

- **Jaroslav Lacina, Martin Zlámal**
- **SANACE TUNELŮ – TECHNOLOGIE A MATERIÁLY, SPÁROVACÍ HMOTY PRO OSTĚNÍ**

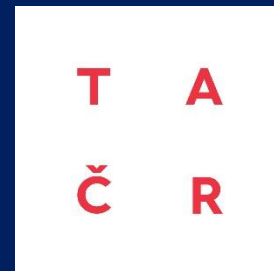
TA03030851

Sanace tunelů - technologie, materiály a metodické postupy

- **Zesilování**
- **Optimalizace**

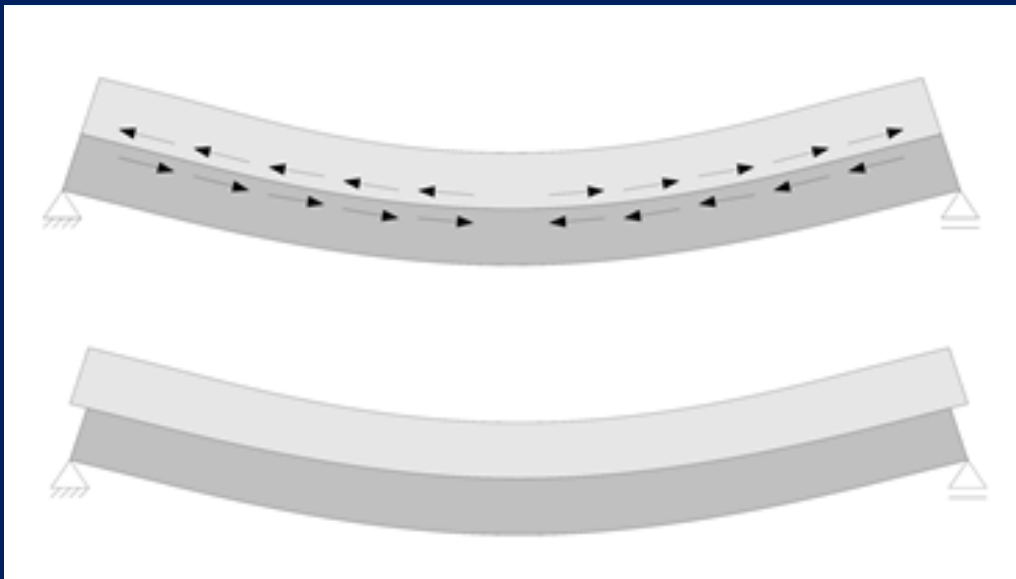
Petr ŠTĚPÁNEK, Ivailo TERZIJSKI, **Martin ZLÁMAL**, Jaroslav KADLEC, Ivana LANÍKOVÁ
Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební Brno

Vlastimil Horák, Jaroslav Lacina
Amberg Engineering



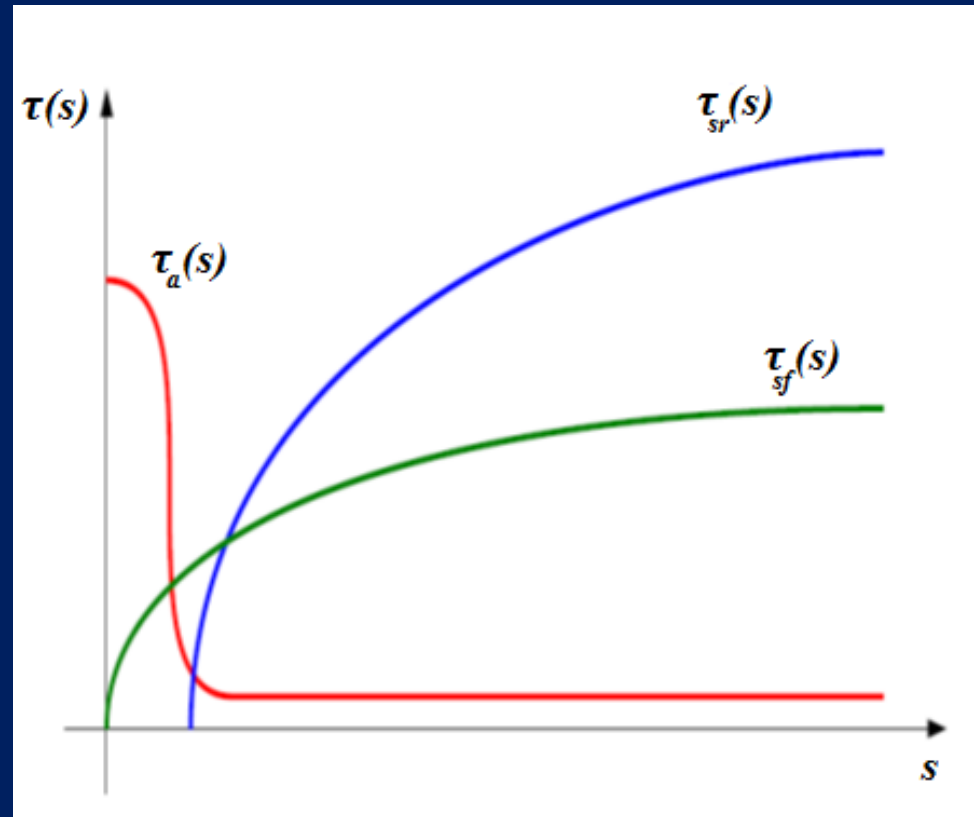
- Zvýšení životnosti – návrh sanační směsi,
- **Zvýšení únosnosti – zesílení ostění – dodatečná vrstva betonu,**
- Optimalizace zesílení.

- Chování betonu na styku dvou vrstev betonů – slabé místo
- Chování kompozitní (FRP) a betonářské výztuže



- Je důležité porozumět chování rozhraní mezi vrstvami betonu

- Mechanické propojení (Mechanical interlocking)
- Soudržnost $\tau_a(s)$
- Tření $\tau_{sf}(s)$
- Hmoždinkový efekt $\tau_{sr}(s)$



$$\tau(s) = \tau_a(s) + \tau_{sf}(s) + \tau_{sr}(s)$$

| | Proměnné | MC2010 | MC1990 | EC 2 | ACI 318-11 | BS 8110 | CAN A23.3-04 | JSCE |
|----------------------|----------------------|--------|--------|------|------------|---------|--------------|------|
| Bez výztuže | c_a | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | f_{ct} | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | f_c | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ |
| | $f_{ct,2}$ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | μ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| | σ_n | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ |
| | Drsnost povrchu | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ | ✗ |
| | $\tau_{R,min}$ [MPa] | - | - | - | 0.55 | 0.4~0.8 | 0.7 | - |
| | τ_R [MPa] | 0.44 | 0.44 | 0.44 | 0.55 | 0.65 | 0 | 0 |
| | S výztuží | c_a | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ |
| f_{ct} | | ✗ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| f_c | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✓ | ✗ | ✓ |
| $f_{ct,2}$ | | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| μ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✗ |
| σ_n | | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓ | ✓ |
| Drsnost povrchu | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |
| ρ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| ρ_{min} [%] | | 0.05 | 0.10 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.10 | - |
| f_y | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| θ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓ | ✓ |
| κ | | ✓ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ | ✗ |
| $\tau_{R,max}$ [MPa] | | 6.47 | 6.17 | 6.30 | 5.50 | 2.50 | 6.30 | - |

- τ_R odolnost povrchu ve smyku;
- f_{ct} pevnost betonu v tahu;
- f_c pevnost betonu v tlaku;
- $f_{ct,2}$ pevnost v tahu dodatečného betonu;
- c_a soudržnost;
- μ součinitel tření;
- σ_n normálové napětí;
- ρ stupeň vyztužení smykovou výztuží;
- f_y mez kluzu výztuže,
- θ úhel mezi rovinou smyku a výztuží;
- κ součinitel interakce výztuže a betonu.

Výzkum Sand patch test

Hloubka textury ≤ 1.5 mm \rightarrow hladký povrch



- Smyková únosnost (model code 2010)
- $\tau_u = c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n$
- Pokud je smyková únosnost vzorků různá,
- Normálové napětí $\sigma_n = 0$,
- A soudržnost $c_a = \text{konstantní/podobná}$

