



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE  
STAVEBNÁ FAKULTA**

**Ing. Patrik Václavík**

**Autoreferát dizertačnej práce:**

**OVERENIE SPOĽAHLIVOSTI INJEKČNÝCH CLÔN  
V PODMIENKACH SLOVENSKÝCH PRIEHRAD  
Z POHĽADU SÚČASNÝCH POZNATKOV**

**na získanie akademického titulu:** doktor (philosophiae doctor, PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe:** vodohospodárske inžinierstvo

**v študijnom odbore:** stavebníctvo

**Forma štúdia:** denná

**Miesto a dátum:** Bratislava, 31.5.2024



**Dizertačná práca bola vypracovaná na:** Katedre geotechniky,  
Stavebná fakulta STU v Bratislave

**Predkladateľ:** Ing. Patrik Václavík  
Katedra geotechniky  
Stavebná fakulta STU v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Školiteľ:** doc. Ing. Monika Súľovská, PhD.  
Katedra geotechniky  
Stavebná fakulta STU v Bratislave  
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

**Autoreferát bol rozoslaný:**

**Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa:**

**o.....h na .....**

.....  
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.  
dekan fakulty

## Obsah

1. Úvod .....	4
2. Poruchy a havárie priehrad .....	5
3. Priehradné staviteľstvo na Slovensku .....	5
4. Protipriesakové opatrenia .....	6
5. Vodné tlakové skúšky a používané kritéria .....	7
6. Posúdenie injekčnej clony z pohľadu súčasných poznatkov v podmienkach priehrady Vlčia Dolina .....	10
7. Posúdenie injekčnej clony z pohľadu súčasných poznatkov v podmienkach priehrady Nosice .....	14
8. Záver .....	21
Zoznam použitej literatúry .....	23
Zoznam publikačnej činnosti a ohlasov .....	24

## 1. ÚVOD

V dôsledku klimatickej zmeny narastá výskyt extrémnych hydrologických udalostí, ako sú privalové dažde a dlhotrvajúce obdobia sucha. Schopnosť umelých vodných nádrží pružne reagovať na meniace sa podmienky z nich robí stabilizačný prvok vodného hospodárstva. Ich existencia a efektívny manažment vodných zdrojov pomáhajú minimalizovať negatívny dopad extrémov počasia. Základom pre spoľahlivý návrh nádrží a priehrad je vysoká miera spoľahlivosti hydrologických podkladov, kvalitný geologický, hydrogeologický a geotechnický prieskum. Vychádzajú zo štatistík porúch a havárií priehrad vo svete, jednou z ich najčastejších príčin sú preliatie a priesaky. Priesaky vody telesom alebo podloží hrádze predstavujú riziko a spoľahlivý návrh protipriesakových opatrení znižuje toto riziko na únosnú mieru. V podmienkach Slovenska sa do popredia dostáva vek vodných diel. Mnohé z nich majú viac ako 60 rokov, kedy nemožno vylúčiť výskyt porúch, vyplývajúcich z únavy materiálov.

Predkladaná dizertačná práca sa v súlade s predchádzajúcimi argumentami zameriava na analýzu protipriesakových opatrení v podložiach priehrad Vlčia Dolina (1952) a Nosice (1958). Jej primárnym cieľom je analýza parametrov injekčných clôn, spočívajúca v porovnaní odporúčaní na základe existujúcich kritérií pre vodné tlakové s ich skutočnou hĺbkou. Tento proces súčasne zahŕňa aj hľadanie optimálnych hĺbok injekčných clôn numerickým modelovaním (MKP) formou parametrických štúdií a konfrontáciu výsledkov výpočtov s reálnymi hodnotami meraní in situ v podmienkach analyzovaných priehrad.

## 2. PORUCHY A HAVÁRIE PRIEHRAD

Záznamy o poruchách a haváriách vodných stavieb, predovšetkým priehrad, ktoré sa nám dochovali z minulosti, sú v súčasnosti pre nás veľkým zdrojom poznania a poučenia. Štúdium historických prameňov nás nabáda k poznaniu, že akákoľvek priehrada alebo ochranná hrádza nie je stopercentne bezpečná. Podľa viacerých štúdií autorov ako Middlebrooks, Mallet, Paquant, Gruner, Schnitter a Vogel, vieme identifikovať príčiny zdrojov porúch a havárií. Možno konštatovať, že preliatie a filtračné poruchy patria medzi najčastejšie zdroje porúch a havárií priehrad. Z hľadiska časových relácií, svoju maximálnu koncentráciu zaznamenali v prvých rokoch uvedenia vodných diel do prevádzky. Počet porúch a havárií priehrad je zrkadlom ľudského poznania a technologického pokroku. Začiatkom 20. storočia bol výskyt porúch a havárií priehrad k počtu priehrad v prevádzke cca 4 – 4,5 %. Avšak vďaka pokroku vo vede a technológii, ako sú geológia, mechanika zemín, matematika, štatistika, geofyzika a iné, sme zaznamenali ich významný pokles, na hodnotu okolo 0,4 % . To svedčí o efektívite nových prístupov a metód v navrhovaní, výstavbe a prevádzke priehrad.

## 3. PRIEHRADNÉ STAVITEĽSTVO NA SLOVENSKU

Priehrady predstavujú kľúčovú súčasť vodného hospodárstva na Slovensku. Sú dôležitými inžinierskymi dielami, ktoré majú vplyv na reguláciu prietokov (nadlepšovanie v období sucha), zásobovanie pitnou vodou a produkciu elektrickej energie, vytváranie zásob vody pre priemysel, poľnohospodárstvo. Nemenej dôležitý je ich význam v protipovodňovej ochrane.

# STU

Najvýznamnejšie z nich sú zaradené do svetového registra priehrad Medzinárodnej komisie pre veľké priehrady (ICOLD).

