



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

STAVEBNÁ FAKULTA

Meno a priezvisko:

Ing. Eliška Kučová

Autoreferát dizertačnej práce:

**Stanovenie charakteristických hodnôt
geotechnických parametrov zemín dynamickou
penetračnou skúškou**

na získanie akademického titulu: Philosophiae doctor - PhD.

v doktorandskom študijnom programe: Teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore: Stavebníctvo

Forma štúdia: Denná

Miesto a dátum:

Bratislava, 24.07.2023



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedra geotechniky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Eliška Kučová
Katedra geotechniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Jana Frankovská, PhD.
Katedra geotechniky
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa 24.08.2023 o 11:00 h na Katedre geotechniky
Svf STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05 Bratislava

.....
Prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan fakulty

Obsah

1.	Úvod	4
2.	Prehľad súčasného stavu	4
3.	Ciele záverečnej práce	5
4.	Materiál	6
4.1	Dunajské štrky	6
4.2	Hronské štrky	7
5.	Metodika práce	9
5.1	Terénne skúšky	9
5.2	Laboratórne skúšky	9
5.3	Stanovenie charakteristickej hodnoty geotechnických parametrov zemín	10
6.	Výsledky terénnych skúšok	12
6.1	Vyhodnotenie charakteristickej hodnoty geotechnických parametrov	12
6.2	Vplyv výberu korelácií na vyhodnotenie parametrov zemín	13
6.3	Uhol šmykovej pevnosti	15
6.4	Deformačný modul	20
6.5	Vplyv genézy	24
7	Záver	26
8	Literatúra	27

1. Úvod

Fyzikálne a mechanické vlastnosti zemín a hornín sú vstupným údajom potrebným pre návrh geotechnických konštrukcií. Zeminy a horniny, na rozdiel od vyrobených materiálov, oplývajú veľkou priestorovou variabilitou, v dôsledku čoho nie je vždy možné odobrať reprezentatívnu a pri niektorých zeminách aj neporušenú vzorku. Preto sa okrem laboratórneho skúšania využívajú na stanovenie geotechnických parametrov zemín aj terénne skúšky.

Medzi najpoužívanejšie terénne skúšky na skúšanie hrubozrnných zemín patrí aj dynamická penetračná skúška. Princíp skúšky spočíva v meraní odporu zeminy voči dynamickému zarážaniu tyče zakončenej kužeľovým hrotom. Skúška je relatívne jednoduchá a možno ju využiť aj v menej dostupnom teréne.

Z výsledkov dynamickej penetrácie možno pomocou korelácií odvodiť vybrané geotechnické parametre štrkov a pieskov. Na odvodenie týchto vlastností sú v literatúre uvedené viaceré korelácie, pričom len niektoré z nich zohľadňujú genézu zemín.

Dizertačná práca je zameraná na analýzu geotechnických parametrov štrkov a pieskov, ktoré boli vyhodnotené z výsledkov dynamických penetrácií realizovaných v rámci inžiniersko-geologického prieskumu dunajských a hrnských štrkov. Výsledky boli štatisticky spracované a pre jednotlivé triedy zemín boli vyhodnotené charakteristické hodnoty parametrov. Pre zistenie vplyvu genézy na interpretáciu výsledkov dynamickej penetrácie boli charakteristické hodnoty parametrov porovnané s inými koreláciami, výsledkami laboratórnych skúšok a tabuľkovými (nominálnymi) odporúčanými hodnotami.

2. Prehľad súčasného stavu

Dynamická penetračná skúška (DP) je na Slovensku často využívaná v rámci inžiniersko-geologického prieskumu pre pozemné a inžinierske stavby na skúšanie hrubozrnných zemín (Obert, 1974; Švasta, Cuninka, 1975; Blažo, 1982; Jesenák, 1986; Blažo, 1989; Garaj, 1990; Danko, 2001; Smolař, 2009; Kuvik, 2015; Dobrovoda, 2019; Kubiš, 2019). Z výsledkov skúšky (N a q_{dyn}) sa použitím vhodných korelácií dajú vyhodnotiť vybrané geotechnické parametre štrkov a pieskov - relatívnu uľahnutosť (I_D), uhol šmykovej pevnosti (φ_{ef}), deformačný modul (E_{def}). Korelácie na odvodenie týchto parametrov majú regionálnu (slovenskú) a medzinárodnú použiteľnosť.

Korelácie, ktoré sa používajú medzinárodne sú uvedené v normách (STN EN 1997-2:2008, DIN 4094-3:2002, EN ISO 22476-2, PN-B-04552:2002, STN 72 1032: 1997), kde sa najčastejšie zmieňuje korelácia pre odvodenie relatívnej uľahnutosti, ktorá vychádza priamo z výsledkov počtu úderov (N_{DP}). Na vyhodnotenie uhla šmykovej pevnosti sú v normách uvedené nepriame korelácie vychádzajúce z relatívnej uľahnutosti hrubozrnných zemín. Tieto korelácie spôsobujú pri vyhodnocovaní neistoty φ_{ef} a preto sa odporúčajú použiť priame korelácie (Vrettos, Papamichael, 2018). Ďalšie korelácie pre odvodenie uhla šmykovej pevnosti uvádzajú aj iní autori (Tolia, 1977;

Schnaid, 2009; Carter, Bentley, 2016; Sanglerat, 1972; Lobo, 2009), ktorí sa venovali problematike vyhodnocovania ϕ_{ef} z výsledkov štandardnej penetračnej skúšky (SPT).

Priame korelácie medzi výsledkami DP skúšky a vybranými parametrami zemín sa používajú na Slovensku (Matys a kol., 1990; Obert, 1974; Švasta, Cuninka, 1975). Tieto korelácie vychádzajú z výsledkov dynamického penetračného odporu (q_{dyn}), ktorý na rozdiel od počtu úderov zohľadňuje vplyv hladiny podzemnej vody, trenie na tyči a pribúdajúcu tiaž sondy s narastajúcou hĺbkou. Väčšina z publikovaných korelácií uvádza obmedzenie použiteľnosti na základe triedy zeminy, prípadne vlhkosti. Málo korelácií však špecifikuje aj genézu zeminy.

Geotechnické parametre sú dôležitým údajom pre návrh geotechnických konštrukcií. Do návrhu vstupuje ich charakteristická hodnota, ktorú je možné odvodiť použitím štatistických metód. Vyhodnotenie charakteristickej hodnoty analyzovali viacerí autori (Schneider, 2010; Bond, 2011; Pohl, 2011; Frankovská, 2016; Orr, 2019; Prästings, 2019), ktorí skúmali štatistické postupy vyhodnotenia charakteristickej hodnoty v prvej generácii Eurokódu 7 (EN 1997-1:2005).

3. Ciele záverečnej práce

Cieľom dizertačnej práce je analyzovať využitie korelácií pre dynamickú penetračnú skúšku, ktoré sa používajú na vyhodnotenie geotechnických parametrov hrubozrnných zemín a odvodenie ich charakteristickej hodnoty.

Pre odvodenie charakteristickej hodnoty bol v záverečnej práci použitý štatistický postup odporúčaný v druhej generácii Eurokódu 7 (EN 1997-1:2024), ktorý pracuje so základnými štatistickými údajmi.

Ciele záverečnej práce sa dajú zhrnúť do nasledujúcich bodov:

1. Analýza korelácií pre dynamickú penetračnú skúšku (DP) na Slovensku a v zahraničí pre jednotlivé geotechnické parametre hrubozrnných zemín
2. Použitie štatistických metód a aplikácia postupu na stanovenie charakteristickej hodnoty geotechnických parametrov zemín v druhej generácii Eurokódu 7 pri vyhodnocovaní výsledkov dynamickej penetrácie
3. Analýza vplyvu genézy na interpretáciu výsledkov dynamickej penetrácie
4. Porovnanie výsledkov odvodených šmykových a deformačných parametrov hrubozrnných zemín z DP s laboratórnymi výsledkami a odporúčanými hodnotami v STN 73 1001:1987
5. Odporúčania pre tvorbu národnej prílohy ku STN EN 1997-2: 2024
6. Odporúčania na použitie vhodných korelácií pre jednotlivé geotechnické parametre a odporúčania pre ďalší výskum

4. Materiál

Pre analýzu geotechnických parametrov boli vybrané výsledky dynamických penetračných skúšok riečnych hrubozrnných zemín – dunajské, hronské štrky a piesky. Súborný výsledok dynamických penetračných skúšok sme vybrali zo zdrojov, ktoré obsahovali všetky podstatné informácie potrebné k vyhodnoteniu geotechnických vlastností zemín.

4.1 Dunajské štrky

Na skúšanie dunajských štrkov boli použité dynamické penetrácie typu DPM, DPH a DPSH. Tieto skúšky boli realizované vo viacerých častiach Bratislavy, v úseku diaľnice D4 – Rusovce, Ivanka Sever a v úseku diaľnice D1. Z geologického hľadiska je oblasť tvorená neogénymi a kvartérnymi zeminami. Neogénne zeminy tvoria podložie kvartérnym sedimentom, ktoré v sa skúmanej oblasti nachádzajú vo forme štrkopiesčitej výplne údolnej nivy rieky Dunaj.

