

Použitie neurónových sietí v rámci pokročilých konštitučných modelov zemín



**Slovenská
cestná spoločnosť**

**Cestná
konferencia**

2026

Ing. Filip Cigáň, PhD.
24. 03. 2026



ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE
Stavebná
fakulta

Geotechnika

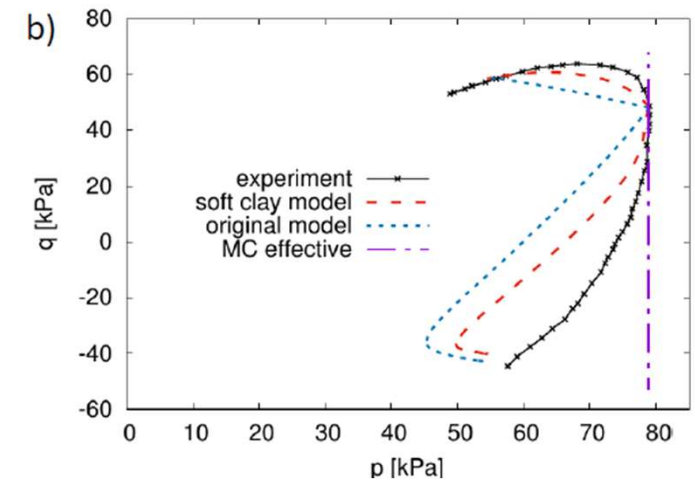
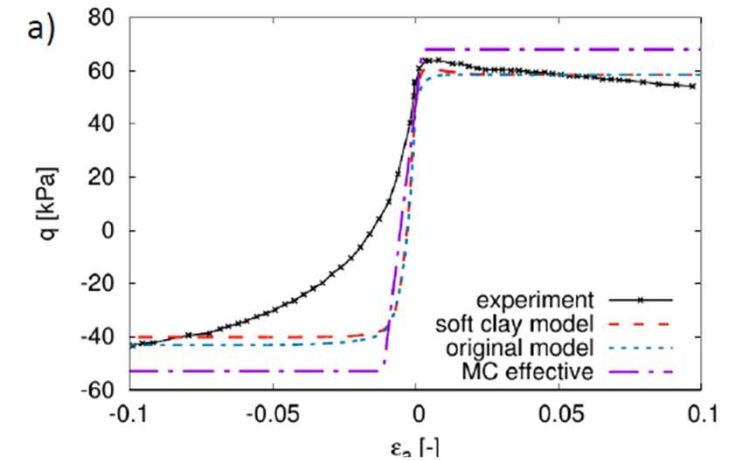
- Geotechnika pracuje s prírodným materiálom – zeminou/horninou
- Sadanie násypov na stlačiteľnom podloží
- Deformácie a stabilita zárezov
- Zemina - nehomogénna, anizotropná, nelineárna
- Iné odvetvia- drevo, betón a ocel
- IGP často nedostatočný (čas/rozpočet) → vysoká vstupná neistota
- Konzervativizmus alebo poddimenzovanie
- Potreba pokročilých konštitučných modelov



[Menard 2023]

Motivácia a problém

- Tradičné konštitučné modely (Mohr-Coulomb (**MC**), lineárne elastický, modifikovaný Cam-Clay (**MCC**), Hardening soil model)
- Často nedokážu verne vystihnúť reálne správanie zemín
- V kritických oblastiach deformácie odchýlky modelov až do 30 %
- Nedostatočné zohľadnenie nelinearity, anizotropie a histórie zaťaženia



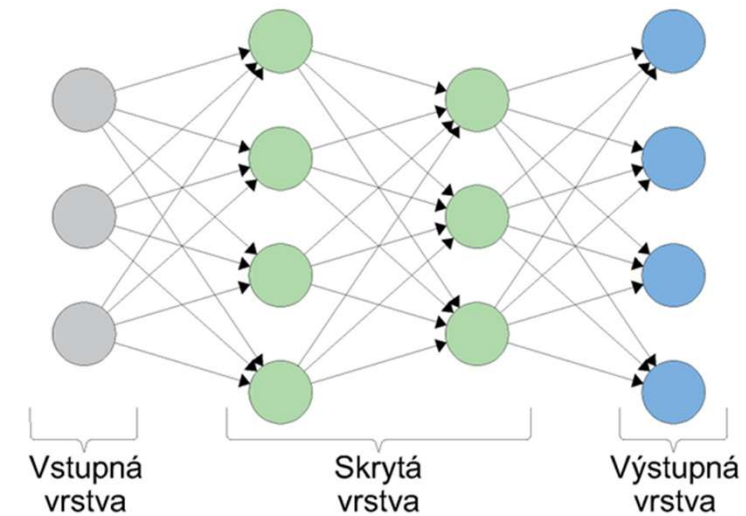
[Jerman & Mašín 2021]

Ciele práce

- Vyvinutie dátovo riadeného modelu na báze neurónovej siete (**NN**) namiesto analytických konštitučných modelov
- Trénovanie modelu na syntetických a reálnych experimentálnych dátach
- Integrácia NN modelu do numerického výpočtu pomocou metódy konečných prvkov (FEM)