Podľa dostupných údajov existuje na území Slovenska približne 240 priehrad malých vodných nádrží a 50 priehrad zapísaných v registri ICOLD. Značnú časť nášho zastúpenia predstavujú údolné nádrže vytvorené priehradami, ale aj riečne stupne tvoriace zdrže. Veľká časť z nich bola postavaná v období po 2. svetovej vojne ich výstavba súvisela s dynamickým rozvojom krajiny a potrebou modernizácie infraštruktúry. V tomto období dochádzalo k významnému budovaniu vodohospodárskych stavieb, nádrží a priehrad, ktoré nielenže slúžili na výrobu elektrickej energie a zabezpečenie vodných zdrojov, ale aj na ochranu pred povodňami a podporu hospodárskeho rastu. Výstavba vodných diel, ako je napríklad vodohospodárska sústava Orava – Tvrdošín, Dobšiná, Liptovská Mara – Bešeňová, PVE Čierny Váh a ďalšie vodohospodárske diela prispeli nielen k rozvoju priemyslu, poľnohospodárstva, energetiky krajiny, ale aj k zlepšeniu životnej úrovne obyvateľstva a ochrane prírodného prostredia.

## **4. PROTIPRIESAKOVÉ OPATRENIA**

Zo štatistiky porúch a havárií priehrad je zrejmé, že hlavnými príčinami ohrozenia bezpečnosti priehrad je preliatie a priesaky. Problémy často vznikajú v dôsledku nepredpokladaného priesaku vody cez hrádzu alebo podložie. V kontexte bezpečnej prevádzky priehrad je preto kľúčovým faktorom implementácia protipriesakových opatrení. V zásade môžeme protipriesakové opatrenia podľa funkcie rozdeliť do dvoch skupín aktívne protipriesakové opatrenia a pasívne protipriesakové opatrenia.

# STU

Funkcia aktívnych protipriesakových opatrení (drény a filtre), spočíva najmä v spoľahlivom záchyte a následnom odvádzaní a monitorovaní priesakových vôd telesom a podložím priehrady.

Úlohou pasívnych protipriesakových opatrení je redukcia priesakov telesom a podložím priehrady na prijateľnú úroveň, zníženie hodnoty vztlakov v podloží a minimalizácia nepriaznivých účinkov presakujúcej vody s ohľadom na faktory filtračnej stability.

V podmienkach slovenských priehrad boli, vzhľadom na nepriaznivú geologickú skladbu ich podložia, často budované injekčné clony. Z celkového počtu 50 priehrad evidovaných v registri ICOLD bola metóda utesnenia podložia injekčnou clonou v zrealizovaná v 21 prípadoch. Kritériom pre potrebu utesnenia horninového prostredia v podloží priehrad sú vodné tlakové skúšky.

## 5. VODNÉ TLAKOVÉ SKÚŠKY A POUŽÍVANÉ KRITÉRIA

Vodné tlakové skúšky sú najkomplexnejšie a najvyužívanejšie metódy na určenie priepustnosti skalných hornín. Dôvodom pre vznik a vývoj týchto skúšok bolo budovanie hydrotechnických stavieb ako sú priehrady a hate. Po využití optimálnych priehradných profilov so zdravým skalným podložím boli projektanti nútení pristúpiť k navrhovaniu priehrad v podmienkach nespojitého a rozpukaného skalného podložia. Najdôležitejším faktorom pre návrh injekčnej clony je bezpochyby koeficient filtrácie. Koeficient filtrácie možno určiť z výstupov vodných tlakových skúšok (ďalej VTS) podľa rôznych autorov, ako napr.: Dupuit, Verigin, Altovskij, Ťavoda, Moye, Hoek – Bray.

Ich podstata sa nezakladá iba na určení koeficienta filtrácie skalného podložia, no i na zhodnotení a posúdení potreby utesnenia podložia. K tomu boli stanovené kritéria podľa

viacerých autorov ako Lugeon, Jähde, Houlsby a Verfel (tab. 5.1). Pod kritériom pre VTS rozumieme hodnotu straty vody, pri prekročení ktorej treba pristúpiť k utesneniu podložia priehrady.

Tab.5.1 Kritéria dovolených strát vody pri VTS –  
pre priehradu s výškou nad 30 m

Autor	Kritérium prípustných strát vody pri VTS
Lugeon	1 LU resp. 0,3 l. min <sup>-1</sup> . m <sup>-1</sup> pri 0,3 MPa
Jähde	0,1 - 0,5 l/min/bm pri 0,3 MPa
Terzaghi	0,05 l/min/m pri 10 kPa
Heitfeld	2,5 - 4 LU
USSR	3 LU
USA	3 – 4 LU

Odlíšný prístup použil **Verfel** (1989). Vychádzal z poznania, že priesaková dráha prúdiacej vody sa s narastajúcou hĺbkou predlžuje, čoho dôsledkom sú vo väčších hĺbkach nižšie hodnoty gradientov a teda aj menšie hydrodynamické namáhanie horninového prostredia. Obvykle sa s narastajúcou hĺbkou znižuje i rozpukanosť skalného masívu (tab. 5.2).

Tab. 5.2 Kritéria dovolených strát vody pri VTS podľa Verfla (1989)

$Q_{dov}$ (l. min <sup>-1</sup> . m <sup>-1</sup> )	Skúšobný tlak (MPa)	Hĺbka pod základovou škárou priehradu (m)
0,5	0,3	0 - 10
1,5	0,3	10 - 20
2,5	0,3	20 – 30
4,0	0,3	30 - 50
6,0	0,3	> 50



Podľa **Houlsbyho** (2005). je najdôležitejším faktorom pri návrhu dovolených strát pri VTS a parametroch injekčnej clony hodnota vody, resp. jej strata priesakom. Kritéria založil na posudzovaní „hodnoty“ vody (vzácná – cenná – dostupná), následne na charaktere podložia (náchylné – nenáchylné na sufóziu) a nakoniec na typológii priehrady (tab. 5.3).

