VOĽBA A OPTIMALIZÁCIA KONSOLIDAČNÝCH METÓD POD NÁSYPMI

Radovan Baslík – Mirko Matys – Ľubomír Turinič

SELECTION AND OPTIMALISATION OF THE CONSOLIDATIONS METHODS UNDER THE EMBANKMENTS. In Slovakia modernization mainly of railway lines are taking place for a design speed of 160 km. h^{-1}. In the railway route Bratislava – Trnava, there is a need to build a 7.5 m high embankment on very soft and deformable subsoil. To speed up the primary consolidation, an appropriate technology from three different methods was selected by the help of the Analytic Hierarchy Process. The selected method, vertical drains was optimalized with accordance to the primary consolidation time, thickness of the subsoil and coefficient of consolidation c_v. These boundary conditions determined the axis length of the vertical drains.

1. Úvod

Pri modernizácii železničnej trasy na návrhovú rýchlosť 160 km/hod, v úseku Bratislava Rača – Trnava, je potrebné zväčšiť polomer oblúka trasy v oblasti Šenkvíc. Vzhľadom na nepriaznivé geologické pomery, výškové vedenie trasy, bude potrebné časť úseku navrhnúť na neúnosných veľmi stlačiteľných zeminách na násype vysokom až 7,5 m. Dôležitou požiadavkou zo strany ŽSR je dosiahnuť vysoký stupeň konsolidácie podložia ešte pred uvedením trate do prevádzky.

2. Inžinierskogeologické pomery trasy v okolí Šenkvíc

Inžinierskogeologické pomery v úseku trasy násypu pri Šenkviciach sú veľmi zložité. Územie je po geologickej stránke budované sedimentami kvartéru, v podloží ktorého sa nachádzajú sedimenty neogénu. Hrúbka kvartérnych sedimentov je po dĺžke trasy premenná, dosahujúca 4 – 10m. Všeobecne sú tvorené prevažne hlinami, piesčitými hlinami, pieskom, sprašami a prachovitými hlinami, ílovitohlinitými sedimentami s výskytom organických sedimentov. Povrchovú vrstvu predstavujú humusovité hliny mocnosti 0.3 – 2m, pod ktorými sa nachádzajú prevažne íly piesčité alebo íly tuhej až pevnej konzistencie F4 CS, miestami íly s vysokou plasticitou F8 CH pevnej konzistencie a íly organické. Neogenné sedimenty sú zastúpené vápnitými ílmi s polohami pieskov, lignitov a uhoľných ílov. Polohy súdržných a nesúdržných sedimentov sa nepravidelne striedajú aj v krátkych vzdialenostiach. Zistené piesčité polohy sú charakteru pieskov s prímesou jemnozrnnej zeminy S3 S-F až pieskov hlinitých S4 SM, do hĺbky cca 3m pod terén kypré až slabo uľahnuté, hlbšie stredne uľahnuté až uľahnuté. Súdržné jemnozrnné zeminy sú tvorené hlinami so strednou plasticitou F5 MI pevnej konzistencie, hlinami s vysokou plasticitou F7 MH pevnej konzistencie, ílmi piesčitými F4 CS tuhej až pevnej konzistencie a ílmi s vysokou plasticitou F8 CH až ílmi s veľmi vysokou plasticitou F8 CV. V stredno a vysokoplastických íloch sa nachádzajú vápni-

Ing. Radovan Baslík, PhD., Tectum geosynthetic, Radvanská 1, 811 01 Bratislava, Tel: 00421 7 54414096, Fax: 00421 7 54415414, E-mail: tecgeo@isternet.sk
Prof. Ing. Mirko Matys, PhD., PRIF UK Katedra inžinierskej geológie, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava, Tel: 00421 7 60296449, Fax: 00421 7 65428981, E-mail: matys@nic.fns.uniba.sk
Ing. Ľubomír Turinič, Prodex,s.r.o., Mlynské nivy 68, 82105 Bratislava, Tel: 00421 7 58270253, Fax: 00421 7 58270261 E-mail: turinic@prodex.sk

té konkrécie veľkosti 0.3 – 2 cm v obsahu 3 – 25%. Neogénne sedimenty v hĺbkach 15 – 30m sú tvorené prevažne sedimentami charakteru piesčitých ílov F4 CS, ílov so strednou plasticitou F6 CI, ílov s vysokou plasticitou F8 CH a veľmi vysokou plasticitou F8 CV a oranické íly resp. rašelina a lignit.

