

Геол. ан. Балк. пол. Ann. Geol. Penins. Balk.	60	1	505-523	Београд, децембар 1996 Belgrade, Decembre 1996
--	----	---	---------	---

УДК 624.131.4:624.138:627.8

Оригинални научни рад

ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКЕ ОСОБЕНОСТИ ОБЕЗБЕЂЕЊА ВОДОДРЖИВОСТИ ПОДЛОГА БРАНА У ГЕОЛОШКИ РАЗЛИЧИТИМ СРЕДИНАМА

од

Соње Цветковић–Мркић* и Дејана Ђурановића*

Анализом бројних испитивања водопропусности, испуцалости, резултата пробних ињекционих поља и изведених ињекционих завеса за бране изграђене у геолошки различитим срединама, могу се сагледати важне опште одлике ињектибилности различитих врста стенских маса и инжењерскогеолошких услова обезбеђења вододрживости. Како су ињекционе завесе битан елемент безбедности брана, као и обимни, дуготрајни и скупи радови, стечена искуства имају посебан значај, допуна су истраживањима за конкретне објекте и добра основа за праћење функционалности и одржавање. У раду је анализирано неколико врста стенских маса; кречњаци, флишини седименти, вулканити и слабије метаморфисане стене и приказани најосновнији подаци о резултатима истраживања и ињекционим завесама на конкретним објектима.

Кључне речи: испуцалост, водопропусност, ВДП, ињектибилност, пукотинске испуне, хетерогеност, анизотропија, хидрауличка непостојаност, филтрациона стабилност, ињекциона завеса

УВОД

Један од важнијих проблема, који при истраживању услова изградње брана и формирања акумулација треба решити, јесте могућност губљења воде кроз подлоге и бокове брана, односно по ободу акумулације. Општи инжењерскогеолошки и хидрогеолошки услови, као и водопропусност самих стенских маса, у првом реду су функција геолошке грађе ширег простора и особености изражених на самом преградном месту. Како су услови изградње брана и формирања акумулација, у овом смислу, посебно важни, и како им се мора удовољити извођењем, често обимних, заптивних ињекционих радова, оправдано им треба поклањати што већу пажњу, од првих истраживања, до непрестаног осматрања филтрације током коришћења објеката.

Екстремно сложене услове за формирање вештачких акумулација пружају карстификовани терени, у којима је добра изученост карста ширег простора основа приступању неопходним заптивним радовима. У испуцалим стенским масама ови услови су једноставнији, али је и у овом случају потребно довољно истражити све аспекте филтрације кроз подлоге брана и могућности њеног свођења у допуштене границе у погледу сигурности објеката и коштања изгубљене воде. Како у овој области још увек има доста непознатог, тако и анализа и уопштавање досадашњих искустава има одређену

* Рударско–геолошки факултет Универзитета у Београду, Ђурина 7, Београд.

тежину у изналажењу потребних параметара и инжењерскогеолошких критеријума. Истраживање општих услова обезбеђења вододрживости је од важности за сва будућа пројектовања и одржавање постојећих објеката.

ОСИОВНЕ ПОСТАВКЕ

Основу оцене инжењерскогеолошких услова обезбеђења вододрживости једног преградног места чини величина и просторна расподела водопрпусности и инјектибилности стенских маса, при чему су оба параметра непосредно условљена битним својствима испуцалости, као и геолошком грађом. Допуштена водопрпусност и димензије инјекционих завеса зависе и од других параметара међу којима су: општи хидрогеолошки услови, тип и висина бране, коштање акумулиране воде итд.

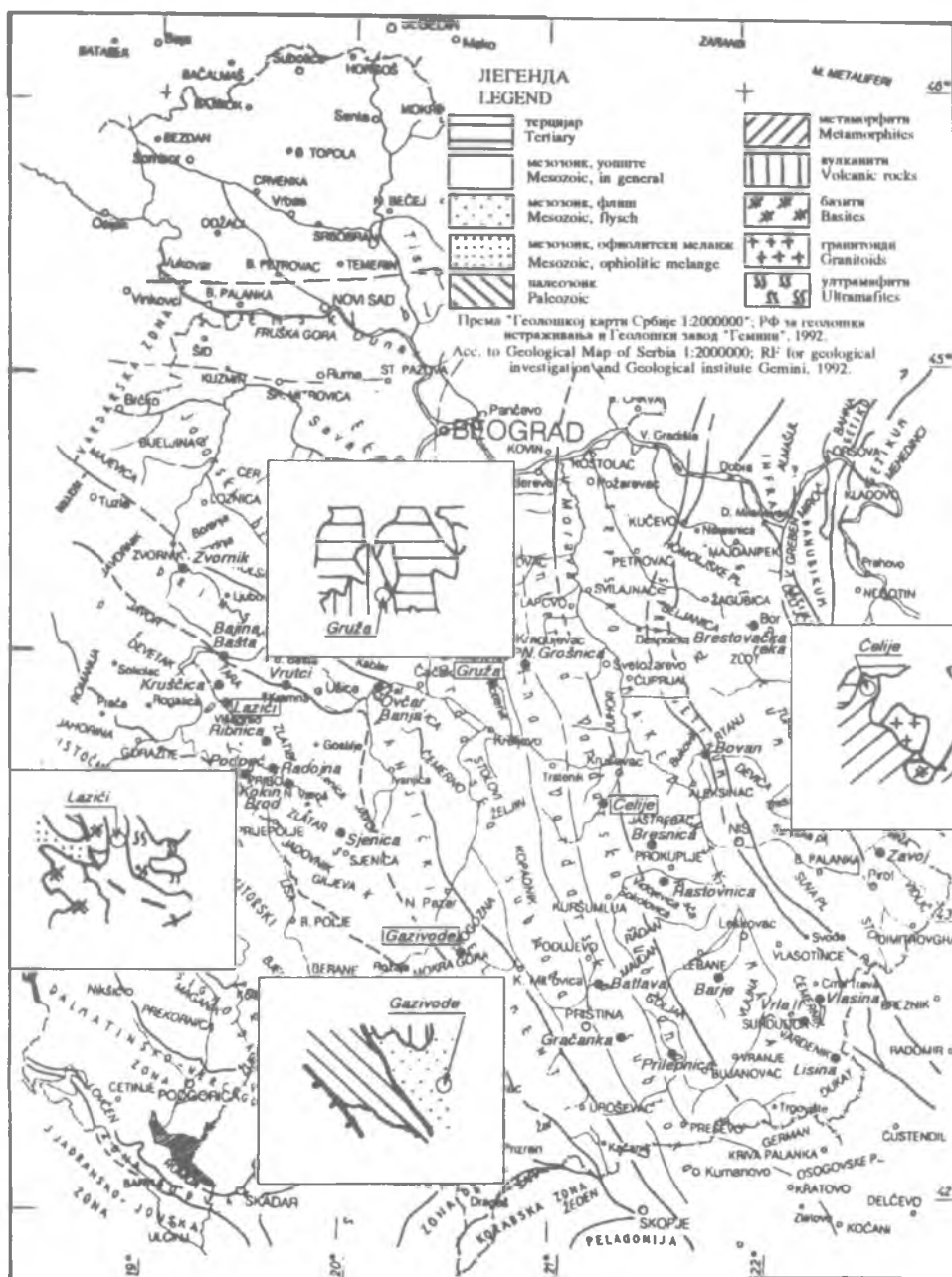
На територији Србије је изграђено више од 40 високих брана, у геолошки различитим теренима у оквиру свих крупнијих геотектонских јединица (сл. 1, табела 1).

