

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta stavební**

**Katedra hydrotechniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2017**

**Jan ŠTÍCHA**

## **SEZNAM ČÁSTÍ**

Titulní strana – 1 x A4

Zadání bakalářské práce – 1 x A4

Prohlášení – 1 x A4

Poděkování – 1 x A4

Abstrakt a klíčová slova – 2 x A4

Bakalářská práce – 46 x A4

Příloha – dokument programu GEO5 2017-MKP – 17 x A4

CD s nahranou kompletní předkládanou prací

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta stavební**

**Katedra hydrotechniky**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Numerická analýza vlhkostního režimu těsnicího jádra**

**VD Dalešice**

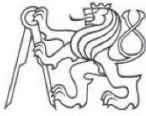
**Numerical analysis of moisture regime in clay core of**

**Dalešice dam**

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

**květen 2017**

**Jan ŠTÍCHA**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

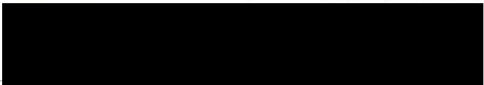

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE



Příjmení: Štícha	Jméno: Jan	Osobní číslo: 412664
Zadávající katedra: K142 - Katedra hydrotechniky		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby		

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Numerická analýza vlhkostního režimu těsnicího jádra VD Dalešice	
Název bakalářské práce anglicky: Numerical Analysis of Moisture Regime in Clay Core of Dalesice Dam	
Pokyny pro vypracování: Seznámení se s problematikou numerického modelování transportu vlhkosti v nenasycených podmínkách, rešerše problematiky vlhkostních podmínek v těsnicích jádrech sypaných hrází, numerická analýza vybraného stavu na VD Dalešice, interpretace numerických výsledků	
Seznam doporučené literatury: Metoda konečných prvků v geomechanice, M.Šejnoha a kol., ISBN 978-80-01-05743-8 Přehrad, Broža, V., Kratochvíl, J., Peter, P., Votruba, L., 04-728-87, SNTL 1987 Hydraulika podzemní vody - skriptum, Valentová, J., 1998 HYDRUS Technical Manual, online	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Miroslav Brouček	
Datum zadání bakalářské práce: 21.2.2017	Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017
 Podpis vedoucího práce	Údaj uveďte v souřadnicích  jeho ak. roku 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“.*

 Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
--	---

**Prohlášení:**

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

.....  
[Redacted Signature]

Praha, 27.5.2017

.....  
[Redacted Signature]

Jan Štícha

## **Poděkování:**

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kterým patří moje vděčnost za poskytnuté odborné konzultace, za poskytnutí informací, podkladů či programů, které umožnily sepsání předkládané práce, či za podporu během přípravy závěrečné práce.

V první řadě patří moje poděkování Ing. Miroslavu Broučkovi, Ph.D. za trpělivé a shovívavé vedení mé práce, za mnoho času, který mi věnoval při konzultacích, jakož i za nesmírně důležitou pomoc, kterou mi poskytl při řešení potíží s programem, ve kterém probíhalo samotné numerické modelování. Taktéž děkuji za milé přijetí, prohlídku přímo na přehradě a zaslání dat hráznému Josefu Suchánkovi. Děkuji Ing. Jiřímu Petrovi a Ing. Vítu Rainerovi za zaslání doplňujících dat, o která jsem žádal, a za odpovědi na moje otázky k poskytnutým materiálům.

Moje poděkování také náleží všem společnostem, které mi poskytly studentskou licenci ke svému softwaru, jmenovitě bych rád poděkoval firmě Fine, s.r.o. za poskytnutí programu GEO5, který umožnil naplnit zadání bakalářské práce.

Nemůžu na tomto místě vynechat i krátké poděkování celé Fakultě stavební a lidem, kteří mě po celou dobu mého studia vzdělávali, a mají tedy zásluhu na tom, že jsem se dostal až k psaní závěrečné práce.

Nakonec, ale ne v poslední řadě, bych rád poděkoval svým rodičům a celé rodině za neochvějnou podporu jak během celého studia, tak v době přípravy předkládané práce, kdy byla tolik důležitá. Nemohu nezmínit ani své přátele, kterým patří dík nejen za povzbuzující slova.

Děkuji!

## **ABSTRAKT A KLÍČOVÁ SLOVA**

Cílem této práce je pomocí numerického modelování zkoumat vlhkostní poměry těsnicího jádra VD Dalešice. Práce předkládá 4 stručné rešeršní části. V prvních dvou je řešeno samotné VD Dalešice a obecně problematika vysychání těsnicích jader, v dalších dvou částech jsou popsány základní rovnice proudění podzemní vody a metoda konečných prvků.