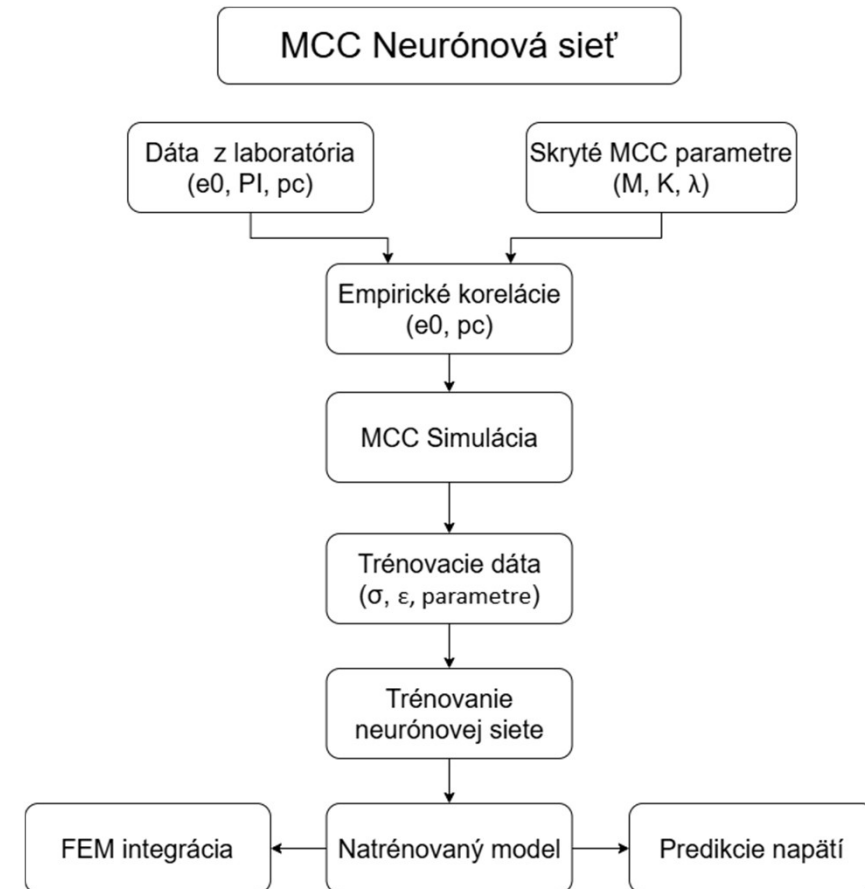
Architektúra neurónových sietí

- Navrhnutá s cieľom optimálne aproximovať nelineárnu závislosť
- Vstup 8 uzlov
- Skrytá časť 4 plne prepojené vrstvy (64, 128, 128, 64)
- Výstup 36 uzlov (určí správanie zeminy matica \mathbf{D})
- NN umožnila zachytiť nelineárne závislosti
- Zabezpečila dostatočnú kompresiu informácie a prevenciu pred preučeníím
- Normalizácia dát $[-1, 1]$
- Epochy 200, premiešavanie dát (každá epocha)
- Bayesianova optimalizácia



Navrhnuté modely z neurónových sietí

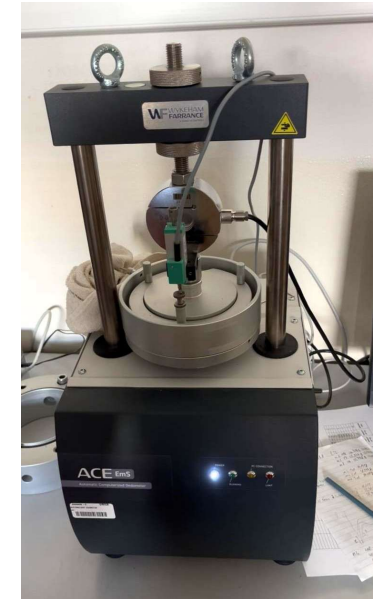
- Vyvinuté tri architektúry neurónových sietí :
 - **Minimálny model:**
 - 13 dimenzií, 3 vstupné parametre: $\sigma[9]$, $\Delta\varepsilon[3]$, $P_c[1]$
 - RMSE: 0.148 kPa
 - Vhodný len pre jeden typ zeminy
 - **Plný model:**
 - 19 dimenzií, 9 vstupov – kompletný súbor premenných MCC
 - $\sigma[9]$, $\Delta\varepsilon[3]$, $P_c[1]$, $e_0[1]$, $M[1]$, $\lambda[1]$, $\kappa[1]$, $N[1]$, $v[1]$
 - RMSE: 0.087 kPa
 - Zrýchlená alternatíva k modelu MCC
 - **Špecializovaný model:**
 - 15 dimenzií – 5 vstupných parametrov
 - $\sigma[9]$, $\Delta\varepsilon[3]$, $P_c[1]$, $PI[1]$, $e_0[1]$
 - Vhodný pre podobný druh zeminy