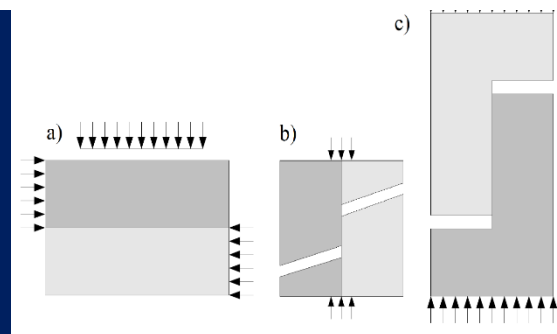
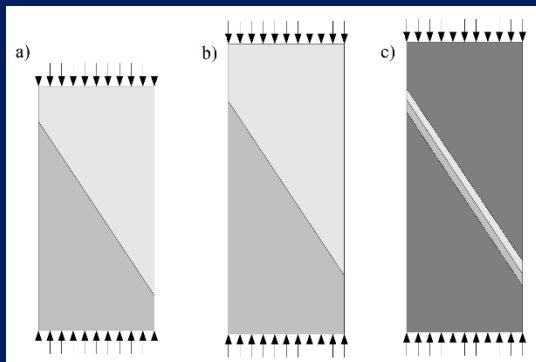
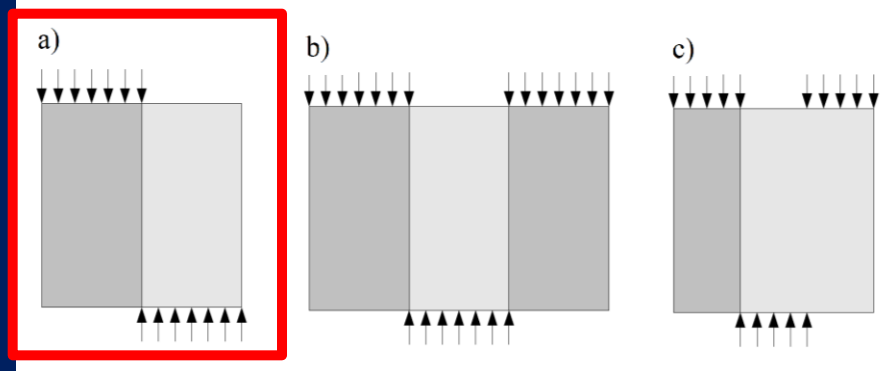
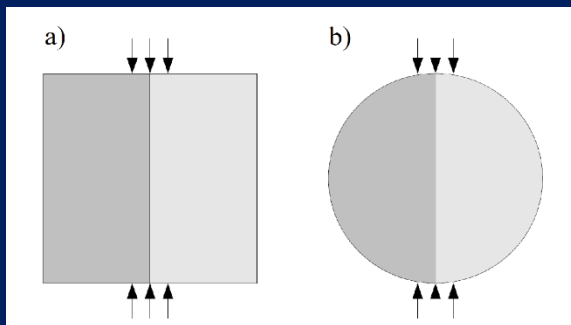
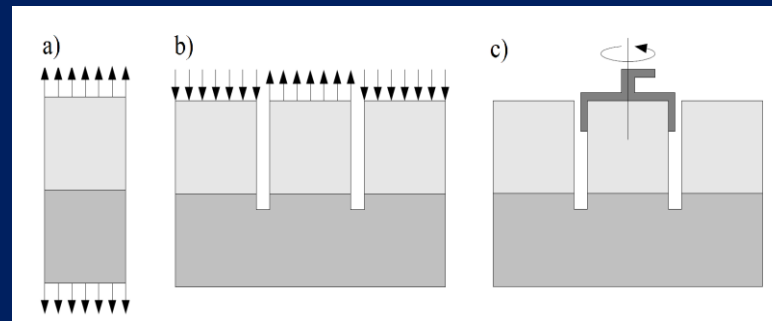
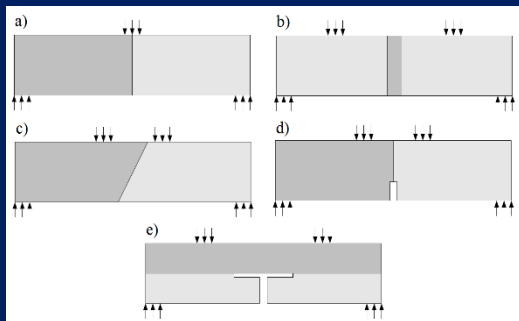


smyková únosnost musí záviset na $f_{ct,2}$

T A

Č R

Zkoušky smykové únosnosti



Výzkum Přímý test smykové únosnosti

Série A: 800x800x300 mm; 4 ϕ 8 (ocel) or 4 ϕ 10 (GFRP);

- 1) špatná/špatná kvalita betonu
- 2) špatná/dobrá kvalita betonu
- 3) dobrá/dobrá kvalita betonu

| | Kvalita | Pevnost v tlaku | Pevnost v tahu |
|----|-----------------|--------------------|-------------------|
| 1. | Špatná / Špatná | 51,5 / 42,5 | 3,3 / 2,9 |
| 2. | Špatná / Dobrá | 19,5 / 63,9 | 1,7 / 3,8 |
| 3. | Dobrá / Dobrá | 51,3 / 53,1 | 3,3 / 3,4 |



9. 11. 2016



Tunelářské odpoledne



Výzkum Přímý test smykové únosnosti

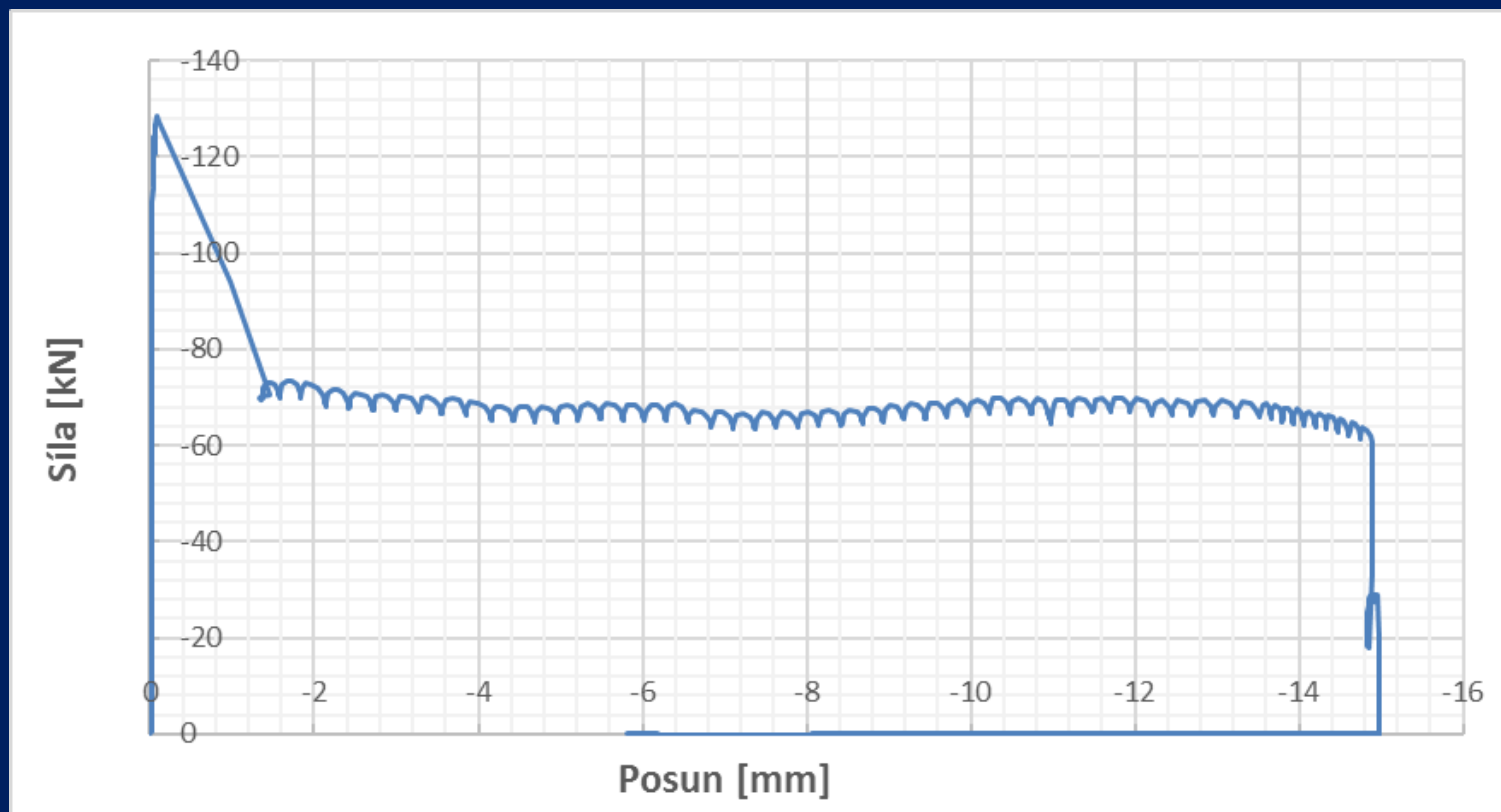
Série B: 400x400x300 mm; 2,4,8,16 ϕ 8 (ocel) or 2,4,8,16 ϕ 10 (GFRP);
- pouze špatná/dobrá kvalita betonu



