

Zhodnotenie priepustnosti podložia a modelovanie priesakov z hornej nádrže PVE Ipeľ

PAVEL HARUŠTÁK¹, PETER WAGNER²

¹Ústav pro životní prostředí a využívání přírodních zdrojů, středisko Bratislava, L. Novomeského 2, 842 42 Bratislava

²Katedra inžinierskej geológie PF UK, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava

(Doručené 20. 6. 1989)

Evaluation of bedrock permeability and seepage modelling from the upper reservoir of the Ipeľ Pumping Storage Hydroelectric Power Plant (SE Slovakia)

An appropriate forecast of water seepage from the upper reservoir of a pumping storage hydroelectric power plant is one of conditions for the success of its construction and long-term operation of the entire waterwork. Results of in site investigations of the Ipeľ Pumping Storage Hydroelectric Plant yielded the input data for a computerized solution of seepage numerical modelling using finite differences. The analytical treatment of results allows positive assessment of the area in question as far as seepage forecast is concerned. The practice for further improvement of the applied procedure is indicated as well.

Úvod

Posúdenie priesakov z hornej nádrže prečerpávacej vodnej elektrárne (PVE) patrí vo všeobecnosti k zásadným otázkam, ktoré podmieňujú správne situovanie celého systému PVE. Úniky vody do masívu spôsobujú totiž nielen nenahraditeľné straty energie a znižujú efektivitu prečerpávania, ale môžu ohroziť priamo činnosť jednotlivých objektov PVE, čo vedie v extrémnych prípadoch až k vyradeniu diela z prevádzky. Dôležitosť posudzovaného problému narástla v ostatnom období predovšetkým v súvislosti s projektovaním PVE s týždenným cyklom prečerpávania, v ktorých je požadovaný objem horných nádrží zvyčajne väčší než 15 mil. m³ pri zodpovedajúcej ploche nádrže až okolo 1 000 000 m². Umelé tesnenie nádrží takýchto rozmerov je technicky a predovšetkým ekonomicky problematické. Vychádzať sa preto musí z čo najobjektívnejšieho zhodnotenia priepustnosti horninového masívu a naň nadväzujúceho návrhu efektívneho tesnenia jednotlivých jeho častí.

Zo zásadného významu otázok priepustnosti horninového prostredia v miestach projektovanej hornej nádrže PVE pre celkové posúdenie vhodnosti uvažovanej lokality vyplýva skutočnosť, že od inžinierskogeologického prieskumu sa očakáva vyjadrenie s dostatočnou prognostickou náplňou už v jeho počiatočných etapách.

Otázka zhodnotenia priepustnosti horninového masívu a z toho vyplývajúcej prognózy priesakov z hornej nádrže je veľmi aktuálna i pri hodnotení územia projektovanej výstavby PVE Ipeľ, ktorá patrí v súčasnosti k veľmi perspektívnym lokalitám PVE na Slovensku.

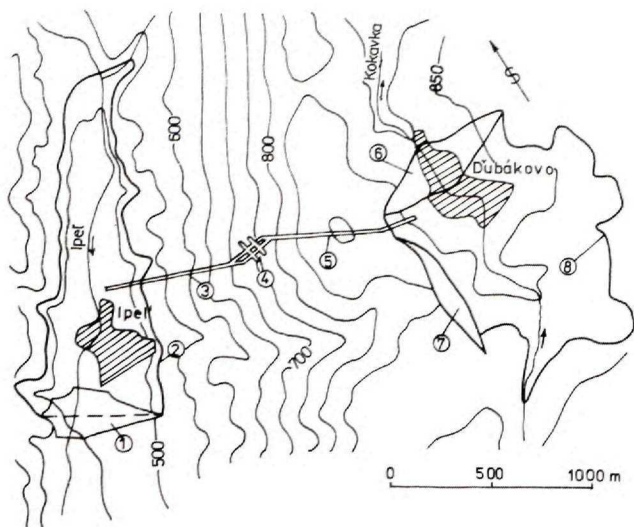
Technické riešenie PVE Ipeľ a geologická stavba územia

PVE Ipeľ sa má stavať v jz. časti Slovenského rudohoria na hornom toku rieky Ipeľ.

Technické riešenie (podľa štúdie Hydroprojektu Brno, 1981 in Matejček, 1984a) predpokladá vytvorenie dolnej nádrže objemu 16 mil. m³, ktorá vznikne prehradením toku Ipľa pri obci Ipeľ sypanou hrádzou výšky 78 m a s podzemným umiestnením hydraulického obvodu, pozostávajúceho zo zvislého privádzača Ø 4,5 až 6,0 m, elektrárne a odpadového tunela Ø 6,0 až 7,5 m. Horná nádrž má vzniknúť prehradením potoka Kokavka pod obcou Ďubákovo sypanou hrádzou výšky 60 m. Podľa projektu má úniku vody do údolia Chladnej studne zamedziť bočná hrádza výšky 15 m (obr. 1). Horná nádrž po vytažení materiálových nálezísk bude mať objem 16 mil. m³. Využitelný rozdiel hladín je 360 m, projektovaný výkon elektrárne 609 MW.

V súvislosti s narastajúcimi požiadavkami energetiky sa vypracovalo viacero aktualizovaných variantných riešení, umožňujúcich inštalovať na lokalite výkon 600 až 1 000 MW (Dobeš, 1988). Celková koncepcia riešenia PVE vo všetkých vypracovaných alternatívach však zostáva nezmenená: upresňujú sa predovšetkým parametre a vzťahy objektov hydraulického obvodu so snahou využiť poznatky z inžinierskogeologického prieskumu (Matejček, 1985a) a novšie technické možnosti pri inštalácii väčšieho výkonu na danej lokalite (navrhujú sa napríklad šikmé vedenie privádzača pod uhlom 45°, uvažuje sa o zväčšení rozmerov i zmene usporiadania kaverien atď.). V situovaní a parametroch hornej nádrže PVE nedošlo v novších projekčných riešeniach k žiadnym podstatným zmenám.