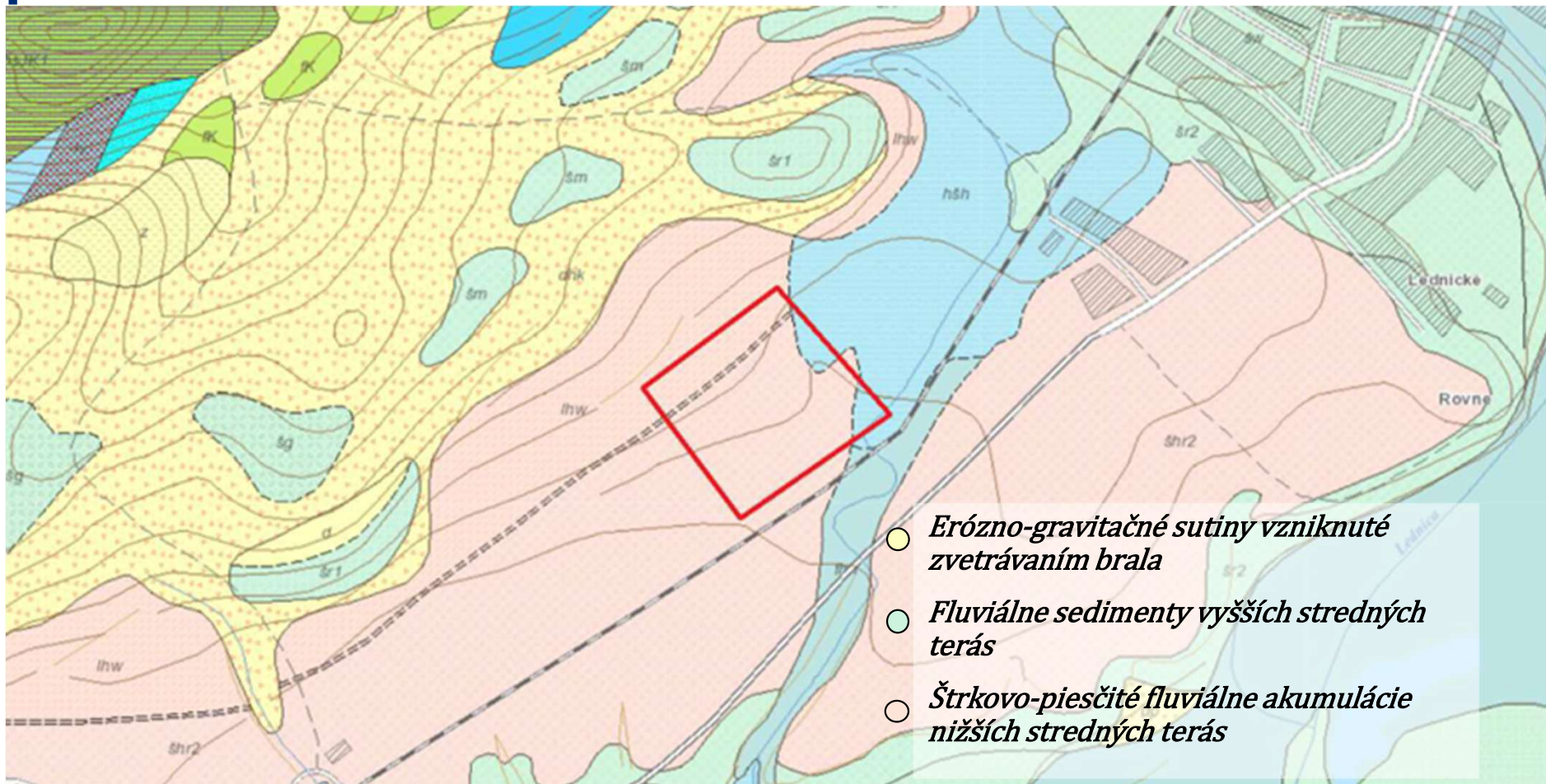
Experimentálna časť

- **Lokalita:** obec Horovce, vzorky odobraté z hĺbky 12-12,4 m
- **Typ zeminy:** ílovitá zemina F6 (Cl – íl so strednou plasticitou)
- Vzorky testované pomocou:
 - Triaxiálna skúška- ϕ' , c' , M
 - Oedometrická skúška- p_c , λ , κ , N , E_{OED}

Výsledné parametre zeminy			
ϕ' [°]	c' [kPa]	M [-]	λ [-]
24.4	22.2	1.13	0.141
<hr/>			
κ [-]	N [-]	P_c [kPa]	E_{OED} [MPa]
0.032	1.41	528.6	11.64

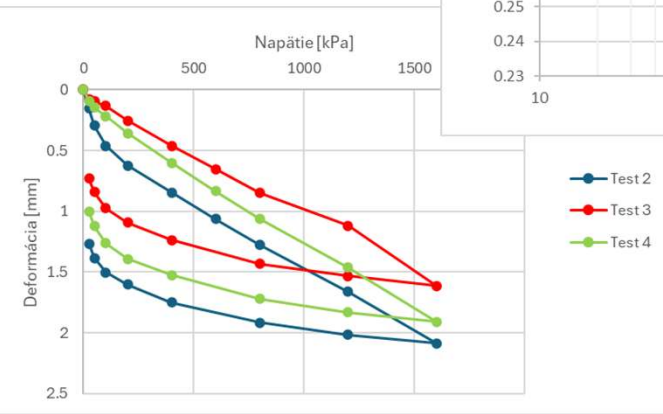
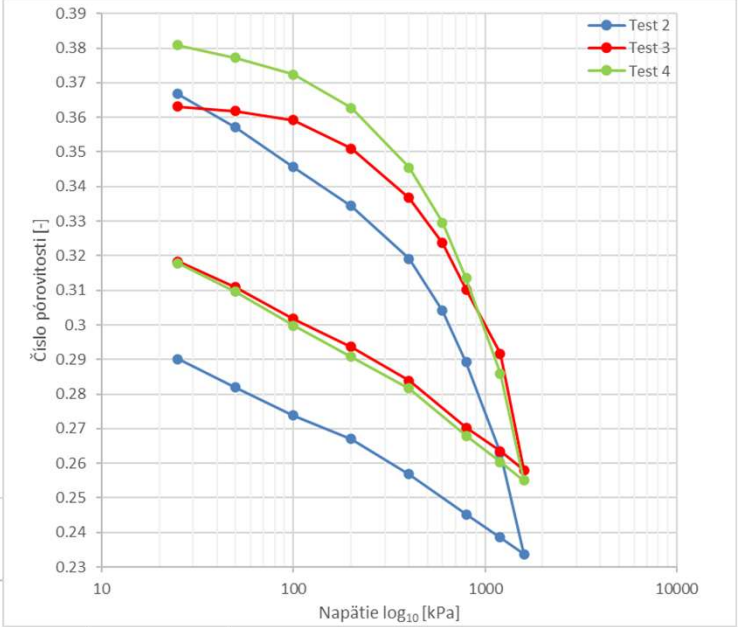


Experimentálna časť

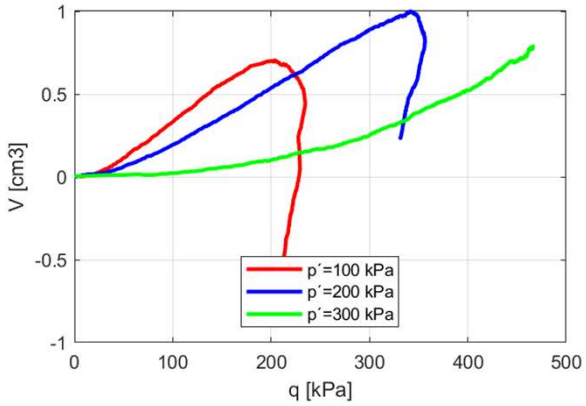
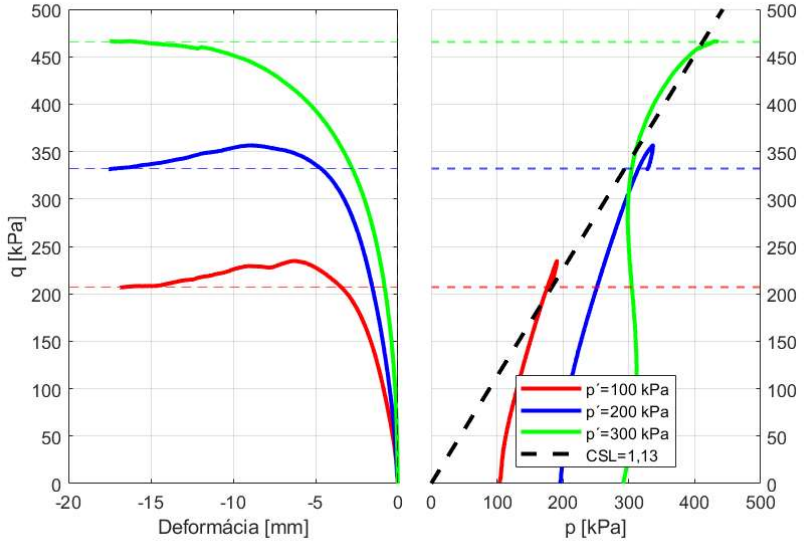


