PODKLADNÍ VRSTVY VOZOVEK
A ZEMNÍ TĚLESO

Změny parametrů smykové pevnosti jemnozrnných zemin po úpravě hydraulickými pojivy

Jaroslav Hauser, GEOSTAR spol. s r.o.

25.–26. 11. 2026

SDRUŽENÍ
PRO VÝSTAVBU
SILNIC

Proč porovnávat c a ϕ upravených zemin

1 **c a φ jsou vstupy výpočtů stability**

Násypy, zářezy, svahy – rozhodují o sklonu i o dalších opatřeních

2 **Úprava pojivy je běžná technologie**

Vápno, cement a směsná pojiva umožňují využít místní zeminy

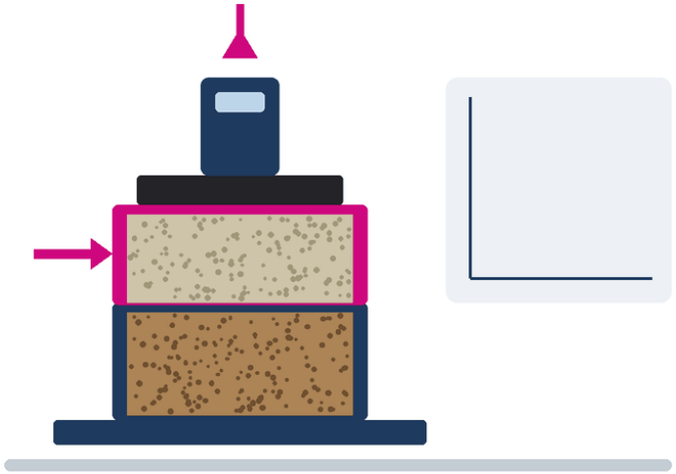
3 **Údaje o změně c a φ jsou roztroušené**

V praxi se přebírají z jediné studie nebo z normy pro přírodní zeminu

4 **Cíl příspěvku**

Sjednotit publikované výsledky, rozlišit typy odezvy zemin a ukázat vliv metodiky zkoušek

Data a výsledky



Datová základna: jen zdroje s c i ϕ před a po úpravě

10
zdrojů uvádí c i φ před i po úpravě

15
souborů dat v tabulce, 14 s úplnými daty

10
dalších prací (qu, CBR) využito v diskusi

Pojiva v souboru

vápno / CaO | cement | CKD | Dorosol, CSDA | popílek

Sprašové hlíny, prachy, prachovité a vysoce plastické jíly, expanzivní jíly, měkké švédské jíly

! **Soubor není metodicky homogenní**

Krabicové CD i rychlé zkoušky, CU triaxiál, jednou odvození z prosté pevnosti → trendy, ne návrhová čísla