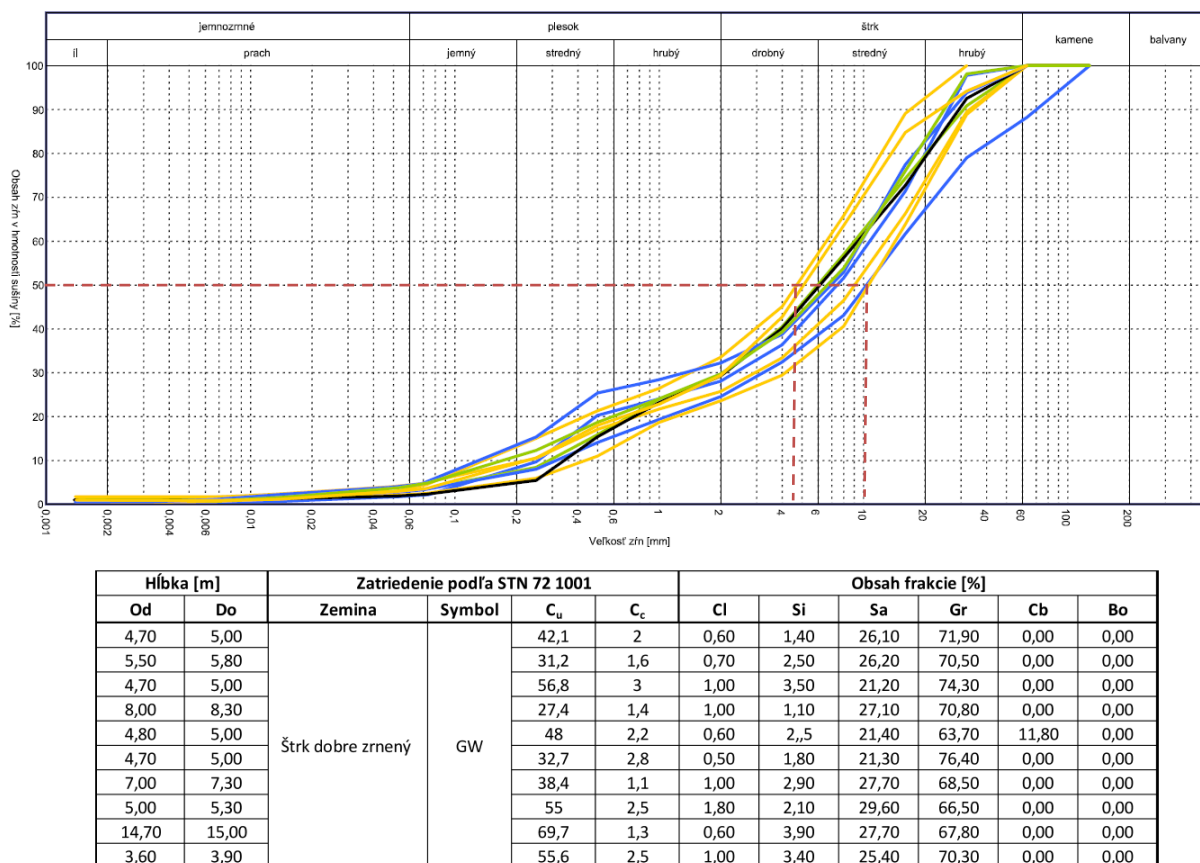
Dunajské štrky a piesky spadajú do kategórie riečnych sedimentov nížinných tokov, kde má tok rieky menšiu rýchlosť a prevláda akumulácia a sedimentačná činnosť. Tieto sedimenty sú charakteristické hladkými a jemnejšími štrkovitými frakciami (obr. 4.1 a 4.2). V skúmanej oblasti sa zrná štrkovitých zemín vyznačujú guľatými, elipsovými alebo vajcovitými tvarmi s veľkosťou 1-5 cm. Z náplavových pieskov sú najviac zastúpené piesky tried S1, S2 a S3.



Obrázok 4.1 Fotodokumentácia dunajských štrkov

Dobre zrnené štrky G1 (obr. 4.2) majú obsah štrkovej frakcie od 63 do 76%. Priemer zŕn d_{50} hrnských štrkov G1 je zastúpený v rozsahu 5 – 10 mm.

Zrnlitosť dunajských štrkov G1/GW



Obrázok 4.2 Krivky zrnitosti dunajských štrkov triedy G1

4.2 Hronské štrky

Dynamické penetrácie skúšky sa realizovali v rámci inžinierskogeologického prieskumu hrnských štrkov v úseku rýchlostnej cesty R1 Banská Bystrica – Slovenská Ľupča.

Hronské štrky patria do kategórie riečnych sedimentov horských tokov. Tieto toky sa vyznačujú prevládajúcou eróznou činnosťou a premiestňovaním materiálu. V dôsledku toho, sú štrky a piesky korytovej fácie a terasové štrky hrubozrnejšie, menej opracované, čiastočne zaoblené a majú drsnejší povrch (obr. 4.3).

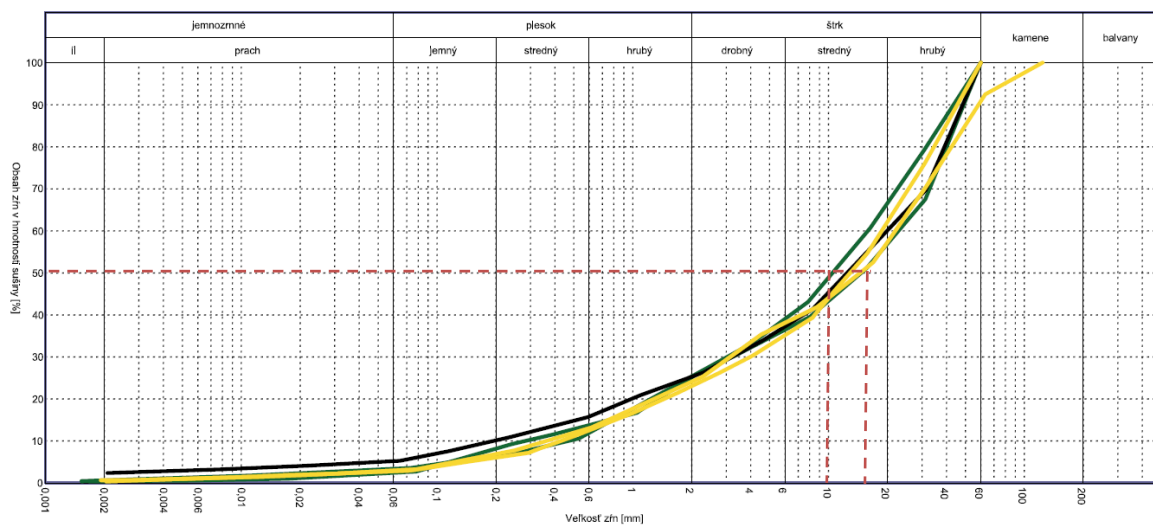
Štrky sú v skúmanej oblasti široko zastúpené a predstavujú všetky typy štrkov od G1/GW až po G5/GC. Náplavové piesky korytovej fácie predstavujú zle zrnené piesky, piesky s prímiesou jemnozrnej zeminy až piesky ílovité (S2/SP, S3/S-F, S5/SC).

Dobre zrnené štrky G1 (obr. 4.4) majú obsah štrkovej frakcie od 67 do 75%. Priemer zŕn d_{50} hrnských štrkov G1 je zastúpený v rozsahu 10 – 16 mm.



Obrázok 4.3 Fotodokumentácia doplnkového prieskumného vrtu pre rýchlostnú cestu R1 Banská Bystrica – Slovenská Ľupča (Kubiš, 2019)

Zrnitosť hrnských štrkov G1/GW



Hĺbka [m]		Zatriedenie podľa STN 72 1001				Obsah frakcie [%]					
Od	Do	Zemina	Symbol	C _u	C _c	Cl	Si	Sa	Gr	Cb	Bo
4,00	4,50	Štrk dobre zrný	GW	104,2	1,7	1,00	3,00	22,60	73,40	0,00	0,00
4,00	5,00			107,1	2,7	1,20	3,60	20,20	75,10	0,00	0,00
2,00	3,00			44,4	1,4	1,60	3,00	21,80	73,70	0,00	0,00
1,50	2,00			49,8	2,1	0,90	2,30	20,40	76,30	0,00	0,00
2,60	3,40			69	1,2	0,90	2,60	21,80	67,20	7,40	0,00

Obrázok 4.4 Krivky zrnitosti hrnských štrkov triedy G1

5. Metodika práce

Na účely analýzy geotechnických parametrov hrubozrnných zemín sú v práci použité výsledky terénnych skúšok dynamickej penetrácie a laboratórne skúšky veľkorozmerového šmyku a veľkorozmerovej skúšky stlačiteľnosti.

5.1 Terénne skúšky

V teréne boli realizované viaceré skúšky pomocou ťažkej (DPH a DPSH) a stredne ťažkej (DPM) dynamickej penetrácie (obr. 5.1). Skúšky stredne ťažkej dynamickej penetrácie boli realizované katedrou geotechniky Stavebnej fakulty STU v Bratislave na prieskum dunajských štrkov. Skúšky ťažkej dynamickej penetrácie realizovali viaceré subjekty v rámci inžinierskogeologického prieskumu dunajských a hronských sedimentov. Skúšky boli vyhodnotené v súlade s EN ISO 22476-2.



Obrázok 5.1 Dynamická penetračná skúška typu DPM

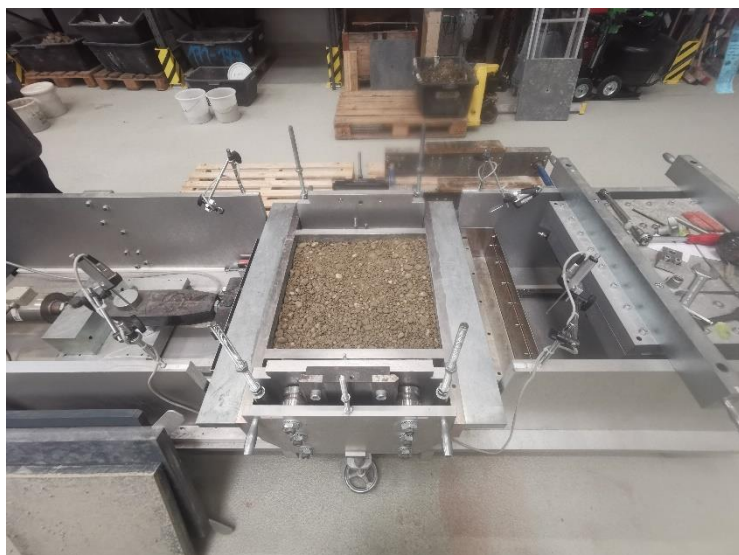
5.2 Laboratórne skúšky

Na overenie výsledkov terénnych skúšok boli v laboratóriu realizované veľkorozmerové krabicové šmykové skúšky a veľkorozmerové skúšky stlačiteľnosti (obr. 5.2). Metodika skúšok je podrobne popísaná v publikácii *Manual of Soil Laboratory Testing* (Head, 1994).

Veľkorozmerový krabicový šmyk bol použitý na overenie šmykových parametrov (φ_{ef}) vybraných vzoriek zemín. V laboratóriu katedry geotechniky sme realizovali sériu skúšok na veľkorozmerovom krabicovom šmyku typu Shearmatic 300, ktorý je vhodný na skúšanie hrubozrnných zemín obsahujúcich zrná do 15 mm.

V geotechnickom laboratóriu TU Viedeň sme realizovali šmykové skúšky na prístroji Wille Geotechnik ADS-500, ktorý umožňuje skúšať hrubozrnné zeminy do priemeru zŕn 32 mm. Skúšky sa uskutočnili v súlade s STN EN ISO 17892-5 a ČSN 72 1030:1987.