Experimentálna časť

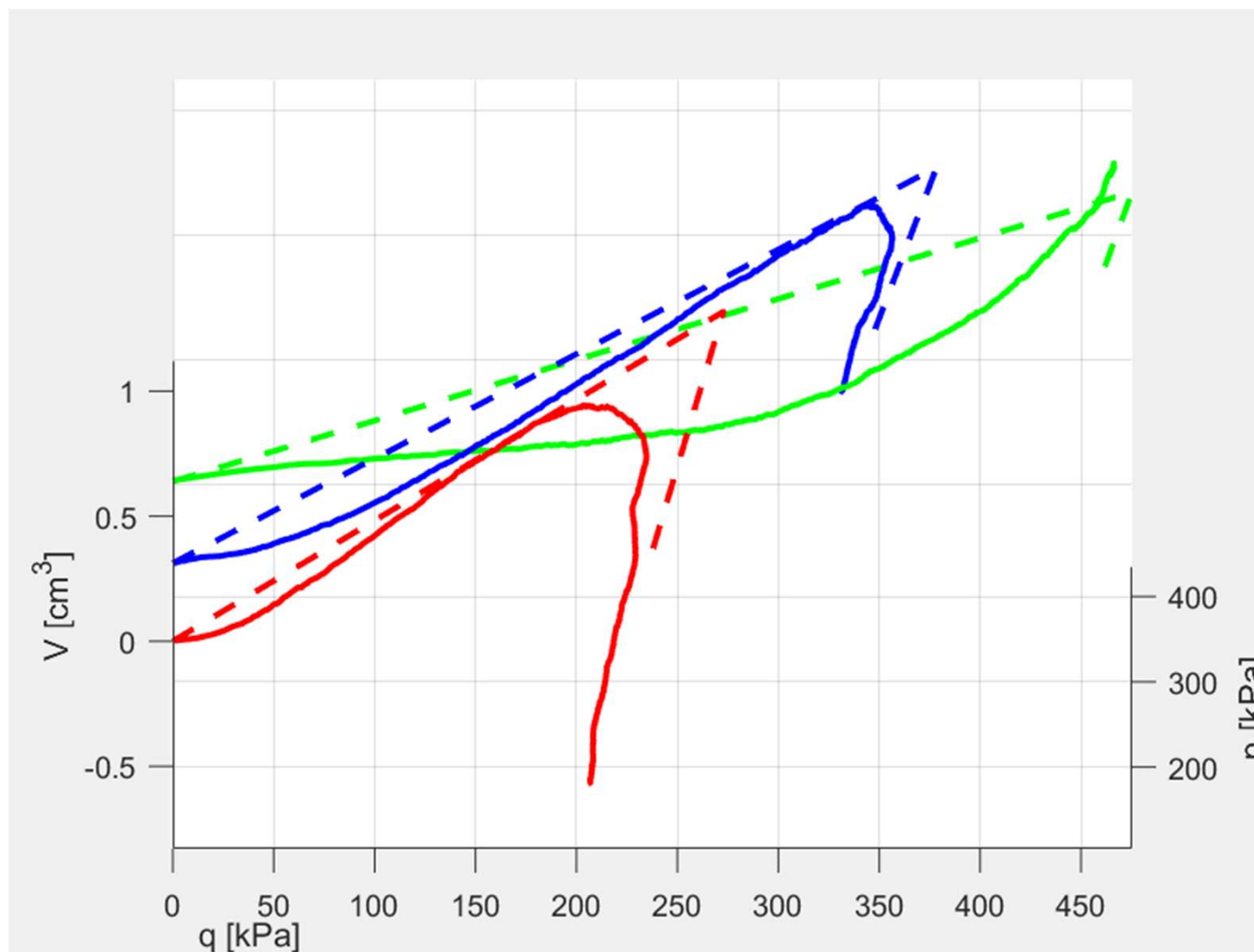
Oedometrická skúška



Triaxiálna skúška

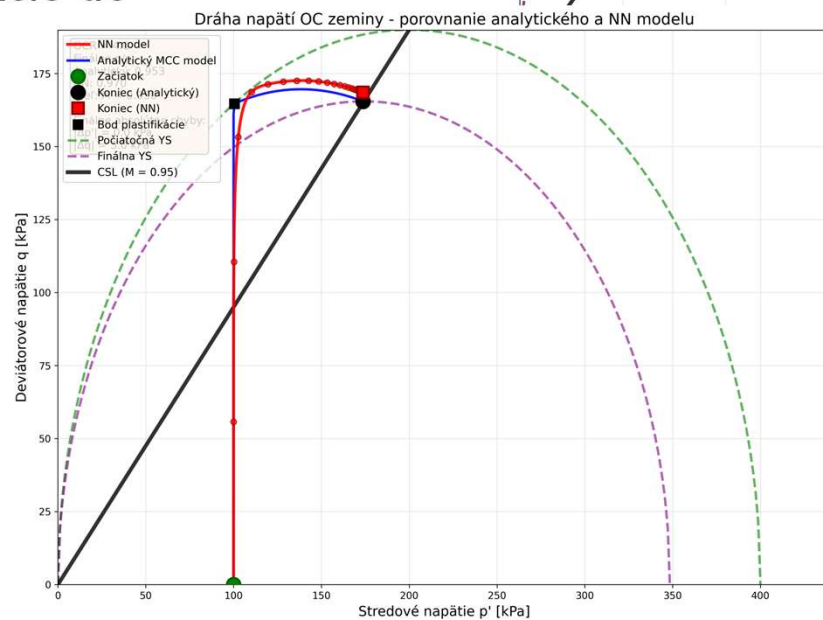
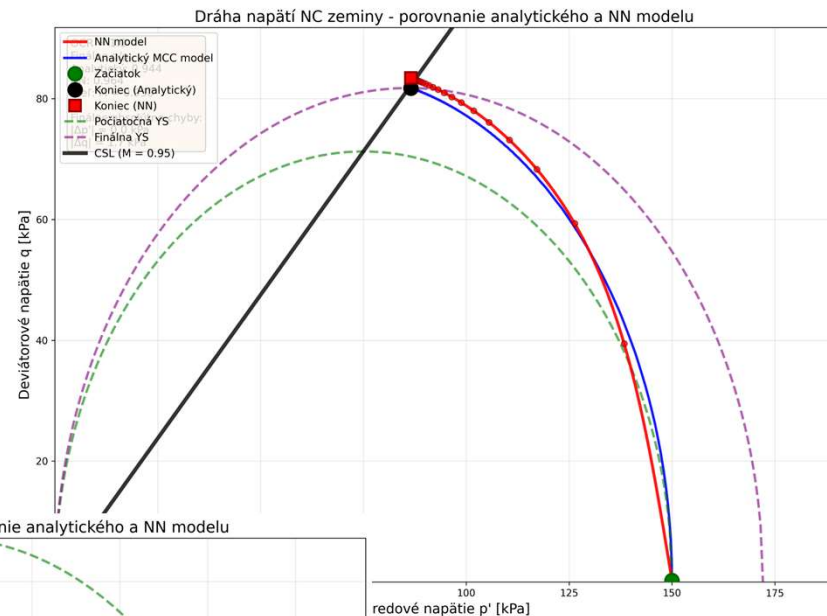