Свако преградно место има одређене инжењерскогеолошке специфичности условљене, у првом реду, геолошком грађом ширег и ужег простора, али постоји и одређена општа сагласност ових својстава у литогенетски истим или довољно сличним срединама. Тачније, одређена инжењерскогеолошка својства се генерално типично манифестују у појединим врстама стенских маса, иако је свако подручје обележено утицајима локалне геолошке грађе. У прилог овоме иду и сазнања до којих се дошло анализом услова вододрживости и својстава од којих она зависи у неколико литолошки различитих средина: у кречњацима, флишним седиментима, еруптивима и кристалистим шкриљцима. У овом приказу највећа пажња је посвећена општим својствима издељености, водопрпусности и инјектибилности, при чему је за сваку од одабраних средина приказан по један пример са основним елементима заптивних инјекционих радова.

ОПШТИ ИНЖЕЊЕРСКОГЕОЛОШКИ УСЛОВИ ВОДОДРЖИВОСТИ

Кречњаци. Неколико наших брана је изграђено на кречњацима, или се они јављају као доминантан члан геолошке грађе (табела 1). Међу њима су и: "Лазини-кањон", "Врутци", "Крушчица" и др.

Кречњачке стенске масе су посебне утолико што имају релативно разнолико појављивање, често варирање састава и различит степен издељености и што су, у већини случајева, захваћене процесом карстификације. То може, зависно од укупних хидрогеолошких услова и стадијума развоја овог процеса, пружити доста сложене, или чак екстремно тешке, услове обезбеђења вододрживости. Ако се са разлогом задржимо на случајевима делимично развијеног карста, често називаним пукотинским карстом, чија база није спуштена испод површинске ерозионе базе, могуће је установити извесне закономерности у просторној расподели, димензијама и развијености карстних облика који имају доминантно значење у укупним условима обезбеђења вододрживости. У суштини, овај тип умереног карста почива на растварању стенске масе по постојећим дисконтинуитетима, па је утолико израженији уколико је стенска маса издељенија, што значи посебно у зонама интензивније механичке оштећености. Истовремено, читави делови ових, по правилу блоковски издељених стенских маса, могу остати са очуваном испуцалости, скоро без трагова карстификације.



Сл. 1. Положај брана и акумулација у склопу геотектонских јединица
Fig. 1. Locations of dams and storage lakes and geotectonic units.

Табела 1. Општи подаци о бранама.
Table 1. General information on dams.

Р. бр. No.	Брана Dam	Тип Type	Висина (m) High (m)		Река - слив River - main river	Геолошка грађа Geologic feature
			граб. const.	хидр. hydr.		
1.	Lazići kanjon	E	135,5	125	B. Rzav - Drina	Кречњаци (К), крило синформе Limestones (K), flank sinform
2.	Kruštica	E	41,5	40	B. Rzav - Drina	Кречњаци (К), крило синформе Limestones (K), flank sinform
3.	Sjenica	E	110	105	Uvac - Drina	Кречњаци (Ј), ДРФ (Ј), убрано Limestones (J), DRF (J), folded
4.	Vrutci	V	75	64,5	Đetinja - Z. Morava	Дол кречњаци (Т), моноклина серија Dolomitic limestones (T), monocline series
5.	Gazivode	E	107,5	102,5	Ibar - Z. Morava	Флиш (К), изокл. антиформа, раседнута Flysch (K), isocline antiform, faulted
6.	Grošnica	P	50	36	Grošnica - V. Morava	Флиш (К), моноклина серија, раседнута Flysch (K), monocline series, faulted
7.	Zavoj	E	101	86	Visočica - J. Morava	Флиш (Т), моноклина серија Flysch (T), monocline series
8.	Batlava	H	46,5	42	Batlava - Ibar	Флиш (К), антиформа раседнута Flysch (K), antiform faulted
9.	Gruža	C	51,5	48	Gruža - Z. Morava	Вулканисти (М), широка раседна зона Volcanic rocks (M), wide fault zone
10.	Radonjić	E	61	57	Prue - Drim	Серпентинити, перидотити (Pz) Serpentinites, peridotites (Pz)
11.	Ribnica	C	32,5	24,5	Ribnica - Z. Morava	Серпентинити, перидотити (Ј) Serpentinites, peridotites (J)
12.	Gračanka	E	52	45	Gračanka - Ibar	Серпентинити са пробојима габра Serpentinites with gabbro intruded
13.	Čelije	T	51,5	48	Rasina - Z. Morava	Крист. шкр., микашисти (Pz), антиформа Crystalline schists, mica (Pz), antiform
14.	Bajina Bašta	F	90	74	Drina	Аргилошистит, шкр. пеш., глиници, мелаф. (Pz) Argillaceous, schists sandstone, melaphyre (Pz)
15.	Rastovnica	E	29,25	22	Rastovnica - J. Morava	Гнајсеви (Pz) Gneiss (Pz)
16.	Vlasina	T	31,5	26,5	Vlasina - J. Morava	Микашисти, амфиболити (Pz) Mica, amphibolite (Pz)
17.	Bovan	E	52	46	Moravica - J. Morava	Крист. шкриљци (Pz), моноклина серија Crystalline schists (Pz), monocline series
18.	Lisina	E	53	42	Božica	Крист. шкриљци (Pz), антиформа, раседнута Crystalline schists (Pz), antiform, faulted
19.	Barje	E	75	65	Veternica - J. Morava	Гнајсеви (Pz) Gneiss (Pz)
20.	Bresnica	E	39,1	33,5	Bresnica - J. Morava	Зелени шкриљци (Pz), набори, раседи Greenschists (Pz), foulds, faults
21.	Prilepnica	E	50	36,8	Prilepnica - J. Morava	Крист. шкриљци (Pz), раседи, набори Crystalline schists (Pz), faults, foulds
22.	Ovčar Banja	P,T	27	20	Z. Morava - V. Morava	Аргилошисти, пешчари (С, P) Argillaceous, sandstones (C, P)
23.	Kokin Brod	E	82	79,5	Uvac - Drina	Кречњаци (Т), ДРФ (Ј), лапори (Тс) Limestones (T), DRF (J), claystone (Tc)
24.	Radojna	E	42	33	Uvac - Drina	ДРФ, масивни кречњаци (Т) DRF, massive limestones (T)
25.	Lazići - prevoj	F	55	43	B. Rzav - Drina	Глиници, лапорци, креч. (К), антиформа Shales, claystones, limestones (K), antiform
26.	Vrla II	E	26	21	Vrla - J. Morava	Зелени шкриљци, пробоји дацита (Pz) Greenschists, dacite intruded (Pz)
27.	Podpeč	P	46	44	Lim - Drina	Амфиболит, амфиб. шкр., пешчари (Ј) Amphibolite, amphibolite schists, sandstones (J)
28.	Zvornik	P	42	36,4	Drina	Крист. шкриљци (Pz), кречњаци (Т) Crystalline schist (Pz), limestones (T)

E – камена насута; T – земљана насута; B – луцна; П – бетонска грав; Ц – гравитационо-луцна; Ф – олакшана грав.
E – Rockfill dam; T – Earth dam; B – Arch dam; concrete gravity dam; C – Gravity arch; F – Hollow gravity dam.

Ове стенске масе, у највећем броју случајева, карактерише блоковска издељеност и присуство по најмање три фамлије пукотина од којих је једна развијена по св површима, а друге две су, са мањим или већим локалним одступањима, међусобно управне и управне на слојевитост. Уз то, јављају се и гравитационе пукотине у боковима долинских страна, као и карактеристичне пукотине у зонама раседања. Оне су најчешће путеви интензивног кретања подземне воде па су и у већој мери захваћене карстификацијом.