Na stanovenie deformačného modulu sme v laboratóriu geotechniky TU Viedeň simulovali **veľkorozmerovú oedometrickú skúšku** (obr. 5.2). Skúšky sa realizovali v súlade s postupom opísaným v STN EN ISO 17892-5.



Obrázok 5.2 Laboratórne skúšky hrubozrnných zemín

(vľavo – veľkorozmerová krabicová šmyková skúška, vpravo - veľkorozmerová skúška stlačiteľnosti)

5.3 Stanovenie charakteristickej hodnoty geotechnických parametrov zemín

Charakteristická hodnota X_k je druhej generácií Eurokódu 7 (EN 1997:2024) definovaná ako hodnota ovplyvňujúca medzné stavy, ktorá zodpovedá špecifickému kvartilu predpokladaného štatistického rozdelenia konkrétnej vlastnosti zeminy.

V dizertačnej práci je charakteristická hodnota fyzikálnych a mechanických vlastností zemín vyhodnotená podľa vzťahu 5.1 a odporúčaných štatistických postupov v EC 7 (EN 1997:2024).

$$X_k = X_{mean}[1 \mp k_n V_x] = X_{mean} \left[\frac{1 \mp k_n \sigma_x}{X_{mean}} \right] \quad (5.1)$$

kde

- X_{mean} je priemerná hodnota z nameraných hodnôt vlastností zeminy
- V_x je koeficient variácie nameraných hodnôt vlastností zeminy
- k_n je koeficient závisiaci od počtu nameraných hodnôt (n) vlastností zeminy
- σ_x je štandardná odchýlka nameraných hodnôt vlastností zeminy

Aritmetický priemer (X_{mean}) sa vypočítal podľa vzťahu 5.2, kde X_i predstavuje namerané hodnoty odvodených vlastností zemín a n je počet meraní.

$$X_{mean} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (5.2)$$

Podľa EC 7 (EN 1997:2024) môže byť postup vyhodnotenia X_k aplikovaný pre prípady, keď koeficient variácie V_x je aj nie je definovaný. Pre prípad neznámeho koeficientu variácie sú v EC 7 uvedené dva postupy vyhodnotenia.

V prípade, že koeficient variácie nie je známy, postupujeme podľa analytického výpočtu V_x podľa vzťahu 5.3, kde s_x je štandardná odchýlka nameraných hodnôt vlastnosti zemín.

$$V_x = \frac{s_x}{x_{mean}}; s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{mean})^2}{n-1}} \quad (5.3)$$

Hodnoty koeficientu k_n možno analyticky vypočítať podľa vzťahov v druhej generácii EC 7, alebo ich možno stanoviť z tab. 5.1.

Tabuľka 5.1 Vybrané hodnoty t_{95n-1} a k_n na vyhodnotenie charakteristickej hodnoty (EN 1997:2024)

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
t_{95n-1}	6,31	2,92	2,35	2,13	2,02	1,94	1,89	1,86	1,83	1,80
k_n	4,46	1,69	1,18	0,95	0,82	0,73	0,67	0,62	0,58	0,52
N	14	16	18	20	25	30	35	40	50	100
t_{95n-1}	1,77	1,75	1,74	1,73	1,71	1,70	1,69	1,68	1,68	1,66
k_n	0,47	0,44	0,41	0,39	0,34	0,31	0,29	0,27	0,24	0,17

6. Výsledky terénnych skúšok

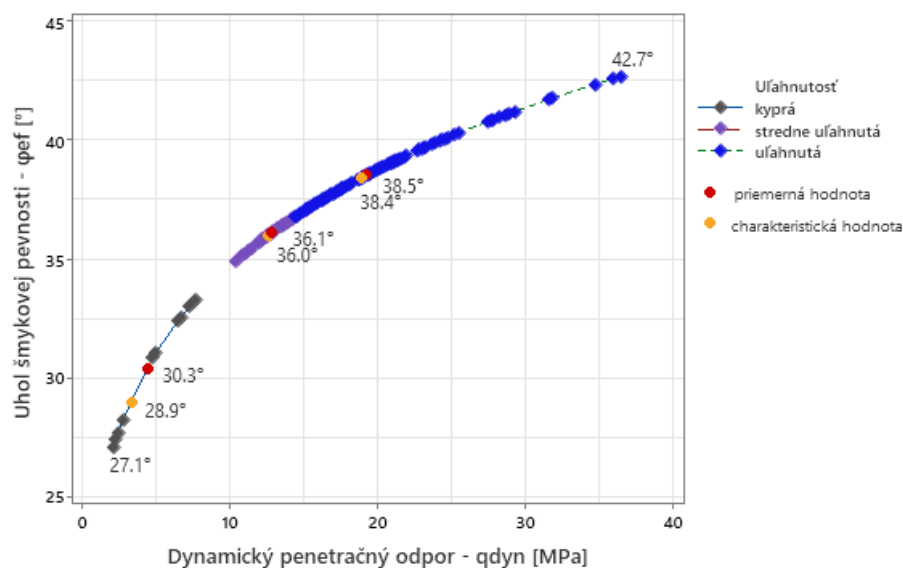
Z výsledkov dynamických penetračných skúšok boli odvodené šmykové a deformačné parametre hrubozrnných zemín - I_D , φ_{ef} , E_{def} . Výsledky geotechnických parametrov boli štatisticky spracované a boli vyhodnotené ich charakteristické hodnoty pre jednotlivé inžinierskogeologické triedy dunajských, hrnských štrkov a pieskov v súlade s druhou generáciou Eurokódu 7 (EN 1997-1:2024).

6.1 Vyhodnotenie charakteristickej hodnoty geotechnických parametrov

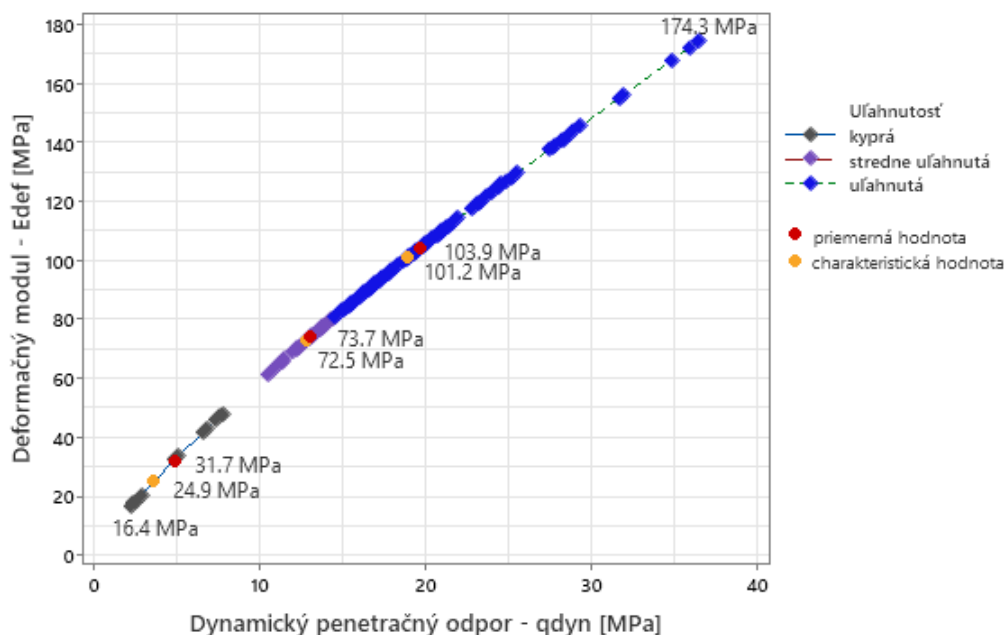
Charakteristické hodnoty geotechnických parametrov boli štatisticky vyhodnotené pre jednotlivé inžinierskogeologické triedy dunajských, hrnských štrkov a pieskov. Výsledky a porovnanie charakteristickej a priemernej hodnoty sú uvedené v tab. 6.1 a na obr. 6.1 na príklade vyhodnotenia šmykových a deformačných parametrov dunajských štrkov triedy G2.

Tabuľka 6.1 Výsledky a opisná štatistika φ_{ef} a E_{def} dunajských štrkov triedy G2/GP

Zemina	Relatívna uľahnutosť	Početnosť (n)	Smerodajná odchýlka (s_x)	Koeficient variácie (V_x)	φ_{ef} [°]		
					$\varphi_{ef,min} - \varphi_{ef,max}$	$\varphi_{ef,mean}$	$\varphi_{ef,k}$
G2/GP	Kyprá	12	2,58	0,09	27,1 – 33,3	30,3	28,9
	Stredne uľahnutá	52	0,47	0,01	34,9 – 36,8	36,1	36,0
	Uľahnutá	166	1,22	0,03	36,8 – 42,7	38,5	38,4
Zemina	Relatívna uľahnutosť	Početnosť (n)	Smerodajná odchýlka (s_x)	Koeficient variácie (V_x)	E_{def} [MPa]		
					$E_{def,min} - E_{def,max}$	$E_{def,mean}$	$E_{def,k}$
G2/GP	Kyprá	12	13,02	0,41	16,4 – 47,9	31,7	24,9
	Stredne uľahnutá	52	4,89	0,07	61,5 – 80,9	73,7	72,5
	Uľahnutá	166	18,28	0,18	81 – 174,3	103,9	101,2



Obrázok 6.1 Deformačný modul štrkov dunajských štrkov triedy G2/GP



Obrázok 6.2 Deformačný modul štrkov dunajských štrkov triedy G2/GP

Z porovnania charakteristických a priemerných hodnôt uhla šmykovej pevnosti vidieť najväčší rozdiel je pri kyprých štrkoch - 2°. Pre stredne uľahnuté a uľahnuté štrky G2 nie sú rozdiely medzi $\phi_{ef,mean}$ a $\phi_{ef,k}$ významné - približne 0,1°.

Porovnaním charakteristickej a priemernej hodnoty deformačných modulov vidieť významnejšie rozdiely pre kypré a uľahnuté štrky G2. Rozdiel medzi $E_{def,mean}$ a $E_{def,k}$ pre kypré štrky je 6,75 MPa. U stredne uľahnutých štrkov je rozdiel medzi charakteristickou a priemernou hodnotou 1,2 MPa. Pre uľahnuté štrky je rozdiel medzi $E_{def,mean}$ a $E_{def,k}$ 2,7 MPa.

