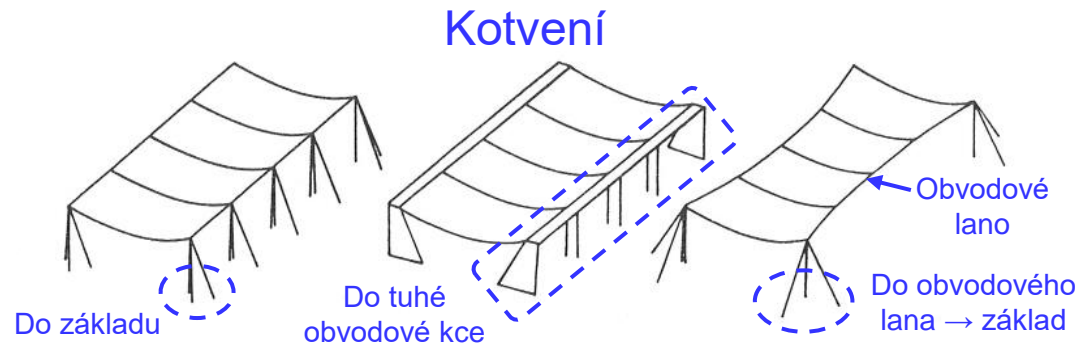
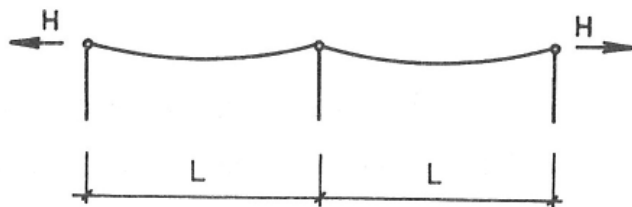
■ Jednovrstvé

■ Lano v ploše střechy

■ Pro zatížení sáním je nutno střechu stabilizovat

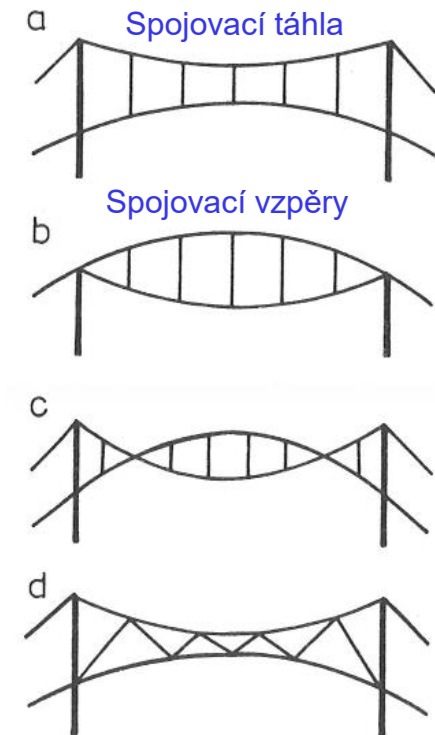
- Zatížením (balastem)
- Vyztužením (výztuhy, tuhé prvky)
- Předpětím (dvojvrstvé kce)