Vlastní data GEOSTAR: 2 % CaO, krabicová zkouška CD

F6 CI – sprašová hlína

n = 10 zkoušek

φ	19° † →	**23,2°**
c [kPa]	16 † →	**122**

F8 CH/CV – třetihorní jíl

n = 5 zkoušek

φ	17° →	**29,7°**
c [kPa]	26 →	**96**

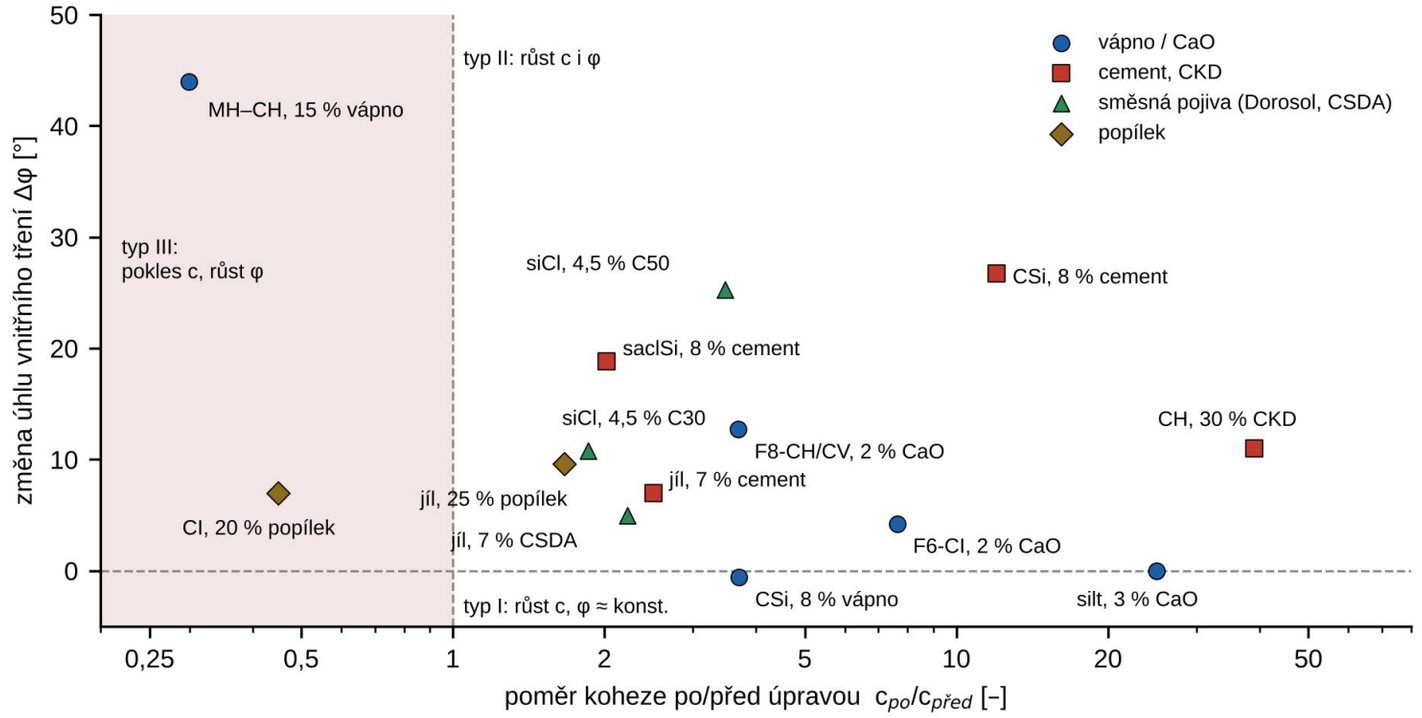
Vzorky Ø 100 mm zhutněné na 95 % Proctor standard, hodnoty jsou průměry ze zkoušek [1]. Výchozí F8: průměr zkoušek neporušených vzorků; † F6: směrná normová hodnota (ČSN 73 1001), nárůst c je tedy vztažen k normě, ne k měření.

Souhrn publikovaných výsledků

Zemina	Pojivo (dávka, zrání)	φ před [°]	φ po [°]	c před [kPa]	c po [kPa]	Zdroj
F6 Cl (sprašová hlína)	**2 % CaO (n = 10)**	**19†**	**23,2**	**16†**	**122**	**[1]**
F8 CH/CV	**2 % CaO (n = 5)**	**17**	**29,7**	**26**	**96**	**[1]**
CSi (hrubý prach)	8 % vápno, 28 d	33,6	33,0	10,4	**38,5**	[2]
CSi (hrubý prach)	8 % cement, 28 d	33,6	60,3	10,4	**125**	[2]
saclSi (jílovitý prach s pískem)	8 % cement, 28 d	34,1	52,9	42,6	**86,1**	[2]
siCl, Ip = 25 %	4,5 % Dorosol C30, 7 d	13,5	24,3	74,5	**138**	[3]
siCl, Ip = 25 %	4,5 % Dorosol C50, 7 d	13,5	38,8	74,5	**259**	[3]
jíl, wL = 58 %, Ip = 18 %	7 % cement	≈ 28	≈ 35	≈ 18	**≈ 45**	[4]
jíl, wL = 58 %, Ip = 18 %	7 % CSDA	≈ 28	≈ 33	≈ 18	**≈ 40**	[4]
CH, Ip = 40 %	30 % CKD, 3 d	≈ 10	≈ 21	≈ 4	**≈ 155**	[5]
MH–CH	15 % vápno, 7 d	30	74*	92	**28***	[6]
Cl expanzivní, Ip = 25 %	20 % popílek	6	13	71	**32**	[7]
expanzivní jíl	25 % popílek	≈ 6,5	16,1	≈ 18	**30**	[8]
silt, Ip = 16 %	3 % CaO, 2 roky	37,4	≈ 37,5	5,8	**≈ 145**	[9]
měkké jíly (w = 78–89 %)	vápno, cement, směsi, 1 d–1 rok	–	28–38	–	**5–230**	[10]

