

10. Haly velkých rozpětí.

Rovinné konstrukce z tuhých prvků: nosníky plnostěnné a příhradové, oblouky.

Prostorové konstrukce z tuhých prvků (rošty, příhradové desky, válcové klenby a skořepiny, kopule).

Visuté konstrukce: lanové, membránové.

Zavěšené konstrukce: s tuhými závěsy, netuhými závěsy.

Pneumatické konstrukce s lany.

Konstrukce s osově namáhanými prvky a skly.

Tensegrity a tensairity konstrukce.

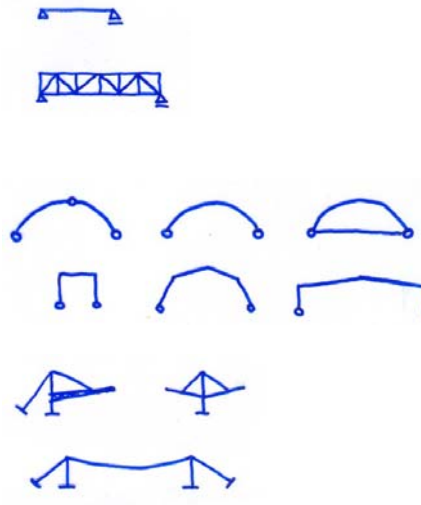
Zvolené rozdělení podle hlavních nosných prvků:

(doplní se o plášť, zavětrování, stěny atd.)

- ❖ konstrukce z tuhých prvků,
 - ❖ visuté konstrukce,
 - ❖ zavěšené konstrukce,
 - ❖ pneumatické konstrukce s lany.
- } rovinné soustavy,
prostorové soustavy.

Obecně platí:

- plnostěnný nosník
- příhradový nosník
- oblouk
- rám
- zavěšené konstrukce
- visuté konstrukce



spotřeba
materiálu

nároky
na opěry

klesá

stoupají

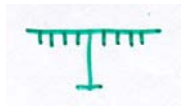
1. Konstrukce s tuhých prvků

a) Rovinné soustavy

Plnostěnný nosník

Nevýhody: pro velká rozpětí těžký (řidké použití).

Příklad: zastřešení vstupní haly Wilsonova nádraží (strop je parkovištěm automobilů)

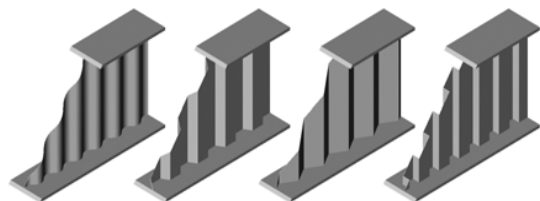


nosník s rozpětím $L = 45$ m,
horní pás tvoří ortotropní (vyztužená) deska

Výjimka:

Nosník s tvarovanou tenkostěnnou stěnou
tl. 2 ÷ 4 mm, L až 50 m

Únavové zkoušky v laboratoři
FSv ČVUT (potvrdily možnost
užití SIN nosníků pro jeřábové nosníky)



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

3

Příhradový nosník

- Nevýhody:
- velká výška (až $L/10$),
 - nutné zajistit stabilitu tlačného pásu.

Modifikace: prostorový příhradový nosník (L_{cr} jen mezi styčníky)



horní pás je v obou případech zajištěn pro vybočení z roviny na vzdálenost jeho styčníků

Příklady:

- Hala Vítkovice, $L = 100$ m
- Stadion Amsterdam, $L = 177$ m (s pohyblivou střechou)

Oblouky (plnostěnné, příhradové)

- Nevýhody:
- zakřivení působí potíže krytině (proto často polygonální tvar)

Příklady:

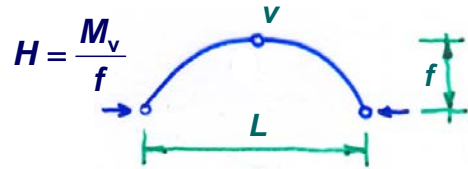
- Olympijský stadion v Sydney, $L = 300$ m
- Olympijský stadion v Athénách, $L = 304$ m

Olympijský stadion Athény:
Oblouky s rozpětím $L = 304$ m, polykarbonátová krytina
(návrh: španělský architekt Santiago Calatrava)



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

Statika oblouku:



trojkloubový oblouk
(staticky určitý)

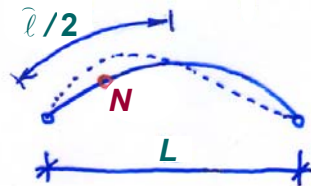


Dvojklobový a vetknutý oblouk (staticky neurčité):

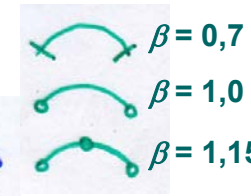
- projeví se vliv stlačení střednice (\rightarrow menší H),
- jsou citlivé na pokles podpór a teplotu,
- vhodné je vložit táhla do podlahy (k přenesení H).

Stabilita oblouku:

a) Přibližně posudek na vzpěr ve čtvrtině rozpětí oblouku (pro $N_x = L/4$)



- pro vybočení v rovině oblouku: $L_{cr} = \beta \frac{\tilde{l}}{2}$



- pro vybočení z roviny oblouku:
- vzdál. příčného držení

- nebo $L_{cr} = \beta_1 \beta_2 L$ (β_1, β_2 dáno v Eurokódu podle geometrie, a zatížení. Platí ale jen pro trubky, viz podrobně Macháček: Stabilita oblouků (TZB info 2021).

b) Přesněji teorií 2. řádu s imperfekcemi (velké oblouky)

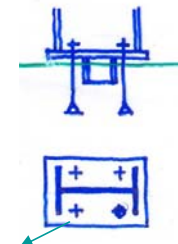
(imperfekce se zavedou v prvním kritickém tvaru, amplitudy podle Eurokódu)

Rámy

Nejrůznější typy uložení, náběhy apod. (Stabilita ráků - viz přednáška č. 1).



