

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STAVEBNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

**ANNA
KUTNAROVÁ**

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta stavební
Katedra hydrotechniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Numerická analýza vlivu okrajových podmínek na
rozložení pórových tlaků pod tělesem hráze
VD Nechanice**

**Numerical analysis of the influence of boundary
conditions on the distribution of pore pressures under
the Nechanice dam body**

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

květen 2019

Anna KUTNAROVÁ



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kutnarová Jméno: Anna Osobní číslo: 460664

Zadávající katedra: k142 - katedra hydrotechniky

Studijní program: Stavební inženýrství - B3651

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Numerická analýza vlivu okrajových podmínek na rozložení pórových tlaků pod tělesem hráze VD Nechranice

Název bakalářské práce anglicky: Numerical analysis of the influence of boundary conditions on the distribution of pore pressures under the Nechranice dam body

Pokyny pro vypracování:

V rámci bakalářské práce sestavte numerický model a proveďte analýzu proudění podzemní vody pod tělesem hráze VD Nechranice metodou konečných prvků ve vybraných příčných řezech na základě poskytnutých měřených polohách hladiny podzemní vody. Úlohu řešte jako rovinou s využitím softwaru GEO 5 MKP. Proveďte analýzu vlivu změny hloubky nepropustného podloží na rozložení pórových tlaků pod tělesem hráze. Interpretujte získané výsledky a poznatky z modelování.

Seznam doporučené literatury:

Metoda konečných prvků v geomechanice, M.Šejnoha a kol., ISBN 978-80-01-05743-8

Přehrady, Broža, V., Kratochvíl, J., Peter, P., Votruba, L., 04-728-87, SNTL 1987

Hydraulika podzemní vody - skriptum, Valentová, J., 1998

HYDRUS Technical Manual, online

GEO 5 MKP Manuál, online

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 22. 2. 2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 27. 5. 2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

1.3.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....
Praha, 27.5.2019

.....
Anna Kutnarová

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala všem, kteří mi poskytli potřebné informace a odborné konzultace potřebné k sepsání této závěrečné práce.

V první řadě patří poděkování Ing. Miroslavu Broučkovi, Ph.D. za množství času, který mi věnoval při konzultacích a který obětoval řešení problémů s programem GEO5, které se v průběhu práce objevily. Stejně tak bych chtěla poděkovat kolegům z firmy Vodní díla – TBD a.s., kteří mi poskytli veškeré potřebné podklady o VD Nechanice a vždy si našli čas pro zodpovězení dotazů k těmto podkladům.

Poděkování také patří společnosti Fine, s.r.o. za poskytnutí programu GEO5, ve kterém probíhalo numerické modelování.

Nakonec bych také ráda poděkovala své rodině a blízkým za jejich podporu během celého studia, a hlavně za jejich trpělivost v posledních pár týdnech, kdy to se mnou určitě nebylo jednoduché vydržet.

Děkuji.

ANOTACE

Cílem této práce je pomocí numerického modelování provést analýzu vlivu okrajových podmínek na rozložení pórových tlaků pod tělesem hráze vodního díla Nechranice (dále jen VD Nechranice). Práce obsahuje 4 stručné řešeršní části. V prvních dvou je popisováno VD Nechranice, ve třetí jsou popsány základní rovnice proudění podzemní vody a ve čtvrté je stručně vysvětlena metoda konečných prvků.

Hlavní část popisuje postup provedené analýzy a prezentuje její výsledky. Numerická analýza byla provedena v programu GEO5 2019-MKP, který využívá metodu konečných prvků. V první řadě bylo třeba model kalibrovat, podle naměřených hodnot pórových tlaků. Po kalibraci bylo možné přistoupit k vlastnímu modelování průběhu pórových tlaků pod tělesem hráze VD Nechranice a analýze vlivu změny dolní okrajové podmínky na tyto průběhy. Závěr této analýzy ukazuje, že hranice, od které začíná mít další posun nepropustného podloží vliv na průběh pórových tlaků pod tělesem hráze je na kótě 194 m n. m.

Klíčová slova: VD Nechranice, pórový tlak, stacionární proudění, podzemní voda, metoda konečných prvků, numerické modelování

ABSTRACT

The objective of this thesis is to use numerical modelling to analyze the impact of borderline conditions on the distribution of pore-water pressure under the body of the Nechranice Dam (furthermore as ND). The thesis consists of 4 brief background research sections. First two of these describe ND in detail, the third one looks at basic underground water current equations and the fourth part briefly explains the principles of finite element method. The main part of this thesis describes the methods used for the analysis and then presents its results. GEO5 2019-MKP software was used for the numerical analysis using finite element method. Initial calibration of the model was conducted based on data obtained from pore water pressure measurements. With the model calibrated, the modelling of pore water pressure development under the body of the ND was done, as well as an analysis of the influence a change of lower boundary conditions would have on the pressure development. Based on the analysis the present thesis concludes that the influence of further movement of impervious foundation on the development of pore water pressure under the body of the dam starts at 194 mamsl.

Key words: Nechranice Dam, pore water pressure, stacionary flow, ground water, finite element method, numerical modelling

Obsah

1. ÚVOD.....	8
2. POPIS VODNÍHO DÍLA	9
2.1. Úvod.....	9
2.2. Povodí Ohře	10
2.3. Hráz.....	10
2.4. Nádrž.....	11
2.5. Úpravy v zátopě	11
2.6. Sdružený objekt	12
2.7. Bezpečnostní přeliv.....	12
2.8. Těsnicí clona	13
2.9. Štola a výtokový objekt	14
2.10. Geologický průzkum	15
2.11. Geologie podloží hráze.....	15
3. MĚŘENÍ TLAKŮ VODY	17
3.1. Hladina vody v podloží hráze a v podhrází - vztlaky	17
3.2. Pórové tlaky pod věžovým objektem.....	19
3.3. Pórové tlaky pod štolou	19
3.4. Pórové tlaky v těsnícím jádře.....	19
4. PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY.....	20
5. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	22
5.1. Postup při řešení obecného problému pomocí MKP	22
6. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ	23
6.1. Výběr profilu.....	23
6.2. Topologie modelu	23
6.3. Kalibrace modelu	25
6.4. Závislost výsledků na síti konečných prvků	27

6.5. Omezení dolní okrajové podmínky.....	27
7. ZÁVĚR.....	29
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A PODKLADŮ	30
9. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	31
9.1. Seznam obrázků.....	31
9.2. Seznam tabulek	31

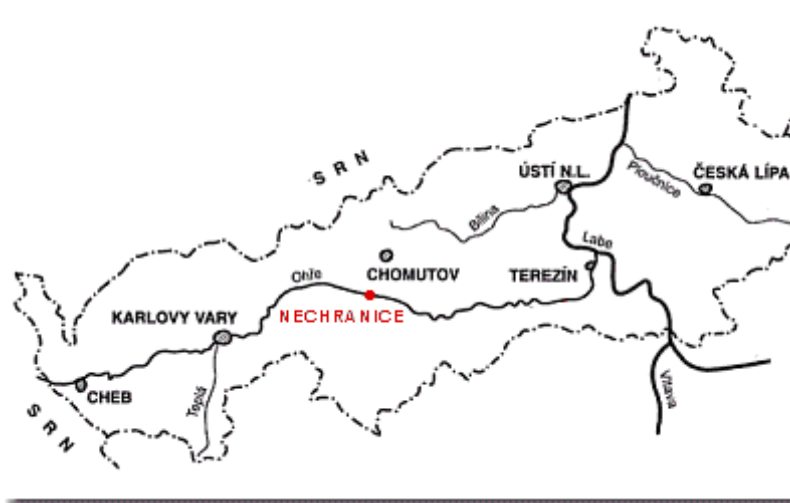
1. ÚVOD

Vzhledem k mé dlouholeté praxi ve firmě Vodní díla – TBD a.s. jsem měla určitou představu o tématu pro bakalářskou práci. VD Nechanice jsem si vybrala na základě konzultace s Ing. Richtrem a Ing. Švarcem z firmy Vodní díla – TBD a. s. Důvodem k výběru tohoto vodního díla byla složitost geologických podmínek pod tělesem hráze. Po následné konzultaci s Ing. Miroslavem Broučkem vznikl záměr zabývat se pórovými tlaky pod hrází VD Nechanice.

Cílem práce je analyzovat vliv změny hloubky nepropustného podloží na rozložení pórových tlaků pod tělesem hráze. Pro analýzu jsem využila numerického modelování pomocí metody konečných prvků ve 2D modelu v programu GEO5 – MKP.

