

# Realizácia podzemných tesniacich stien tryskovou injektážou

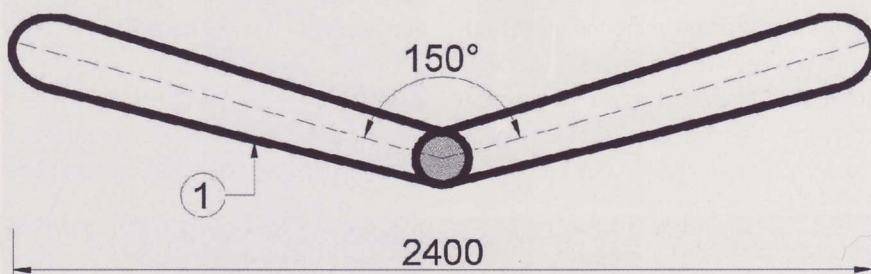
Príspevok sa zaoberá problematikou prípravy realizácie podzemných tesniacich stien zhotovených tryskovou injektážou. Stručne prechádza všetkými bodmi stavebno-technologickej prípravy od geologických pomerov cez materiálovú základňu, pripravenosť stavby a pracoviska, zariadenie staveniska pre dané procesy, technológiu zhotovenia, postup realizácie, časový plán a zásobovanie až po odovzdanie diela. Najväčšia pozornosť sa venuje kontrolným činnostiam, zabezpečujúcim kvalitu a funkčnosť výsledného diela. V tejto súvislosti sú dôležité aj podmienky preberania prác investorom, ktoré sú úzko späté so skúšobníctvom.

**pripravil:** Peter Briatka, Technický a skúšobný ústav stavebný

**M**etóda tryskovej injektáže Soilcrete je odvodená od anglických slov „soil“ (zemina, pôda) a „to concrete“ (tvrdnúť, stmeliť do kompaktnej hmoty). Základné princípy fungovania metódy Soilcrete boli vyvinuté v metóde CJG (Column Jet Grout), v šesťdesiatych rokoch 20. storočia, ktorá spočívala v prerezávaní zeminy vodným lúčom chráneným vzduchom, za súčasného tryskania cementovej suspenzie. Tieto procesy sa dejú za zdvíhania a rotácie tryskovej hlavy z dna vrtu. Zopakovaním tohto procesu vo vhodnom množstve a vhodnej vzájomnej vzdialenosti vzniká podzemná tesniaca stena (ďalej len PTS). Z vysvetlenia názvu a pôvodu je zrejmé, že metóda sa zaoberá vylepšovaním vlastností základovej pôdy. Keďže ide o geotechnickú metódu a vedomosti z tejto oblasti sa v stavebnej praxi značne podceňujú, je nevyhnutné zaoberať sa problematikou aj v teoretickej rovine.

Realizácia predmetných PTS bola navrhnutá pre stavebnú jamu polyfunkčného komplexu v Bratislave. Stavebná jama dosahovala maximálne rozmery 122,0 x 56,5 m; hĺbka figúry bola 5,7 m a hĺbka pracovnej úrovne 4,15 m pod okolitým terénom, pričom hladina podzemnej vody (HPV) sa nachádzala 4,35 m pod terénom.

Potreba zabezpečenia stavebnej jamy vznikla z dôvodu zložitých geologických

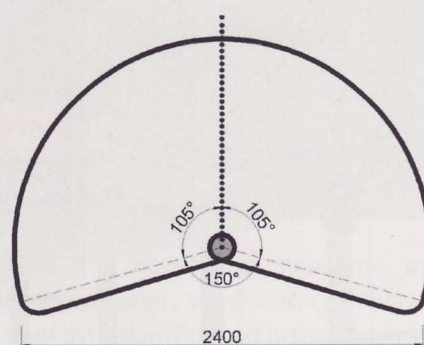


Obr. 1 Obojstranná lamela

a hydrogeologických pomerov. Zabezpečenie stavebnej jamy bolo potrebné riešiť v troch základných oblastiach. Stabilita strmých svahov stavebnej jamy (riešená tzv. klincovaným torkrétom), ochrana pred prítokom podzemnej vody (vytvorenie tzv. hydraulického bariéry – predmet tejto práce) a znižovanie HPV pomocou čerpacích studní.

