PODKLADNÍ VRSTVY VOZOVEK
A ZEMNÍ TĚLESO

TYPICKÉ PROBLÉMY PROJEKTOVÁNÍ A VÝSTAVBY PŘECHODOVÝCH OBLASTÍ MOSTŮ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

RNDr. Mgr. Ivan Poul, Ph.D. – Projekce iGEO s.r.o.; VŠB-TU Ostrava, Fakulta stavební

Projekce iGEO s.r.o.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | FAKULTA STAVEBNÍ | KATEDRA GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

SDRUŽENÍ PRO VÝSTAVBU SILNIC

Proč vznikají nerovnosti v přechodové oblasti

- Tuhý most na pilotách sedá málo, násyp na jemnozrnném podloží sedá desítky centimetrů
- Podloží konsoliduje ještě roky po uvedení do provozu (např. estakáda na D1 u Fulneku)
- Most, násyp a přechodová oblast se často navrhují odděleně, bez vzájemné interakce
- Spolehlivost návrhu určuje kvalita geologického a geotechnického modelu

Cíl příspěvku

Realisticky předpovědět velikost a časový průběh sedání a porovnat opatření pro snížení rozdílu most–násyp.

1,7–2,0 cm
sedání mostu na pilotách

9–31 cm
sedání podloží 5 m násypu

75 %
sedání do předání (ČSN 73 6133)

Přechodová oblast neintegrovaného mostu (TP 261)

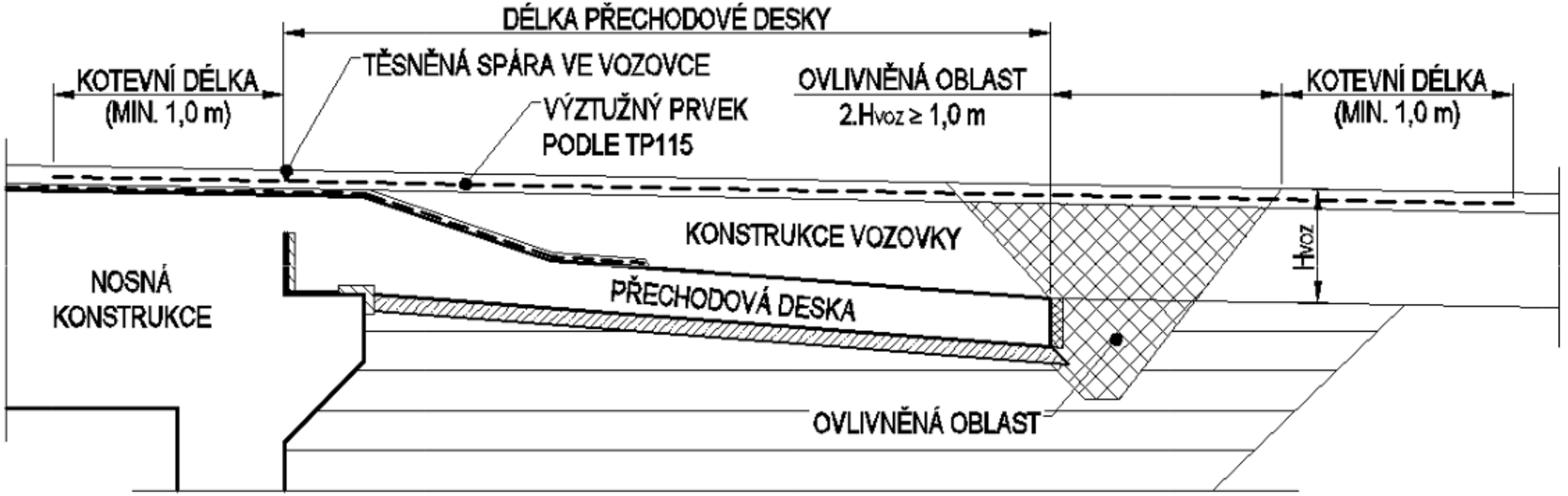


Schéma přechodové oblasti neintegrovaného mostu (převzato z TP 261), vhodné pro očekáváné větší nerovnoměrné sedání

ČSN 73 6244 požaduje $\Delta s \leq 20$ mm/3 roky pro dálnici, R a I. tř.
$\Delta s \leq 40$ mm/3 roky pro ostatní

Lokalita a geologická stavba

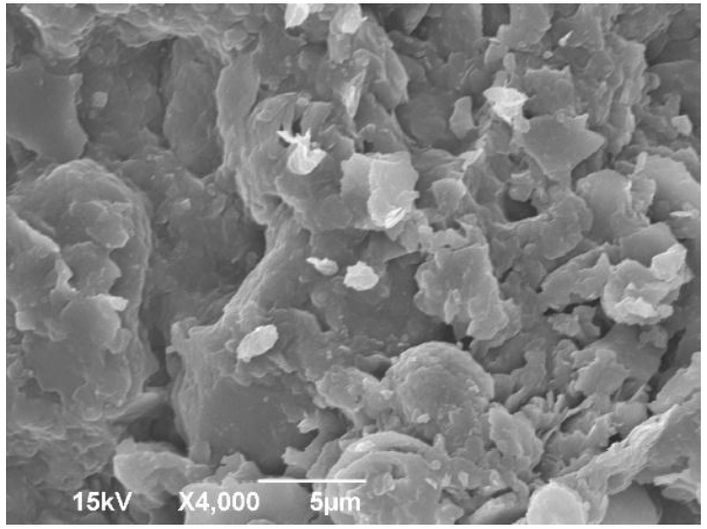
- **Brno, Černovická terasa** – most přes dálnici D1, násyp výšky 5 m, dvoupruhová komunikace
- **GT1** spraš / prach s příměsí písku, 0,3–0,8 m
- **GT2** fluviální písky a štěrky do 5,5–6 m
- **GT3** neogenní jíl F8 CH (baden) >20 m s proplástky jemnozrnného písku
- HPV 1,5–2,5 m p. t., voda slabě agresivní XA1 (sírany)
- V CPTu3 chybí štěrková terasa – interpretován zlom, tj.
- **3 odlišná výpočtová geologická prostředí**



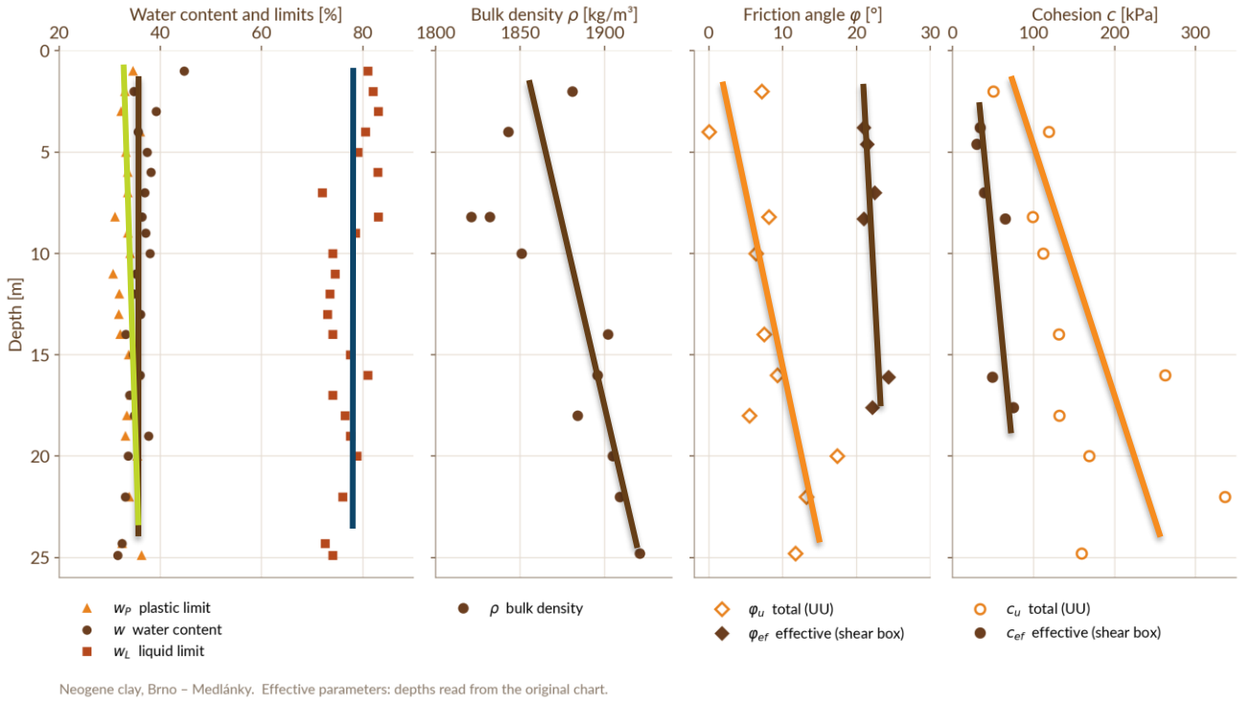
Realizace CPTu– Projekce iGEO s.r.o.

Neogenní jíl – proč je problematický

Složení: 65 % illit/smektit, 17 % illit, 12 % kaolinit; Sr = 1,0; OCR ≈ 3–10. **Vlastnosti:** φef = 20°, cef = 10–30 kPa, γ = 18,5–19,0 kN/m³, Eoed = 9–20 MPa



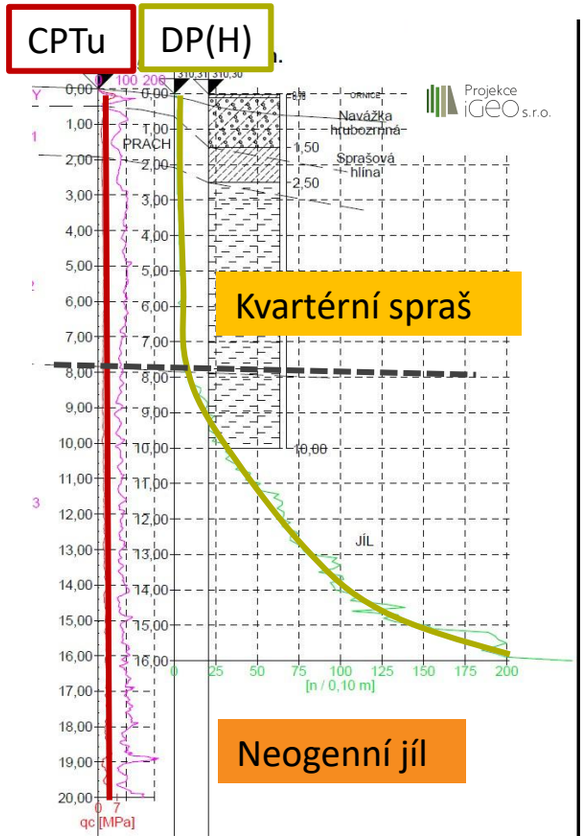
Struktura NG jílu v SEM (Poul a Koubová, 2008)



Vlastnosti jílu s hloubkou (Brno-Medlánky)

Nad oxidačně-redukční hranicí (10–15 m): oxidace pyritu → sírany, sádrovec, jarosit; pokles pevnosti a riziko síranové koroze betonu