2. POPIS VODNÍHO DÍLA

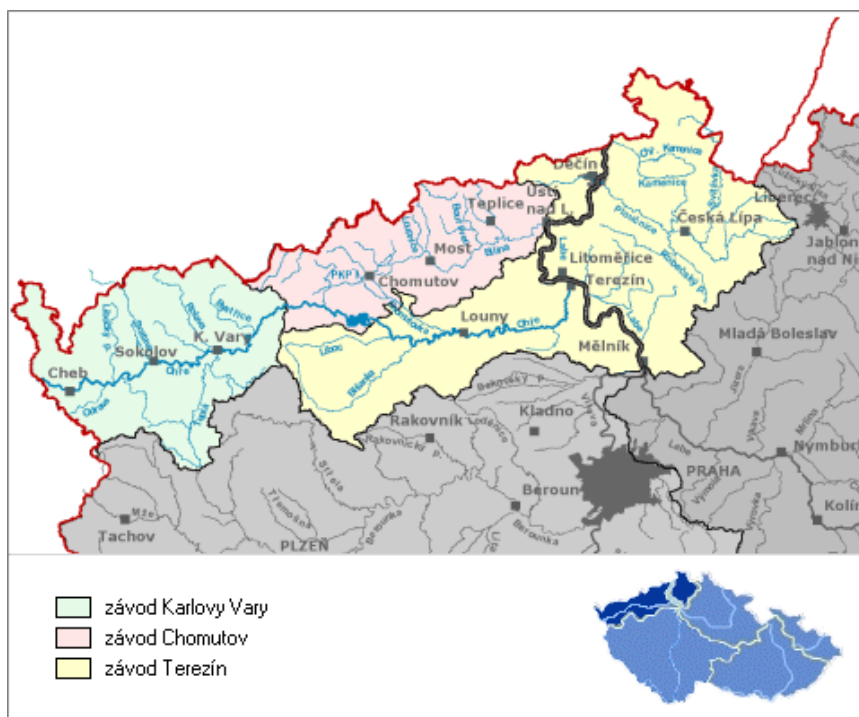
2.1. Úvod



Obrázek 1: Umístění VD Nechranice (2)

Nechranice jsou významná víceúčelová nádrž nacházející se v Ústeckém kraji 9 km jižně od Chomutova, 5 km východně od Kadaně a 10 km západně od Žatce. Leží přibližně v polovině řeky Ohře na ř. km 103,44 (Obrázek 1). Výstavba hráze byla zahájena v lednu roku 1961 a probíhala do prosince roku 1968. První napouštění začalo 5. října 1967. Trvale v provozu je vodní dílo od roku 1970. Pro získání potřebného objemu nádrže bylo nutno přehradní profil posunout do místa, kde Ohře přechází z úzkého údolí do široké pánve, která je až do hloubky 350 m vyplněna neskálními horninami obsahujícími uhelné sloje a vložky písků v jílovitých materiálech. Hráz byla tedy vystavěna v nejhorším místě z hlediska geologických podmínek, ale nejvýhodnějším z hlediska objemu vody ve vzniklé nádrži. (1)

2.2. Povodí Ohře



Obrázek 2: Mapa povodí Ohře (2)

Jak bylo již zmíněno, VD Nechanice je postaveno na řece Ohři. Povodí Ohře se dělí na tři správní celky: Chomutov, Karlovy Vary a Terežín. VD Nechanice patří pod závod Chomutov (Obrázek 2). Povodí Ohře má plochu 3590 km². Na povodí spadne za rok průměrně 727 mm srážek. Průměrná dlouhodobá roční hodnota průtoku v Ohři je 30,8 m³/s, průměrný 365denní průtok 4,6 m³/s a stoletý průtok 753 m³/s. (2)

2.3. Hráz

Vodní dílo je tvořeno přímou, jednou lomenou, sypanou, zemní hrází. Koruna hráze má kótu 274,50 m n. m., je široká 9 m široká a vede po ní místní komunikace. Svou délkou 3280 m je hráz nejdelší sypanou přehradní hrází ve střední Evropě. Na koruně hráze je mohutný vlnolam. Maximální výška hráze nad terénem je 47,5 m. Pro zajištění stability byly v místě původního údolí řeky Ohře na návodní i vzdušné patě nasypány mohutné zatěžovací lavice. Šířka přehradního tělesa v základové spáře dosahuje až 800 m. Celkový objem tělesa hráze je 9,5 mil. m³. Těleso hráze je nasypáno z 8,7 mil. m³ šterkopísků a 0,9 mil. m³ sprašových hlín. Celkový objem tělesa hráze je 9,5 mil. m³. Navržená je na stupeň stability 1,8.

Hráz je nehomogenní s šikmým zemním těsněním ze sprašových hlín. V horní části má těsnění tloušťku 1,8 m a směrem dolů tloušťka roste až na hodnotu 6,5 m. Do podloží je zavázáno pomocí jílocementové těsnící stěny. (1)

Návodní líc je ve sklonu 1:2,1 a přitížen zatěžovací lavicí se sklonem svahu 1:16. Návodní svah hráze je opevněn betonovými panely s dilatačními spárami vyplněnými pórobetonem. Toto opevnění bylo příčinou pozdějších poruch na návodním líci. Proto byl návodní líc v letech 1998-2004 opravován. Následně byla navržena nová opatření v provozním řádu vodního díla tak, aby bylo zamezeno opětovné poruše návodního líce.

Sklon svahů vzdušního líce jsou 1:1,75; 1:2 a 1:3. Zatěžovací lavice na vzdušné straně hráze je ve sklonu 1:20. Vzdušný líc je opevněn travním osevem. Krom toho je v horní části vysazen pás křovin, které by měly napomáhat stabilitě svahu v jeho nejstrmější části.

2.4. Nádrž

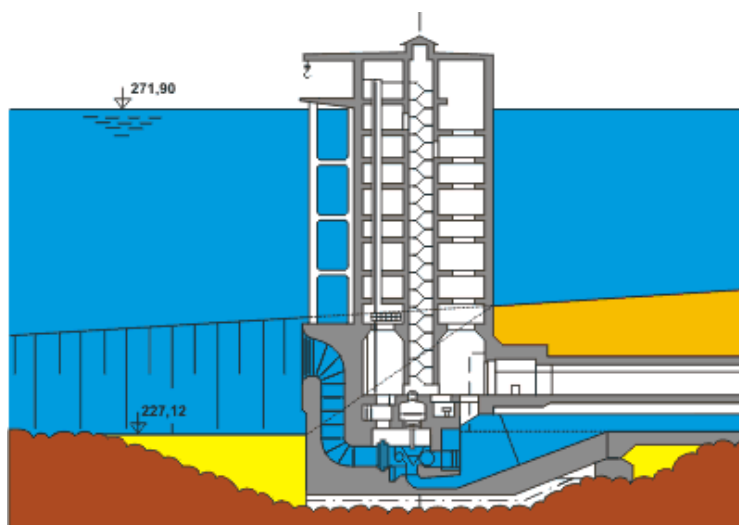
Nechranická nádrž má dno na kótě 227,00 m n. m., celkově pojme 287,632 mil. m³ vody při celkové zatopené ploše 1338 ha. Nádrž je po výšce rozdělena na 5 úrovní, mrtvý prostor o objemu 1,085 mil. m³ s hladinou 233,70 m n. m., prostor stálého nadržení o objemu 2,650 mil. m³ s hladinou 235,40 m n. m., zásobní prostor o objemu 233,215 mil. m³ s hladinou 269,00 m n. m., ovladatelný ochranný prostor o objemu 36,562 mil. m³ s hladinou 271,90 m n. m., a neovladatelný ochranný prostor o objemu 15,205 mil. m³ s hladinou 273,05 m n. m., což je zároveň kóta maximální hladiny vody v nádrži. Se svou rozlohou 1338 ha je VD Nechanice pátou největší přehradní nádrží ČR. (2)

2.5. Úpravy v zátopě

Zatopením území zmizelo 115 domků, 68 zemědělských stavení, 3 mlýny, 2 štoly, 1 dětský domov, 2 kostely a malá vodní elektrárna. Pozemky pod hladinou jezera měly převážně velmi kvalitní půdu. Zatopeno bylo 68 ha chmelnic, 24 ha lesa, 55 ha polí a luk. Zbytek území byly vodní, zastavěné a hospodářsky nevyužité plochy. Ornice byla před napuštěním sejmuta a odvezena na pozemky nad zátopou. Zachránilo se tak celkově 250 000 m³ kvalitní ornice. V zatopeném území se nacházela také řada kulturních památek. Ty byly přemístěny do areálu františkánského kláštera v Kadani.

V rámci úprav zátopy bylo třeba vyřešit problémy způsobené nepříznivým působením větru. Problémy zde působí značná výška vln, časté kolísání hladiny a nestabilní svahy zdrže. Tyto činitele způsobují značné deformace břehu. Pro účel zmírnění abrasivní činnosti a částečně i z architektonických důvodů byl kolem hráze vysázen pás smíšeného lesa a přilehlé plochy byly osety vhodnými travinami. (3)

2.6. Sdružený objekt



Obrázek 3: Sdružený objekt (2)

V pravé části v nejhlubším místě nádrže u návodní paty hráze stojí věžový sdružený objekt (Obrázek 3). Původně měl stát mimo těleso hráze, pro vyloučení nepříznivého vlivu na sedání objektu. Následkem rozšíření hráze byl objekt částečně zasypán. Je založen na 134 konsolidačních pískových pilotách. Ve spodní části tvaru kvádrů jsou uloženy dvě Kaplanovy turbíny s oběžnými koly o průměru 1460 mm a instalovaným výkonem 2 x 5 MW. Od roku 1997 prošel provoz a zařízení elektrárny postupnou rekonstrukcí. Mimo jiné byly rekonstruovány rozvodny, generátory, byl instalován výkonný řídicí systém a oběžná kola turbín byla nahrazena novými a účinnějšími. Nyní patří vodní elektrárna Nechranice k nejmodernějším provozům svého druhu u nás.