Tab. 5.3 Kritéria dovolených strát vody pri VTS podľa Houlsbyho

Hodnota vody / straty priesakom							
vzácná / straty eliminovať		cenná / straty obmedziť			*dostupná / straty sú prípustné		
<b>1 LU</b>		<b>2 – 3 LU</b>			3 – 15 LU		
<b>*Voda dostupná, straty priesakom sú prípustné</b>							
Podložie je náchylné na sufóziu				<b>** Podložie nie je náchylné na sufóziu</b>			
<b>3 LU</b>				3 – 15 LU			
<b>** Podložie priehrad nie je sufózne</b>							
Priehrady zemné a rockfillové						Bet.priehrady, klenbové, členené.	
S tesniacim plášťom		So širokým tesnením		S úzkym tesnením			
1-rad. IC	3 a viac radová IC	1-rad. IC	3 a viac radová IC	1-rad.IC	3 a viac radová IC	1-rad. C	3 a viac radová IC
5–10 LU	7–15 LU	5–10 LU	7–15 LU	3–7 LU	5–10 LU	3–5 LU	5–7 LU

V prípade, ak nie je vodohospodárska strata priesakom významná, pristupujeme k prehodnoteniu rizika sufózie v podloží priehrady. V prípade, že vodohospodárska strata a sufózia nepredstavujú reálne riziko, stanovujeme hraničnú hodnotu straty na základe typu konštrukcie priehrady.

Verflove kritériá, ktoré sú jediné odstupňované s hĺbkou pod základovou škárou, sú opodstatnené a veľmi dobre vystihujú potrebu utesnenia podložia priehrady. Tento prístup zohľadňuje dynamiku priesakovacej dráhy vody s hĺbkou a umožňuje presnejšie posúdenie efektivity utesnenia podložia vodných stavieb, čím prispieva k zvýšeniu spoľahlivosti a účinnosti technických riešení

## **6. POSÚDENIE INJEKČNEJ CLONY Z POHĽADU SÚČASNÝCH POZNATKOV V PODMIENKACH PRIEHRADY VLČIA DOLINA**

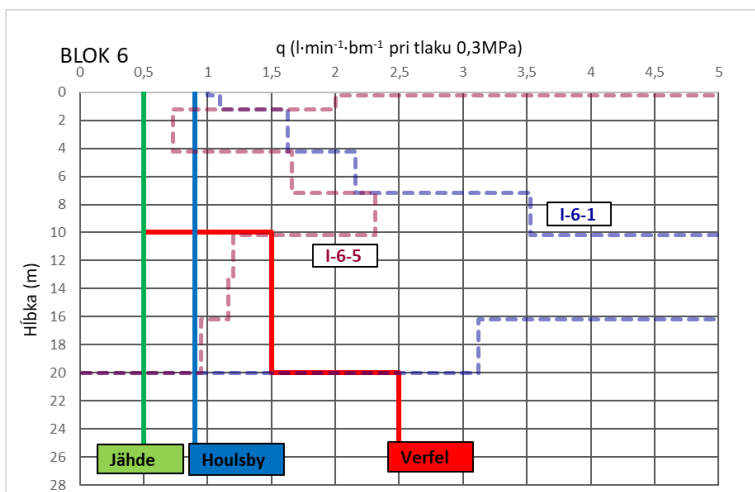
VD Vlčia Dolina je súčasťou vodohospodárskej sústavy Dobšiná, ktorá slúži na produkciu špičkovej elektrickej energie. Nádrž je vytvorená prehradením údolia potoka vo Vlčej doline gravitačnou betónovou priehradou. Výška telesa priehrady nad terénom je 19 m, nad základovou škárou 27 m. Koruna priehrady sa nachádza na kóte 512,60 m n. m. Dĺžka priehrady v korune je 137,60 m.

### **6.1 Analýza vodných tlakových skúšok**

Primárnym cieľom analyzovania výsledkov VTS, bolo porovnať namerané straty vody s hodnotiacimi kritériami podľa autorov Lugeona, Verfla a Houlsbyho (obr. 6.1). Hodnoty strát pri VTS boli prevzaté z dokumentácie, ktorá bola spracovaná pri rekonštrukcii injekčnej clony v roku 1978. Súvislou čiarou (zelená, žltá, červená) sú vynesené kritéria podľa Jähdeho (zelenou farbou), Houlsbyho (žltou farbou) a Verfla (červenou farbou) a prerušovanými čiarami sú vykreslené výsledky strát vody vo vrtoch pod jednotlivými blokmi.

### **6.2 Zvolená metóda spracovania**

Pre overenie optimálnej hĺbky injekčnej clony bola zvolená metóda konečných prvkov (MKP). Voľba metódy vyplynula

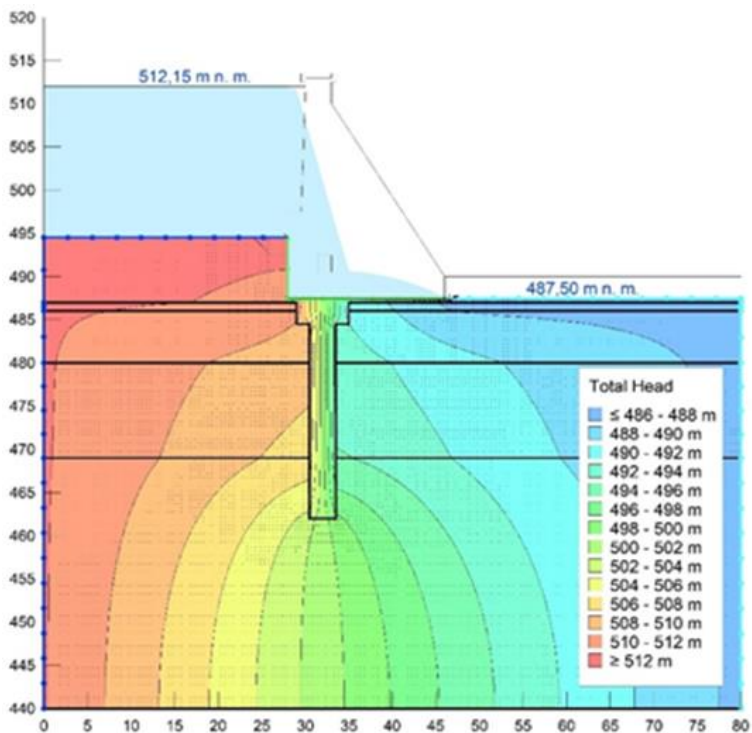


Obr. 6.1 Porovnanie strát vody pri VTS s kritériami podľa Verfla, Houslsbyho a Jähdeho v podloží bloku 6

z charakteru úlohy, ktorý vyžaduje podrobnú analýzu parametrov filtračného prúdenia v oblasti injekčnej clony. Matematické riešenie úloh ustáleného filtračného prúdenia v rovine vyplýva z rovnice odvodenéj z rovnice kontinuity a Darcyho filtračného zákona. K riešeniu zadanej úlohy som aplikoval Software Geostudio, modul Seep/W, ktorý umožňuje riešenie úloh filtračného prúdenia MKP v horizontálnej a vertikálnej rovine s tlakovou i voľnou hladinou.