změna tvaru
a kmitání



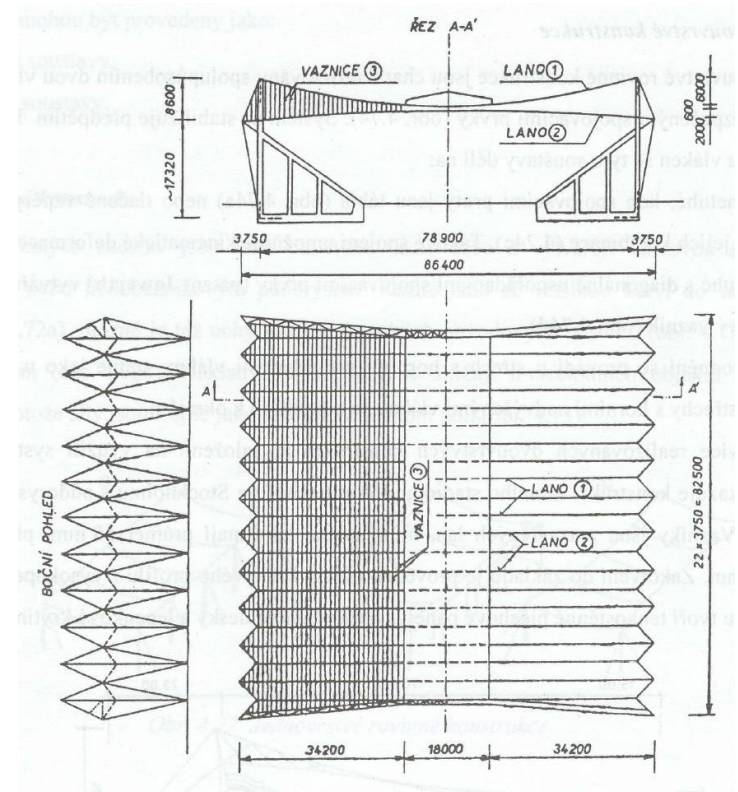
Lanové konstrukce

- Visuté konstrukce
 - Rovinné
 - Dvojvrstvé
 - Spolupůsobení 2 vláken ve svislé rovině
 - Systém je stabilizován předpětím
 - Tvarově netuhé systémy
 - Táhla (a)
 - Vzpěry (b)
 - Kombinace (c)
 - Tvarově tuhé systémy
 - Jawerthův nosník (d)
 - Spojovací prvky diagonálně



Lanové konstrukce

- Visuté konstrukce
 - Rovinné
 - Dvojvrstvé
 - Zimní stadion Plzeň, 1967



Lanové konstrukce

- Visuté konstrukce
 - Rovinné
 - Dvojvrstvé
 - Most Golden Gate v San Franciscu, 1933



Lanové konstrukce

■ Visuté konstrukce

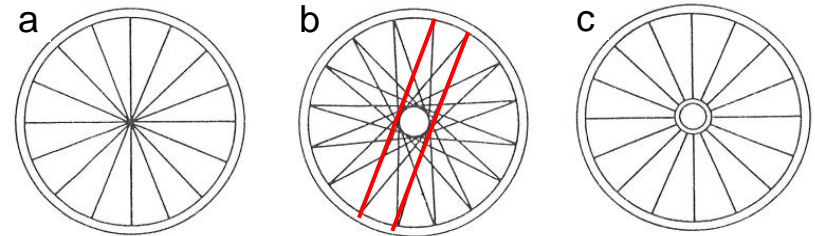
■ Prostorové

- S radiálními lany

■ Obvykle kruhový půdorys

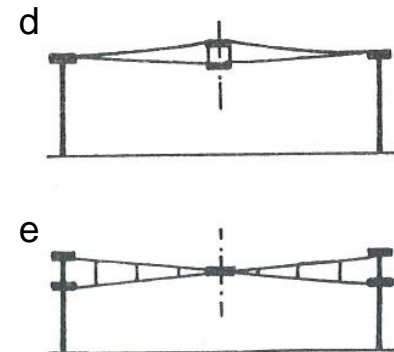
■ Jednovrstvé

- Radiální uspořádání lan (a)
 - Nevhodné křížení velkého počtu lan
- Dvojice rovnoběžných lan (b)
- Vnitřní tažený prstenec (c)