Stěžejní kapitola popisuje postup provedeného numerického modelování a prezentuje jeho výsledky. Numerická analýza byla provedena v programu GEO5 2017-MKP, který užívá metodu konečných prvků. Po přibližné kalibraci modelu bylo přistoupeno k modelování scénáře dlouhodobého významného poklesu hladiny. Byl sledován vývoj objemové vlhkosti, respektive sání materiálu těsnicího jádra. Analýza vlhkostních poměrů těsnicího jádra je jednou z nutných součástí posouzení možnosti vzniku trhlin od vysychání. Prezentován je závěr, že vlhkostní poměry těsnicího jádra VD Dalešice jsou v rozsahu potenciálního vzniku trhlin od vysychání.

Klíčová slova: VD Dalešice, saturace těsnicího jádra, trhliny od vysychání, tranzientní proudění, podzemní voda, metoda konečných prvků, numerické modelování, vlhkost, materiálové modely, Gardner, van Genuchten, nenasycená zóna.

## **ABSTRACT AND KEY WORDS**

The objective of this thesis is to examine the moisture regim in sealing core of Dalešice dam through numerical modeling. The thesis includes 4 brief research chapters. In the first two, Dalešice dam itself is described and the general problem of desiccation of the sealing core, in the remaining two chapters, basic equations of groundwater flow and the finite element method are described.

The crucial chapter describes the conduct of numerical modeling done, and presents the results. The numerical analysis has been conducted in GEO5 2017-MKP, which uses the finite element method. After the rough calibration, the modeling of the scenario of long-term significant decrease of water level was proceeded. The development in volumetric moisture, or negative pore pressure of the material of sealing core respectively, was

observed. Analysis of moisture ratios of sealing core is one of the necessary components of assessment of the possibility of desiccation cracking initiation. The presented conclusion is that moisture ratios of sealing core at Dalešice dam are within the range of potential desiccation cracking initiation.

Key words: Dalešice dam, saturation of sealing core, desiccation cracking, transient flow, groundwater, finite element method, numerical modeling, moisture, material models, Gardner, van Genuchten, unsaturated zone.



## **OBSAH:**

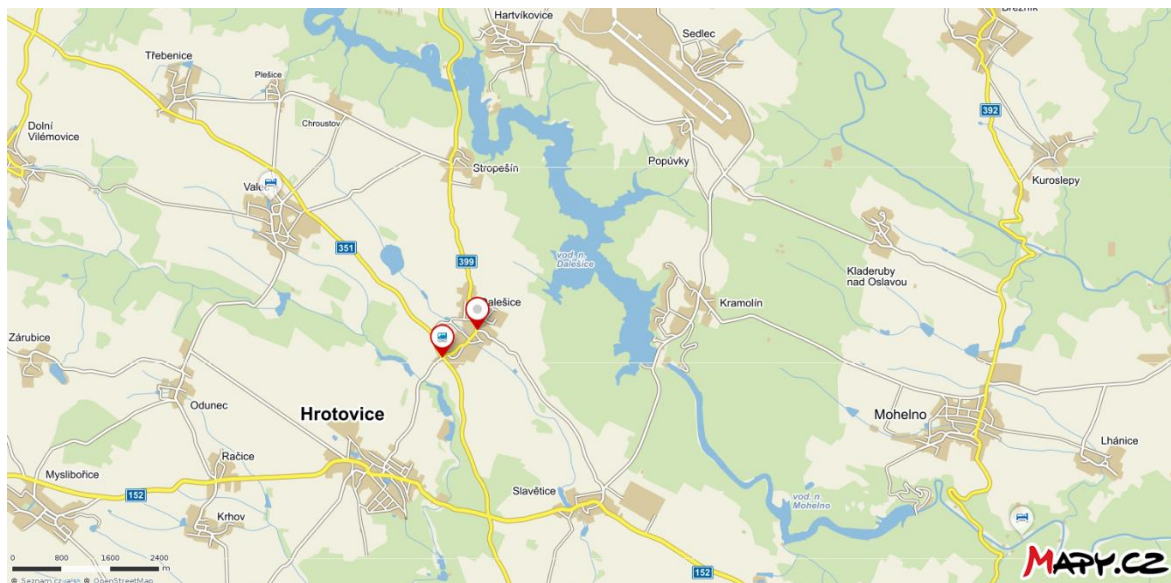
1. VODNÍ DÍLO DALEŠICE .....	3
1.1 Zájmová lokalita .....	3
1.2 Účel VD Dalešice .....	3
1.3 Přehradní těleso .....	4
1.4 Výpustné objekty .....	6
1.5 Nádrž .....	9
1.6 Hydrologické údaje .....	9
1.7 Výstavba .....	10
1.8 Kontrolní a měřící zařízení .....	11
2. VYSYCHÁNÍ TĚSNICÍCH JADER .....	12
3. SOUHRNNÝ POPIS PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY .....	17
4. STRUČNĚ O METODĚ KONEČNÝCH PRVKŮ .....	19
4.1 Jednotlivé kroky MKP při řešení obecného problému .....	19
5. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VLHKOSTNÍCH POMĚRŮ TĚSNICÍHO JÁDRA ..	21
5.1 Topologie modelu .....	21
5.2 Materiálové modely .....	23
5.2.1 Určení parametrů pro van Genuchtenův model .....	25
5.2.2 Určení parametrů pro Gardnerův model .....	28
5.3 Kalibrace modelu .....	29
5.3.1 Kalibrace na základě průsaků .....	30
5.3.2 Porovnání skutečných hodnot pórového tlaku s výsledky modelu .....	35
5.4 Model dlouhodobého poklesu hladiny .....	39
6. ZÁVĚR .....	42
7. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH PODKLADŮ .....	43
8. SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK .....	45