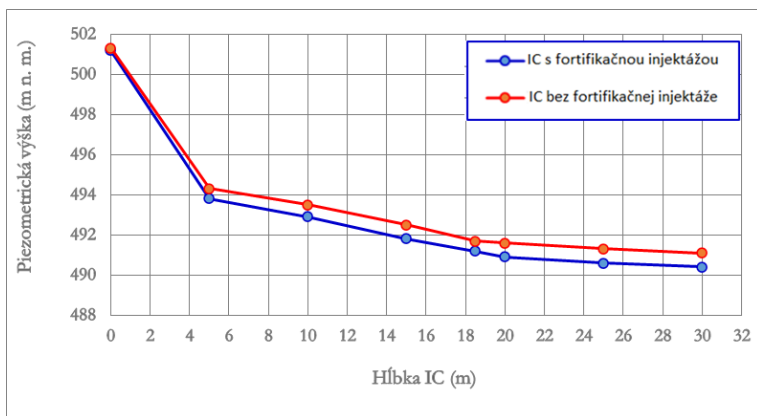
Optimálna hĺbka injekčnej clony zisťovaná formou parametrickej štúdie, t. j. sledovaním vplyvu jej hĺbky na zmenu piezometrickej výšky. K získaniu takýchto závislostí boli v rámci parametrickej štúdie riešené hĺbky injekčnej clony: 0 až 30 m a následne pre spresnenie aj pre hĺbku 18,5 m. Injekčná clona bola modelovaná ako jednoradová, fiktívnej hrúbky 3 m. V oblasti základovej škáry

do hĺbky 3 m bola simulovaná fortifikačná injektáž. Obr. 6.2 predstavuje numerický model s 25 m hlbokou IC.



Obr. 6.2 Vývoj piezometrických výšok pri hĺbke IC 25 m

Pre získanie poznatkov o vplyve fortifikačnej injektáže na redukciiu vztlakov boli v súbore výpočtov realizované aj alternatívy bez fortifikačnej injektáže. Výsledky tohto vplyvu sú na obr. 6.3.



Obr. 6.3 Vývoj piezometrických výšok v závislosti od hĺbky IC podložie bloku 6

Účelom riešenia filtračného pohybu MKP, bolo zistiť optimálnu hĺbku injekčnej clony v podloží priehrady, pod blokom 6, ako aj získanie poznatkov o tom, ktoré z kritérií pre VTS (podľa Jähdeho, Houlshyho, Verfla) v geologických podmienkach priehrady Vlčia Dolina najlepšie vystihujú potrebu dotesnenia jej podložia (tab. 6.1).

Tab. 6.1 Porovnanie otázky pýtajúcej sa na nedostatky v infraštruktúre

Blok	Hĺbka pod zŠ	Špecifická strata od - do (l/min/bm/0,3MPa)	Kritérium podľa			Odporúčané hĺbka IC podľa			MKP $h_{IC}$ (m)	Skutočná $h_{IC}$ (m)
	(m)		J	H	V	J (m)	H (m)	V (m)		
6	0 - 10	0.7-7.0	0.5	0.9	0.5	>> 20	>> 20	> 20	20	20
	10 - 20	0.9-7.33	0.5	0.9	1.5	>> 20	>> 20	> 20	20	20
	20 - 30	nepreskúmané	0.5	0.9	2.5	>> 20	>> 20	> 20	20	20

Z dosiahnutých výsledkov, na ilustrovanom príklade posúdenia injekčnej clony v podloží blokov 6 v údolnej nive priehrady Vlčia

Dolina vyplýva, že optimálna hĺbka injekčnej clony najviac konvertovala ku kritériám podľa Verfla. Získané výsledky potvrdzujú, že kritéria odstupňované s hĺbkou pod základovou škárou sú opodstatnené a najlepšie vystihujú potrebu utesnenia podložia priehrady.

## 7. POSÚDENIE INJEKČNEJ CLONY Z POHĽADU SÚČASNÝCH POZNATKOV V PODMIENKACH PRIEHRADY NOSICE

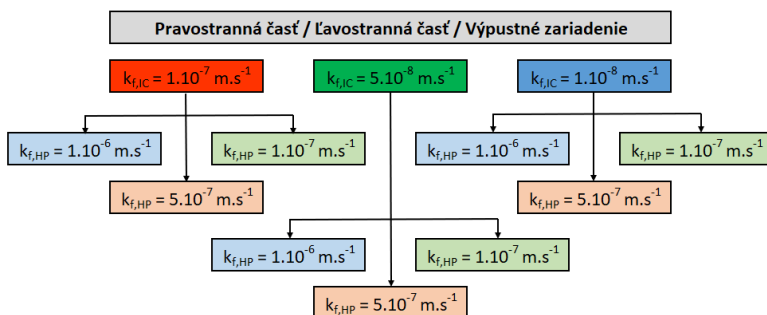
Vodná stavba Nosice bola postavená v povojnovom období medzi rokmi 1949 až 1958, na hornom toku Váhu. Priehradný profil sa nachádza v morfolologickej úžine medzi Javorníkmi a Strážovským pohorím, charakterizovanom členitým terénom s prudkými skalnatými svahmi a hustým lesom.

Metóda spracovania zvolená pre overenie optimálnej hĺbky injekčnej clony je, vzhľadom na rovnakú úlohu v podmienkach VD Vlčia dolina, totožná s metódou, popísanou v stati 6.