≈ odečteno z grafu · * odvozeno z prosté pevnosti a sklonu smykové plochy · † směrná normová hodnota · – parametry přírodní zeminy neuvedeny

Koheze roste téměř vždy, úhel tření nejednoznačně



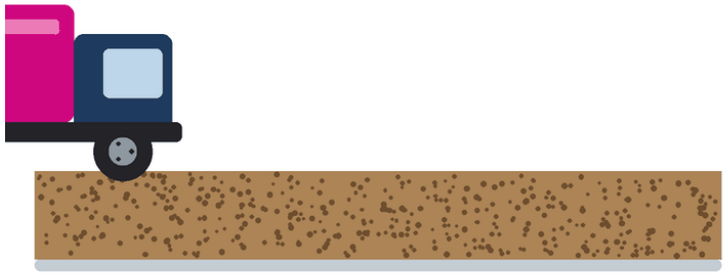
Obr. 1 – z dat tabulky, bez souboru [10]; osa x logaritmická

12 / 14
souborů: koheze po úpravě vzrostla

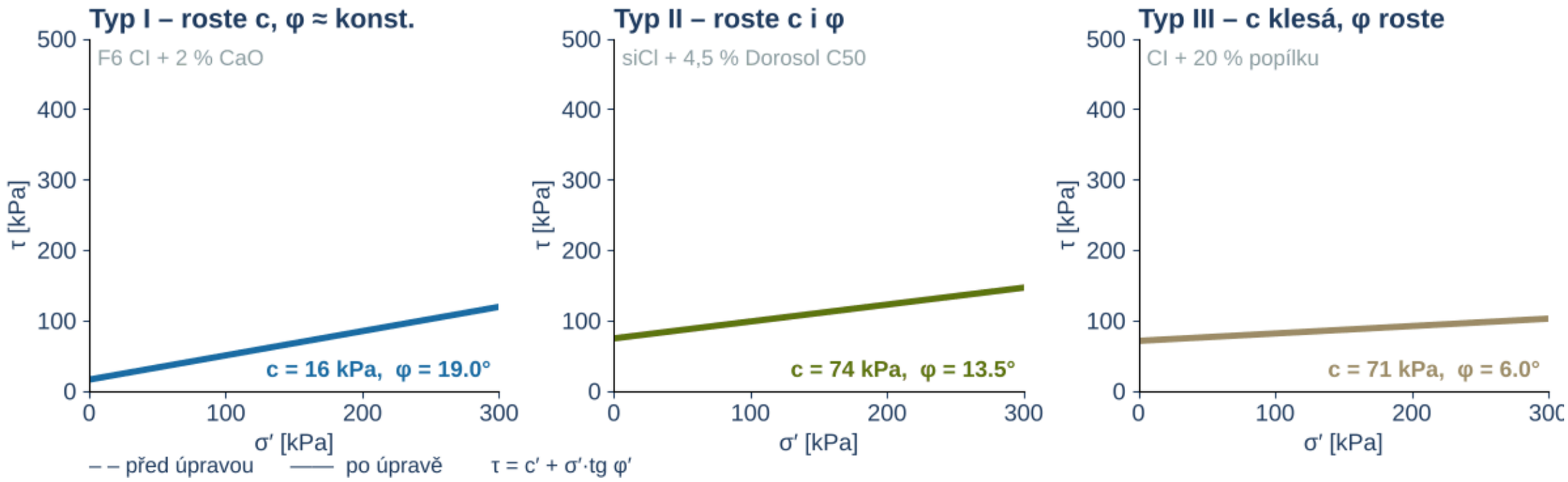
1,7× – 40×
rozpětí nárůstu koheze

−0,6° až +27°
změna φ (bez sporných +44°)