PTS museli byť zhotovené tak, aby vytvorili súvislú stenu (vzdialenosť vrtov 2100 mm) dostatočne hlboko (3 m) zasahujúcu až do piesčito-ílovitej nepriepustnej neogénnej vrstvy v hĺbke 18,25 m pod terénom. Z hľadiska minimalizovania nákladov a optimalizovania času výstavby bol po zvážení všetkých podmienok staveniska zvolený nasledovný postup vyhotovenia a zabezpečenia stavebnej jamy:

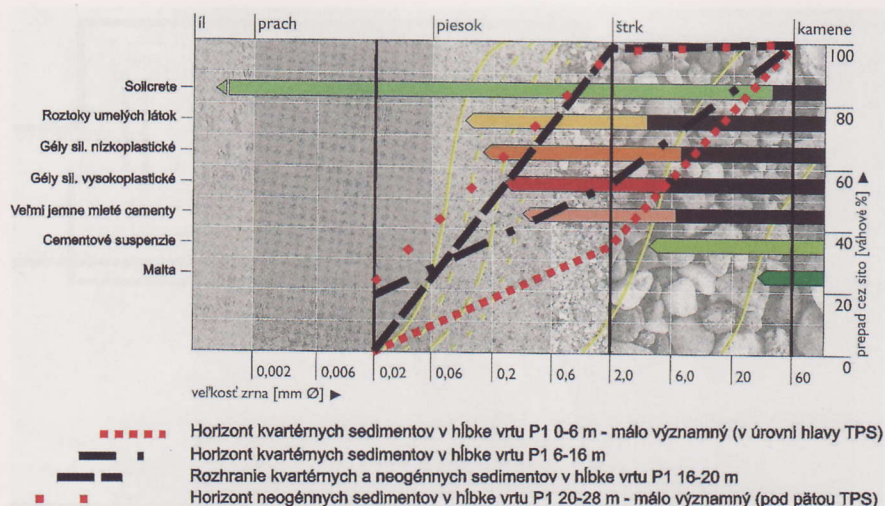
1. Prekládka inžinierskych sietí predchádzajúca výkopu stavebnej jamy na pracovnú úroveň (-4,15 m = 20 cm nad HPV) s priebežným torkrétova-



Obr. 2 Polstĺpová hlava lamely

ním a klincovaním jej stien. Stavebná jama bola navrhnutá s dvomi rampami v sklone do 15° a celoobvodovou ryhou na odčerpávanie spätnej suspenzie;

2. Hĺbkové vibračné zhutnenie podzákladia výškových častí stavby;
3. Realizácia PTS celkovej dĺžky 17 m z pracovnej úrovne. PTS boli dôvodu následného odkopu podľa bodu 5 (na rôzne hĺbky) navrhnuté v dvoch typoch telies, čo zabezpečilo ich vodotesnú a zároveň pažiacu funkciu. Hĺbková (vý-



Obr. 3 Výber druhu injekčnej zmesi na základe zrnitosti prostredia

lučne vodotesná) časť PTS pozostávala z obojstranných lamiel (obr. 1) vytvorených vyťahovaním injektážneho sútyčia za neustáleho kmitania okolo osi rotácie. Vrchná (vodotesná aj pažiaca) časť pozostávala z polstĺpov (obr. 2) vytvorených na lamelovej PTS od hĺbky závislej na konečnej hĺbke výkopu v danom mieste;

- Znižovanie HPV;
- Výkop na definitívnu úroveň základovej škáry za súčasného kĺncovania vrchnej časti PTS.