Генерално, јављају се две врсте пукотинских испуна. Минералне, калцитске испуне могу испуњавати читаве карстне шупљине од димензија или само прекривати зидове пукотина у виду крипнокристалних или прашкастих скрама до добро развијених кристалних форми. Често је уочљиво више фаза излучивања испуна, што је резултат промена у општем тренду развоја карстификације условљених геотектонским процесима, климатским променама итд. Трошне, претежно глиновите испуне, резултат потпуног растварања основне стенске масе, карактеристичне, првенствено, за плиће делове терена, могу имати различит степен консолидације, мада су генерално подложне филтрационом разарању и разлог су хидрауличке непостојаности ових стенских маса. У извесним случајевима, шире раседне зоне могу бити потпуно затворене добро консолидованим глиновитим испунама седиментног типа, старијим од испуна у другим деловима стенске масе.

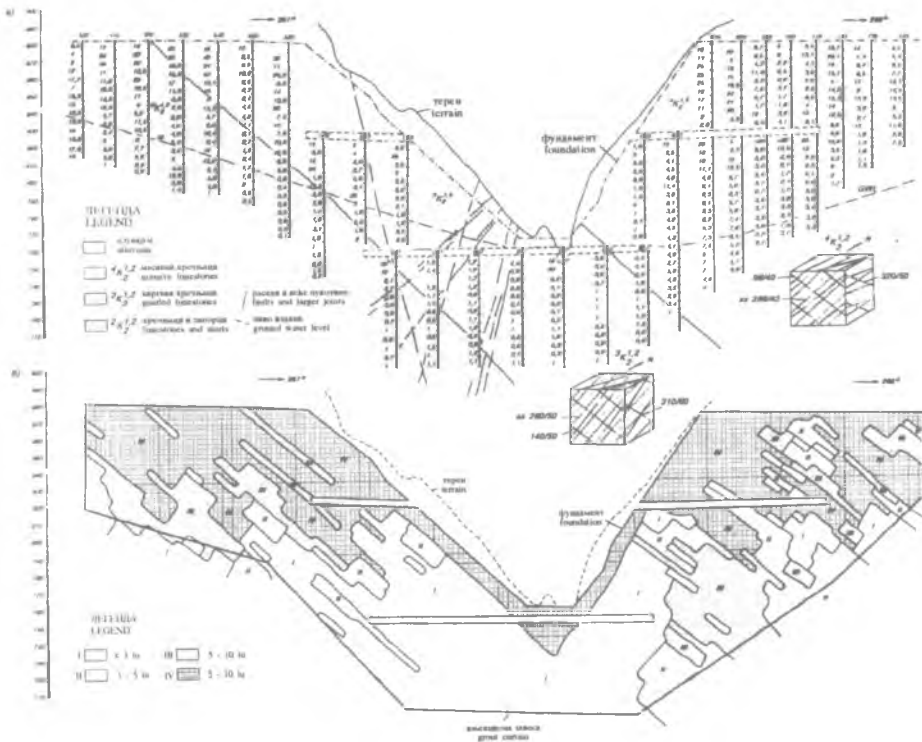
Сагласно карактеристикама испуцалости стенских маса и степену развијености карстификације, терен је по водопрониосности, не ретко, изразито хетероген и за потпуно сагледавање могућности губљења воде и услова ограничавања губитака је потребан висок ниво истражености. Два битна својства водопрониосности ових стенских маса су: широк распон вредности ВДП-а, од незнатних до немерљиво великих у просторима са развијеном карстификацијом, и хидрауличка непостојаност условљена присуством трошних, филтрационо нестабилних испуна. Томе, свакако, треба додати и разноликост облика појављивања ових стенских маса од које зависе геометријске карактеристике пукотина, учесталост, рапавост зидова, степен отворености и други параметри од важности за величину и својства водопрониосности. Класична испитивања ВДП-а, осматрања режима издани, ниво ефикасности изведених ињекционих завеса и осматрања њиховог функционисања, показују знатну хетерогеност по водопрониосности и велике тешкоће у савладавању њених особености класичним ињектирањем. Тачније, ињектибилност ових стенских маса може бити ограничена појавом локално екстремних вредности ВДП-а, филтрационо нестабилношћу испуна, па чак и изразитом анизотропијом испуцалости и водопрониосности. Отуда типска, униформна решења са јединственим елементима ињектирања скоро да немају изгледа на успешност ни онда када су димензије ињекционе завесе прилагођене њеној намени.

Један од терена са типично израженим проблемима обезбеђења вододрживости о којима је било говора, је преградио место бране "Лазихи-кањон", у склопу горње акумулације РХЕ "Бајина Башта". Граде га седименти сенонске госавске фазије: слојевити до плочасти лапоровити кречњаци са прослојцима лапораца, слојевити кречњаци, квргави сиви слојевити до банковити кречњаци и банковити кречњаци, са поступним прелазима. Чине југозападно крило синформе динарског пружања, а на самом преградиом месту имају облик моноклине форме испресецање дијагоналним и попречним раседима (сл. 2).

Лапоровити кречњаци левог бока су издељени св површинама и већим бројем дијагоналних пукотина, претежно по зевовима. Све су оне затворене трошним испунама подложним испирању, а трагова карстификације има само у површинском делу. Водопрониосност ове средине је до дубине од око 70 m углавном већа од 10 lu, а у дубљим мања од

3 lu. Утрошци ињекционе масе на реперним бушотинама показују да су ове стенске масе са ВДП–ом до 5 lu једва ињектибилне, са утрошцима од око 35 kg/m³, а вредности-ма мањим од 3 lu одговарају утрошци до 25 kg/m³.

Квргави банковити кречњаци, у левом боку и дну профила, су доста правилно издељени са три фамилије пукотина, зезова и до 10 mm, рапавих зидова, са траговима карстификације у надизданској зони и испирљивим грануларним испунама. Плићи делови терена имају ВДП већи од 10 lu, а дубљи мањи од 3 lu и показују знатну хомогеност. И ова врста кречњака има малу ињектибилност за ВДП до 5 lu, нарочито уколико је већа рапавост зидова пукотина.



Сл. 2. Брана "Лазичи": а) инжењерскогеолошки пресек терена; б) инжењерскогеолошки модел
Fig. 2. Lazici dam site: a) engineering-geological section; b) engineering-geological model

Банковити кречњаци и њихов поступни прелаз у масивне, у десном боку профила су, попут претходних, доста правилно издељеени у крупне блокове, са три генерално међусобно управне фамилије пукотина, од којих је једна развијена по ss површима (сл. 2). У надизданској зони има нешто интензивнијих трагова карстификације, а пукотине свих фамилија су до знатних дубина испуњене испирљивим испунама. Доста је изражена хетерогеност по ВДП–у, што одражава карактер издељености стенских маса. За вредности ВДП–а до 5 lu, ове стенске масе су скоро неињектибилне. Утрошци ињекционе масе на реперним бушотинама су масовно мањи од 20 kg/m³.

Овакви услови су захтевали обимно заштитно ињектирање (сл. 2). Укупна дужина ињекционих бушотина, распоређених на растојањима 2 и 2,5 m, у три реда,

износила је 28780 m'. Јединични утрошци масе су доста умерени до незнатни. На значајном броју етажа утрошци су били мањи од 10 kg/m'. Екстремни утрошци, од неколико стотина па до преко хиљаду kg/m', били су везани за подручја захваћена карстификацијом, а делимично су последица и неприлагођеног режима ињектирања. Остали елементарни подаци о ињекционој завеси су дати у табели 2.

Табела 2. Основни подаци о бранама и акумулацијама.

Table 2. Basic information on grout curtains.

