



**ČVUT**  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE



**STABFI**

# Stabilizace prvku a konstrukce pláštěm za běžné teploty

**Michal Jandera**



# Obsah

2

- Stabilizace prutu
  - ▣ stabilizační síly
  - ▣ požadavky na podepření
- Příčné podepření tenkostěnným profilem pláště
  - ▣ návrhové postupy
  - ▣ s využitím zkoušek
- Podepření proti zkroucení
  - ▣ návrhové postupy
  - ▣ s využitím zkoušek
- Plášťové působení diafragmat s trapézovými profily a kazetami
- Přípoje sendvičových panelů
  - ▣ podepření v kroucení
  - ▣ příčné podepření

# Konstrukční třída

- Navrhování konstrukcí z prvků tvarovaných za studena / sendvičových panelů ve spojitosti s následky porušení konstrukce podle EN 1990, příloha B jsou **konstrukční třídy**:
  - **III**: prvky použity jako element roznášející zatížení do konstrukce
  - **II**: podílejí se na celkové únosnosti a stabilitě jednoho konstrukčního prvku
  - **I**: prvky se podílejí se na celkové únosnosti a stabilitě konstrukce

(sekundárním) využitím prvku pro stabilizaci → ze sekundárního nosného prvku se při plášťovém působení stává primární nosná konstrukce

# Stabilizace prutů

- Stabilizační síly – z imperfekcí prvku či konstrukčního systému pro analýzu výztužného systému (EN 1993-1-1 5.3.3)

$$e_0 = \alpha_m \cdot L/500$$

- $L$  – je rozpětí výztužného systému
- redukce z počtu vyztužovaných prutů:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left( 1 + \frac{1}{m} \right)}$$

■  $m$  – počet vyztužovaných prutů

- účinky imperfekcí – ekvivalentní stabilizující zatížení

$$q_d = \sum N_{Ed} \cdot 8 \frac{e_0 + \delta_q}{L^2}$$

- $\delta_q$  - případný průhyb od vnějších zatížení

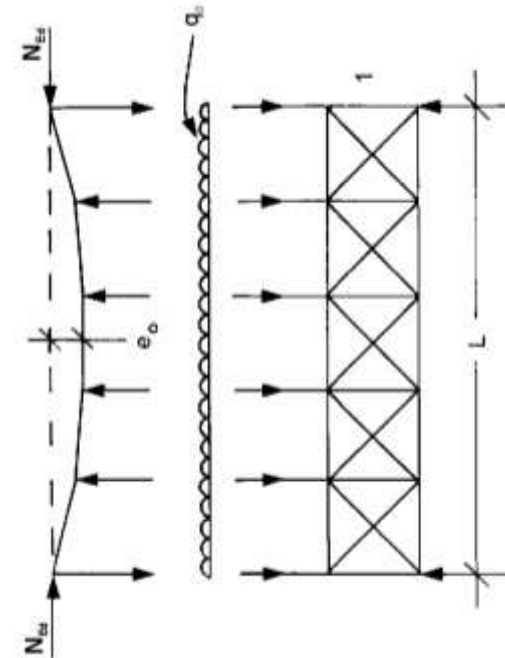
- Podepření plastických kloubů:

- místní síla  $2,5\% N_{f,Ed}$  ve vzdálenosti max.  $h/2$  podél prutu

- pro výztužný systém spolu s vlivem imperfekcí

i účinek místních sil na všechny stabilizované pruty  $Q_m = 1,5 \alpha_m \frac{N_{f,Ed}}{100}$

- Plášťové působení – stabilizační síly a vnější zatížení



# Požadavky na podepření

- **Spojité příčné podepření** v rovině plošného profilu je zajištěno při splnění (BB.2) EN 1993-1-1

$$S > \left( E \cdot I_w \frac{\pi^2}{L^2} + G \cdot I_t + E \cdot I_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25 h^2 \right) \frac{70}{h^2}$$

- kde  $S$  – smyková tuhost na jednotku délky prutu pro plošný profil (nebo jiný plášť) připojený v každé vlně ( $S$  se nahradí  $0,2S$  u přípoje plošného profilu v každé druhé vlně)

$I_t, I_z, I_w$  – průřezové charakteristiky prutu

$h$  – výška průřezu prutu

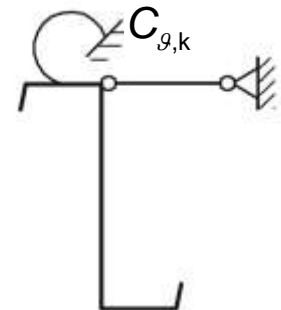
$L$  – délka prutu

# Požadavky na podepření

- Spojité podepření proti zkroucení  $C_{\vartheta,k}$  je zajištěno při splnění (BB.3) dle EN 1993-1-1

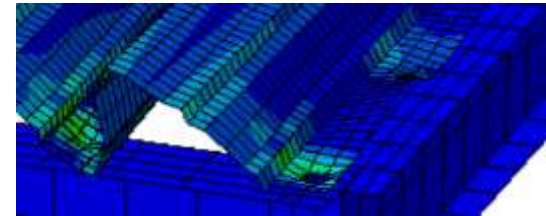
$$C_{\vartheta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{E \cdot I_z} K_{\vartheta} K_u$$

- $M_{pl,k}$  - charakteristická hodnota plastické únosnosti nosníku v ohybu
  - $K_u = 0,35$  při pružnostní analýze,  $K_u = 1,0$  při plasticitní analýze
  - $K_{\vartheta}$  – součinitel dle průběhu momentu a typu podepření (Tab. BB.1)
- 
- Pokud není dosaženo plného podepření, lze uvažovat tuhost podepření pro výpočet  $M_{cr}$  resp.  $N_{cr}$ .



# Příčné podepření tenkostěnným profilem pláště

- Únosnost – v EN 1993-1-3
  - samovrtné šrouby: tenký + tenký plech, tenký + silný plech
  - nastřelovací hřeby
  - při využití plášťového chování se smyková únosnost přípoje na vazník / sloup / vaznici **redukuje na 60 %** (zohledňuje tah v přípoji, který při plášťovém chování vzniká) – nezahrnuje osovou sílu od vnějšího zatížení
- Poddajnost přípoje (ECCS):
  - samovrtné šrouby
    - $d = 5,5$  a  $6,3$  mm ocelová podložka / rozšířená hlava,  $s = 0,15$  mm/kN
    - $d = 5,5$  a  $6,3$  mm neoprenová podložka,  $s = 0,35$  mm/kN
    - $d = 4,1$  až  $4,8$  mm bez podložky,  $s = 0,25$  mm/kN
  - nastřelovací hřeby
    - $d = 3,7$  až  $4,8$  mm s ocelovou podložkou 23 mm,  $s = 0,1$  mm/kN



# Příčné podepření tenkostěnným profilem pláště

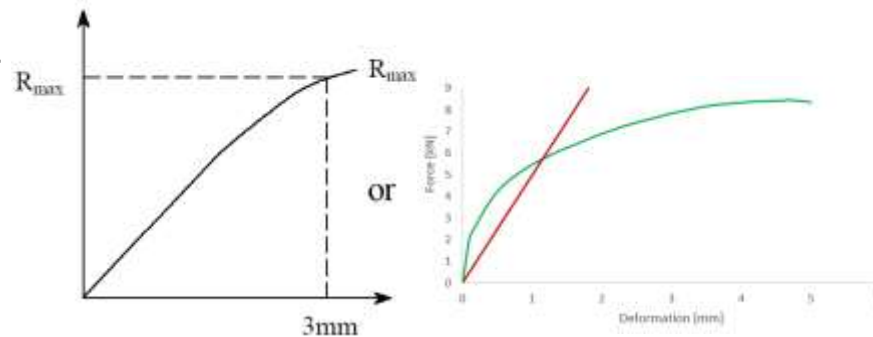
- Poměrně snadné získat únosnosti a tuhost i experimentálně

šroub 5,5 mm – přípoj na vazník

šroub 4,8 mm – přípoj tenkých plechů



Způsob zkoušení a vyhodnocení v ECCS TC7  
TWG 7.5 - The Testing of Connections with  
Mechanical Fasteners in Steel Sheeting  
and Sections, 2009.