Případ: Brno (Tišnov) – stejný jíl, dvě metody, dvě odpovědi



3,8 MPa

Edef z qc CPTu – neogenní jíl, **16 m**

×48

182 MPa

Edef z neopravené DP – stejný jíl, stejná hloubka

15–50×

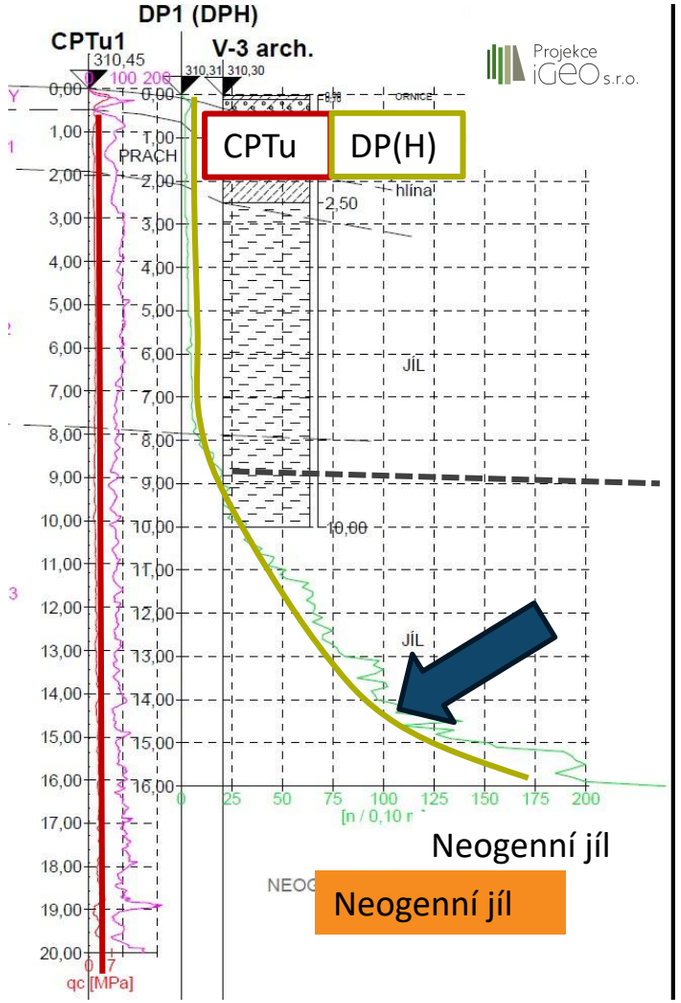
Edef nadhodnocen v **neopravených interpretacích DP**

CPTu: qc s hloubkou téměř konstantní

DP: N10 roste nelineárně – tření soutyčí, ne pevnost – **fatální CHYBA v interpretaci**

Nadhodnocený modul → podhodnocené sedání → nerovnoměrné sedání u opěry mostu

Případ: Brno – stejný jíl, tři zkoušky, jedna odpověď



Příklad: HLOUBKA 9,3 m

CPTu $E_{oed} = a_e \cdot (q_t \cdot 1000 - \sigma_{v0}) \cdot 0.001$ →8,2 MPa

qc = 1,8 MPa, fs = 0,065 MPa

(upraveno podle Robertson & Cabal 2024)

DP $E_{def} = q_{dyn,k} \cdot k_{corr}$ k_{corr} = 0,5 – 1,5 →3,1 MPa

N10=24 | 6,3 MPa | 0,5 MPa

(I. Poul, nepublikováno)

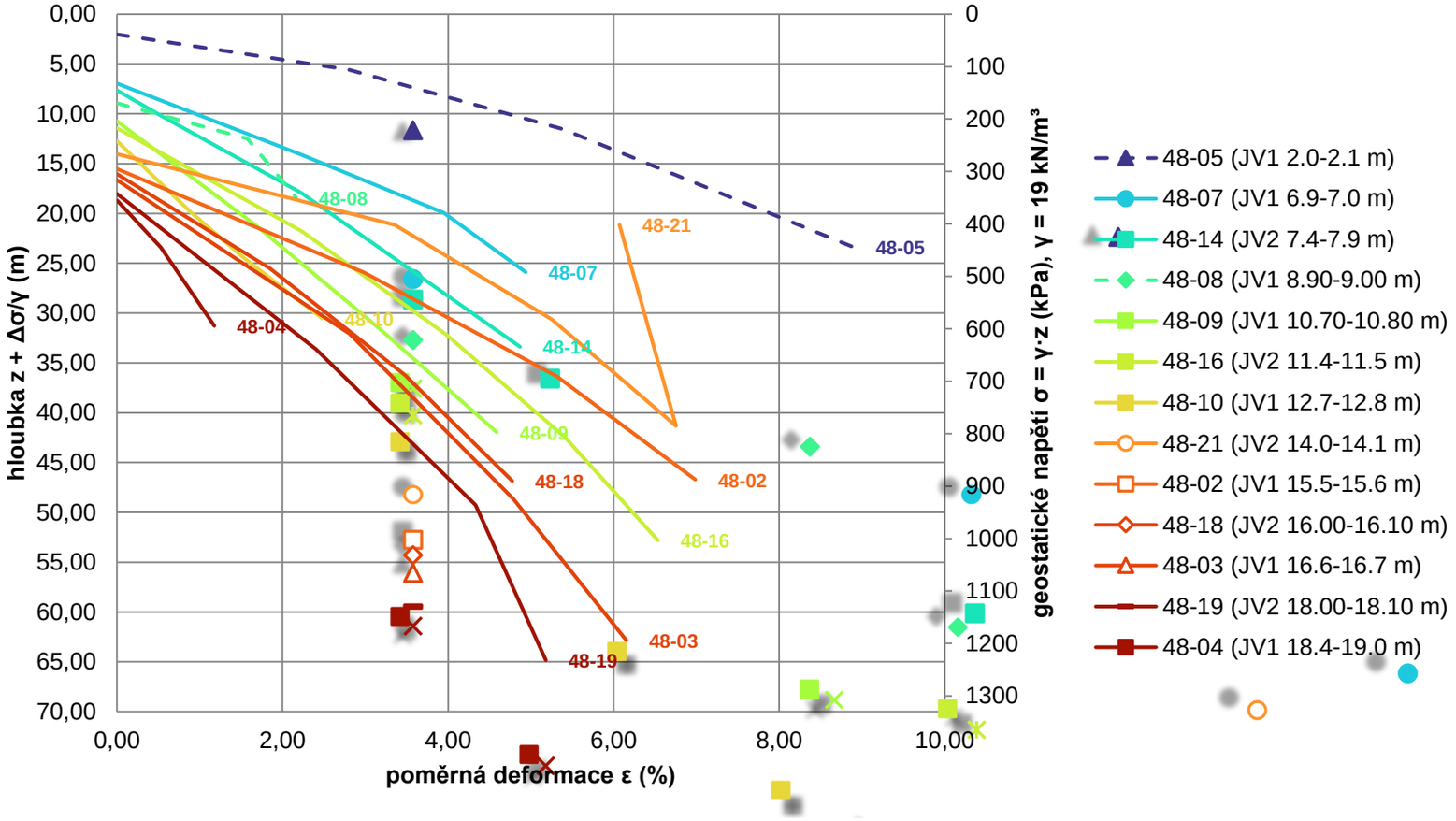
LAB $E_{oed\ (0,15–0,3\ MPa)} = 8,05\ MPa$

$$E_{oed} = \frac{E_{def}}{\beta} \qquad \beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \qquad \nu = \frac{1-\sin\varphi_{ef}}{2-\sin\varphi_{ef}}$$ →0,38

(odvozeno Jákym 1944/1948)

Vlastnost odvozená z penetrační zkoušky v konkrétní hloubce se kalibruje podle výsledků oedometru, vrtulkové zkoušky a krabicového smyku. Všechny ostatní hodnoty ve stejné vrstvě se pak násobí stejným kalibračním součinitelem.

Oedometrické zkoušky – zatěžovací křivky vzorků z JV1 a JV2 (B-ČT)



- 13 vzorků z vrtů JV1 a JV2, hloubka 2–19 m
- Zatěžování po 24 h pod vodou, rekonsolidace na napětí z hloubky odběru
- S hloubkou odběru (pohřbení) roste Eoed, a to nelineárně i při vyšších napětích
- Hlubší vzorky (16–19 m): Eoed ≈ 20–35 MPa, mělčí ≈ 10 MPa
- Anomální vzorky 48-21 a 48-02 – nižší Eoed než trend

Hydraulická vodivost jílu – podle metody se liší o řády

Metoda stanovení	k [m/s]	Důsledek pro výpočet
Oedometr, klesající hladina (8 m kapilára)	$1 \cdot 10^{-11} – 2 \cdot 10^{-11}$	referenční hodnota; kx ≈ 2× ky
Triaxiální přístroj	$6 \cdot 10^{-11} – 2 \cdot 10^{-10}$	řádově shodné s oedometrem
Odhad z křivky zrnitosti	$\approx 10^{-8}$	o 3–4 řády vyšší → falešně rychlá konsolidace
Interpretace křivek CPTu (obecné korelace)	nespolehlivé	bez kalibrace nepoužitelné

Až 1000× rozdíl v k znamená rozdíl mezi konsolidací za měsíce a za desítky let.

CPTu v geologicky složitém prostředí

Přednosti

spojitý profil, pórový tlak, bez tření soutyčí; ϕef (hrubozrnné), cu (jemnozrnné), Edef, γ, zatřídění podle EN ISO 14688

Omezení

korelace (Robertson & Cabal 2024) odvozené na mladých klastických sedimentech

špatně sedí na překonsolidované neogenní jíly, zvětralé horniny, ±reziduální zeminy

k z interpretace se liší o řády od zkoušky propustnosti v oedometru a triaxiálu

riziko ulomení hrotu ve zvětralé hornině a valounech

Bez geologického kontextu se pouze nahradí subjektivita popisu subjektivitou interpretace.