Detail "kloubu" :
(vetknutí vyžaduje
příliš velké základy)



šrouby v obrysu sloupu \approx kloubové chování

b) Prostorové soustavy

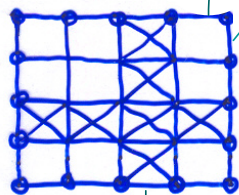
- rošty
- příhradové desky
- válcové klenby a skořepiny
- kopule

Při prostorovém návrhu:

- materiál je lépe využit,
- tuhost konstrukce při výpočtu je větší,
- výroba je však pracnější a montáž obtížnější.

Rošty

- dvousměrné

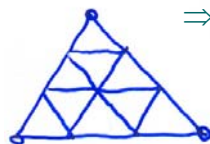


rovinné nosníky: <ul style="list-style-type: none; padding-left: 0;">- plnostěnné
- příhradové

(podpory jsou obvykle po obvodě)

↳ může se v půdoryse zkosit
⇒ nutné zavětrování v obou směrech !!

- třísměrné rošty

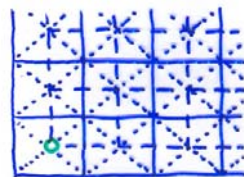


- jsou v půdorysu tuhé, zavětrování není nutné.

Příhradové desky (obvykle trubkové)

Liší se od roštů tím, že dolní pásy jsou posunuty o $\frac{1}{2}$ příhrady:

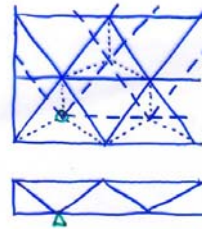
- dvojsměrné



pro kloubová spojení má
konstrukce 1° vnitřní volnosti
⇒ min. 4 svislé podpory !



- třísměrné



Výhody příhradových desek

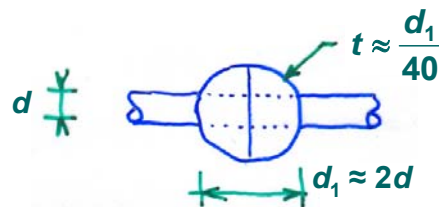
- podpory lze umístit podle potřeby (namáhání se řeší dimenzí prutů - "skryté průvlaky"),
- umožňuje nejružnější půdorysy,
- některé pruty lze výhodně vypustit (např. části dolních pásů, diagonály).

Nevýhody příhradových desek

- styčníky jsou složité (obvykle patentované),
- spotřeba materiálu je vysoká (z důvodu dodržení minimálních dimenzí trubek).

Styčníky příhradových desek

a) Svařenec z lisovaných polokoulí



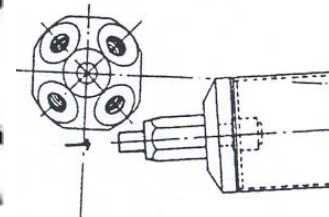
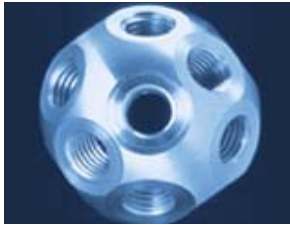
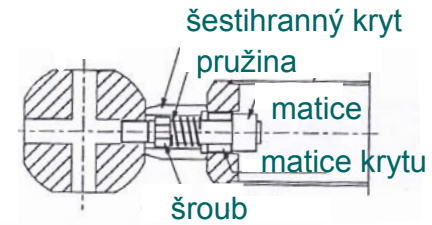
- výlisky jsou lisovány za tepla do zápustky,
 - jedna trubka probíhá,
 - ostatní trubky v prostoru přivařeny na kouli tupým svarem $\frac{1}{2} V$,
- (např. zimní stadion a autobusové nádraží Brno, hala Pelhřimov).

b) Patentované styčníky

System Mero (SRN)

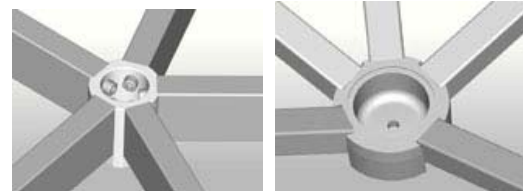
(mnohostěn - lze připojit až 18 trubek)

Obdoba: KT-I (Japonsko):



Řada modifikací, např.:

- válcový styčník (přenáší momenty),
- talířový styčník (pro jednovrstvé k.)



Význačné stavby:



Globe Arena (1987)



Eden projekt (2000)



Singapore Art C. (2002)

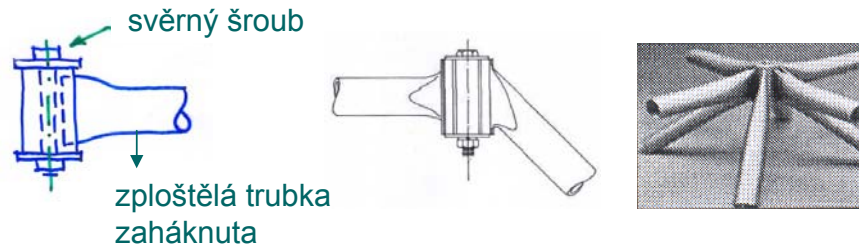


S. Jordi (1992)

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

10

**Systém Triodetic
(Kanada)**



Význačné stavby:



Skleník ve Vancouveru (1969)

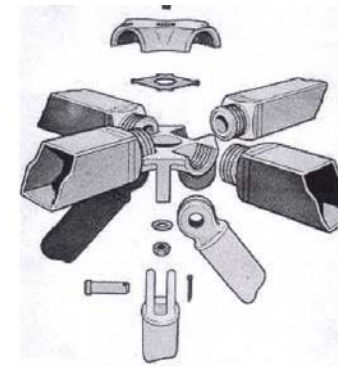
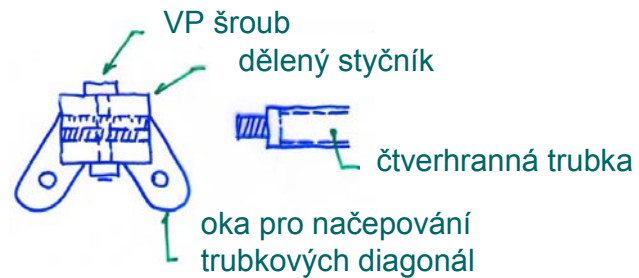