### Injektážna zmes

Návrh vhodného zloženia injektážnej zmesi bol determinovaný množstvom činiteľov, ktoré možno rozdeliť z hľadiska pôvodu na dve základné oblasti. Prvú oblasť tvoria geotechnické vlastnosti základovej pôdy a hydrogeologické pomery, ktorých rôznorodosť zásadne komplikuje jednotný optimálny návrh injektážnej zmesi pre všetky dotknuté geologické prostredia. Druhou oblasťou sú vlastné materiálové charakteristiky a reologické vlastnosti navrhovanej injekčnej zmesi.

Z hľadiska geotechnických vlastností sú pre návrh injekčnej zmesi rozhodujúce najmä zrnitosť (určuje homogenitu), pórovitosť (udáva teoretické množstvo zmesi na vyplnenie pórov) a priepustnosť prostredia (daná spomínanou zrnitosťou a pórovitosťou).

**Zrnitosť prostredia** je vyjadrená krivkou zrnitosti, ktorá udáva podiel častíc rôznych rozmerov vo forme diagramu prepadu cez sítá príslušných rozmerov. Na návrhu injekčnej zmesi sa podieľa značnou váhou, pretože ovplyvňuje pórovitosť aj priepustnosť. Vplyv na návrh je zrejmy z obr. 3.

**Pórovitosť prostredia** ( $n$ ) je úzko spätá s granulometrickým zložením, mechanizmom vzniku zeminy a tlakom, akým bola vystavená.

**Priepustnosť prostredia** popisuje hyd-

Zložka	Označenie	Dávka (kg/100l)
Cement CEM I 32,5 R	C	13
Bentonit S110	B	36
Voda (STN 73 2028)	V	56

Tab. 1 Predpísané zloženie suspenzie

Parameter	Označenie	Hodnota	Jednotka	Parameter	Označenie	Hodnota	Jednotka
Súčiniteľ $V/(C+B)$		1,17		Rýchlosť ťahania sútyčia	$v$	220	mm/min
Obj. hmotnosť suspenzie	$\rho$	1,06	g/cm <sup>3</sup>	Rezný tlak	$p$	45	MPa
Pevnosť v tlaku	$F_c$	1,00	MPa	Tlak vzduchu	$p_{air}$	1,2	MPa
Tesnenie suspenzie	$k_s$	$6,55 \cdot 10^{-9}$	m/s	Injektované množstvo	$Q_i$	160-240	l/min
Pevnosť v tlaku po 28 d.	$F_{c,28}$	90 % $F_c$		Injekčný tlak	$p_i$	4	MPa

Tab. 2 Predpísané parametre suspenzie a injektáže

raulické vlastnosti zeminy a prúdenie vody v póroch. Pre bežné stavbárske účely je najvhodnejšie popísaná koeficientom filtrácie  $k_f$ , na základe ktorého vieme empiricky určiť požadovaný priemer zrn injektážnej zmesi.

Trysková injektáž PTS bola na základe zrnitosti zeminy (obr. 3) navrhnutá stabilnou suspenziou (nedochádza ku dekantácii) Soilcrete predpísaného zloženia (tab. 1) a parametrov (tab. 2).