Hladina podzemnej vody sa nachádza v hĺbke 0.5 až 1.5m, je tlaková a vystupuje až k povrchu. V niektorých častiach je povrch terénu stále zamokrený. Voda nie je agesívna na betón, avšak pre oceľ je prostredie charakterizované v zmysle STN 03 8375 ako veľmi vysoko agresívne.

Navrhovaný násyp sa nachádza na území s intenzitou seizmicity 6 – 7° M.C.S.

Tabuľka 1: Časť výsledkov laboratórnych skúšok (spracované podľa DANKO et.al. 1999)
Table 1: Part of the soils laboratory test results (after DANKO et. al. 1999)

	F4 CS mäkký	**F4 CS tuhý**	**F4 CS pevný**	**F6 CL makká**	**F6 CI tuhá**	**F6 CL pevná**	**F7 MH pevná**	**F8 CH tuhý**	**F8 CH pevný**
w_n	23	22.7	18.4	30.1	24.7	18.58	25.8	25.8	21.93
ρ_n		1941			2045	2077	2010	2035	2085
ρ_d		1584			1641	1755	1556	1636	1720
ρ_s		2733			2755	2773	2784	2758	2781
γ		19.035			20.057	20.369	19.711	19.956	20.446
w_L	25	34.3	33	31	43	42	59	54	57
w_P	17	20.3	20	20	21.75	23	34	23.5	26
I_p	18	14	13	11	21.25	19	25	30.5	31
n		42			40	37	44	41	38
e		0.72			0.67	0.08	0.79	0.69	0.6
S_r		84.9			96.93	87	93.5	96.8	91.45
I_c	0.22	0.8	1.12	0.09	0.86	1.22	1.34	0.93	1.12
uhlič.%	14.9	15.25		23.8	19.46	28.84	21.5	14.3	17