8.1 Obrázky .....	45
8.2 Tabulky.....	46
8.3 Grafy.....	46

# 1. VODNÍ DÍLO DALEŠICE

## 1.1 Zájmová lokalita

Vodní dílo Dalešice (dále jen VD Dalešice) se nachází v České republice, v okrese Třebíč kraje Vysočina. Dílo spadá do povodí Moravy, do oblasti závodu Dyje a leží na řece Jihlavě. Vodní nádrž Dalešice je doplněna vyrovnávací nádrží Mohelno. Horní vodní nádrž Dalešice (ř.km 65,944, katastrální území Slavětice) [1] [2] leží severněji a její přehradní těleso (hlavní hráz) je nejbližší obci Kramolín, dolní vyrovnávací vodní nádrž Mohelno (ř.km 58,940, katastrální území Mohelno) [3] [2] má přehradní těleso umístěné poblíž stejnojmenné obce. Vlastníkem i provozovatelem VD je ČEZ, a.s., správce vodního toku Jihlava je Povodí Moravy, s.p. a technickobezpečnostní dohled provádí společnost VODNÍ DÍLA – TBD a.s. Další text se věnuje nádrži a hrázi VD Dalešice.



Obrázek 1: Zájmová lokalita [4]

## 1.2 Účel VD Dalešice

VD Dalešice je víceúčelovým vodním dílem.

Má energetický účel – součástí díla je přečerpávací vodní elektrárna Dalešice, ale také průtočná vodní elektrárna Mohelno. Elektrickou energii tedy nejen vyrábí, ale jako jiné přečerpávací vodní elektrárny vyrovnává diagram denního zatížení a vytváří rezervu pro případ poruch jiných zdrojů elektrické energie.

VD Dalešice plní řadu vodohospodářských účelů – zajišťuje vodu pro jadernou elektrárnu Dukovany (voda se odebírá z nádrže Mohelno), zásobuje lokální průmysl a zemědělství

vodou, zlepšuje hygienické poměry toku. Krom toho také přispívá svým retenčním prostorem k ochraně území před povodněmi (ochranný prostor nesmí být využíván k ničemu jinému než k protipovodňové ochraně) a zároveň vytváří prostor pro různé rekreační a rybářské využití. Nalepšovací účel spočívá především v nalepšování průtoku pro potřeby průtočné vodní elektrárny (umístěna v přehradním tělese nádrže Mohelno).

Prioritně jsou funkce seřazeny takto:

1. Zajištění minimálních průtoků pod VD
2. Zajištění vody pro odběry JE Dukovany
3. Výroba špičkové energie
4. Další funkce [2]

### **1.3 Přehradní těleso**

Vzdouvacím objektem nádrže Dalešice je heterogenní sypaná hráz. Stabilizační část je tvořena kamenitou sypaninou. Návodní i vzdušný svah je doplněn lavicemi. Sklon návodního svahu se pohybuje od 1:2 od nejnižší lavice po dno nádrže po sklon 1:1,5. Ve zkoumané části hráze nad vtokovým betonovým objektem je sklon návodního svahu 1:1,7 v dolní části a 1:1,6 pod korunou hráze. Vzdušný svah je vyhotoven s dvěma lavicemi se sklonem 1:1,4 ve dvou horních úsecích a 1:1,5 ve spodním. Těsnění je střední, skloněné ve sklonu 1:0,4 ve směru návodního líce. Tvoří ho sprašové hlíny. Těsnění je po obou stranách doplněno přechodovou částí z hlinitopísčitých šterků. Mezi částmi jsou vloženy úzké vrstvy filtrů frakcí 0-4 mm a 8-63 mm [2]. Celková kubatura hráze činí 1,95 mil. m<sup>3</sup> [5].

Hráz je v koruně dlouhá 300 m a široká 8 m. Největší šíře hráze v základové spáře je 300 m s výškou 88 m nad dnem nádrže a 100 m nad základovou sparou [2].