S J. Greggem a P. Robertsonem – i osvědčená metodika CPTu potřebuje místní kalibraci

EN 1997-2 příloha D · EN 1997-2 ed. 2 příloha 2E

Provedený průzkum

2 × 20 m
jádrové vrty, TKO 1A, vrtulka

3 × CPTu
50,5 bm, záznam po 1 cm

2 × DPH
16 m s měřením torzního momentu

13
oedometrických zkoušek



Statická penetrace
PAGANI TG 63-150 kN



Vrtná souprava BRT 150



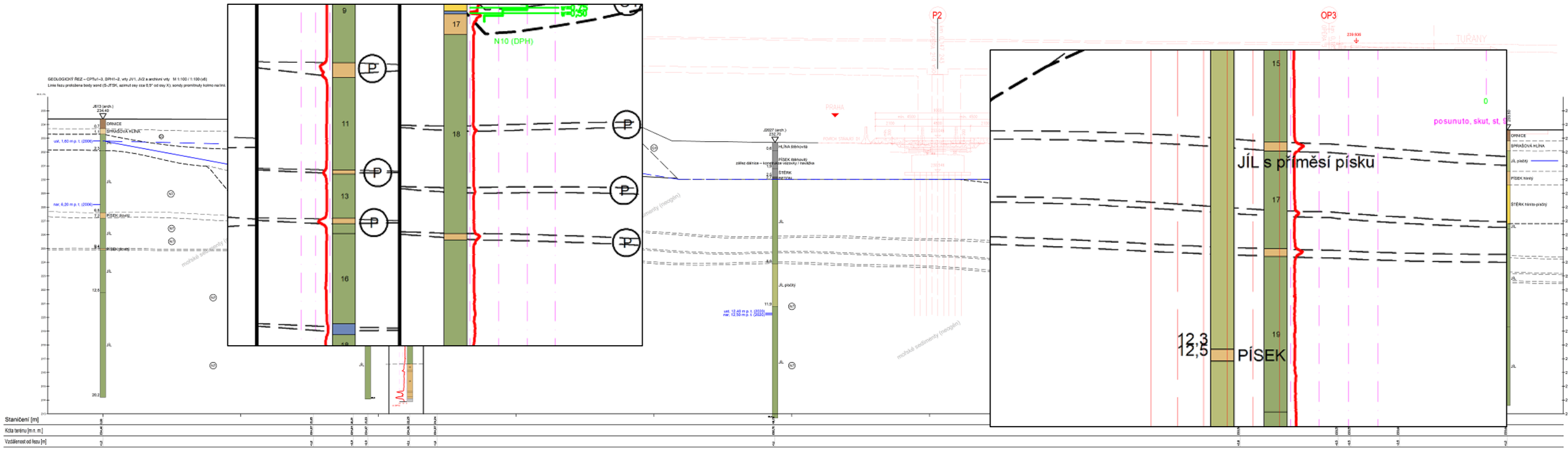
Oedometry MATEST
(stlačitelnost, propustnost)



Krabicová smyková zkouška Shearlab

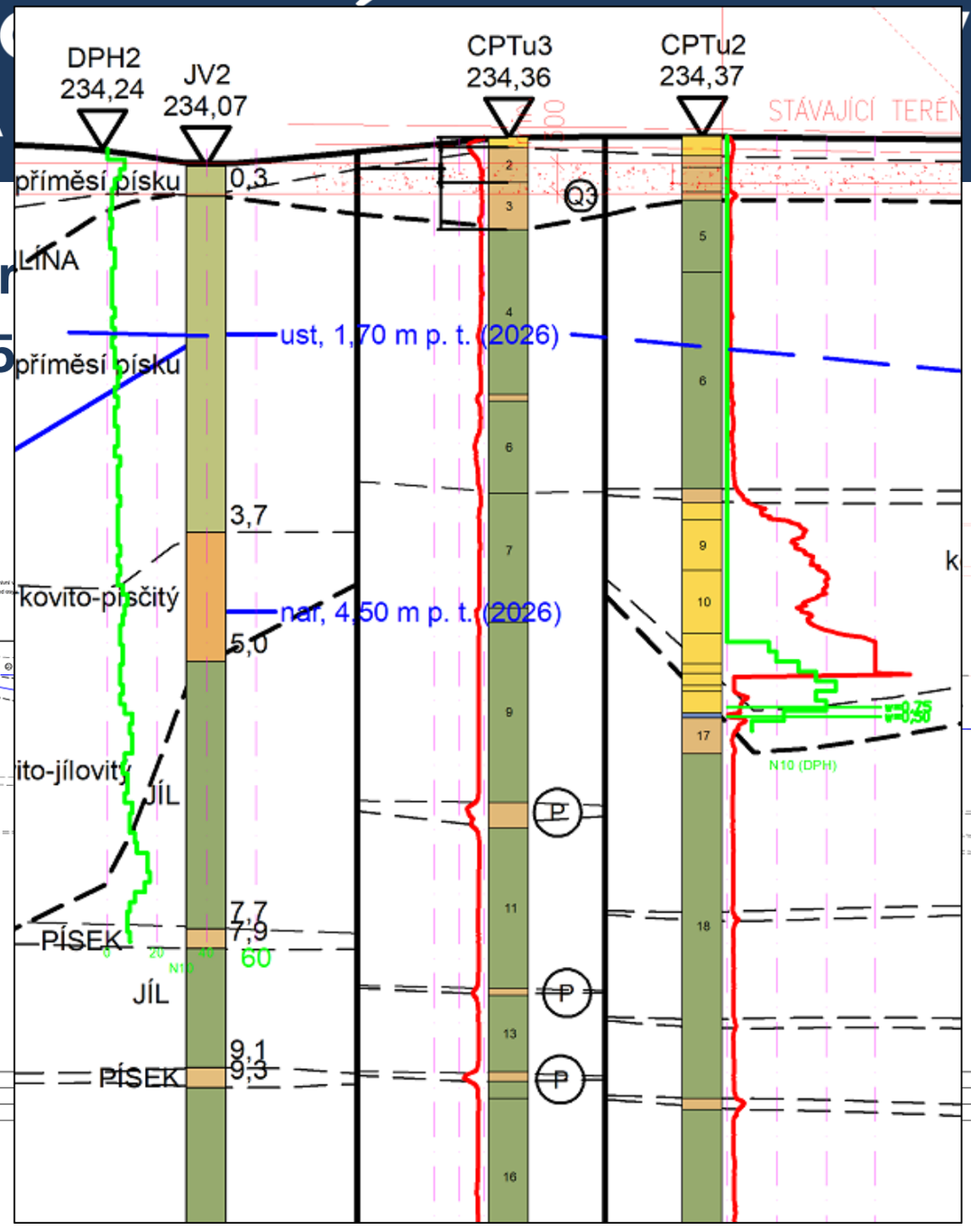
Numerické modelování sedání (GEO5 – MKP)