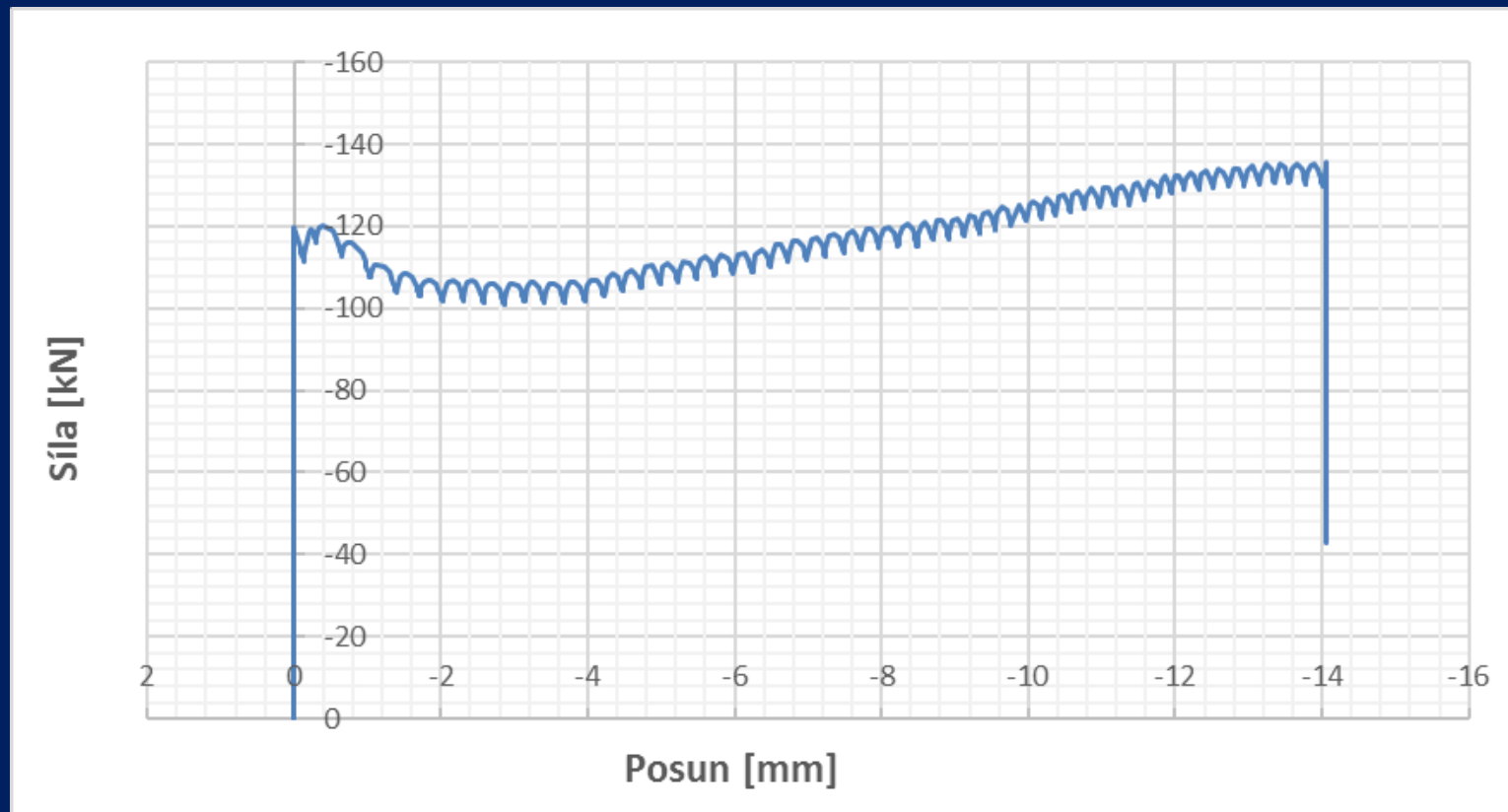
Výzkum

Přímý test smykové únosnosti

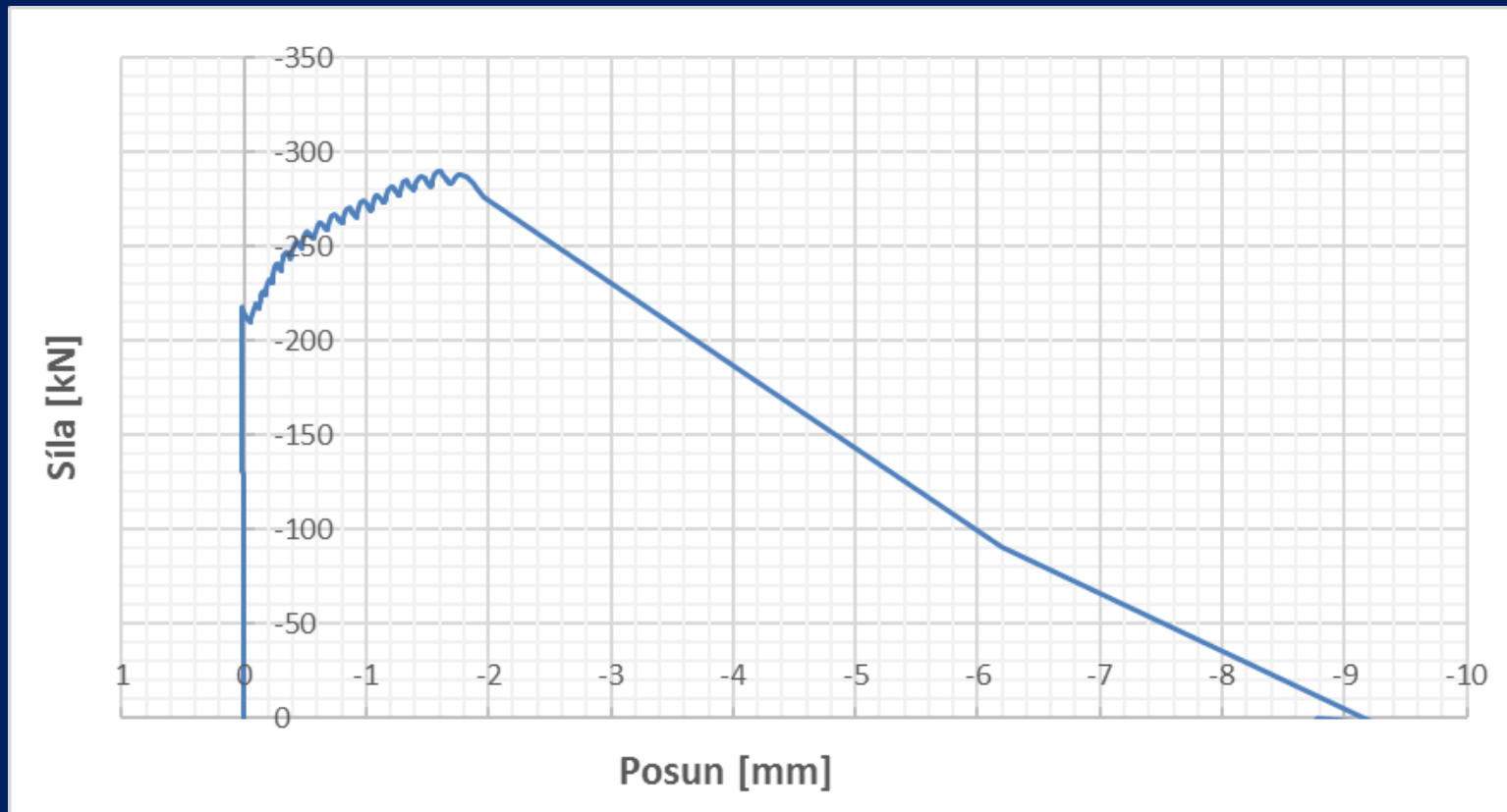
- Rozhraní beton-beton – Typické chování s malým stupněm vyztužení
- Série A: 4 trny a Série B: 2 trny (stupeň vyztužení $\rho < 0,1 \text{ ‰}$)



- Rozhraní beton-beton – Typické chování s malým stupněm vyztužení
- Série B: 4 trny (stupeň vyztužení $\rho = 0,2 \text{ ‰}$)

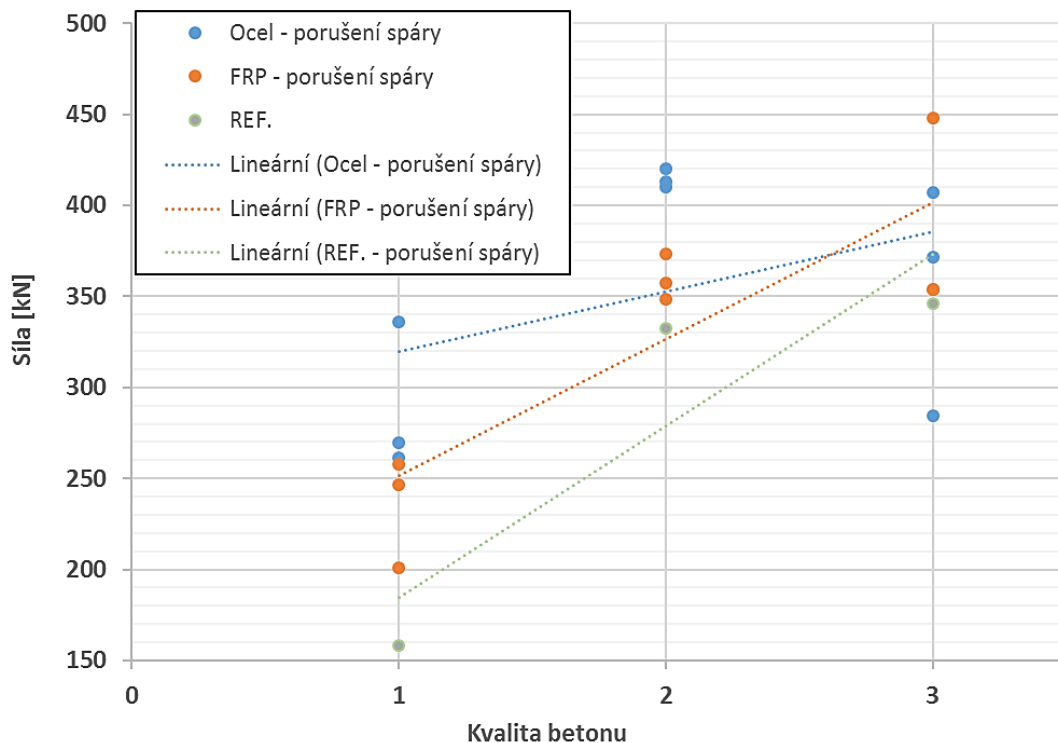


- Rozhraní beton-beton – Typické chování s vyšším stupněm vyztužení
- Série B: 8 a 16 trnů (stupeň vyztužení $\rho = 0,4 \text{ ‰}$, resp. $0,8 \text{ ‰}$)



Závěr Přímý test smykové únosnosti

- Rozhraní beton-beton – Série A: 800x800 mm; 4 trny
 - Závislost na kvalitě betonů

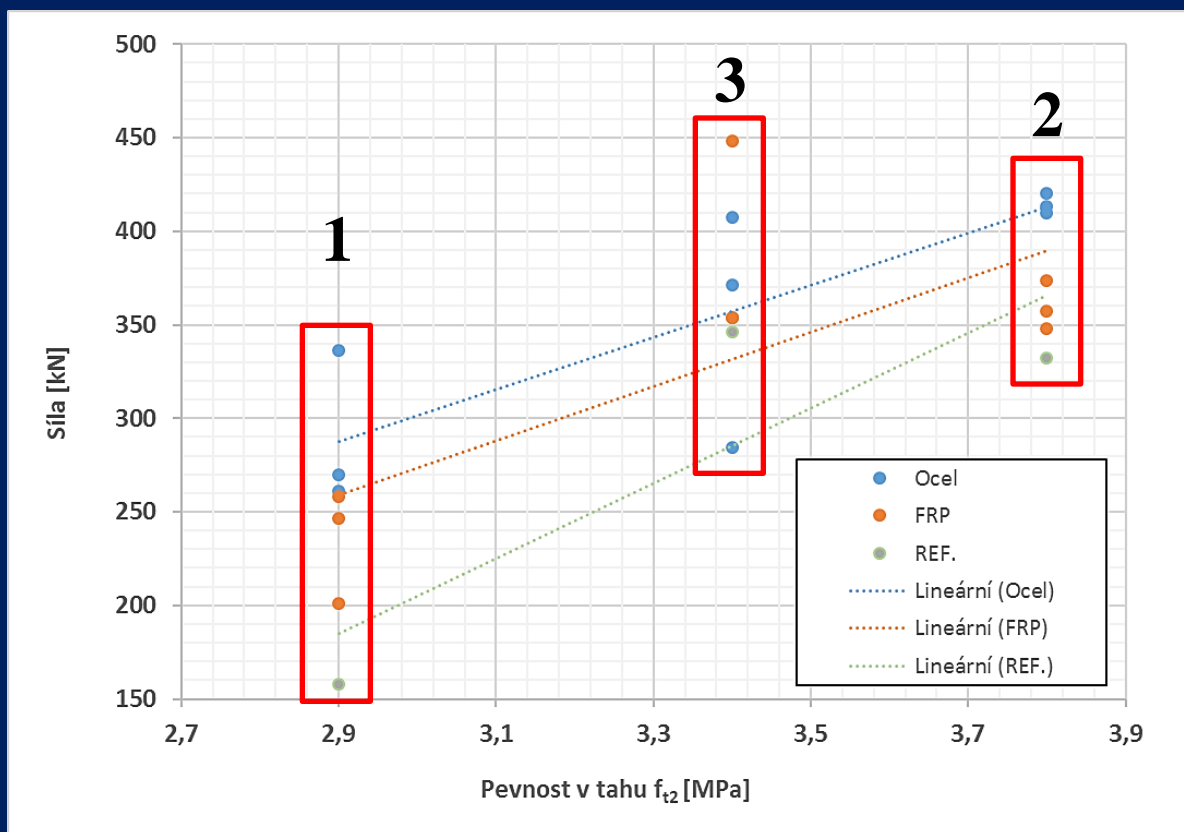


- 1) špatná/špatná kvalita betonu
- 2) špatná/dobrá kvalita betonu
- 3) dobrá/dobrá kvalita betonu