Koruna hráze je vybavena silniční komunikací. Pod vozovkou jsou umístěny technické sítě. V kontextu práce je důležité, že koruna hráze byla v roce 2016 rekonstruována z důvodu sedání hráze.



*Obrázek 2: Rekonstruovaná koruna hráze (foto autor 10.4.2017)*

Za 40 let provozu koruna hráze klesla v důsledku sedání asi o 40 cm, a to se projevilo prohlubněmi na vozovce, ve kterých se držela voda. Nová vozovka je důsledně vypsádována k jímkám dešťové vody.

V důsledku sedání popraskalo instalované odvodňovací potrubí a těsnicí jádro bylo tedy do rekonstrukce přirozeně zavlažováno srážkami. V rámci rekonstrukce bylo položeno nové odvodňovací potrubí, které již plní svojí funkci. Právě kvůli možnosti vysychání těsnicího jádra ale bylo položeno i potrubí zavlažovací. [6] [7] Při přípravě rekonstrukce byla provedena v roce 2013 práce Elektrárna Dalešice – Studie opravy koruny hráze, která obsahuje přílohu Těsnicí jádro – posouzení vlivu poklesu hladiny a výsledky laboratorních zkoušek [8]. Tato příloha byla zdrojem některých důležitých dat pro tuto práci (podrobněji v kapitole 5).

Pod těsněním je vybudována injekční a revizní betonová chodba.



*Obrázek 3: Injekční chodba (foto autor 10.4.2017)*

#### **1.4 Výpustné objekty**

Hráz disponuje následujícími nezávislými výpustnými objekty: bezpečnostním přelivem, přivaděči na PVE a spodními výpustěmi.

Dvě spodní výpusti sloužily i k převádění vody během výstavby. Vtok je umístěn v pilířích mostu vedoucímu k vtokovému objektu do PVE (každá má svůj vtok v jiném pilíři).



*Obrázek 4: Most k vtokovému objektu na PVE (foto autor 10.4.2017)*

Obě výpusti jsou obtokové štoly (vedeny u pravého břehu) s DN 4000 mm. Jsou vybaveny řadou uzávěrů – skříňovými stavidlovými na vzdušné i návodní straně, provozními v pilířích a česlemi a hradidlovou tabulí u začátku obtokové štoly. Ovládání uzávěrů je hydraulické. Maximální kapacita každé z výpustí je  $66 \text{ m}^3/\text{s}$ , dohromady tedy  $132 \text{ m}^3/\text{s}$  [2].

Bezpečnostní přeliv je boční, u pravého břehu. Tvoří ho dvě přelivná pole se zdvižnými segmentovými uzávěry, každé s délkou 11,5 m. Hrana přelivu je na kótě 377,95 m n.m., maximální přepadová výška je 3,55 m. Celková kapacita přelivu je  $310 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pohon zvedání segmentů je elektrický, s možností nouzového připojení elektrocentrály a nouzového ručního zvednutí [2].



*Obrázek 5: Segmentové uzávěry bezpečnostního přelivu (foto autor 10.4.2017)*

Voda přepadá do betonového spadiště s maximálním podélným sklonem 5 % a šířkou 12,57 m, které je napojeno na skluz o šířce 10 m. Skluz je dlouhý 319,5 m. Jeho podélný sklon je proměnný, maximální 23 % [2]. Skluz je zakončen vývarem o hloubce 3 m.



*Obrázek 6: Spadiště (foto autor 10.4.2017)*



*Obrázek 7: Skluz (foto autor 10.4.2017)*



Důležitou součástí objektu hráze je přečerpávací vodní elektrárna. Tvoří ji čtyři reverzní Francisovy turbíny typu FR 25 se čtyřmi přivaděči o DN 6 200 mm. Hltnost turbín je  $4 \times 132\text{--}150 \text{ m}^3/\text{s}$  [1], při volnoběžných otáčkách je potom průtok každou turbínou  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , tedy  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  celkově [2]. Výkon každé turbíny byl do opravy 112,5 MW. Po generální opravě, která byla dokončena roku 2007, dosahuje výkon každé turbíny 120 MW [5].

## 1.5 Nádrž

Celkový objem nádrže je 126,9 mil.  $\text{m}^3$  při maximální hladině na kótě  $M_{\max} = 381,5 \text{ m n.m.}$ , vodní plocha pak zabírá 482 ha. Rozdělení prostorů v nádrži je zřejmé z následující tabulky:

Prostor	Kóta	Objem	Plocha
	m n.m.	mil. $\text{m}^3$	ha
Stálé nadržení	$M_s = 362,5$	$V_s = 59,2$	256,6
Zásobní	$M_z = 380,5$	$V_z = 63$	463,7
Ochranný	$M_{\max} = 381,5$	$V_r = 4,7$	482

Tabulka 1: Rozdělení prostorů v nádrži [2]

Do prostoru stálého nadržení spadá i mrtvý prostor o objemu  $V_m = 0,3 \text{ mil. m}^3$  s hladinou na kótě  $M_m = 303 \text{ m n.m.}$ , vodní plocha mrtvého prostoru činí 8,4 ha. Obdobně součástí zásobního prostoru je zálohový prostor pro PVE –  $M_e = 365,9 \text{ m n.m.}$ ,  $V_e = 8,9 \text{ mil m}^3$ , zabírající plochu 289,3 ha [2].