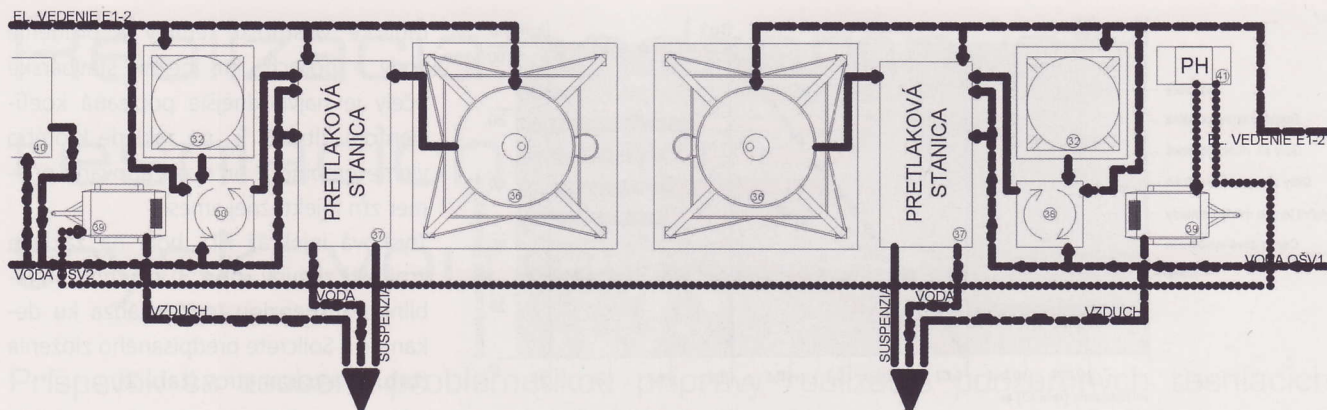
### Zariadenia staveniska

Na základe dispozície stavebnej jamy a potreby minimalizovania času realizácie PTS bolo navrhnuté vyhotoviť tieto PTS pomocou dvoch injektážnych súprav, čo si vyžiadalo vhodne zosúladiť ich činnosť (jedna súprava párne a druhá nepárne vrty s oddialením 4 dní) a navyše zdvojnásobiť obvyklé zariadenie staveniska (ZS) používané pre jednu súpravu.

Základné elementy výrobného ZS (obr. 4) predstavujú zásobníky cementu a bentonitu, miešacia centrála, vzduchový kompresor a pretlaková stanica obsahujúca aj dezintegrátor bentonitu. Toto ZS muselo mať z dôvodu stiesnených priestorových pomerov a nadmerných rozmerov samotných zásobníkov presne definované poradie montáže a demontáže.

Výrobný postup možno zjednodušené popísať a rozdeliť na:

Vrtné práce, kedy sa vrtným dlátom, chladeným cemento-bentonitovým (CB) výplachom, zhotoví vrt do požadovanej hĺbky;



Obr. 4 Schéma výrobného ZS

Injektážne práce – začínajú okamžite po ukončení vŕtania. Sútyčie sa vyťahuje predpísanou rýchlosťou za dodržania frekvencie otáčania (v tomto prípade pootáčania), kedy sa injektážnou hlavou s dvoma úrovňami trysiek vykonáva vlastná injektáž. Horná zložená tryska (vodný lúč obalený vzduchom) zabezpečuje erodovanie zeminy, a tým zvýšenie pórovitosti prostredia a dosahu injektáže, zatiaľ čo spodná tryska slúži na injektovanie prostredia CB suspenziou; Ošetrovanie sa vykonáva dolievaním suspenzie do vrtu, čím sa udržiava jej pretlak až do času zatuhnutia.

Samotnej realizácii PTS predchádzalo viacero procesov, zabezpečujúcich jej kvalitu, dodržanie predpísaných parametrov a správne vykonanie. Pred začiatkom realizácie PTS bolo potrebné vykonať pasportizáciu okolitých objektov, aby sa dali sledovať zmeny ich stavu počas týchto geotechnických procesov. Taktiež boli vytýčené polohy a výškové úrovne vrtov, bolo vykonané nastavenie a kontrola miešania suspenzie, pretlaku, rýchlosti vyťahovania a rotácie sútyčia.

## Kontrolné procesy

**Kalibrácia strojných zariadení** pred ich zaradením do výrobného procesu sa vykoná „in situ“ na dvoch skúšobných vrtoch umiestnených vnútri dispozície jamy. Z kalibrácie sa vyhotoví záznam, ktorý je neskôr súčasťou dokumentácie pri odovzdávaní diela. Na týchto skúšobných vrtoch sa overí aj geologická skladba podložia sledovaním injektovaného množstva suspenzie. Overí sa aj predpokladaná vhodnosť kapacity stavenískovej prípojky vody. Súčasne sa kalibrujú vysokotlakové čerpadlá skúšobným



tlakom 30; 35; 40 a 45 MPa a plniace čerpadlá skúšobným tlakom 2; 2,5; 3; 3,5; 4 MPa, čím sa odstráni pokles tlaku v potrubiach.