брана dam	P_b (m ²)	P_z (m ²)	P_b/P_z	H_u (m')	D_z (m')	D_z/H_u	VDPd. (lu)	R	d_{bu} (m')	Σl_b (m')	Q_{sm} (kg/m')
Лазичи к. (кречњаци) Lazići k. (Limestone)	16200	51760	0,31	125	60 145	0,48	2	3	2 2,5	28780	54
Газиводе (флиш) Gazivode (flysch)	33440	41870	0,80	102,5	60 103	0,66	2	1	2,5 5	16608	51
Гружа (вулканити) Grūža (volc. rocks)	9955	17790	0,56	48	48,5 59,5	1,15	1	1	2,5 5	8198	33
Ћелије (шкриљци) Ćelije (schists)	7150	8040	0,89	48	30 39	0,62	1	1	2 4	1589	142

P_b – површина бране; P_z – површина ињекционе завесе; H_u – висина успора; D_z – дубина завесе, распон; VDPd. – дозвољени вdp; R – редност завесе; d_{bu} – растојање ињекционих бушотина; Σl_b – укупна дужина ињектирања; Q_{sm} – утрошци суве масе.

P_b – dam surface area; P_z – Grout curtain surface area; H_u – backwater level; D_z – curtain depth, span; VDPd – permissible permeability; R – curtain rows; d_{bu} – space between grouting holes; Σl_b – total grouting length; Q_{sm} – dry mass concentration.

Флишни седименти. Захваљујући јединственој генези, ови седименти се одликују потпуном хетерогеношћу и анизотропијом у погледу свих битнијих инжењерскогеолошких својстава. Обично их чини мање или више правилно смењивање секвенци изграђених од глинача, алевролита, пешчара, лалораца и кречњака, у којима дебљина слојева, којом је предиспониран карактер издељености, може варирати од лиски до m димензија. Флишни терени су, по правилу били изложени интензивним вишефазним убирањима и раседањима, што додатно повећава утицај укупне геолошке грађе на инжењерскогеолошка својства.

Издељеност ових стенских маса и својства пукотина су условљени дебљином слојева, механичким својствима литолошких чланова и процесима којима је формирана коначна структура терена. Како је најизраженија фамилија пукотина по површинама слојевитости, то се и у склопу једне секвенце могу срести значајне разлике учесталости пукотина и свих других својстава. Пукотине које прате наборе, раседе и раседне зоне, имају одређену правилност појављивања, а својства им у највећој мери зависе од локалног литолошког састава и положаја у склопу терена. У пачелу, веће зевове имају пукотине у крућим, мање деформабилним члановима, а испуцалост механички слабијих одликује хидрауличка непостојаност.

Водопропусност флишних седимената је генерално мала, до неколико lu, осим у зонама раседа и изразитијих структура. Регионално, флишни седименти су, по правилу, хидрогеолошки изолатори. Осим малих вредности водопропусности, њих карактерише и хидрауличка непостојаност, било условљена испирањем испуна у механички отпорнијим члановима, било повратним или трајним отварањем пукотина у деловима које граде глинци и алевролити. Величина притиска "отварања формације" може варирати од неколико до преко 0,5 МПа, зависно од локалних услова и положаја у склопу терена.

Упркос генерално малој водопропусности, и у овим степским масама је неопходно изводити заштитно ињектирање ради смањења губитака воде и обезбеђења филтрационе стабилности. Обзиром на својства испуцалости и водопропусности, ињектибилност може варирати у широким границама и на блиским растојањима. Највећи проблеми се јављају у хидраулички непостојаним деловима које прате повећани утросци изазвани хидрауличким отварањем појединачних пукотина, иначе малих зезова, и одвођењем масе изван корисног подручја. Отуда честе привидне контрадикторности да зоне малих водопропусности прате повећани утросци масе и обрнуто, што само потврђује обавезу прилагођавања елемената ињектирања, не само водопропусности, већ и ињектибилности.

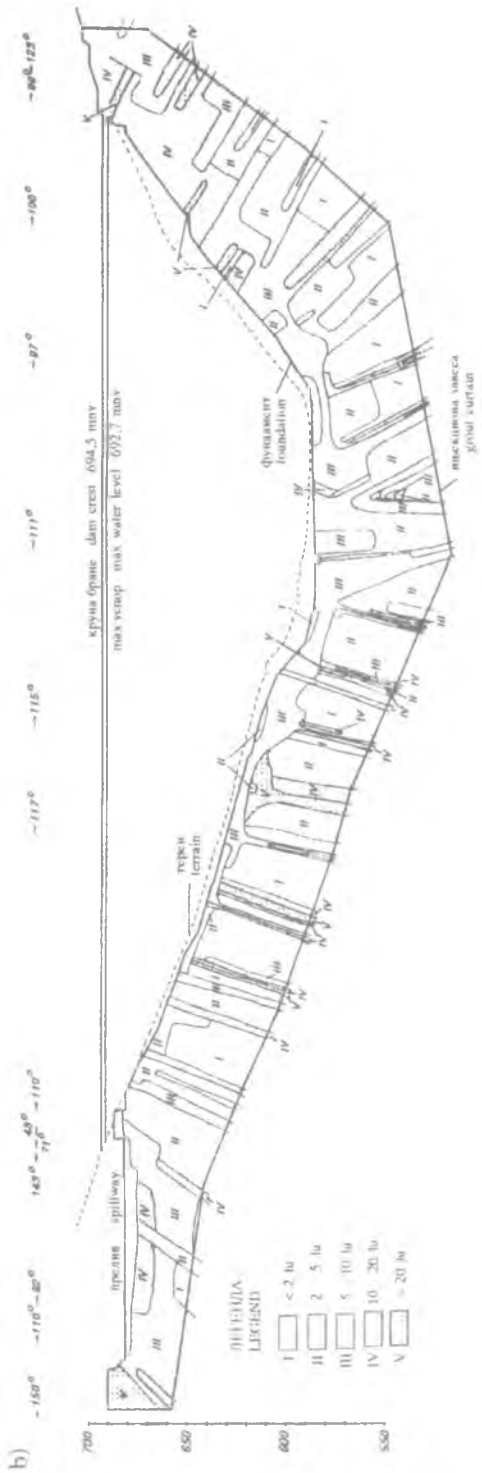
Код нас је неколико брана изграђено на флишним творевинама, махом горњокредне старости. Међу њима су "Грошница", "Батлава" и "Газиводе" која формира највећу акумулацију у Србији.

Флиш подлоге бране "Газиводе" чине глинци, лапорци и пешчари који преовлађују само у средишњем делу десног бока, као плочасти, банковити, ређе масивни. У осталим деловима доминирају глинци и лапорци који се појављују у засебним пакетима или у смени са пешчарима. Терен је представљен стиснутом асиметричном, подужно по темепу раседнутом антиформом, дуж које је Ибар усекао долину (сл. 3а и 3б). У склопу преградног места, стенске масе су издвојене у крупне блокове раседима и раседним зонама динарског и дијагоналног пружања. Издвојене су фамилијом пукотина по површинама слојевитости и двама фамилијама управним и дијагоналним у односу на слојевитост. Учесталост пукотина, дужине и величине зезова зависе од локалног литолошког састава, односно, дебљине слојева и механичких својстава литолошких члапова. Учесталост пукотина је већа у лапорцима и глинцима, али су оне краће и скоро без зезова.

Због већег учешћа пешчара, у десном боку, до дубине од око 40 m, доминирају вредности водопропусности веће од 10 lu, са тенденцијом смањења са дужином на вредности мање од 2 lu. У левом боку, вредности преко 10 lu се јављају само у раседним зонама и пакетима пешчара. Испитивањима ВДП–а је утврђена хидрауличка непостојаност, као последица "отварања" формације, и то под притисцима реда величине 0,2–0,4 МПа, првенствено у лапорцима и глинцима. Због изразите хетерогености по величини зезова и оваквог типа хидрауличке непостојаности, ињектибилност варира у широким границама, од добре праћене регуларним остварењем завршног критеријума, до изазивања хидрауличких ломова под високим ињекционим притисцима, праћених обимним губљењем ињекционе масе изван подручја предвиђеног за ињектирање.