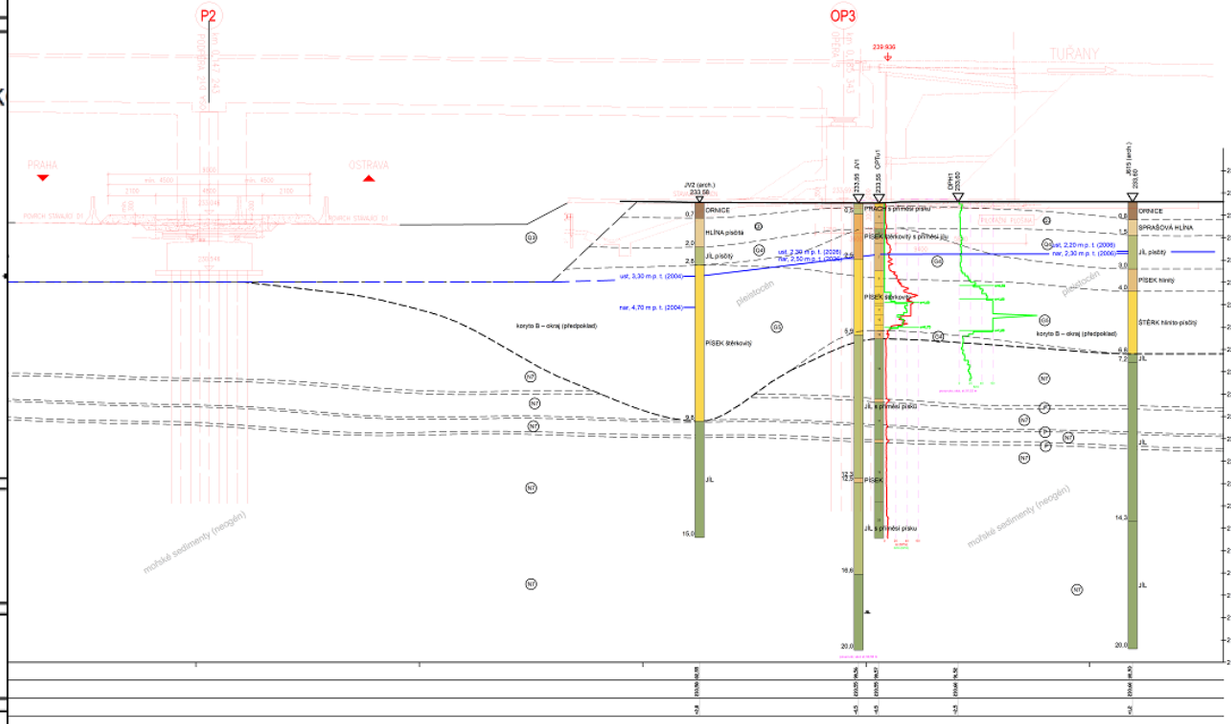
Geologický řez podélný



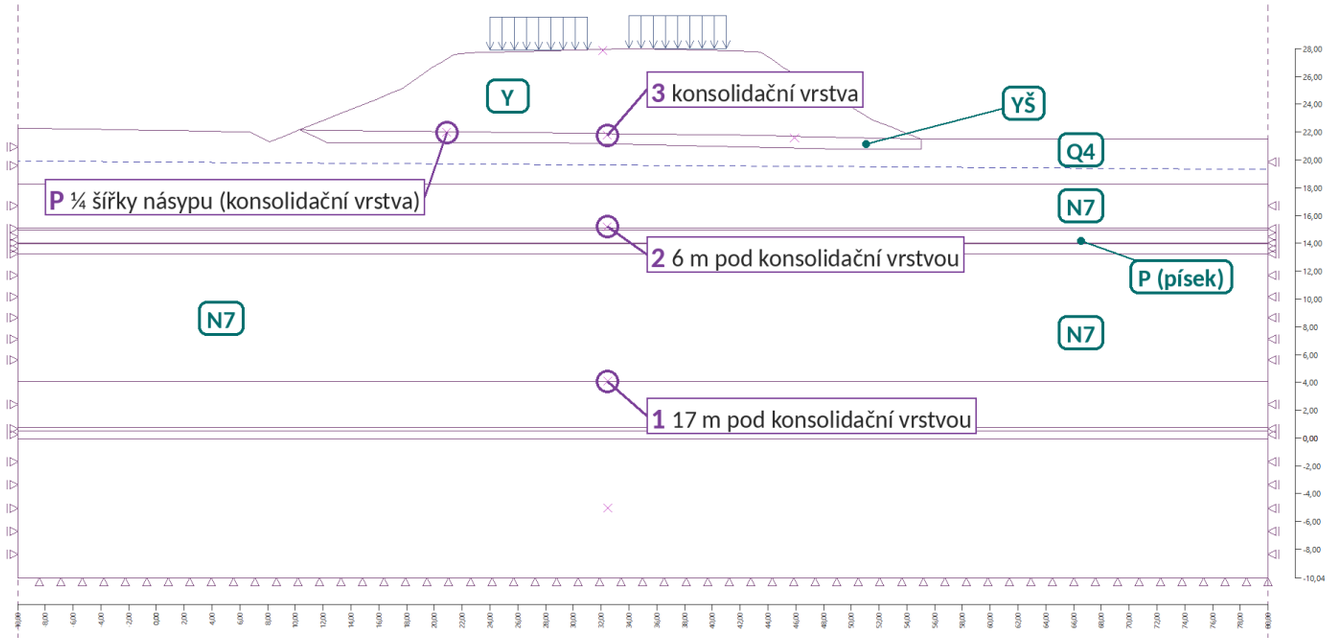
Numer
(GEO5

Geologický řez podélný





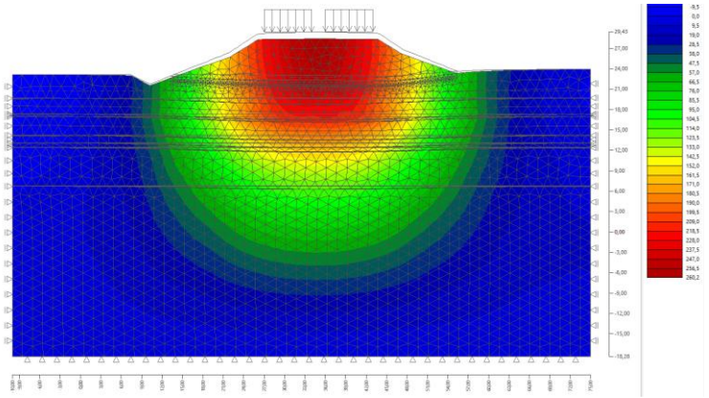
Výpočtový model GEO5 – MKP



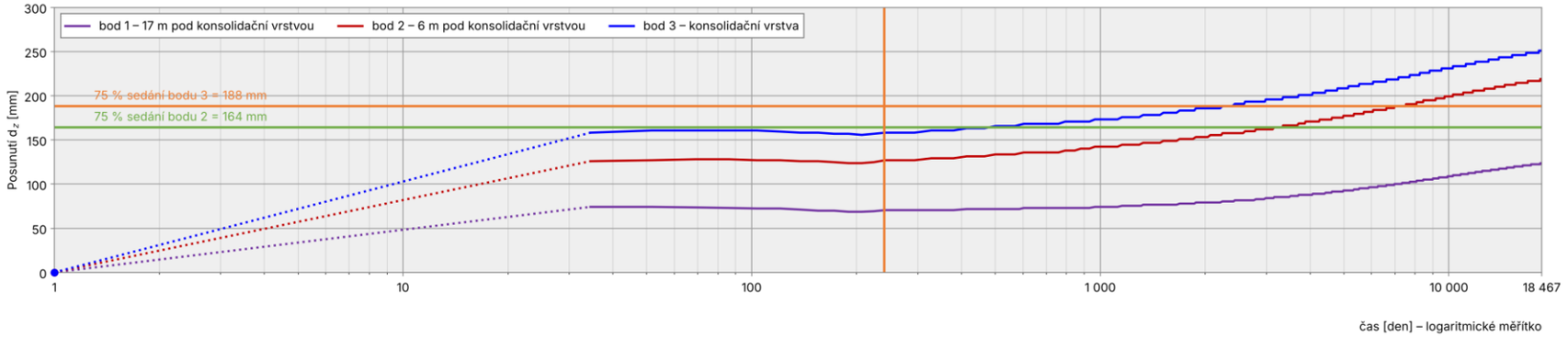
Monitorované body 1–3 a P; zeminy Y, YŠ, Q4, N7, P (tenké vrstvy = písčité proplástky)

- 2D rovinná úloha, typ výpočtu konsolidace
- Modifikovaný Mohr-Coulomb, parametry kalibrované laboratoří
- **3 geol. prostředí podle CPTu1–CPTu3**
- 14 dní násyp + 2 m nadnásyp (38 kPa), 30 dní konsolidace, 172 dní práce
- Předání po ~240 dnech, dále 50 let provozu (10 kPa)

CPTu1 bez opatření – sedání nestihne proběhnout

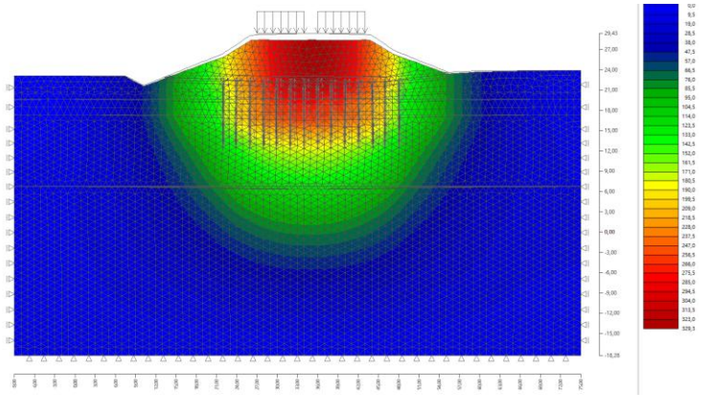


- **251 mm** sedání konsolidační vrstvy za 51 let (povrch násypu 260 mm)
- Do předání (242 dní) proběhne jen 63 %
- Požadavek 75 % (ČSN 73 6133) nesplněn
- Po předání zbývá ~93 mm, Δs za 3 roky 20,9 mm

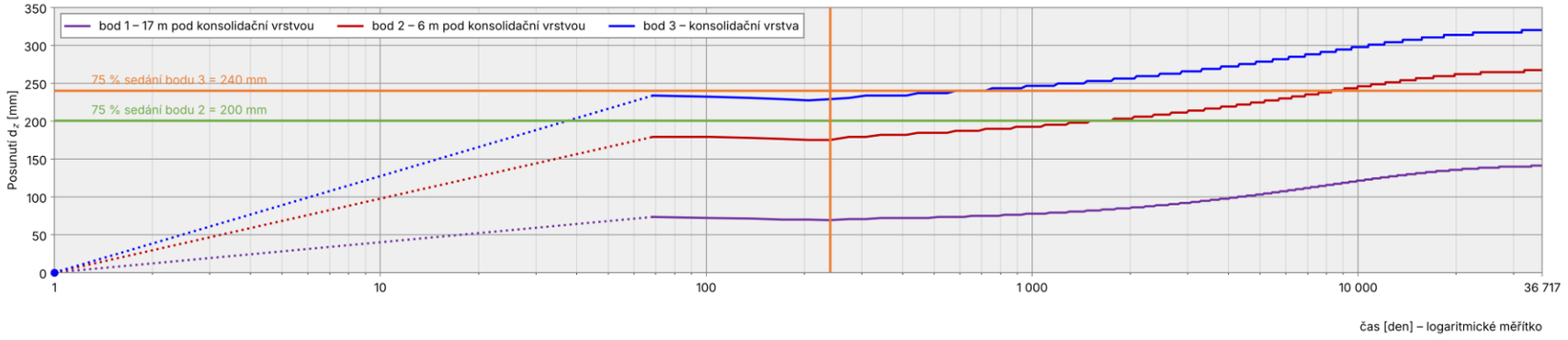


Sedání bodů 1–3 v čase, log. měřítko (svislá čára = předání stavby) | Vlevo: celkové sedání za 51 let, barevná škála v mm

CPTu1 s geodrény – konsolidace se urychlí



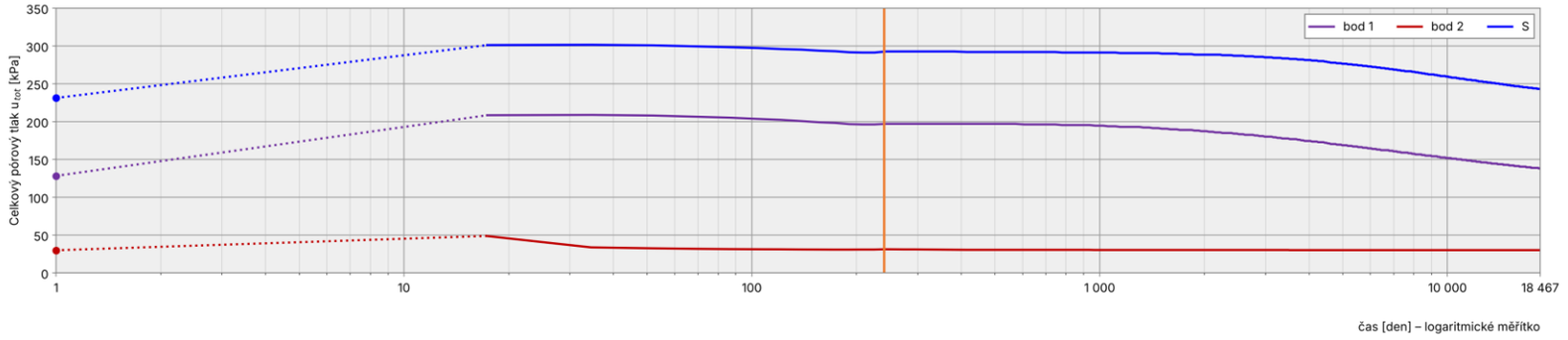
- Geodrény 10 m, trojúhelníková síť, rozteč 2,0 m
- **314 mm** za 51 let v konsolidační vrstvě (povrch 329 mm)
- Do předání 73–74 % – požadavek 75 % splněn jen hraničně
- Celkové sedání se nesníží, po předání zbývá ~85 mm



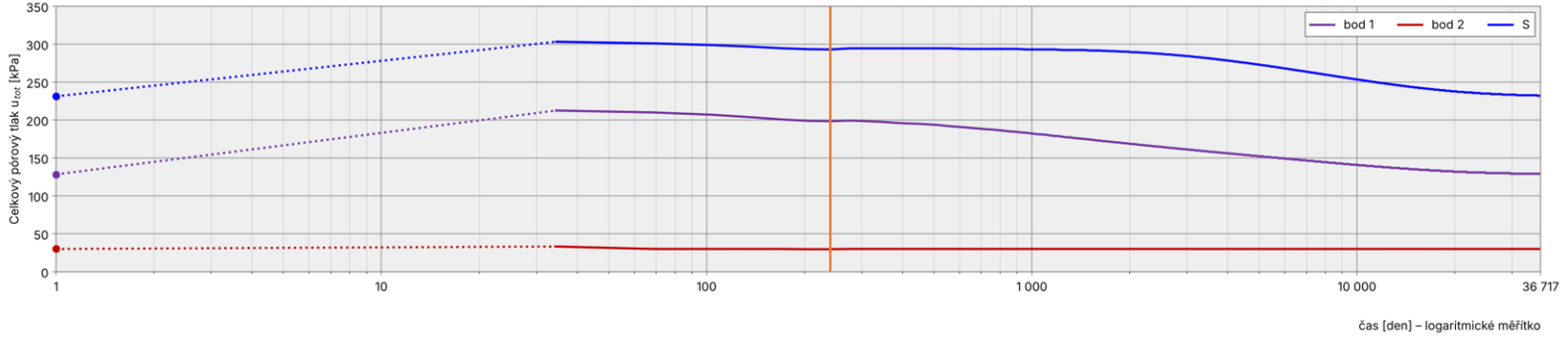
Sedání bodů 1–3 v čase s geodrény | Vlevo: celkové sedání s geodrény, barevná škála v mm

Pórové tlaky po umístění násypu bez drénů

CPTu1 bez drénů (konsolidační nadnásyp 2 m)