Typy odezvy zemin na úpravu



Tři typy odezvy: posun Mohr-Coulombovy obálky

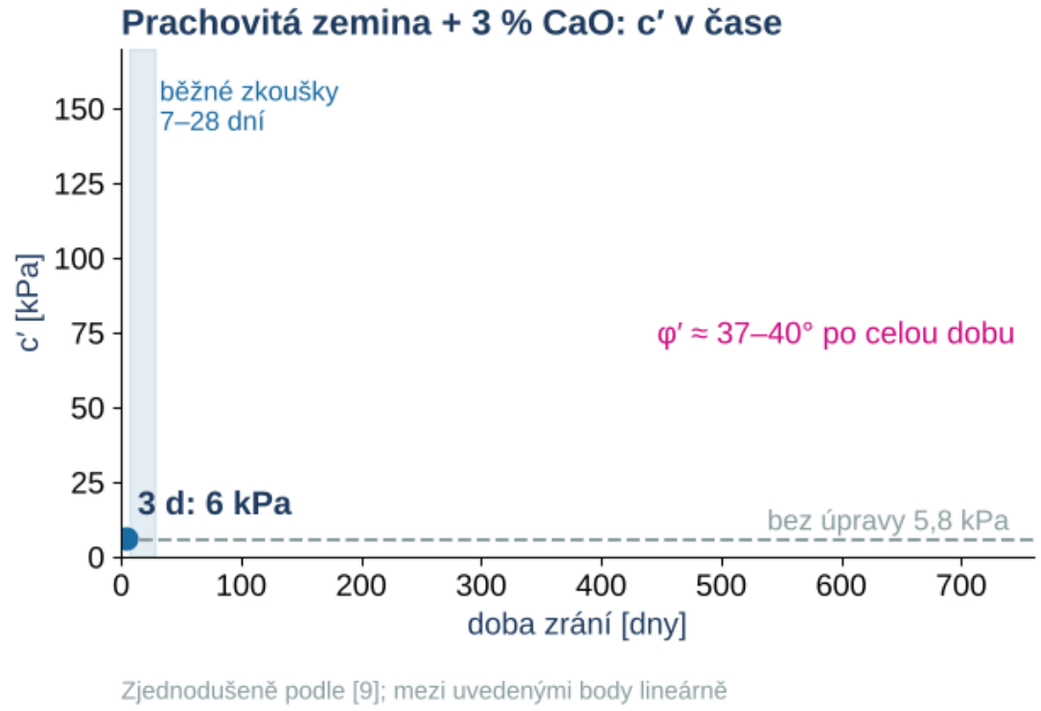


Typ I F6 CI, prach + vápno, silt + CaO

Typ II cement, CKD, směsná pojiva, F8

Typ III MH–CH + vápno, jíl + popílek

Typ I: roste koheze, ϕ zůstává – rozhoduje čas



Zjednodušeně podle [9]; mezi uvedenými body lineárně

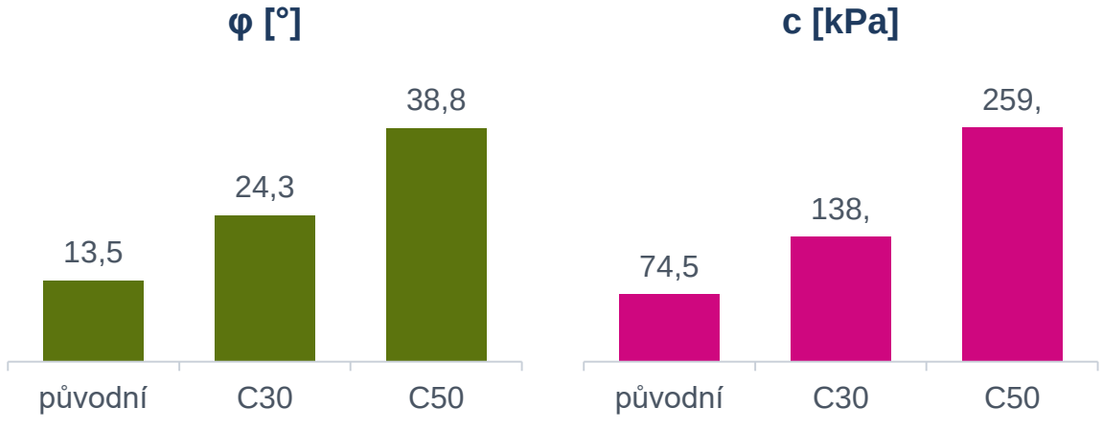