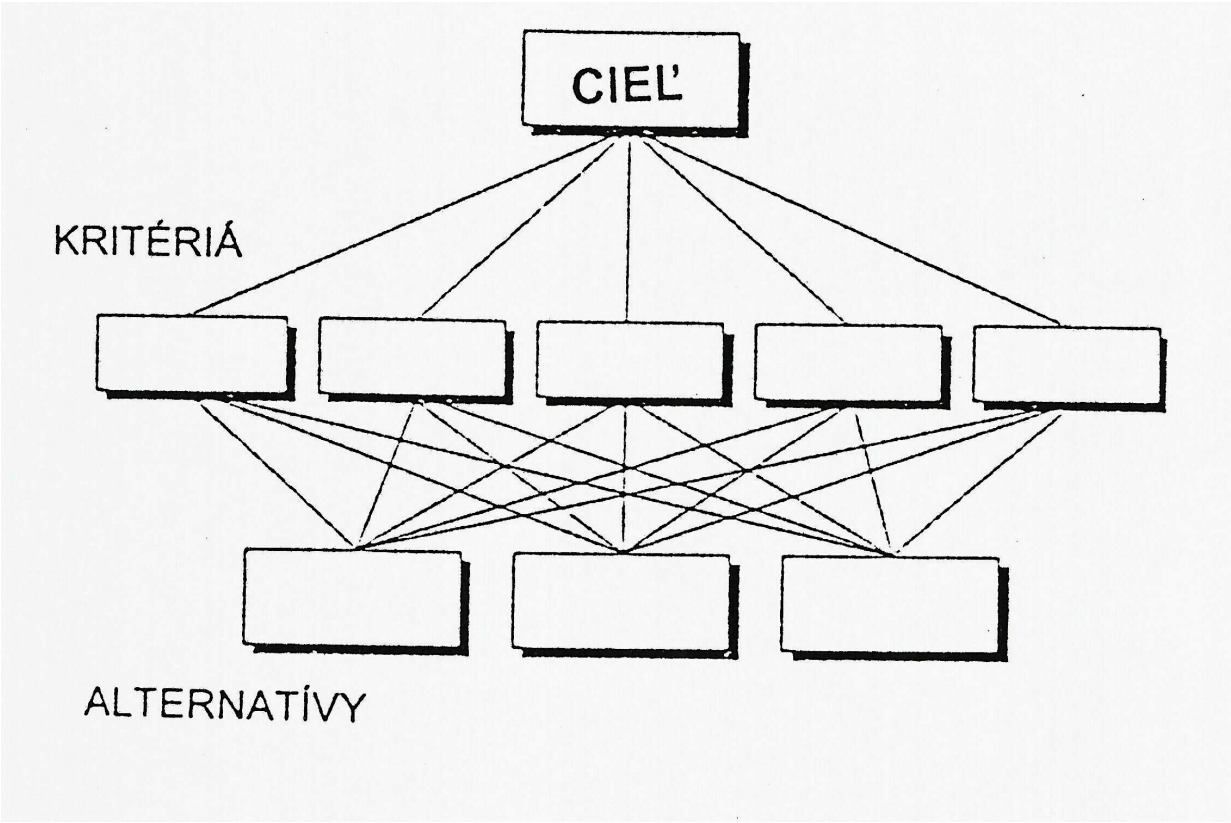
Tabuľka 2: Oedometrický modul pre jednotlivé zaťažovacie stupne (DANKO et.al. 1999)
Table 2: Oedometer modulus for loading steps (after DANKO et. al. 1999)

	Oedometrický modul E_{oed} (MPa)			
Zaťažovací stupeň (kPa)	F4 CS tuhá	F6 CI Tuhá	F8 CH tuhá	F8 CH pevná
0 – 50	7.62	7.93	6.17	4.65
50 – 100	7.28	6.02	4.85	12.09
100 – 200	8.78	6.93	20.67	10.09
200 – 300	13.93	11.5	9.06	
300 – 400	14.46	12.49	10.04	11.10
400 - 0	21.26	14.65	17.13	18.95

3. Voľba konsolidačnej metódy pod násypom

V poslednej fáze výberu vhodnej metódy urýchlenia konsolidácie železničného násypu pri Šenkviciach zostali tri metódy. Metóda zhotovenia vápenných pilót, metóda urýchlenia konsolidácie pomocou vrtaných štrkopieskových alebo pieskových pilót a metóda urýchlenia konsolidácie pomocou zatláčaných geodrenov. Voľbu vhodnej metódy možno uskutočniť

viacerými spôsobmi, intuitívne – robí to viacmenej každý, ak nemá iné možnosti a prostriedky, na základe analógie z riešenia podobnej úlohy v porovnateľných geologických pomeroch, alebo tým, že vlastní alebo vykonáva iba jednu vhodnú technológiu. Pre významnejšie stavby je však potrebné použiť na voľbu najvhodnejšej technológie tzv. optimalizačnú metódu (MAŇAS 1979), alebo niektorú z iných dostupných metód. Jedna takáto metóda je opísaná a odvodená (SAATYM 1992) „Analytic Hierarchy Process – AHP“ a na jej základe zostavený softwarový program. Pri metóde AHP sa zostaví systém optimalizácie pozostávajúci z cieľa, zvolených kritérií a alternatív, hierarchicky usporiadaný podobne ako rodokmeň (obrázok 1).