Celý systém PVE je situovaný do veporidného kryštalinika. Hlavným štruktúrnym prvkom je muránsko-divínska poruchová zóna, predstavujúca veľmi zložitú, až niekoľko stoviek metrov široké poruchové pásmo tvorené blastomylonitmi rôzneho charakteru a stupňa porušenia (Ondrášik et al., 1987). Na západ od uvedenej tektonickej zóny vystupujú prevažne biotitické granodiority

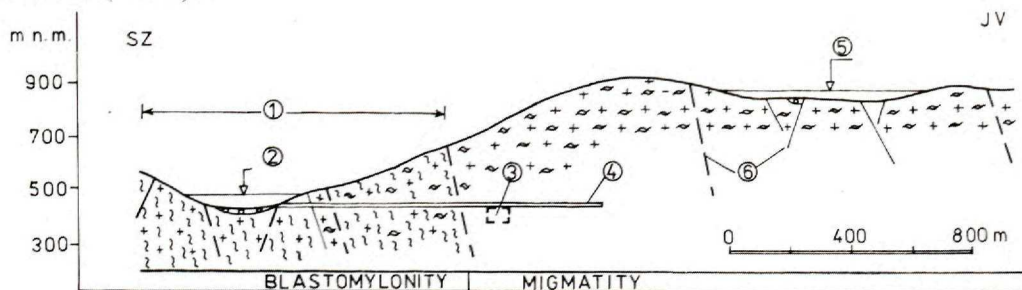


Obr. 1. Schéma usporiadania hlavných objektov PVE Ipeľ (podľa Hydroprojektu Brno, 1981 in Matejček, 1984a). 1 – hrádza dolnej nádrže, 2 – ohraničenie zátopnej oblasti dolnej nádrže, 3 – odpadný tunel, 4 – kaverna vodnej elektrárne, 5 – privádzač, 6 – hlavná hrádza hornej nádrže, 7 – bočná hrádza hornej nádrže, 8 – ohraničenie zátopnej oblasti hornej nádrže.

Fig. 1. Schematic arrangement of main objects of the Ipeľ Pumped Storage Hydroelectric Plant (Hydroprojekt Brno, 1981 in Matejček, 1984a). 1 – dam of the lower reservoir, 2 – limit of the flooded area of the lower reservoir, 3 – outlet tunnel, 4 – cavern of hydroelectric plant, 5 – penstock, 6 – dam of the upper reservoir, 7 – levee, 8 – limit of the flooded area of the upper reservoir.

až granity, východnú časť (teda aj horninové prostredie projektovanej hornej nádrže) tvoria prevažne kryštalicke bridlice, migmatity a hybridné granodiority (obr. 2). Z inžinierskogeologického hľadiska má najväčší význam štruktúrna nehomogenita horninového masívu, reprezentovaná okrem muránsko-divínskej poruchovej zóny diskontinuitami rôznej hierarchickej úrovne.

V r. 1979–1985 robil IGHP Žilina predbežný inžinierskogeologický prieskum daného územia (Matejček, 1985b), ktorý okrem rozsiahlych geofyzikálnych a technických prieskumných prác zahrňoval aj vyrazenie prieskumnej štólne dĺžky 1 070 m v smere projektovaného odpadného tunela (obr. 2).



Obr. 2. Geologický rez horninovým masívom v línii situovania hydraulického obvodu PVE Ipeľ (podľa Matulu et al., 1986). 1 – dosah prejavov regionálnej muránsko-divínskej poruchovej zóny, 2 – dolná nádrž PVE, 3 – priestor situovania kaverny VE, 4 – prieskumná štólňa, 5 – horná nádrž PVE, 6 – poruchové línie rôznych hierarchických úrovní.

Fig. 2. Geological profile of the rock mass in the line of the hydraulic circuit (according to Matula et al., 1986). 1 – limit of the regional Murán-Divín dislocation zone, 2 – lower reservoir, 3 – cavern of the power plant, 4 – exploration gallery, 5 – upper reservoir, 6 – dislocation of various significance.

Inžinierskogeologické zhodnotenie územia projektovanej hornej nádrže PVE tvorilo samostatnú časť prieskumu. Popri výbere optimálnych profilov hrádzi, posúdení objemu vhodných stavebných materiálov a ďalších otázkach k samostatným a veľmi náročným problémom patrilo zhodnotenie priepustnosti horninového prostredia a z toho vyplývajúcej prognózy priesakov z hornej nádrže. V našej štúdii chceme prispieť práve k riešeniu tohto okruhu problémov.

Analýza vstupných údajov pre výpočtové riešenie priesakov z nádrže

Pre ľubovoľný spôsob prognózovania priesakov vody z nádrže je potrebné charakterizovať rôzne typy horninového prostredia v dosahu vplyvu nádrže reprezentatívnymi filtračnými parametrami, predovšetkým koeficientom filtrácie. Kým na určenie tohto parametra v kvartérnych sedimentoch s pórovou priepustnosťou existuje viacero overených metód (čerpacie a nalievacie skúšky, výpočtové postupy na základe analýzy kriviek zrnitosti a pod.), charakterizovanie hydraulických vlastností skalných hornín s puklinovou priepustnosťou je podstatne komplikovanejšie i diskutabilnejšie. Ide totiž o osobitý typ filtračného prostredia s charakteristickou filtračnou heterogenitou a hydraulickou anizotropiou rôznych úrovní (Kullman, 1984), z čoho vyplýva i veľká zložitost režimu puklinových podzemných vôd. Na základe viacerých prác i všeobecne platných predstáv sa možno prikloniť k názoru, že v oblastiach budovaných silne rozpukanými horninami s pravidelnou sieťou puklín platia takmer rovnaké zákonitosti režimu podzemných vôd ako v pórovom prostredí. So vzrastajúcou heterogenitou prostredia vplyvom rozdielnej porušenia hornín a otvorenosti puklín významnú funkciu, ktorá ovplyvňuje režim podzemných vôd, preberajú predovšetkým diskontinuity, tvoriace významné drény, a tým i privilegované cesty pre podzemné vody. Z uvedených skutočností treba vychádzať pri určovaní hydraulických parametrov puklinového prostredia, ako aj pri posudzovaní rep-

reprezentatívnosti získaných výsledkov (Kullman, 1984; Jettel, 1984).