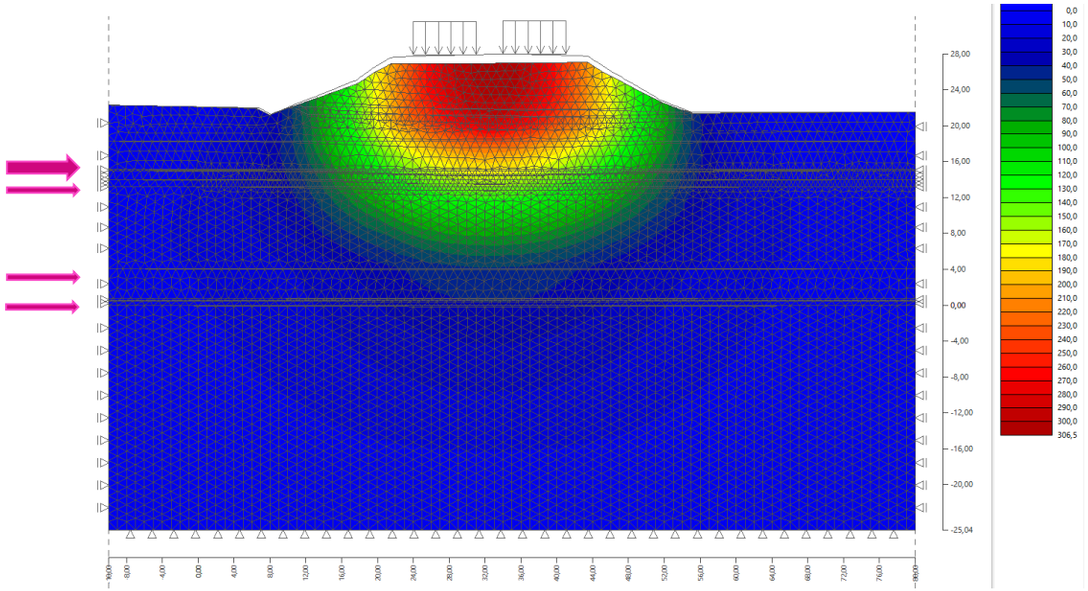


CPTu1 s geodrény (pro srovnání)

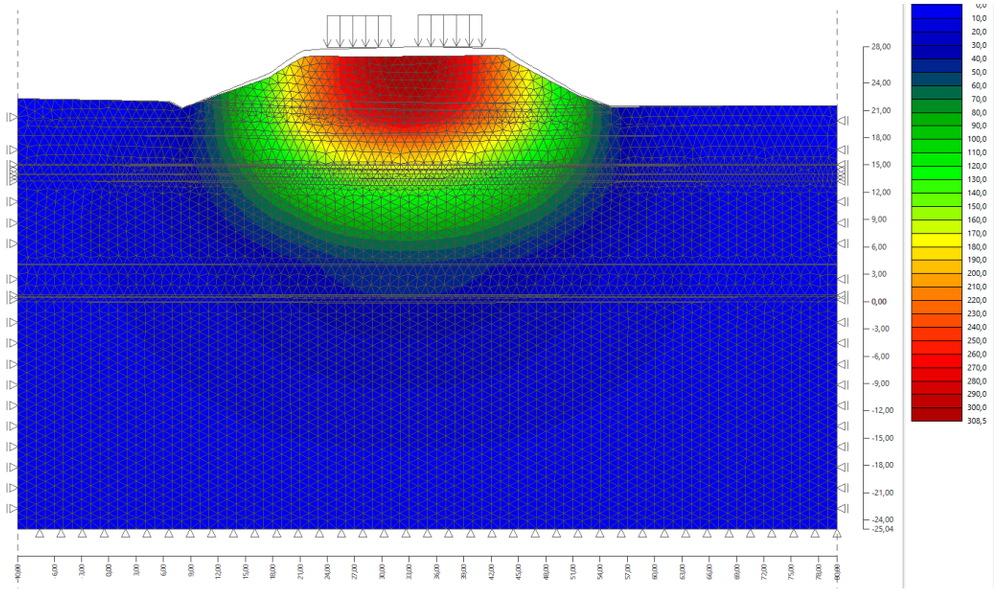


- **+70 až 80 kPa** v jílu po navezení násypu (14 dní)
- Do předání (~240 dní) disipuje jen 10–15 % přírůstku
- Po 51 letech je tlak stále nad původní hodnotou
- Štěrková vrstva (bod 2) disipuje během dní
- S geodrény disipace rychlejší: bod 1 po 5 letech 168 kPa místo 186 kPa

CPTu3 – mají písčité proplástky vliv?



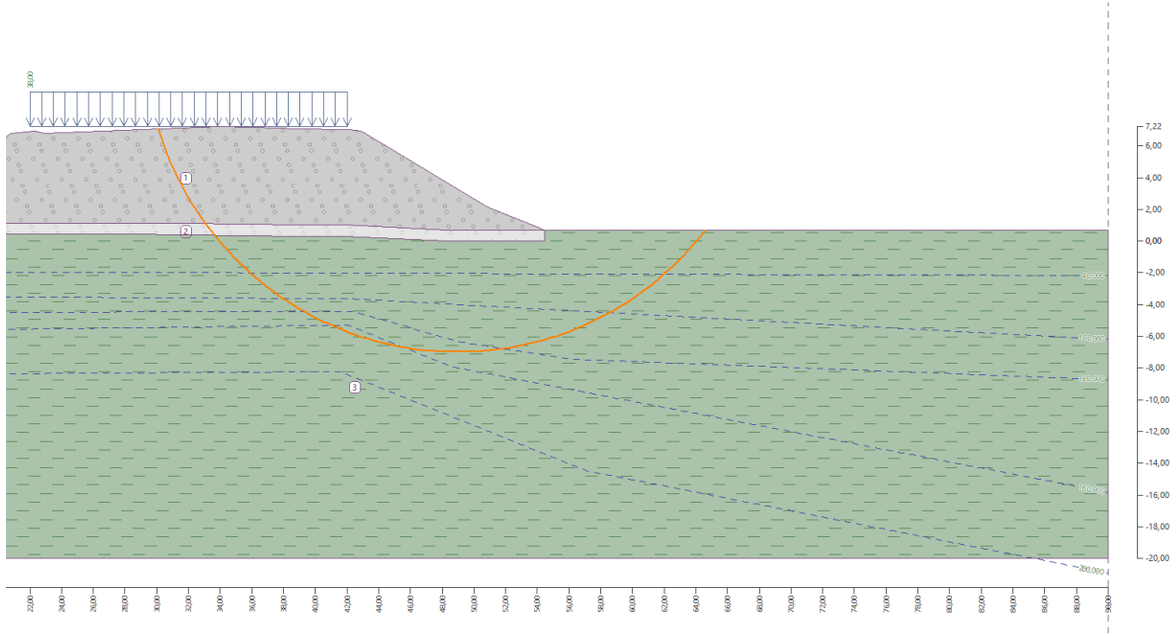
Podrobný model s proplástky prachovitého písku: 287,9 mm



Model bez proplástků: 290,6 mm

- **Rozdíl jen 2,7 mm** – proplástky (k ≈ 100× vyšší) zde konsolidaci výrazně neurychlily; CPTu je však spolehlivě odhalí, vrty často ne.

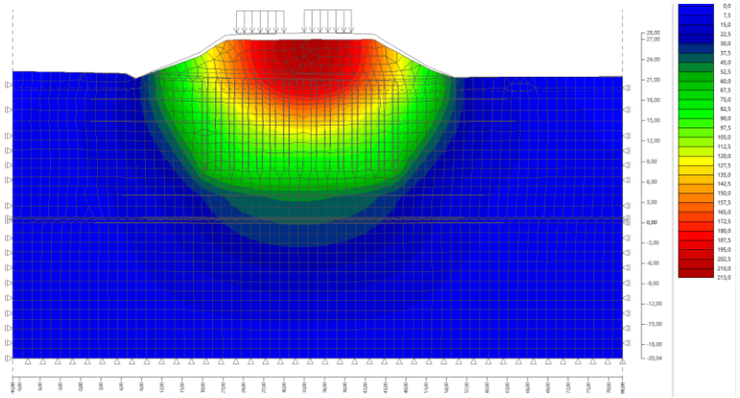
Stabilita svahu a podloží – CPTu3



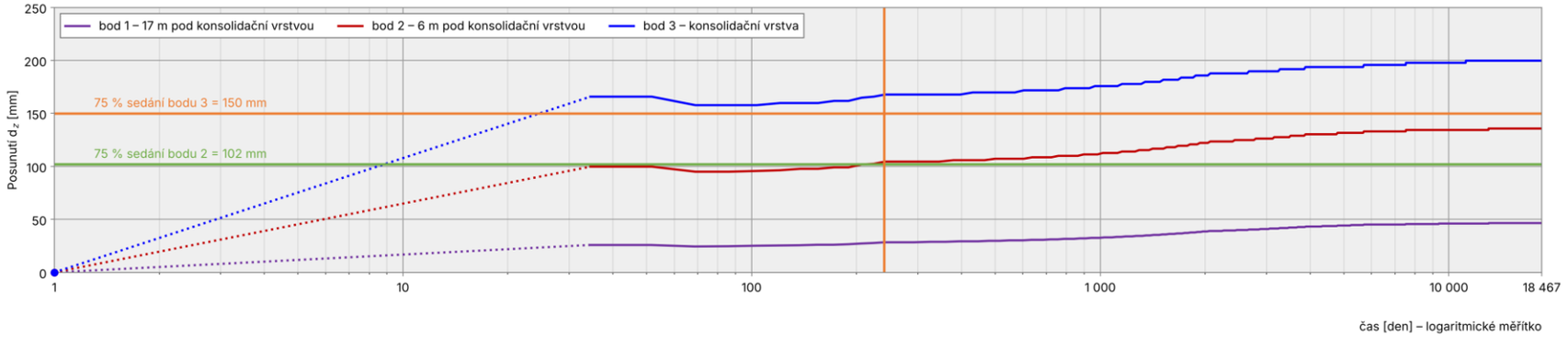
Stabilita svahu a podloží po 14denním přitěžování, pórové tlaky z MKP (GEO5 – Stabilita svahu)

- **FS = 1,98** vrcholové parametry jílu, pórové tlaky z MKP
- **FS = 2,19** ustálená HPV
- **FS = 1,05** reziduální parametry (φr = 10°, cr = 10 kPa) < 1,1 (ČSN 73 6133, příl. B)
- Na předurčených smykových plochách hrozí porušení podloží při rychlém sypání
- Nutné opatření: geomříže (≥ 80 kN/m), štěrkové pilíře nebo deep-soil miging

CPTu3 se štěrkovými pilíři – nejmenší dosedání

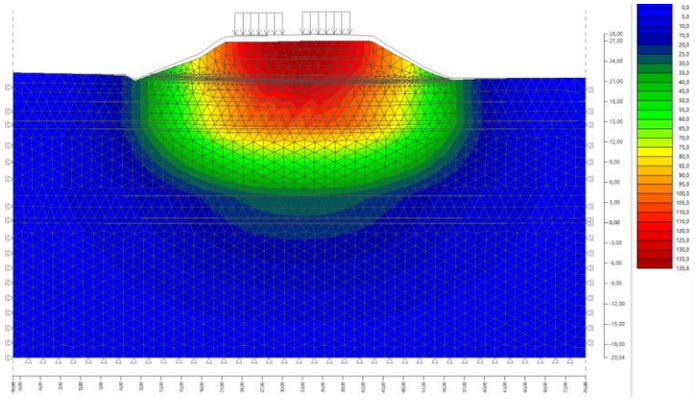


- **200 mm** místo 288 mm (konsolidační vrstva) bez opatření (povrch 213 mm)
- Do předání ~168 mm (84 %) → požadavek 75 % splněn
- Po předání zbývá ~32 mm, Δs za 3 roky 12,3 mm
- Pilíře ⌀ 800 mm, dl. 10 m, á 2,0 m, štěrk 32/63