Изведена је једноредна ињекциона завеса, дубине 25–103 m, са осовним растојањем бушотина од 2,5 m, и прогушћењем на 1,6 m у левој бочној завеси (сл. 3б). Накнадно су највећем делу завесе додата још два реда косих бушотина, са истим основним растојањем. Контролна испитивања ВДП–а су показала да је, осим на појединачним изолованим етажама, остварено предвиђено смањење водопропусности на 2 lu.

Вулканити. Релативно мали број брана код нас је изграђен на вулканским стенама, што је и разумљиво обзиром на карактеристике наших вулканских масива. Најчешће се ради о слабије тектонски поремећеним младим масивима, разорених ерозијом по периферним подручјима. Генеа вулканских стена, попут вишефазног утискивања и изливања, минерални састав и накнадни процеси, условљавају специфичан облик издвојености и својстава која из ње произилазе. Правилност просторне расподеле пукотина лучења није увек уочљива у размери подручја преградног места где су тектонски процеси,

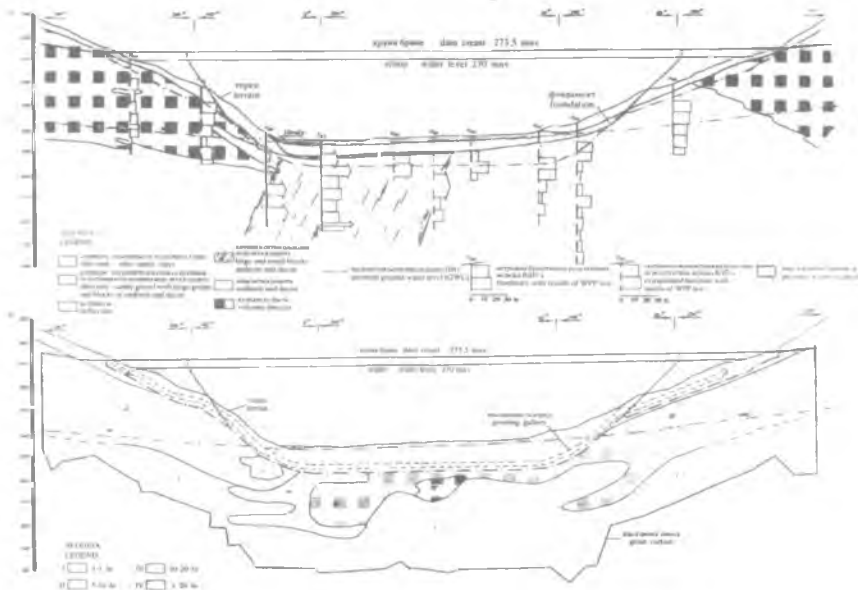


Сл. 3. а) Брана "Газиводе", инжењерскогеолошки пресек терена; б) брана "Газиводе", инжењерскогеолошки модел. Fig. 3. a) Gazivode dam site, engineering-geological section; b) Gazivode dam site, engineering-geological model.

најчешће, били пресудни за стварање услова за развој ерозије и настајак речних долина. Отуда, није редак случај да са повећањем дубине нема правилности у смањивању учесталости и величина зезова пукотина. Глиновитих испуна, продуката распања основне стене, скоро редовно има у површинским деловима терена, и оне су најчешће подложне филтрационом разарању.

Сагласно својствима испуцалости, водопропусност може варирати у широким границама, са честим појавама повећаних вредности на већим дубинама. Таква хетерогеност по водопропусности, у извесном смислу, отежава усвајање димензија ињекционих завеса и захтева виши ниво истражености. С друге стране, ове стенске масе се могу сматрати ињектибилним за вредности ВДП-а веће од 1 lu, и без посебних тешкоћа се може достићи смањење водопропусности до те величине.

Једно од преградних места у оваквим стенским масама се налази у склопу Котленичког вулканског комплекса, на реци Гружи, где је изграђена истоимена лучно-гравитациона брана. Настанак овог комплекса је везан за раздобље од олиго-миоцена до млађег неогена, и то тако што су у првој фази настали андезити и дацити, у другој кварцлатити и дацити, а у трећој лабрадорски андезити и трахитоиди, са уиоредним формирањем пирокластита, бреча и туфита. Средишњи део преградног места чине црвени до тампо црвени андезити. У површинском делу они су издвојени у ситне блокове, а у дубљим деловима, у свежој стенској маси, јављају се пукотине лучења, већих зезова, са глиновитим испунама, и тектонске пукотине без испуна. Бочне, више делове терена граде неправилније издвојене вулканске брече које чине комади андезита и дацита уклопљене у нехомогену груспфицирану цементну масу. Речна долина је развијена по широјој раседној зони у којој је основна стена потпуно механички оштећена (сл. 4).



Сл. 4. Брана "Гружа": а) инжењерскогеолошки пресек терена; б) инжењерскогеолошки модел

Fig. 4. Gruža dam site: a) engineering-geological section; b) engineering-geological model

Испитивања ВДП-а су показала распон од неколико, до преко 20 lu, у раседној зони и преко 30 lu, без смањивања вредности са дубином. Хидрауличка непостојаност је изражена само у шиљим деловима услед присуства филтрационо нестабилних испуна.

Обзиром на конструктивни тип бране, за решење ињекционе завесе је од посебног значаја била њена улога у смањењу узгона. Бушотине су распоређене у једном реду, у облику закривљеног узводно пагнутог екрана и променљивих су азимута и падних углова. Растојања између бушотина су од 1,5 m у раседној зони, до 2,5–4,5 m у осталом делу завесе. Дубина завесе је знатна, и до 55 m у делу корита реке, а укупна површина 17790 m². У односу на пројектовани обим, завеса је у делу раседне зоне допуњена са 20 бушотина, распоређених у додатни узводни и низводни ред. На реперним бушотинама просечан утрошак цементне масе је износио 35 kg/m', а кретао се од неклско, до преко 120 kg/m'. Сличан утрошак је остварен и на ињекционим бушотинама и износио је 33 kg/m', а само на допуским је био већи, 104 kg/m'. Контролна испитивања ВДП–а су дала средњу вредност од 0,97 lu, што потврђује оцену о ињектибилности ових стенских маса.

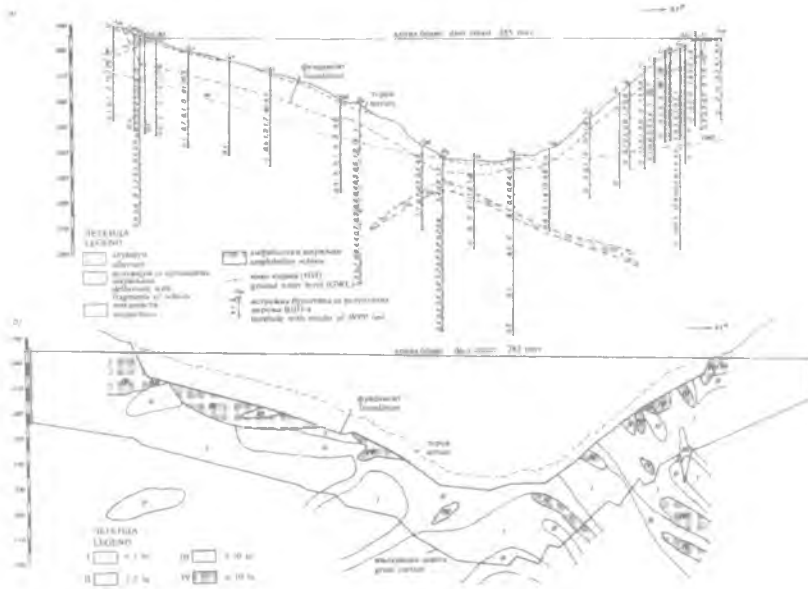
Кристални шкриљци. У склопу ове врсте, посебну пажњу привлаче слабије метаморфисане стене јер су довољно водопропусне да је и у њима потребно изводити заптивно ињектирање, а карактер испуцалости, водопропусности и механичка својства отежавају остварење потребних побољшања.