25× vyšší c′ prachovité zeminy s 3 % CaO po 2 letech; jiná zemina po 450 dnech c′ = 500 kPa [9]

28–38° φ′ stabilizovaných jílů bez ohledu na pojivo; c′ ≈ 0,25 qu [10]

7–28 dní krátkodobé zkoušky přínos vápna výrazně podhodnotí

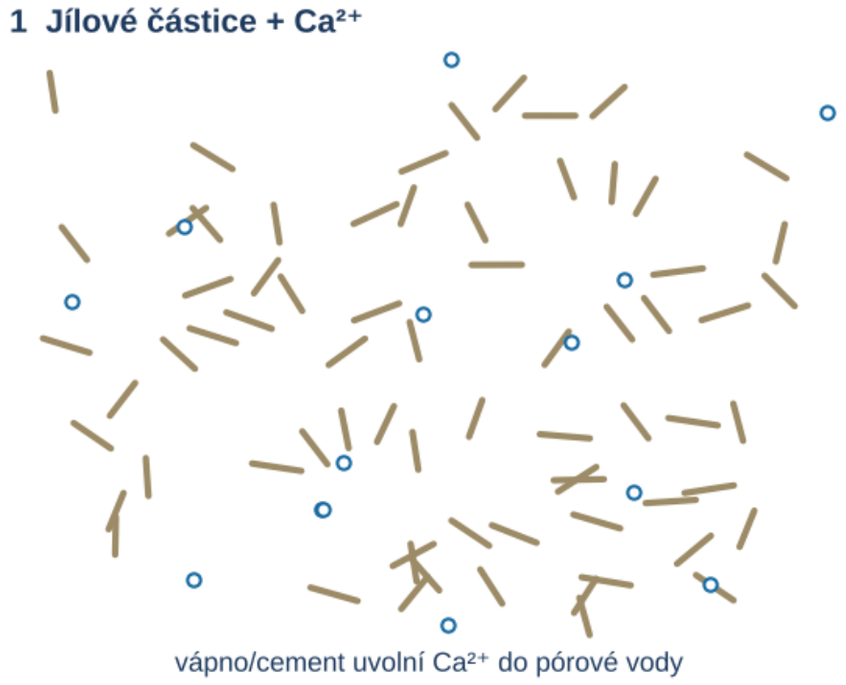
Typ II: rostou c i ϕ – flokulace a cementace

Prachovitý jíl siCl + 4,5 % Dorosol, 7 dní [3]