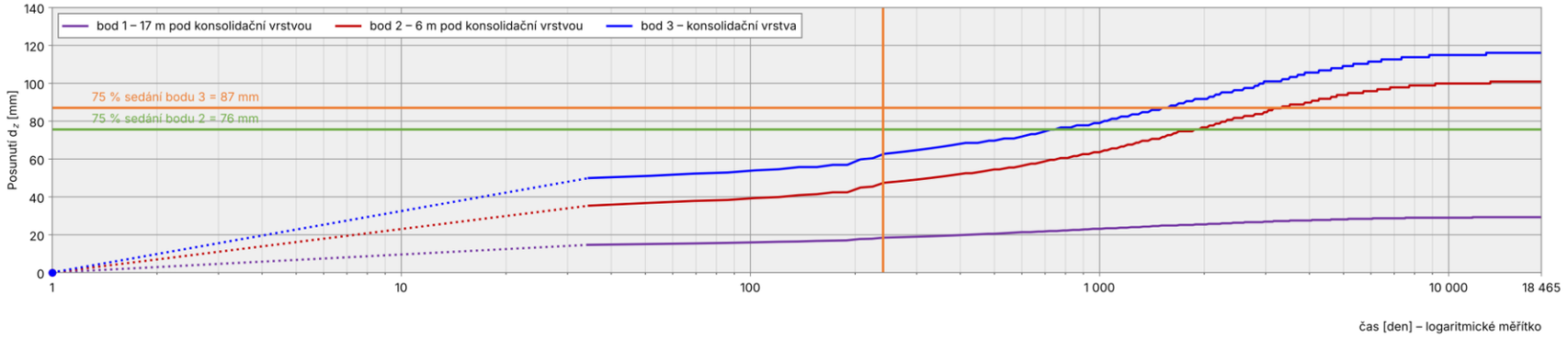


Sedání bodů 1–3 v čase se štěrkovými pilíři | Vlevo: celkové sedání se štěrkovými pilíři, barevná škála v mm

CPTu2 s odlehčeným násypem (XPS) – menší, ale pomalé sedání

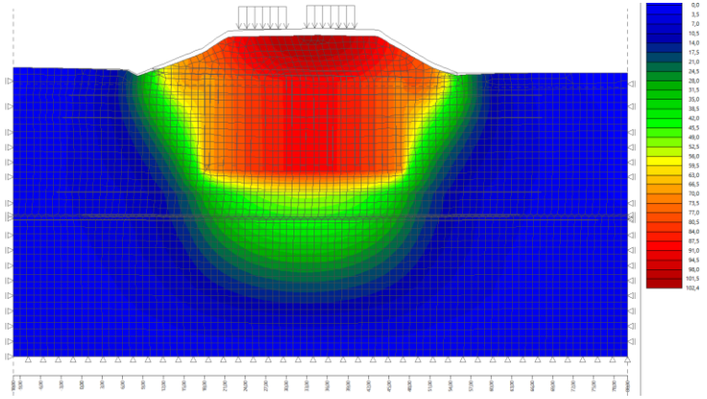


- 2 m jádra násypu z extrudovaného polystyrenu XPS 300
- **116,0–128,3 mm** místo 172–176 mm bez opatření
- Do předání 62,7–78,3 mm – jen 54–61 %, 75 % nesplněno
- Po předání zbývá 50–53 mm; účinné, ale nákladné

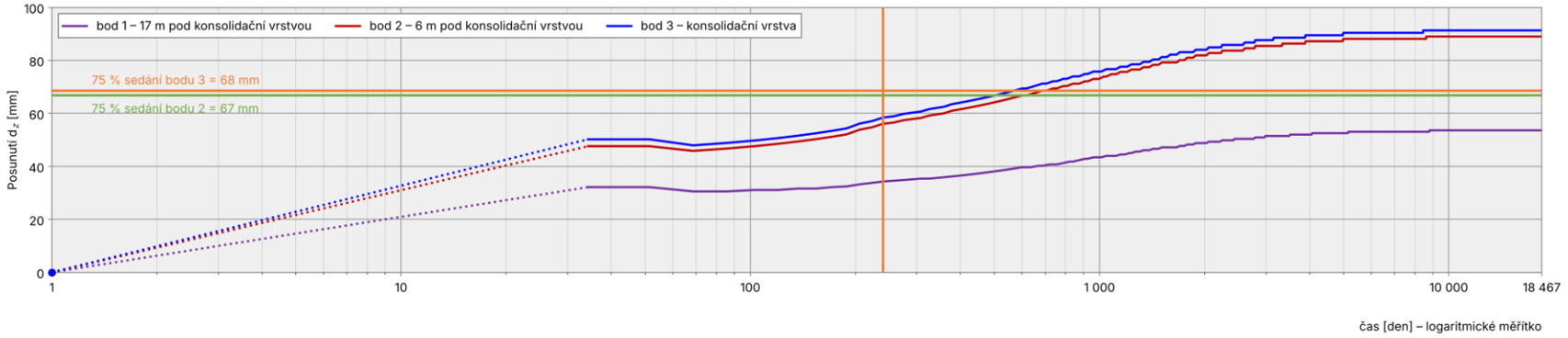


Sedání bodů 1–3 v čase, násyp s jádrem z XPS | Vlevo: sedání násypu s jádrem z XPS a nadnásypem, barevná škála v mm

CPTu3 s deep-soil mixingem – nejmenší sedání, pomalá konsolidace

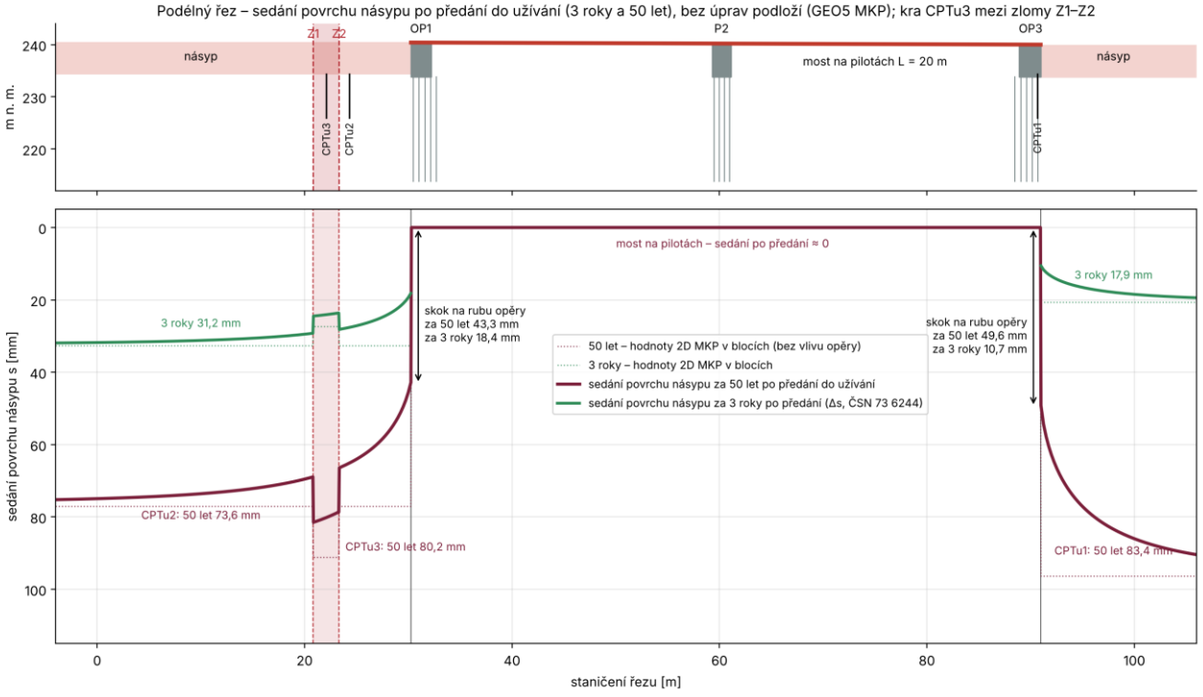


- **91 mm** v konsolidační vrstvě za 51 let (povrch 102 mm)
- Do předání jen 58,5 mm (64 %) – 75 % nesplněno
- Sloupy nedrénují – kombinovat s geodrény nebo zahustit síť
- Model: ideální sloupy C30/37 – reálné sedání bude větší

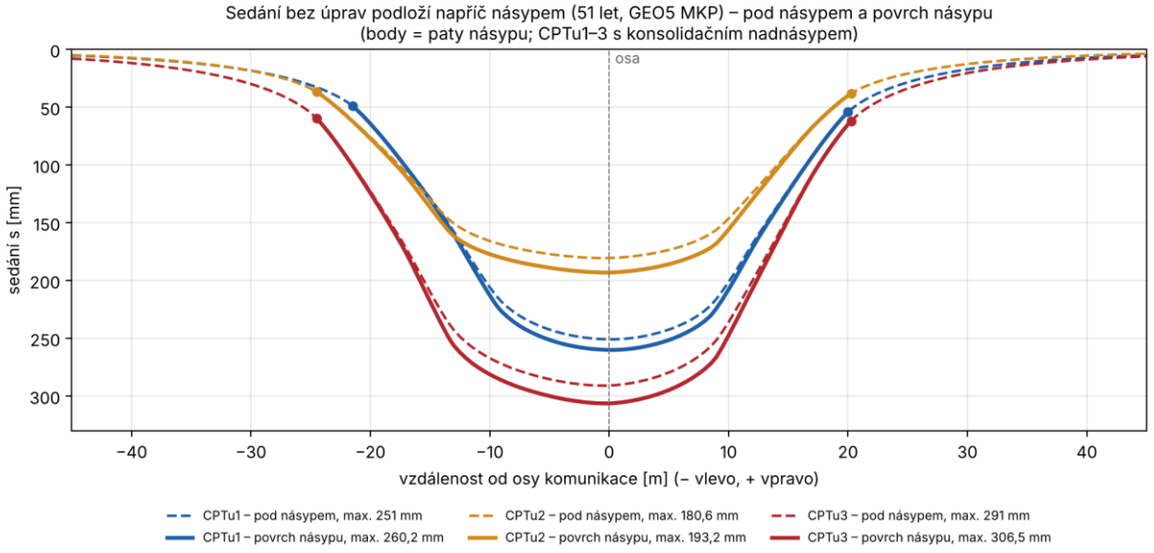


Sedání bodů 1–3 v čase s DSM | Vlevo: celkové sedání násypu podpořeného sloupy DSM, barevná škála v mm