Toronto IMAX (1971)



Hawaii Energy Center (2004)

**Systém Nodus (vyvinut pro čtverhranné trubky)
(VB)**



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

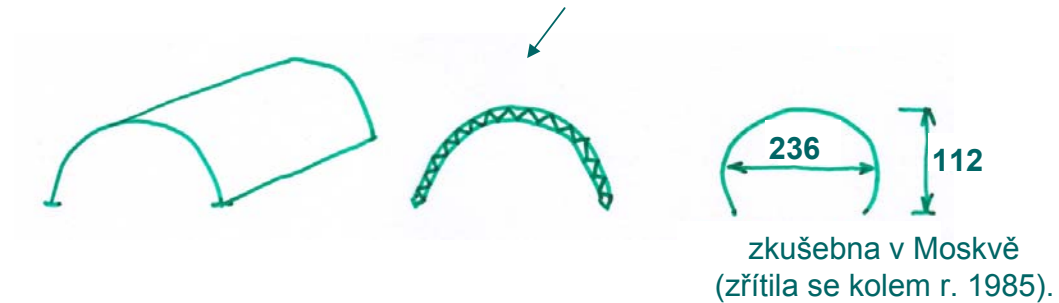
11

Válcové klenby a skořepiny

- **plnostěnné** obvykle ortotropní (s výztuhami) pro lokální tuhost.
Příklad: sportovní hala Praha výstaviště (1962)
 $L = 64 \text{ m}$, $t = 4 \text{ mm}$

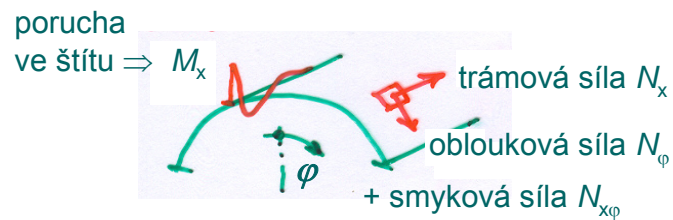
- **příhradové** $\left\{ \begin{array}{l} \text{jednovrstvé} \\ \text{dvouvrstvé} \end{array} \right.$

Příklad: lamelové konstrukce zimních stadionů
v Kladně a Prostějově.



Statické řešení (podrobně v ČSN EN 1993-1-6)

a) Pevnostní:



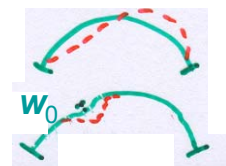
- ohybová teorie

výsledkem je 6 složek vnitřních sil
($N_x, N_\varphi, N_{x\varphi}, M_x, M_\varphi, M_{x\varphi}$)

- membránová teorie

výsledkem jsou jen 3 normálové síly
($N_x, N_\varphi, N_{x\varphi}$). Nutno uvážit ohybové poruchy (zejména u štítů M_x)

b) Stabilitní ("prolomení" skořepiny):



- **globální ztráta stability**
(podobně jako u oblouků)

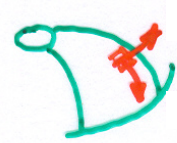
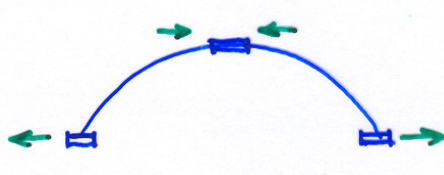
- **lokální ztráta stability**
(pro zvolené lokální imperfekce)

Podrobnosti k řešení skořepin viz <http://shellbuckling.com>



Boulení panelů mezi výztuhami.
Křídlo je ohýbanou konzolou vetknutou
do trupu letadla, s horní plochou v tlaku.
(David Bushnell)

Kopule



rovnoběžková síla N_θ
meridiální síla N_φ
+ smyková síla $N_{\theta\varphi}$

membránová
teorie

- v patě tažený prstenec (nebo kotvení vodorovných sil),
- ve vrcholu zahuštění prutů \Rightarrow výhodnější je tlačný závěrný prstenec.

• Jednovrstvé kopule



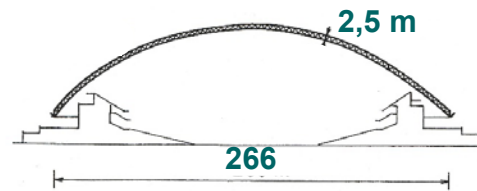
tažený prstenec z trubky $\varnothing 330 \times 17$.

Příklad:

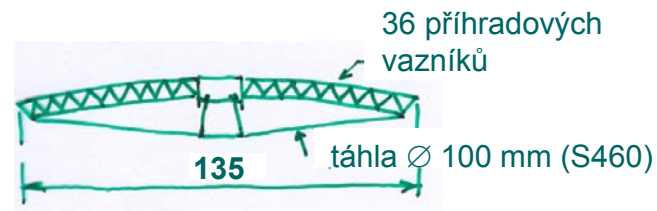
mřížový Z pavilon v Brně (1958);

$\varnothing 93$ m (trubky 60×2 až 102×6 [mm]).

- **Dvouvrstvé kopule**



Stadion v Detroitu (1979)



Hala Sazka (2004)

obdobné haly:

Anaheim LA ($L = 101 \times 133$ [m])

Chicago ($L = 115 \times 159$ [m])



Skleníky Eden (VB, 2000)

Globe Arena (Stockholm, 1987)

Historické kopule: báně Schwedlerovy, Zimmermanovy.