V existujúcich podmienkach, k hľadaniu optimálnej hĺbky injekčnej clony a jej konfrontácie s reálnou hĺbkou, sme aplikovali metódu parametrickej štúdie. Vstupné údaje, vyplývajúce z dostupných podkladov, sme zvolili takto:

- Hĺbka injekčnej clony v rozsahu od 0 do 45 m, do hĺbky cca 5 m fortifikačná injektáž.
- Koeficient filtrácie injekčnej clony ( $k_{f,IC}$ ) v troch variantoch riešenia:  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$     $5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$     $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Koeficient filtrácie horninového prostredia ( $k_{f,HP}$ ) v podloží priehrady v troch variantoch riešenia:  
 $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$     $5 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$     $1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Kombináciou vstupných údajov sme získali podklady, vyjadrujúce vplyv interakcie geologického prostredia a injekčnej clony. Aplikovaním (pri riešení parametrov filtračného pohybu podloží priehrady) inverznej metódy riešenia – bolo možné konfrontovať výpočtami dosiahnutú optimálnu hĺbku injekčnej clony s jej reálnymi parametrami. Takto som analyzoval podložie blokov telesa priehrady v jej pravej a ľavej časti a pod blokmi výpustného zariadenia (obr.7.1).

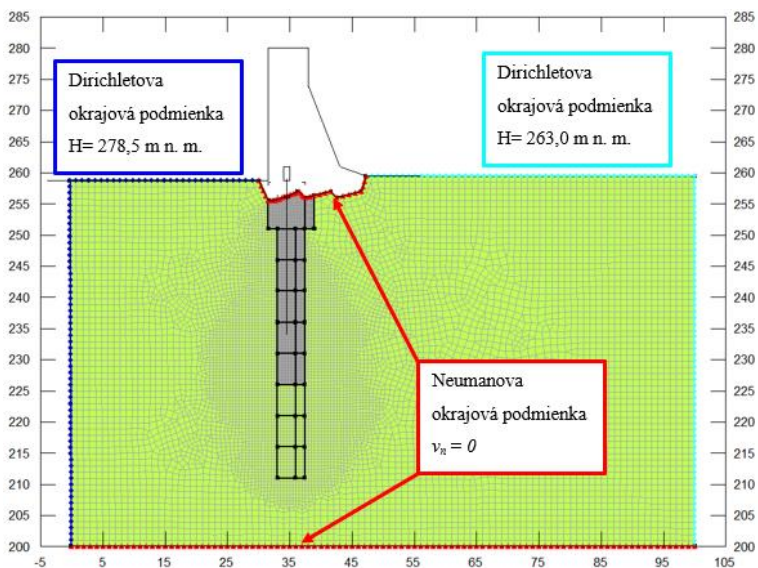


Obr. 7.1 Schéma realizovanej parametrickej štúdie v podloží pravostrannej časti priehrady, ľavostrannej časti priehrady a v oblasti výpustného zariadenia

K riešeniu parametrickej štúdie bol použitý program Geostudio 2012, modul SEEP/W (priesak). Veľkosť prvkov výpočtovej siete bol 1m, v okolí injekčnej clony 0,5m kvôli spresneniu parametrov prúdenia podzemných vôd. Okrajové podmienky, t. j. úroveň hladiny vody v nádrži a hladiny vody pod priehradou (v sondách sledujúcich trend vývoja podzemných a priesakových vôd, resp. hladiny vody v odpadnom koryte Váhu) boli stanovené na základe 30 ročného radu údajov in situ za roky 1994 až 2023 (obr. 7.2).

## 7.2 Výsledky riešenia

Pre ilustráciu prezentujem výsledky, získané v podmienkach podložia blokov ľavostrannej oblasti priehrady. V súlade s predpokladmi o parametroch injekčnej clony a poznatkami o geologickej skladbe horninového prostredia bola vykonaná parametrická štúdia, analyzujúca vývoj vztlakov v podloží blokov 24, 25, 26 a 27. Numerický model skúmanej časti telesa priehrady v podloží dokumentuje obr. 7.2. Vo výpočtoch bola pozornosť upriamená na hodnoty piezometrickej výšky (vztlaku) v oblasti základovej škáry telesa priehrady, na vzdušnej strane injekčnej clony.



Obr. 7.2 Schéma numerického modelu a výpočtovej siete v ľavostrannej časti priehrady



Výsledky výpočtov – závislosti piezometrických výšok na hĺbke injekčnej clony – sú dokumentované v tab. 7.1.

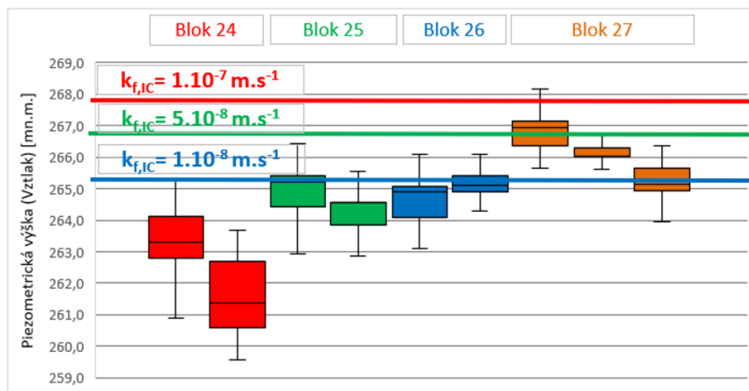
Tab. 7.1 Priebeh redukcie piezometrickej výšky na vzdušnej strane injekčnej clony v podloží blokov 24, 25, 26 a 27 v ľavostrannej oblasti telesa priehrady

		IC s $k_f = 1.10^{-7} \text{ m/s}^{-1}$			IC s $k_f = 5.10^{-8} \text{ m/s}^{-1}$			IC s $k_f = 1.10^{-8} \text{ m/s}^{-1}$		
$k_{f,HP}$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]		$1.10^{-6}$	$5.10^{-7}$	$1.10^{-7}$	$1.10^{-6}$	$5.10^{-7}$	$1.10^{-7}$	$1.10^{-6}$	$5.10^{-7}$	$1.10^{-7}$
$k_{f,HP} / k_{f,IC}$		10	5	1	20	10	2	100	50	10
Hĺbka IC [m]	0	270,5	270,5	270,5	270,5	270,5	270,5	270,5	270,5	270,5
	5	268,4	268,8	270,5	268,1	268,4	269,7	267,9	268,0	268,4
	10	267,7	268,4	270,5	267,3	267,7	269,5	266,9	267,0	267,8
	15	267,3	268,1	270,5	266,7	267,3	269,5	266,2	266,3	267,3
	20	267,0	268,0	270,5	266,4	267,0	269,4	265,6	265,8	267,1
	25	266,8	267,9	270,5	266,1	266,9	269,4	265,2	265,5	266,9
	30	266,8	267,9	270,5	265,9	266,8	269,4	264,9	265,2	266,8
	35	266,7	267,8	270,5	265,8	266,7	269,4	264,7	265,0	266,7
	40	266,7	267,8	270,5	265,7	266,6	269,4	264,5	264,9	266,7
45	266,6	267,8	270,5	265,6	266,6	269,4	264,3	264,8	266,6	