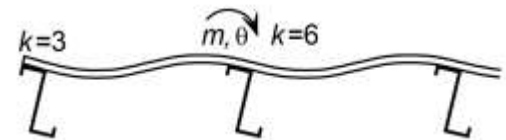
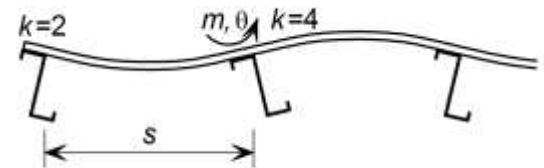
# Podepření proti zkroucení

- Rotační tuhost podepření nosníku

$$C_{\vartheta,k} = \frac{1}{1/C_{\vartheta R,k} + 1/C_{\vartheta C,k} + 1/C_{\vartheta D,k}}$$

- $C_{\vartheta R,k}$  je rotační tuhost odpovídající ohybové tuhosti panelu – např. EN 1993-1-3 (10.16)

- pro trapézové plechy:  $C_{\vartheta R,k} \rightarrow C_{D,C} = \frac{k \cdot E \cdot I_{\text{eff}}}{s}$



- $C_{\vartheta C,k}$  je rotační tuhost spojení mezi nosníkem a panelem

- pro trapézové plechy:  $C_{\vartheta C,k} \rightarrow C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT}$

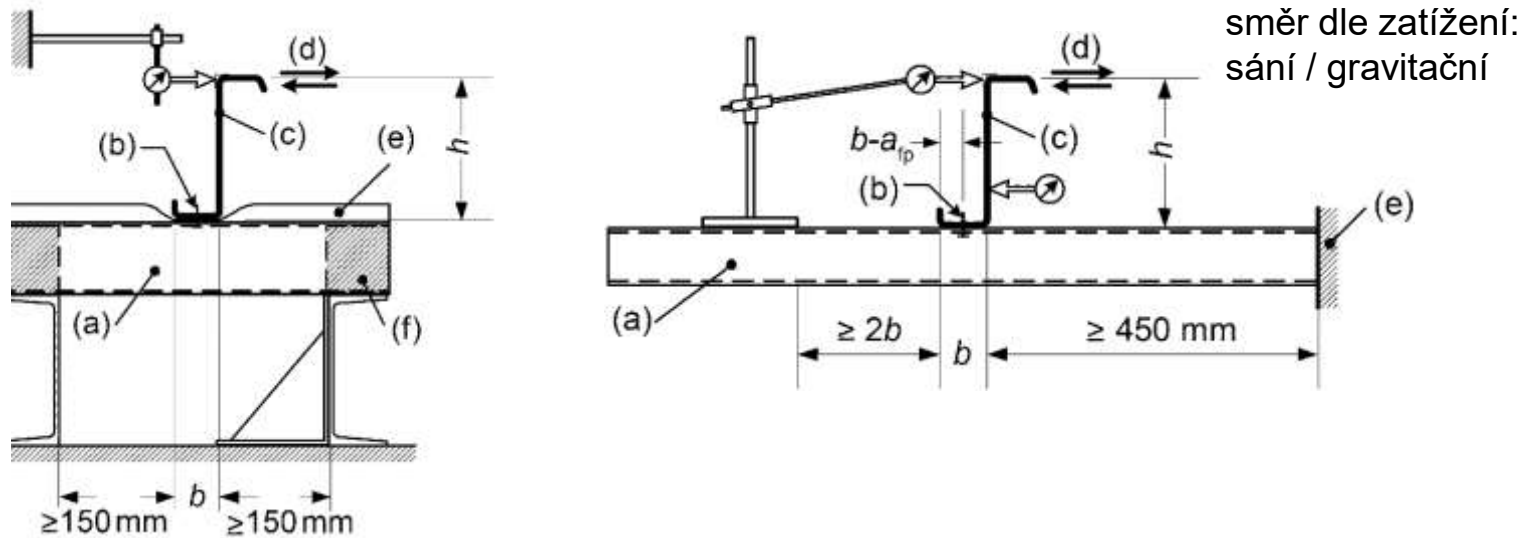
- ref. rotační součinitel; šířka pásnice vaznice; tl. plechu krytiny; šířka žebra krytiny; šířka pásnice krytiny připojené k vaznici; tloušťka plechu vaznice

- omezení jedním průměrem šroubu ( $d = 6,3 \text{ mm}$ ) ....

- $C_{\vartheta D,k}$  je rotační tuhost odpovídající distorzi průřezů prutu, jestliže tlačaná pásnice je volná. Jestliže tlačaná pásnice je připevněná nebo pokud je možné distorzi průřezu zanedbat  $C_{\vartheta D,k} = \infty$ .

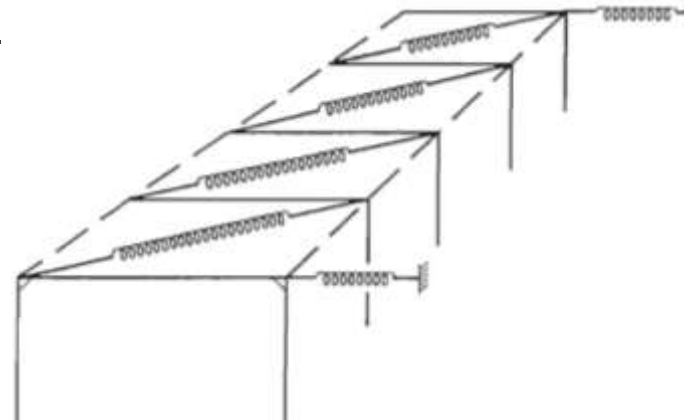
# Podepření proti zkroucení

- Rotační tuhost spojení mezi nosníkem a panelem  $C_{9C,k} \rightarrow C_{D,A}$  (značení EN 1993-1-1 resp. EN 1993-1-3) lze stanovit experimentálně (postupy v EN 1993-1-3):



# Plášťové působení

- Bryan, E. R. (1973). The stressed skin design of steel buildings. Wiley.
- ECCS (1977) European Recommendations for the Stressed Skin Design of Steel Structures
- naposledy vydáno v roce 1995 jako: European Recommendations for the Application of Metal Sheeting Acting as Diaphragm
  - tabulka s hodnotami únosnosti a prokluzu přípojí
  - kritéria pro boulení diafragmat
  - návrhové postupy pro tenkostěnné kazety, při plášťovém působení (základní informace i pro dvouplášťové střechy a sendviče)
  - praktická omezení, montážní stádium ...
- Náhradní model (ECCS)



- Únosnost a tuhost diafragmat je ovlivněna zejména přípoji

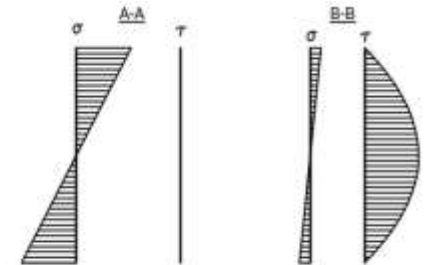
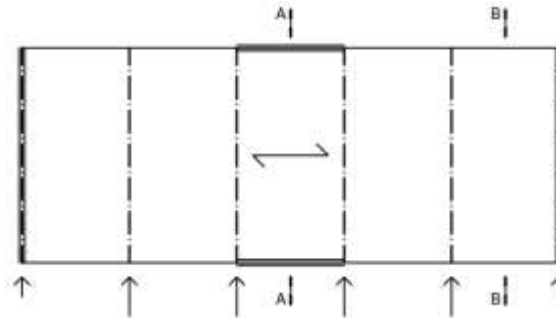
# Podmínky pro využití plášťového působení

Musí být zajištěno mimo jiné:

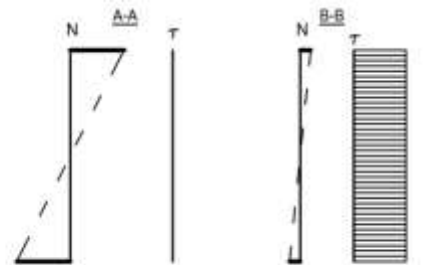
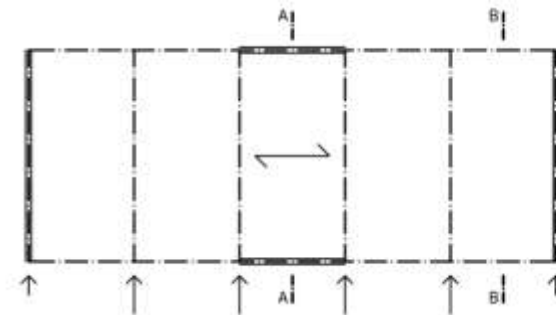
- podélné okrajové prvky diafragmat pro přenos zatížení (vs. směr vodorovného zatížení) – podélně orientované vlny mohou přenášet síly - okrajové prvky
  - vhodné konstrukční přípoje (nejen plášť – prvek, ale rovněž
  - plášť je součástí konstrukce - technická zpráva, výkresy na to upozorní
  - podélné styky mezi plechy s roztečí spojovacích prostředků max. 500 mm (trapézové plechy) resp. 300 mm (kazety)
  - omezené otvory – max 15 % plochy profilu (do 3% zcela bez omezení)
  - perforované plechy – náhradní snížená tloušťka
  - smyková napětí v diafragmatu  $< 0,25 f_y / \gamma_{M0}$  (resp. omezení smykového toku u kazet)
- převládá názor, že konstrukční systém diafragmat musí být pro dostatečně přesné stanovení vnitřních sil **staticky určitý**
  - plášťové působení není využito při montáži
  - pro krátké budovy resp. nízké budovy je tuhost a únosnost diafragmatu pro vodorovné resp. svislé ztužení zpravidla dostatečná
  - → je výhodné plášťové působení při daných omezeních uvažovat?