Výsledky ostatných inžinierskogeologických tried dunajských a hronských hrubozrnných zemín sú podrobnejšie opísané v dizertačnej práci.

6.2 Vplyv výberu korelácií na vyhodnotenie parametrov zemín

Na vyhodnotenie geotechnických parametrov má veľký vplyv výber korelácie. Korelácie pre DP skúšku vychádzajú buď z nameraného počtu úderov N alebo dynamického penetračného odporu q_{dyn} , v dôsledku čoho môžu byť hodnoty geotechnických parametrov vyhodnotené rozdielne.

Relatívna uľahnutosť bola vyhodnotená použitím vybraných korelácií pre N a q_{dyn} (tab. 6.2 a 6.3).

Tabuľka 6.2 Aplikované korelácie na vyhodnotenie I_D z N_{10}

Zdroj	Zemina	Relatívna uľahnutosť (I_D) odvodená z N_{10}		
		Kyprá	Stredne uľahnutá	Uľahnutá
Obert	Štrky	≤ 4	4 - 15	≥ 15
	Piesky	≤ 3	3 - 15	≥ 15
	Korelácia	Koeficienty		
Eurokód 7	$I_D = C_1 + C_2 \times \log N \quad [-]$	Štrk dobre zrnený nad HPV ($C_U \geq 6$)	C_1	-0,14
			C_2	0,55
		Piesok zle zrnený ($C_U \leq 3$) nad HPV	C_1	0,21
			C_2	0,23
		Piesok zle zrnený ($C_U \leq 3$) pod HPV	C_1	0,23
			C_2	0,38
Švasta	$I_D = a \times (q_{dyn})^b \quad [-]$	Prachovitý, ílovitý piesok	a	0,16
			b	0,7
		jemný piesok	a	0,15
			b	0,67
		Strednozrnný. Hrubozrnný piesok	a	0,14
			b	0,63
		Štrkovité zeminy, štrkopiesky	a	0,13
			b	0,6

Tabuľka 6.3 Aplikované korelácie na vyhodnotenie I_D z q_{dyn}

Zdroj	Zemina	Relatívna uľahnutosť (I_D) odvodená z q_{dyn}		
		Kyprá	Stredne uľahnutá	Uľahnutá
Obert	Štrky zle zrnené	≤ 4	4 - 14	≥ 14
	Štrky až piesčité štrky	$< 11,2$	11,2 - 23,0	$> 23,0$
	Siltovité piesky S4, SM	$\leq 3,0$	3,0 - 10,0	$\geq 10,0$
Ohde, Schubert, Haefeli	Fluviálne štrky	2,5 – 5,0	$> 5,0 - 10,0$	$> 10,0$

Vplyv zohľadnenia N alebo q_{dyn} na stanovenie geotechnických parametrov je ukázaný v tab. 6.4, kde je príklad vyhodnotenia relatívnej uľahnutosti z výsledkov stredne ťažkej dynamickej penetrácie vo vybranom vrte pre rôzne vrstvy zeminy.

Z počtu úderov N boli zeminy pod hladinou podzemnej vody vyhodnotené ako stredne uľahnuté, pričom z q_{dyn} boli zeminy vyhodnotené ako kypré (tab. 6.4). Počet úderov N nezohľadňuje žiadne fyzikálne vplyvy, ako je napr. výskyt trenia na tyči a hladinu podzemnej vody. Výsledky q_{dyn} sú hodnoty zohľadňujúce tieto vplyvy a nárast tiaže súpravy s pribúdajúcou hĺbkou.

Ak sú parametre zemín vyhodnocované z výsledkov DP nad hladinou podzemnej vody bez trenia na plášti, tak nie je rozhodujúce, či sa použijú korelácie z N alebo q_{dyn} (tab. 6.4). V prípade, že sa zemina nachádza pod hladinou podzemnej vody alebo je namerané iné ako nulové trenie na tyči, je lepšie použiť korelácie pre q_{dyn} , ktoré zohľadňujú zmieňované fyzikálne vplyvy.

Pri vyhodnocovaní relatívnej uľahnutosti hrubozrnných zemín z dynamických penetračných skúšok odporúčame použiť koreláciu podľa Švasty uvedenú v tab. 6.1 (Švasta, 1978).

Tabuľka 6.4 Vyhodnotenie relatívnej uľahnutosti použitím rôznych korelácií

Zemina	Výsledky		Relatívna uľahnutosť				
	N_{10}	q_{dyn}	z N		z q_{dyn}		
	[-]	[MPa]	Obert	EC 7	Švasta	Obert	Ohde a kol.
G2/GP*	12,88	10,55	Stredne uľahnutá	Stredne uľahnutá	Stredne uľahnutá	Stredne uľahnutá	Stredne uľahnutá
G5/GC	8,67	4,13	Stredne uľahnutá	Stredne uľahnutá	Kyprá	Kyprá	Kyprá
S4/SM	5,13	1,95	Stredne uľahnutá	Stredne uľahnutá	Kyprá	Kyprá	-
G5/GC	5,54	2,21	Stredne uľahnutá	Kyprá	Kyprá	Kyprá	Kyprá
S4/SM	1,74	1,87	Kyprá	Kyprá	Kyprá	Kyprá	-
G5/GC	7,09	3,88	Stredne uľahnutá	-	Kyprá	Kyprá	Kyprá
G2/GP	10,25	4,78	Stredne uľahnutá	-	Kyprá	Stredne uľahnutá	Kyprá
G3/GF	7,90	3,51	Stredne uľahnutá	-	Kyprá	Kyprá	Kyprá
Poznámka: * Zeminy nad hladinou podzemnej vody							

6.3 Uhol šmykovej pevnosti

Uhol šmykovej pevnosti dunajských a hrnských hrubozrnných zemín bol stanovený použitím priamych korelácií, ktoré vychádzajú priamo z výsledkov N (STN 72 1032 v tab. 7.1 – 7.4) a q_{dyn} (Švasta v tab. 8.4 – 8.7). Výsledky uhla šmykovej pevnosti sú v tabuľkách zatriedené podľa jednotlivých triedy a uľahnutosti hrubozrnných zemín.

Tab. 6.5 sú zosumarizované výsledky φ_{ef} kyprých až uľahnutých **dunajských štrkov** inžinierskogeologických tried G1 až G5.

Podľa Švastovej korelácie dosahujú hodnoty uhla šmykovej pevnosti **kyprých štrkov** od 30,3° (pre G2) do 32,9° (pre G3). Podľa korelácie z STN 72 1032 dosahujú uhly šmykovej pevnosti nižšie hodnoty, od 25,3° do 32,3°. Zahraničné korelácie (BS 8002, DIN 4094-3) odporúčajú použiť pre kypré štrky hodnotu 30°.

Na základe analýzy a porovnania výsledkov so zahraničnými koreláciami je vhodné pre kypré štrky všetkých tried uvažovať s tabuľkovou hodnotou 30°.

Pre **stredne uľahnuté štrky** je uhol šmykovej pevnosti, odvodený podľa Švastovej korelácie, v rozsahu 32° (pre G5) – 36° (pre G2). Použitím korelácií v STN 72 1032 dosahuje uhol šmykovej pevnosti 37° (G2) až 38° (G3, G1). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú hodnoty φ_{ef} od

30° (pre G5) do 38,5° (pre G1). Použitím Britskej a nemeckej korelácie sú hodnoty φ_{ef} pre stredne uľahnuté štrky v rozsahu 34° - 36° (tab. 6.5).

Pre **uľahnuté štrky** má uhol šmykovej pevnosti, odvodený podľa Švasty, hodnoty 39,9° (pre G3), 39,4° (pre G2) a 40,2° (pre G1). Podľa korelácií v STN 72 1032 dosahuje uhol šmykovej pevnosti 37° (G2) až 38° (G3, G1). Pri štrkoch s prímiesou jemnozrnnej zeminy G3/G-F sa výsledky φ_{ef} (obr. 6.3) blížia k hodnotám uhla šmykovej pevnosti dobre zrnených štrkov G1 (tab. 6.5). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú hodnoty φ_{ef} od 30° (pre G5) do 41,5° (pre G1). Britská a nemecká korelácia odporúčajú použiť pre uľahnuté štrky so zaoblenými zrnami hodnoty φ_{ef} v rozsahu 35° - 40°. Laboratórnymi skúškami sa stanovili hodnoty φ_{ef} od 41 do 51,9° pre triedy G1, G2 a G3 (tab. 6.5).

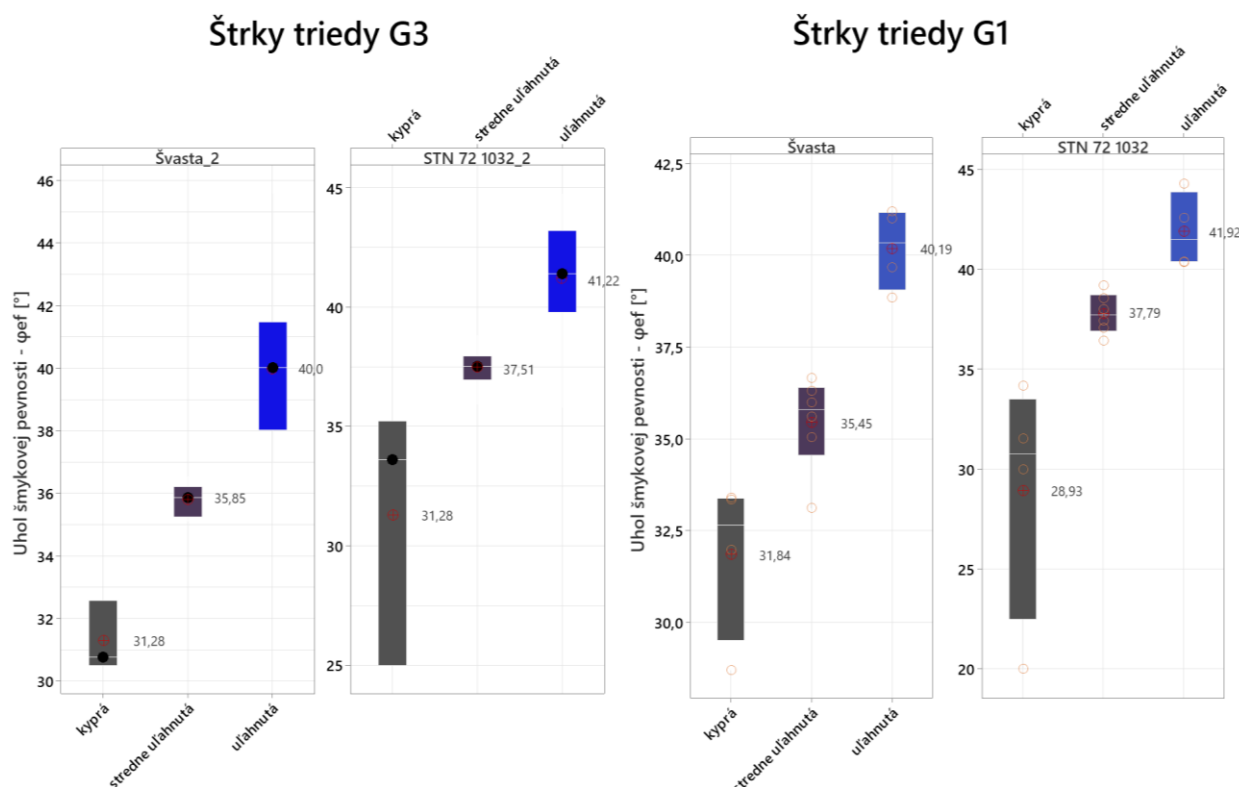
Na základe analýzy výsledkov a ich porovnania so zahraničnými koreláciami je vhodné pre prehodnotiť tabuľkovú hodnotu φ_{ef} stredne uľahnuté a uľahnuté štrky triedy G3, G4 a G5.