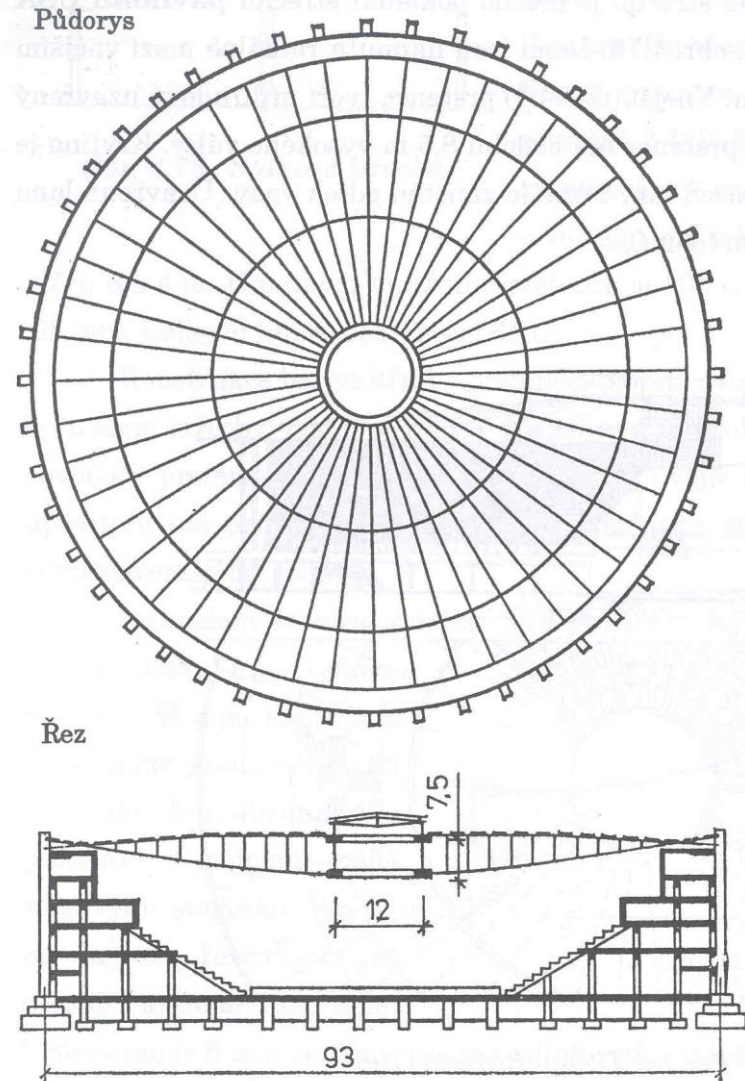
■ Dvojvrstvé

- Nejčastěji s vnitřním prstencem
- Často nadvýšení horních vláken (d)
 - Pomocí středového válce
 - Výhodné kvůli odvodnění
- S úžlabím (e)
 - Problém s odvodněním



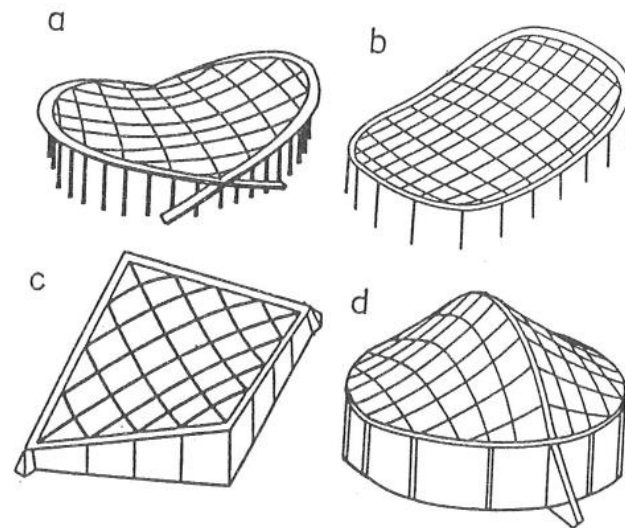
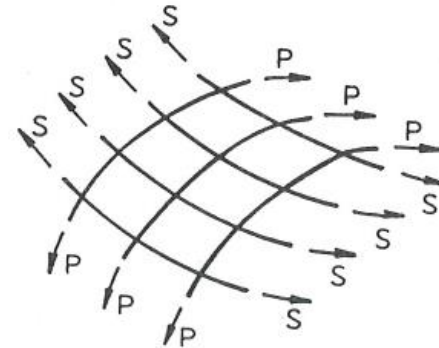
Lanové konstrukce

- Visuté konstrukce
 - Prostorové
 - S radiálními lany
- Sportovní hala Jubilejnyj, Petrohrad