Nové trendy: geodetické kopule (ikosaedr: má 12 vrcholů, 20 stěn, 30 stejných prutů).

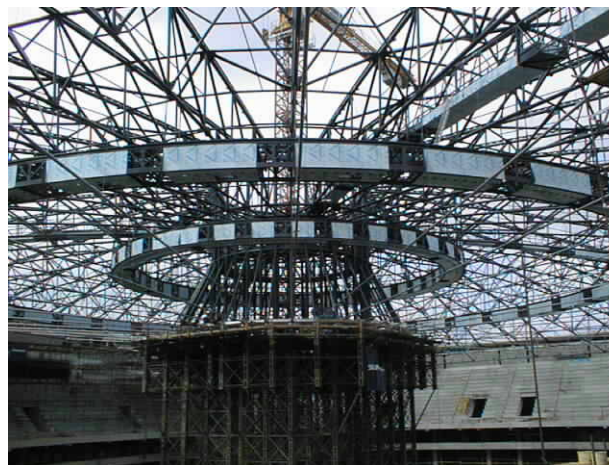
**Skleníky Eden (VB, 2000)
- systém MERO**



**Globe Arena (Stockholm, 1987)
- systém MERO**



Hala Sazka (2004)



- hala pro 18 000 diváků,
- průměr 135 m, výška 9 m,
- 36 vzpínadlových vazníků s předepnutým táhlem Macalloy \varnothing 98 mm (S460),
- středový tubus \varnothing 18 m o váze 170 t (lze zavěsit dalších 30 t).

2. Visuté konstrukce

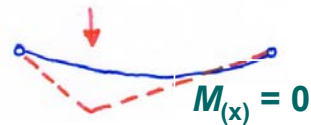
- lanové (vláknové),
- membránové.

Výhody:

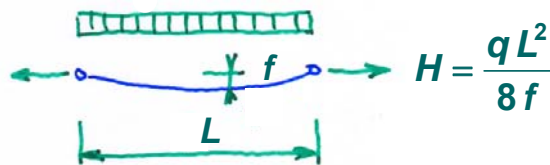
- malá spotřeba materiálu,
- velké tvarové možnosti (architektonická rozmanitost).

Nevýhody:

- tvarová nestálost



- velké vodorovné reakce



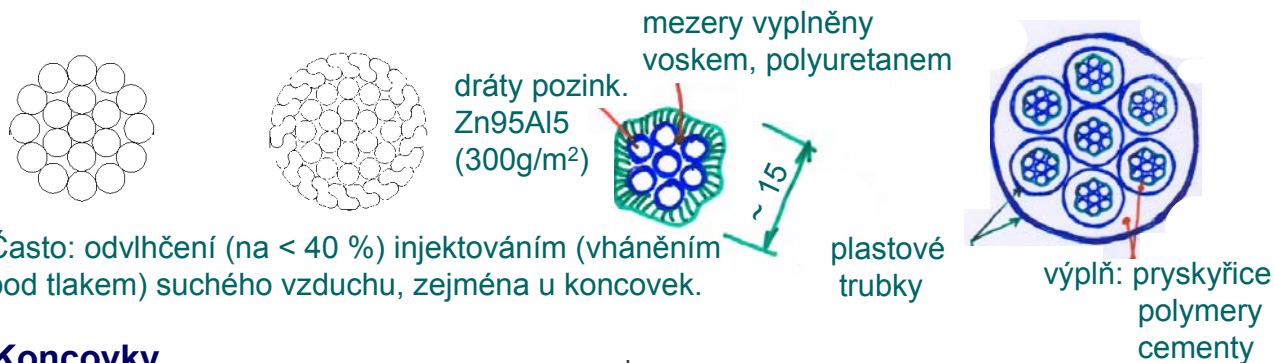
Tvar závisí na zatížení, tzn.:

- řešit teorií 2. řádu,
- jsou vysoké nároky na krytinu.

- vysoké nároky na podpory.

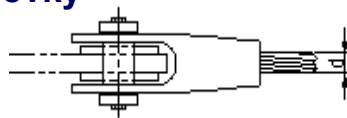
Lana

Vinutá, skládaná, jednopramenná, vícepramenná, otevřená, uzavřená (viz NNK):

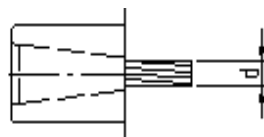


Často: odvlhčení (na < 40 %) injektováním (vháněním pod tlakem) suchého vzduchu, zejména u koncovek.

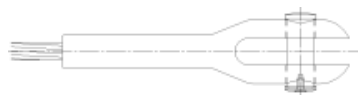
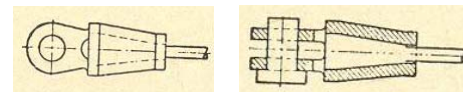
Koncovky



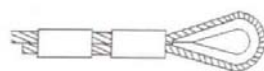
otevřená, zalitá zinkem



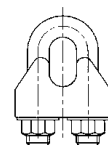
válcová koncovka zalitá kovem (zinek, slitiny) nebo epoxidem (může mít vnější/vnitřní závit, nebo oka pro přípoj)



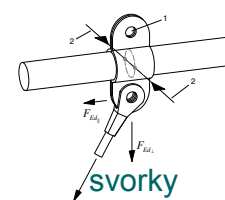
otevřená kovaná koncovka



srdcovka



U svorka



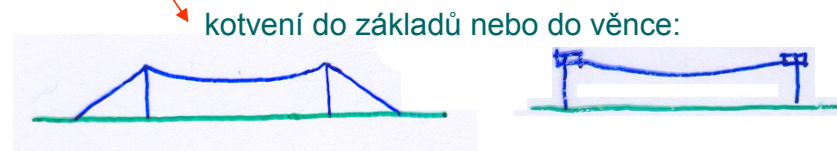
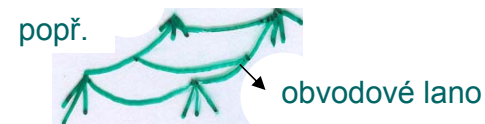
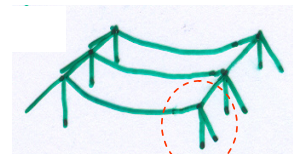
svorky