Терени које граде ове врсте стенских маса су, по правилу, сложеног литогенетског састава и структурно–тектонских односа, као последица више фаза метаморфизма и структурног обликовања. Испуцалост карактеристична изразита анизотропија и хетерогеност, знатна учесталост пукотина претежно врло малих зезова, као и присуство продуката распадања у њима. Ово су претежно слабо водопропусне стенске масе, најчешће до 3 lu. Веће водопропусности имају пливни делови и тектонски општењене зоне. За њих је карактеристична и хидрауличка непостојаност узрокована отварањем пукотина, а само изузетно класичним хидрауличким ломовима предиспонираним латентним дисконтинуитетима и испирањем испуна. На ово својство утиче знатна механичка ослабљеност названа интензивним површинским распадањем, и до неколико десетина метара дубине.

Мале водопропусности и величине зезова пукотина битно ограничавају ињектибилност. Класичним масама се тешко остварују радијуси дозирања масе већи од око 1 m, па уз опасност губљења масе услед хидрауличке непостојаности, остаје неизвесност у континуираност заињектираности и при малим растојањима ињекционих бушотина. Обзиром на својства испуцалости и водопропусности, као и мале укупне губитке воде, непотребно је, у већини случајева иисистирати на допуштеној водопропусности мањој од 3 lu.

Једна од брана изграђена на овој врсти стенских маса је и брана "Ђелије" на реци Расини. Терени граде палеозојски микашисти, изразито шкриљави, често ситно плисирани и изувјани. Садрже неправилне жице и сочива кварца, местимично прелазе у силификоване шкриљце, па чак и у кварците. У маси микашиста се јављају тање конкордантне жице и сочива амфиболитских шкриљаца. У стеној маси има више фамилија пукотина различитих пружања и са знатним распонима падова. У микашистима су пукотине делимично запуњене испунама богатим лискунима, а у силификованим деловима су, обично, отворене и без трошних испуна. Обимна испитивања у истражним и реперним бушотинама ињекционе завесе су показала да је водопропусност у највећем делу мања од 1 lu, а само изузетно већа од 10 lu, са уочљивом тенденцијом смањивања са дубином (сл. 5). Изведена је једноредна ињекциона завеса, релативно једноставне контуре, која прати терен, дубине 30 m. Основно растојање бушотина је 4,0 m, а на десном боку су изведене и допунске бушотине на 2 m растојања. Ињектирањем није у потпуности остварено смањење ВДП–а на допуштеној вредности од 1 lu, посебно на прве две етаже од по-

вршише терена, Међутим, укупни рачупски добијени губици воде су мањи од 5 l/sec, што тешко оправдава и изведени обим радова. Посебну занимљивост представљају релативно велики просечни утрошци масе од 142 kg/m' на пробном пољу, и 173 kg/m' на средњем делу дубинске завесе. Они су, највероватније, последица анизотропије водопрпусности и хидрауличке непостојаности, односно губљења масе изван ко-рисног простора.



Сл. 5. Брана "Љелије": а) инжењерскогеолошки пресек терена; б) инжењерскогеолошки модел
Fig. 5. "Čelije" dam site: a) engineering-geological section; b) engineering-geological model

УМЕСТО ЗАКЉУЧАКА

Изучавање општих инжењерскогеолошких услова обезбеђења вододрживости се заснива на познавању својстава испуцалости, водопрпусности и ињектибилности, као последице одређене геолошке грађе шпрег простора и њених локалних особеости. У рекапитулацији ових разматрања, обзиром на полазне поставке о типичном испољавању битних својстава у појединим литогенетским врстама стенских маса, у табели 2. су дати пајбитнији параметри ињекционих завеса за одабране објекте и врсте стенских маса.

Упоредна аналза ових података, између осталог, показује да су релативно најобимија ињектирања у кристаластим шкриљцима који, иначе, испољавају најмању водопрпусност и најпроблематичнију ињектибилност, условљену преовлађујућом величином зезова пукотина и специфичном хидрауличком непостојаиошћу. То отвара питања избора допуштене водопрпусности и усклађивања елемената ињектирања са својствима ињектибилности, дајући им значење незаобилазног истраживачког задатка у рутинским истраживањима, као и важно место у инжењерскогеолошким изучавањима општих критеријума заптивног ињектирања.

Геол. ан. Балк. пол. Ann. Géol. Penins. Balk.	60	1	505-523	Београд, децембар 1996 Belgrade, Decembre 1996
--	----	---	---------	---

UDC 624.131.4:624.138:627.8

Original scientific paper

ENGINEERING-GEOLOGICAL PROPERTIES RELATIVE TO DAM FOUNDATION WATER-HOLDING IN DIFFERENT GEOLOGIC ENVIRONMENTS

by

Sonja Cvetković-Mrkić* and Dejan Đuranović*

The engineering-geological properties and the general groutability of different rock masses for the water-holding purpose can be deduced from the numerosity of analysed permeabilities, fissuring, experimental and completed grouting works for dams in different geologic environments. This experience is significant and useful extension of prospectings for specific structures and a good basis for monitoring and maintenance of completed works, particularly in view of the long and costly construction of grout curtain as important safety components any dam. This work considers several types of rock masses: limestones, flysch deposits, volcanic rocks, and low metamorphic rocks, and summarizes investigation results and grout curtain information for some case examples.

Key words: fissuring, water permeability, WPP, groutability, fissure filling, heterogeneity, anisotropy, hydraulic inconsistency, filtration consistency, grout curtain.

INTRODUCTION

One of major problems of the dam and storage lake projects is the possible water loss under and beside the dam body and through the sides of the lake. The general engineering-geological and hydrogeological situation and permeability of rocks are primarily controlled by the regional and specific situation in the dam site. As the conditions of dam construction and storage lake formation are particularly important in this respect, and because must be satisfied often by voluminous grouting works, they should be given utmost consideration from the preliminary prospecting to the continuous observation of filtration upon the completion of the project.

Extremely complex conditions for artificial reservoirs are found in karst areas, where good study of the general area is inevitable for planning the grouting works. It is a simpler task where rock masses are fissured, but, still, all aspects of filtration under the dam must be investigated and the likely filtration reduced to a limit permissible for the safety of the structure and the cost of the water loss. In view of many uncertainties in this field,

* University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Đušina 7, Belgrade.

the analysis and generalisation of the practises have some weight in the search of parameters and engineering–geological criteria. The study of general provision of water–holding capacity is important for any prospective design and maintenance of existing structures.

GENERAL STATEMENTS

An assessment of the engineering–geological situation for safe impounding is based on the extent and distribution of permeability and groutability of rocks, with both parameters directly related to the rock mass fissuring and local geology. The permissible water permeability and the size of grout curtains also depend on some other parameters, including: general hydrogeology, type and height of dam, cost of stored water, etc.

More than forty high dams have been constructed in Serbia in various terrains of all the geologic units (Fig. 1, Tab. 1).

Each dam site is specific from the engineering–geological aspect, primarily in the local and regional geology, but there is certain general congruity of these characters in lithologically similar or almost similar environments. More specifically, certain engineering–geological characters are generally typical for some types of rocks, though each site also has local geological characteristics. This has been verified through an analysis of the water–holding properties in several different lithologic environments: limestones, flysch deposits, eruptive rocks, crystalline schists. This work is mainly concerned with the general properties of water permeability and groutability, illustrated by a case example of grouting works for each of the selected environments.