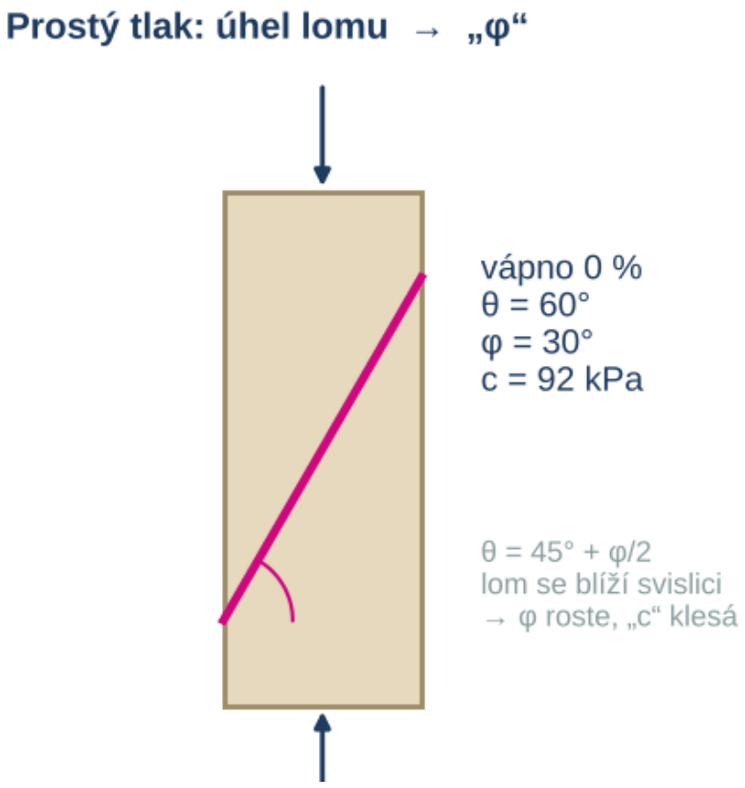
CH (Ip = 40 %) + CKD [5]

φ 10° → 21° už při 10 % pojiva; c po 3 dnech 20–39× vyšší a dál rostla



Agregace → hrubší zrno → φ ↑; pucolánové reakce (C-S-H) → c ↑ [22]

Typ III: pokles c a růst ϕ – spíš artefakt



1 **MH–CH + 0–15 % vápna [6]**

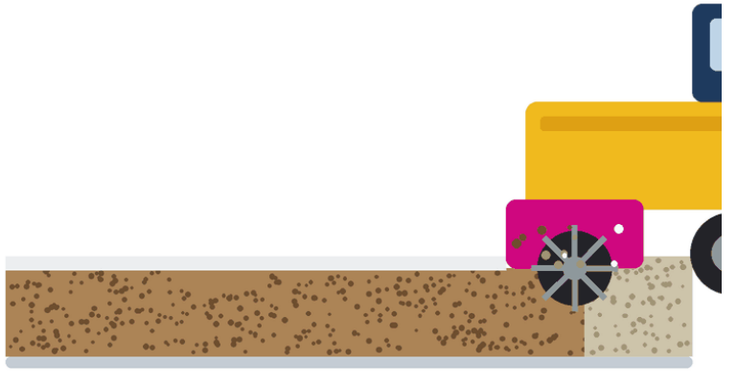
φ 30° → 74°, c 92 → 28 kPa z jedné zkoušky prostým tlakem a sklonu lomu. φ = 59–74° = křehké porušení, ne tření; pevnost rostla do 10 % vápna.

2 **CI expanzivní + 20 % popílku [7]**

c 71 → 32 kPa, φ 6° → 13°: naředění jílu nesoudržným popílkem (c = 8 kPa, φ = 31°); optimum ≈ 25 % [8].

Tatáž změna struktury může podle metodiky vést k jinému rozdělení pevnosti mezi c a φ.