# Plášťové působení pro různé střešní systémy

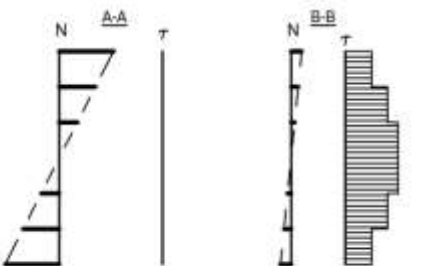
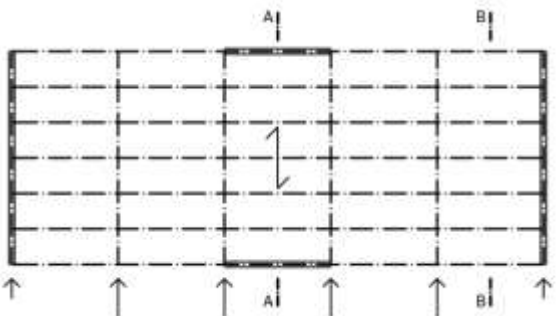
- konstrukce bez krajních profilů
  - analogie – ohýbaná stojina (profil bez pásnic)



- s krajními profily
  - analogie – ohýbaná stojina (profil s pásnicemi)

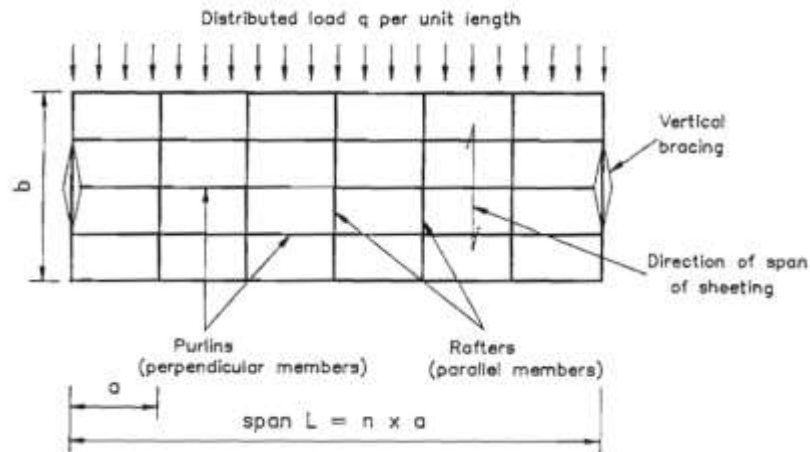


- s krajními profily a vaznicemi
  - rozdělení na více meších polí

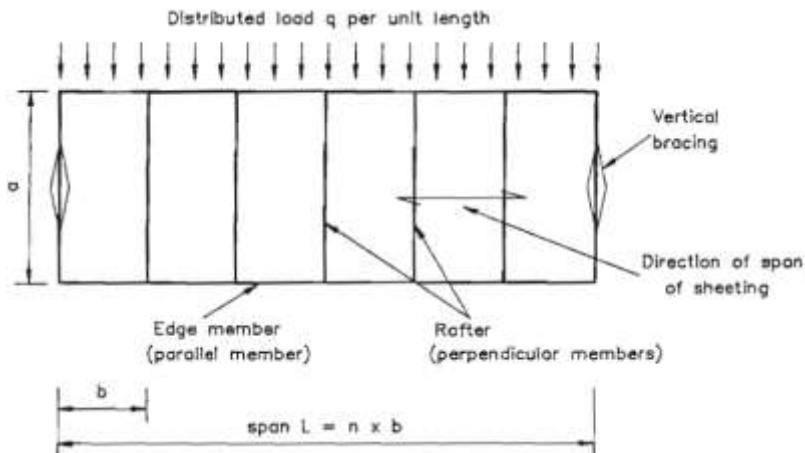


# Postup dle ECES

- Plášť pnutý ve směru zatížení (zde kolmo na budovu)

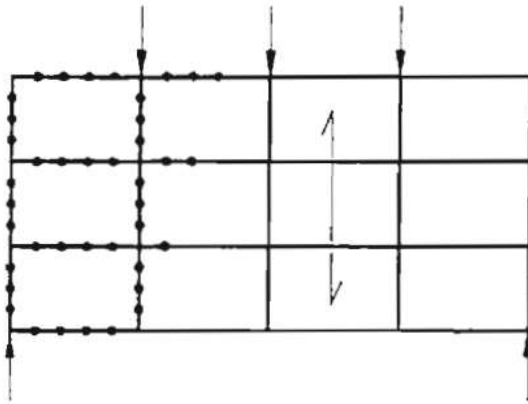


- Plášť pnutý kolmo na směr zatížení (zde podél budovy)

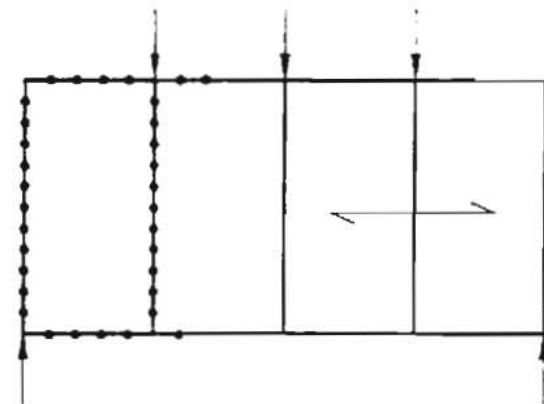


# Rozmístění přípojí

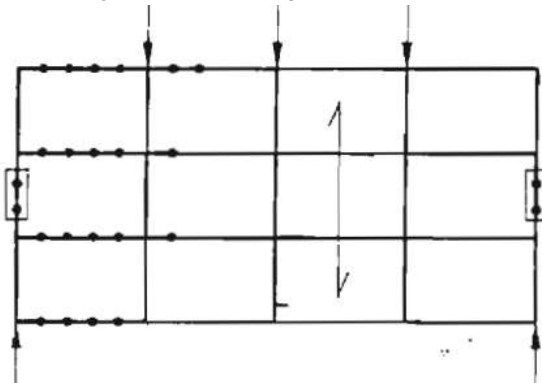
(1) podélné pnutí, připojené 4 strany



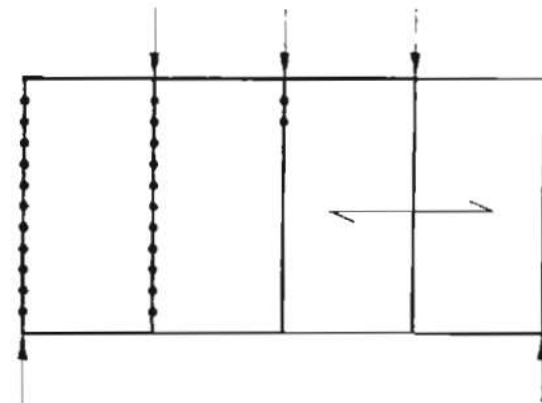
(2) příčné pnutí, připojené 4 strany



(3) podélné pnutí, připojené 2 strany  
+ smyková spojka

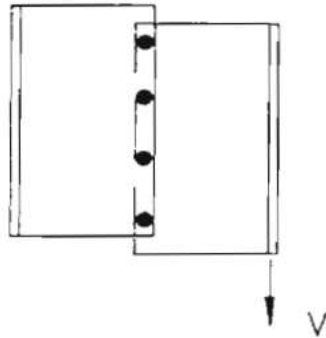


(4) příčné pnutí, připojené 2 strany

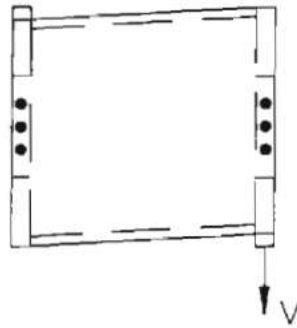


# Únosnost smykového pole

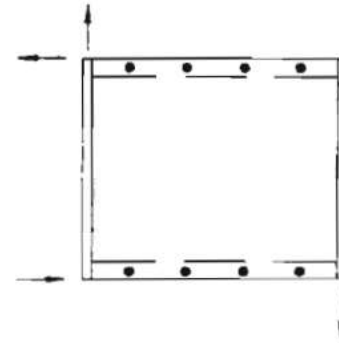
- O únosnosti diafragmatu může rozhodovat