Z výsledkov vodných tlakových je priemerná hodnota koeficienta filtrácie pod blokmi telesa priehrady, situovaných v jej ľavostrannej oblasti  $k_{f,HP} = 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zo súboru výpočtov bola preto pozornosť upriamená na alternatívy, zohľadňujúce koeficient filtrácie horninového prostredia  $k_{f,HP} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Za účelom konfrontácie optimálnej a reálnej hĺbky injekčnej clony bol spracovaný krabicový graf zobrazujúci namerané hodnoty piezometrických výšok (vztlakov) pod príslušnými blokmi telesa priehrady (obr. 7.3). V grafe sú zobrazené týždenné hodnoty meraní na krátkych vztlakomerných vrtoch na vzdušnej strane injekčnej clony za obdobie rokov 1994 až 2023.

Výsledky analýzy (tab. 7.1) dokumentujú, že v geologickom prostredí s  $k_{f,HP} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  sa za predpokladu hĺbky injekčnej

clony 30 m hodnota piezometrickej výšky pohybuje v rozmedzí od 267,9 m n. m. (pri  $k_{f,IC} = 1.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ ) do 265,2 m n. m. (pri  $k_{f,IC} = 1.10^{-8} \text{ m.s}^{-1}$ ).

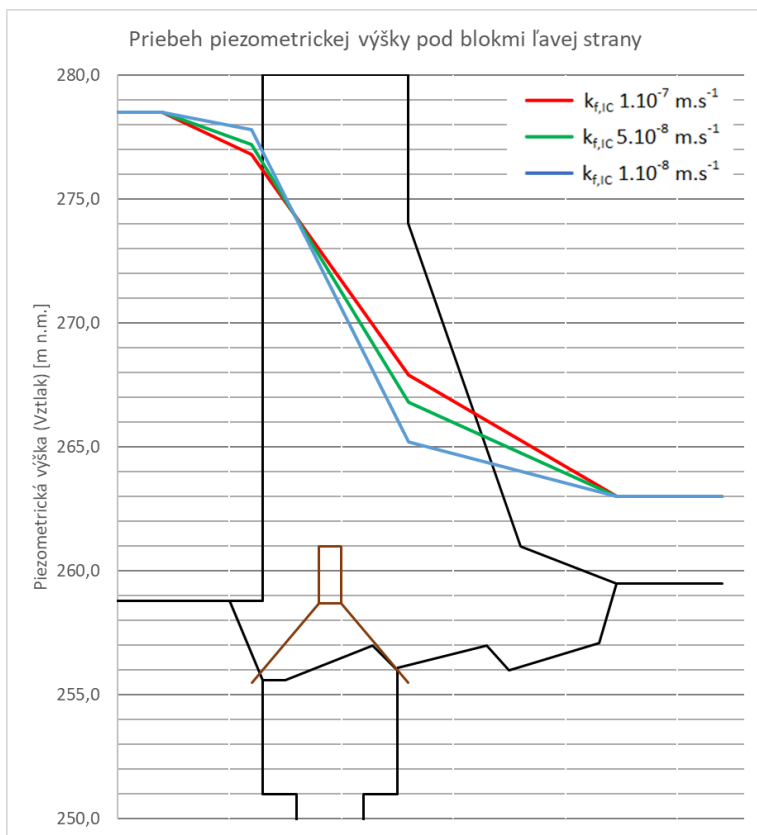


Obr. 7.3 Krabicový graf zobrazujúci hodnoty piezometrických výšok z krátkych vztlakomerných vrtov na vzdušnej strane injekčnej clony pod blokmi 24, 25, 26 a 27

Toto zistenie naznačuje, že injekčná clona, vybudovaná v skúmanej oblasti podložia priehrady Nosice má nižšiu priepustnosť ako minimálna deklarovaná priepustnosť dodávateľom ( $k_{f,IC} = 1.10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ ). Pre názornosť sú výsledky prezentovanej analýzy dokumentované na obr. 7.4.

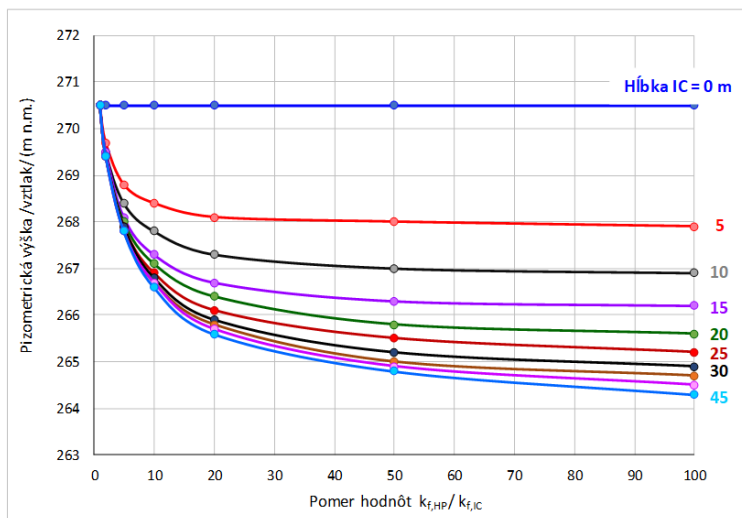
### 7.3 Zhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Z analýzy výsledkov parametrických štúdií v tejto kapitole vyplynul poznatok, že na vývoji účinnosti injekčnej clony sa významnou mierou podieľa geologické prostredie, resp. jeho interakcia s injekčnou clonou, čo možno vyjadriť pomernou hodnotou  $k_{f,HP} / k_{f,IC}$ . To vyústilo do spracovania vplyvu pomernej hodnoty  $k_{f,HP} / k_{f,IC}$  na redukciu piezometrickej výšky (vztlaku).