Metodika, technologie a praxe



Rozptyl dělá hlavně metodika zkoušek

1. **Odvodněná ≥ neodvodněná pevnost**
   překonsolidované vzorky křehké; nenasycené dávají nereálné „φu“ [10]

2. **Zrání pod napětím**
   jíly: σ′p +38–90 %, c′ úměrně, φ′ beze změny [10]; písek + 3 % cementu: φ′ 31 → 33° [23]

3. **Rychlé UU zkoušky nekonzistentní**
   laterit: c = 18–113 kPa, φ = 2–27° pro tutéž zeminu [12]; CH + cement: φu 4–36° [24]

4. **c = qu/2 není c′**
   u cementu řádově stovky kPa (10 % cementu, 7 d: 1 330 kPa) [13]

Pro návrh

Konsolidované zkoušky na vzorcích připravených a ošetřovaných jako na stavbě, v rozsahu napětí odpovídajícím skutečnému zatížení

Dávka, zrání, hutnění a trvanlivost

3 % — **Optimum dávky**

Dorosol C30: φ max. 29,7° při 3 %, pak klesá, c roste dál [3]; optimum i u popílku [8]

3 dny — **Doba zrání**

CKD: φ konečný po 3 dnech, dál roste jen c [5]; zpoždění hutnění 24 h škodí cementu [18]

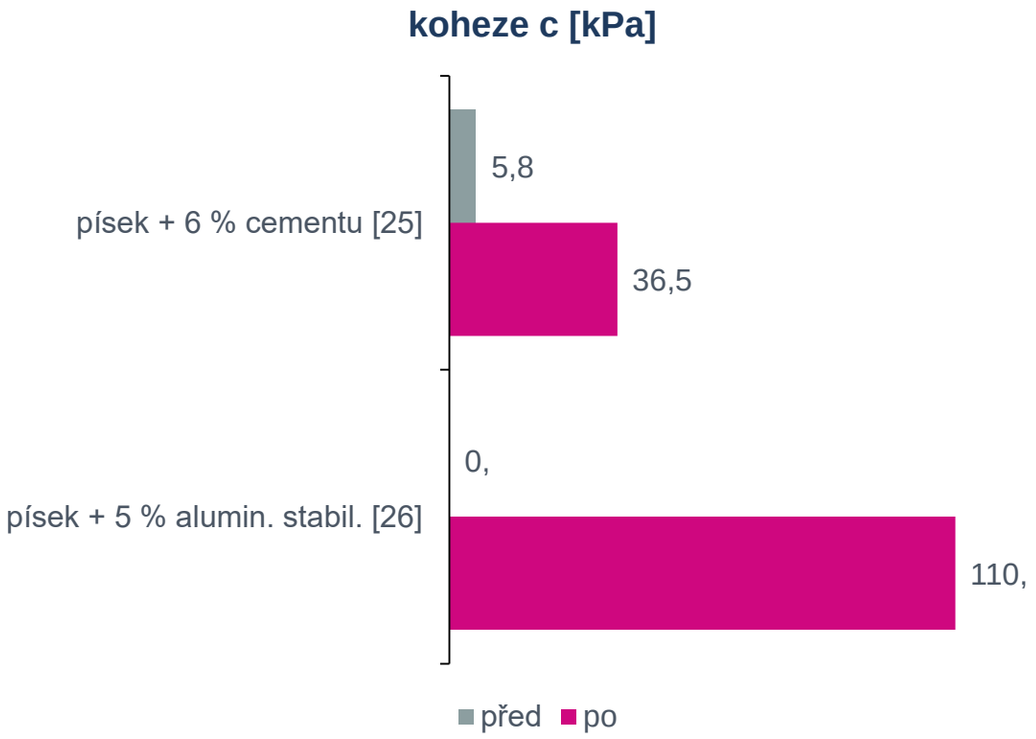
+20 % — **Hutnicí energie**

PS modifikovaný: qu +20 %, Eoed až +20 %, Edef v terénu +4–28 % [14]

14 cyklů — **Mráz a agresivní voda**

8 % cementu: c 86 → 47 kPa, φ 53 → 43° [2]; sírany a Mg soli: pevnost −50 % i víc [20]