**Kalibrácia injekčných súprav (IS)** sa vykonáva jednoduchými meraniami výšky zdvihu a počtov otáčok značky umiest-

nenej na sútyčích v časových intervaloch 2 minúty. Kalibrácia sa vykonáva na každej IS pred zahájením predrealizačnej kontroly.

**Predrealizačná kontrola návrhových parametrov injektáže** (podľa [10]) sa vykonáva na skúšobnom vrte. Začiatok



skúšobnej injektáže by mal byť najneskôr jeden deň pred plánovaným zahájením prác na prvom vrte. Po zatvrdnutí suspenzie (min. 12 hod.) sa teleso odkope (za súčasného čerpania prítokov podzemnej vody) na úroveň, z ktorej možno skontrolovať jeho rozmery. Tejto kontrole sa zúčastňuje aj stavebný dozor. Na základe meraní rozmerov telesa sa posúdi vhodnosť prvotného návrhu rýchlosti vyťahovania a otáčania sútyčia.

**Kontrola zrovnania** IS musí byť vykonaná pred začatím každého vrtania. Zrovnanie IS sa kontroluje tak polohové, ako i horizontálne. Polohové zrovnanie stredu sútyčia sa kontroluje voči osi vytýčeného vrtu, pričom sa nesmie prekročiť odchýlka 50 mm. Horizontálne zrovnanie sa vykonáva vizuálne pomocou libely umiestnenej na IS.

**Kontrola sklonu budúceho vrtu** sa vykonáva pred začiatkom každého vrtania, a to sklonomerom priloženým na injektážne sútyčie. Podmienkou na umožnenie začiatku vrtania je, aby sa sklon sútyčia nelíšil od projektovaného sklonu o viac ako  $2^\circ$  (pre vrty dĺžky do 20 m podľa [10]).

**Kontrola smeru trysiek** sa vykonáva pred začiatkom injektáže každého telesa. Smer trysiek sa kontroluje vizuálne podľa polohy značiek na sútyčí, ktoré definujú polohu trysiek nasadenej injektážnej hlavy.

**Kontrola priebehu vrtania a injektáže** sa vykonáva nepretržite počas celej doby práce IS, a to automatickou zbernou dátovou jednotkou. V časovom intervale (zvyčajne) troch sekúnd sa zaznamenávajú nasledovné údaje: čas (s), hĺbka (m),

rýchlosť (m/min), otáčky sútyčia (u/min), prítlak (bar), krútiaci moment (kNm), tlak suspenzie (bar), tlak vody (bar), tlak vzduchu (bar).

**Kontrola množstva prítoku a vzhľadu spätnej suspenzie** sa vykonáva vizuálne pomocným pracovníkom. Zistenie radikálneho zníženia prítoku suspenzie by mohlo naznačovať upchatie medzikružia vrtu alebo narazenie na určitú diskontinuitu prostredia.

**Kontrola deformácií okolitých objektov** sa vykonáva geodetickým meraním osadených meračských značiek až po ukončení injektážnych prác prvej čaty na severnej časti PTS. Výsledky merania sa porovnávajú s vykonanou pasportizáciou.

**Kontrola injektážnej suspenzie** sa vykonáva z každej ucelenej výrobnéj jednotky ZS počas prípravných prác a následne v každej zmene v počte predpísanom pre jednotlivé parametre, ako je uvedené neskôr.

**Viskozita Marsh (s)** (podľa požiadaviek [10]) sa zisťuje dvakrát za zmenu na 3 vzorkách odobratých z každej ucelenej jednotky výrobného ZS. Veľkosť každej vzorky je približne 2 l. Odobratá vzorka s teplotou asi  $15^\circ\text{C}$  sa naleje v objeme 1,5 l do zosopu uzavretého prietokového viskozimetra Marsh. Po jeho naplnení





skúšanou suspenziou sa výtoková rúrka otvorí a meria sa čas potrebný na vytečenie 1000 cm<sup>3</sup> suspenzie do odmerného valca.