Hráz je vybavena dvěma spodními výpustěmi DN 1800 a kapacitou $2 \times 50,7 \text{ m}^3/\text{s}$. Ty jsou napojeny přímo na spirály turbín a vyústěny nad savkou do odtokové štol. (3)

2.7. Bezpečnostní přeliv

V levé části hráze je umístěn korunový železobetonový přelivný objekt (Obrázek 4). Původní bezpečnostní přeliv měl tři pole o 3×15 metrů hrazená hydrostatickými uzávěry na výšku 4 m. Celková kapacita při vyhrazení přelivu byla 680 m^3 . Vzhledem k nevhodnosti hydrostatických uzávěrů pro pohotovostní manipulace bylo rozhodnuto o úpravě přelivného objektu. V první fázi byl prostřední hydrostatický uzávěr vyměněn za zdvižný segment. Prostřední pole bylo kvůli tomu zúženo na 13 m a hradící výška prostředního pole je nyní téměř 8 m. Před přelivem byl také vybudován mohutný vlnolam kvůli ochraně přelivu před vysokými vlnami, které na nádrži Nechranice vznikají kvůli velikosti nádrže i otevřenému prostoru kolem ní. Vlnolam je tvořen nornou stěnou na železobetonových sloupech.

Kapacita přelivu se po této úpravě zvýšila na 1193 m³/s. Po dokončení rekonstrukce bude přeliv tvořen středním polem se segmentovým uzávěrem a dvěma krajními poli s klapkovými uzávěry.

Na přeliv navazuje 600 m dlouhý skluz. Ten má lichoběžníkový příčný profil, ve dně široký 26 m se sklony svahů 1:2. Skluz je částečně zapuštěn do terénu. Spád dosahuje maximální hodnoty ve střední části, kde dosahuje 12 %, v horní části je spád 1,5 % a v dolní 2,5 %. Ukončen je vývarem délky 110 m. (3)



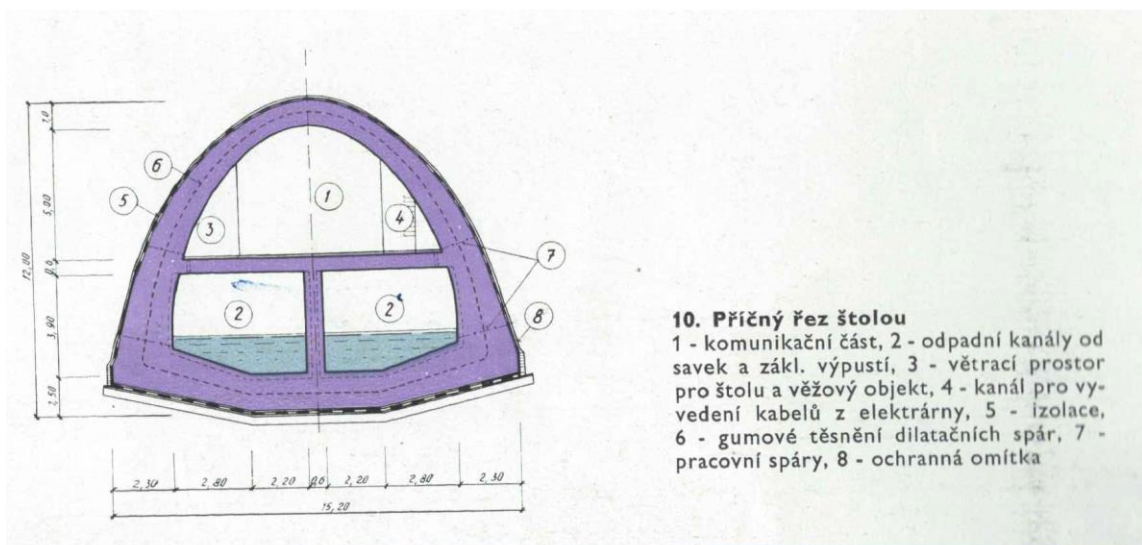
Obrázek 4: Bezpečnostní přeliv

2.8. Těsnící clona

Ve střední a pravé části je podloží hráze utěsněno jílocementovou clonou. Byla zřízena pro potřebu utěsnění propustných vrstev uhelné sloje a písčité vložky a napjatou vodou. Clona snižuje vztlaky pod hrází, zabraňuje případnému vyplavování jemných písků ve styku s uhelnou slojí a zabezpečuje nepropustnost podloží hráze v místě zavalených důlních chodeb. Rozsah clony je 14 600 m², maximální hloubka 31,2 m a tloušťka 65 cm. Jednotlivé díly clony se spojují převrtáváním. Hustý bentonitový výplach, používaný k pažení rýhy, má při hloubení objemovou váhu 1,09 – 1,11 t/m³. Jílocement používaný pro betonáž má složení: 150 kg cementu, 150 kg jílu, 1670 kg štěrkopísku a 250 l vody na m³ hotové směsi. (3)

2.9. Štola a výtokový objekt

Štola má na VD Nechanice dvojí funkci, čímž je dáno i její uspořádání a velikost. Má klenbový tvar parabolického oblouku a její profil je rozdělený do dvou etáží. Spodní etáž je ještě rozdělena svislou příčkou na dva samostatné kanály. Svrchní část se skládá z vozovky, od které je na každé straně příčkou oddělen kanál. V pravé části slouží tento oddělený prostor jako součást vzduchotechnického zařízení pro větrání štoly a věžového objektu. Levý kanál potom slouží k vyvedení silových a ovládacích kabelů elektrárny (Obrázek 5).



Obrázek 5: Příčný řez štolou (3)

V průběhu výstavby sloužila štola pro převedení vody přes staveniště. Zatímco spodní vstupní kanály slouží od dokončení stavby pro odpad vody od turbín a spodních výpustí, vrchní část je využívána pro komunikační spojení s věžovým objektem.

Celá štola je dlouhá 475 m a je rozdělena na 32 pásů po 15 m (s výjimkou vyrovnávacího pásu). Chodba je shora zatížena násypem hráze proměnlivé výšky. Štola byla navržena a provedena s proměnlivým převýšením. Jeho maximální hodnota je 52 cm. Díky tomu byl i po sednutí zachován alespoň minimální podélný spád štoly pro odvodnění. Z důvodu různého sedání chodby a věžového objektu bylo třeba zajistit plynulý přechod mezi objekty. To zajišťuje společný železobetonový blok právě v místě napojení obou konstrukcí. Dále bylo třeba zabránit stupňovitému poklesu jednotlivých pásů chodby. Tomu mají bránit pérové klouby z oceli Roxor 60 mm spojující jednotlivé pásy.

Na chodbu plynule navazuje vývar, který byl dimenzován na množství vody převáděné ve druhém stavebním období. Za vývarem už následuje upravené koryto řeky. (3)

2.10. Geologický průzkum

Geologickým průzkumem přehradního profilu byl pověřen n. p. Geologický průzkum Praha. Práce probíhaly od července roku 1959 až do konce roku 1960. Vyhodnocení průzkumu bylo posléze použito jako podklad pro zadávací projekt. Geologický průzkum potvrdil velice složité a obtížné základové poměry. V roce 1962 byl zahájen dodatečný geologický průzkum, který řídila zvláštní komise Ústředního úřadu geologického. V této komisi byli přední českoslovenští odborníci. Dodatečný geologický průzkum prokázal závažné geologické skutečnosti, které měly vliv na koncepci již rozestavěného díla. (3)

2.11. Geologie podloží hráze

Hráz vodního díla byla vystavěna na rozhraní chomutovské a pětipeské části Severočeské uhelné pánve. Ta vznikla v terciéru příkopovým prolomem pod Krušnými horami. „Podloží pánve se skládá z krystalických hornin. Výplň pánve tvoří nezpevněné nebo jen velmi slabě zpevněné sedimenty, synklinálně uložené na tufitických jílech, jež vyplňují dno pánve. Mocnost miocenních sedimentů dosahuje 350 m.“ (3) Tyto terciérní sedimenty jsou kryty říčními kvarténními terasami Ohře o mocnosti 2 – 10 m. Postupně zde vzniklo celkem pět terasovitých stupňů skládajících se z místy hrubých až balvanitých písčitých štěrků, které jsou v některých místech proloženy hrubými písky.

Zvláštností podloží hráze je výskyt uhelných slojí. Ty byly nalezeny celkem ve třech různých úrovních. Podloží je tímto rozděleno do několika úrovní. Nejvýše jsou horniny tzv. „nadložní série“, svrchní uhelné sloje a svrchní mezislojové pásmo. Obdobně vypadají vrstvy ve větší hloubce kolem střední a nejnižší uhelné sloje.