Triaxiálna skúška - MCC

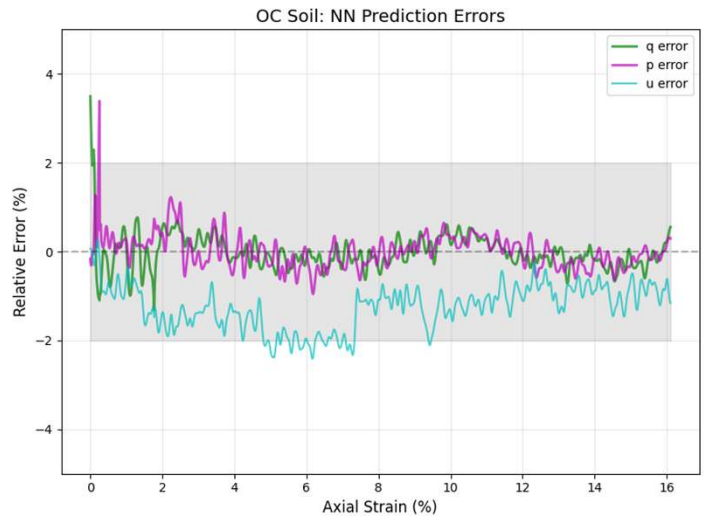
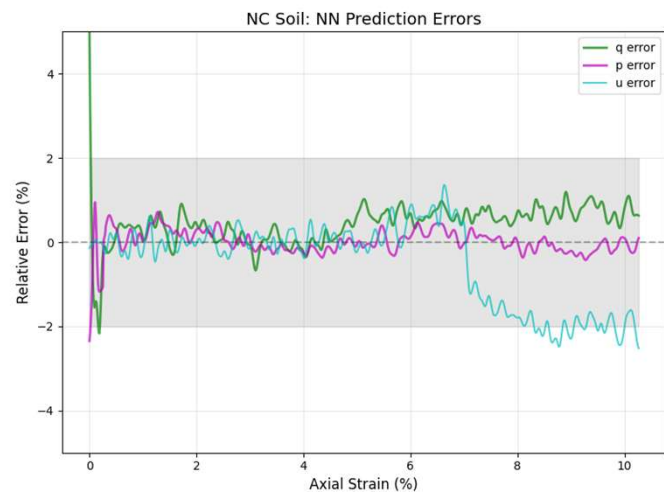
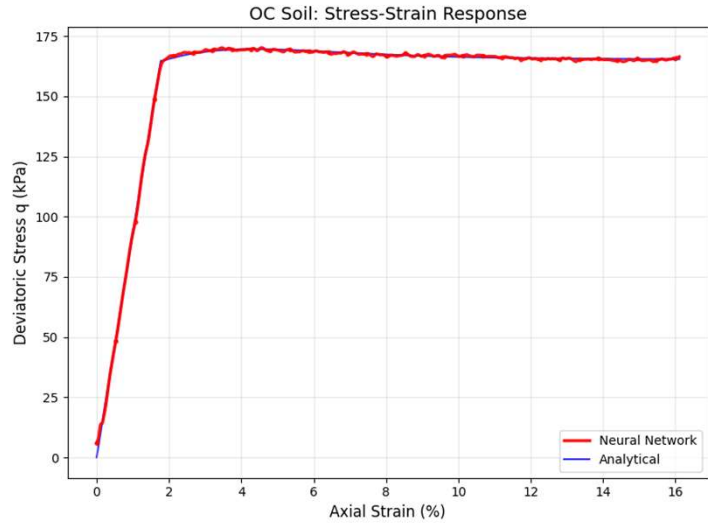
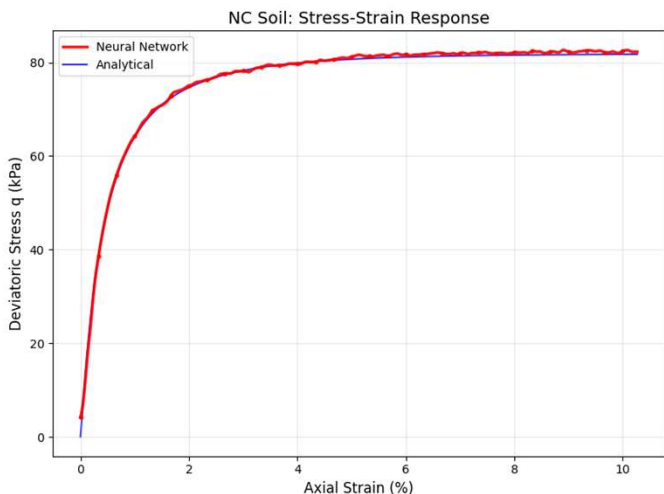


Výsledky – presnosť

- Neurónový model úspešne reprodukuje experimentálne správanie zeminy
- Správne zachytený prechod z kontrakcie do dilatancie pri vyšších deformáciách
- Koeficient determinácie $R^2=0.93$ pre špecializovaný model



Výsledky – presnosť



FEM integrácia

- Implementácia modelu do FEM prostredia pomocou constant stiffness prístupu
- Použitie modelu v kóde zaberá len 3 riadky – vhodné aj pre externé FEM riešiče
- Kompatibilita s populárnymi softvérmi: Plaxis, Abaqus, Ansys
- Pripravený modul triedy MCCNeuralNetworkFEM umožňuje rýchle nasadenie v inžinierskej praxi