Sedání bez úprav podloží v podélném a příčném řezu



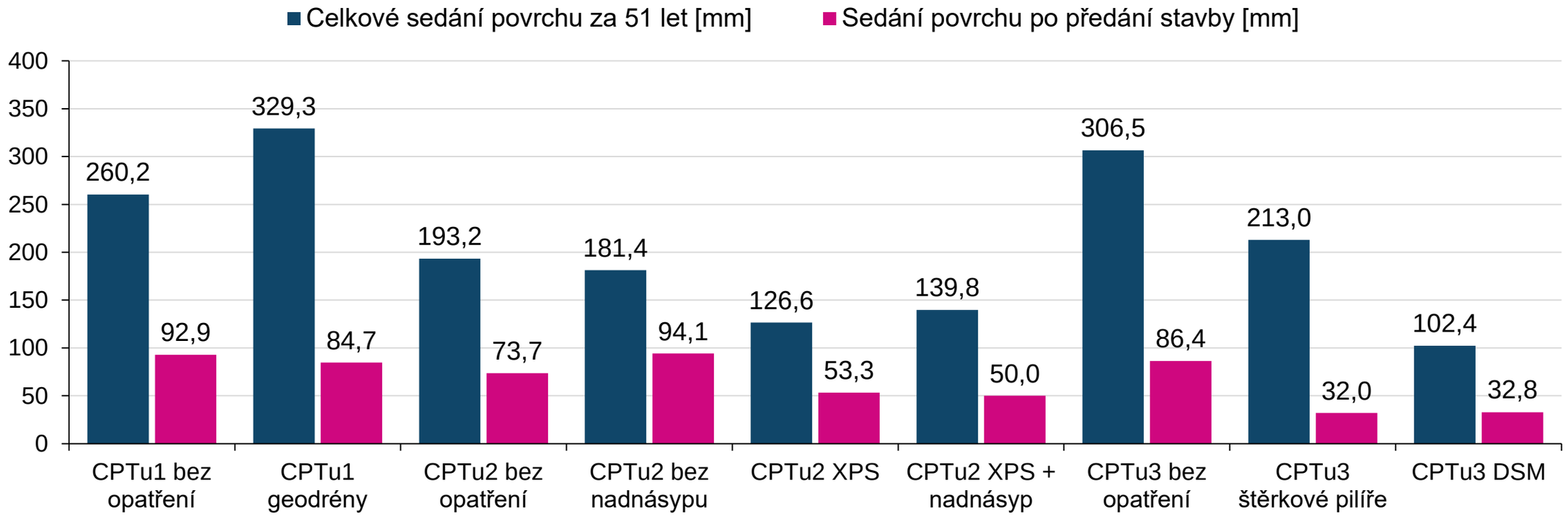
Podélný řez – sedání povrchu po 3 a 50 letech od předání



Příčný řez – soutisk CPTu1–3 pod násypem a na povrchu

- **Bez opatření zbývá po předání stavby 7–9 cm sedání, z toho asi 30–60 % v prvních 5 letech; most sedá jen 1,7–2,0 cm.**

Srovnání variant – celkové sedání povrchu a sedání po předání



Zdroj: GEO5 – MKP, tab. 6 DP; sedání povrchu = konsolidační vrstva + těleso násypu. Sedání mostu 16,6–20,1 mm.

Posouzení podle ČSN 73 6133 – 75 % sedání do předání

Varianta	Profil	Povrch 51 let [mm]	Povrch při předání [mm]	Podíl do předání [%]	Po předání [mm]	75 % splněno?
Štěrkové pilíře	CPTu3	213,0	181,0	85,0	32,0	ano
Deep-soil mixing	CPTu3	102,4	69,6	68,0	32,8	ne
Geodrény + nadnásyp	CPTu1	329,3	244,6	74,3	84,7	ne (hraničně)
XPS bez nadnásypu	CPTu2	126,6	73,3	57,9	53,3	ne
XPS + nadnásyp	CPTu2	139,8	89,8	64,2	50,0	ne
Bez opatření + nadnásyp	CPTu1	260,2	167,3	64,3	92,9	ne
Bez opatření + nadnásyp	CPTu2	193,2	119,5	61,9	73,7	ne
Bez opatření, bez nadnásypu	CPTu2	181,4	87,3	48,1	94,1	ne
Bez opatření + nadnásyp	CPTu3	306,5	220,1	71,8	86,4	ne

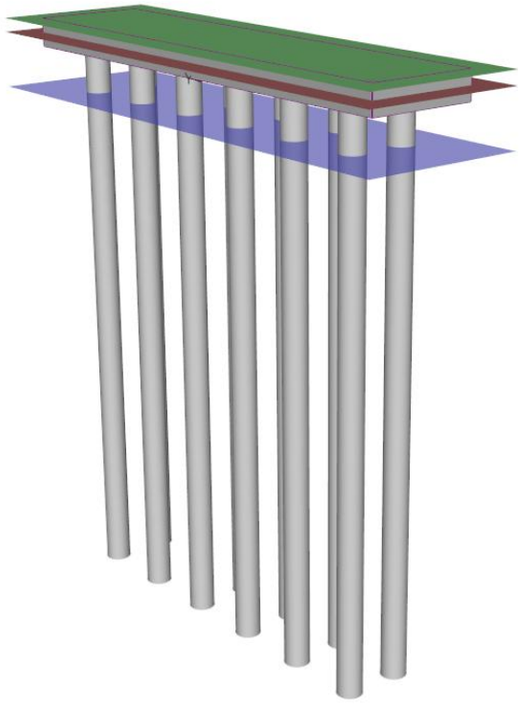
Podmínku 75 % sedání do předání (242 dní) splňují pouze štěrkové pilíře; geodrény jen hraničně (73–74 %).

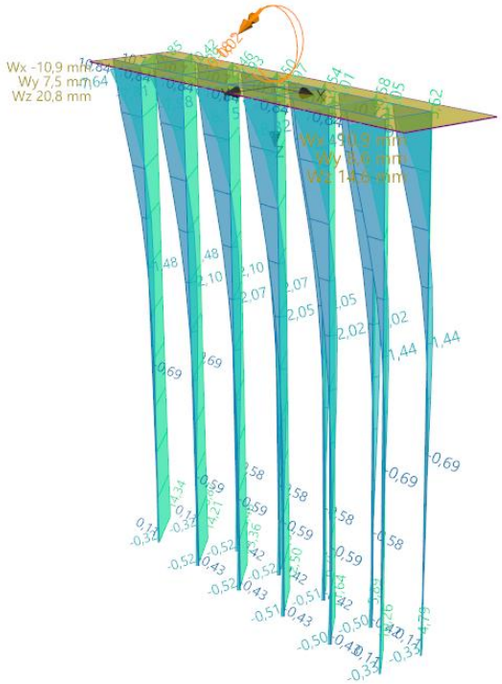
Posouzení nerovnoměrného sedání podle ČSN 73 6244

Varianta	Profil	Δs 3 roky [mm]	I. třída: l_0 [m]	I. třída (20 mm)	MK: l_0 [m]	MK (40 mm)
Štěrkové pilíře	CPTu3	12,3	6,2	ano	3,1	ano
Deep-soil mixing	CPTu3	23,5	11,8	ne	5,9	ano
Geodrény + nadnásyp	CPTu1	21,8	10,9	ne	5,5	ano
XPS bez nadnásypu	CPTu2	24,3	12,2	ne	6,1	ano
XPS + nadnásyp	CPTu2	22,4	11,2	ne	5,6	ano
Bez opatření + nadnásyp	CPTu1	20,9	10,5	ne	5,2	ano
Bez opatření, bez nadnásypu	CPTu2	32,8	16,4	ne	8,2	ne*
Bez opatření + nadnásyp	CPTu2	33,5	16,8	ne	8,4	ne*
Bez opatření + nadnásyp	CPTu3	27,8	13,9	ne	7,0	ano

Δs = sedání povrchu za 3 roky po předání; $l_0 = 2 \cdot \Delta s/\Delta i$. I. třída: $\Delta i = 0{,}4$ %, $l_{0,max} = 10$ m; MK: $\Delta i = 0{,}8$ %, $l_{0,max} = 7{,}5$ m. * $l_0 > l_{0,max}$

Hlubinné založení mostu – sedání v jednotkách cm





Model opěry 6 × 2 piloty a vnitřní síly ve skupině pilot (GEO5)

16,6 mm
nejvíce zatížená pilota (3 071 kN)

20,1 mm
max. sedání skupiny pilot (výpočet pomocí pružin)

13,4 mm
max. horizontální deformace

185 MN/m
tuhost pružiny piloty

Doporučení pro průzkum a projektování

Průzkum

- CPTu s vyhodnocením po 1 cm
- DP jen s korekcí na tření (Mv) - **kalibrovat**
- *k* měřit v laboratoři, ne ze zrnitosti
- Vzájemná kalibrace metod (EC7-2)

Model a výpočet

- Kalibrovaný geotechnický model
- Posoudit rozdíl most–násyp v čase
- Ověřit velkoobjemovým zatěžovacím pokusem
- Observační metoda
- Stabilita i s reziduálními parametry

Opatření a materiály

- Geodrény + nadnásyp = rychlost
- Štěrkové pilíře = rychlost i velikost
- XPS = menší přitížení
- DSM = velikost, ale nedrénuje
- Sírany: SR cement C30/37 (XA2), pozor na pojiva

Závěr a otázka do diskuse

- Numerický model neopraví špatná vstupní data
- Podloží 5 m násypu sedá 9–31 cm (povrch 10–33 cm), most 1,7–2,0 cm
- Po předání stavby zbývá podle varianty 3–9 cm sedání
- Nejmenší rozdíl most–násyp dávají štěrkové pilíře – jako jediné splňují ČSN 73 6133 i ČSN 73 6244
- Kalibrace CPTu, DP a laboratoře je základ spolehlivého modelu (optimálně zatěžovací lavice)
- V případě velkých nerovnoměrných sedání TP 261 kap. 3.3 doporučuje využití semi-integrované konstrukce přechodové oblasti.
- Volba nejvíce závisí na vodorovné tuhosti spodní stavby, 2 řady pilot pod opěrou jsou brány spíše jako tuhá konstrukce (vypočítaná deformace x = 10,9 mm)

Do diskuse

Nebylo by vhodnější, místo ne příliš funkčních výpočtových modelů a spousty laboratorních a terénních analýz, realizovat konsolidační pokusy pomocí přitěžovací lavice?