Ve svrchní nadložní sérii převládají šedé jíly a jílovce. Převážně se nacházejí na levém břehu, kde mají mocnost až několik desítek metrů, v místě původního koryta řeky jsou zcela erodovány a objevují se znovu až na pravém břehu, kde je zakrývají mocné sesuvy. Svrchní uhelná sloj má mocnost mezi 1,2 a 2 m, je velmi nepravidelná a silně rozpukaná. Stejně jako nadložní jíly je v místě koryta zcela erodována. Mocnost svrchního mezislojového pásma se pohybuje kolem 80 m, průzkumem bylo ale sledováno jen 25 – 35 m. V tomto pásmu se nachází písky, jíly, silty a uhelné jíly. Jejich vrstvy se ale střídají velmi nepravidelně. U písčitých složek byly identifikovány dvě hlavní pásma: spodní písčitý horizont (15 – 20 m pod slojí) a svrchní písčitý horizont (0 – 6 m pod slojí). V obou horizontech byla zjištěna artézská voda, ale nebyla mezi nimi prokázána žádná hydrologická souvislost, ta byla identifikována pouze mezi svrchním písčitým horizontem a uhelnou slojí. (3)

„Celé údolí Ohře je v rozsahu miocenní sedimentace postiženo sesuvnými pohyby. V oblasti přehradního profilu je patrna sesuvná činnost na svazích pravého nárazového břehu, kde hloubka smykové plochy dosahuje 10 – 15 m. Také na levém břehu jsou přímo pod tělesem staré uklidněné sesuvy. Nebezpečí obnovení sesuvné činnosti bylo potvrzeno tím, že během stavby došlo k několika místním sesuvům od zatížení nepatrnou deponií materiálu.

Při průzkumu pravého břehu byly nalezeny stopy po staré hornické činnosti. Prokázalo se, že jde o uhelný důl z roku 1880, který zasahuje do pravobřežní části hráze. Sondováním bylo zjištěno, že chodby jsou zavaleny a není nutno se obávat průlomů vody pod hrází; je však nutno počítat se zvýšenou propustností.“ (3)

Kvartérní pokryv	Obsahuje několik zvodnělých horizontů souvisejících se svrchní uhelnou slojí a svrchním písčitém horizontem. Nasycená hydraulická vodivost štěrkopísků je 5 – 20 m/den
Sesuvy	Nasycená hydraulická vodivost 5 – 20 m/den
Nadložní série	Hydrogeologicky negativní
Svrchní uhelná sloj	Nasycená hydraulická vodivost 18 – 55 m/den
Svrchní pískový horizont	Artéská voda s hladinou v úrovni vody v Ohři. Bude napájen vodou z nádrže.
Spodní pískový horizont	Artéská voda s hladinou až 3,5 m nad terénem. Nesouvisí přímo se svrchním pískovým horizontem, s uhlím, ani s kvartérním pokryvem. Existuje však souvislost nepřímá.

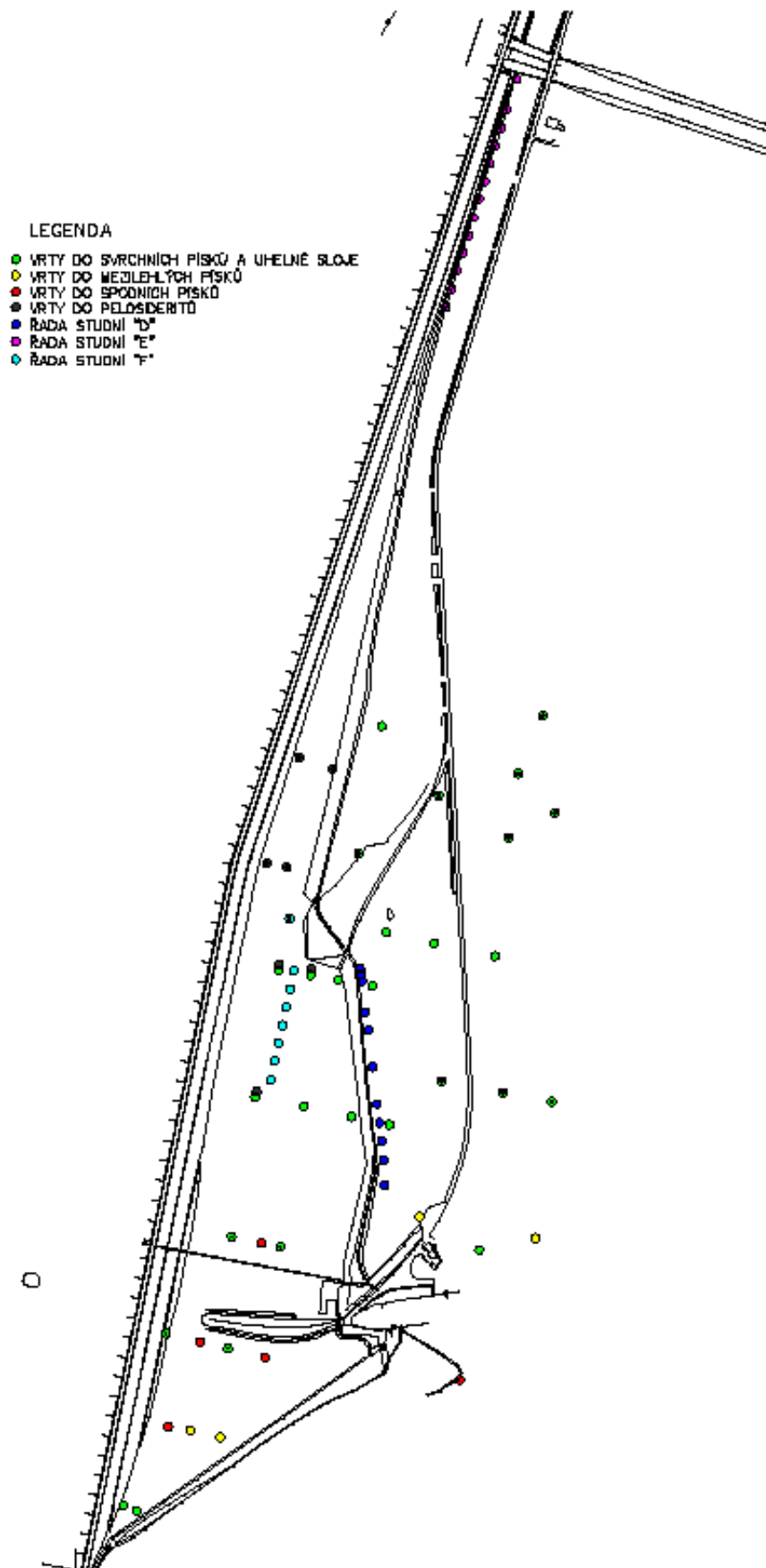
Tabulka 1: Hydrogeologická charakteristika jednotlivých vrstev (3)

3. MĚŘENÍ TLAKŮ VODY

3.1. Hladina vody v podloží hráze a v podhrází - vztlaky

Ke sledování hladiny podzemní vody pod hrázi jsou využívány piezometrické vrty. Ty jsou na hrázi VD Nechanice rozmístěny tak, aby pokud možno zachycovaly nejproblematictější oblasti podloží. V podloží hráze se nachází několik horizontů, obsahujících artézskou vodu. Proto jsou vrty vedeny do různých hloubek tak, aby postihly všechny tyto horizonty a bylo možné sledovat změny tlaků v těchto vrstvách. Prvním a zároveň nejmělkším případem je horizont podzemní vody ve svrchní uhelné sloji a ve svrchních pískách. O něco hlubší vrty pak vedou do horizontu mezilehlých písků, tedy mezi svrchní a spodní píský. Poslední skupinou jsou vrty zachycující horizont ve spodních pískách (Obrázek 6).

Přímo v projektu bylo navrženo deset piezometrických vrtů (I až X), v úvahu se bralo také šest vrtů vzniklých při hydrogeologickém průzkumu (1001 až 1006). Projekt počítal s dalšími patnácti piezometrickými vrty, které byly rozmístěny později podle potřeby. Hned na konci roku 1964 geologové doporučili zřízení dalších devíti vrtů do podloží hráze (XI až XIX). V době výstavby (1963/4 až 1967) bylo tedy pravidelně měřeno 25 piezometrických vrtů, z toho bylo do svrchních písků a uhelné sloje 14, do mezilehlých písků 4 a do spodních písků 6 vrtů. Během výstavby se objevilo několik povodňových stavů, během kterých se samovolně vzdula hladina v nádrži. Při těchto situacích měření v piezometrech potvrdilo, že uhelná sloj se svrchními píský tvoří jediný vodonosný horizont napájený přímo vodou z nádrže. Tuto skutečnost bylo třeba vyřešit ještě před napuštěním nádrže. Bylo třeba snížit vztlaky a plošně rozšířit jejich kontrolu v uhelné sloji. Byla tedy realizována řada studní „D“, pomocí které se uhelnou sloj podařilo odvodnit. Společně s tím byla rozšířena síť piezometrů na levém břehu o deset vrtů (XXI až XXX) seřazených do tří profilů a zasahujících do svrchních písků a uhelné sloje. Při realizaci jednoho z těchto vrtů byla objevena vrstva pelosideritů a hladina v tomto vrtu vystoupala až 7 m nad tehdejší hladinu vody v nádrži. Do úrovně této vrstvy byly vystrojeny ještě dva z deseti nově budovaných vrtů. Mimo to byl objednan další dodatečný geologický průzkum. Vznikly tedy další čtyři kontrolní vrty postihující oblast pelosideritů. Na základě průzkumu byly vyhloubeny dvě řady studní „E“ (14 studní) a „F“ (8 studní), které také zasahují v případě „E“ studní do pelosideritů I. pásma a „F“ studní do pelosideritů II. pásma. I tyto řady studní slouží jako kontrolní vrty. (4)