Lanové konstrukce

- rovinné
- prostorové

Rovinné lanové konstrukce (válcové střechy)

a) jednovrstvé



(např.
hokejová hala Vsetín)

Pro zatížení sáním je nutno střechu **stabilizovat**:

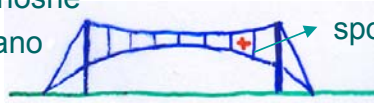
změna tvaru
a kmitání



- zatížením (balastem),
- vyztužením (tuhými prvky, výztuhami),
- předpětím (dvojvrstvé konstrukce).

b) dvojvrstvé

předeprnuté nosné
a napínací lano



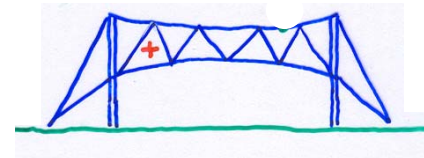
spojovací táhla



spojovací vzpěry

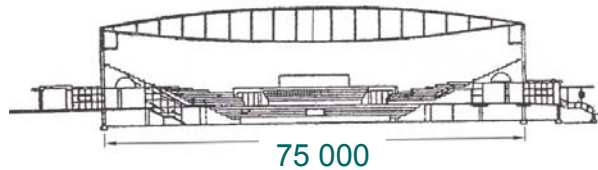
Jawerthův nosník

(všechny prvky lanové, tažené)

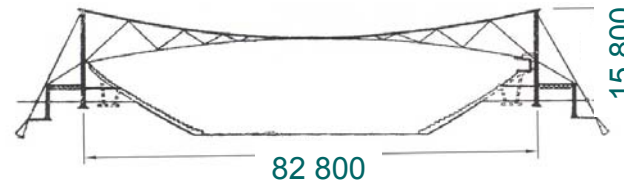


Příklady:

posluchárna univerzity v Utica (USA)

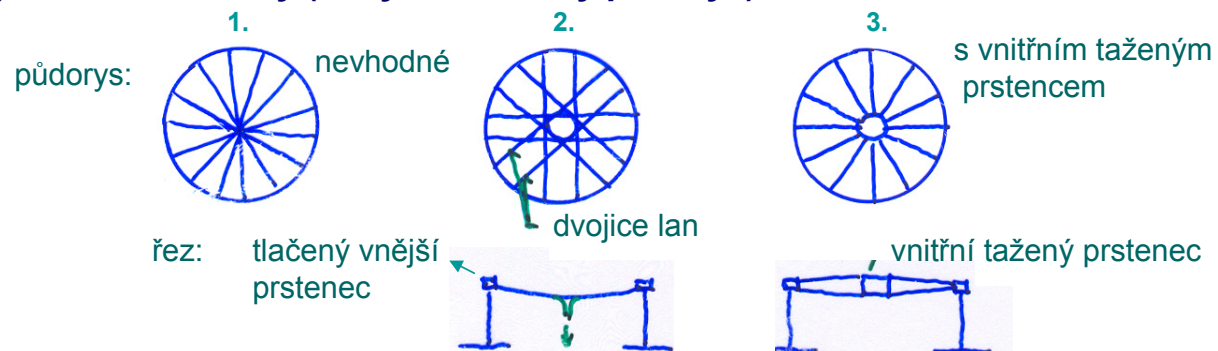


zimní stadion Johannesburg (Stockholm)



Prostorové lanové konstrukce

a) s radiálními lany (obvykle kruhový půdorys)



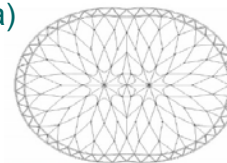
Příklad: Pavilon USA v Bruselu, 1958 (104 m)

b) lanové kopule Geigerovy



Příklad:
Olympijský stadion Soul, 1988
(tkaninová krytina)

Modifikace:
systémy Tenstar (Atlanta, M. Levy),
Twinstar (La Plata)



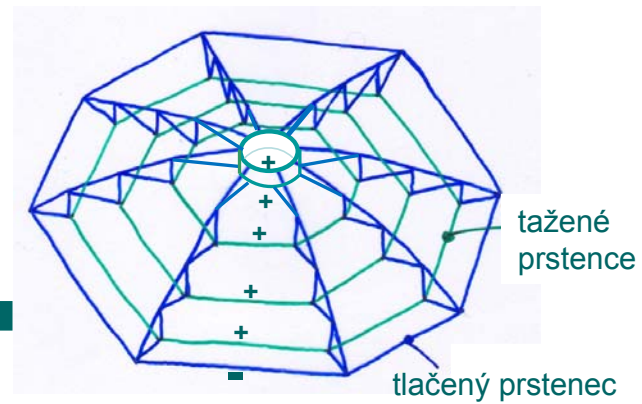
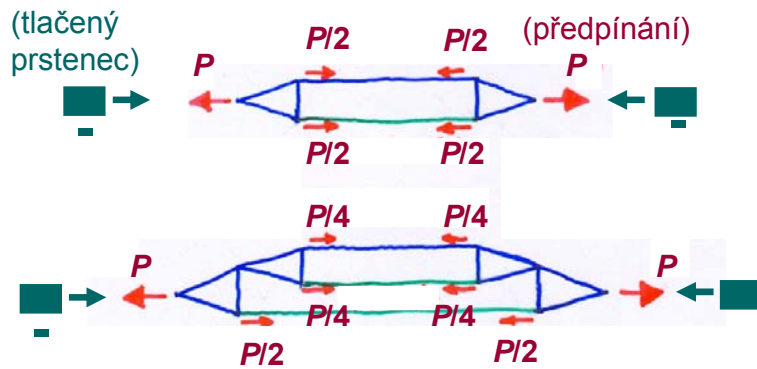
OK01 – Ocelové konstrukce (10)