Obrázok 1: Základná štruktúra zostavenia AHP
Figure 1: Structure of the AHP

Proces zostavovania systému sa nerobí len pre pomoc presnejšie identifikovať všetky rozhodujúce prvky, ale tiež rozpoznať väzby medzi nimi. Z faktorov, ktoré robia metódu AHP azda najpopulárnejšiu rozhodovacou metódou na svete je to, že sa prispôsobuje pevným údajom, takým ako napr. cena, rýchlosť výstavby, rozmery ako aj osobné skúsenosti a v neposlednej rade aj intuícii. Dovoľuje teda matematicky odvodiť váhu jednotlivých kritérií, namiesto predpokladania alebo voľby váhy premenných, ako to robia iné rozhodovacie metódy. Na všetkých úrovniach rozhodovania je preferovaná séria porovnaní medzi rôznymi alternatívami alebo kritériami vplyvu na rozhodovanie. To je robené za použitia slovného vysvetlenia a číselných hodnôt (pozri tabuľku 3). Výsledok je daný matematickou váhou v pomernej škále pre alternatívy a kritériá. Pri rozhodovaní sa majú zohľadniť sociálne, politické, technické i ekonomické faktory.

Podrobnosti o matematickom riešení možno podrobnejšie zistiť v literatúre (SAATY 1992), alebo manuálov softwaru AHP.

Príklad výberu optimálnej metódy na urýchlenie konsolidácie pod násypom preložky železnice pri Šenkviciach sa urobil podľa nasledovnej schémy. Cieľom bola voľba medzi metódou zhotovenia vápenných pilót, metódou urýchlenia konsolidácie pomocou vrtaných štrkopieskových alebo pieskových pilót a metódou urýchlenia konsolidácie pomocou zatláčaných geodrenov.

Zvolili sa tieto **základné kritéria** a podkritériá:

A - Schopnosť zlepšenia podložia a kontrola jeho funkcie, podkritériá

A1 **-** sadanie

A2 **-** vodorovné posuny

A3 - pórové tlaky.

Tabuľka 3: Slovné vysvetlenie a príslušné číselné hodnoty použité v AHP (SAATY 1992)
Table 3: Verbal expressions and corresponding numerical values used in AHP (SAATY 1992)

Intenzita dôležitosti	Definícia	Vysvetlenie
1	Rovnaká dôležitosť	Dva prvky sa spolupodieľajú
3	Menšia dôležitosť jednej metódy vzhľadom k druhým	
5	Podstatná alebo veľká dôležitosť	Skúsenosti a poznatky trochu viac preferujú jednu činnosť (metódu) pred druhou
7	Veľmi veľká alebo očividná dôležitosť	Jedna činnosť (metóda) je veľmi preferovaná pred druhou, je prevládajúco používaná v praxi
9	Absolútne dôležitá	Preferovaná metóda (činnosť) jednej pred druhou je absolútne akceptovaná
2, 4, 6, 8	Medziľahlé hodnoty medzi uvedenou škálou	Ak je potrebný kompromis vzhľadom k nejednoznačnosti priradenia k uvedeným definíciám dôležitosti

B - Vplyv na životné prostredie, podkritériá

B1 **-** hluk a vibrácie

B2 - vplyv na okolie, prašnosť

B3 - vplyv použitých chemikálií.

C - Možnosť predpovede sadania a konsolidácie, podkritériá

C1 - schopnosť výpočtových modelov predpovedať sadanie a konsolidáciu

C2 - skúsenosti s metódou

C3 - poznatky o stlačiteľnosti

C4 - poznatky o hĺbke stlačiteľných zemín.

D - Splnenie podmienok stability, podkritériá

D1 - schopnosť výpočtových modelov predpovedať stabilitu

D2 - skúsenosti s metódou

D3 - pevnosť podložia po zlepšení.