| | Kvalita | | Pevnost v tlaku | | Pevnost v tahu | |
|----|---------|--------|-----------------|------|----------------|-----|
| 1. | Špatná | Špatná | 51,5 | 42,5 | 3,3 | 2,9 |
| 2. | Špatná | Dobrá | 19,5 | 63,9 | 1,7 | 3,8 |
| 3. | Dobrá | Dobrá | 51,3 | 53,1 | 3,3 | 3,4 |

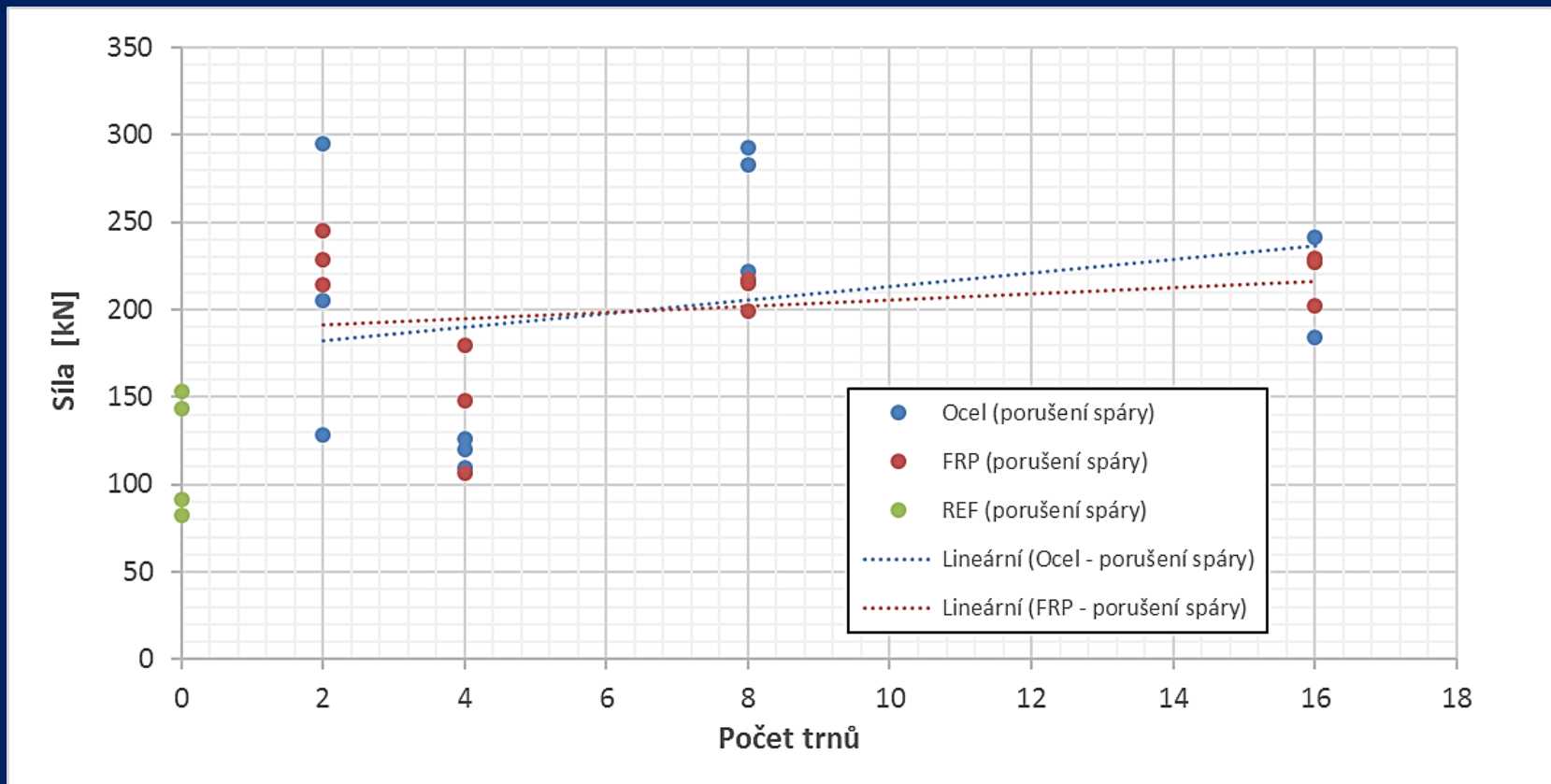
Závěr Přímý test smykové únosnosti

- Rozhraní beton-beton – Série A: 800x800 mm; 4 trny
 - Závislost na tahové pevnosti dodatečného vrstvy betonu f_{ct2}



| | Kvalita | Pevnost v tlaku | Pevnost v tahu |
|----|-----------------|-----------------|----------------|
| 1. | Špatná / Špatná | 51,5 / 42,5 | 3,3 / 2,9 |
| 2. | Špatná / Dobrá | 19,5 / 63,9 | 1,7 / 3,8 |
| 3. | Dobrá / Dobrá | 51,3 / 53,1 | 3,3 / 3,4 |

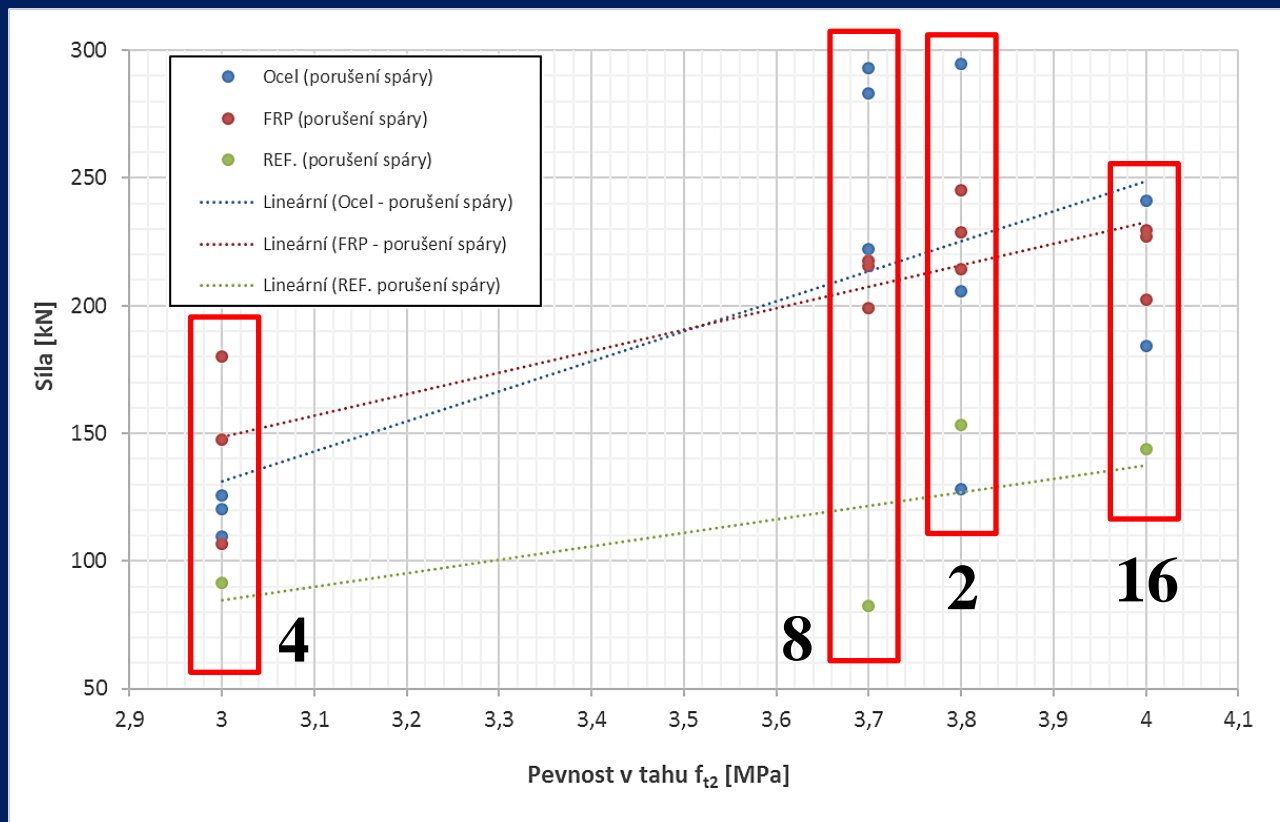
- Rozhraní beton-beton – Série B: 400x400 mm; 2-16 trnů; porušení spáry/rozhraní
 - Závislost na počtu trnů