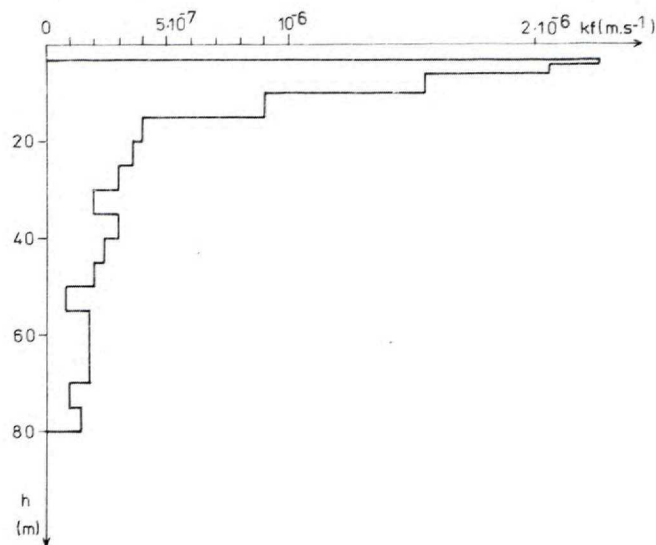
Problém charakterizovania prostredia puklinových skalných hornín výstižnými filtračnými koeficientmi riešia viacerí autori (Rac et al., 1979; Romm, 1966; Ťavoda, 1976; Van Golf-Racht, 1982 a ďalší). Ide zvyčajne o výpočtové postupy vychádzajúce z modelových predstáv rôzneho stupňa zjednodušenia reálneho horninového prostredia. Najčastejšie sa vychádza z predpokladu kvázihomogénneho prostredia, ktoré sa charakterizuje spriemerovanými parametrami diskontinuit bez zohľadnenia samostatného vplyvu výrazných otvorených porúch, ktoré predstavujú potencionálne najnebezpečnejšie cesty únikov vody do masívu, pričom i prúdenie vody môže mať v takomto prípade principiálne odlišný charakter (postupný prechod od laminárneho k turbulentnému prúdeniu, pri ktorom neplatí priama závislosť medzi rýchlosťou prúdenia a tlakovým gradientom, vyjadrená v Darcyho rovnici). Napriek uvedeným skutočnostiam ide o postupy, ktoré dovoľujú aspoň orientačne kvantitatívne charakterizovať filtračné vlastnosti horninového prostredia a umožňujú predovšetkým v úvodných štádiách prieskumu použiť výpočtové metódy na kvantitatívnu prognózu priesakov z nádrže.

Vzhľadom na úroveň vykonaného prieskumu lokality (etapa predbežného inžinierskogeologického prieskumu) sme základné predstavy o filtračnom koeficiente masívu skalných hornín získavali nasledujúcimi postupmi:

a) Výpočet filtračného koeficienta z výsledkov vodných tlakových skúšok. Z výsledkov vodných tlakových skúšok v priestore hornej nádrže v 23 vrtoch pre rôzne hĺbkové intervaly (prevažne do hĺbky 50 m, vo vybraných dielach až do 100 m) bol vypočítaný koeficient filtrácie na základe empirického vzťahu (Ťavoda, 1976):

$$k_f = \frac{\ln \frac{1}{r}}{2\pi \cdot 100} \cdot \frac{q}{p} \text{ (ms}^{-1}\text{)}$$

kde l (m) je dĺžka skúšanej etáže, r (m) je polomer vrtu, q ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) predstavuje mernú vodnú stratu v danej etáži a p (MPa) je tlak, pri ktorom došlo k strate vody q . Vypočítané hodnoty filtračného koeficienta pre jednotlivé odskúšané etáže (charakteristický príklad vyhodnotenia je na obr. 3) názorne ilustrujú zmeny priepustnosti horninového prostredia v smere do hĺbky masívu. Ak zovšeobecňujeme výsledky realizovaných výpočtov, môžeme konštatovať, že koeficienty filtrácie skalného masívu dosahujú hodnoty rádovo $n \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, charakteristické pre zónu zvetraných hornín (do hĺbky 10 až 20 m) a hodnoty $n \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a nižšie pre nezvetrané a tektonicky málo porušené horniny skalného podložia. Vo väčšine vyhodnotených vrtoch sa prejavuje znižovanie priepustnosti v smere do hĺbky masívu, svedčiace o postupnom uzatváraní diskontinuit. Lokálne zvýšenia priepustnosti naznačujú dosah vplyvu výrazných poruchových zón v masíve hornín.



Obr. 3. Hodnoty koeficienta filtrácie (k_f) skalného masívu, vypočítané pre rôzne hĺbkové úrovne (h) z výsledkov vodných tlakových skúšok pri tlaku $p = 0,3$ MPa (inžinierskogeologický vrt J-104, realizovaný v priestore hornej nádrže PVE Ipeľ).

Fig. 3. Values of filtration coefficient (k_f) in the rock massif calculated for various depth levels (h) from the water pressure tests applying $p = 0,3$ MPa pressure (J-104 engineering geological test hole at the site of upper reservoir).

Zo spôsobu vykonania vodných tlakových skúšok vyplýva, že vypočítané hodnoty charakterizujú filtračné pomery v smere kolmom na vrt (ide teda o koeficient filtrácie v horizontálnom smere).

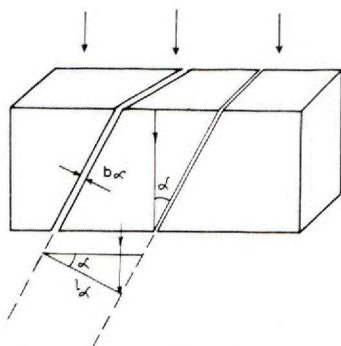
b) Výpočet filtračného koeficienta na základe spracovania parametrov puklinovitosti skalného masívu. Detailné zhodnotenie parametrov diskontinuit skalného masívu možno premietnuť do výpočtového vzťahu na určenie filtračného koeficienta v študovanej časti masívu (upravené podľa Van Golf-Rachta, 1982):

$$k_f = \frac{\gamma_w b_a^3 \cos^3 \alpha}{12 \mu l_a \cos \alpha} = \frac{\gamma_w b_a^3 \cos^2 \alpha}{12 \mu l_a} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

kde γ_w (Nm^{-3}) je objemová tiaž vody, μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) je súčiniteľ dynamickej viskozity vody, l_a (m) predstavuje priemernú vzdialenosť diskontinuit vo vyčlenenom systéme, b_a (m) priemernú šírku puklín vo vyčlenenom systéme a α ($^\circ$) je uhol medzi smerom, v ktorom počítame k_f , a spádnitou puklinového systému (obr. 4).