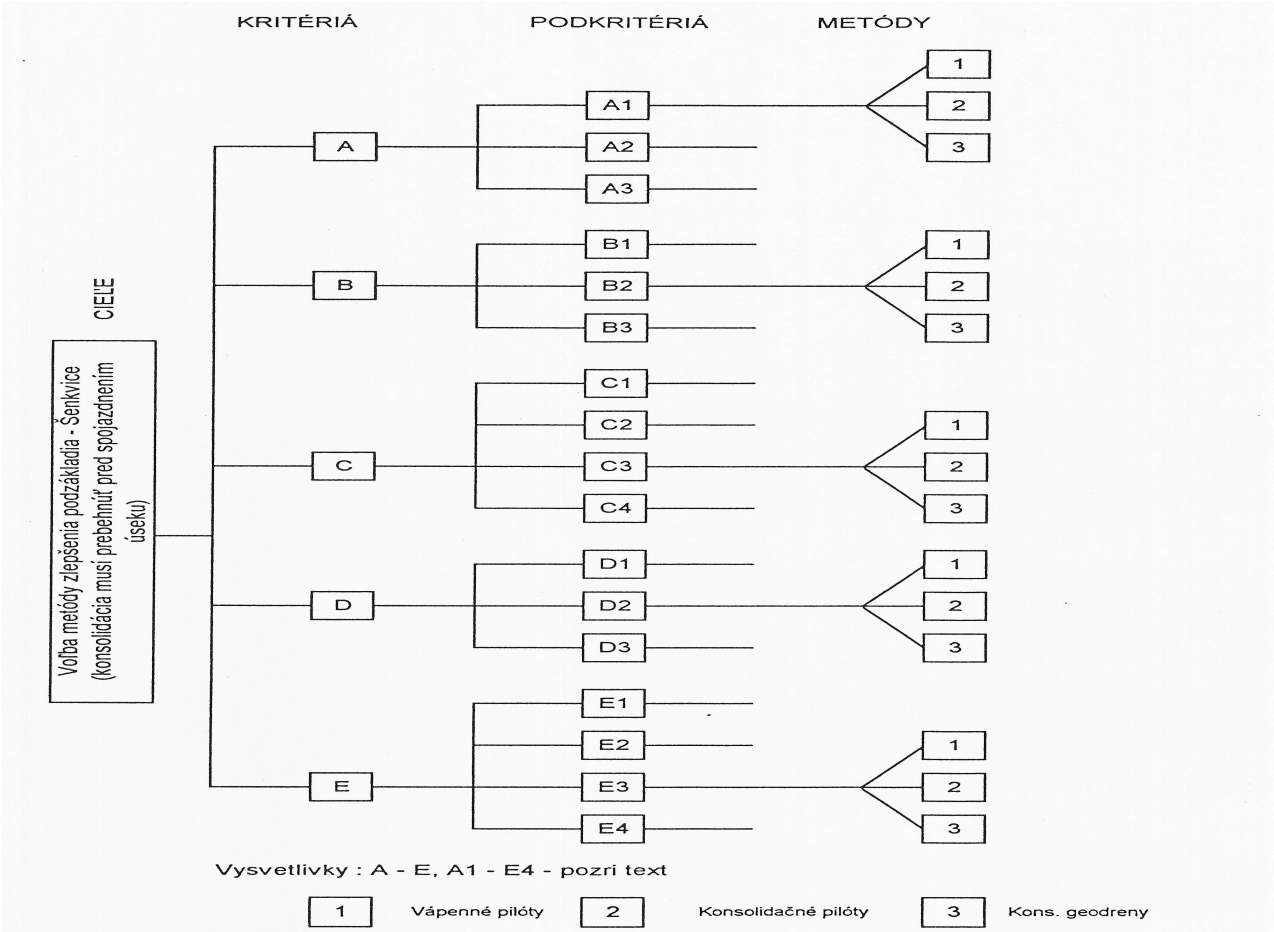
E - Ekonomické kritériá, podkritériá

E1 - náklady na materiál

E2 - náklady na zhotovenie
E3 - náklady na údržbu
E4 - čas zhotovenia.

Rozhodovanie má zohľadniť sociálne, politické, technické i ekonomické faktory.