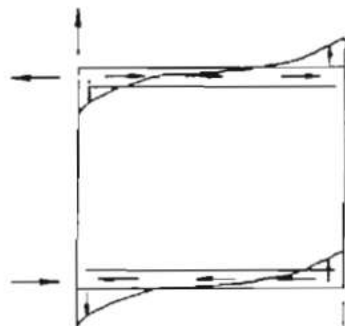
spoj mezi plechy



smyková spojka



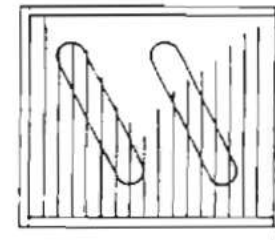
na vazník / vaznici (4 strany)



spoj k vazníku/vaznici (2 strany)



kolaps profilu



boulení ve smyku

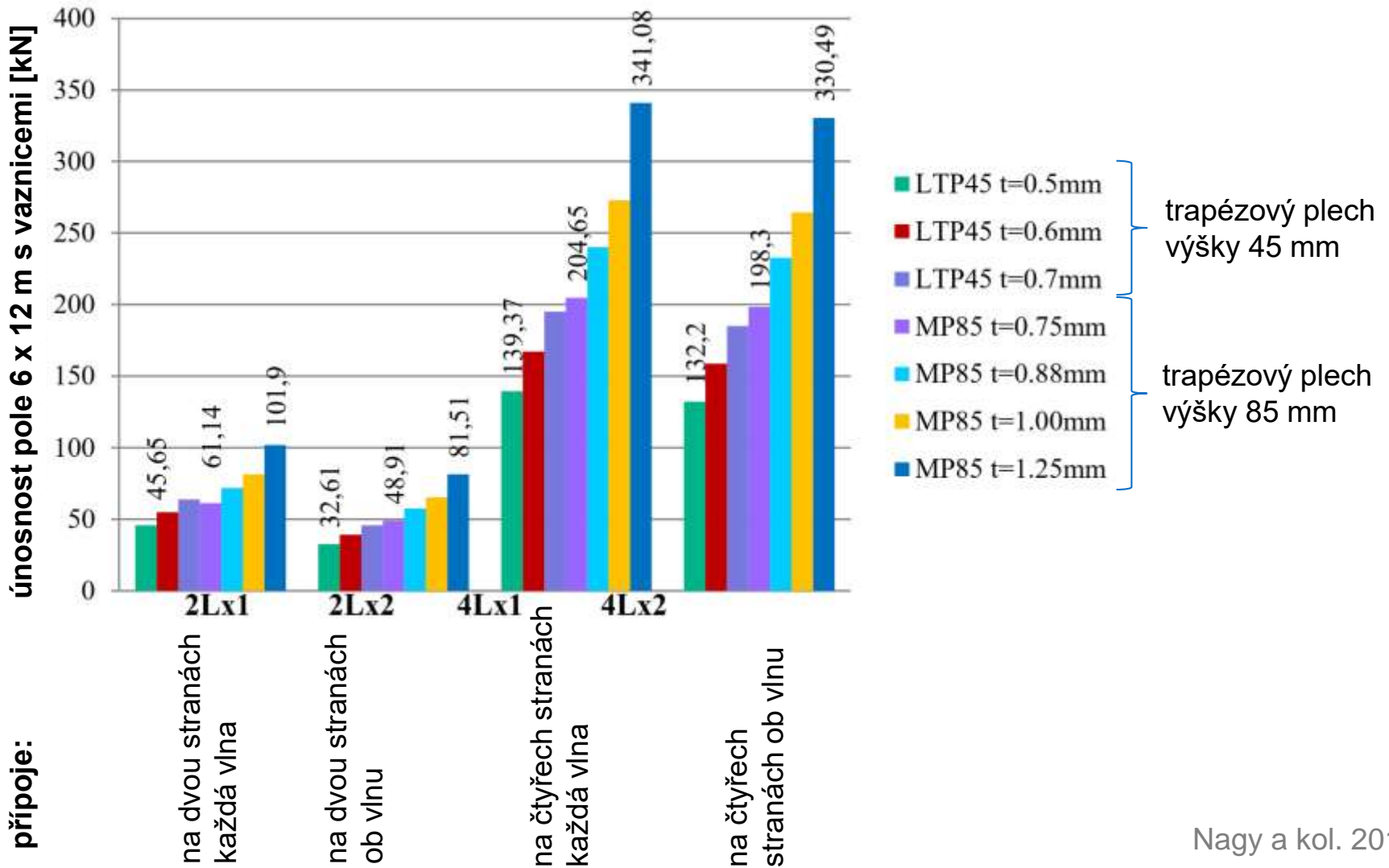
dále i porušení osovou silou ve vaznici/vazníku (>25% vyšší únosnost), přípoji vaznice na vazník atd...