Vzhľadom na to, že ide o určenie filtračného koeficienta vo vybranom reze, možno vo výpočte zohľadniť viacero systémov diskontinuit, ktorých spádnicu zvierajú so smerom prúdenia rôzny uhol ($\alpha, \beta, \dots, \omega$). Potom:

$$k_f = \frac{\gamma_w}{12 \mu} \left(\frac{b_a^3 \cos^2 \alpha}{l_a} + \frac{b_\beta^3 \cos^2 \beta}{l_\beta} + \dots + \frac{b_\omega^3 \cos^2 \omega}{l_\omega} \right) \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$



Obr. 4. Znáznornenie parametrov diskontinuit potrebných na výpočet filtračného koeficienta skalného masívu (smer prúdenia vertikálny).

Fig. 4. Discontinuity parameters necessary for calculations of the filtration coefficient in the rock massif (vertical flow).

Pretože väčšina puklín v študovanom horninovom prostredí je vyplnená, prepočítava sa šírka diskontinuit na ekvivalentnú šírku (z hľadiska priepustnostnej spôsobilosti) podľa vzťahu:

$$b_{ekv} = \sqrt{\frac{k_f b}{\gamma_s / 12 \mu} \cdot \frac{m}{100} + b^3 \left(1 - \frac{m}{100}\right)^3}$$

kde b , b_{ekv} (m) znamenajú skutočnú a ekvivalentnú šírku vyplnených puklín daného systému, k_f ($m \cdot s^{-1}$) je koeficient filtrácie materiálu tvoriaceho výplň pukliny a m (%) je percentuálne zastúpenie výplne v pukline.

Pretože údaje o rozhodujúcich parametroch puklín získané z odkryvov a prieskumných šachtíc z priestoru hornej nádrže boli neúplné, resp. charakterizovali diskontinuálnosť intenzívne zvetranej časti masívu, použili sme pre výpočet filtračných koeficientov údaje z detailne dokumentovaných úsekov prieskumnej štôlne. Výsledky výpočtov sú zhrnuté v tab. 1. Možno konštatovať, že v porušenejších častiach masívu (metráž 602 až 656 m prieskumnej štôlne) dosahoval filtračný koeficient hodnoty $5,5 \cdot 10^{-5}$ až $5,5 \cdot 10^{-6} m \cdot s^{-1}$ (čo rádovo zodpovedá hodnotám charakterizujúcim zvetranú časť masívu podľa výpočtov z výsledkov vodných tlakových skúšok). V relatívne najmenej porušenej časti masívu, odporúčenej na výstavbu kaverny VE (metráž 715 až 775), dosahoval koeficient filtrácie hodnoty rádovo $10^{-7} m \cdot s^{-1}$ a nižšie. Prítomnosť výrazných porúch sa prejavila vo zvýšených hodnotách filtračného koeficienta, a to čiastočne v metráži 675 až 690 hodnotou $1,5 \cdot 10^{-5} m \cdot s^{-1}$, no predovšetkým v metráži 775 až 795, kde bola vypočítaná hodnota $1,9 \cdot 10^{-4} m \cdot s^{-1}$.

Pri analýze vypočítaných výsledkov treba upozorniť, že dokumentácia štôlne nebola vykonávaná kvôli výpočtom koeficienta filtrácie. Okrem nesporných pozitív takéhoto postupu (objektívnosť pôvodnej dokumentácie, a teda aj z nej odvodených výpočtov) môžu na druhej strane zaniknúť niektoré dôležité nepriame príznaky a pozorovania (napr. ak je v okolí otvorených puklín stena štôlne suchá, možno s veľkou pravdepodobnosťou predpovedať, že pozorované systémy puklín sú v hĺbke

masívu uzavreté, resp. ich prepojenie s inými puklinovými systémami je slabé a pod.). Z rovnakých dôvodov (t. j. neúplné a neúčelové zameranie pôvodnej dokumentácie) sme na výpočet filtračného koeficienta masívu hornín na základe zhodnotenia parametrov puklinovitosti nepoužili presnejšie, no o to náročnejšie metódy (napr. modifikovanú tenzorovú metódu – pozri Rac et al., 1979 a ďalšie).

Pri charakterizovaní filtračných vlastností kvartérnych sedimentov sme vychádzali zo zrnitostného rozboru vzoriek zemín odobratých zo šachtíc a vrtov, ktoré boli realizované v priestore projektovanej hornej nádrže PVE. Na výpočet sme použili viacero empirických vzťahov (podľa Beyera a Sweigera, Kröbera, Seelheima a ďalších in Mucha a Šestakov, 1987). Výsledky výpočtov sme konfrontovali s výsledkami nalievacích skúšok vykonaných a vyhodnotených pracovníkmi IGHP, š. p., Žilina. Značný rozptyl výsledkov určených rôznymi výpočtovými postupmi (Harušák, 1985) poukazuje na orientačný charakter týchto hodnôt. Rádovo sa filtračné koeficienty rôznych typov kvartérnych sedimentov pohybujú v rozmedzí $n \cdot 10^{-6}$ až $n \cdot 10^{-8} m \cdot s^{-1}$.

Výpočet priesakov z nádrže

Na základe rozboru viacerých realizovaných výpočtov (Harušák, 1985; Ťavoda in Ondrášik et al., 1988) a s prihliadnutím na existujúce možnosti riešenia danej úlohy sme priesaky z hornej nádrže počítali numerickou modelovacou metódou konečných rozdielov, založenou na bilancii prúdenia v jednotlivých blokoch, na ktoré je hydraulické prostredie rozdelené. Rozdiel vtečeného a vytečeného množstva vody za zvolený časový úsek zodpovedá prírastku (úbytku) množstva vody v bloku za daný čas. Prítok vody do bloku je vyjadrený faktorom prietochnosti bloku TF_{n-1} , ktorý je vypočítaný z hodnôt koeficientov filtrácie, rozmerov a výšok hladín v danom a predchádzajúcom bloku. Odtok vody z bloku je vyjadrený faktorom prietochnosti nasledujúceho bloku TF_n . Prírastok (úbytok) vody, resp. zmena výšky hladiny v bloku je potom daná faktorom zásobnosti bloku SF_n , ktorý je vypočítaný na základe rozmerov daného bloku a jeho koeficienta mernej zásobnosti. Podľa toho, či je výška hladiny v bloku nad alebo pod hornou hranicou bloku, je použitý koeficient mernej zásobnosti napätej alebo voľnej hladiny. Z uvedeného vyplýva, že hodnoty faktorov zásobnosti a prietochnosti jednotlivých blokov sú závislé od výšok hladín v blokoch, a preto ich treba pred každým časovým krokom výpočtu počítať znova.