Na vyhodnotenie uhla šmykovej pevnosti štrkov z dynamických penetračných skúšok odporúčame použiť koreláciu podľa Švasty uvedenú v tab. 2.8 (Švasta, 1978):

$$\varphi_{ef} = p \times (q_{dyn})^r \quad [^\circ] \quad \text{kde} \quad p = 24; r = 0,16$$

Tabuľka 6.5 Porovnanie korelácií pre φ_{ef} s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 a inými koreláciami (dunajské štrky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	$\varphi_{ef} [^\circ]$					Tabuľkové hodnoty
		Švasta	STN 72 1032	Lab. skúšky	BS 8002	EC7/DIN	STN 73 1001
G1/GW	Kyprá	31,8	28,9	-	30	30	-
	Stredne uľahnutá	35,5	37,8	-	34	36	36 – 41 (38,5)
	Uľahnutá	40,2	41,9	40,9/42,8	38	40	39 – 44 (41,5)
G2/GP	Kyprá	30,3	25,3	-	30	30	-
	Stredne uľahnutá	35,8	37,6	-	32,5	34	33 – 38 (35,5)
	Uľahnutá	39,4	41,1	41 – 48,5	35	38	36 – 41 (38,5)
G3/G-F	Kyprá	32,9	32,3	-	30	30	-
	Stredne uľahnutá	35,6	38,1	-	34	36	30 – 35 (32,5)
	Uľahnutá	39,9	41,2	44 – 51,9	38	40	33 – 38 (35,5)
G4/GM	Stredne uľahnutá	33,6	-	-	34	-	30 – 35 (32,5)
	Uľahnutá		-		36		
G5/GC	Kyprá	30,9	-	-	30	-	-
	Stredne uľahnutá	32,1	-	-	32	-	28 – 32 (30)
	Uľahnutá				34		



Obrázok 6.3 Výsledky uhla šmykovej pevnosti dunajských štrkov triedy G1 a G3

V tab. 6.6 sú zhrnuté výsledky charakteristických hodnôt uhla šmykovej pevnosti, ktoré boli vyhodnotené pre jednotlivé triedy a uľahnutosť **hronských štrkov**.

Pre **středně uľahnuté štrky** G4 a G5 je uhol šmykovej pevnosti, odvodený použitím Švastovej korelácie, 34,5° (pre G4) a 34,6° (pre G5). Podľa korelácií v STN 72 1032 je uhol šmykovej pevnosti 37,3° (G4) a 36,3° (G5). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú pre stredne uľahnuté štrky hodnoty ϕ_{ef} od 30° - 35° (pre G4) a od 28° - 32° (pre G5). Britská a nemecká korelácia odporúčajú použiť hodnoty ϕ_{ef} 34° (G4) a 36° (G5).

Pre **uľahnuté štrky** má uhol šmykovej pevnosti odvodený podľa Švasty hodnoty od 37° (pre G4) do 49,5° (pre G1). Použitím korelácií v STN 72 1032 dosahuje uhol šmykovej pevnosti 36,9° (G4) až >45° (G1). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú hodnoty ϕ_{ef} od 30° (pre G5) do 41,5° (pre G1). Britská a nemecká korelácia odporúčajú použiť pre uľahnuté štrky hodnoty ϕ_{ef} 37° - 40°.

Na základe analýzy výsledkov je vhodné pre prehodnotiť tabuľkovú hodnotu ϕ_{ef} pre stredne uľahnuté a uľahnuté štrky triedy G3, G4 a G5. Na vyhodnotenie uhla šmykovej pevnosti hronských štrkov z dynamických penetračných skúšok odporúčame použiť rovnakú Švastu koreláciu (Švasta, 1978) ako pre dunajské štrky.

Tabuľka 6.6 Porovnanie korelácií pre φ_{ef} s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 (hronské štrky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	φ_{ef} [°]				Odporúčané hodnoty
		Švasta	STN 72 1032	BS 8002	EC7/ DIN	
						STN 73 1001
G1/GW	Uľahnutá	49,5	> 45	40	40	39 – 44 (41,5)
G2/GP	Uľahnutá	41,9	40,9	37	38	36 – 41 (38,5)
G3/G-F	Uľahnutá	38,3	40,8	40	40	33 – 38 (35,5)
G4/GM	Stredne uľahnutá	34,5	37,3	36	-	30 – 35 (32,5)
	Uľahnutá	37,0	36,9	38	-	
G5/GC	Stredne uľahnutá	34,6	36,3	34	-	28 – 32 (30)
	Uľahnutá			36		

V tab. 6.7 sú zhrnuté výsledky uhla šmykovej pevnosti pre jednotlivé triedy a uľahnutosti dunajských pieskov.

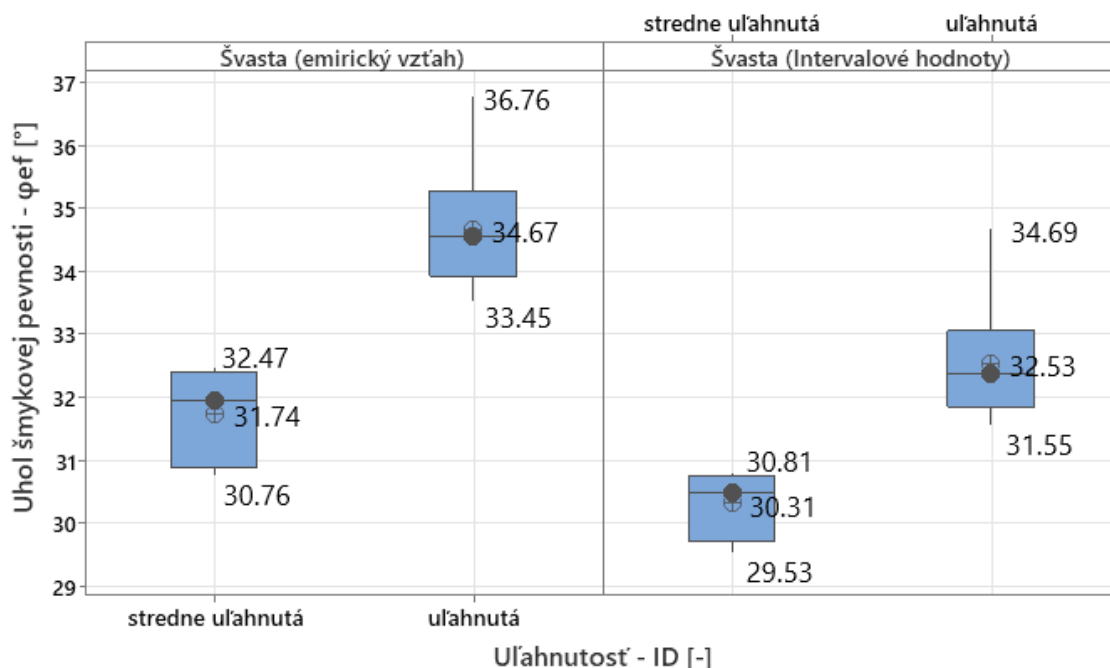
Pre **stredne uľahnuté piesky** je uhol šmykovej pevnosti, odvodený podľa Švastovho empirického vzťahu, v rozsahu 30,2° (pre S5) – 31,1° (pre S3). Podľa Švastových intervalových hodnôt dosahuje uhol šmykovej pevnosti 28,7° (S5) až 29,9° (S3). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú φ_{ef} pieskov od 27° (pre S5) do 29,5° (pre S1). Britská a nemecká korelácia odporúča použiť pre stredne uľahnuté piesky hodnoty φ_{ef} 34° (pre S3).

V **uľahnutých pieskoch** má uhol šmykovej pevnosti, odvodený podľa Švastu, hodnoty od 34,1° (pre S3) – 41,2° (pre S1). Korelácia z STN 72 1032 odporúča pre uľahnuté piesky hodnoty φ_{ef} od 32° (S3) až 41,3° (S3, S1). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú hodnoty φ_{ef} 27° (pre S5) až 42° (pre S1). Britská a nemecká korelácia odporúča použiť pre uľahnuté piesky hodnoty φ_{ef} rovné 38°.

Uhol šmykovej pevnosti pieskov S3 (obr. 6.4) má nižšie hodnoty ako britská a nemecká korelácia.

Tabuľka 6.7 Porovnanie korelácií pre φ_{ef} s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 (dunajské piesky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	φ_{ef} [°]				Tabuľkové hodnoty
		Švasta (empirický vzťah)	Švasta (Intervalové hodnoty)	BS 8002	EC7/ DIN	
S1/SW	Uľahnutá	41,2	41,3	38	38	37 – 42 (39,5)
S2/SP	Uľahnutá	38,3	36,9	35	35	34 – 37 (35,5)
S3/S-F	Stredne uľahnutá	31,1	29,9	34	34	28 – 31 (29,5)
	Uľahnutá	34,1	32,0	38	38	30 – 33 (31,5)
S4/SM	Stredne uľahnutá	30,8	29,4	34	-	28 – 30 (29)
	Uľahnutá	35,7	33,3	36	-	
S5/SC	Stredne uľahnutá	30,2	28,7	32	-	26 – 28 (27)
	Uľahnutá	35,5	33,3	34	-	



Dunajské štrky

Obrázok 6.4 Výsledky uhla šmykovej pevnosti dunajských pieskov triedy S3 vyhodnotené použitím Švastovho empirického vzťahu (vľavo) a intervalových hodnôt (vpravo)

Na základe analýzy výsledkov je vhodné prehodnotiť tabuľkovú hodnotu φ_{ef} pre stredne uľahnuté a uľahnuté piesky triedy S3, S4 a S5. Na vyhodnotenie uhla šmykovej pevnosti dunajských pieskov použiť rovnakú Švastu koreláciu (Švasta, 1978) ako na vyhodnotenie φ_{ef} štrkov.