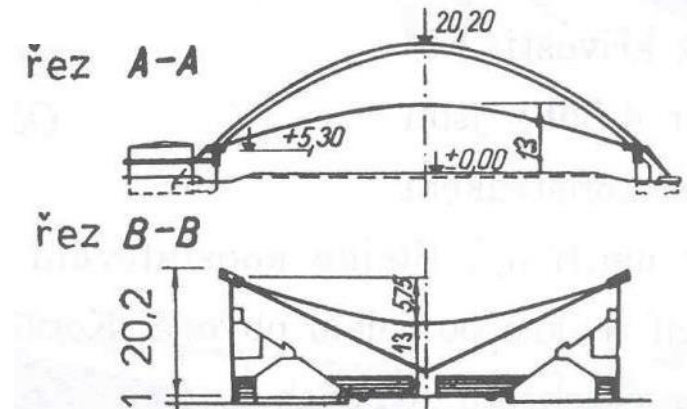
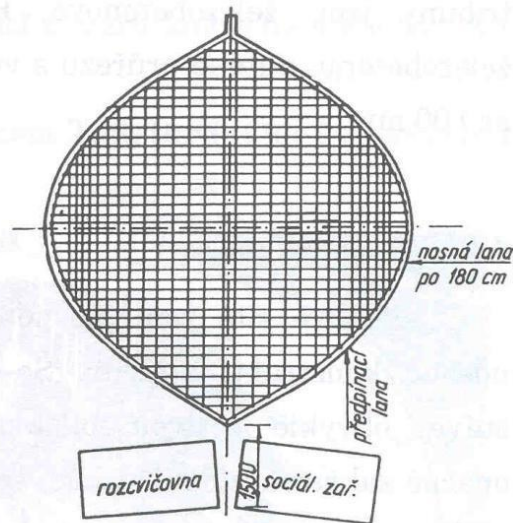
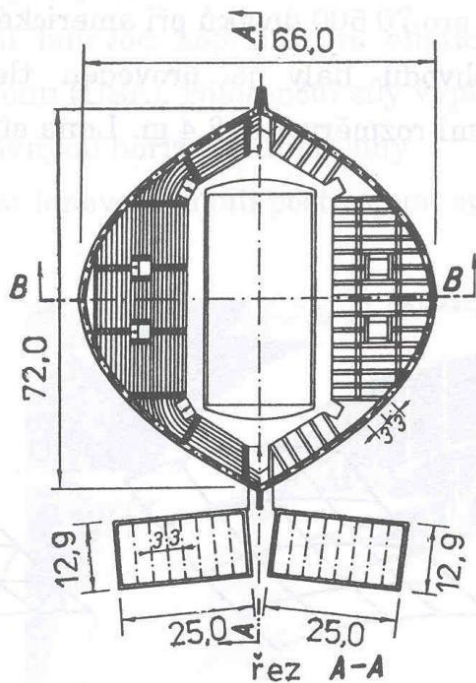
Lanové konstrukce

- Visuté konstrukce
 - Prostorové
 - Lanové sítě
 - Dvě osnovy lan
 - Konkávní – nosná
 - Konvexní – předpínací
 - Reakce po celém obvodě
 - Kotvení do obvodových prvků
 - Přímé
 - Obloukové
 - Tvarová rozmanitost



Lanové konstrukce

- Visuté konstrukce
 - Prostorové
 - Lanové sítě
- Sportovní hala Pasienky v Bratislavě, 1962



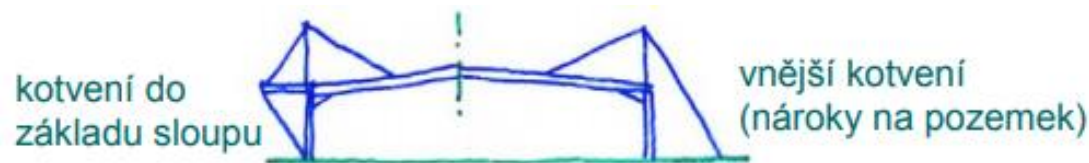
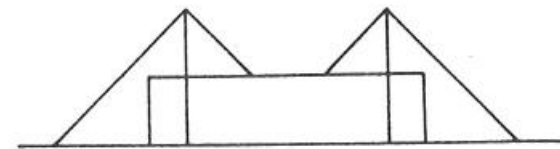
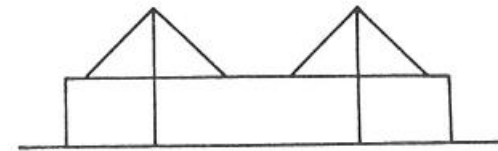
Lanové konstrukce

- Visuté konstrukce
 - Prostorové
 - Lanové sítě
 - Zastřešení festivalového komplexu



Lanové konstrukce

- Zavěšené konstrukce
 - Závěsy tvoří poddajné podpory
 - Rozklad sil
 - Svislá složka tvoří „podporu“
 - Vodorovná přitěžuje konstrukci
 - Nutná optimalizace umístění
 - Průběh vnitřních sil
 - Ohebné závěsy
 - Obvykle místo lan táhla



Membránové konstrukce

Úvod

- Současné trendy v architektuře
 - Užití membrán pro stálé stavby, v různých klimatických podmínkách napříč podnebnými pásy.