Délka vzdutí je 22 kilometrů. Izoterma v prostoru nádrže je  $7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ztráty výparem činí 725 mm/rok [2].

Údolí je skalnaté a tok byl v prostoru nádrže značně zaříznut do okolního prostředí s větším podélným sklonem.

## 1.6 Hydrologické údaje

Minimální zbytkový průtok pod nádrží Mohelno odpovídá přibližně průtoku  $Q_{355}$ , má velikost  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Při nouzovém nedostatku vody ho lze snížit na hodnotu  $0,78 \text{ m}^3/\text{s}$ . [2]

Neškodný průtok je v korytě  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ , průtok do  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  způsobí škody rozlitím po okolních pozemcích, ale objekty zůstanou neporušeny.

Následující tabulka dokumentuje vyhodnocení m-denních průtoků pro profil VD Dalešice – Kramolín za období let 1931–2010 (třída II.):

M	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	355	364
$Q_m$ (m <sup>3</sup> /s)	13,6	9,15	7,13	6,75	4,72	3,94	3,37	2,92	2,5	2,14	1,75	1,26	0,84

Tabulka 2: m-denní průtoky [2]

N-leté průtoky byly vyhodnoceny tamtéž za období 1931–2014 (třída II., respektive III. pro  $Q_{200}$ ,  $Q_{500}$ ,  $Q_{1000}$ ):

N	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
$Q_N$ (m <sup>3</sup> /s)	54,5	80,4	121,9	158,3	198,9	259,2	310	365,5	446,5	514

Tabulka 3: N-leté průtoky [2]

Plocha povodí tvoří 1139,07 km<sup>2</sup>. Z dat za léta 1981–2010 byl vypočten dlouhodobý průměrný průtok –  $Q_a = 6,19$  m<sup>3</sup>/s, a průměrná roční výška srážek na povodí – 647 mm. Dnů v roce se srážkami vyššími než 0,1 mm je asi 144 [2].

## 1.7 Výstavba

Uvažovat o výstavbě vodní nádrže někde v lokalitě se začalo již před první světovou válkou. V důsledku stavění tepelných elektráren a rozvoje jaderné energetiky a průmyslu se v 60. letech zvýšila potřeba vyrovnávání diagramu zatížení elektrizační sítě, a tak se přistoupilo k hledání vhodných lokalit pro PVE. Dalešice byly výhodné svojí polohou uprostřed elektrizační sítě a také tím, že oblast byla bez energetických zdrojů. Krom toho se rozhodlo o výstavbě jaderné elektrárny Dukovany a bylo zapotřebí zajistit dostatek chladicí vody. K projektovému zpracování se přistoupilo u dvou variant – betonové klenbové hráze (ze které nakonec zbylo vybudování elektrárny do oblouku – tato varianta vyžadovala menší prohrádku koryta, a tak byla ponechána i pro sypanou zemní hráz) a právě sypané zemní, ke které se nakonec přistoupilo.

Přípravné práce začaly v září 1970, o rok později již byla řeka převedena do obtokových štol (dnes spodní výpusti) a začalo se s betonáží. V roce 1973 se museli pracovníci vypořádat se sesuvem části pravého svahu údolí. V roce 1974 se dokončovala práce na stavbě přivaděčů a spodní stavbě elektrárny, započalo se také se sypaním hráze. K napouštění hráze se fakticky přistoupilo 28. července 1976. O dva roky později byla do zkušebního provozu uvedena

všechna čtyři soustrojí elektrárny. Na začátku roku 1980 se poprvé dosáhlo maximální hladiny v nádrži. Stavba byla zkolaudována v roce 1981 [5].

Není bez zajímavosti, že při výstavbě VD Dalešice natáčel režisér Jiří Menzel svůj budovatelský film Kdo hledá zlaté dno.

## **1.8 Kontrolní a měřicí zařízení**

VD Dalešice je vybaveno celou řadou měřících zařízení. Měření přítoku do nádrže je realizováno limnigrafickou stanicí Ptáčov, měření hladiny pak pomocí vodotečné latě umístěné na vtokovém objektu a limnigrafu umístěném na levém pilíři mostu ke vtokovému objektu. Je měřena teplota vody v nádrži a kontrolována průhlednost vody. Teplota vzduchu je měřena ve srážkoměrné stanici u domku hrázného, kde jsou ombrometrem zaznamenávány srážky. V zimním období je měřena v blízkosti hráze tloušťka ledu a výška sněhu sněhoměrnou latí u domku hrázného. Také jsou sledovány odběry vod a kvalita vod [2].