**Objemová hmotnosť** (g/cm<sup>3</sup>) (podľa požiadaviek [10]) sa kontroluje dvakrát za zmenu na 3 vzorkách odobratých pre zisťovanie viskozity. Objemová hmotnosť je definovaná ako podiel hmotnosti vzorky k jej objemu. Musí byť splnená podmienka, že výsledná objemová hmotnosť sa nesmie líšiť od predpísanej o viac ako 2 %.

**Dekantácia** (%) (podľa požiadaviek [10]) sa overuje jedenkrát za zmenu na 3 vzorkách (15 °C) použitých pre prvé zistenie viskozity a objemovej hmotnosti. Vzorka objemu 1000 cm<sup>3</sup> v odmernom valci priemeru 60 mm sa ponechá na sedimentáciu. Po uplynutí troch hodín sa na odmernom valci vizuálne zistí rozhranie suspenzie a odlúčenej vody, pričom sa množstvo tejto vody percentuálne vyjadrí v pomere k celkovému objemu suspenzie. Musí byť splnená podmienka, že dakantácia nesmie prekročiť 1 %.

**Odolnosť proti erózii** (-) sa vykonáva počas predrealizačnej kontrolnej injeckáže. Vzorky sa odoberajú zo spätnej suspenzie vystupujúcej popri injeckážnom sútyčí. Veľkosť každej z troch odoberaných vzoriek predstavuje približne 0,75 l – toto množstvo sa naleje do valcovej nádoby, v spodnej časti uzavretej korkovou zátkou s upevnenou sklenenou rúrkou. Suspenzia sa nechá 18 hodín tuhnúť a po tejto dobe sa sklenená rúrka

vytiahne, čím vznikne otvor s priemerom 8 mm. Pomocou nádržky vybavenej prepadom sa do valca púšťa také množstvo vody, aby vznikol ustálený prúd vody, cez otvor 8 mm, s rýchlosťou 2 m/s. Voda sa nechá prúdiť otvorom 1 hodinu. Po ukončení skúšky sa vizuálne posúdi úbytok zmesi. Aby bola skúška vyhodnotená ako vyhovujúca môže dôjsť iba k odlámaniu vtokových hrán.

## Kontrola spätnej suspenzie

**Objemová hmotnosť spätnej suspenzie** (podľa [10]) sa zisťuje jedenkrát za zmenu, a to na 3 vzorkách odobratých čerpacej ryhy.

**Pevnosť v tlaku** (MPa) stanovená laboratórne (podľa požiadaviek STN EN 12 716 [10]) sa zisťuje na vzorkách odobraných zo spätnej suspenzie jedenkrát týždenne. Veľkosť jednej vzorky je približne 1,75 l, čo postačuje na zhotovenie skúšobného valca s priemerom 100 mm a výškou 200 mm. Zo vzoriek sa vyrobí 3 skúšobné valce popísaných rozmerov, a tie sa 7 dní uchovávajú vo vlhkom prostredí pri teplote 10-25 °C. Po uplynutí tejto doby sa na všetkých troch skúšobných valcoch vykoná samotná skúška pevnosti v prostom tlaku.

## Kontrola zatvrdnutej suspenzie

**Pevnosť v tlaku vzorky suspenzie** z predrealizačnej kontroly stanovená laboratórne (podľa požiadaviek [10]) sa

overuje na vzorkách odobratých z injeckážnej suspenzie. Skúšobný postup sa dodržiava totožný s postupom v predchádzajúcom prípade, ale kondicionovanie vzoriek prebieha 28 dní.