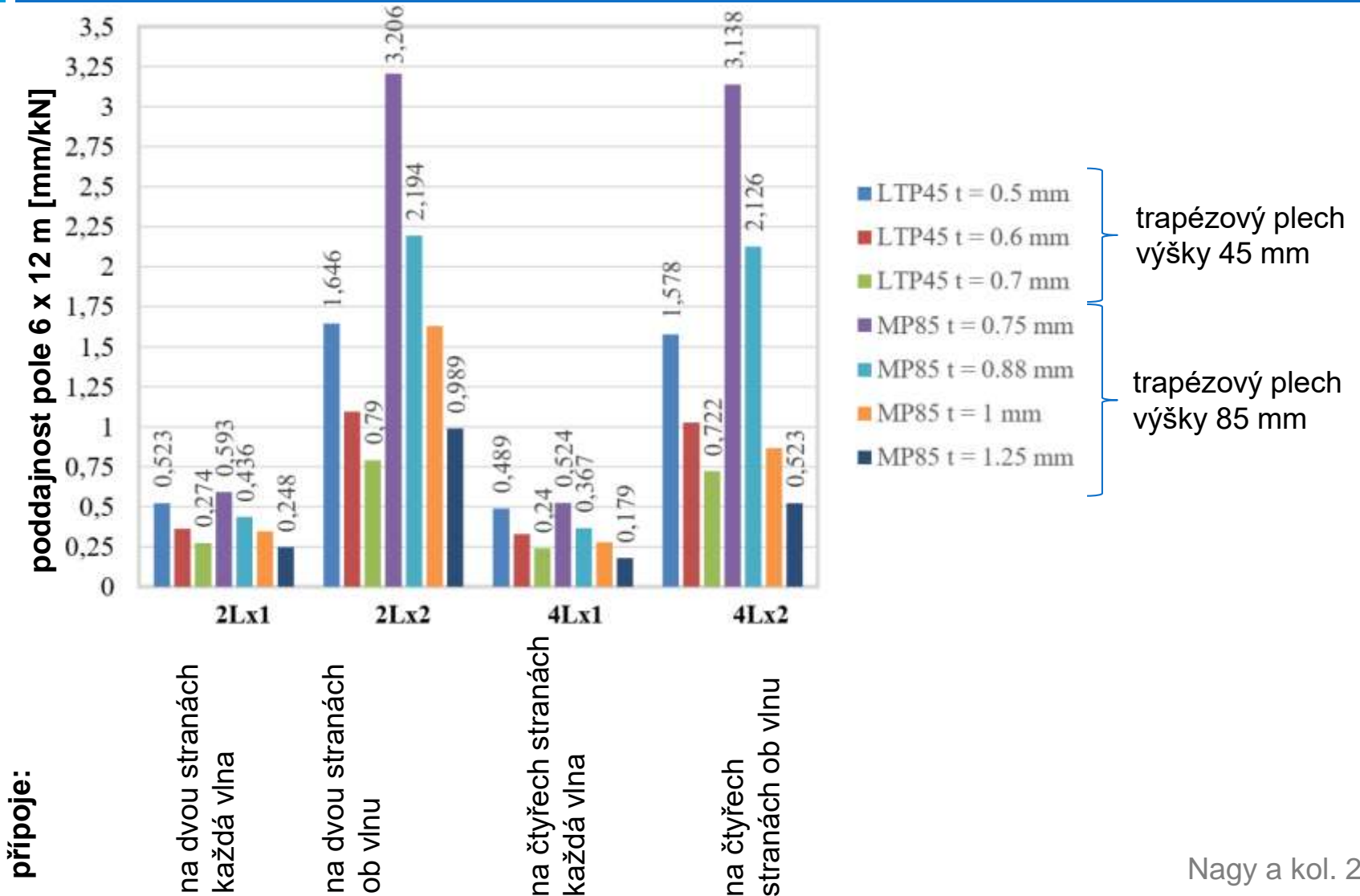
# Poddajnost smykového pole

- Poddajnost smykového pole je určena:
  - deformací profilu
    - distorze příčného řezu
    - smyková deformace
  - poddajností přípoje
    - přípoj na podélný nosný prvek
    - přípoj na příčný nosný prvek
    - přípoj mezi plošnými profily
  - osová deformace lemujících prvků (pokud není zohledněna jinde – např. modelu)

# Vliv kotvení na únosnost diafragmatu

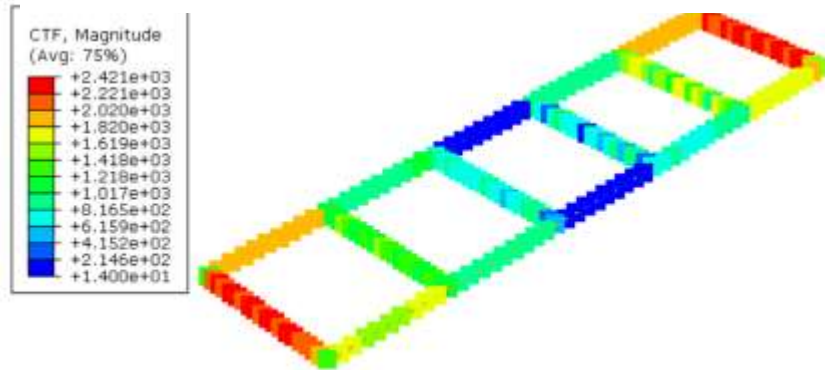
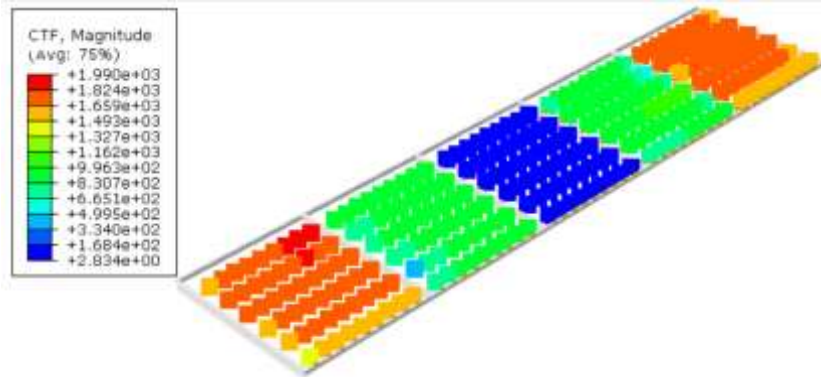


# Vliv kotvení na poddajnost diafragmatu

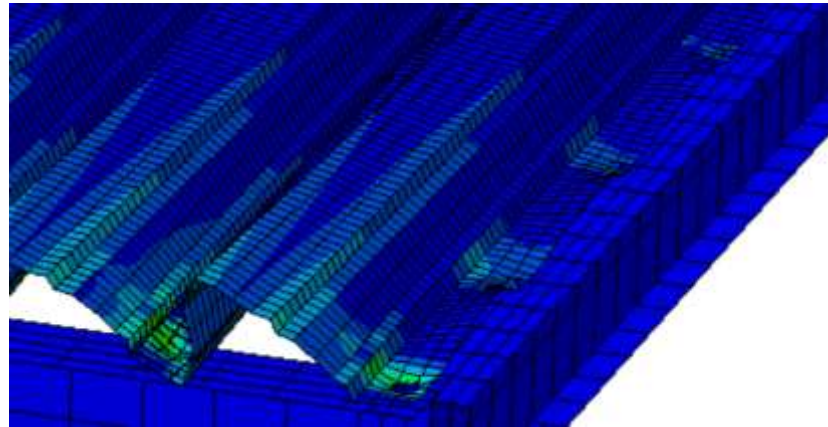
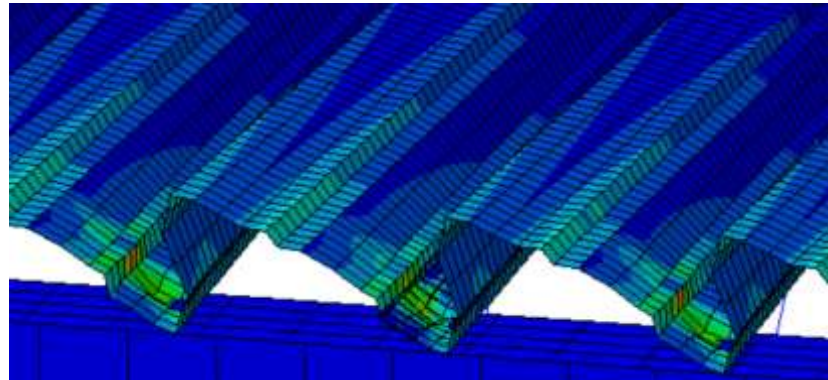


# Ukázka: porovnání postupu a modelem MKP

Síly na přípoje:



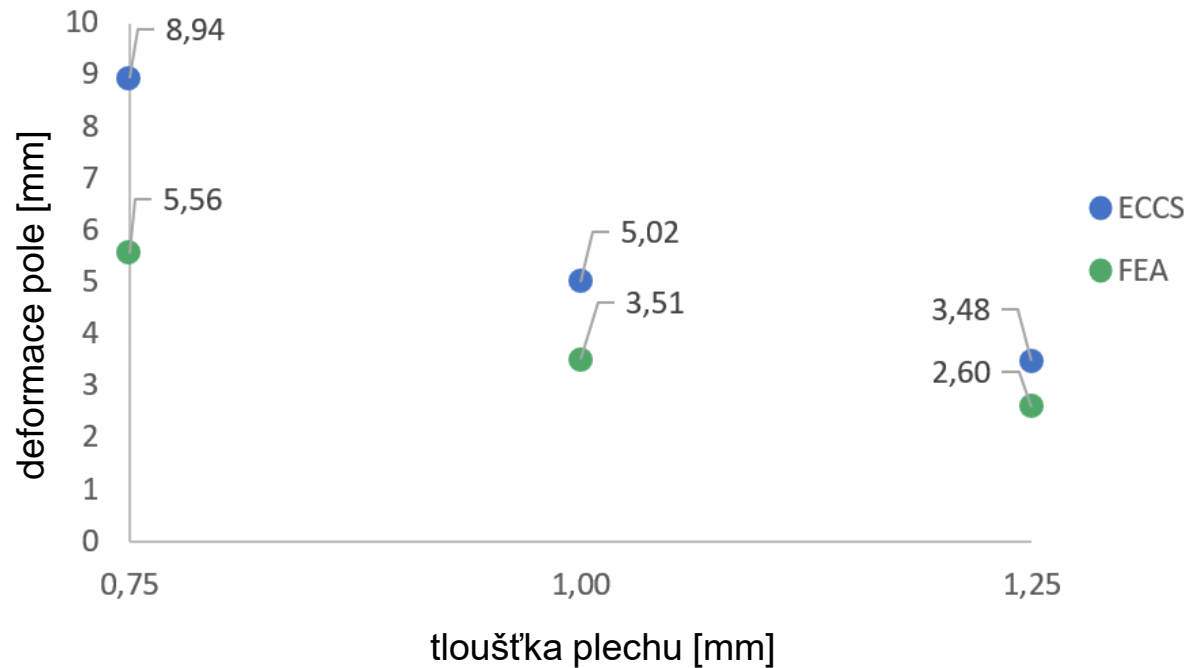
Deformace:



Diplomová práce: Ondřej Novotný - Stabilisation of Steel Structures by Diaphragm Action of Trapezoidal Sheeting, 2020.