GENERAL ENGINEERING–GEOLOGICAL CONDITIONS OF WATER–HOLDING

Limestones. Several dams in this country are constructed on limestones or on dominantly limestone rocks (Tab. 1). Some of them are: Lazići–canyon, Vrutci, Kruševica, etc.

Limestones are specific in different modes of occurrence, variability in composition and fissuring, and in being affected by karstification in most cases. This, depending on the general hydrogeologic situation and intensity of the process, can offer complicated, or even very difficult, conditions for assurance of the water–holding capacity. If we, for a good reason, dwell on the examples of partly karstified areas, often referred to as fracture karst, where the process penetrated below the base level of surface erosion, certain regularity could be noted in the distribution, dimensions and extent of karst forms which are of great importance for the general provision of water–holding. Basically, this type of moderate karst is dissolution of rocks along the existing discontinuities, more advanced where rocks are mechanically heavily damaged. At the same time, entire units, blocks or fissured rocks, can remain fissured without signs of karstification.

These rock masses, in majority of cases, are broken into blocks, each bearing at least three systems of fissures, one at the surface and two, with minor local deviations, perpendicular to one another and to the bedding plane. There are also gravity fractures in abutment valley walls and typical fractures in the fault zones. These fractures are common ground water paths and consequently more affected by karstification.

Generally, there are two types of fissure fillings. Mineral, calcite may completely fill karst dm-size cavities or cover fissure walls with cryptocrystalline or floury crusts to well developed crystal forms. Often, several phases of fissure fillings are observed, a consequence of changes in the general trend of karstification controlled by geotectonic processes, climatic modifications, etc. Friable, prevailing clay fillings, a result of complete dissolution of rock, characteristic foremostly of subsurface ground, may be consolidated to different degrees, though generally are susceptible to decomposition and as such are a factor or hydraulic inconsistency of rocks. In some instances, broad fault zones can be completely sealed with well consolidated sedimentary clay fillings, older than the fillings in other rocks.

Congruous with the fissured rocks and the karstification intensity, the terrain is often heterogeneous in permeability, calling for a high level of investigation in its water loss capacity and for adequate steps in limiting it. There are two principal properties of the rock mass permeability: a wide range of WPP, from negligible to immeasurably high in karst areas, and hydraulic inconsistency from friable, unconsolidated fillings. Additionally, the modes of rock occurrences are diverse and control the geometry of fissures, frequency, wall roughness, openings, and other parameters of significance for the level and character of permeability. Conventional WPP, ground water regimen observation, efficiency of, grout curtains and observation of their behaviour are much heterogeneous in permeability and very difficult to overcome by conventional grouting. More specifically, the groutability of these rocks can be limited by extremely high WPP values, instability of fillings, and even by notable anisotropy of fissuring and permeability. Consequently, standard, uniform designs of unified grouting elements are hardly promising in efficiency even where the grout curtain dimensions are proportioned to its purpose.

One of terrains characteristic for the problems of sealing the rock mass is the Lazići-canyon dam site, in the Bajina Bašta power plant system. It is made up of the Senonian Gosau sedimentary facies: stratified to flaglike marly limestones interbedded with marlstone, stratified limestones, grey nodular bedded to thick-bedded limestones and thick limestones in gradual transitions. These rocks form the southwestern limb of a synform of Dinaric strike, shaped in a monocline at the dam site, intersected by diagonal and transverse faults (Fig. 2).

Marly limestones in the left abutment wall are parted by ss-planes and a number of diagonal fissures of dominantly mm-openings filled with friable material susceptible to washing out, karstified only at the surface. The permeability of these rocks to the depth of about seventy metres exceeds 10 lu, and is less than 3 lu at greater depths. The grouting rates at reference boreholes indicate that rocks of WPP up to 5 lu are barely groutable (rate about 35 kg/m) and those of less than 3 lu received up to 25 kg/m of grout.

Thick nodular limestones, in the left abutment wall, are quite regularly intersected by three systems of fissures up to 10 mm wide, rough-walled, showing signs of karstification above the water table, and filled with loose granular material. Rocks in shallow areas are more homogeneous, with permeabilities of 10 lu or higher, and deeper rocks of 3 lu or less. This type of limestones has low groutability for WPP to 5 lu, especially where fissures walls are very rough.

Thick and transitional to massive limestones in the right abutment wall, like preceding ones, are quite regularly divided into large blocks intersected by three systems of fis-

tures perpendicular to each other, one of which on ss planes (Fig. 2). Above the water table, karstification is slightly more intensive and fissures of all systems are deeply filled with loose material. Heterogeneity on WPP is notable, which is natural for the fractured rocks. Where up to 5 lu, these rocks are almost ungroutable. Grout loss in reference boreholes is always less than 20 kg/m.

The grouting works in the given situation were voluminous (Fig. 2). The total length of grouting holes, spaced 2 m or 2.5 m apart in three rows, was 28.780 m. The unit rate of grouting was moderate to negligent; it was less than 10 kg/m in a number of benches. The grouting rates were extremely high, from hundreds to over a thousand kg/m, in karstified rocks, and partly due to the unadjusted grouting regime. Other salient data for the grout curtains are given in Tab. 2.

Flysch deposits. These deposits are characterized by complete heterogeneity and anisotropy in all principal engineering-geological properties. Flysch deposits commonly form more or less regular succession of shale, siltstone, sandstone, marlstone and limestone sequences of the thickness varying from laminae to 1 m. Flysch terrains have been repeatedly folded and faulted, thus increasing in the geologic influence on the engineering-geological properties.

The fissuring of these rocks and the nature of fissures depend on the bed thickness, mechanical properties of lithologic units, developed system of fissures at bedding surfaces, one sequence may greatly vary in their frequency and other properties. Fissures which conform with folds, faults or fault zones are regular in occurrence and their character is greatly dependent on the local lithology and position. Principally, fissures in brittle, less deformed rocks are more open, and in mechanically ductile units are characterized by hydraulic inconsistency.

Permeability of flysch deposits is generally low, a few lu, excluding fault zones and notable structures; regionally, they are always aquifers. Besides low permeability, flysch deposits are hydraulically inconsistent, because either the filling is washed out in stronger units or fissures are open in the unit parts composed of shale and siltstone. The pressure of opening may vary from a few to over 0.5 Mpa, depending on local conditions and the rock position.

Even these rocks of low permeability must be grouted to reduce water losses and provide safety against filtration. The required volume of grouting may widely vary even at small distances. Greatest problems in grouting arise with the hydraulic opening of narrow fissures which swallow grout beyond the grouted space. Hence the frequent apparent contradiction that low permeability zones swallow more grout and vice versa, which only supports the statement on the necessary adjustment of grouting to the permeability and groutability of the given rocks.

Several dams, including Grošnica, Batlava, and Gazivode forming the largest storage reservoir, have been constructed in Serbia on flysch deposits dominantly of Upper Cretaceous age.

The Gazivode dam is constructed on flysch deposits composed of shale, marlstone and laminated, thick or rarely massive sandstones prevailing only in the central areas of the right abutment wall. Elsewhere in the dam site, shale and marlstones are dominating in sets of beds or alternating with sandstones. The terrain is represented by a compressed asymmetrical, antiformal faulted along the crestline, where the Ibar river incised its valley

(Fig. 3a and 3b). Rock masses in the dam site are dissected into blocks by faults and fault zones of Dinaric and diagonal trends. The blocks bear a system of fissures on bedding planes and two systems perpendicular and diagonal to bedding. The frequency, lengths and openings of fissures depend on the local lithology, i.e. bed thickness and mechanical properties of rock units. The fissures are more frequent in marlstones and shales, but are shorter and almost closed.