V tab. 6.8 sú zhrnuté výsledky uhla šmykovej pevnosti pre jednotlivé triedy a uľahnutosti hronsých pieskov.

Pre **stredne uľahnuté piesky** triedy S5 je uhol šmykovej pevnosti podľa Švastovho empirického vzťahu $30,5^\circ$. Podľa Švastových intervalových hodnôt je uhol šmykovej pevnosti $29,2^\circ$. V pieskoch triedy S3 je uhol šmykovej pevnosti podľa Švastovho empirického vzťahu $32,9^\circ$. Podľa Švastových intervalových hodnôt je φ_{ef} rovné $31,1^\circ$ (pre S3). Britská a nemecká korelácia odporúčajú použiť pre stredne uľahnuté piesky S3 a S5 hodnoty φ_{ef} 34° a 30° .

Pre **uľahnuté piesky** má uhol šmykovej pevnosti, odvodený podľa Švastovho empirického vzťahu, hodnoty od 35° (pre S3) – $36,2^\circ$ (pre S2). Podľa Švastových intervalových hodnôt je φ_{ef} rovné $32,8^\circ$ (pre S3) a $34,1^\circ$ (pre S2). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú hodnoty φ_{ef} 33° (pre S3) až 37° (pre S2). Britská a nemecká korelácia odporúčajú použiť pre uľahnuté piesky S2 a S3 hodnoty φ_{ef} 38° a 35° .

Na základe analýzy výsledkov je vhodné prehodnotiť tabuľkovú hodnotu φ_{ef} pre stredne uľahnuté a uľahnuté piesky triedy S3, S4 a S5. Na vyhodnotenie uhla šmykovej pevnosti dunajských pieskov použiť rovnakú Švastu koreláciu (Švasta, 1978) ako na vyhodnotenie φ_{ef} štrkov.

Tabuľka 6.8 Porovnanie korelácií pre φ_{ef} s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 (hronske piesky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	φ_{ef} [°]				Odporúčané hodnoty
		Švasta (empirický vzťah)	Švasta (Intervalové hodnoty)	BS 8002	EC7/DIN	STN 73 1001
S2/SP	Uľahnutá	36,2	34,1	35	35	34 – 37 (35,5)
S3/S-F	Stredne uľahnutá	32,9	31,1	34	34	28 – 31 (29,5)
	Uľahnutá	35,0	32,8	38	38	30 – 33 (31,5)
S5/SC	Kyprá	27,4	25,5	30	-	-
	Stredne uľahnutá	30,5	29,2	32	-	26 – 28 (27)
	Uľahnutá			34		

6.4 Deformačný modul

V tab. 6.9 sú výsledky deformačného modulu jednotlivých tried a uľahnutosti **dunajských štrkov**, ktoré boli vyhodnotené použitím viacerých korelácií (tab. 6.8 – poznámka).

Podľa Švastovej korelácie dosahujú hodnoty deformačného modulu **kyprých štrkov** hodnoty 8,9 MPa (pre G3) až 30,3° (pre G1). Koreláciou podľa Obeta sú deformačné moduly stanovené od 17,7 MPa (pre G3) do 48,8 MPa (pre G5). Podľa poslednej korelácie (tab. 6.8) je deformačný modul od 24,8 MPa (pre G3) do 67,9 MPa (pre G5).

Na základe analýzy výsledkov je vhodné pre kypré štrky všetkých tried uvažovať s tabuľkovou hodnotou deformačného modulu minimálne 20 MPa.

Deformačný modul pre **stredne uľahnuté dunajské štrky** je podľa Švastovej korelácie v rozsahu 24,9 MPa (pre G5) – 72,5 MPa (pre G2). Použitím Obertovej korelácie sú deformačné moduly vyhodnotené od 61,8 MPa (G5) do 121 MPa (G2). Ďalšou koreláciou ($E_{def,k}^3$ z tab. 6.8) sú deformačné moduly dunajských štrkov stanovené od 86,5 MPa (G5) do 161,4 MPa (G1). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú E_{def} v rozmedzí 40 – 60 MPa (pre G5) až 250 – 390 MPa (pre G1). Najväčší nesúlad medzi výsledkami nameraných hodnôt E_{def} a tabuľkovými hodnotami je pre stredne uľahnuté štrky G1 (obr. 6.5), ktorých hodnoty E_{def} sú nižšie ako tabuľkové hodnoty.

Deformačný modul **uľahnutých štrkov** vyhodnotený podľa Švastovej korelácie má hodnoty od 70,9 MPa (pre G3) do 148,1 MPa (pre G1). Podľa Obertovej korelácie dosahujú deformačné moduly hodnoty od 191 MPa (G2) do 301 MPa (G1). Použitím tretej korelácie ($E_{def,k}^3$ z tab. 6.8) sú výsledky E_{def} v rozsahu od 267 MPa (pre G2) do 421 MPa (pre G1).

Korelácia podľa Švasty udáva najnižšie hodnoty deformačných modulov, ktoré sú v porovnaní s odporúčanými hodnotami podľa STN 73 1001:1987 výrazne nižšie.

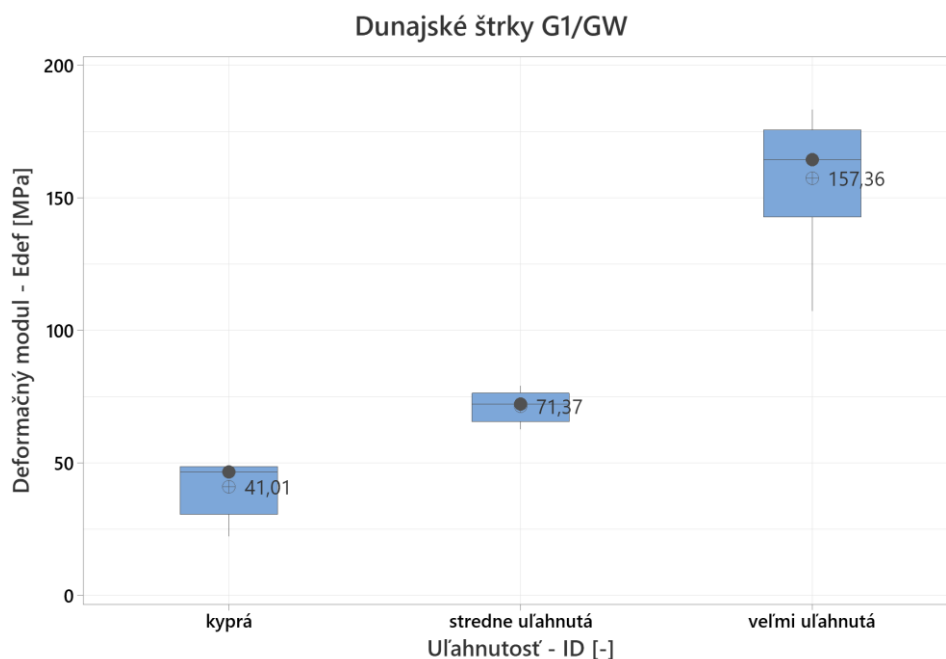
Na základe analýzy výsledkov je vhodné pre stredne uľahnuté a uľahnuté štrky všetkých tried prehodnotiť tabuľkovú hodnotu E_{def} . Na vyhodnotenie deformačného modulu štrkov odporúčame koreláciu podľa Oberta (v STN 72 1032):

$$E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}} \quad [\text{MPa}] \quad \text{kde} \quad n = 10 \quad \text{pre štrkovité zeminy}$$

Tabuľka 6.9 Porovnanie korelácií pre E_{def} s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 (dunajské štrky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	Výsledky meraní	Deformačný modul [MPa]			Tabuľkové hodnoty
		$q_{\text{dyn},k}$	$E_{\text{def},k}^1$	$E_{\text{def},k}^2$	$E_{\text{def},k}^3$	STN 73 1001
G1/GW	Kyprá	4.5	30,3	44,8	62,7	-
	Stredne uľahnutá	11.5	66,5	115,3	161,4	250 – 390
	Uľahnutá	30.1	148,1	300,9	421,3	360 – 500
G2/GP	Kyprá	3.6	24,9	35,9	50,3	-
	Stredne uľahnutá	12.2	72,5	121,7	170,4	100 – 190
	Uľahnutá	19,1	101,2	191	267,4	170 – 250
G3/G-F	Stredne uľahnutá	10.8	39,5	107,6	150,6	80 – 90
	Uľahnutá	23,9	70,9	239	334,6	90 – 100
G4/GM	Stredne uľahnutá	8.2	31,4	81,7	114,4	60 – 80
G5/GC	Kyprá	4.9	20,4	48,5	67,9	-
	Stredne uľahnutá	6.2	24,9	61,8	86,5	40 – 60

Poznámka:
¹ vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}^m$ (podľa Švastu); $n = 8,8$ a $m = 0,83$
² vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}$; $n = 10$ pre štrkovité zeminy (podľa Oberta, STN 72 1032)
³ vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}$; $n = 14$ pre štrkovité zeminy



Obrázok 6.5 Výsledky deformačného modulu dunajských štrkov triedy G1

V tab. 6.10 sú zhrnuté výsledky deformačného modulu jednotlivých tried a uľahnutosti **hronských štrkov**.

Podľa Švastovej korelácie je deformačný modul pre **stredne uľahnuté štrky** 36 MPa (pre G5) a 47 MPa (pre G4). Použitím Obertovej korelácie sú deformačné moduly 97 MPa (G5) a 134 MPa (G4). Ďalšou koreláciou ($E_{\text{def},k}^3$ z tab. 6.10) sú deformačné moduly 136 MPa (G5) a 187 MPa (G4). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú E_{def} v rozmedzí 40 – 60 MPa (pre G5) až 60 – 80 MPa (pre G4).