23

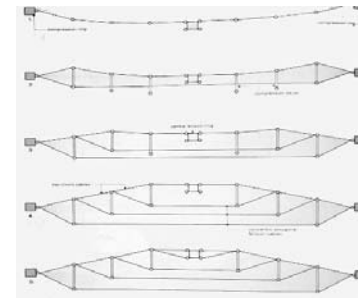
Geigerův systém (na principu „tensegrity“ konstrukce, viz dále)

Statické chování

Provedení



Postup montáže v Soulu 1988:



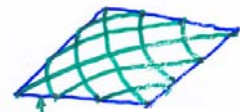
Z



c) lanové sítě

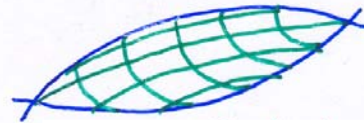
2 osnovy lan <math>\left\{ \begin{array}{l} \text{konkávní} - \text{nosná} \\ \text{konvexní} - \text{předpínací} \end{array} \right.

1. přímé obvodové prvky



velké ohybové momenty

2. obloukové obvodové prvky



Příklady:

- Č. Budějovice,
- Bratislava Pasienky, 1962 (72x66 m)



Festivalový komplex Tartu (53,3x42,6 m): montáž a dokončení

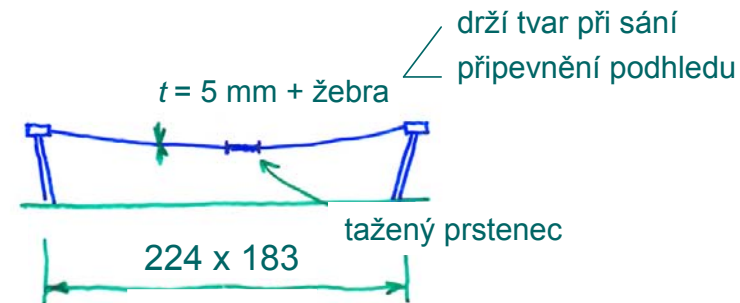
Membránové visuté konstrukce

Nosná membrána může tvořit zároveň krytinu.

Mohou být:

- válcové,
- kruhové, elipsovité.

Příklad:
Moskva (elipsa 224x183 m):



Obecně materiál membrán:

- nerez ocel (plech $t = 4 \div 5$ mm),
- slitiny Al (do 70 m jenom $t \approx 2$ mm),
- tkanina - obvykle polyester oboustranně pokrytý PVC a zalakovaný akrylovým nebo PVDF lakem;
 - skelná tkanina potažená PTFE (= teflon); popř. skelná tkanina potažená silikonem,
 - drahá, ale kvalitní TENARA (= expandovaný PTFE), pokrytá fluoropolymerem.
- fólie - dnes zejména ETFE (ethylene tetrafluoroethylene, Teflon) – vynikající, zcela transparentní, pevný,
 - popř. THV (tetrafluoroethylene-hexafluoropropylene-vinylidene fluoride terpolymer).

Příklad plachtové konstrukce (polyesterová tkanina Ferrari Précontraint)



Lineární obvodové prvky:
obvodová lana, tkaninové pásy, „kapsy“,
keder profily a lišty, tuhé profily atd.



kotvení lan

3. Zavěšené konstrukce

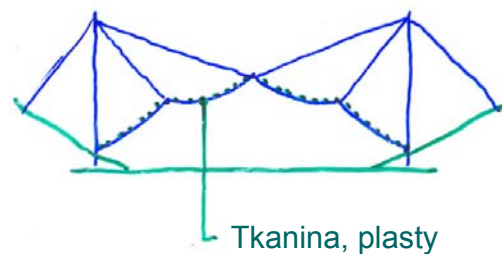
Závěsy tvoří další podpory, které jsou poddajné. Jejich umístění je nutné optimalizovat. Závěsy jsou:

- tuhé (tyče, trubky - zejména jsou-li při sání větru tlačeny),
- lanové (ohebné: vzniká-li v nich při sání tlak, musí se předeprnout).

Zavěšené konstrukce střech:



Zavěšené visuté konstrukce střech:



Příklad:

- Olympijský stadion v Mnichově, 1972
- Letiště Džida (pro poutníky do Mekky), 405000 m², 1980

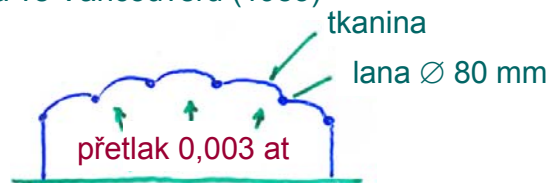


4. Pneumatické konstrukce stabilizované lany

Tkaninové konstrukce s vnitřním přetlakem cca 0,003 at (= 0,0003 MPa = 0,3 kN/m²).

Příklady:

- Hala ve Vancouveru (1983)

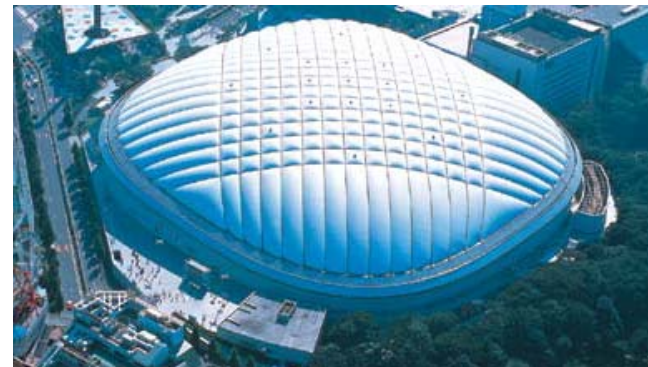


Rozměr 232 x 190 m

- Big Egg Tokio (1988)



Hala pro baseball, 55000 diváků,
při tajfunech se vypouští.