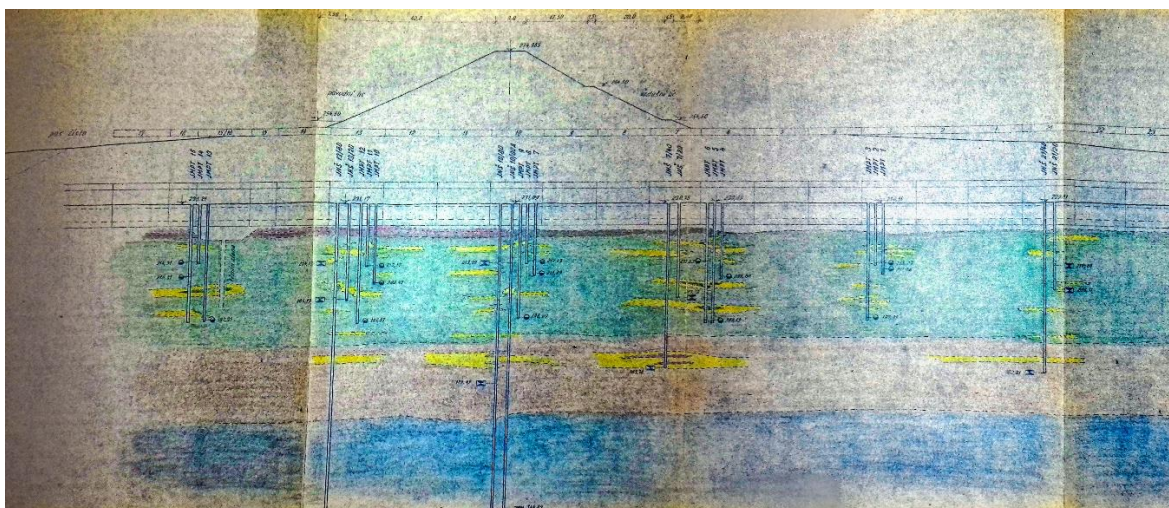
Obrázek 6: Rozmístění vrtů na vzdušném líci

3.2. Pórové tlaky pod věžovým objektem

Celkem pět snímačů pórových tlaků bylo v roce 1963 instalováno do podloží věžového objektu. Čtyři z těchto snímačů jsou umístěny v jílech asi 3,5 m pod základovou spárou věžového objektu a jeden je uložen ve zvodnělých píscích v hloubce cca 9 m. Vrtý mají průměr 152 mm a jsou uloženy v 50 mm vrstvě odvzdušněného písku. Na výšku jílu jsou těsněny bentonitovými kuličkami a ve zbytku jsou zasypány pískem. (4)

3.3. Pórové tlaky pod štolou

Ve štolě jsou pod pasy číslo 15/16, 13, 10, 6 a 3 jsou osazeny vždy trojice snímačů pórových tlaků (Obrázek 7). Celkem je tedy ve štolě osazeno patnáct snímačů, které měří v hloubkách cca 10, 15 a 20 m pod základovou spárou v mezislojových jílech. Vrtý pod chodbou mají průměr 140 mm, znovu uloženy do cca 1 m vrstvy odvzdušněného písku. Utěsněny jsou 1 až 2 m zátkou z colcreeťové malty a cementobentonitovou zálivkou na zbylou výšku vrtu. Stejným způsobem jsou umístěny ještě tři samostatné vrtý pod pasy číslo 5, 12 a 22. (4)



Obrázek 7: Piezometrické vrtý a hloubkové nivelační značky pod odpadní chodbou

3.4. Pórové tlaky v těsnícím jádře

Pórové tlaky v těsnícím jádře jsou měřeny v jednom profilu umístěném nad štolou. V této části je osazeno celkem 18 snímačů pórových tlaků rozdělených do tří etáží na kótách 239,30 m n. m., 249,50 m n. m. a 260 m n. m. Snímače byly osazovány během sypání hráze ve vodou nasyceném pískovém obalu do vykopaných kapes ve ztuhnutém těsnění. (4)

4. PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

Proudění podzemní vody můžeme rozdělit na ustálené a neustálené, kde ustálené, nebo také stacionární, proudění je časově nezávislé, zatímco neustálené, nebo také nestacionární či tranzientní proudění počítá se změnami v čase. Neustálené proudění se ještě dělí podle typu skeletu. Pokud se skelet v čase deformuje, zvyšuje tak pórové tlaky v tělese, mluvíme o úloze konsolidace. Ve skutečnosti neexistuje porézní skelet, který by byl nekonečně tuhý, ale v mnoha případech se dá jeho deformace zanedbat, aniž by to způsobilo významnější nepřesnosti. To je i případ numerického modelování v této práci.

Základní rovnicí proudění podzemní vody je rovnice kontinuity. Změna objemu vody v oblasti za určitý čas se musí rovnat rozdílu mezi vtokem do této oblasti a výtokem z této oblasti za daný čas. To lze vyjádřit jako:

$$Z^{in} + Z^{out} = - \int_P n^T (nS\rho^w v^w) dP \Delta t$$

$$Z^{in} + Z^{out} = Z$$

Kde Z^{in} je vtok do oblasti, bude tedy kladný, Z^{out} je výtok z oblasti a bude záporný. Z je potom celková změna objemu vody v oblasti. Pórovitost je n , stupeň nasycení S , vektor rychlosti proudící vody v pórech je v^w , ρ^w představuje hustotu vody a P řešenou plochu. Rychlost proudění vody je tedy uvažována jako hustota toku $q = v = nS\rho^w v^w$ (m/s).

Pomocí Greenovy věty a uvedených rovnic se s dalšími úpravami tvaru rovnice a za předpokladu konstantní hustoty vody ρ^w a pórovitosti n dostaneme k rovnici:

$$n \frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}[nSv^w] = m$$

Kde m je veličina představující vnitřní zdroj v jednotkách (s^{-1}).

Pro ustálené proudění je rovnice zjednodušena na tvar:

$$\text{div}[nSv^w] = m$$

Konstitutivní rovnice v případě proudění reprezentuje Darcyho zákon, který vyjadřuje vztah mezi hustotou toku $q = nSv^w$ a gradientem pórového tlaku, či celkové výšky. Pro výpočet v prostředí nasycených i částečně nasycených zemin je třeba upravovat koeficient hydraulické vodivosti K_{sat} plně nasycené zeminy relativním součinitelem K_r .

$$nSv^w = -K_r K_{sat} \nabla h$$

$$nSv^w = -\frac{K_r}{\gamma_w} K_{sat} (\nabla p - \gamma_w i_g)$$

Kde i_g je jednotkový vektor ve směru tíhového zrychlení.

Program GEO5 MKP umožňuje předpisy funkce K_r neboli modely součinitele relativní permeability zavést jako van Genuchtenův, Gardnerův a Log-lineární model.

Předpis funkce van Genuchtenova modelu:

$$K_r(h_p) = \frac{\{1 - (\alpha|h_p|)^{n-1}[1 + (\alpha|h_p|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (-\alpha h_p)^n]^{m/2}}$$

Kde α , n a m jsou regresní parametry modelu.

Předpis funkce pro Gardnerův model:

$$K_r(h_p) = e^{ah_p} = 10^{ah_p \log e}$$

Předpis funkce pro Log-lineární model

$$K_r(h_p) = 10^{\frac{(h_p - h_p^{min}) \log R}{h_{TZ}}}$$

Kde R je parametr, který volíme jako dostatečně velké číslo např. 1000. Parametr $h_p^{min} \leq 0$ dodává modelu určitou flexibilitu pro popis součinitele permeability v blízkosti saturace. Parametr h_{TZ} charakterizuje přechodovou oblast pro částečně nasycenou zeminu v intervalu $S_r < S < 1$.

Log-lineární a Gardnerův model jsou si ekvivalentní. Gardnerův model, na rozdíl od van Genuchtenova závisí pouze na jednom parametru a lze ho tak dobře využít pro řešení úlohy ustáleného proudění spojené s hledáním polohy podzemní vody. (5)

5. METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (dále jen MKP), v anglickém jazyce Finite Element Method (FEM) se do praxe nejvíce rozšířila s vývojem numerických metod počítačových modelů. Výhoda MKP spočívá v možnosti jednoznačně simulovat jakoukoli stránku řešeného problému. Při dobré znalosti principů numerického modelování může být MKP spolehlivým nástrojem pro řešení úloh, na které už je zjednodušený analytický postup krátký. Stále však nesmíme zapomínat na skutečnost, že se jedná o pouhou aproximaci skutečnosti a to bez ohledu na složitost numerického modelu.