Samotné přehradní těleso je vybaveno řadou uzavřených i neuzavřených tlakoměrných vrtů a tlakoměrnými krabicemi MAIHAK.

Probíhá též kontinuální měření průsaků. Celková hodnota průsaku se měří ve studni, kam je svedeno drenážní potrubí uložené v patním drénu.

Jsou prováděny i další měření a sledování dle platných předpisů. Stanovuje je program technickobezpečnostního dohledu, který vypracovala společnost VODNÍ DÍLA-TBD a.s., pracoviště Brno [9].

## 2. VYSYCHÁNÍ TĚSNICÍCH JADER

Trhliny v hrázi jsou obecně nežádoucí jev, neboť mohou vést ke zvýšenému průsaku, průsakové erozi a v konečném důsledku ke ztrátě stability. Mohou vzniknout z různých příčin (sedání zemního tělesa, zemětřesení), ale právě i v důsledku vysychání [10].

*„It is common knowledge that clay soils can crack during desiccation. Cracks occur when soils are restrained while undergoing volume change produces as a result of the soil suction generated within the desiccating soil matrix.“ (Je všeobecně známo, že jílové zeminy mohou popraskat během vysychání. Trhliny se objevují, když jsou zeminy omezovány změnou svého objemu, která vzniká v důsledku sání generovaného v matici vysychající zeminy.) [11]*

K tomu, že vysychání těsnicích jader či celých zemních hrází (v případě homogenních přehradních těles) má za účinek tvorbu trhlin, dochází například ve své výzkumné práci, ve které se věnuje vlivu sušení a máčení zhutněných půd na jejich pevnost v tahu, i San San Win: *“Conversely, while saturation has been shown to reduce tensile strength, shrinkage is also reduced reducing the likelihood for cracking.“ (Naopak, zatímco bylo zjištěno, že saturace snižuje pevnost v tahu, zmenšuje i smršťování, což snižuje pravděpodobnost vzniku trhlin.) [12]*

V našich podmínkách je při možných klimatických změnách (prodlužování suchých období) vysychání materiálu reálná hrozba. Trhliny od vysychání vznikají nejvíce v jemnozrnných zeminách s velkým množstvím částic menších než 0,063 mm [10] – těsnění zemních hrází jsou zpravidla tvořena právě takovými zeminami (jílovité, sprašové hlíny atd.), protože mají nízký koeficient hydraulické vodivosti, a tedy jsou vhodné k těsnicí funkci. Nejvíce je ohrožena horní část hráze, kde je nejmenší přitížení vlastní tíhou. Při vysychání materiálu hráze ztrácí zemina objem vody a v důsledku toho má tendenci se smršťovat. Při smršťování se generují tahová napětí, pokud je zemina omezena proti smršťování. Těmito omezeními je myšlena například interakce s dalším rozhraním (vnější omezení), nebo interakce s nestejně vysychající vrstvou téhož materiálu (vnitřní omezení) [11]. Z uvedeného je zřejmé, že nějakým způsobem je materiál těsnění hráze omezen vždy. Pokud tato napětí překročí hodnotu pevnosti v tahu materiálu, dojde k vytvoření trhliny. Z počátku se vytvoří systém drobných trhlin, ten ale dále roste a přibývá i větších trhlin ve všech směrech [10].

Vliv vysychání na trhliny v hrázích byl zkoumán například v experimentu, který provedl Philippe Sentenac, Marcin Zielinsky a Mark Dyer, finální zpráva z experimentu byla

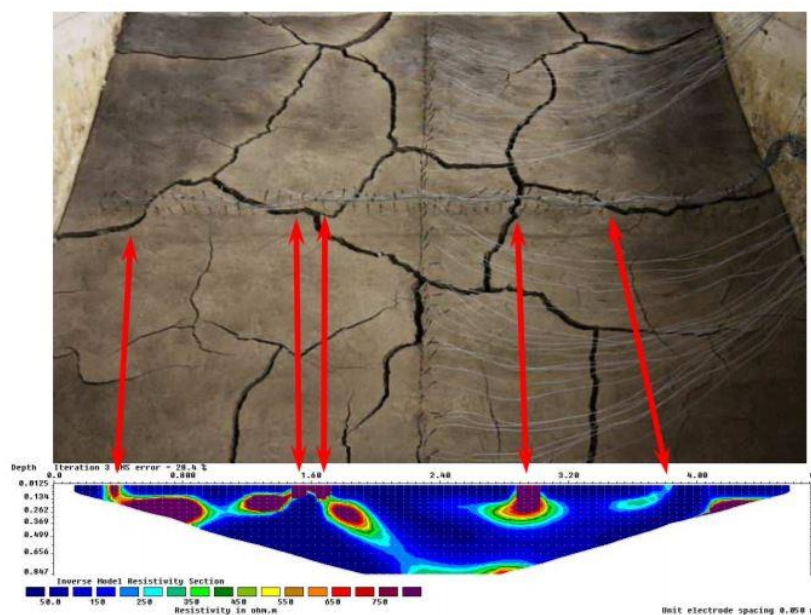
zveřejněna v roce 2009 [13]. V laboratoři vytvořili model hráze a zkoumali jeho chování při zavodňování a vysychání.