- Výhody
 - Neobvyklé tvary
 - Velká rozpětí
 - Nízká vlastní tíha střešní konstrukce

Předeprnutá membrána = konstrukční prvek schopný přenášet vnější zatížení



Typologie

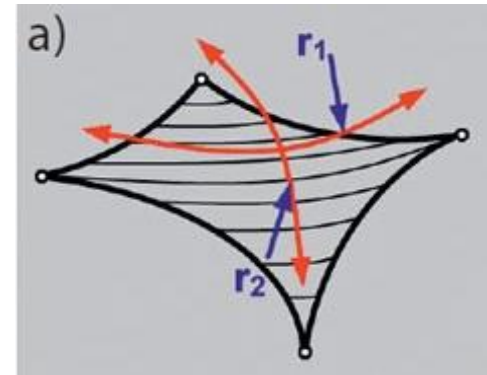
- 1) Mechanicky předepnuté
 - Jednovrstvé membrány
 - Textil, fólie, kovové sítě, ...
 - Bez požadavku na tepelnou izolaci
 - Membrána namáhána pouze tahovými silami
 - K zajištění stability dvě protisměrná zakřivení
 - Tvar zajištěn upnutím okrajů, vypnutím vrcholů nebo oblouků = převýšení bodů či linií v ploše (trychtýře, hřebeny atd.)

- 2) Pneumaticky předepnuté
 - Jednovrstvé nebo vícevrstvé membrány
 - Vypínané vzduchem - **přetlak**
 - Samonosné, nosné, velkoplošné, modulární

Předepnutí = základní požadavek pro působení membrán jako konstrukčních prvků přenášejících zatížení

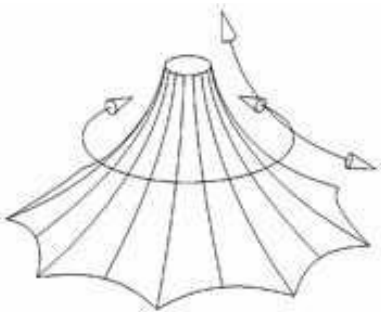
Mechanicky předepnuté membrány

- Vždy dvojí křivost
- Bodová membrána – hyperbolický paraboloid
 - Upnutí mezi 4 a více bodů, které nejsou v rovině
 - Jedno zakřivení konvexní, druhé konkávní
 - Nejčastěji vynesení konstrukce na sloupech, které jsou držené pomocí šikmých táhel působících proti směru vypnutí membrány



Mechanicky předepnuté membrány

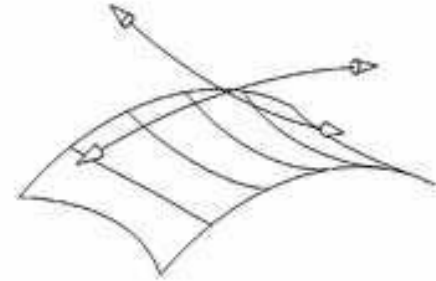
- Kužel (positivní **x** negativní – „pagoda **x** trychtýř“)
 - Vypnutí membrány mezi 2 křivkami různých průměrů (nejčastěji kružnice), které jsou od sebe vzdáleny
 - V řezu rovnoběžném s průměry je křivka konvexní, kolmo je konkávní
 - Svislé podpěry v ose **x** vzpěrné sloupy a lana na okraji



Mechanicky předepnuté membrány

■ Sedlo

- Zakřivení zajištěno v jednom směru oblouky na protilehlých stranách (konvexní zakřivení)
- Druhé (konkávní) zakřivení tvoří prohnutí plochy v kolmé rovině mezi nimi
- Tahové síly vypínání membrány mezi oblouky se aktivují lany
- Oblouky je nutno polohově zafixovat (táhly, vzpěrami, příhradovou konstrukcí) ve směru kolmém k oblouku, tj. proti tahu membrány