5. Konstrukce s taženými prvky a skly

V pohledových konstrukcích (např. odbavovací a vstupní haly) se stále více uplatňují tažené tyčové prvky a skleněné konstrukce:

system DETAN



system MACALLOY



Příklady:



Expo Lisabon 1998



Granada Airport 1998



Madrid Barajas 2006



Senftenberg 1998

Skleněné fasády podepírané lanovými předpjatými nosníky

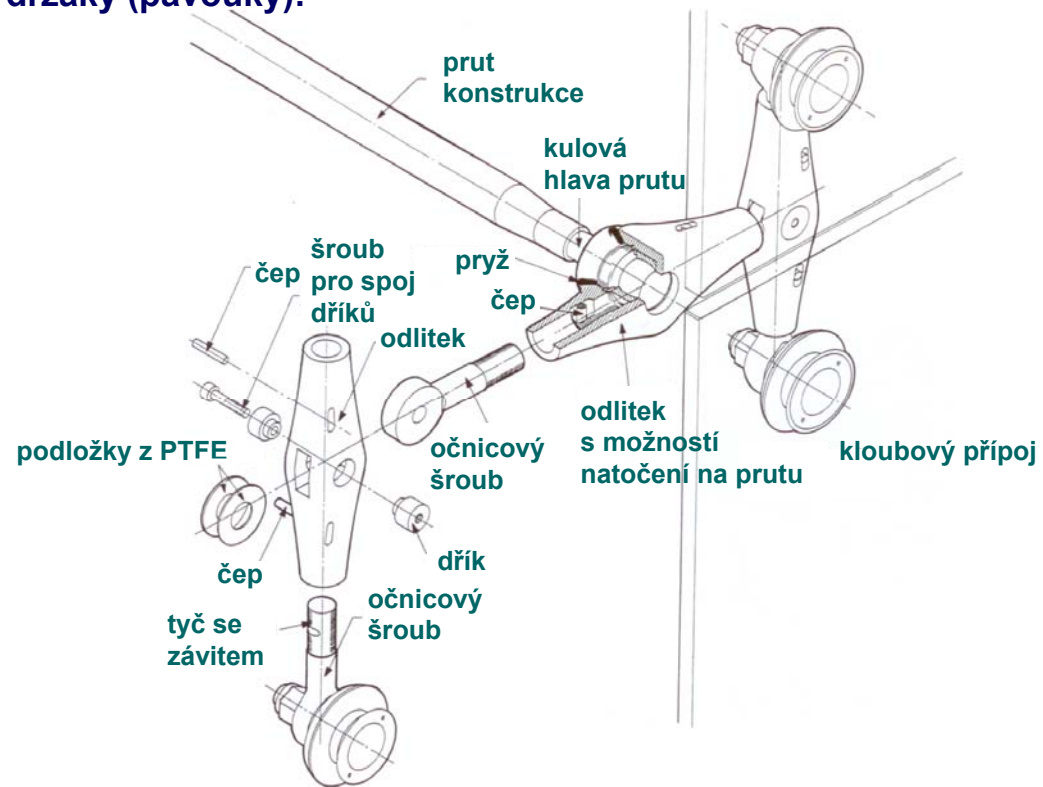
Konstrukce vytvořené z předepnutých tyčí. Tlačené rozpěry z trubek podepírají skleněné tabule rektifikovatelnými bodovými držáky ("pavouky").



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

Prosklené fasády

Bodové držáky (pavouky):



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

32

Velkorozměrová skleněná fasáda (Mnichov)

(na obrázku skleněné fasády je odraz obrazu fasády protějšího domu)



bodové
držáky

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

33

City Deco (Praha Pankrác)

Použití předepnutých táhel Macalloy k vyvěšení pater budovy



Administrativní budova

Konferenční centrum



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

City Deco



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

Tensegrity konstrukce

Tensegrity konstrukce (podle B. Fullera, 1960 - tensional integrity or floating compression) sestávají z izolovaných tlačných prvků propojených předpjatými táhly.



lávka Kurilpa, $L = 120$ m
(Brisbane, 2009)



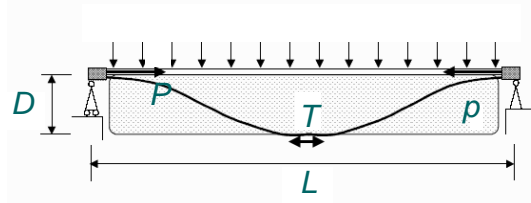
věž v Kalkatě
(2010)



princip věže
podle Snelsona (1948)

Tensairity konstrukce

Tensairity konstrukci tvoří vzduchový nosník (membránový válec naplněný vzduchem s malým přetlakem) pevně spojeným s tlačným (ocelovým) pásem a dvěma spirálovými lany spojenými v podporách s tlačným pásem (Pedretti, 2004).



OK01 – Ocelové konstrukce (10)

**Stadióny
fotbalového mistrovství světa
2018 v Rusku**

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

37

Moskva, Lužniki (otevřen 1956, rekonstrukce 2017)



Tlačený příhradový prstenec, radiální plnostěnná žebra.

Architekt: Igor Rozhin, Nikolay Ullas.

Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 81 000 diváků.

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

38

Moskva, Otkrytie aréna (otevřena 2014)



Příhradový rošt.

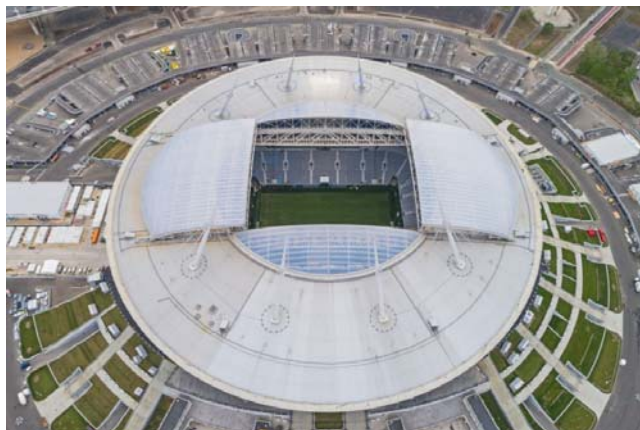
Architekt: BiznesTehProekt, PozhEvroStroi, AECOM + Sport Concepts.

Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 45 360 diváků.

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

39

Petrohrad, Krestovský stadión (otevřen 2017)



Prostorová zavěšená konstrukce se zatahovací částí.

Architekt: Kišó Kurokawa.

Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 64 287 diváků.

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

40

Volgograd, Volgograd Aréna (otevřena 2017)



Konstrukce „bicyklového kola“ o průměru 303 m, výška 49,5 m, radiální předpjaté kabely. Stadión pro 45 568 diváků.

Návrh: Sport-Engineering Moskva, výstavba Stroytransgaz.

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

41

Soči, Olympijský stadión (FIŠT) (otevřen 2013)



**Příhradové oblouky, konstrukce doplněná polštáři z fólií ETFE.
Architekt: firma Populous a Angličan B. Happold.
Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 47 659 diváků.**

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

42

Nižnij Novgorod stadión (otevřen 2017)



Tlačený prstenec, ocelová konstrukce 11 000 t, průsvitná střecha i fasáda.

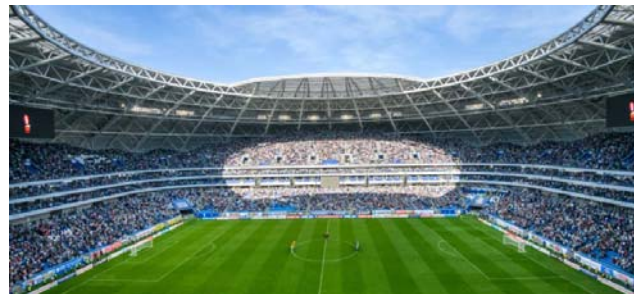
Návrh a stavba: OAO Stroytransgaz.

Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 44899 diváků.

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

43

Samara Kosmos Aréna (otevřena 2017)



**Půdorys \varnothing 330 m, konstrukci tvoří 32 konzol s vyložení 90 m, 13 000 t oceli.
Návrh: TerrNilgrazhdanproekt. Stavba: Kazan Production and Construction Ass.
Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 44918 diváků.**

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

44

Kaliningrad Stadión (otevřen 2018)



**Zavěšená střecha (původně zatahovací, z finančních důvodů zrušeno).
Návrh: Wilmotte & Associes (Fr.), stavba: Crocus International.
Rozměry hřiště 105 x 68 [m], 35212 diváků.**

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

45

Kazaň Aréna (otevřena 2013)



**Pátevní příhradové oblouky a příhradové konzoly.
Návrh: firma Populous, D. Lavelle, V. Motorin.
Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 45 379 diváků.**

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

46

Rostov Aréna (otevřena 2018)

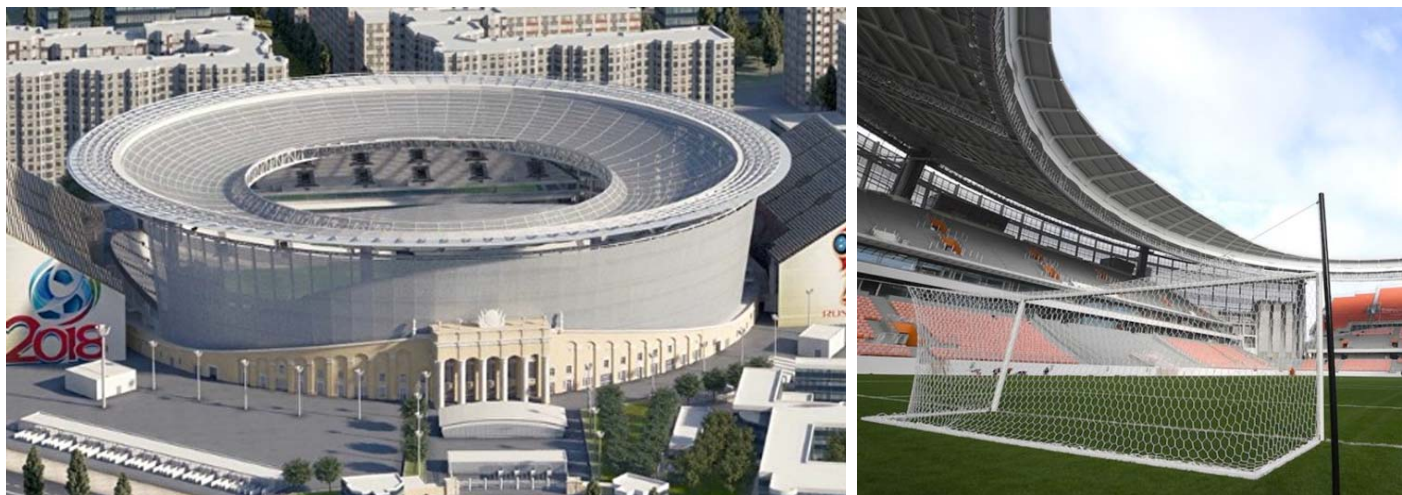


**Zavěšená konstrukce, pokrytí z textilních membrán.
Návrh: Architektonická kancelář Populous (dříve HOK Sport Venue Event).
Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 45 000 diváků.**

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

47

Jekatěrinburg Aréna (1957, rekonstrukce pláště 2017)



Vnější tlačný prsteneč.

Návrh: ABD Architect, PI Arena, stavba: Sinara Development.

Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 25 000 diváků (pro MS pro 35 000 diváků).

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

48

Mordovia Aréna (otevřena 2018)



Rámová prostorová konstrukce, kovový plášť z perforovaných a hladkých panelů.

Návrh: SaranskGrazhdanProekt.

Rozměry hřiště 105 x 68 [m], pro 44 442 diváků.

OK01 – Ocelové konstrukce (10)

49