Obr. 7.4 Porovnanie piezometrických výšok z parametrickej štúdie a nameraných hodnôt v údolných blokoch – ľavostranná oblasť priehrady

Na obrázku 7.5 sú tieto výsledky, prislúchajúce oblasti podložia ľavostranných blokov priehrady, doplnené o širšie spektrum pomerných hodnôt  $k_{f,HP} / k_{f,IC}$  od 1, 2, 5, 10, 20, 50 až 100.



Obr. 7.5 Redukcia piezometrickej výšky v závislosti na pomerných hodnotách  $k_{f,HP} / k_{f,IC}$ , pri rôznych hĺbkach injekčnej clony - ľavostranná oblasť podložja priehrady

Z prezentovaných výsledkov je zrejmé, že vplyv interakcie horninového prostredia a injekčnej clony sa dá vhodne vyjadriť pomernou hodnotou  $k_{f,HP} / k_{f,IC}$ . Z grafického spracovania možno následne stanoviť efektívnu hĺbku injekčnej clony. Tak napr. v reálnych podmienkach  $k_{f,HP} / k_{f,IC} = 5$  až 20 je efektívna hĺbka injekčnej clony cca 15 – 25 m. Súčasne z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že tento faktor je pri optimalizácii parametrov injekčnej clony v podloží priehrad dominantný. Toto poznanie možno aplikovať pri posudzovaní spoľahlivosti injekčných clôn aj na iných vodných dielach. Neoddeliteľnou podmienkou úspechu takejto analýzy sú však poznatky o geologickej skladbe dotknutého prostredia a o parametroch injekčnej clony.

## 8. ZÁVER

Predmetom skúmania predkladanej dizertačnej práce bol problematika overenia spoľahlivosti injekčných clôn v podmienka slovenských priehrad z pohľadu súčasných poznatkov. Téma vyplynula z poznatkov štatistík porúch a havárií priehrad, vykonávaných v rámci ICOLD. Podľa nich, jednou z najčastejších príčin sú priesaky. Vek mnohých priehrad na Slovensku (viac ako 60 %) presahuje 50 rokov a poznatky doby v období ich navrhovania (1950- 1975) a výstavby boli skromnejšie, než v súčasnosti. Napr. pri výstavbe našich najstarších betónových priehrad (Orava, Nosice, Vlčia Dolina, Palcmanská Maša) sa pri navrhovaní potreby výstavby injekčných clôn najčastejšie aplikovalo Jähdeho kritérium, prostriedky na overovanie spoľahlivosti predkladaných návrhov (počítačové vybavenie, programové vybavenie, numerické modelovanie a i.) neexistovali. K overeniu spoľahlivosti funkcie injekčných clôn v podmienkach slovenských priehrad som zvolil betónové gravitačné priehrady Vlčia Dolina a Nosice.

Metodicky som predmetnú problematiku riešil v troch etapách:

- Analýza výsledkov VTS a konfrontácia parametrov injekčných clôn s kritériami podľa Jähdeho, Houlsbyho a Verfla,
- Skúmanie vplyvu interakcie dotknutého geologického prostredia a injekčných clôn na ich tesniacu funkciu – redukciiu vztlakov v podloží priehrad formou parametrických štúdií, numerickým modelovaním MKP,
- Konfrontácia výsledkov numerických analýz s výsledkami in situ.

*Vlčia Dolina*, betónová gravitačná priehrada, nachádzajúca sa v relatívne rovnomerom geologickom prostredí (amfibolity).

V konkrétnych podmienkach podložja priehrady, pod vybranými blokmi v údolnej nive, bola v rámci konfrontácie s výsledkami VTS a zvolenými kritériami zaznamenaná dobrá zhoda so skutočnými parametrami injekčnej clony a kritériami podľa Verfla.

*Priehrada Nosice* – vzhľadom na značnú heterogenitu dotknutého geologického prostredia, charakteristického striedaním pieskocov, ílovcov a zlepcov, bola k riešeniu predmetnej problematiky zvolená metóda širšej parametrickej štúdie.

Súbor poznatkov v rámci riešenej problematiky obohatili výsledky parametrickej štúdie. Prispela k tomu analýza skúmania vplyvu interakcie geologického prostredia a injekčnej clony, cez pomerné hodnoty ich koeficientov filtrácie ( $k_{f,HP} / k_{f,IC}$ ) na jej účinnosť, t. j. redukciu piezometrických výšok (vztlakov) v podloží priehrady. Z trendov ich vývoja je zrejmé, že jej vplyv sa prejaví najmä v rozmedzí hodnôt  $k_{f,HP} / k_{f,IC} = 5$  ž  $50$ . Ak je táto hodnota menšia ako  $5$ , funkcia injekčnej clony sa na redukcii vztlakov prejaví len nepatrne. Pri hodnotách  $k_{f,HP} / k_{f,IC} > 50$  ďalší nárast parametrov injekčnej clony je málo efektívny.

Na základe analýzy výsledkov vodných tlakových skúšok a numerického modelovania sme dospeli k záveru, že kritériá podľa Verfla najlepšie vystihujú potrebu utesnenia podložja v podmienkach slovenských priehrad. Tieto výsledky sú významné nielen pre priehradu Vlčia Dolina a vodné dielo Nosice, ale aj pre iné vodné stavby na Slovensku. Tento fakt súčasne potvrdzuje mimoriadne schopnosti, poznatky a skúsenosti vodohospodárov, priehradárov, geológov a d., ktorí stáli pri zrode takých vodných diel, akým je priehrada Orava, Nosice, Vlčia Dolina, Palcmanská

Maša, a i. Sú to vodné stavby, vybudované v 50-tych rokoch minulého storočia, bez akéhokoľvek využitia výpočtovej techniky.