Hlavním principem MKP je vytvoření tzv. „sítě konečných prvků“. Ta rozděluje řešenou oblast na jednoduché geometrické tvary, nazývané prvky. Díky tomuto principu lze pomocí MKP vyřešit geometricky nebo jinak velmi složité konstrukce. Výpočet pak probíhá tak, že se neznámá veličina určuje jen v určitých bodech prvku tzv. uzlech. Mezi uzly je pak hodnota veličiny aproximována z vypočtených hodnot v uzlech. Pro tyto účely se používají různé stupně aproximačních funkcí, například lineární funkce, polynom druhého stupně a jim podobné. Tyto funkce často neodpovídají matematické funkci popisující veličinu. Z toho potom vznikají nepřesnosti výsledků. Další nepřesnosti mohou souviset se zadávanými vstupními parametry, které nemusí být vždy přesně známé. (5)

5.1. Postup při řešení obecného problému pomocí MKP

1. Zadání geometrie zkoumané oblasti.
2. Zadání vlastností a parametrů materiálů.
3. Přiřazení materiálů k jednotlivým oblastem.
4. Generování sítě konečných prvků. Většina programů generuje síť automaticky, ale pokud je třeba síť v některých místech zhustit, lze toho dosáhnout ručním zhuštěním.
5. Zadání okrajových podmínek. Podmínky většinou přisuzujeme určité linii, program je pak sám přisoudí jednotlivým uzlům.
6. Převedení jednotlivých prvků do jednotné globální soustavy souřadnic a sestavení soustavy lineárních (případně linearizovaných) rovnic na základě počtu stupňů volnosti.
7. Řešení soustavy rovnic a získání aproximace chování spojitě oblasti.
8. Grafické zobrazení vypočtených hodnot. Výhodou MKP je přehlednost výsledků výpočtů a v závislosti na použitém programu i přehledné grafické zpracování. (5)

6. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

6.1. Výběr profilu

Pro numerické modelování byl vybrán příčný řez přehradou v místě odpadní chodby, tedy zároveň v nejširším místě hráze. Tento profil byl zvolen hlavně proto, že v odpadní chodbě je největší množství pravidelně odečítaných snímačů pórových tlaků, což přispělo k přesnější kalibraci modelu.

6.2. Topologie modelu

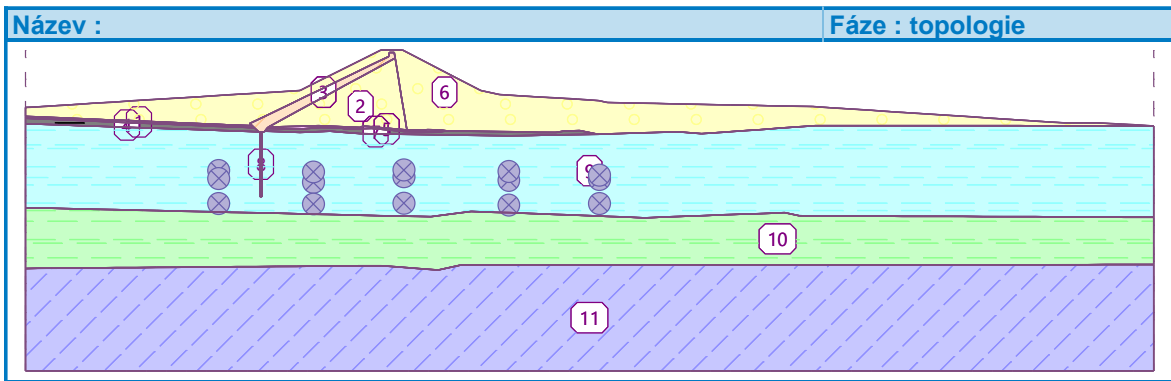
Pro účely modelování byl zadán profil hráze složený ze dvou materiálů. Materiálem těsnícího jádra jsou sprašové hlíny, materiálem násypu hráze jsou šterkopísky. V podloží hráze byly zadány 5 materiálů: jíly, uhelná sloj, jílovce, siltovce a jílovcové siltovce, jezerní jílovce a střední slojové vrstvy (uhelné sloje a uhelné jílovce). Jednotlivé materiály byly zadávány podle parametrů známých z geologického průzkumu. (Tabulka 2) Stejně tak byly zadány součinitele nasycené hydraulické vodivosti. Počáteční číslo pórovitosti bylo pro každý materiál určeno podle tabulek, stejně tak i parametry van Genuchtenova modelu, který byly pro numerické modelování v této práci využíván (Tabulka 3).

Materiál	zrnitost (%)			Vlhkost (%)			Třída	Konzistence
	f	s	g	w	w _l	w _p		
Sprašové hlíny	70	15	15	25	55	20	F8	tuhá
Šterkopísky	5	5	90				G2	ulehlá
Jíly	90	10	0	26	64	33	F7	pevná
Uhelná sloj	-	-	-				F4	tuhá
Jílovce, siltovce a jílovité siltovce	85	15	0	20	57	32	F7	pevná
Jezerní jílovce	62	38	0	23	55	20	F4	tuhá
Střední slojové vrstvy	-	-	-				F4	tuhá

Tabulka 2: Zatřídění zemin

Materiál	k _{x,sat}	k _{z,sat}	e ₀	α	n
	m/den	m/den	-	1/m	-
Sprašové hlíny	2,50E-06	2,50E-06	1,17	1,68	1,073
Šterkopísky	5,00E-01	5,00E-01	0,58	4,3	1,521
Jíly	6,10E-05	6,10E-05	1,17	0,15	1,17
Uhelná sloj	3,72E+01	3,72E+01	1,17	4,3	1,521
Jílovce, siltovce a jílovité siltovce	6,10E-06	6,10E-06	1,17	1,4	2,84
Jezerní jílovce	6,10E-06	6,10E-06	1,17	1,68	1,073
Střední slojové vrstvy	6,10E-05	6,10E-05	1,17	4,3	1,521

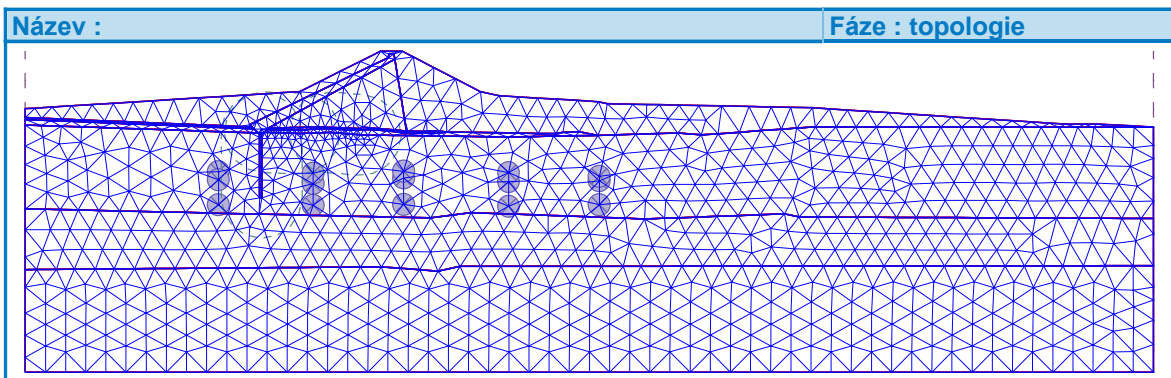
Tabulka 3: Parametry zemin



Obrázek 8: Geometrie modelu

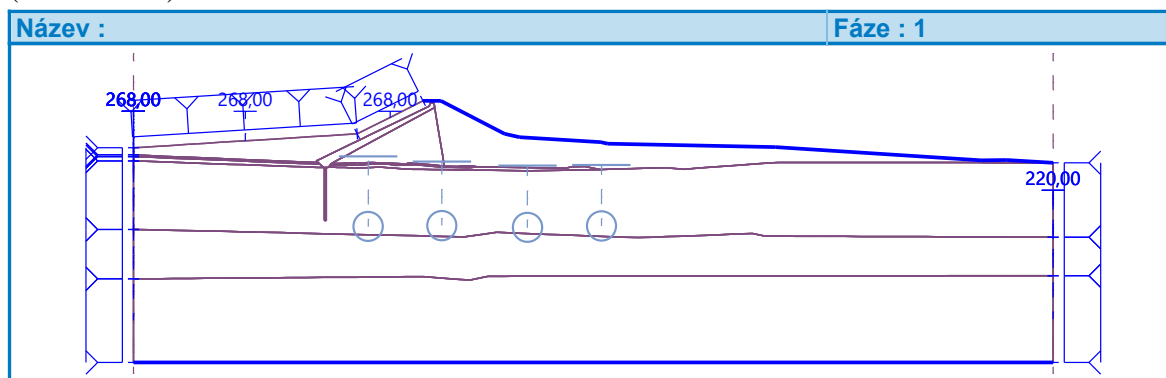
Materiály pak byly přiřazeny jednotlivým oblastem profilu následovně. Oblasti 2 a 6 tvoří násyp hráze, přisouzeným materiálem jsou tedy štěrkopísky, oblast 3 jsou sprašové hlíny, oblast 1 a 5 jíly (tvoří tenkou vrstvu pod návodní částí hráze), pod nimi jsou oblasti 4 a 7, kterým náleží materiál uhelná sloj, oblast 8 je jílocementová těsnící clona zadaná v programu jako tzv. tuhý prvek, oblasti 9 byly přisouzeny jílovce, siltovce a jílovité siltovce, oblasti 10 jezerní jílovce a oblasti 11 střední slojové vrstvy (Obrázek 8).

Po zadání geometrie profilu a přiřazení jednotlivých materiálů byla vygenerována síť trojúhelníkových prvků o délce hrany 10 m, se zhuštěním na 2m v oblasti těsnící clony a jílové a uhelné vrstvy vpravo od ní (Obrázek 9).