Úloha sa rieši ako sústava rovníc (resp. matica), v ktorej každá rovnica reprezentuje bilanciu v jednom bloku. Tým je zabezpečené implicitné dosadzovanie hodnôt výšok hladín v susedných blokoch do výpočtu výšok hladín v práve riešených blokoch, t. j. zmeny výšok hladín v blokoch sa nepočítajú izolovane na základe východiskového stavu, ale v závislosti od zmien výšok hladín v susedných blokoch.

TAB. 1
Výpočet filtračného koeficienta na základe spracovania parametrov puklinovitosti horninového masívu
Calculation of filtration coefficient value from data on rock fracturing

Metráž prieskumnej štôlne (m)	Parametre najzastúpenejších puklinových systémov						Koeficient filtrácie masívu k_f (m.s ⁻¹)
	Poloha (°)	Šírka b_p (m)	Vzdialenosť l_p (m)	Výplň m (%)	Ekv. šírka b_{ekv} (m)	α (°)	
602 – 622	56/76	$5 \cdot 10^{-4}$	0,12	80	$1 \cdot 10^{-4}$	14	$5,5 \cdot 10^{-6}$
	104/77	$5 \cdot 10^{-4}$	0,25	90	$5 \cdot 10^{-5}$	13	
622 – 634	46/84	$2 \cdot 10^{-4}$	0,07	80	$4 \cdot 10^{-5}$	6	$5,6 \cdot 10^{-5}$
	63/71	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,25	–	–	19	
634 – 656	148/74	10^{-4}	0,38	90	10^{-4}	16	$3,9 \cdot 10^{-5}$
	114/70	$2 \cdot 10^{-4}$	0,28	100	–	20	
656 – 675	320/43	$1 \cdot 10^{-4}$	0,6	95	$5 \cdot 10^{-6}$	47	$6 \cdot 10^{-11}$
	37/87	$1 \cdot 10^{-4}$	0,04	–	–	3	
675 – 690	314/33	$5 \cdot 10^{-4}$	0,16	95	$2,5 \cdot 10^{-5}$	57	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	286/72	$3 \cdot 10^{-4}$	0,5	80	$6 \cdot 10^{-5}$	18	
690 – 714	225/76	$5 \cdot 10^{-4}$	0,06	95	$2,5 \cdot 10^{-5}$	14	$3,9 \cdot 10^{-7}$
	304/60	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,16	80	$5 \cdot 10^{-5}$	30	
714 – 733	25/85	$2 \cdot 10^{-4}$	0,1	25	$5 \cdot 10^{-5}$	5	$7,8 \cdot 10^{-7}$
	299/77	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,5	–	–	13	
733 – 775	30/85	$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,05	–	–	5	$1,9 \cdot 10^{-4}$
	305/70	$7,5 \cdot 10^{-4}$	0,1	90	$7,5 \cdot 10^{-5}$	20	
795 – 800	356/70	0	0,1	–	–	20	nepriepustný

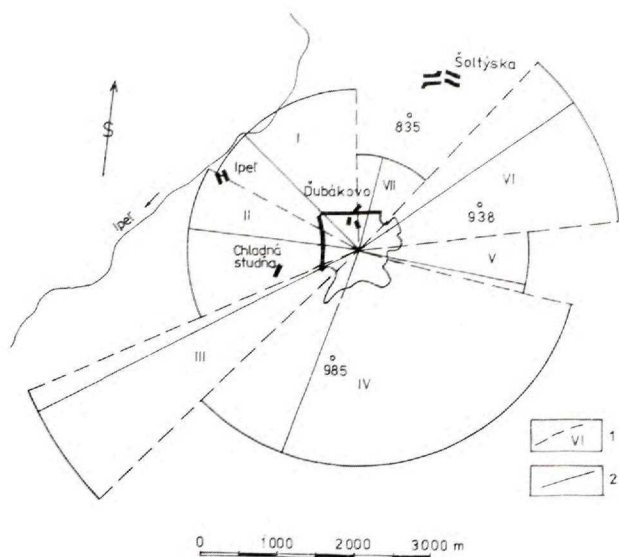
TAB. 2
Vstupné údaje a vypočítané priesaky z hornej nádrže PVE Ipeľ
Input data and calculated seepage flow from the upper reservoir of the Ipeľ Pumped Storage Hydroelectric Plant

Horninové prostredie a jeho filtračné charakteristiky		Číslo úseku (podľa obr. 5)							Celkový priesak z nádrže (l.s ⁻¹)
		I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	
Kvartérne sedimenty	k_{vert} (m.s ⁻¹)	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	
Skalné horniny	k_{hor} (m.s ⁻¹)	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	
kryštalínika	k_{vert} (m.s ⁻¹)	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	
	k_{hor} (m.s ⁻¹)	$4 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	
Priesak (l.s ⁻¹)									
a) bez zohľadnenia drenážneho účinku výrazných porúch a podzemných diel	týždeň po napustení nádrže	3,9	12,9	1,3	2,9	0,2	1,6	1,8	24,6
	2 týždne	2,8	12,1	0,1	0,25	0,04	0,15	0,3	15,74
b) so schematickým zohľadnením drenážneho účinku výrazných porúch a podzemných diel v úseku II	týždeň po napustení nádrže	3,9	20,3	1,3	2,9	0,2	1,6	1,8	32,0
	2 týždne	2,8	20,5	0,1	0,25	0,04	0,15	0,3	24,14

Pri modelovaní dvojrozmerného prúdenia (v horizontálnom a vertikálnom smere) je vhodné túto implicitnú výpočtovú metódu kombinovať s explicitnou metódou riešenia, t. j. hodnoty výšok hladín zo susedných blokov, ktoré sú v inom ako vo výpočtovom smere, dosadzovať do výpočtu explicitne (t. j. na základe stavu v predchádzajúcom kroku). Po výpočte prúdenia v oboch smeroch je nutné tento krok opakovať (iterovať) až do stavu, v ktorom sú rozdiely výšok hladín medzi poslednou a predchádzajúcou iteráciou zanedbateľné. Oproti

implicitnej výpočtovej metóde, pri ktorej treba v prípade dvojrozmerného modelovania riešiť 5-diagonálnu maticu, je tento spôsob riešenia zdĺhavejší, ale výrazne úspornejší z hľadiska požadovaného objemu pamäti počítača.