Permeabilities of 10 lu or more are prevailing in the dominantly sandstone right side, to a depth of about 40 m, with a decreasing trend to less than 2 lu with the increasing depth. In the left side, permeabilities over 10 lu prevail only in fault zones and sandstones. The WPP tests revealed hydraulic inconsistency as a result of fissure opening under the pressures of 0.2–0.4 MPa order, primarily in marlstones and shales. The groutability is variable within a wide range, from good, completely satisfactory, to causing hydraulic fissuring under high injection pressures and loss of grout beyond the grouted space, all due to the heterogeneity in fissure opening and this type of hydraulic inconsistency.

An one-row grout curtain was constructed 25–103 m deep with hole spacing of 2.5 m and additional ones at 1.6 m in the left lateral curtain (Fig. 3b). Most of the curtain was additionally strengthened by two more rows of inclined holes equally spaced. Excluding discrete isolated levels, the permeability was reduced to the designed 2 lu, as verified by the WPP test.

Volcanic rocks. A comparatively small number of dams was constructed on volcanic rocks, which is only reasonable in respect of their nature in Serbia. Where constructed, it is on slightly defomed young massifs, affected by erosion on the periphery. The genesis of volcanic rocks, such as staged intrusion or extrusion, mineral composition, and subsequent processes have controlled the specific fissuring and relative properties of rocks. The regularity of the joint pattern is not always notable on the dam–site scale, where tectonic processes, mainly were responsible for development of erosion and formation of river valleys. Hence the common irregularity indecreasing frequency and opening of fissures with the depth. Clay fillings, as products of country rock wathering, are always found on the surface wherefrom they have been washed out.

Depending on fissures, permeability may vary within wide limits, often increasing at depth. This heterogeneity in permeability in a way increases the difficulty of dimensioning grout curtains and requires a high level of investigation. On the other hand, these rocks may be considered groutable for WPP higher than 1 lu, or their permeability relatively simply reduced to this value.

One of impoundments in similar rocks is located in Kotlenik volcanic rock complex, in the Gruža river, where a arch–gravity dam was completed. The complex of rocks was formed between the Oligo–Miocene and the late Neogene, first andesite and dacite, then quartz latite and dacite, and finally Labrador andesite and trachytoids, paralleled with the formation of pyroclastics, breccias and tuffites. Central part of the dam site is made up of red to dark red andesites, broken at the surface into small blocks, and joint fissures with the clay–filled openings, and empty tectonic fractures in depth. Lateral, higher areas of the terrain are of less regularly fissured volcanic breccias of andesite and dacite fragments in a nonhomogeneous grussified cement. The river valley developed in a wide fault zone on mechanically completely damaged groundrock (Fig. 4).

Permeabilities vary from a few to a20 lu or more, exceeding 30 lu in the fault zone, which is not decreasing with the depth. Hydraulic inconsistency is notable only in shallow places owing to the presence of fissure fillings unstable to filtration.

The type of the dam required a grout curtain designed to reduce the uplift. Holes were drilled in one row to follow the curvature of the upstream inclined dam face, and had varied azimuth and dip angles. Hole spacing was 1.5 m in the fault zone to 2.5–4.5 m in the rest of the curtain. The curtain depth was considerable, to 55 m in the river bed, and its total surface area was 17.790 m². Compared with the designed volume, the curtain was strengthened with 20 more grout holes in the fault zone, arranged in additional upstream and downstream rows. Average grouting rate was 35 kg/m in reference boreholes, and ranged from a few to over 120 kg/m. Similarly high rate of 33 kg/m was recorded for injected grout, and was higher, 104 kg/m, only in the additional holes. Control WPP tests gave an average value of 0.97 lu, which verified the expected groutability of these rocks.

Schists. Particular consideration is given to low metamorphosed rocks, which are sufficiently permeable to need sealing by grouting, and have fissures, permeability and mechanical properties which increase the difficulty of accomplishing the improvement.

Terrains of this type of rocks are almost invariably complex in lithology and in textural–structural relations, a consequence of progressive metamorphism and structural shaping. Fissures are characterized by marked anisotropy and heterogeneity, frequency and narrow openings filled with weathering products. Schists are mostly low permeable rocks to 3 lu. More permeable are shallow rocks and deformation zones, which are characterized by hydraulic inconsistency from fissure opening, and only rarely by hydraulic fissuring along the latent discontinuities and removal of fillings. The latter property is enhanced by the lessened mechanical strength from intensive weathering even tens of metres deep.

Low permeabilities and fissure openings significantly limit the groutability. Standard grouts can hardly penetrate more than one metre deep; this and the threatening loss of grout provided by hydraulic inconsistency raise a doubt in the grouting continuity even where grout holes are closely spaced. In respect of fissuring and permeability, and small total water losses, it is superfluous in most cases to insist on the permissible permeability of less than 3 lu.

One of the dams constructed on this type of rock mass is Čelije dam across the Rasina river. The dam site is made up of Paleozoic mica schist, highly schistose, often finely pleated and distorted, bearing irregular quartz veins and lenses, locally passing into silicified schist or even quartzite. The mica schist mass also bears occurrences of concordant veins and lenses of amphibolite schist. Fissures in mica schist form several systems different in strike and widely varying in dips, partly filled with mica–high material. In silicified rocks, fissures are usually open, without friable fillings. Voluminous tests in test and reference boreholes of the grout curtain indicated the prevailing water permeability of less than 1 lu, only exceptionally over 10 lu, and its decreasing trend with the depth (Fig. 5).

An one–row grout curtain is constructed, relatively simple in contour following the surface line, 30 m deep. Holes are spaced 4 m apart, with additional ones at 2 m in the right abutment wall. Grouting has not reduced the WPP to the permitted 1 lu, especially in the first two benches from the surface. However, the total calculated water loss is less than 5 l/s, which hardly justifies the volume of the completed work. A peculiarity is the relatively high average grouting rate of 142 kg/m in the pilot field, and 173 kg/m in the

middle of the deep curtain. These rates are a likely consequence of permeability anisotropy and hydraulic inconsistency, i.e. of the grout loss beyond the useful space.

INSTEAD OF CONCLUSION

A study of the general engineering-geological situation for provision of water holding is based on the knowledge of fissure, water permeability and groutability properties, as resultants of the regional geology and its specific local character. In summarizing the above considerations, proceeding from the initial statement on typical expression of basic properties in some lithogenetic rock species, Table 2 gives principal parameters of grout curtains for the selected dams and rock species.

A comparative analysis of data indicates, inter alia, that grouting is relatively most voluminous in schists which manifest least permeability and most problematic groutability, controlled by the prevailing open fissures and specific hydraulic inconsistency. This raises the question of the selection of permissible permeability and adjustment of grouting elements to the groutability, giving them the importance of an unavoidable research task in routine investigations, and a prominent place in the engineering-geological studies of the general sealing grouting criteria.

ЛИТЕРАТУРА-REFERENCES

- Cvetković-Mrkić S., 1985. Izučavanje vodopropusnosti ispucalih sredina za potrebe projektovanja injekcionih zavesa.- Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 140 kucanih strana. Beograd (nepublikovano/unpublished)
- Cvetković-Mrkić S., 1991. Inženjerskogeološki uslovi projektovanja i izvođenja injekcionih zavesa za izgrađene brane u Srbiji - studija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 639 kucanih strana., (nepublikovano/unpublished).
- Dimitrijević M. 1992.: Geološka karta Srbije, 1:2000000.- Republički fond za geološka istraživanja, Geološki zavod - GEMINI. Beograd.