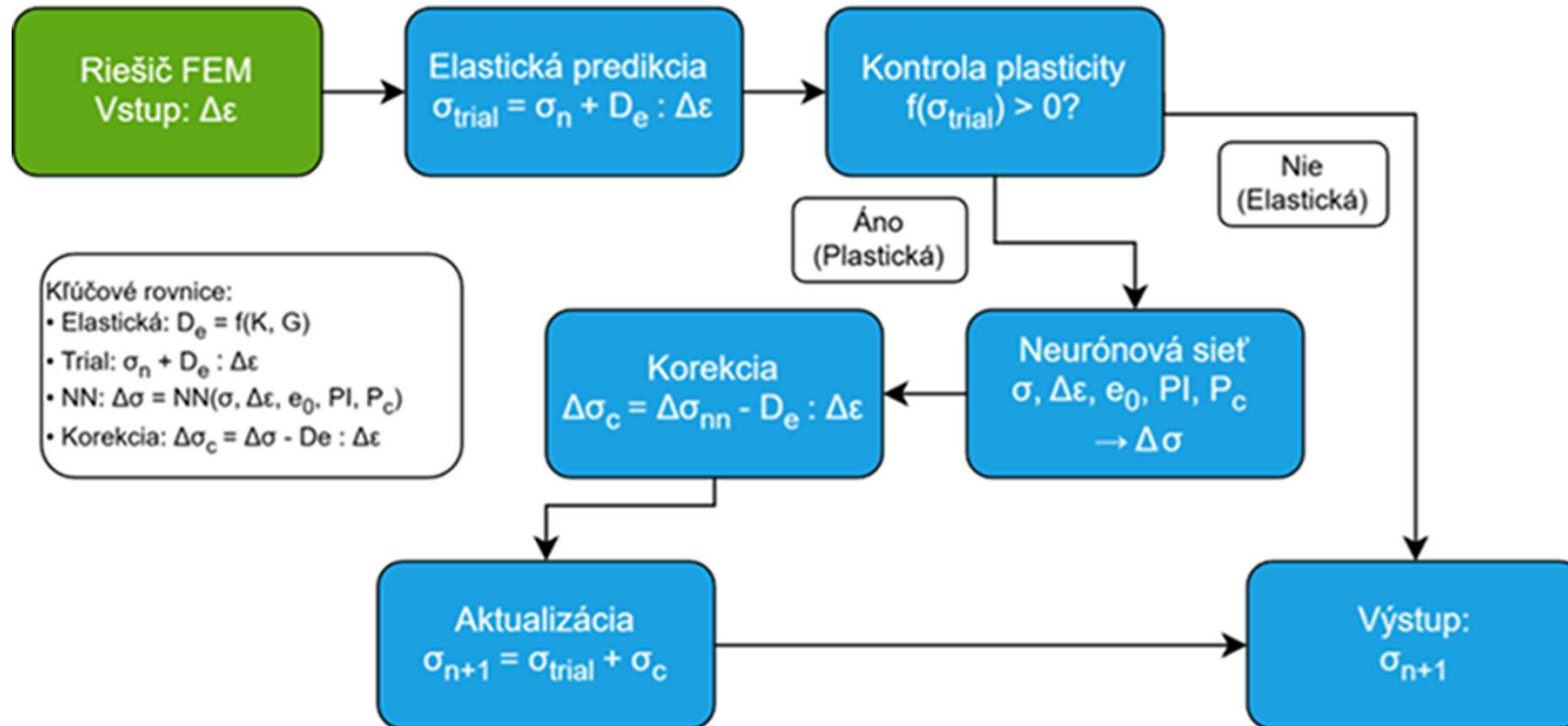
```
# Základné použitie
model = NeuralConstitutiveModel.load('model.pth')
material = Material(e0=0.8, PI=30, pc=200)

# Integrácia napätia
new_stress = model.integrate(
    current_stress=stress,
    current_strain=strain,
    strain_increment=delta_strain,
    material=material
)

# Získanie tangenciálnej matice
tangent = model.get_tangent_matrix(
    stress=new_stress,
    strain=strain + delta_strain,
    material=material
)

# empiricke vzťahy:
Empirické vzťahy využívajúce index plasticity (IP):
1. Sklon kritickéj čiary (M):
M = 0.8 + 0.4 * IP^0.7
Tento vzťah bol validovaný na databáze slovenských zemín s R2 = 0.89.
2. Kompresný index (λ):
λ = 0.009 * (IP - 10) pre IP > 10
λ = 0.014 * IP^0.85 alternatívny vzťah
3. Index opätovného stlačenia (κ):
κ = λ / (5 až 10)
κ ≈ 0.2 * λ typicky pre íly
4. Poissonovo číslo (ν):
ν = 0.1 + 0.3 * IP / (IP + 60)
Empirické vzťahy pre číslo pórovitosti (e0):
1. Vzťah s vlhkosťou pri medzách konzistencie:
e0 = 0.85 * wL * Gs / 100 pre normálne konsolidované íly
e0 = 1.2 * wP * Gs / 100 pre prekonsolidované íly
kde wL je medza tekutosti, wP je medza plasticity, Gs je merná hmotnosť.
2. Vzťah s indexom plasticity:
e0 = 0.5 + 0.015 * IP pre íly s nízkou až strednou plasticitou
e0 = 0.3 + 0.025 * IP pre íly s vysokou plasticitou
3. Pre parameter N (intercept špecifického objemu):
N = (1 + e0) * exp(λ * ln(1))
N = 1 + e0 zjednodušené
Ďalšie relevantné korelácie:
Prekonsolidačný tlak (pc):
OCR = (σ'p / σ'v0) = 1.11 - 1.62 * IL
kde IL je index konzistencie = (wL - w) / IP
Uhol vnútorného trenia pre reziduálny stav:
φ'r = 40 - 0.35 * IP pre IP < 50
Tieto empirické vzťahy umožňujú redukovať počet potrebných laboratórnych skúšok, pretože z troch základných parametrov (e0, IP, pc) možno odvodiť všetkých sedem parametrov potrebných pre MCC model.
```