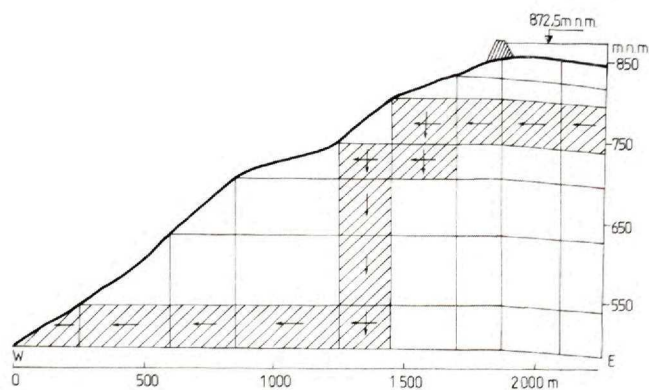
Iteračný spôsob modelovania dvojrozmerného prúdenia (vo vertikálnom a horizontálnom smere) metódou konečných rozdielov sme použili i pri výpočte priesakov z hornej nádrže PVE Ipeľ. Pretože v riešenom prípade predpokladáme hlavné smery prúdenia z nádrže nadol



Obr. 5. Rozdelenie širšieho okolia hornej nádrže PVE Ipeľ na výpočtové úseky. 1 – hranice a čísla úsekov, 2 – línie typových profilov.

Fig. 5. Subdivision of the site of the Ipeľ Pumping Storage Hydroelectric Plant into computation sectors. 1 – limit and number of sector, 2 – type profile line.

a do okolia, predmetné územie sme rozdelili na samostatné úseky I.–VII. (obr. 5) v cylindrických súradniciach so stredom v mieste s najnižšou nadmorskou výškou v nádrži (v tzv. strede nádrže). Pri vyčleňovaní úsekov sme vychádzali z morfológie a hydraulických vlastností hornín. Každý úsek bol ďalej rozdelený na jednotlivé výpočtové bloky. Zásady rozdelenia na bloky a spôsob určenia ich stredov v cylindrických súradniciach je opísaný v literatúre (Mucha a Šestakov, 1987). Spodné časti blokov v horizontálnych radoch majú rôzne nadmorské výšky z toho dôvodu, že prvý rad blokov je paralelný



Obr. 6. Schéma rozdelenia typového profilu úseku II na výpočtové bloky. Pri riešení zohľadňujúcom drenážny účinok výrazných porúch a podzemných diel sa vyšrafované výpočtové bloky charakterizovali hodnotou koeficienta filtrácie 1 m.s^{-1} v smere označenom šípkou.

Fig. 6. Scheme of subdivision in the type profile 2nd sector into block units for computation. The hatched block units have been assigned by 1 m.s^{-1} value of the filtration coefficient for the purpose reflecting the drenage effect of significant dislocations in the direction of arrows.

s povrchom terénu a končí sa v pomerne strmom svahu (obr. 6). Preto i prierez jednotlivých blokov nie je úplne obdĺžnikový, ale čiastočne deformovaný. Výpočtová chyba podmienená touto skutočnosťou je však zanedbateľná.

Pri modelovaní sme v jednotlivých úsekoch stanovili nasledujúce okrajové podmienky:

- Nepriepustnú hranicu tvorili prvé bloky v radoch vo zvolenom strede nádrže (dosadením nulovej hodnoty faktora prietochnosti TF_{n-1}) a bloky tvoriace spodnú časť modelu (dosadením nulovej hodnoty faktora prietochnosti TF_n).

- Konštantnú hladinu vody v nádrži vyjadrovala vysoká hodnota faktora zásobnosti ($SF_n = 10^3$) blokov reprezentujúcich nádrž.

- Voľnú hladinu modelovala hodnota faktora prietochnosti vo vertikálnom smere, rovnajúca sa ploche horizontálneho prierezu v danom stĺpci blokov. Faktor zásobnosti na voľnej hladine sa počíta pomocou koeficienta mernej zásobnosti voľnej hladiny. Hodnota faktora prietochnosti vo vertikálnom smere sa dosadzuje aj vo všetkých blokoch nachádzajúcich sa nad hladinou.

- Výtok vody zo svahu sa v blokoch tvoriacich svah vyjadri vypočítaným faktorom prietochnosti TF_{n+1} , vynásobeným pomerom výšky hladiny v stĺpci nad stredom bloku a výšky stredu bloku nad určenou nadmorskou výškou (reprezentujúcou najnižšiu nadmorskú výšku v modeli).

Jednotlivé bloky sme charakterizovali filtračnými koeficientami na základe poznatkov zhrnutých v predchádzajúcom texte. Pri výbere filtračných koeficientov skalného masívu v horizontálnom smere sme sa opierali predovšetkým o hodnoty získané prepočtom z výsledkov vodných tlakových skúšok, kým koeficienty filtrácie vo vertikálnom smere sme odvodzovali z výpočtov na základe puklinovitosti masívu (tab. 1). Vzhľadom na predbežný výpočet overenú skutočnosť o významnom vplyve otvorených puklín prepojených do údolia na celkové straty vody z nádrže sme sa pri výbere charakteristických koeficientov filtrácie snažili túto skutočnosť zohľadniť. Preto napr. vertikálny koeficient filtrácie skalného masívu sme charakterizovali extrémne nepriaznivou hodnotou $1 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Analogicky sme postupovali pri výbere filtračných koeficientov kvartérnych sedimentov, ktoré sú v modeli vyjadrené výpočtovými blokmi tvoriať dno hornej nádrže (obr. 6).

Ďalším vstupným údajom pre výpočet je hodnota koeficienta mernej zásobnosti voľnej a napätej hladiny. Vychádzajúc z údajov z literatúry (Mucha a Šestakov, 1987), sme za koeficient mernej zásobnosti napätej hladiny do modelu dosadili hodnotu $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ a pre voľnú hladinu $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$.