Děkuji za pozornost

ivan.poul@igeo.cz

DĚKUJI ZA POZORNOST

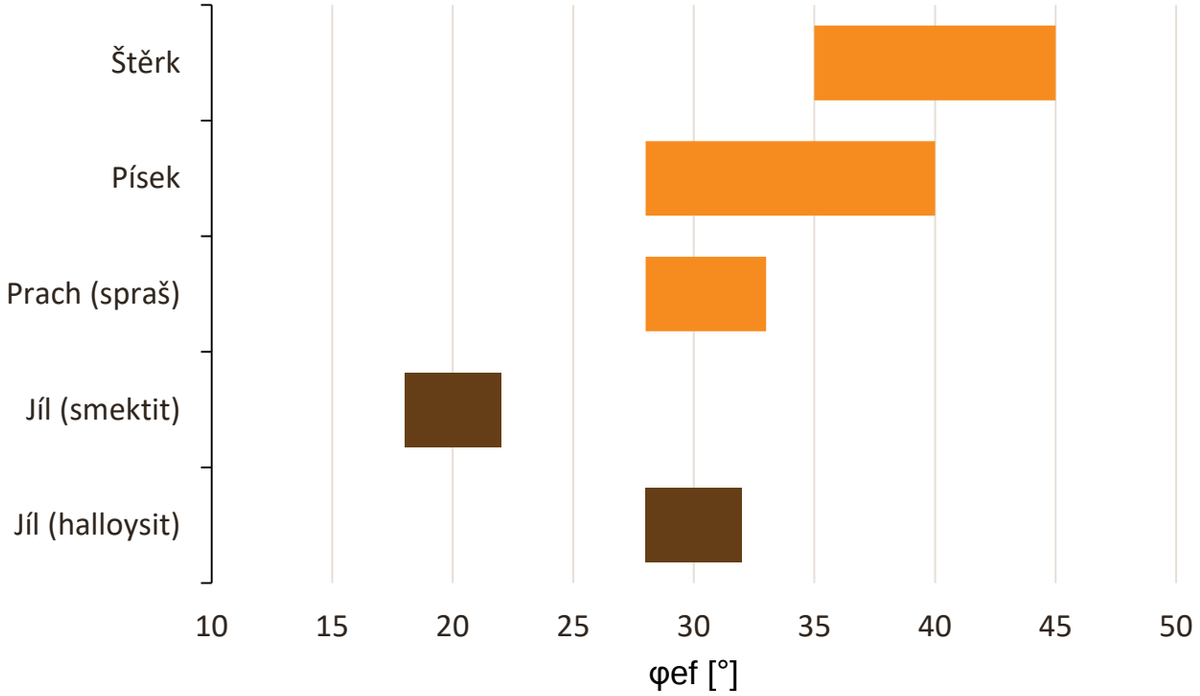
Projekce iGeo s.r.o.

VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA | FAKULTA STAVEBNÍ | KATEDRA GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

SDRUŽENÍ PRO VÝSTAVBU SILNIC

Efektivní smyková pevnost podle druhu zeminy

Vrcholový φef ze saturovaných CD smykových zkoušek



φef · cef

Štěrk
35–45° · 0–15 kPa

Písek
28–40° · 0–15 kPa

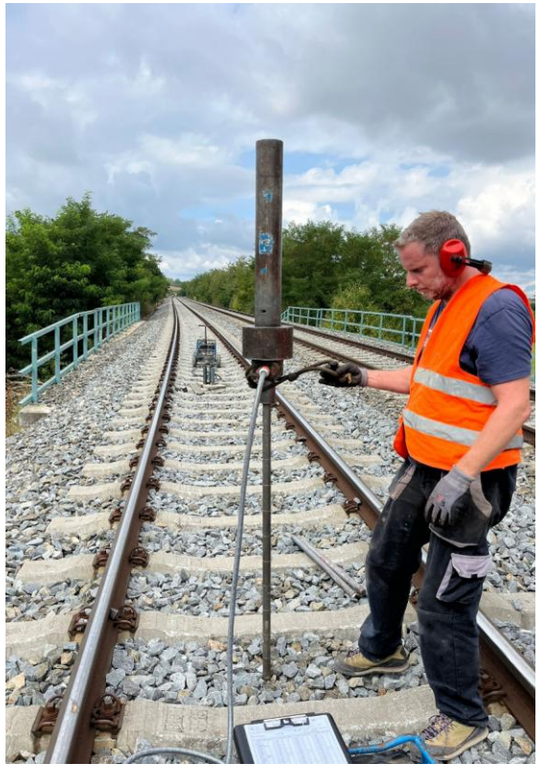
Prach (spraš)
28–33° · 5–25 kPa

Jíl (smektit)
18–22° · 20–80 kPa (do napětí 400 kPa)

Jíl (halloysit)
28–32° · 8–10 kPa (povrch)

Zkušenosti autora z celého světa

Dynamická penetrace: tření soutyčí v lepivých jílech (smektit)



Dynamická penetrace DP (DPH)

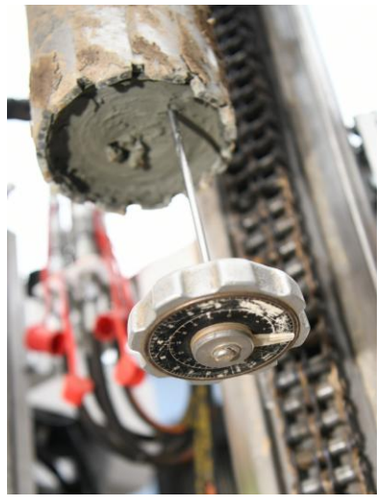
$$q_{dyn,\,k} = q_{dyn}\,(N_{10} - x\,M_v)$$

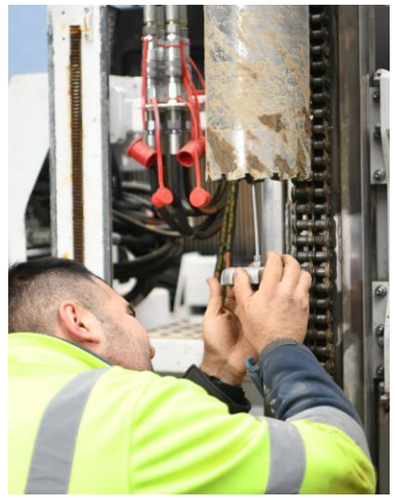


x = 0,02–0,1 (zemina, hloubka) · Mv > 300 Nm → x iterací z cu vrtulky

Korekce kroutícím momentem Mv měřeným na soutyčí (Matys a kol., 1990)

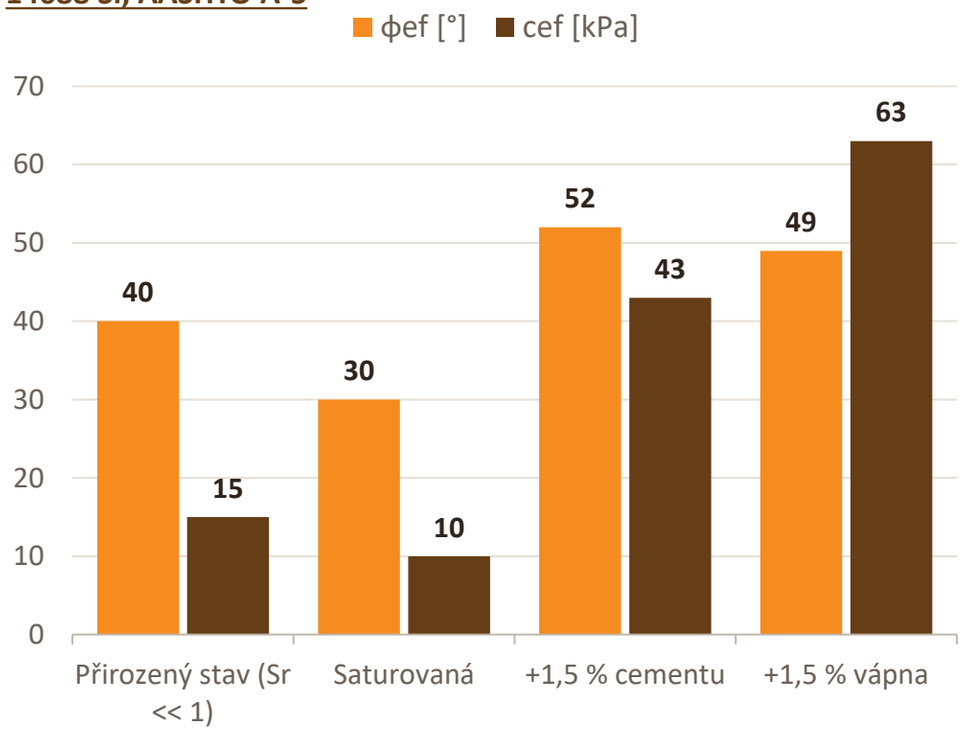
Pro kalibraci q_{dyn} použijte zpětnou analýzu nebo iterační postup založený na výsledcích vrtulkové zkoušky. DP → **ef. smykové vlastnosti** jen pro prach, písek a štěrk





Spraš: Česká republika vs. Saúdská Arábie – na saturaci a mineralogii záleží

Efektivní smyková pevnost spraše (napětí 50–300 kPa), USCS CI/CL, ISO 14688 Si, AASHTO A-5



Česká republika

Prosedavost 3–5 % při provlhčení, rozbřídavost, namrzavost → nevhodná do násypů dopravních staveb bez zhutnění (w = 15–16 %) nebo zlepšení pojivy (vápno, cement apod.)

Saúdská Arábie

Nízké srážky a malé riziko mrazu → stejné zeminy jsou hodnoceny jako použitelné (AASHTO A-5, A-7)

15→20

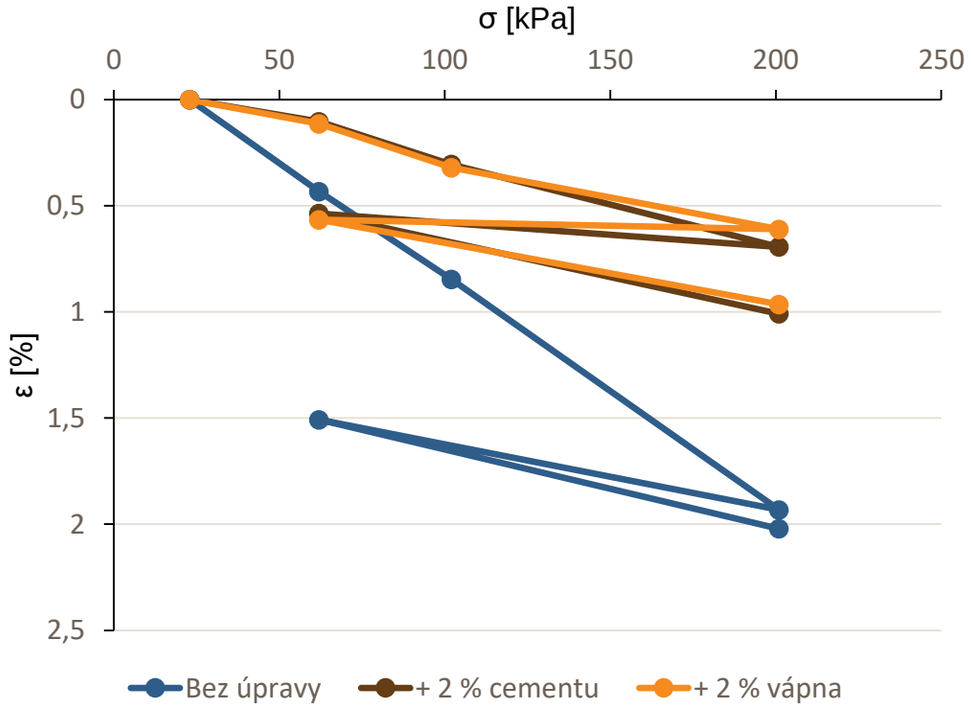
γ [kN/m³] po prosednutí

4–6×

Eoed s 2 % vápna nebo cementu

Spraš + 2 % pojiva: oedometr a Proctor

Oedometr: poměrná deformace vs. napětí (95 % Proctor, saturováno), každý krok 14 dní



9,3 MPa
Eoed bez úpravy

25,7 MPa
Eoed + 2 % cementu

29,2 MPa
Eoed + 2 % vápna

Průměr zatěžovacích kroků 20–200 kPa · s pojivem asi 3× tužší

Proctor standard (EN ISO 13286-2)