Nesoudržné zeminy reagují méně jednoznačně



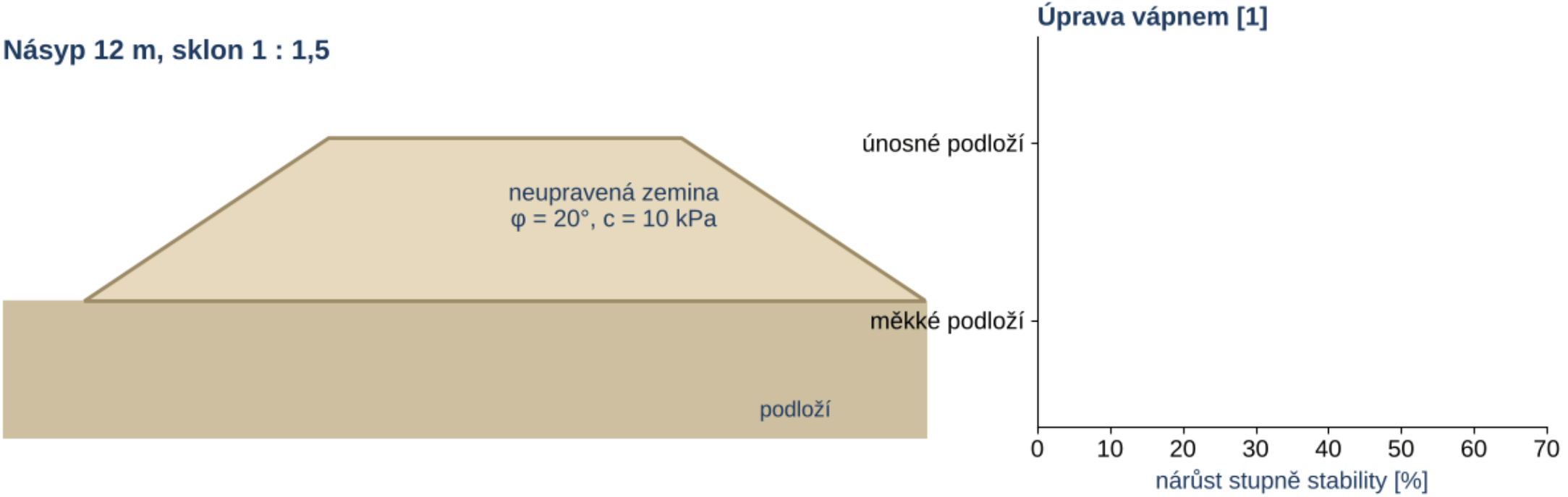
φ′ 33,3° → 34,4°
písek + 6 % cementu; až 47,7° teprve s PP vlákny [25]

φ 38,0° → 34,7°
písek + aluminátový stabilizátor: c z nuly na 110 kPa [26]

φ 35,6° → 43°
štěrkovitý písek + 3 % cementu, 21 d, c = 39 kPa [27]

φ až 53,6°
písek s popílkem [28]; vlákna: zdánlivá c ≤ 18,7 kPa [29]

Co to znamená pro stabilitu násypu



Návrhově jen φ = 22°, c = 53 kPa – výrazně méně než z laboratoře [1]. Účinnost klesá s kvalitou podloží; trhliny podstatné jen do výšky ≈ 6 m.

Co z toho plyne pro praxi

Návrhové c a φ upravených zemin stanovovat konsolidovanými zkouškami na konkrétní zemině a receptuře – literární hodnoty jen orientačně

1	**c roste 1,7× až 40×**	u většiny zemin převažuje nárůst koheze nad změnou φ
2	**φ se mění méně a nejednoznačně**	φ′ ≈ 28–38° bez ohledu na pojivo; výrazný nárůst u cementu a CKD
3	**Typ III není vlastnost vápna**	naředění nesoudržnou příměsí nebo metodika z prosté pevnosti
4	**Optimum, zrání, hutnění, trvanlivost**	účinek pojiva závisí na všech těchto faktorech
5	**Stabilita násypu +25 až +61 %**	podle kvality podloží, i s konzervativními parametry

Děkuji za pozornost