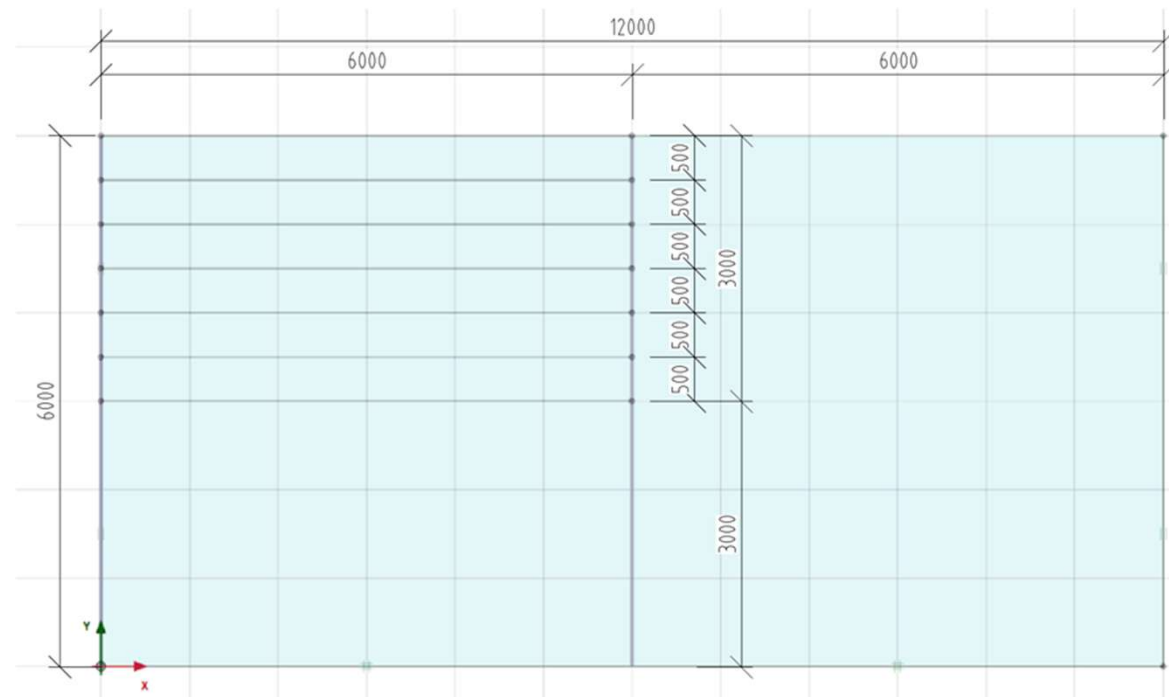
Integrácie metódy FEM s prístupom konštantnej tuhosti



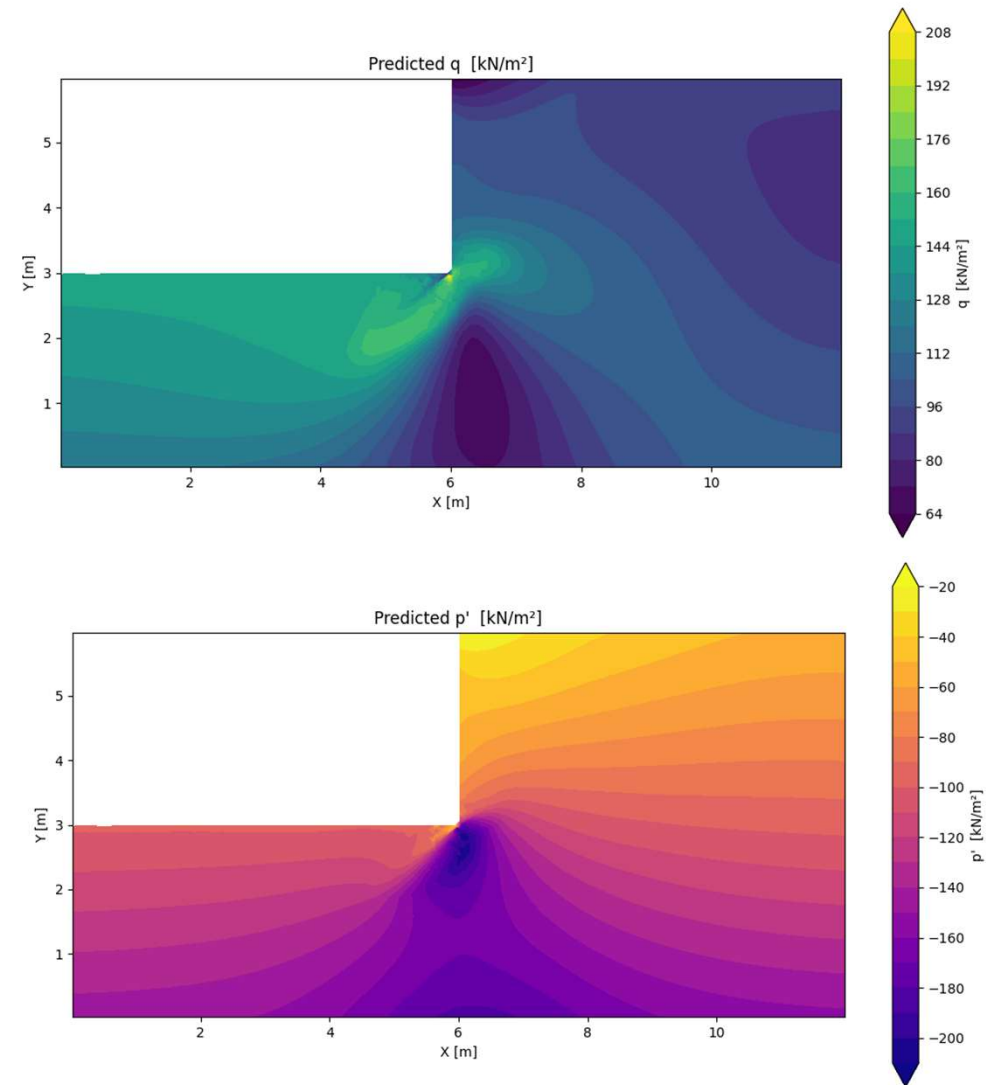
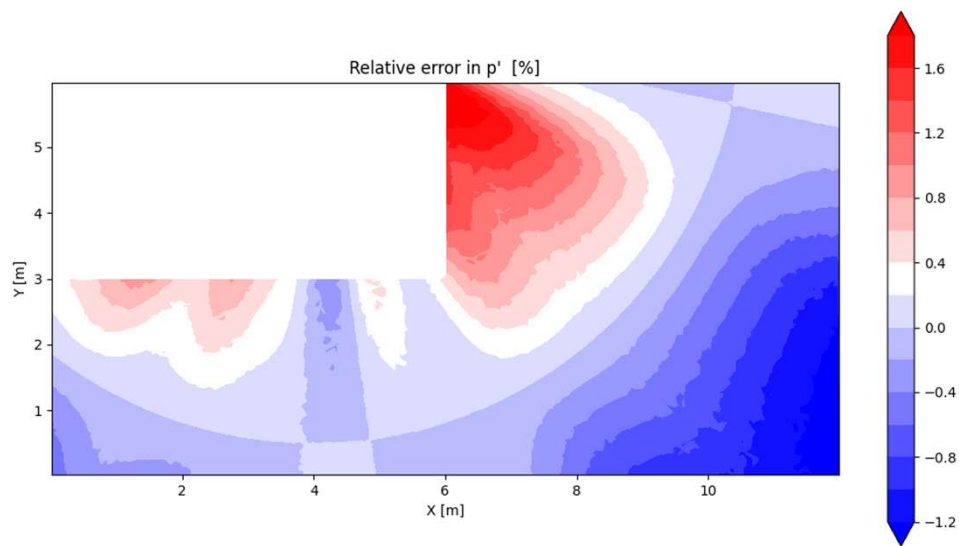
Praktický príklad