Vývojový diagram rozhodovania o najvhodnejšej metóde zlepšenia podzákladia násypu pri Šenkviciach je na obrázku 2. Každému zo 17 podkritérií sme pomocou tabuľky 3 priradili číselnú hodnotu.



Obrázok 2 : Hierarchická štruktúra pre voľbu metódy zlepšenia podložia násypu pri Šenkviciach
Figure 2 : The hierarchic structure used for the selection of the embankment subsoil improvement method near Šenkvice

Po zhodnotení vhodnosti metód zlepšenia podložia sme obdržali pre konsolidačné geodrény váhu vhodnosti metódy 0,60, pre vŕtané pieskové konsolidačné drény 0,52 a pre vápenné pilóty 0,36. Do rozhodovania o najvhodnejšej metóde nakoniec vstúpili aj dve závažné skutočnosti. Metódu vápenných pilót vylúčila vyhláška Ministerstva zdravotníctva o zákaze aplikácie takých chemických hmôt pod hladinou podzemných vôd, ktoré môžu zhoršiť kvalitu vôd a pieskové pilóty vylúčil pri konečnom rozhodovaní investor po dohode s projektantom, a to v dôsledku nedostatku vhodných sypkých zemín v blízkom okolí stavby. Takže metóda konsolidačných geodrénov z hľadiska vhodnosti vyšla v konkrétnom prípade po všetkých stránkach najvhodnejšia.

4. Optimalizácia návrhu konsolidačných zvislých syntetických drénov - geodrénov

Metóda urýchlenia konsolidácie stlačiteľného podložia pod zemnými konštrukciami pomocou geodrénov sa teoreticky aj prakticky pripravila pre domáce podmienky na začiatku osemdesiatych rokov. VÚIS Bratislava vypracoval projektové podklady (Baslík, Petrík 1984) a Dopravní stavby Olomouc vyvinuli zariadenie na inštaláciu geodrénov (Kratochvíla 1985). Výsledky týchto prác a najmä skúsenosti z prvých realizácií geodrénov na Slovensku boli veľmi pozitívne (Baslík et.al. 1984), (Baslík 1987). Geodrény v podloží násypu sa často kombinovali s vystužením základovej škáry násypu pomocou geosyntetiky (Holický et.al. 1984).

Na dimenzovanie geodrénov sa používa zjednodušený vzťah:

$$t = D^2/8c_h\,[\ln D/d - 3/4]\,\ln(1/1-\bar{U}_r)$$

kde t je čas konsolidácie (sec)

D - priemer odvodňovaného valca zeminy (m)

c_h - súčiniteľ konsolidácie pri vodorovnom prúdení vody ($m^2 . s^{-1}$)