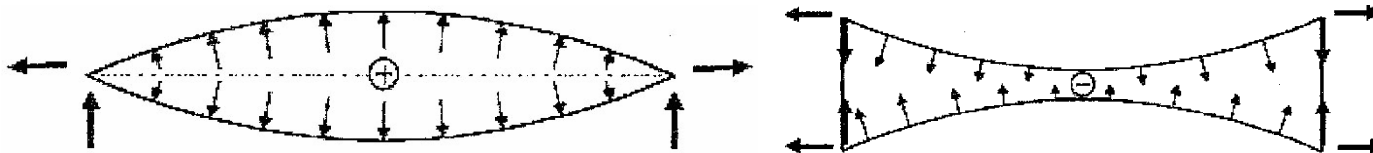
Pneumaticky předepnuté membrány

- Jednovrstvé konstrukce
 - Membránový obal nesený vnitřním přetlakem vzduchu
 - Stálý přetlak 300 – 1000 Pa
 - U velkých rozponů plášť stabilizován lany
 - Laciné, bez potřeby podpor a pomocných konstrukcí

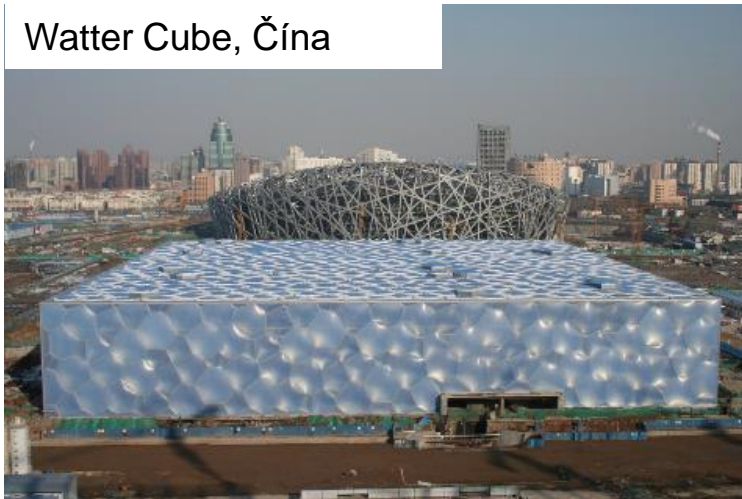


Pneumaticky předepnuté membrány

- Dvouvrstvé konstrukce
 - Vypínané přetlakem \times podtlakem



Water Cube, Čína



Allianz Arena, Mnichov



Velkorozponové konstrukce

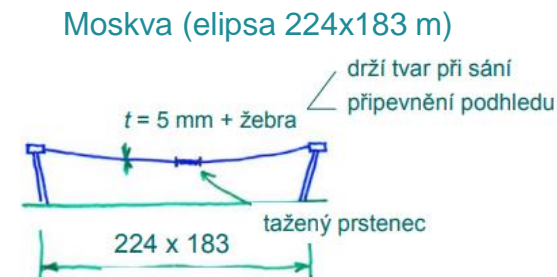
- Visuté konstrukce – membránové
 - Nosná membrána může tvořit krytinu
 - Problém s rekonstrukcí
 - Membrána působí jako celek
 - Při jejím narušení možný kolaps

- Tvar membrány

- Válcová
- Kruhová
- Elipsovitá

- Materiál membrán

- Korozivzdorná ocel
 - Plech o $t \approx 5$ mm
- Slitiny Al
 - Do 70 m rozponu ; $t \approx 2$ mm
- Tkanina
- Fólie



Předpínání membrán

- Rozhodující parametr membrán
- Aktivace tuhosti membrány

- Požadované úrovně předpětí může být dosaženo pomocí
 - Napínání membrány ve dvou směrech s opačnou křivostí.
 - Napínání membrány k tuhým bodům nebo tuhé konstrukci

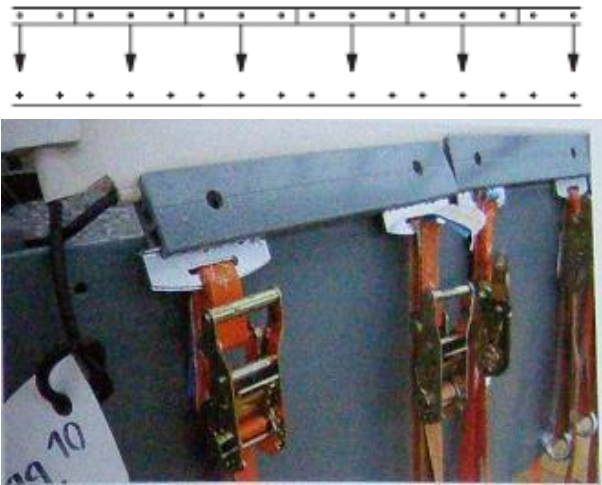
- Dosažení přiměřené úrovně předpětí vyžaduje
 - Správný návrh detailů (pevnost, možnost rektifikace).
 - Dobře navržený postup montáže, předpínání
 - Předpětí v jednom směru ovlivní další směry

- Úroveň předpětí je obvykle 0,7 – 2,0 kN/m, výjimečně 5,0 kN/m.