### **Využitie získaných poznatkov a skúseností v odbornej praxi:**

Dostupnosť spoľahlivých výsledkov inžiniersko-geologického prieskumu v podmienkach existujúcich priehrad, poznatkov o parametroch injekčných clôn v ich podloží a dátové súbory dlhoročných meraní parametrov pohybu podzemných a priesakových vôd ponúkajú cenné podklady k posudzovaniu spoľahlivosti funkcie protipriesakových opatrení dostupnými metódami. Jedná sa o využívanie dostupných programových produktov, vhodnú aplikáciu numerického modelovania (MKP) formou parametrickej štúdie, rešpektujúc pritom rozsah reálnych vstupných údajov (parametrov injekčnej clony a dotknutého geologického prostredia) a v súčinnosti s konfrontáciou získaných výsledkov riešenia s hodnotami meraní in situ. Takto získaný a inverznou metódou overený numerický model v konkrétnych podmienkach predmetnej vodnej stavby predstavuje cenný podklad v prípade potreby skúmania príčin vyskytujúcich sa súčasných, prípadne budúcich anomálií vo vývoji parametrov pohybu podzemných a priesakových vôd. K tomuto účelu môže vhodne poslúžiť metodický postup riešenia, prezentovaný v predkladanej dizertačnej práci v podmienkach VD Vlčia Dolina a Nosice.

## Zoznam publikačnej činnosti a ohlasov

### **ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS**

BEDNÁROVÁ, Emília; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik**; POÓROVÁ, Jana. Water management system Liptovská Mara - Bešeňová in the context of climate change. In: Acta hydrologica Slovaca. -- ISSN 2644-4690. -- Roč. 22, č. 1 (2021), online, s. 15-21.

### **AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách**

BEDNÁROVÁ, Emília; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik**; POÓROVÁ, Jana. Liptovská Mara – Bešeňová water management system versus extreme hydrological phenomena. In: Gospodarka wodna / Technical Dam Control International Conference. -- ISSN 0017-2448. -- No. 9 (2021), s. 5-9.

### **AGI Správy o vyriešených vedeckovýskumných úlohách**

BEDNÁROVÁ, Emília; HULLA, Jozef; GRAMBLIČKOVÁ, Danka; BRČEK, Martin; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik**; VELEBA, Hubert. VD Krpeľany : analýza filtračného pohybu v podloží objektov vodného diela. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta 2021.

BEDNÁROVÁ, Emília; HULLA, Jozef; GRAMBLIČKOVÁ, Danka; BRČEK, Martin; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik**; VELEBA, Hubert. Analýza pohybu podzemných a priesakových vôd pozdĺž hrádzí odpadového kanála od VE Liptovská Mara v obciach Vlachy a Vlašky. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta, 2021.



BEDNÁROVÁ, Emília; HULLA, Jozef; GRAMBLIČKOVÁ, Danka; BRČEK, Martin; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik**; VELEBA, Hubert. Analýza pohybu podzemných a priesakových vôd pozdĺž obvodovej hrádze VD Liptovská Mara na ochranu obce Liptovský Trnovec. Bratislava : Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta 2021.

**AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách**

**VÁCLAVIK, Patrik.** Metodika posúdenia parametrov injekčnej clony na vodnom diele Vlčia Dolina. Advances in architectural, civil and environmental engineering. -- Bratislava : Spektrum STU, 2021. -- ISBN 978-80-227-5150-6. -- CD-ROM, s. 605-610.

**VÁCLAVIK, Patrik.** Možnosti posúdenia účinnosti injekčnej clony v podloží priehrady Nosice z hľadiska najnovších poznatkov. Advances in architectural, civil and environmental engineering. -- Bratislava : Spektrum STU, 2022. -- ISBN 978-80-227-5251-0. -- CD-ROM, s. 610-615.

**VÁCLAVIK, Patrik.** Optimalizácia hĺbky injekčnej clony metódou konečných prvkov. Advances in architectural, civil and environmental engineering. -- Bratislava : Spektrum STU, 2023. -- ISBN 978-80-227-5378-4. -- CD-ROM, s. 512-517.

BEDNÁROVÁ, Emília; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik.** Posúdenie filtračnej stability ochrannej hrádze Malého Dunaja. Slovenská geotechnická konferencia. -- Bratislava : Spektrum STU, 2023. -- ISBN 978-80-227-5313-5. -- USB kľúč, s. 168-178.

**AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách**

**VÁCLAVIK, Patrik.** Analýza parametrov injekčnej clony v podloží priehrady Vlčia Dolina. Juniorstav 2022. -- Brno : ECON publishing, 2022. -- ISBN 978-80-86433-76-9. -- online, s. 442-447.

BEDNÁROVÁ, Emília; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik;** POÓROVÁ, Jana; KASANA, Andrej. Importance of the water management system Liptovská Mara - Bešeňová in the context of climate change. International Congress on Large Dams. -- Leiden : CRC Press, 2022. -- ISBN 978-1-003-21180-8. -- USB kľúč, s. 46-56, Q.107-R.4.

BEDNÁROVÁ, Emília; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik.** Analysis of the impact of local leaks in the flood control levee. International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2022. -- Sofia : STEF 92 Technology, 2022. -- ISBN 978-619-7603-38-5. -- ISSN 1314-2704. -- S. 85-91.

**VÁCLAVIK, Patrik.** Stanovenie koeficientov filtrácie v podloží priehrady Nosice pre potreby posúdenia účinnosti injekčnej clony. Juniorstav 2023. -- Brno : ECON publishing, 2023. -- ISBN 978-80-86433-80-6. -- online, s. 595-600.

## **BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)**

**VÁCLAVIK, Patrik,** BEDNÁROVÁ, Emília. Význam interakcie injekčnej clony s horninovým prostredím pri posudzovaní jej účinnosti. Přehradní dny 2022. -- Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2022. -- ISBN 978-80-01-07001-7. -- USB kľúč, s. 88-95.



BEDNÁROVÁ, Emília; ŠKVARKA, Juraj; **VÁCLAVIK, Patrik**; MINÁRIK, Marián; DUŠEK, Peter; VLČEK, B. Anomalies in the seepage regime at the Lozorno dam - analysis of the causes and proposed remedial measures. ICOLD Annual Meeting 2023 and Symposium. -- Karlstad : SwedCOLD, 2023. -- USB klíč, s. 2165-2174.