### **Pevnosť v tlaku vzoriek telies PTS**

stanovená laboratórne (podľa požiadaviek [10]) sa overuje na troch náhodne zvolených telesách hotovej PTS (počet telies PTS nad 100 ks). Z každého vybraného telesa PTS sa odoberú tri skúšobné vzorky. Odber vzoriek vykonáva pracovník akreditovaného laboratória, a to jadrovým vrtaním nominálneho priemeru 100 mm a dĺžky vzorky bezpečne väčšej ako 200 mm. Záznamy o odbere vzoriek musia nezameniteľne popisovať miesto odberu, keďže v dobe odoberania vzoriek ešte nie je (nemusí byť) splnená podmienka ich veku (28 dní). Jednotlivé vzorky sa v laboratóriu skúšajú jednotlivu podľa dátumu zhotovenia telesa PTS, z ktorého boli odoberané. Výsledok skúšky môže byť považovaný za vyhovujúci, ak je dosiahnutá pevnosť v prostom tlaku minimálne 1 MPa. Odber vzoriek sa uskutočňuje najneskôr počas preberania diela.

**Skúška priepustnosti** sa vykonáva na jednej vzorke suspenzie, odobratej z každej ucelenej jednotky výrobného ZS, počas predrealizačnej kontroly. Veľkosť jednej vzorky je približne 8,5 l. Po odobratí sa vzorka suspenzie vyleje na dno priepustomeru s priemerom 400 mm tak, aby dosahovala výšku 200 mm. Dno priepustomeru je vopred upravené tenkou vrstvou piesku na vrstve štrku (priemer zŕn 5-7 mm). Skúšobná vzorka sa 28 dní kondicionuje vo vlhkom prostredí s teplotou 10-25 °C. Po uplynutí tejto doby sa vzorka vystaví postupne sa zvyšujúcemu vodnému tlaku z hodnoty hydraulického gradientu  $i = 5$  až do pretrhnutia vzorky. Hydraulický gradient v momente porušenia vzorky predstavuje výslednú medzu kritického hydraulického gradientu ovplyvňujúcu koeficient filtrácie. Keďže skúška trvá dva mesiace, jej vyhodnotenie môže v niektorých prípadoch byť dodatočne zaslané stavebnému dozoru.

Kontrola tesnosti PTS

**Skúška priepustnosti** (podľa požiadaviek [10]) sa vykonáva pred zhotovením výkopov pod hladinu podzemnej vody, a to overovacou čerpacou skúškou podľa [11] na vrte z hydrogeologického



prieskumu. Pred zahájením skúšky sa odčerpá statická zásoba podzemnej vody. Skúška pozostáva z odčerpávania podzemnej vody do vzdialeného vrtu (približne 100 m), pričom sa sleduje zníženie HPV v určitých časových intervaloch. Výsledkom skúšky je zistenie koeficientu filtrácie.

Dodržaním týchto základných metodických krokov pri návrhu realizácie PTS a nepodceňovaním dôležitosti sledovania kvality výroby možno predísť komplikáciám, ktoré môžu mať v prípade spodnej stavby (keďže je odrazovým mostíkom ku všetkým následným etapám stavby) fatálne následky nielen na stavbu, ale v konečnom dôsledku aj na hospodársky výsledok jej hlavného zhotoviteľa.

#### Literatúra

1. D. Čabalová, F. Baliak: Geológia, STU, Bratislava 2001
2. J. Hulla, P. Turček, F. Baliak, F. Klepsatel: Predpoklady a skutočnosť v geotechnickom inžinierstve, Jaga, Bratislava 2002
3. O. Makýš, P. Makýš: Stavenisková prevádzka, Zariadenie staveniska, vydavateľstvo STU, Bratislava 2003
4. U.S. Department of Energy: Cement Bentonite Thin Diaphragm Wall, 2000
5. J. Verfel: Injektování hornin a výstavba podzemných stěn, MÚS Bradlo, Bratislava 1992
6. J. Weidner: Durability of Jet Grout Materials, 2000
7. STN 73 3050 Zemné práce. Všeobecné ustanovenia
8. STN P ENV 1997-1 Navrhovanie geotechnických konštrukcií. Časť 1: Všeobecné pravidlá
9. STN 73 0090 Geologický prieskum pre stavebné účely
10. STN EN 12716 Vykonávanie špeciálnych geotechnických prác. Prúdová injektáž
11. STN 73 6614 Skúšky zdrojov podzemnej vody