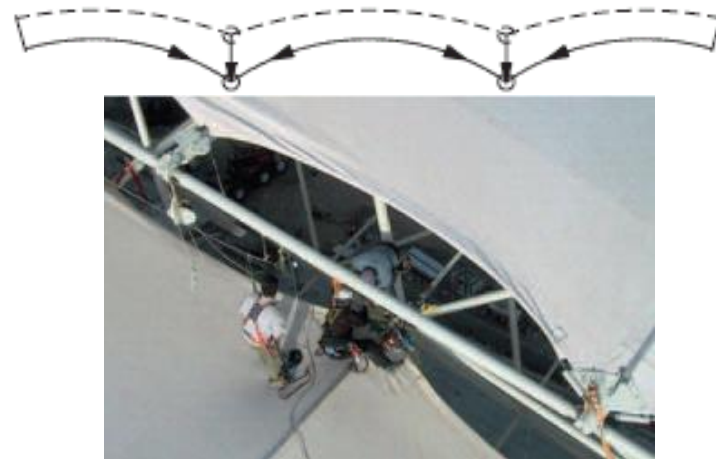
Předpínání membrán

- Využití pohybu / posunu okrajů

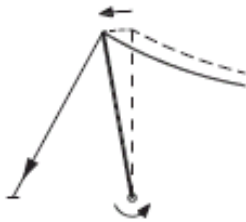
Lineární



V bodech



Rotace sloupu

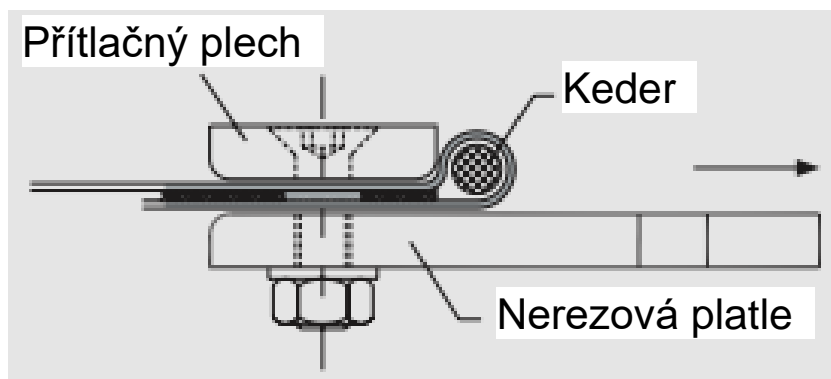


Zvedání sloupu

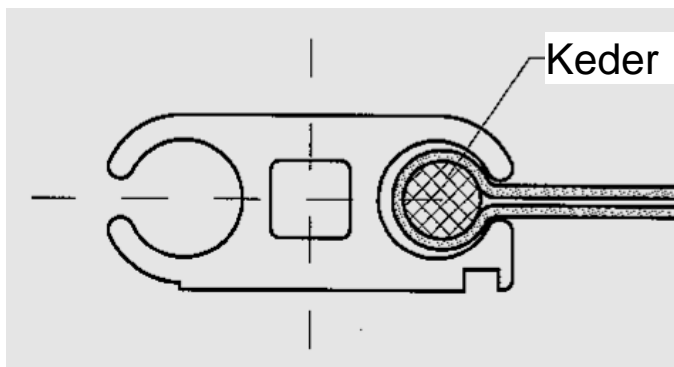


Kotvení membrán

- Bodové kotvení
 - „Keder“ sevřen přes dva ocelové plechy nárožního styčnickového plechu plachty



- Liniové kotvení
 - Pomocí „keder“ lišty



Kotvení membrán

Liniové



Kotvení do sloupu



- Kotvení sloupů

Čepy



Všesměrný kloub



Děkuji za pozornost

Ing. Břetislav Židlický, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze