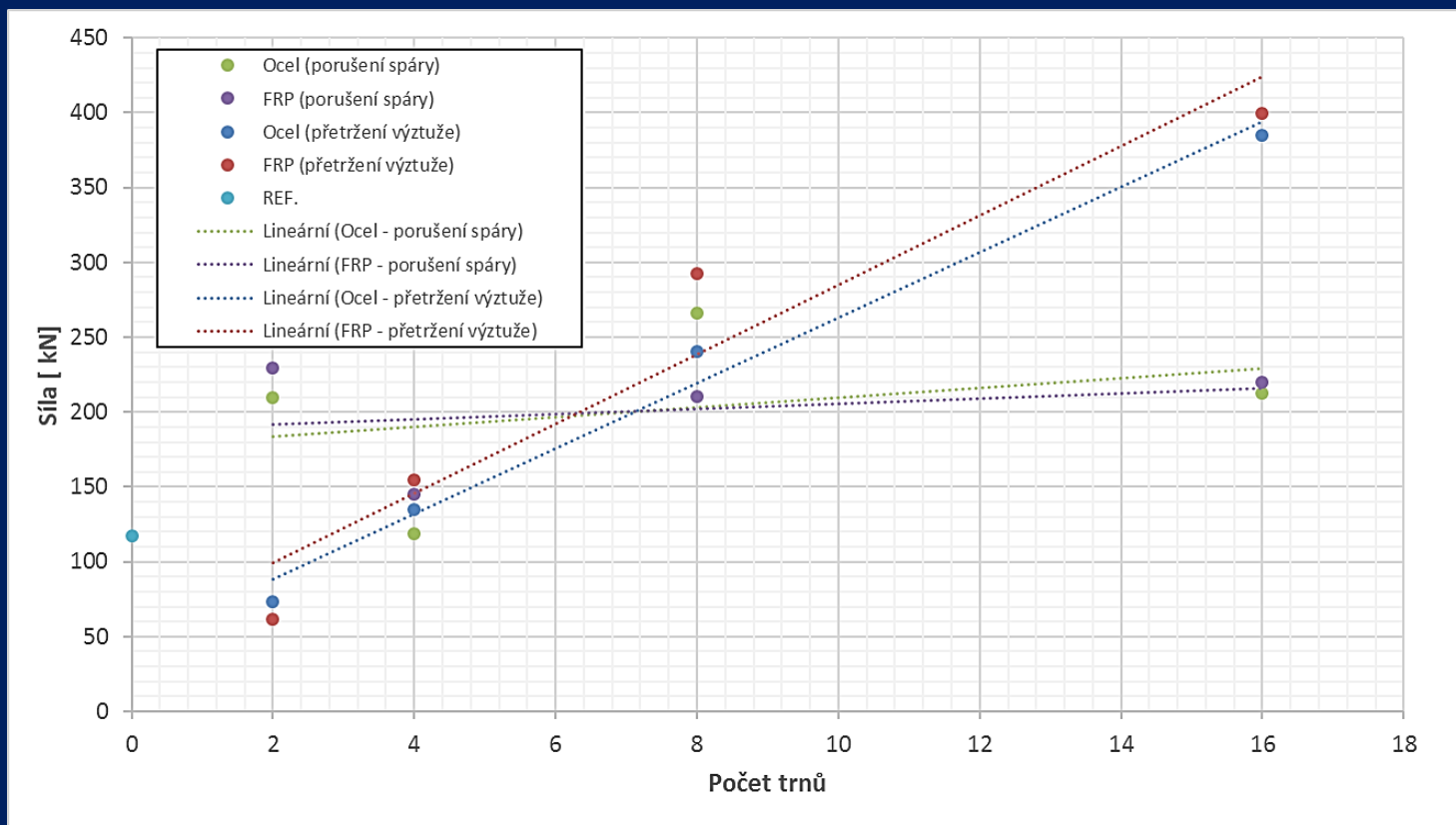
Závěr


Přímý test smykové únosnosti

- Rozhraní beton-beton – Série B: 400x400 mm; 2-16 trnů; porušení spáry/rozhraní
- Závislost na tahové pevnosti dodatečného vrstvy betonu f_{ct2}



- Rozhraní beton-beton – Série B: 400x400 mm; 2-16 trnů; porušení prvku/výztuže
 - Závislost na počtu trnů



- získané výsledky poukazují na relativně dobrý souhlas s návrhovými předpisy,
- vlastnosti přidané vrstvy betonu jsou rozhodující pro smykovou únosnost rozhraní  doplnění norem,
- bylo prokázáno podobné chování FRP a ocelové výztuže.

T A
Č R

TA03030851

Sanace tunelů - technologie, materiály a metodické postupy

Praktická aplikace optimalizace – zesílení kolektoru

Petr ŠTĚPÁNEK, Ivailo TERZIJSKI, Martin ZLÁMAL, Jaroslav KADLEC, Ivana LANÍKOVÁ

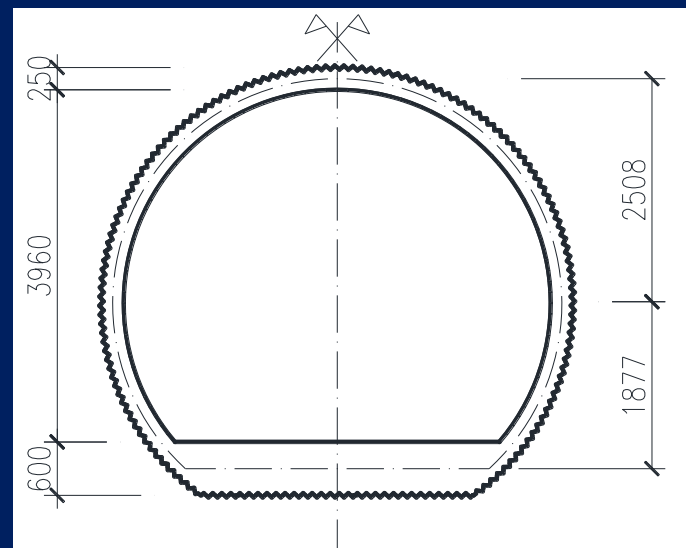
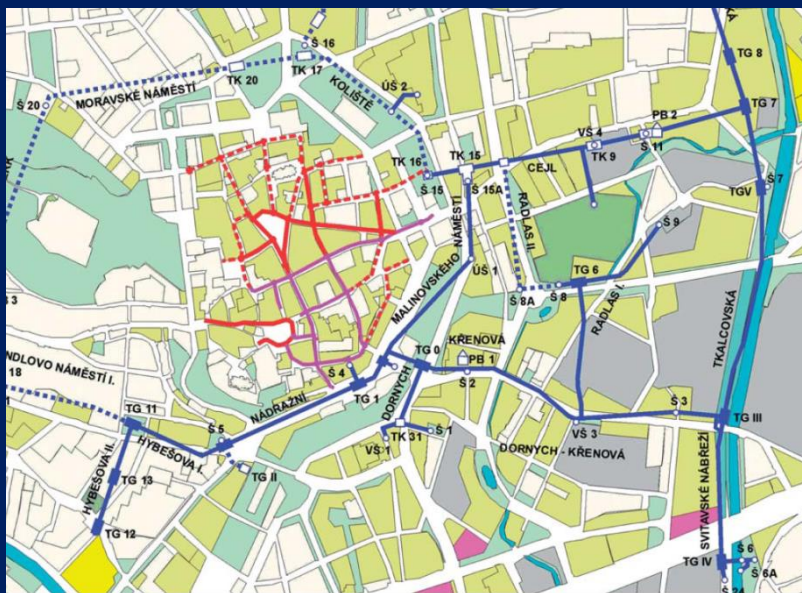
Ústav betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební Brno

Vlastimil Horák, Jaroslav Lacina

Amberg Engineering

- Primární kolektor Svitavské nábřeží mezi šachtami Š6a a Š24

příčný průřez části tunelu



- Výsledky průzkumů z roku 2014
 - první fáze výstavby 1979 - 1982
 - druhá fáze výstavby 1982 - 1989

Výron vody a bahna v pracovní spáře mezi podlahou a ostěním chodby



Lokální degradace ostění kolektoru



Detail výronů vody kolem konzol



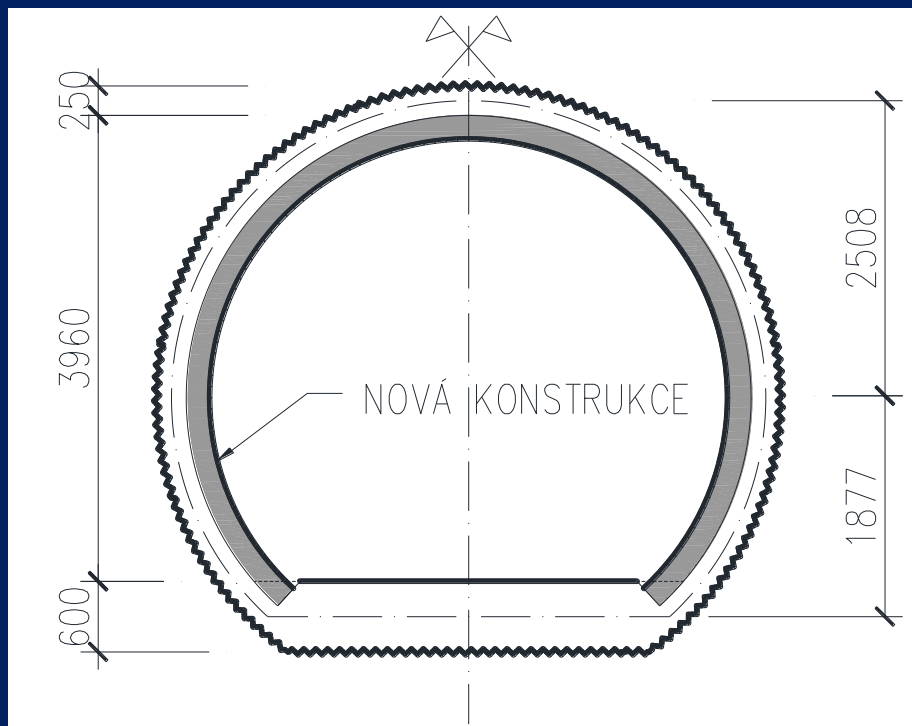
Sít trhlin s výluhy, lokální sanace kolem ocelových konzol



Injektáž paty ostění kolektoru proti průniku podzemní vody



Návrh sanace ostění



Materiál:

Stříkaný beton C25/30

Výztuž B 500 B nebo GFRP výztuž

Tloušťka ostění $h =$ 

aby cena výstavby byla
minimální

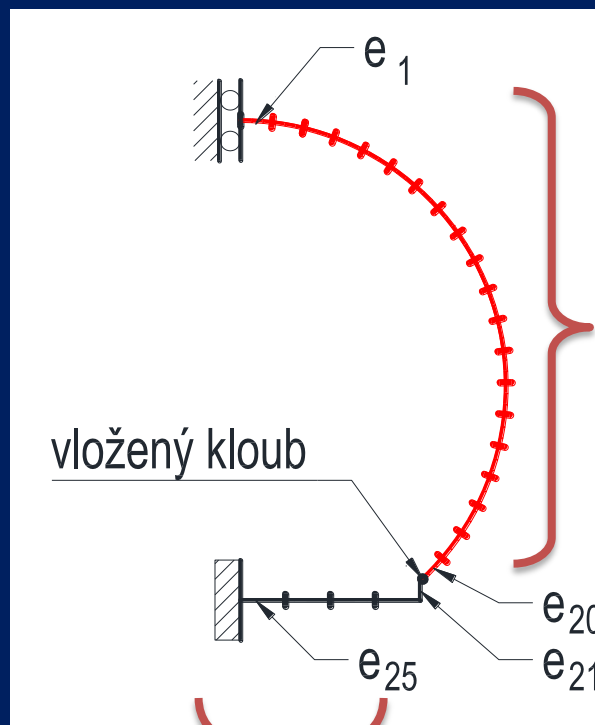
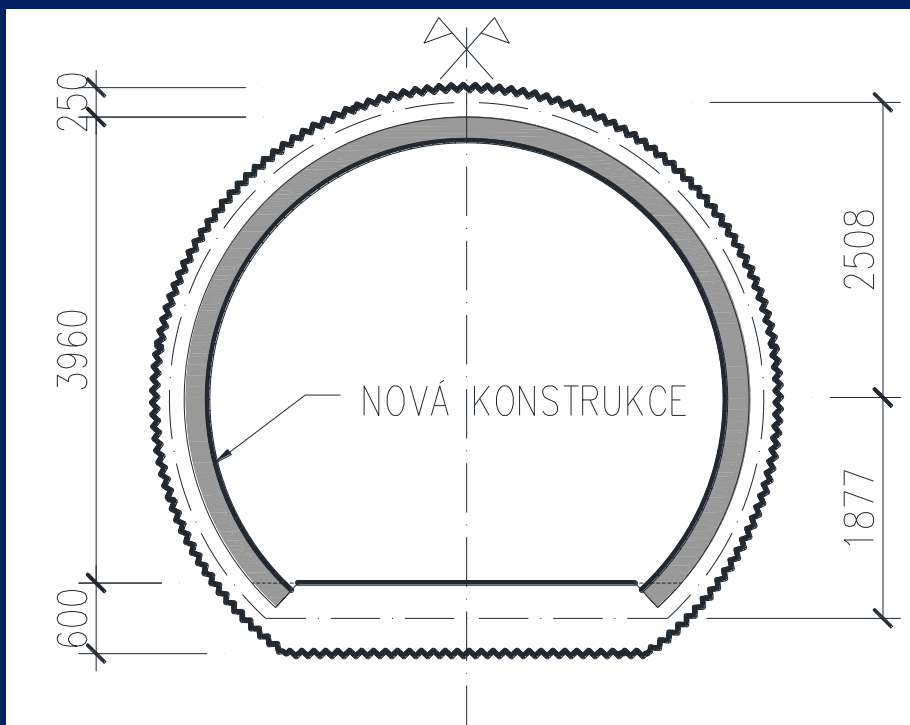


Úloha optimalizace s účelovou
funkcí

$$C = \min$$

a omezujícími podmínkami
uvedenými dále

Diskretizace ostění pro výpočet MKP

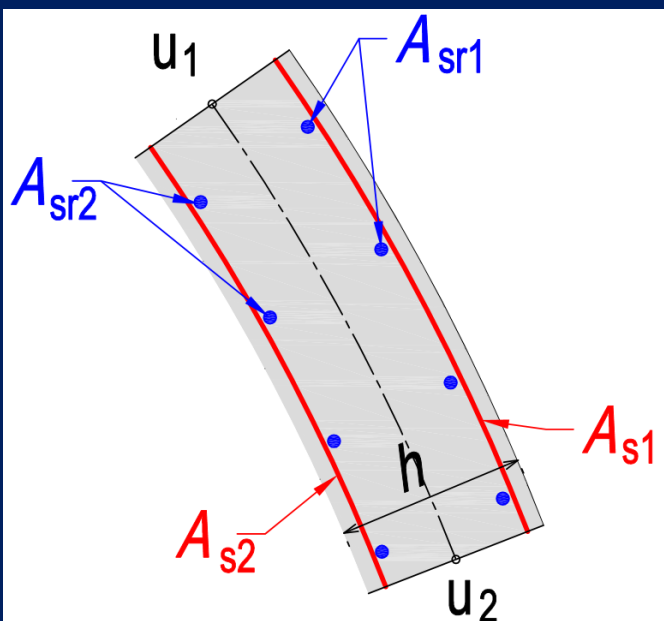


Konečné prvky
 $\{e_1, \dots, e_{20}\}$

Prvky dna $\{e_{21}, \dots, e_{25}\}$
nepodléhající optimalizaci

Optimalizované proměnné

Plochy příčné výztuže



Plochy hlavní výztuže

h_i → tloušťka ostění

$A_{s1,i}, A_{s2,i}$ → plochy hlavní výztuže

$A_{sr1,i}, A_{sr2,i}$ → plochy příčné výztuže

- jsou definované pro každý element e_i pomocí vektoru optimalizovaných proměnných

$$\mathbf{x}_i = \{h_i, A_{s1,i}, A_{s2,i}, A_{sr1,i}, A_{sr2,i}\}^T$$

→ $5 \times 20 = 100$ optimalizovaných proměnných

Omezující podmínky:

➤ MSU

podmínky rovnováhy (MKP) $K_{ULS} \mathbf{u}_{ULS} = \mathbf{F}_{ULS}$

podmínky spolehlivosti $\epsilon_{SE} \leq \epsilon_{SR}$ and $\epsilon_{CE} \geq \epsilon_{CR}$

➤ MSP

podmínky rovnováhy (MKP) $K_{SLS} \mathbf{u}_{SLS} = \mathbf{F}_{SLS}$

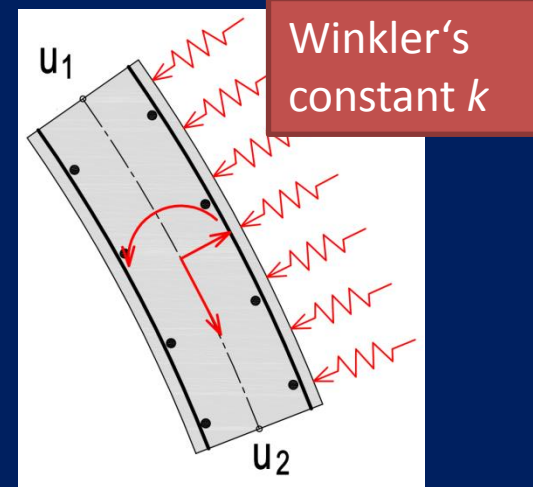
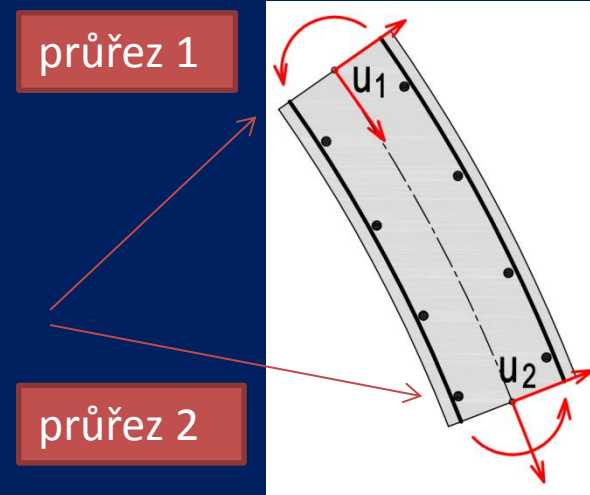
posun, pootočení v uzlu $u_{min} \leq u_{SLS} \leq u_{max}$

$$K_j = K_{B,j} + K_{k,j} \text{ pro } j = ULS, SLS$$

matice ohybových
tuhostí

matice tuhosti podloží
Winkler model

průřez pro
výpočet
tuhosti B s
vlivem trhlin



Omezující podmínky:

➤ konstrukční zásady:

- plocha hlavní výztuže

$$A_{s1}, A_{s2} \geq A_{s,\min}$$

$$A_{s1} + A_{s2} \leq A_{s,\max}$$

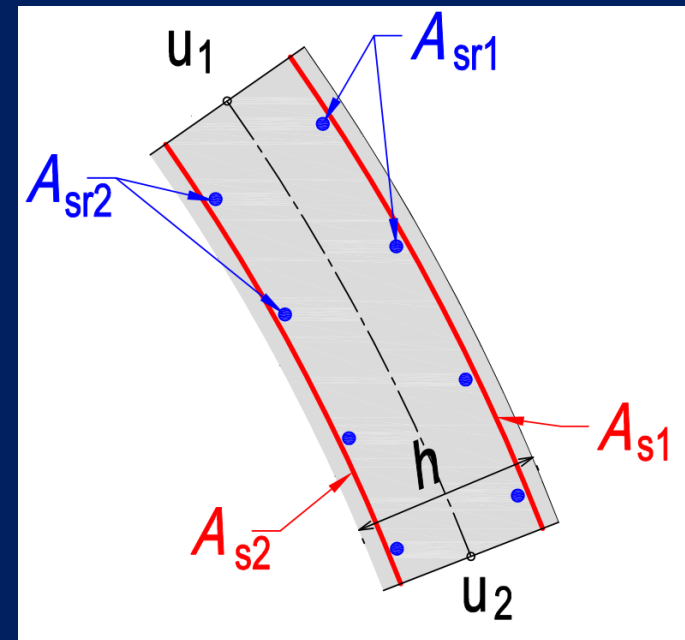
- plocha příčné výztuže

$$A_{sr1}, A_{sr2} \geq A_{sr,\min}$$

$$A_{sri} \geq 0,25A_{s,i}, i = 1, 2$$

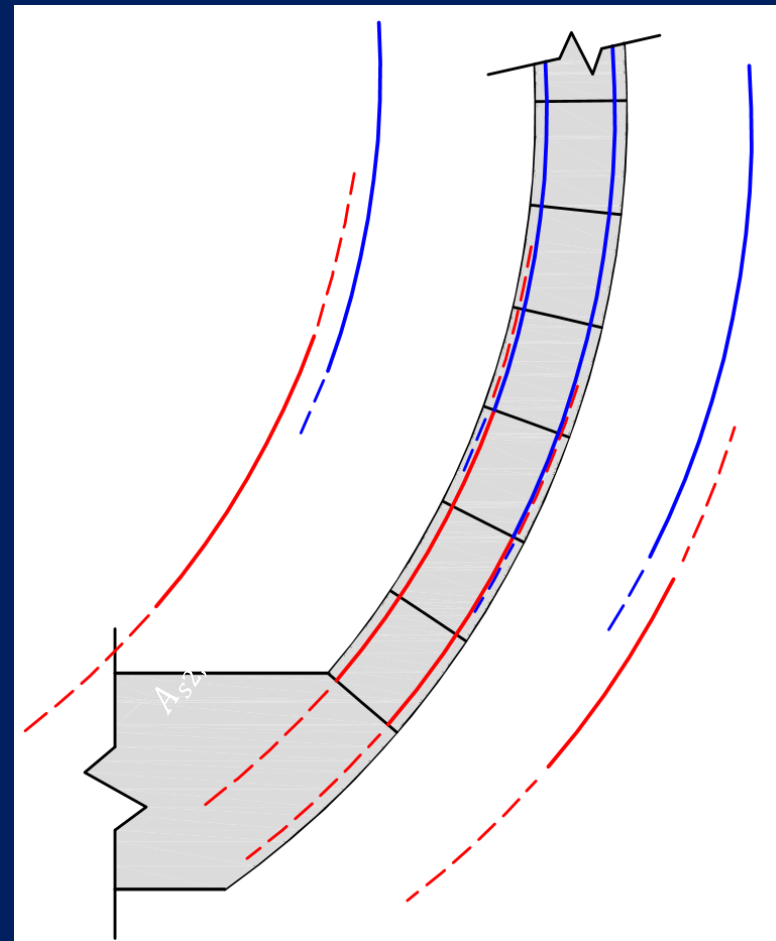
- tloušťka tunelu (požadavky uživatele)

$$h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$$

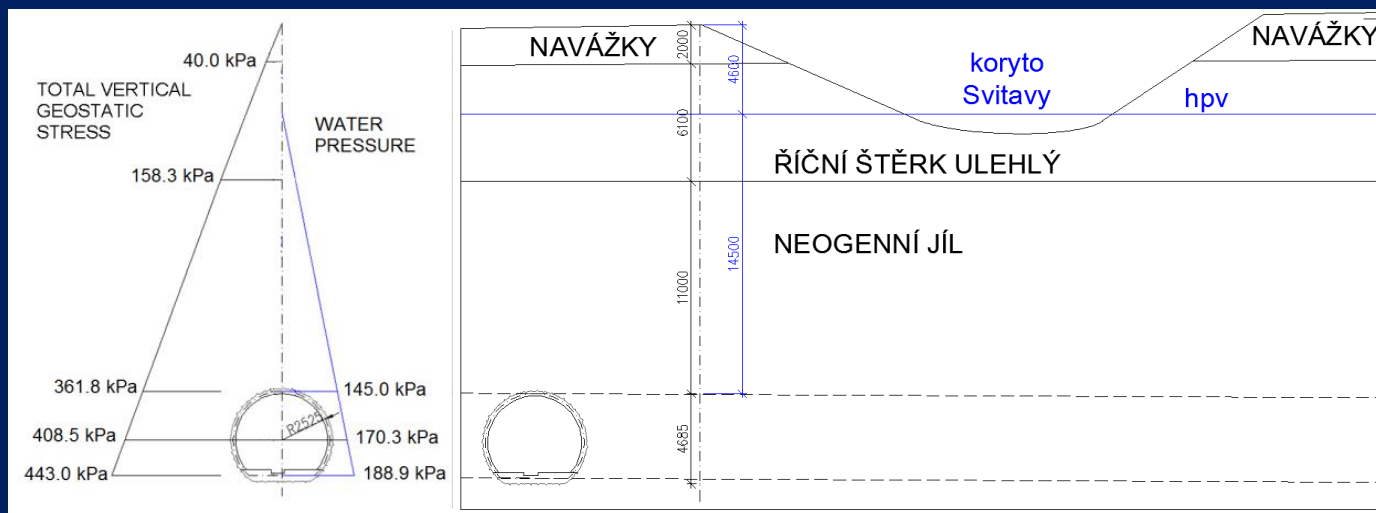


Omezující podmínky:

- další omezující podmínky zadané uživatelem
 - Stejné vyztužení (plochy vyztužení) $A_{s1,i}$, $A_{s2,i}$, vybraných konečných prvků - **vyztužné typy**
 - možnost zohlednit i kotevní délky těchto vyztužných typů v účelové funkci
 - Konstantní tloušťka celého ostění, nebo jen vybraných prvků



Poloha tunelu, zatížení a zatěžovací stavy



| Kombinace zatěžovacích stavů | CL1 ¹⁾ | CL2 ¹⁾ | CL3 ¹⁾ | CL4 ¹⁾ | CL5 ¹⁾ | CL6 ¹⁾ | CL13 | CL14 |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------|------|
| Vlastní tíha tunelového ostění | 1 | 1 | 1 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1 | 1,35 |
| Zemní tlak | 1 | 1 | 1 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 0 | 0 |
| Tlak vody | 0,8 | 1 | 1,27 | 0,8 | 1 | 1,27 | 1,27 | 1,27 |

¹⁾ pro koeficient zemního tlaku $K_0 = 0,593$, kombinace CL7 až CL12 pro $K_0 = 1,25$

Použité materiály a jejich ceny

➤ Stříkaný beton C25/30

standardní cena cca 10 000,- Kč/m³

minimální cena cca 7 000,- Kč/m³

Betonářská výztuž B500B

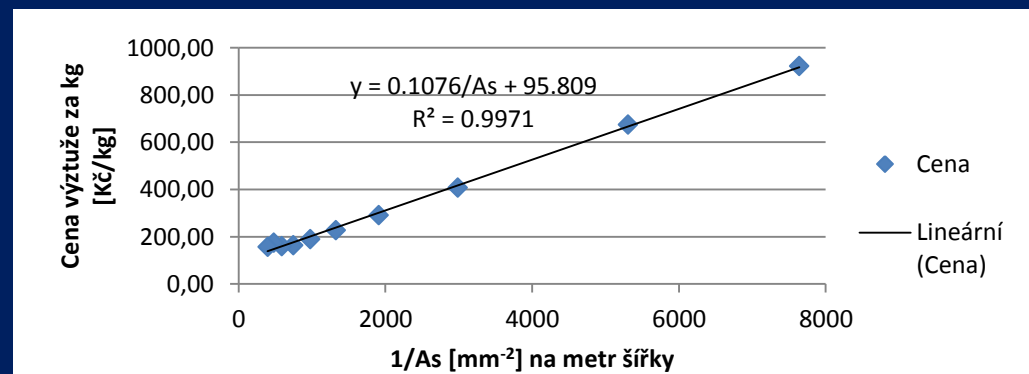
30,- Kč/kg výztuže

Kompozitní výztuž GFRP

- charakteristická hodnota pevnosti v tahu 609 MPa,
- střední hodnota modulu pružnosti 36 GPa,
- charakteristická hodnota mezního poměrného přetvoření 1,73%,
- objemová hmotnost 2100 kg/m³.

| Průměr [mm] | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|
| Cena [Kč/m] | 38 | 40 | 43 | 48 | 54 | 61 | 69 | 85 | 115 | 125 |