Dvojrozmerné prúdenie (vo vertikálnom a „horizontálnom“ smere) sme modelovali v každom úseku zvlášť pri zanedbaní prúdenia medzi úsekmi. Priesakové množstvá z nádrže sme vyčíslili z vertikálnych rýchlostí v prvých blokoch pod nádržou násobením príslušnou

plochou. Prúdenie sme modelovali v troch časových úsekoch s konštantným časovým prírastkom $\Delta T = 1$ týždeň. V prvom časovom úseku sme modelovali prúdenie z východiskového stavu plne nasýteného horninového masívu s voľnou hladinou (hladina podzemnej vody v masíve je pri povrchu terénu) a s hladinou vody v nádrži tiež pri povrchu terénu. V druhom časovom úseku sme modelovali zvýšenie hladiny vody v nádrži na projektovanú maximálnu úroveň (872,5 m n. m.). Výsledkom modelovania v tomto časovom úseku boli hodnoty priesakových množstiev z nádrže jeden týždeň po zvýšení hladiny vody v nádrži. V poslednom časovom úseku sme ponechali nezmenenú maximálnu úroveň hladiny vody v nádrži. Vypočítané hodnoty potom predstavujú priesakové množstvá po dvoch týždňoch od zvýšenia hladiny vody v nádrži.

Z výsledkov riešenia (tab. 2) vyplýva, že v čase jeden týždeň po naplnení nádrže dosahuje priesak $24,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, pričom maximálne priesakové množstvo ($12,9 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) pripadá na úsek II (obr. 5 a 6). Ustálenie prúdenia v čase dvoch týždňov po naplnení nádrže podmienilo zníženie celkového priesakového množstva na $15,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ (pričom priesak v úseku II predstavoval $12,1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$). Prípadný vplyv vyplavovania výplne diskontinuít sa pri modelovaní riešení nezohľadňoval.

V snahe vyjadriť výraznú nehomogenitu horninového masívu, predovšetkým nepriaznivý vplyv priebežných poruchových zón, ako aj prípadný drenážny účinok razenia podzemných diel pri prieskume i výstavbe PVE, preriešili sme úlohu na modeli, schematicky zohľadňujúcim niektoré z týchto skutočností. Prítomnosť a drenážny účinok vertikálnych poruchových línií objektívne preukázaných v prieskumnej štôlni sme vyjadrili v typovom profile úseku II hodnotou koeficienta filtrácie $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ vo vertikálnom smere charakterizujúcou priepustnostné pomery vo vybranej vertikálnej línii výpočtových blokov. Analogicky bol zohľadnený vplyv realizácie podzemných diel i predpokladaná prítomnosť subhorizontálnych porúch v horninovom masíve (hodnota koeficienta filtrácie $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ v horizontálnom alebo v oboch smeroch – obr. 6). Celkový priesak z hornej nádrže po zohľadnení uvedených skutočností stúpol na hodnotu $32 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. I keď v riešenom prípade ide o značnú schematizáciu priepustnostných pomerov reálneho prostredia, treba zdôrazniť, že prezentovaný výpočtový postup umožňuje preriešiť úlohu na ľubovoľne upravenej vstupnej modelovej schéme, vyjadrujúcej upresnené poznatky o geologickej stavbe masívu alebo zohľadňujúcej nové projekčné zábery realizácie diela. Z výsledkov modelovania je zrejmé, že vertikálne diskontinuity (v modeli vyjadrené hodnotou k_{vert}) nevyúsťuje pri povrchu terénu neovplyvňujú významne celkovú hodnotu množstva vody vytečenej z nádrže.

Záver

Výpočtové riešenie priesakov z hornej nádrže PVE Ipeľ dopĺňa viaceré, často veľmi rozporné predpokla-

dy a pozorovania súvisiace s touto problematikou a posudzované v priebehu i po ukončení etapy predbežného inžinierskogeologického prieskumu. Ak zosumarizujeme získané poznatky, môžeme medzi skutočnosťami podporujúcimi priaznivé hodnotenia územia hornej nádrže z hľadiska priesakov uviesť:

- prítomnosť napätých horizontov vody vo väčšine prieskumných vrtov, svedčiacu o veľmi malej priepustnosti skalného masívu,
- existenciu prameňov v priestore projektovanej hornej nádrže,
- výsledky farbiacich skúšok, ktoré nepreukázali žiadne úniky vody do susedných údolí (Matejček, 1984b),
- vplyv projektovaných technických opatrení (tesniaca clona pod oboma hrádzami hornej nádrže, siahajúca až 40 m do hĺbky a do strán), ako aj postupnej kolmatácie dna nádrže.

Na druhej strane viacero pozorovaní a úvah nabáda k zvýšenej opatrnosti pri riešení posudzovaného okruhu otázok. Ide predovšetkým o nasledujúce skutočnosti:

- značné prítoky vody do prieskumnej štôlni, identifikované v rôznych častiach masívu, dokazujú zvodnenie masívu hornín s komplikovaným pohybom podzemných vôd po vybraných puklinových systémoch,
- celková nízka tesniaca schopnosť pokryvných kvartérnych útvarov.

Výsledky realizovaného výpočtového riešenia podporujú celkovo priaznivé prognózy realizácie hornej nádrže z hľadiska očakávaných priesakov. Ak uvážime, že vstupné údaje pre výpočet boli najnepriaznivejšie zo súboru zistených hodnôt a v riešení sa nezohľadnil vplyv navrhovaných technických opatrení (tesniaca clona), je výsledná hodnota priesakov ($24,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) technicky zvládnuteľná a neohrozuje prevádzku technického diela. Na ilustráciu možno uviesť veľký rozsah priesakov vody z rôznych horných nádrží PVE, kým z umelo tesnených nádrží s plochou do $200\,000 \text{ m}^2$ (t. j. PVE pre denný cyklus prečerpávania) sa udávajú hodnoty 1 až $5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ (PVE Turlough Hill v Írsku – Mosonyi, 1981), pre umelo netesnené nádrže nachádzajúce sa v priaznivých inžinierskogeologických a hydrogeologických podmienkach sa tolerujú i podstatne vyššie priesaky (napr. 30 až $60 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ PVE Cabin Creek, USA, $43 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ PVE Yard Creek, USA a pod. – Mosonyi, 1981). Ide pritom o nádrže s podstatne menšou plochou dna, než je projektovaná pre hornú nádrž PVE Ipeľ.