- Simulácia výkopu s hĺbkou 3 m
- Porovnanie výsledkov pre **MCC**, **MC** a **NN** model
- FEM model - Plaxis

Výsledné parametre zeminy			
ϕ' [°]	c' [kPa]	M [-]	λ [-]
24.4	22.2	1.13	0.141
κ [-]	N [-]	P_c [kPa]	E_{OED} [MPa]
0.032	1.41	528.6	11.64

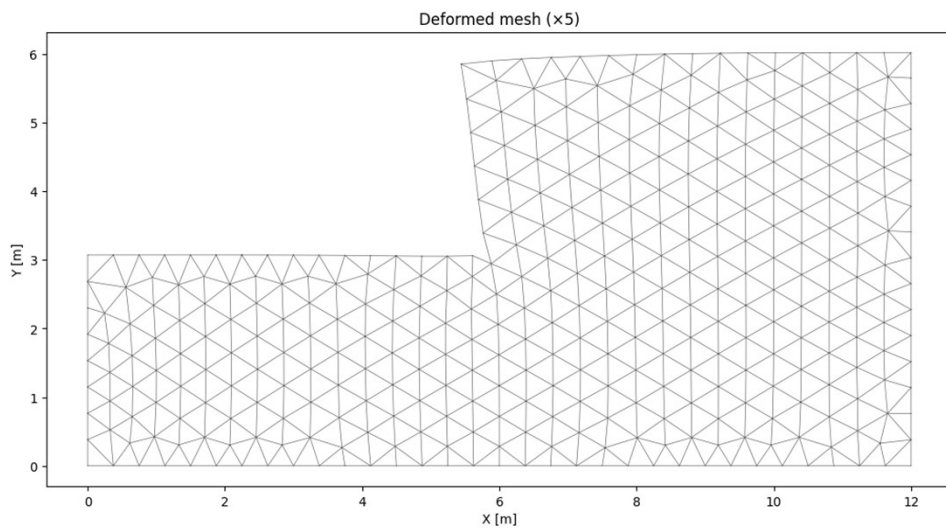


Praktický príklad



Praktický príklad

FEM Model na základe NN



Maximálne deformácie:

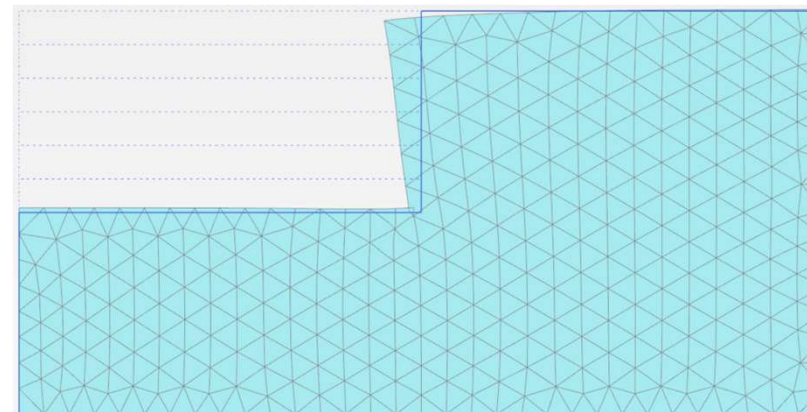
NN - 10,56 cm

MCC - 11,39 cm

MC - 1,99 cm

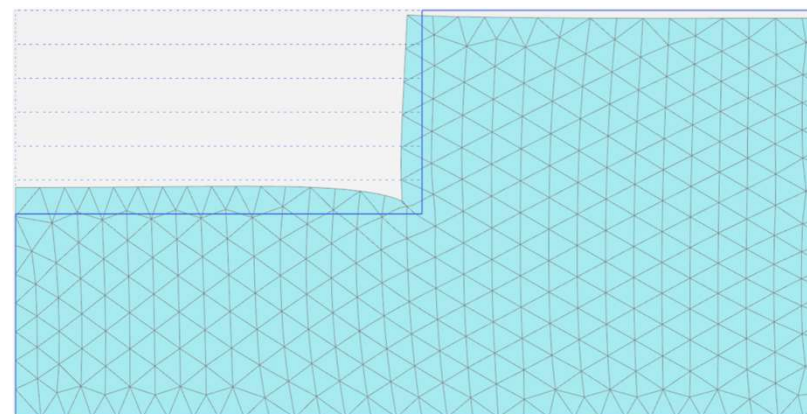
FEM Model MCC

Deformácie x5



FEM Model MC

Deformácie x50



Prínosy a perspektívy

Vedecké prínosy:

- Vyvinutá nová metodológia aplikácie neurónových sietí v geotechnike
- Využitelnosť metodológie je interdisciplinárna
- Robustná integrácia do FEM riešičov bez potreby zložitých úprav

Perspektívy a ďalší výskum:

- Vývoj fyzikálne informovaných neurónových sietí (PINN)
- Tvorba regionálnych modelov adaptovaných na lokálne podmienky
- Použitie transfer learningu v procese tvorby modelov

Praktické prínosy:

- Rýchlejšia kalibrácia oproti manuálnym prístupom
- Rýchlejší výpočet v porovnaní s MCC modelom
- Možné **redukovanie** vstupných parametrov

Záver

Pri cestných stavbách býva rozhodujúca nie len únosnosť zemín, ale aj deformácia. Ak chceme lepšie odhadnúť sadania a posuny, potrebujeme modely, ktoré vedia zachytiť viac než klasický Mohr-Coulomb.

Neurónová sieť sa v tejto práci ukázala ako použiteľný most medzi pokročilou teóriou a praktickým FEM výpočtom.

- Minimálne 10 000 triaxiálnych skúšok na čistý NN model, 1 druhu zeminy
10 000 skúšok \approx 140 000 dní / \approx 383 rokov
 \approx 3 500 000€ +
- IGP často nedostatočný (čas/rozpočet) \rightarrow vysoká vstupná neistota

Ďakujem za pozornosť