Aproximace ceny



Varianty s konstantní výztuží po obvode

Tloušťka ostění a plochy výztuží

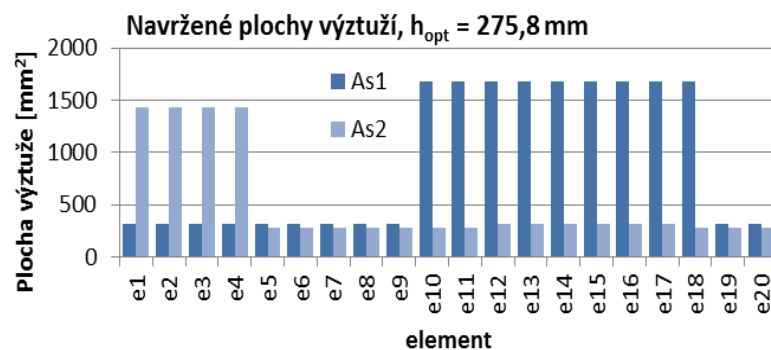
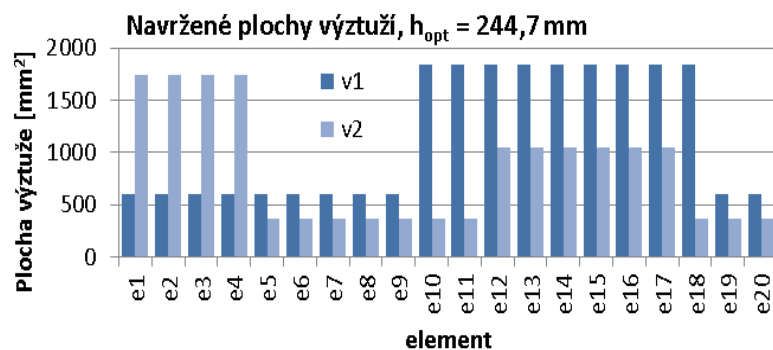
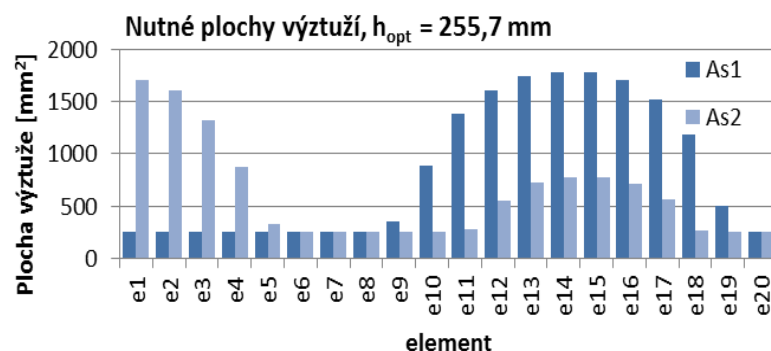
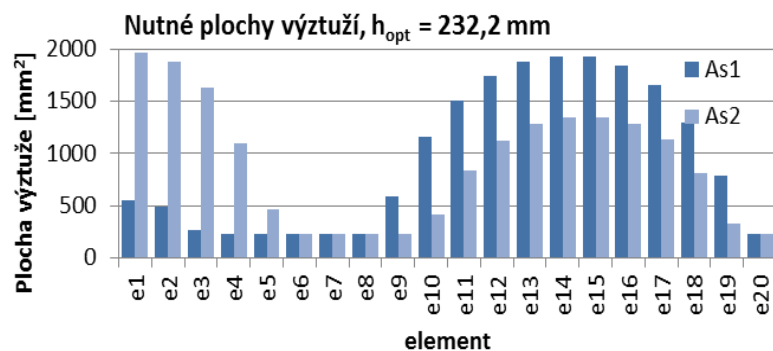
| Varianta řešení | 'Ocel_10' | 'Ocel_7' | 'GFRP_10' | 'GFRP_7' |
|-----------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
| Tloušťka ostění [mm] | 246 | 305 | 367 | 426 |
| A_{s1} [mm ²] | 1656 | 1084 | 1553 | 857 |
| A_{s2} [mm ²] | 1584 | 1111 | 1700 | 1234 |

Ceny

| Varianta řešení | 'Ocel_10' | 'Ocel_7' | 'GFRP_10' | 'GFRP_7' |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Cena za beton | 27 153 Kč | 23 538 Kč | 40 507 Kč | 32 890 Kč |
| Cena za výztuž | 16 831 Kč | 11 399 Kč | 25 154 Kč | 19 732 Kč |
| Cena celkem | 43 984 Kč | 34 938 Kč | 65 661 Kč | 52 623 Kč |

Poznámka: tloušťka ostění je konstantní

Varianty s více výztužnými typy - ocelová výztuž

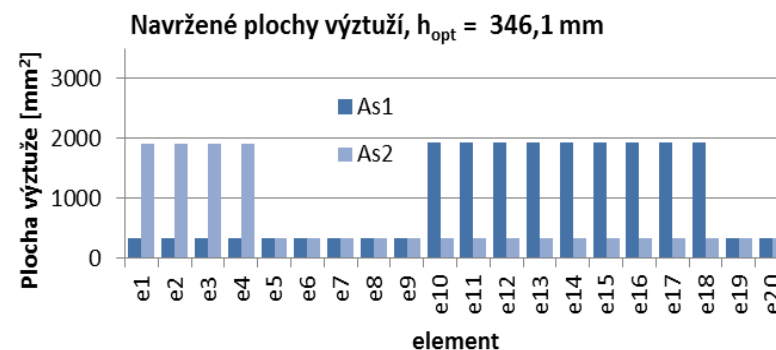
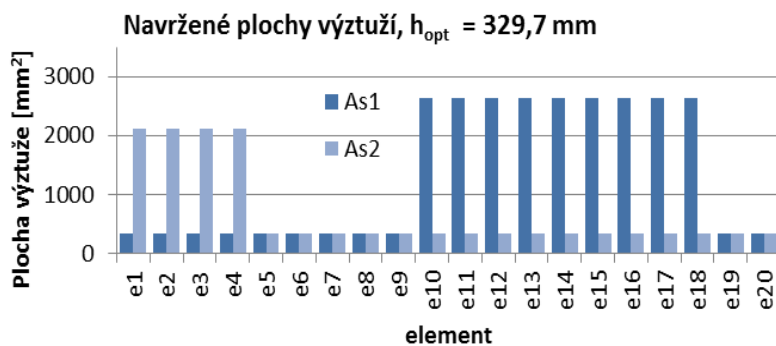
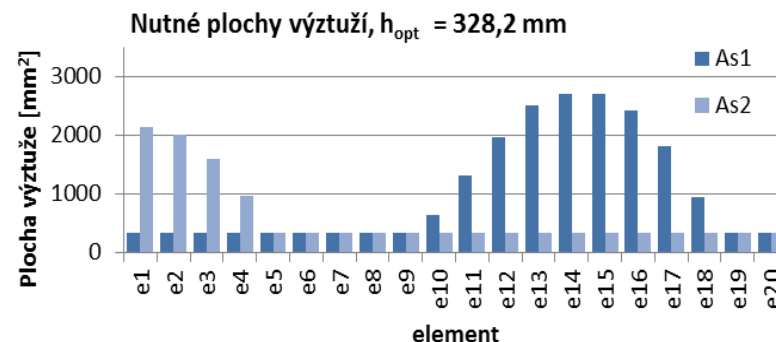
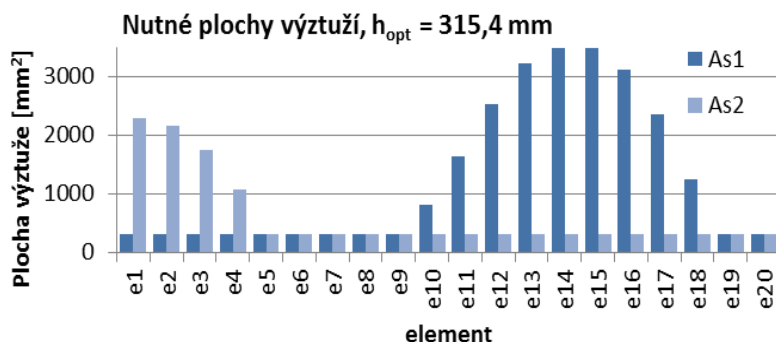


Varianta 'Ocel_10'

Varianta 'Ocel_7'

Poznámka: tloušťka ostění je konstantní

Varianty s více výztužnými typy - GFRP výztuž



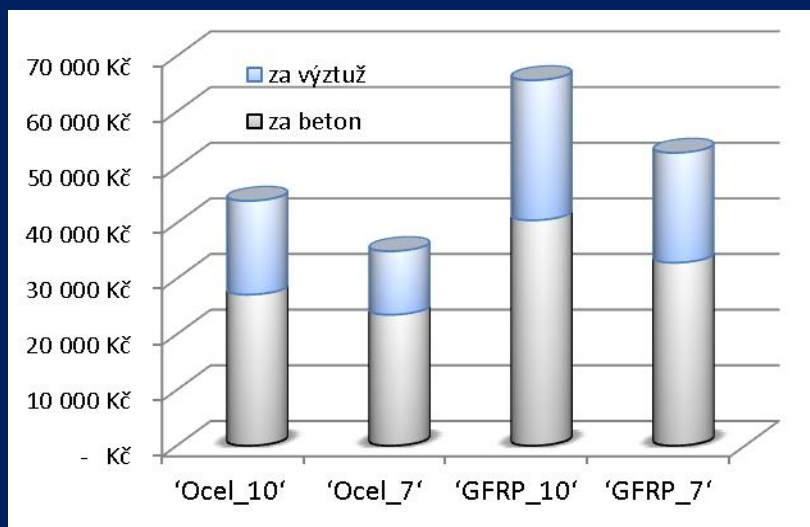
Varianta 'GFRP_10'

Varianta 'GFRP_7'

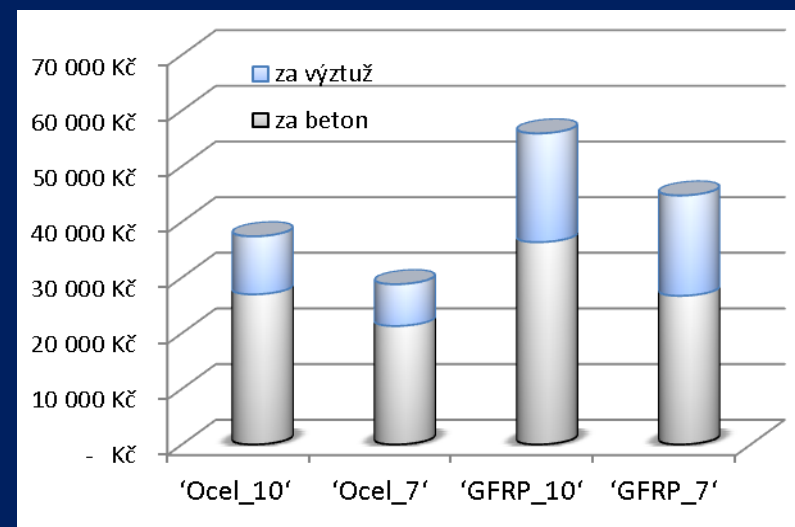
Poznámka: tloušťka ostění je konstantní

Porovnání cen

Varianty s konstantní výztuží po obvodě



Varianty s více výztužnými typy



Varianty způsobu vyztužení

GFRP výztuž



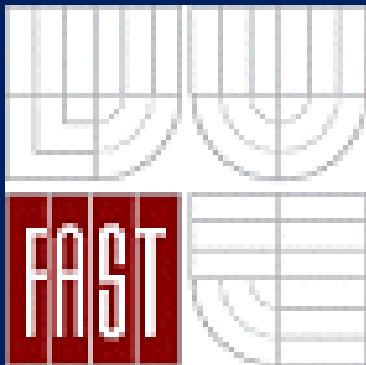
T A
Č R

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory TA ČR, projekt č. TA03030851 – „Sanace tunelů - technologie, materiály a metodické postupy“.

Kontakt



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta stavební
Veveří 331/95
602 00 Brno
Česká republika
email: zlamal.m@fce.vutbr.cz

Děkuji za pozornost