Opísané výpočtové riešenie priesakov vody z hornej nádrže PVE má z metodického hľadiska všeobecnú použiteľnosť. Jeho ďalšie spresnenie a zdokonalenie pri riešení danej problematiky závisí predovšetkým od ďalšej objektivizácie vstupných údajov v etape podrobného inžinierskogeologického prieskumu (realizácia vodných tlakových skúšok vo vytýpaných častiach a hĺbkach horninového masívu, účelovo zamerané štúdium puklinovitosti v prieskumných dielach, identifikácia a upresnenie priestorovej polohy i hydrogeologických charakteristík významných poruchových línií a pod.).

Na základe kvality i kvantity vstupných údajov možno zostaviť podrobnejšiu modelovú schému a urobiť na to nadväzujúci rozsah výpočtových riešení vyžadujúcich vysokokapacitnú výpočtovú techniku.

Literatúra

- Dobeš, L. 1988: Přečerpávací elektrárna Ipef. Studie podzemní elektrárny. *Manuskript – Hydroprojekt, odst. závod Brno*, 56 s.
- Harušík, P. 1985: Inžinierskogeologické problémy výstavby horných nádrží přečerpávacích vodných elektrární. [Diplomová práce.] *Manuskript – Katedra inžinierskej geológie PF UK, Bratislava*, 90 s.
- Jetel, J. 1984: Specifika určovania hydraulických parametrov puklinových kolektorov hydrodynamickými skúškami. In: *Puklinové a puklinovo-krasové vody a problémy ich ochrany. Zborník referátov z VIII. celošt. hydrogeol. konf. Bratislava, GÚDŠ*, 67–75.
- Kullman, E. 1984: Obyčajné podzemné vody v puklinových a puklinovo-krasových kolektorských horninách. In: *Puklinové a puklinovo-krasové vody a problémy ich ochrany. Zborník referátov z VIII. celošt. hydrogeol. konf., Bratislava, GÚDŠ*, 13–27.
- Matejček, A. 1984a: PVE Ipef – geologické, tektonické pomery a metodika prieskumu. In: *Inžinierskogeologické sympóziu. Bratislava*, 142–150.
- Matejček, A. 1984b: PVE Ipef – horná nádrž. *Manuskript – IGHP Žilina*, 86 s.
- Matejček, A. 1985a: Výsledky inžinierskogeologického prieskumu na lokalite PVE Ipef. In: *Inžinierská geologie a energetická výstavba. Sborník přednášek. Brno, ČSVTS – Dům techniky*, 35–44.
- Matejček, A. 1985b: PVE Ipef – prehľadná správa záverov ucelených celkov. *Manuskript – IGHP Žilina*, 48 s.
- Matula, M., Ondrášik, R., Wagner, P. a Matejček, A. 1986: Pumped – storage schemes in tectonically deteriorated rock masses. *Proceedings fifth Int. Congr. IAEG, Buenos Aires*, 199–205.
- Mosonyi, A. 1981: Leakage and seepage from upper basins of the pumped – storage plants. *Water Power and Dam Construction*, January, 35–39.
- Mucha, I. a Šestakov, V. M. 1987: Hydraulika podzemných vôd. *Bratislava, Alfa*, 339 s.
- Ondrášik, R. et al. 1988: Inžinierskogeologické hodnotenie porušnosti a napätosti horninového prostredia. [Výsk. správa.] *Manuskript – Katedra inž. geológie PF UK Bratislava*, 304 s.
- Ondrášik, R., Hovorka, D. a Matejček, A. 1987: Prejavy muránsko-divínskej poruchovej zóny vo veporickom kryštaliniku v štolni PVE Ipef. *Mineralia slov.*, 19, 29–44.
- Rac, M. V., Ivanova, N. B., Rusin, G. L. a Slepcev, B. G. 1979: Avtomatizirovannaja sistema obrabotki dannych (ASOD) po treščinovatosti gornych porod dľa inženerogeologičeskich celej. *Inžener-naja geologija*, 5, 78–89.
- Romm, E. S. 1966: Filtracionnyje svojstva treščinovatych porod. *Moskva, Nedra*, 272 s.
- Tavoda, O. 1976: Hydrogeologický prieskum v zakladaní stavieb. *Acta Geol. Geogr. Univ. Comen., Geol.*, 31, 29–53.
- Van Golf-Racht, T. D. 1982: Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering. *Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Company*.

Evaluation of bedrock permeability and seepage modelling from the upper reservoir of the Ipef Pumping Storage Hydroelectric Power Plant (SE Slovakia)

An appropriate forecast of water seepage from the upper reservoir of a pumping storage power plant is the main condition of its location and even for the success of its construction and harmless operation. This condition is underlined during the design of a hydroelectric power plant with weekly pumping cycle what needs considerably larger volume of the upper reservoir achieving over 15 millions m³. Such typical case is represented by the Ipef Pumping Storage Hydroelectric Plant. After short description of its technical solution and design (Fig. 1) together with characterization of the rock environment in which the waterwork is planned for construction (Fig. 2), the input data necessary for computerized solution of water seepage from the upper reservoir are analyzed.

Basic parameter for any computation mode is the value of filtration coefficient for various rock environment. The usual methods of filtration coefficient establishment in rock masses are analyzed. Accordingly, the deduction of characteristic filtration coefficient values for a given environment depends on computations set out from water pressure tests (Fig. 3) as well as from a detailed documentation of discontinuities in the rock massif what is tested by a site investigation adit (Fig. 4, Tab. 1). Filtration coefficients in sediments of Quarternary age are mostly given according to their mechanical texture.

The computed solution of seepage forecast from the upper

reservoir is that of numerical modelling by finite differences in two-dimensional model in frame of cylindric coordinates. The site of the upper reservoir and its surroundings (down to the lowermost level of the neighbour valleys) has been subdivided into independent sections setting out from the surface morphology (Fig. 5). In the single sections, both the vertical and horizontal seepage flows, oriented outward from the chosen centre of the reservoir, have been modelled. Each sector has been subdivided into block units (Fig. 6) characterized by representative filtration coefficient (Tab. 2). The resulting amounts of seepage are in fact the sums of partial seepages in single block units and sectors.

For procedure of computation also the negative influences of pronounced discontinuities found in the rock massif have systematically been involved together with the drainage effect of existing or planned underground workings (Fig. 6).

The resulting amounts of seepage flow increased by this mode from the original 24.6 l.s⁻¹ to as much as 32 l.s⁻¹.

The forecast of seepage flow amounts by calculation allow to assume the suitability of the planned site for the upper reservoir in general conditions. For further improvement of the given solution also further data on the structures and on filtration parameters of the rock massif in question are necessary.