Obrázek 9: Síť konečných prvků

Linie proudění byly pak stanoveny následovně. Nepropustná hranice na povrchu koruny hráze a na celém vzdušném líci, pórový tlak zadán pomocí souřadnice HPV 268 m n. m. na návodním svahu a na svislé linii na návodní straně. Na svislé linii na vzdušné straně byl určen pórový tlak pomocí souřadnice HPV. Spodní linie modelu byla určena jako nepropustná (Obrázek 10).



Obrázek 10: Linie proudění

6.3. Kalibrace modelu

Pro kalibraci modelu byl vybrán stav při hladině v nádrži na kótě 268 m n. m. Této hladině odpovídají hodnoty naměřených hladin v piezometrických vrtech pod odpadní chodbou z Tabulka 4.

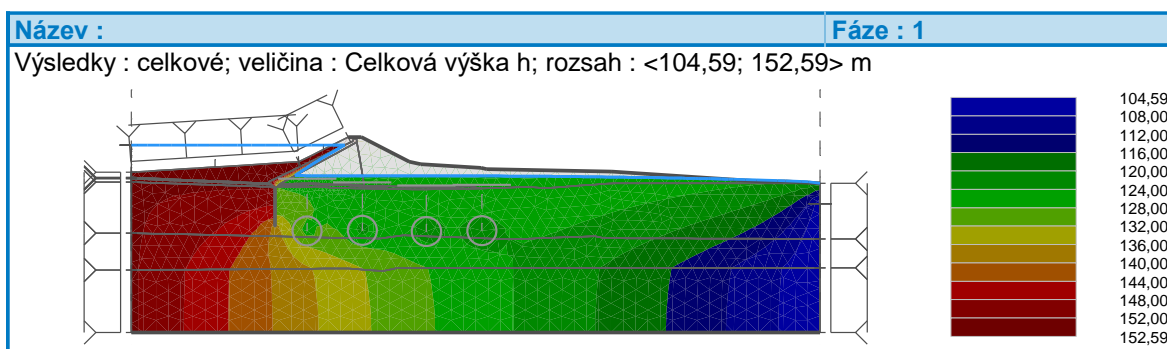
Číslo vrtu	Hloubka čidla	Výška hladiny
1	211,38	234,50
2	213,23	232,23
3	197,93	235,50
4	209,38	238,24
5	197,13	235,13
6	213,83	234,38
7	211,09	237,20
8	214,49	236,79
9	198,09	237,59
10	203,42	248,42
11	213,57	242,07
12	197,67	240,67
13	197,91	241,21
14	214,31	255,11
15	210,31	254,71

Tabulka 4: Tabulka měřených hodnot v piezometrických vrtech pod odpadní chodbou

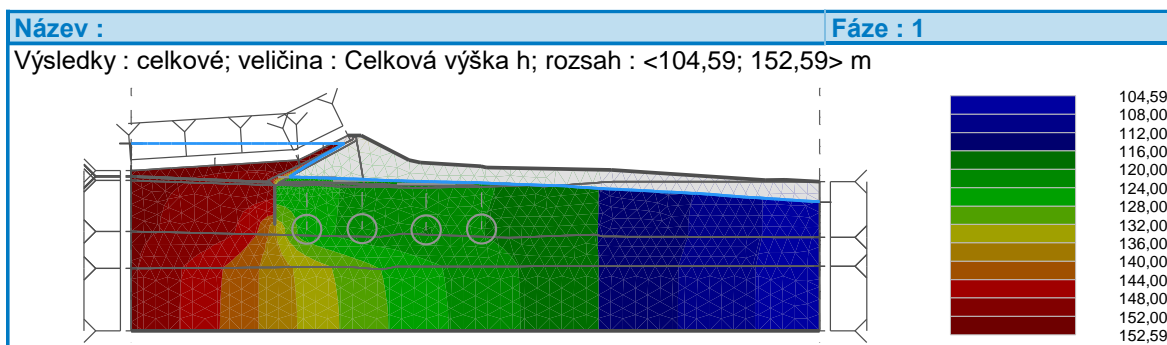
Tyto vrty jsou pod chodbou umístěny vždy po třech (viz. Pórové tlaky pod stolou). Pro účely kalibrace modelu bylo třeba z každé trojice vrtů vybrat pouze jeden. Já jsem se rozhodla pro využití nejhlubších vrtů, to znamená vrty číslo 3, 5, 9 a 12. Vrt číslo 13 nebyl pro kalibraci

modelu použit, protože je umístěn před těsnící clonou, kde již byla zadána podmínka s výškou hladiny vody.

Do modelu byly nejprve zadány vlastnosti materiálů vyplývající z laboratorních testů prováděných v rámci geologického průzkumu. Pro tyto hodnoty byl vypočten průběh celkových výšek h , které ale zdaleka neodpovídaly naměřeným hodnotám v piezometrických vrtech (Obrázek 11). Proto bylo přistoupeno k postupnému upravování součinitelů nasycené hydraulické vodivosti tak, aby se výsledek co nejvíce přiblížil skutečnosti (Obrázek 12).



Obrázek 11: Celková výška h před kalibrací



Obrázek 12: Celková výška h po kalibraci

Pokud porovnáme hodnoty nasycené hydraulické vodivosti před kalibrací a po kalibraci (Tabulka 5) zjistíme, že největší změny se týkaly štěrkopísků, jílu, uhelné sloje a vrstvy jílovců, siltovců a jílovitých siltovců. Tento rozdíl může vyplývat z rozdílných podmínek laboratorních testů oproti skutečným podmínkám v tělese hráze a pod ním. V případě vrstvy jílovců, siltovců a jílovitých siltovců mohou hrát roli také čočkovité vložky písků, které se v této vrstvě nachází. Pro účely této práce nebyly tyto písčité oblasti zadávány, ale počítalo se s homogenizací této vrstvy, tedy i s tím, že při kalibraci dojde v této vrstvě k největším změnám nasycené hydraulické vodivosti.

Materiál	Laboratorní hodnoty		Kalibrované hodnoty	
	$k_{x,sat}$	$k_{z,sat}$	$k_{x,sat}$	$k_{z,sat}$
	m/den	m/den	m/den	m/den
Sprašové hlíny	2,50E-06	2,50E-06	6,10E-06	6,10E-06
Štěrkopísky	5,00E-01	5,00E-01	3,00E-02	3,00E-02
Jíly	6,10E-05	6,10E-05	5,50E-03	5,50E-03
Uhelná sloj	3,72E+01	3,72E+01	3,00E-01	3,00E-01
Jílovce, siltovce a jílovité siltovce	6,10E-06	6,10E-06	8,00E-03	8,00E-03
Jezerní jílovce	6,10E-06	6,10E-06	6,10E-06	6,10E-06
Střední slojové vrstvy	6,10E-05	6,10E-05	6,10E-05	6,10E-05

Tabulka 5: Součinitele nasycené hydraulické vodivosti před a po kalibraci modelu

6.4. Závislost výsledků na síti konečných prvků

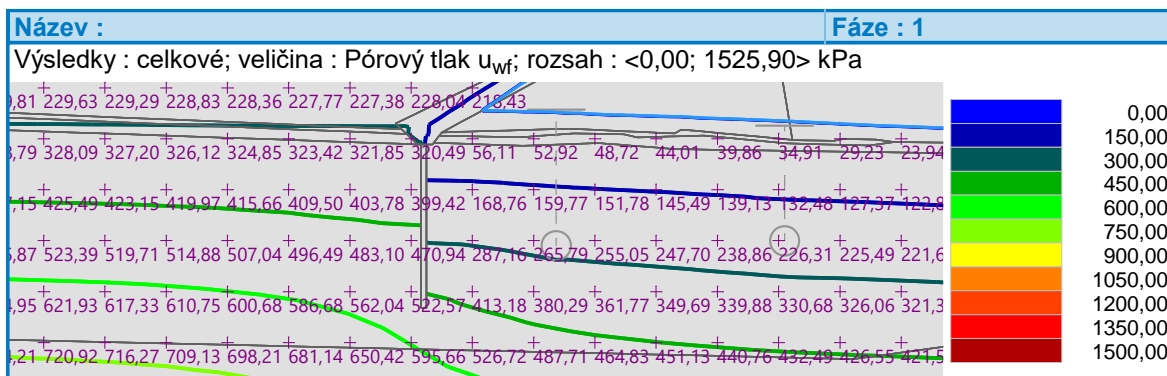
Jedním z faktorů, který může ovlivnit výsledek výpočtu, je i podrobnost sítě konečných prvků. Proto je třeba ověřit, jak velký vliv na výsledky tento faktor má. Protože pro kalibraci byla použita síť s délkou strany prvku 10 m, pro zjištění závislosti byl výpočet proveden se sítí prvků o délce strany 2 metry a 20 metrů. Ani v jednom z těchto případů nebylo pozorováno výrazné ovlivnění výsledků. Šlo spíše o kosmetické rozdíly. Čím podrobnější je síť prvků, tím podrobnější jsou i výsledky a tím pádem dostáváme hladší průběhy v grafických znázorněních výsledků.