# Ukázka: porovnání postupu a modelem MKP

- Porovnání – postup ECCS odpovídá



# Sendvičové panely

# Stabilizace prvků sendvičovými panely

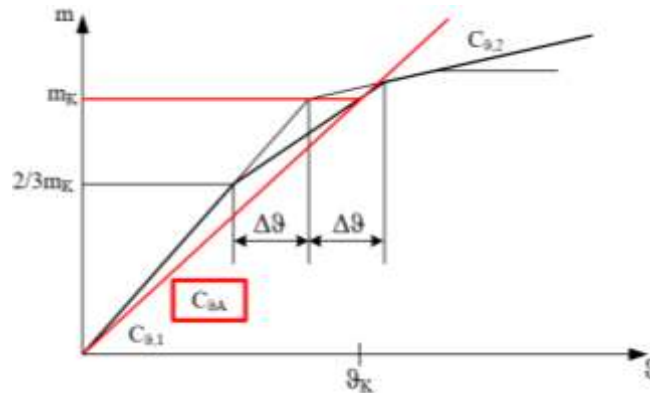
- Pro sendvičové panely v roce 2013 „ECCS / CIB European Recommendations on the Stabilisation of Steel Structures by Sandwich Panels“
  - ▣ podklady pro rotační podepření a příčné podepření
  - ▣ týká se zejména přenosu stabilizačních sil
  - ▣ panel s plechy při obou površích a jádrem tvořeným PU/EPS či minerální vlnou
  - ▣ obsahuje i ohled na správnou montáž a užívání
  - ▣ řešené příklady

# Podepření proti zkroucení

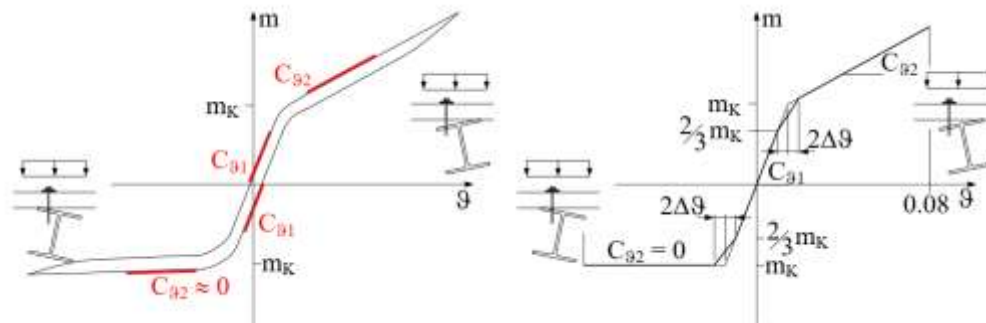
- Rotační tuhost spojení mezi nosníkem a panelem  $C_{\vartheta C,k}$

- Dvě možnosti postupu:

- a) Omezení momentu přenášeného podepřením – lineární



- b) Trilineární diagram tuhosti podepření – nelineární/iterační postup



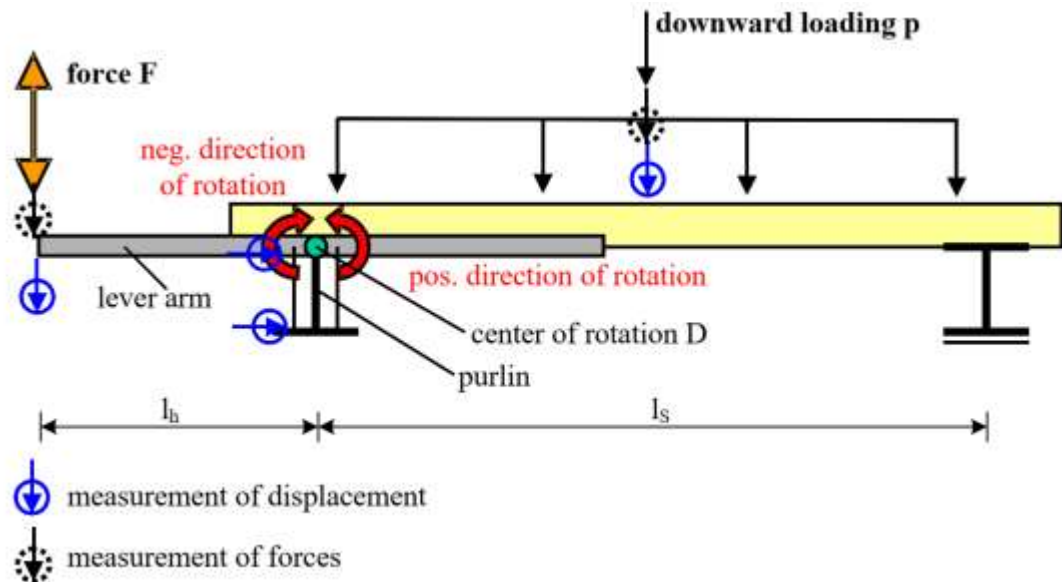
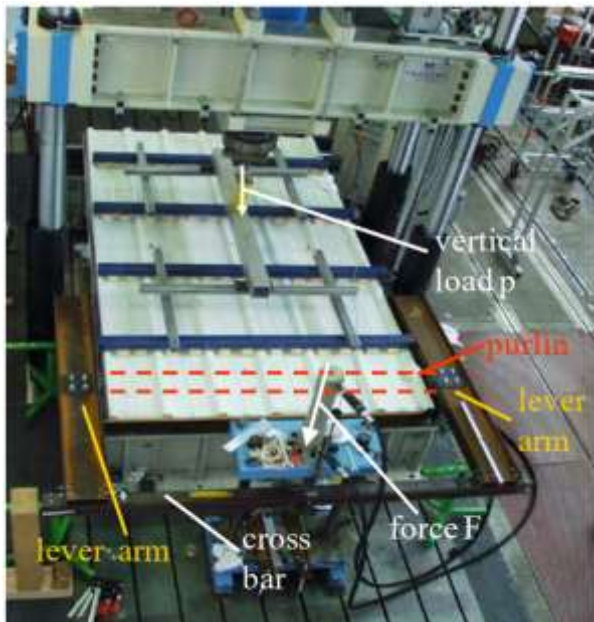
- Nutné znát tuhost jádra panelu.

- Obdobné postupy v DIN 18800-2 a Německá NA EN 1993-1-3



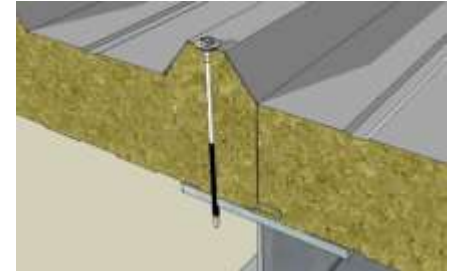
# Podepření proti zkroucení

- Podepření proti zkroucení nelze uvažovat při sání větru
  - možnost vzniku mezery mezi panelem a vaznicí
  - nebo ověřit zkouškou
  - návrh zkoušky: Lindner (1988): Drehbettungswerte für Dacheindeckungen mit untergelegter Wärmedämmung (Projekt 134). Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf.