Deformačný modul **uľahnutých štrkov** odvodený podľa Švastovej korelácie má hodnoty od 51 MPa (pre G4) do 389 MPa (pre G1). Podľa Obertovej korelácie sú deformačné moduly od 148 MPa (G4) do 974 MPa (G1). Použitím tretej korelácie ($E_{\text{def},k}^3$ z tab. 6.10) dosahujú výsledky E_{def} hodnoty 203 MPa (pre G4) až 1360 MPa (pre G1). Tabuľkové hodnoty podľa STN 73 1001 udávajú pre uľahnuté štrky hodnoty E_{def} od 60 – 80 MPa pre G4 až 360 – 500 MPa pre G1.

Na základe analýzy výsledkov je vhodné prehodnotiť tabuľkovú hodnotu E_{def} pre stredne uľahnuté aj uľahnuté štrky a zohľadniť zároveň aj genézu.

Pri vyhodnocovaní deformačného modulu štrkov z dynamických penetračných skúšok odporúčame koreláciu podľa Oberta (v STN 72 1032).

Tabuľka 6.10 Porovnanie korelácií pre E_{def} s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 (hronské štrky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	Výsledky meraní	Deformačný modul [MPa]			Tabuľkové hodnoty
		$q_{\text{dyn},k}$	$E_{\text{def},k}^1$	$E_{\text{def},k}^2$	$E_{\text{def},k}^3$	STN 73 1001
G1/GW	Uľahnutá	97.1	389.9	971,3	1359,8	360 – 500
G2/GP	Uľahnutá	30.2	148.4	302,4	423,4	170 – 250
G3/G-F	Uľahnutá	17.9	60.2	178,7	250,2	90 – 100
G4/GM	Stredne uľahnutá	13.4	47.3	133,6	187,0	60 – 80
	Uľahnutá	14.8	51.6	148,4	202,7	
G5/GC	Stredne uľahnutá	9.7	36.3	97,4	136,4	40 – 60

Poznámka:

¹ vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}^m$ (podľa Švastu)

² vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}$; $n = 10$ pre štrkovité zeminy (podľa Oberta, STN 72 1032)

³ vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}$; $n = 14$ pre štrkovité zeminy

V tab. 6.11 sú zhrnuté výsledky deformačného modulu jednotlivých tried a uľahnutosti **dunajských pieskov**.

Podľa Švastovej korelácie je deformačný modul pre **stredne uľahnuté piesky** 6,6 MPa (pre S5) až 7,7 MPa (pre S3). Použitím druhej korelácie ($E_{\text{def},k}^2$ z tab. 6.11) sú deformačné moduly dunajských pieskov 26 MPa (S4) až 27,7 MPa (S5). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú E_{def} v rozmedzí 4 – 12 MPa (pre S5) až 12 – 19 MPa (pre S3).

Deformačný modul **uľahnutých pieskov**, odvodený podľa Švastovej korelácie, má hodnoty od 12 MPa (S3) do 59 MPa (S1). Použitím druhej korelácie ($E_{\text{def},k}^2$ z tab. 6.11) dosahujú výsledky E_{def}

hodnoty 49 MPa (pre S3) až 203 MPa (pre S1). Tabuľkové hodnoty podľa STN 73 1001 udávajú pre uľahnuté piesky hodnoty E_{def} od 4 - 12 MPa (pre S5) až 50 - 100 MPa (pre S1).

Tabuľka 6.11 Porovnanie korelácií pre E_{def} s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 (dunajské piesky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	Výsledky meraní	Deformačný modul [MPa]		Tabuľkové hodnoty
		$q_{dyn,k}$	$E_{def,k}^1$	$E_{def,k}^2$	STN 73 1001
S1/SW	Uľahnutá	29,9	58,7	203,1	50 – 100
S2/SP	Uľahnutá	22,2	40,6	117,66	30 – 50
S3/S-F	Stredne uľahnutá	5,1	7,7	27,6	12 – 19
	Uľahnutá	9,1	12,6	49,4	17 – 25
S4/SM	Stredne uľahnutá	4,8	7,4	26	5 – 15
	Uľahnutá	11,6	15,3	62,7	
S5/SC	Stredne uľahnutá	4,30	6,56	27,74	4 – 12
	Uľahnutá	11,43	15,14	73,74	
<u>Poznámka:</u> ¹ vyhodnotené podľa vzťahu $E_{def} = n \times q_{dyn}^m$ (podľa Švastu) ² vyhodnotené podľa vzťahu $E_{def} = n \times q_{dyn}$; $n = 5,3$ pre piesčité zeminy a $n = 4$ pre jemnozrnné a hlinité piesky					

Na základe analýzy výsledkov je vhodné prehodnotiť tabuľkovú hodnotu E_{def} pre stredne uľahnuté aj uľahnuté piesky všetkých inžinierskogeologických tried. Na vyhodnotenie deformačného modulu pieskov z dynamických penetračných skúšok odporúčame použiť koreláciu:

$$E_{def} = n \times q_{dyn} \quad [\text{MPa}]$$

Kde: $n = 5$ pre piesčité zeminy, S1, S2, S3

$n = 4$ pre ílovité a siltovité piesky, S4, S5

Táto korelácia je odvodená z korelácií uvádzaných v správach z IG prieskumu v Geofonde (tab. 6.11).

V tab. 6.12 sú výsledky deformačného modulu **hronských pieskov** tried S2, S3 a S5, ktoré boli vyhodnotené použitím viacerých korelácií.

Podľa Švastovej korelácie je deformačný modul pre **stredne uľahnuté piesky** 7 MPa (pre S5) až 18 MPa (pre S3). Použitím ďalšej korelácie ($E_{def,k}^2$ z tab. 6.12) sú deformačné moduly hronských pieskov 39 MPa (S5) až 52 MPa (S3). Tabuľkové hodnoty z STN 73 1001 uvádzajú E_{def} pre stredne uľahnuté piesky v rozmedzí 4 - 12 MPa (pre S5) až 12 - 19 MPa (pre S3).

Deformačný modul **uľahnutých pieskov** odvodený podľa Švastovej korelácie má hodnoty 25 MPa (S3) a 75 MPa (S2). Použitím druhej korelácie ($E_{def,k}^3$ z tab. 6.12) dosahujú výsledky E_{def} hodnoty 76 MPa (pre S3) až 90 MPa (pre S2). Tabuľkové hodnoty podľa STN 73 1001 udávajú pre uľahnuté piesky hodnoty E_{def} od 17 - 25 MPa (pre S3) až 30 - 50 MPa (pre S2).

Pri vyhodnocovaní deformačného modulu pieskov z dynamických penetračných skúšok odporúčame použiť koreláciu rovnakú koreláciu ako pre dunajské piesky.

Tabuľka 6.12 Porovnanie korelácií pre E_{def} s tabuľkovými hodnotami STN 73 1001:1987 (hronské piesky)

Zemina	Relatívna uľahnutosť	Výsledky meraní	Deformačný modul [MPa]		Tabuľkové hodnoty
			$q_{\text{dyn},k}$	$E_{\text{def},k}^1$	$E_{\text{def},k}^2$
					STN 73 1001
S2/SP	Uľahnutá	13,2	74,8	89,6	30 – 50
S3/S-F	Stredne uľahnutá	7,2	18,1	51,9	12 – 19
	Uľahnutá	10,7	24,9	76,3	17 – 25
S5/SC	Kyprá	2,3	4,0	19,8	-
	Stredne uľahnutá	4,5	6,9	38,6	4 - 12

Poznámka:
¹ vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}^m$ (podľa Švasty)
² vyhodnotené podľa vzťahu $E_{\text{def}} = n \times q_{\text{dyn}}$; $n = 5,3$ pre piesčité zeminy a $n = 4$ pre jemnozrnné a hlinité piesky

6.5 Vplyv genézy

V dôsledku iného tvaru a veľkosti zŕn, vplyvom genézy, sú aj geotechnické parametre (I_D , φ_{ef} , E_{def}) štrkov rozdielne. Dunajské štrky patria do riečnych sedimentov nížinných tokov, ktoré sa vyznačujú dobre opracovanými, hladkými a jemnejšími zrnami menších frakcií. V dôsledku tvaru a veľkosti zŕn majú tieto štrky pri zarážaní penetračnej tyče tendenciu roztláčať sa do strán a vykazujú nižšie hodnoty geotechnických parametrov (tab. 6.13 a tab. 6.14).

Polozaoblené, čiastočne ostrohranné zrná štrkov horských tokov riek sa vďaka tvaru a veľkosti zŕn vzájomne zakliesňujú a nadobúdajú pevnejšie vzájomné väzby medzi zrnami. V dôsledku toho vykazujú väčší penetračný odpor voči zarážaniu tyče a majú aj lepšie geotechnické parametre.

Tabuľka 6.13 Porovnanie výsledkov φ_{ef} dunajských a hronských štrkov

Zemina	Relatívna uľahnutosť	Dunajské štrky		Hronské štrky		Tabuľkové hodnoty
		q_{dyn}	$\varphi_{\text{ef}} [^\circ]$ podľa Švasty	q_{dyn}	$\varphi_{\text{ef}} [^\circ]$ podľa Švasty	
G1/GW	Kyprá	4.48	31,8	-	-	-
	Stredne uľahnutá	11.53	35,5	-	-	36 – 41 (38,5)
	Uľahnutá	30.09	40,2	91,9	49,5	39 – 44 (41,5)
G2/GP	Kyprá	3.59	30,3	-	-	-
	Stredne uľahnutá	12.17	35,8	-	-	33 – 38 (35,5)
	Uľahnutá	19.09	39,4	30,2	41,9	36 – 41 (38,5)
G3/G-F	Kyprá	1.77	32,9	-	-	-
	Stredne uľahnutá	10.76	35,6	-	-	30 – 35 (32,5)
	Uľahnutá	21.94	39,9	17,9	38,3	33 – 38 (35,5)
G4/GM	Stredne uľahnutá	8.17	33,6	13,4	37,3	30 – 35 (32,5)
	Uľahnutá	-	-	14,8	36,9	
G5/GC	Kyprá	6.18	30,9	-	-	-
	Stredne uľahnutá	4.48	32,1	9,7	36,3	28 – 32 (30)
	Uľahnutá	-	-	-	-	

Tabuľka 6.14 Porovnanie výsledkov E_{def} dunajských a hronských štrkov

Zemina	Relatívna uľahnutosť	Dunajské štrky		Hronské štrky		Tabuľkové hodnoty
		q_{dyn}	E_{def} [MPa] podľa Oberta	q_{dyn}	E_{def} [MPa] podľa Oberta	STN 73 1001
G1/GW	Kyprá	4.48	44,8	-	-	-
	Stredne uľahnutá	11.53	115,3	-	-	250 – 390
	Uľahnutá	30.09	300,9	97,1	971,3	360 – 500
G2/GP	Kyprá	3.59	35,9	-	-	-
	Stredne uľahnutá	12.17	121,7	-	-	100 – 190
	Uľahnutá	19.09	191	30,2	302,4	170 – 250
G3/G-F	Kyprá	1.77	17,7	-	-	-
	Stredne uľahnutá	10.76	107,6	-	-	80 – 90
	Uľahnutá	21.94	239	17,9	178,7	90 – 100
G4/GM	Stredne uľahnutá	8.17	81,7	13,4	133,6	60 – 80
	Uľahnutá		-	14,8	148,4	
G5/GC	Kyprá	6.18	48,5	-	-	-
	Stredne uľahnutá	4.48	61,8	9,7	97,4	40 - 60
	Uľahnutá	-	-	-	-	

Pre zistenie vplyvu genézy na vyhodnotenie geotechnických parametrov pieskov a štrkov je potrebné v ďalšom výskume analyzovať aj lokality s ostrohrannými zrnami na zvýšenie počtu vzoriek a spoľahlivosti výsledkov štatistického vyhodnotenia.