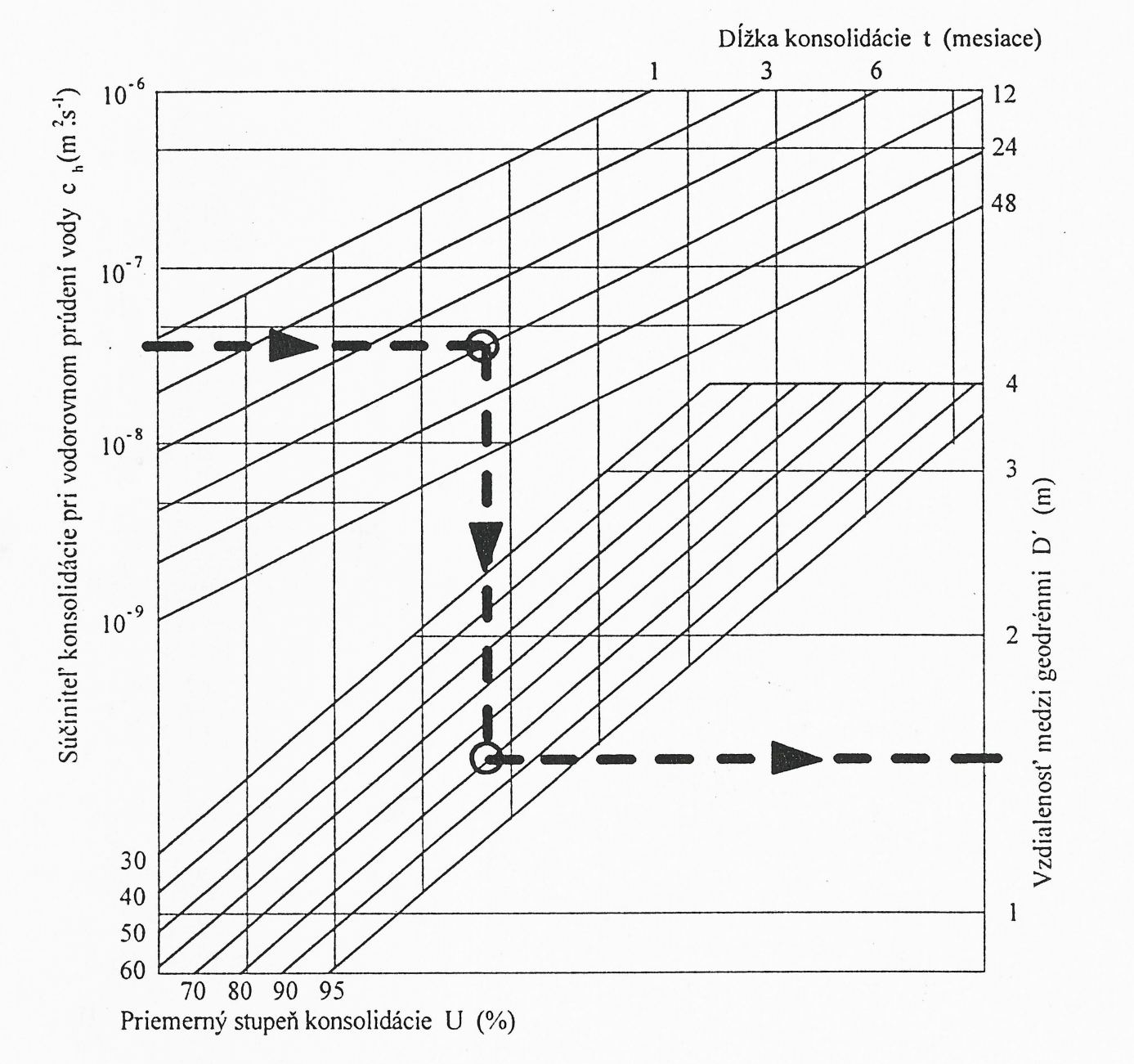
d - ekvivalentný priemer geodrénu (m)

$\bar{U}_r$ - priemerný stupeň konsolidácie pri radiálnom prúdení vody ku drénu (%).

Výsledkom návrhu geodrénov je vzdialenosť medzi geodrénmi v trojuholníkovej alebo štvorcovej sieti, tj. „hustota“ siete. Okrem uvedených vstupných parametrov konečný návrh geodrénov ovplyvňujú v určitých prípadoch aj dĺžka geodrénov (ak je väčšia ako 10 m) a pomer medzi priepustnosťou zeminy podložia a drenážnou kapacitou geodrénu. Navrhnutá dĺžka geodrénov pod železničným telesom pri Šenkviciach je v rozpätí od 8 do 10m, takže táto veličina sa neuvažovala pri návrhu siete geodrénov.

Na stanovenie vzdialenosti medzi geodrénmi sa používajú návrhové diagramy zostavené osobitne pre každý typ geodrénu. Schéma návrhového diagramu je na obrázku 3. Pre rôzne hodnoty vstupných parametrov (alternovaním dĺžky a stupňa konsolidácie) možno rýchlo urobiť rad návrhov a spomedzi nich stanoviť optimálny návrh vzdialenosti medzi geodrénmi.