# Příčné podepření

- Dle doporučení je smyková deformace samotného panelu zanedbatelná.
- Nezávisí na materiálových charakteristikách jádra.
- Vše je ovlivněno pouze tuhostí přípoje.
  - a) Výpočtem (přesnější)
  - b) Konzervativně dle tabulky v [kN/mm]



nominální tloušťka vnitřního plechu panelu	<i>S220GD</i>	<i>S280GD</i>	<i>S320GD</i>
<i>0.40 mm</i>	<i>1.6</i>	<i>1.9</i>	<i>2.0</i>
<i>0.50 mm</i>	<i>2.0</i>	<i>2.3</i>	<i>2.5</i>
<i>0.63 mm</i>	<i>2.4</i>	<i>2.9</i>	<i>3.1</i>
<i>0.75 mm</i>	<i>2.8</i>	<i>3.3</i>	<i>3.6</i>

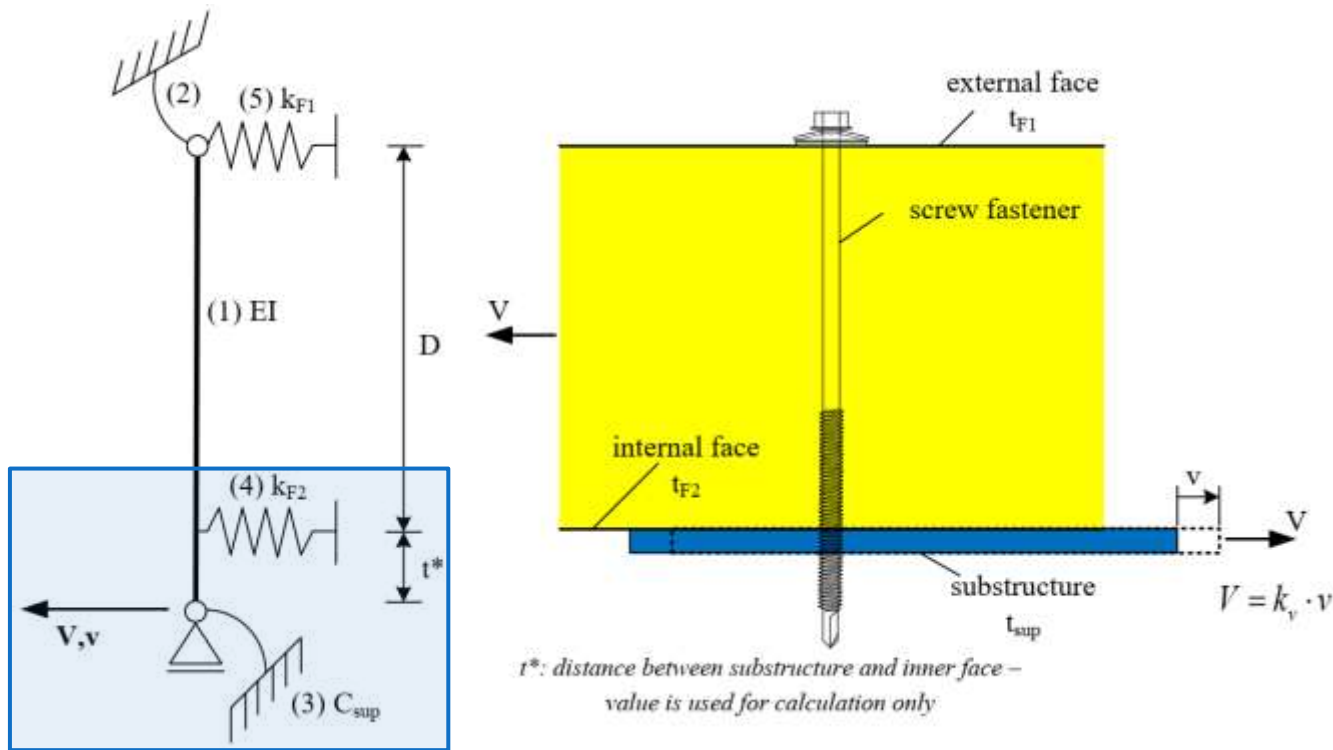
- Smyková únosnost přípoje:  $V_{Rk} = 4,2 \cdot \sqrt{t_{cor,F2}^3 \cdot d_1 \cdot f_{u,F2}}$

$$V_{Rd} = \frac{V_{Rk}}{\gamma_{M2}}$$

- $t_{cor,F2}$  je tloušťka ocelového jádra vnitřního plechu panelu
- $d_1$  nejmenší průměr šroubu – v závitu (uvažuje se  $0,9 d_s$ )
- $f_{u,F2}$  mez pevnosti vnitřního plechu panelu

# Poddajnost přípoje

- (1) ohybová tuhost šroubu
- (2) vetknutí hlavy šroubu do vnějšího plechu – zanedbává se
- (3) vetknutí šroubu do podporující konstrukce
- (4) otačení vnitřního plechu ( $k_{F2}$ ) – hlavní parametr
- (5) otačení vnějšího plechu ( $k_{F1}$ ) – zanedbává se



# Poddajnost přípoje (MSP)

- ohybová tuhost šroubu:  $EI = 200000 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{\pi d_s^4}{64}$
- tuhost upnutí šroubu do podporující konstrukce:  $C_{sup} = 2400 \text{ N/mm}^2 \cdot \sqrt{t_{cor,sup} d_1^5}$
- tuhost v přípoji na vnitřní plech (otlačení plechu):  $k_{F2} = \begin{cases} 6.93 \frac{f_{u,F2} \cdot \sqrt{t_{cor,F2}^3 \cdot d_1}}{0.26 \text{ mm} + 0.8 t_{F2}}, & 0.40 \text{ mm} \leq t_{cor,F2} \leq 0.70 \text{ mm} \\ 4.20 \frac{f_{u,F2} \cdot \sqrt{t_{cor,F2}^3 \cdot d_1}}{0.373 \text{ mm}}, & 0.70 \text{ mm} < t_{cor,F2} \leq 1.00 \text{ mm} \end{cases}$

- $t_{cor,F2}$  je tloušťka ocelového jádra vnitřního plechu panelu
- $t_{cor,sup}$  je tloušťka ocelového jádra podpírající konstrukce
- $d_1$  nejmenší průměr šroubu – v závitu (uvažuje se  $0,9 d_s$ )
- $d_s$  průměr dříku šroubu
- $f_{u,F2}$  mez pevnosti vnitřního plechu panelu

# Poddajnost přípoje (MSP)

- Poddajnost přípoje samovrtným nebo závitotvorným šroubem:

$$k_V = \frac{1}{\frac{x_F}{k_{F2}} + \frac{t_{cor,sup}^2 + 2 \cdot (1 - x_F) \cdot D \cdot t_{cor,sup}}{4C_{sup}} + \frac{3 \cdot (1 - x_F) \cdot D \cdot t_{cor,sup}^2 + t_{cor,sup}^3}{24EI}}$$

$$x_F = 1 - \frac{\frac{1}{k_{F2}} - \frac{Dt_{cor,sup}}{2C_{sup}} - \frac{Dt_{cor,sup}^2}{8EI}}{\frac{1}{k_{F2}} + \frac{D^2}{C_{sup}} + \frac{D^2 \cdot (2D + 3t_{cor,sup})}{6EI}}$$

- $D$  tloušťka panelu v místě přípoje (u běžných tloušťek nemá změna vliv)

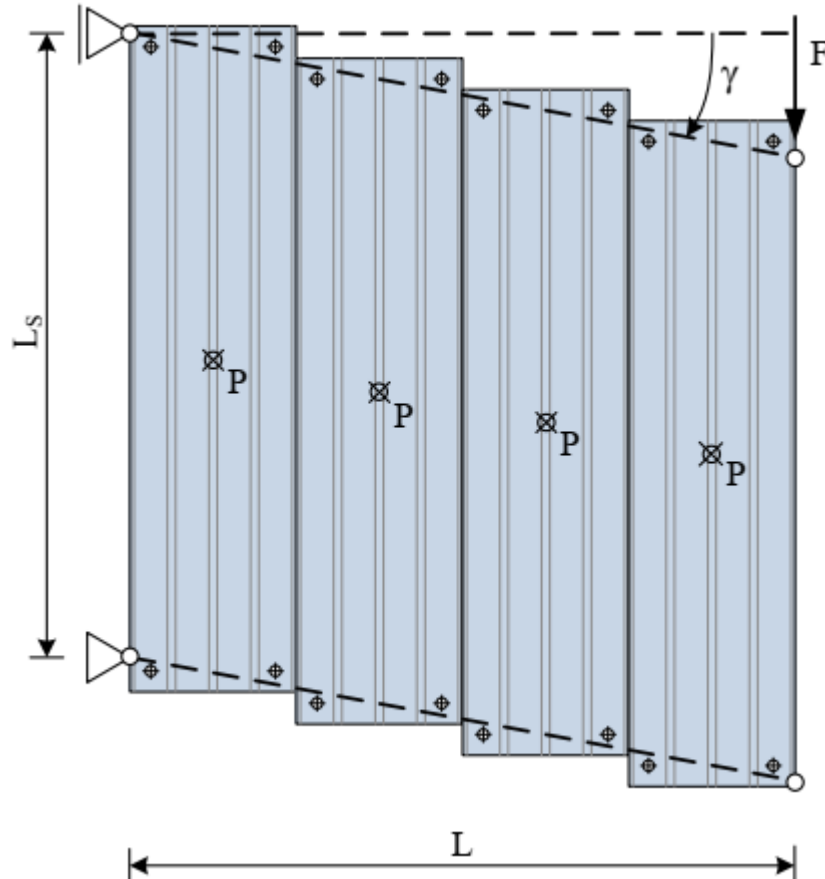
# Poddajnost přípoje (MSP)