6.5. Omezení dolní okrajové podmínky ¹

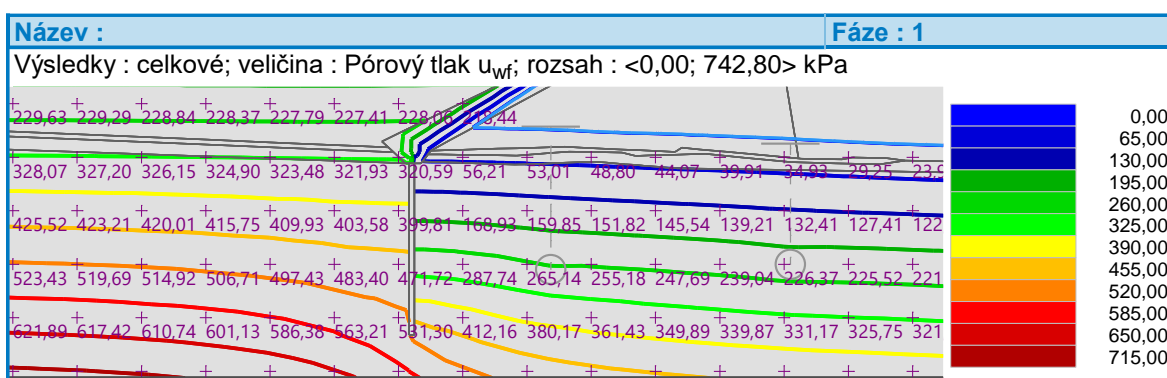
Hlavním cílem této práce bylo zjistit, jaký vliv bude mít změna hloubky nepropustného podloží na rozložení pórových tlaků. Základní předpoklad je, že postupným zmenšováním hloubky nepropustného podloží by se měla zvyšovat účinnost těsnící slony. Pórové tlaky za těsnící clonou by se tedy měly snižovat, zatímco před těsnící clonou by měly být vyšší.

Pro tuto analýzu bylo třeba měnit v topologii modelu rozsah rozhraní. Postupně se tedy omezoval rozsah modelu, dokud nedošlo ke změnám hodnot u výsledných pórových tlaků. Jako základ byla spodní okrajová podmínka určena na kótě 115 m n. m (Obrázek 13). Posouvání nepropustného podloží v rámci střední slojové vrstvy se jen velmi mírně projevilo na pórových tlacích ve vrstvě jezerních jílovců. Ani posun do vrstvy jezerních jílovců nezpůsobil žádné výrazné změny. Ale když byla určena hloubka nepropustného podloží přibližně do úrovně horního rozhraní jezerních jílovců, projevila se již změna v průběhu pórových tlaků pod hrází (Obrázek 14). Každý další posun nepropustného podloží směrem

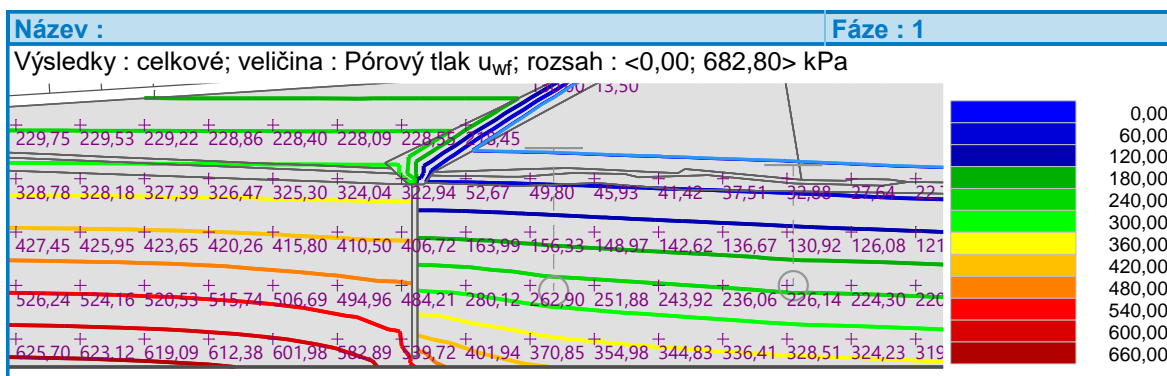
¹nahoru znamenal snížení pórových tlaků pod tělesem hráze za těsnící clonou. Naopak tlaky před těsnící stěnou postupně narůstaly (Obrázek 15).



Obrázek 13: Pórové tlaky při hloubce nepropustného podloží na kótě 115 m n. m.



Obrázek 14: Pórové tlaky při hloubce nepropustného podloží na kótě 194 m n. m.



Obrázek 15: Pórové tlaky při hloubce nepropustného podloží na kótě 200 m n. m.

¹ Dolní okrajová podmínka – spodní horizontální hranice modelu

7. ZÁVĚR

V rámci práce úspěšně proběhla numerická analýza proudění podzemní vody pod hrází VD Nechranice v programu GEO5 2019 – MKP. Byl namodelován průběh hladiny podzemní vody a porovnán s hodnotami naměřenými v piezometrických stanicích. Model byl následně podle naměřených hodnot kalibrován. Při kalibraci vznikl velký rozdíl mezi součiniteli nasycené hydraulické vodivosti u vrstvy jílovců, siltovců a jílovitých siltovců. To by mohlo naznačovat určitou provázanost písčiny čoček, které se v této vrstvě nachází. Je to ovšem jen teoretická domněnka, pro jejíž potvrzení by bylo třeba podrobnějšího zkoumání.

Po kalibraci bylo přistoupeno ke změnám v dolní okrajové podmínce modelu. Při postupném posouvání polohy nepropustného podloží směrem vzhůru byly sledovány změny v průběhu pórových tlaků. Vliv změny okrajové podmínky se poprvé výrazněji promítl do výsledných pórových tlaků při zadání nepropustného podloží na kótu 194 m n. m. Tato kóta odpovídá cca hloubce, ve které se nachází hranice mezi vrstvou jílovců, siltovců a jílovitých siltovců a vrstvou jezerních jílovců.

Od této kóty platí, čím výše se posouvala hranice nepropustného podloží, tím více se zvětšovaly pórové tlaky před těsnicí clonou a naopak snižovaly pod tělesem hráze za ní. Tyto výsledky se shodují s předpokladem, že čím je těsnicí clona blíže nepropustnému podloží, tím je její účinnost větší.

Mezi přínosy této práce by se dalo zařadit například zdokonalení programu GEO5 2019 – MKP. Na základě problémů, které se vyskytly při modelování, byly odstraněny drobné chyby v programu a vše bylo vyřešeno aktualizací softwaru.

V práci byl několikrát zmíněn problém s písčnými horizonty a čočkovitými vložkami v některých vrstvách podloží hráze. To je problém, který by stál za podrobnější zkoumání a je to určitá možnost jak na tuto práci v budoucnu navázat.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A PODKLADŮ

1. *Povodí Ohře, Přehrady*. Povodí Ohře, s.p. Chomutov : Tiskárna AKORD Chomutov, 2010.
2. VD Nechanice. *Povodí Ohře, s.p.* [Online] WEBHOUSE, 6. únor 2019. [Citace: 20. duben 2019.] <https://www.poh.cz/vodni-dilo-nechanice/d-2598/p1=2708>.
3. GROSMAN, Michal a Josef LEJSEK. *Vodní dílo Nechanice ve výstavbě*. Praha : Ředitelství vodohospodářského rozvoje, 1965.
4. Praha, Ředitelství vodních toků. *Souhrnná zpráva o pozorování a měření 1962-1970*. Praha : autor neznámý, 1970. Sv. 16.
5. ŠEJNOHA, Michal, Jan PRUŠKA, Tomáš JANDA a Miroslav BROUČEK. *Metoda konečných prvků v geomechanice, teoretické základy a inženýrské aplikace*. Praha : České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05743-8.

9. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1. Seznam obrázků

Obrázek 1: Umístění VD Nechranice (2)	9
Obrázek 2: Mapa povodí Ohře (2)	10
Obrázek 3: Sdružený objekt (2)	12
Obrázek 4: Bezpečnostní přeliv	13
Obrázek 5: Příčný řez štolou (3)	14
Obrázek 6: Rozmístění vrtů na vzdušném líci	18
Obrázek 7: Piezometrické vrty a hloubkové nivelační značky pod odpadní chodbou	19
Obrázek 8: Geometrie modelu	24
Obrázek 9: Síť konečných prvků	24
Obrázek 10: Linie proudění	25
Obrázek 11: Celková výška h před kalibrací	26
Obrázek 12: Celková výška h po kalibraci	26
Obrázek 13: Pórové tlaky při hloubce nepropustného podloží na kótě 115 m n. m.	28
Obrázek 14: Pórové tlaky při hloubce nepropustného podloží na kótě 194 m n. m.	28
Obrázek 15: Pórové tlaky při hloubce nepropustného podloží na kótě 200 m n. m.	28

9.2. Seznam tabulek

Tabulka 1: Hydrogeologická charakteristika jednotlivých vrstev (3)	16
Tabulka 2: Zatřídění zemin	23
Tabulka 3: Parametry zemin	23
Tabulka 4: Tabulka měřených hodnot v piezometrických vrtech pod odpadní chodbou	25
Tabulka 5: Součinitele nasycené hydraulické vodivosti před a po kalibraci modelu	27