Z podrobnejšej analýzy návrhového diagramu je zrejmé, že rozhodujúcim vstupným parametrom je c_h - súčiniteľ konsolidácie pri vodorovnom prúdení vody. Pri počiatočnom informatívnom návrhu možno použiť zjednodušený predpoklad, že $c_h = c_v$. Pri podrobnejšom návrhu sa však musí doplňujúcim inžinierskogeologickým prieskumom zistiť, a v návrhu uvažovať presná hodnota c_h, pretože priepustnosť i súčiniteľ konsolidácie je vzhľadom na sedimentačné pomery, konsolidačné napätia a iné vplyvy, vo vodorovnom a zvislom smere spravidla rozdielny.



Obrázok 3 : Návrhový diagram pre geodrény (podľa Baslík, 1987)
Figure 3 : Design chart for vertical drains (according to Baslík 1987)

5. Záver

Pri modernizácii železničných tratí na území SR na návrhovú rýchlosť 160 km.h^{-1} sa na úseku trate pri Šenkviciach musí navrhnúť násyp na neúnosnom stlačiteľnom podloží. Pri výbere metód urýchlenia primárnej konsolidácie sa do ostatnej analýzy dostali tri metódy. Zlepšenie podzákladia vápennými pilótami, vŕtanými pieskovými konsolidačnými pilótami a metóda urýchlenia konsolidácie pomocou geodrénov. Po analýze sa odporúčala ako najvhodnejšia metóda urýchlenia konsolidácie pomocou geodrénov. Pri predbežnom návrhu sa uvažoval súčiniteľ konsolidácie vo vodorovnom smere $c_h = 3 \cdot 10^{-8}$ m^2 . s^{-1}, čas konsolidácie do začiatku prevádzky 24 mesiacov a stupeň konsolidácie U = 95 %. Za použitia

grafu na obr. 3 vyšla minimálna osová vzdialenosť konsolidačných geodrénov trojuholníkovej siete 1,4 m.

Literatúra

BASLÍK,R.: *Vystužené cestné násypy*. Dizertačná práca. Bratislava. 1987. s.182.

BASLÍK,R., PETRÍK,P.: *Projektové podklady na zavedenie syntetických zvislých drénov do praxe*. Správa pre DS Olomouc: VÚIS Bratislava, 1984. 81 s.

BASLÍK,R, PETRÍK,P., HOLICKÝ,S.: The construction of embankment utilizing vertical prefabricated drains and reinforcing geotextile. In: *Proc. 6th Conf. on SMFE*. Budapest. 1984, pp.451-458.

BERGGREN, B., OLSSON, L., JOHANSSON, J.: AHP – a tool for geo-decisions. *Proceeding XIII Nordiska Geomortet, Finish Geotechnical Society, Bulding Information Ltd.,* Helsinki, 2000, ISBN 951-682-600-8, p. 561 – 569

DANKO,J. ŽSR Modernizácia trate Bratislava Rača – Trnava, UČS 01, 06 a 08, Doplňujúci inžinierskogeologický a hydrogeologický prieskum, Geohyco Bratislava, 1999

HOLICKÝ,S., PETRÍK,P., BASLÍK,R.: Stavba vystuženého násypu v Mochovciach. In: *Spravodaj VÚIS*, roč.7, 1984, č.1, s.17-19.

KRATOCHVÍLA, L.: Zlepšování podloží konsolidačními drény. Záverečná správa OÚ G 321-104: DS Olomouc. 1985.

MAŇAS,M.: *Optimalizační metody*. TKI SNTL Praha, 1979, 257 s.

MATYS, M., BASLÍK, R.: ŽSR Modernizácia trate Bratislava Rača – Trnava, UČS 06 Traťový úsek Pezinok – Šenkvice. Manuskript , III, Vypracovanie návrhu urýchlenia konsolidácie podložia na „šenkvickej preložke“. Pre Prodex s.r.o. Bratislava , 1999

SAATY, T.: Multicriteria decision making – The Analytic Hierarchy Process. RWS Publicatins, Pittsburgh, 1992