## □ Příklad:

- panel  $D = 230$  mm
- $t_{\text{cor},F2} = 0,46$  mm
- $t_{\text{cor},\text{sup}} = 8$  mm
- $d_1 = 4,95$  mm
- $d_s = 5,5$  mm
- $f_{u,F2} = 360$  MPa
  
- $k_v = 2,392$  kN/mm (tabulka udává 2,5 kN/mm – odpovídá cca tl. pásnice <2 mm)

# Stanovení smykové tuhosti diafragmatu

- Příklad přípoje pouze na dvou stranách



- Zvlášť je postup pro panel s jednou tuhou podporou (kotvení na prah...)

# Stanovení smykové tuhosti diafragmatu

- přetvoření v přípoji
  - síla do spoje šroubem

$$V_k = k_v \cdot \Delta v_k = k_v \cdot \gamma \cdot \frac{c_k}{2}$$

- $c_k$  vzdálenost páru šroubů
- $\gamma$  zkosení (omezeno 1/750)

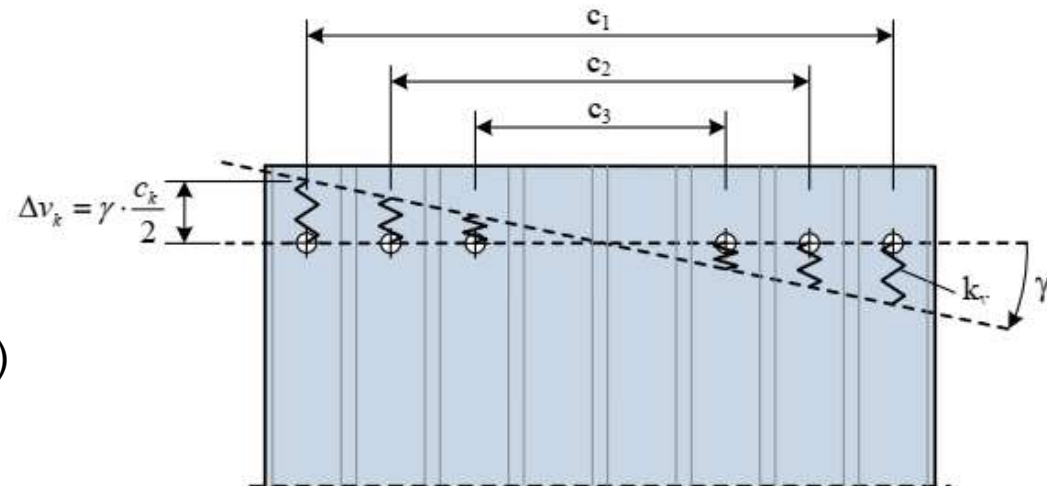
- pro jeden pár šroubů je moment vnitřních sil

$$M_k^I = V_k \cdot c_k = k_v \cdot \gamma \cdot \frac{c_k^2}{2}$$

- pro celý systém (stěnu / střechu)

$$M^I = n \cdot m \cdot k_v \cdot \gamma \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_k} c_k^2}{2}$$

- $n$  – počet panelů podél prvku
- $m$  – počet stabilizovaných polí
- $n_k$  – počet párů spojovacích prostředků v jenom přípoji jednoho panelu





# Stanovení smykové tuhosti diafragmatu

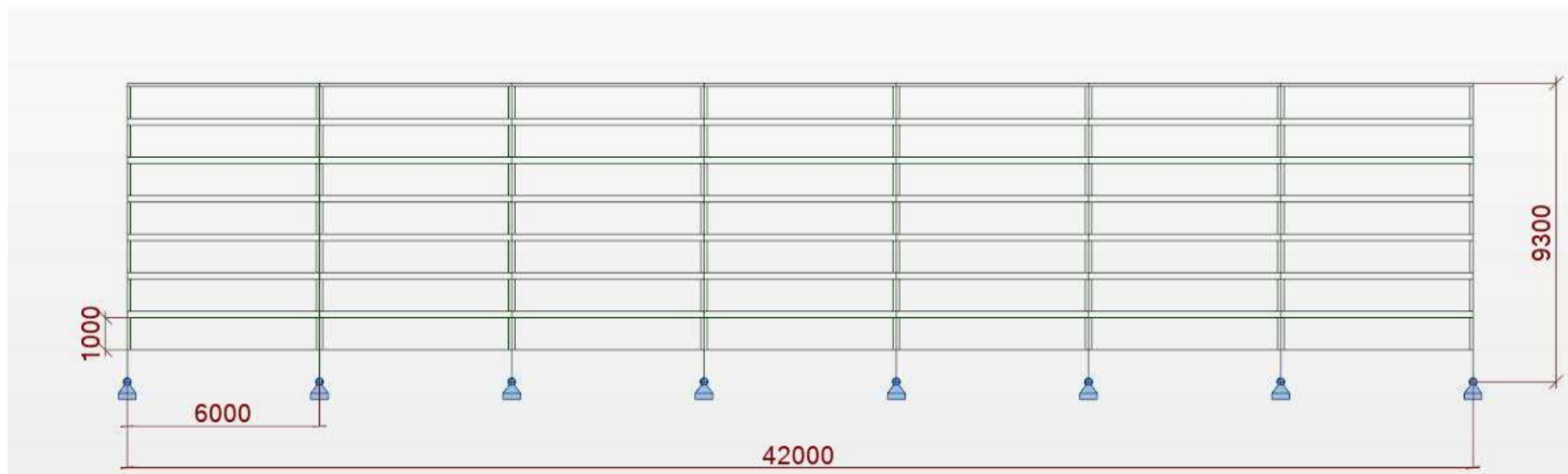
- vnitřní síly musejí být v rovnováze s vnějšími

$$M^E = F \cdot L = S \cdot \gamma \cdot L$$

- z rovnosti pak smyková tuhost:

$$S = n \cdot m \cdot k_v \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_k} c_k^2}{2}$$

# Stanovení smykové tuhosti diafragmatu



- příklad: 7 x 7 polí, dvojice šroubů v přípoji ve vzdálenosti  $c = 1$  m. Výška budovy 9,3m, Vodorovná síla 10 kN

$$S = n \cdot m \cdot k_v \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_k} c_k^2}{2} = 7 \cdot 7 \cdot 2,436 \cdot \frac{1}{9,3} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{n_k} 1^2}{2} = 6417 \text{ kN}$$

- vodorovná deformace pak

$$\delta = \frac{F \cdot L}{S} = \frac{10 \cdot 9,3}{6417} = 14,46 \text{ mm}$$

# Reference

- [1] ČSN EN 1993-1-3: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Obecná pravidla – Doplnující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily, ČNI, 2008.
- [2] EN 1993-1-3 Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. Final Draft. CEN, 2020.
- [3] ECCS TC 7 TWG 7.5 - European Recommendations for the Application of Metal Sheeting Acting as Diaphragm, 1995.
- [4] ECCS TC7 TWG 7.9 / CIB W056 - European Recommendations on the Stabilisation of Steel Structures by Sandwich Panels, 2013.
- [5] ECCS TC7 TWG 7.5 - The Testing of Connections with Mechanical Fasteners in Steel Sheeting and Sections, 2009.
- Ondřej Novotný - Stabilisation of Steel Structures by Diaphragm Action of Trapezoidal Sheeting, 2020.
- Zsolt NAGY, Andra POCOLA, Ilica MOIŞ, Róbert BALLOK - Current research on stressed skin design, TWG 7.5 meeting 2017 – Helsinki.
- STABFI Deliverable D6.2: FE analysis report at ambient temperature (TAU), 2019



**ČVUT**  
ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE



**STABFI**

# Stabilizace prvku a konstrukce pláštěm za běžné teploty

**Michal Jandera**