7 Záver

Šmykové a deformačné parametre dunajských a hrnských hrubozrnných zemín boli vyhodnotené z dynamickej penetračnej skúšky použitím rôznych korelácií. Z výsledkov geotechnických parametrov boli vyhodnotené ich charakteristické hodnoty v súlade so štatistickým postupom z EN 1997:2024. Charakteristické hodnoty boli porovnané s laboratórnymi výsledkami a odporúčanými hodnotami v STN 73 1001:1987.

Uhol šmykovej pevnosti dunajských, hrnských štrkov a pieskov bol vyhodnocovaný pomocou korelácií podľa Švasty a STN 72 1032:1997. Najvýraznejší rozdiel medzi výsledkami terénnych skúšok a odporúčanými hodnotami v STN 73 1001:1987 vykazujú hodnoty φ_{ef} dunajských štrkov triedy G3, ktoré sa približujú ku hodnotám štrkov triedy G1. Potvrdzujú to aj výsledky laboratórnych skúšok.

Na základe nameraných hodnôt DP odporúčame hodnoty, ktoré sú konzervatívne vybrané pre štrky a pre piesky.

Deformačný modul dunajských, hrnských štrkov a pieskov bol vyhodnotený pomocou troch korelácií. Koreláciou podľa Švasty sú odvodené najmenšie deformačné moduly pre štrky a v porovnaní s tabuľkovými hodnotami z STN 73 1001:1987 sú namerané hodnoty výrazne nižšie.

Na základe analýzy a porovnania výsledkov sme navrhli pre kypré štrky všetkých inžinierskogeologických tried uvažovať s tabuľkovou hodnotou deformačného modulu minimálne 20 MPa. Tiež je vhodné prehodnotiť tabuľkovú hodnotu E_{def} pre stredne uľahnuté a uľahnuté piesky.

Vplyv genézy na interpretáciu geotechnických parametrov hrubozrnných zemín sme zisťovali porovnaním vlastností dunajských a hrnských štrkov rovnakej uľahnutosti. Výsledky práce potvrdili, že hrnské štrky majú vyššie hodnoty geotechnických parametrov ako dunajské štrky. Preto odporúčame pri tvorbe nominálnych hodnôt geotechnických parametrov zohľadniť genézu tak, že sa stanovujú rôzne hodnoty pre štrky rôznej genézy.

Použité korelácie pre dynamickú penetráciu boli kriticky prehodnotené. Na vyhodnotenie uhla šmykovej pevnosti hrubozrnných zemín (štrky aj piesky) odporúčame použiť koreláciu podľa Švasty (Švasta, 1978).

Pri vyhodnocovaní deformačného modulu dunajských a hrnských štrkov odporúčame použiť koreláciu podľa Oberta (v STN 72 1032:1997).

Pri vyhodnocovaní deformačného modulu dunajských a hrnských pieskov z dynamických penetračných skúšok odporúčame použiť upravenú koreláciu, ktorá sa vyskytuje v správach z inžinierskogeologického prieskumu v Geofonde.

Na základe analyzovaných výsledkov pokračovať vo vyhodnocovaní DP z ďalších lokalít so zohľadnením genézy zemín. Výsledky štrkov a pieskov je potrebné analyzovať a do databázy doplniť aj hrubozrnné zeminy ďalšej genézy (napr. ostrohranné štrky charakteru sutí, vážske štrky). Odporúčame doplniť aj databázu laboratórnych skúšok o ďalšie skúšky štrkov a pieskov.

8 Literatúra

- BLAŽO, E.: Príchodová cesta Gabčíkovo, Dynamické penetračné skúšky, Pôdohospodársky projektový ústav, 1989, správa č. 71736, ŠGUDŠ, Bratislava, 6 strán
- BLAŽO, E.: VD Gabčíkovo – realizácia a vyhodnotenie D.P.S., Pôdohospodársky projektový ústav Bratislava, 1982, správa č. 53543, ŠGUDŠ, Bratislava, 4 strany
- CARTER, M., BENTLEY, P. S.: Soil properties and their correlations, Second Edition, United Kingdom: John Wiley & Sons, Inc., 2016, ISBN 9781119130901
- DANKO, J.: Bratislava – Martinčekova ulica – dynamická penetračná skúška, Geohyco, 2001, správa č. 83777, ŠGUDŠ, Bratislava, 6 strán
- DIN 4094-3:2002: Baugrund - Felduntersuchungen - Teil 3: Rammsondierungen
- DOBROVODA, P.: Inžinierskogeologický prieskum pre objekt BBC 6 - Plynárenská ul. - Záverečná správa 2019, 63 strán
- EN 1997-2:2008: Eurokód 7-2. Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Časť 2: Prieskum a skúšanie horninového prostredia
- EN 1997-1:2005: Eurokód 7. Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Časť 1: Všeobecné pravidlá
- EN 1997-1:2024 Geotechnical design – General rules
- EN ISO 22476-2:2005: Geotechnical investigation and testing - Field testing - Part 2: Dynamic probing
- FRANKOVSKÁ, J: Analýza použitia štatistických metód pri stanovení charakteristických hodnôt geotechnických parametrov. In: Geotechnika 2/2016. s. 3-7.
- GARAJ, M.: Manipulačná plošina Šamorín, Dynamické penetračné skúšky, Pôdohospodársky projektový ústav, 1990, správa č. 73127, ŠGUDŠ, Bratislava, 6 strán
- HEAD, K.H.: Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, New York, John Wiley & Sons, Inc. 1994, ISBN 0-470-23362-1.
- JESENÁK, P.: ČALOVO – Stred II, 1. stavba, Dynamické penetračné skúšky, Dopravoprojekt, 1986, správa č. 61613, ŠGUDŠ, Bratislava, 12 strán
- KUBIŠ, M. a kol.: Rýchlostná cesta R1 Banská Bystrica – Slovenská Ľupča, Záverečná správa geologickej úlohy, 2019, 179 strán
- KUVIK, M. a kol.: Diaľnica D4 Bratislava, Jarovce – Ivanka sever, Podrobný inžinierskogeologický prieskum, 2015, 54 strán
- MAHEL a kol.: Regionální geologie ČSSR, II. Západní Karpaty, sv. 1. Ústřední geologické vydavatelství, Praha, 1967
- LOBO, B., O., SCHNAID, F., ROCHA, M., M., ODEBRECHT, E.: An approach to evaluate internal friction angle from dynamic penetration tests, In: Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009, Alexandria
- OBERT, L., 1974. Dynamické penetračné skúšky v inžiniersko – geologickom prieskume rigorózná práca, Bratislava: Univerzita Komenského, 143 s.
- ORR, T.: Development in selection of characteristic geotechnical parameters in Eurocode 7. Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk. 2019. Taipei. Taiwan.

PN-B-04552:2002: Geotechnika. Badania polowe

POHL, C.,: Determination of characteristic soil values by statistical methods. In: Vogt, Norbert; Schuppener, Bernd; Straub, Daniel; Bräu, Gerhardt (Hg.): Geotechnical Safety and Risk. ISGSR 2011. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 427-434

PRÄSTINGS, A., SPROSS, J., & LARSSON, S. Characteristic values of geotechnical parameters in Eurocode 7. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering, 172(4), 2019. 301–311. <https://doi.org/10.1680/jgeen.18.00057>

SANGLERAT, G.: The penetrometer and soil exploration, Interpretation of penetration diagrams – theory and practice, Amsterdam, Elsevier Publishing Company, 1972, ISBN 0-444-40976-9

SCHNAID, F. 2009. In Situ Testing in Geomechanics, The main tests. London, New York: Taylor & Francis.. 328 p. ISBN 0-203-93133-5

SCHNEIDER, H., R.: Characteristic Soil Properties for EC7: Influence of quality of test results and soil volume involved, Proc. 14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, 2010, STU Bratislava

ŠVASTA, M., CUNINKA, M.: Hĺbkové penetračné sondy v inžinierskej geológii – korelácia s tradičnými metódami, IGHP n.p. Žilina, 1975, správa č. 36571, ŠGUDŠ, Bratislava, 147 strán

ŠVASTA, M.: Trebišov – Baums, Penetračné skúšky – súčasť podrobného inžiniersko-geologického prieskumu, 1978, n.p. závod Košice, správa č. 40376, ŠGUDŠ, Bratislava, 14 strán

STN 72 1032: 1997: Dynamická penetračná skúška

STN 73 1001:1987: Zakladanie stavieb. Základová pôda pod plošnými základmi.

STN EN ISO 17892-5: 2017 Geotechnický prieskum a skúšky. Laboratórne skúšky zemín. Časť 5: Oedometrická skúška s postupným zaťažením

STN EN ISO 14 688-1 Geotechnický prieskum a skúšky. Pomenovanie a klasifikácia zemín. Časť 1: Pomenovanie a opis

TOLIA, D., S.: Interpretation of dynamic cone penetration tests with particular reference to Terzaghi and Peck's chart, In: Ground Engineering, Vol. 10, 1977, Emap Construct Limited, ISSN: 0017-4653, p. 37-41

VRETTOS, C., PAPAMICHAEL, S.: Relative density of cohesionless soils from dynamic probe and cone penetration test – An update assessment of empirical relationship. Geotechnik 41, 2018, p. 186-196