Obrázek 8: Model hráze s měřicími přístroji [13]

Experiment zahrnoval pozorování vzniku jemných trhlin, měření změn vlhkosti, měření změn sání, porovnání měření sání na svahu oproti měření sání na vrchu modelu, zkoumání neinvazivních geofyzikálních metod pro iniciaci detekci trhlin, sledování již popraskaného modelu v podmínkách záplavy a další.

Po sedmi dnech sušení provedli autoři srovnání měřeného odporu a vzhledu modelu hráze.



Obrázek 9: Model po sedmidenním sušení v souvislosti s měřeným odporem [13]

Autoři také potvrdili vznik trhlin uvnitř modelu hráze. Trhliny mohli potvrdit vizuálně, protože betonové koryto, ve kterém byl model zhotoven, disponovalo okny, která umožňovala přímý vhled do středu tělesa.

Ze závěrů experimentu plyne například, že povrchové trhliny se tvoří kolmo k povrchu, a to obvykle do hloubky až 1 m, tam se ale mohou začít štěpit a může dojít až k vytvoření ortogonální sítě trhlin, která zvýší propustnost zhutněné jílové zeminy až na úroveň hrubého písku nebo šterku [13].

Na základě experimentální činnosti dochází Hervé Peron, Lyesse Laloui, Tomasz Hueckel a Liang Bo Hu k závěru, že smršťování během vysychání lze rozdělit do dvou oblastí – v oblasti stupně nasycení blízkému hodnotě 1 vznikají nevratné a podstatné deformace, v druhé oblasti, která zahrnuje zvyšování sání a pokles hodnoty stupně nasycení, se vytvářejí deformace menší a většinově vratné. Trhliny od vysychání se objevují v první oblasti (stupeň nasycení téměř 1, sání je nenulové) blízko k bodu plnění pórů zeminy vzduchem. Dále autoři vyvozují, že pevnost zeminy v tahu se v průběhu vysychání vyvíjí [14].

Při opětovném zvýšení hladiny jsou tyto trhliny přirozenou cestou proudění. Krom zvýšeného průsaku jsou tyto trhliny ideálním prostorem pro průsakovou erozi a další rozvoj vnitřní eroze, ale i přirozenou cestou pro vstup živočichů, který vede k další vnitřní erozi. Zanedbatelný není ani fakt, že při úplném zatopení trhlin vodou dochází k zvýšení pórových tlaků, které může vést až k sesuvu části hráze [10].

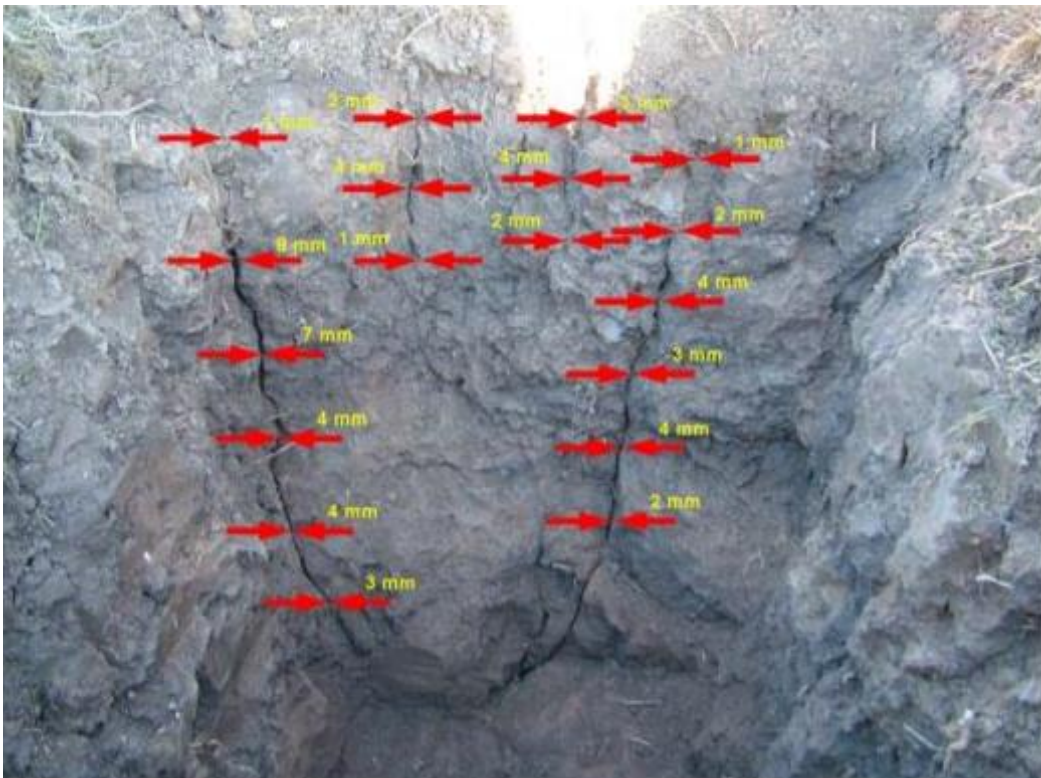
Trhliny od vysychání na reálných hrázích jsou zachyceny na následujících fotografiích:



Obrázek 10: Trhliny od vysychání na koruně nové hráze [15]



Obrázek 11: Trhliny od vysychání pozorované ve zkušebním výkopu (v hloubce 600 mm pod povrchem) v protipovodňové hrázi Thorngumbald [15]



Obrázek 12: Trhliny od vysychání a jejich šířka v historické protipovodňové hrázi (hloubka výkopu 1 m) [15]



*Obrázek 13: Síť trhlin od vysychání pozorovaná v ručně vykopaném zkušebním výkopu na koruně nové hráze [15]*

Nejnáchylnější k porušení vysycháním jsou hráze suchých nádrží a ochranné hráze podél vodních toků, případně homogenní hráze z jílových zemin, které jsou přímo vystaveny vysychání (těsnicí jádra jsou krytá dalšími vrstvami hráze, vysychat mohou ale i tak).

Vzhledem k rekonstrukci koruny hráze (viz kapitola 1.3) vyvstává u VD Dalešice relevantní otázka, hrozí-li vysychání těsnicího jádra, a pokud ano, při jak velkém a jak dlouhém poklesu hladiny je potřeba začít vysychání předcházet a zvlhčovat těsnicí jádro pomocí instalovaného zavlažovacího potrubí.



### 3. SOUHRNNÝ POPIS PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

Jako ostatně i jiná proudění můžeme proudění podzemní vody rozdělit na ustálené a neustálené. Ustálené proudění je časově nezávislé, zatímco neustálené počítá se změnou parametrů v čase. Krom toho dělíme neustálené proudění podzemní vody dle typu skeletu – zdali je tuhý či se v čase deformuje. Úlohy spojené s vyrovnáním zvýšených pórových tlaků v deformujícím se tělese se nazývají konsolidací. V teoretické rovině se až na výjimečné zjednodušující případy konsolidace jedná o plně sdružený problém. Ve skutečnosti není porézni skelet nikdy nekonečně tuhý, ale jeho deformace – například jako v numerickém modelování v této práci – se dá zanedbat, aniž by došlo k významnějším nepřesnostem. Dalším důležitým aspektem je nasycenost prostředí – v našem případě bude probíhat výpočet jak v oblastech zcela nasycených, tak v oblastech nasycených málo. Mluvíme pak o proudění v nasycené, respektive nenasyčené zóně.

Základní rovnicí proudění podzemní vody je rovnice kontinuity neboli zákon o zachování hmotnosti. Je například zřejmé, že změna objemu vody v oblasti za určitý čas se bude rovnat rozdílu vtoku do této oblasti a výtoku z této oblasti za tento čas. Celkovou bilanci průchodu vody určitou plochou  $P$  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 a  $Z^{out}$  je výtok v oblasti. Pak tedy  $Z$  je celková změna objemu vody v oblasti ( $Z^{out}$  bude záporné). Pórovitost představuje  $n$ , stupeň nasycení  $S$  a  $v^w$  je vektor rychlosti vody proudící póry,  $\rho^w$  představuje hustotu vody. Rychlost proudění vody je tedy uvažována jako hustota toku  $q = v = nS\rho^w v^w$  (m/s).

Do rovnice vstupuje veličina  $m$  představující vnitřní zdroj ( $s^{-1}$ ). Použitím Greenovy věty a užitím uvedených rovnic lze s dalšími úpravami tvaru rovnice a za předpokladu že hustota vody  $\rho^w$  a pórovitost  $n$  jsou konstantní, dosáhnout pro libovolnou oblast  $\Omega$  tvaru:

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

V případě ustáleného proudění se tvar zjednoduší na:

$$div[nSv^w] = m$$

Konstitutivní rovnice jsou řízeny Darcyho zákonem, který definuje vztah mezi hustotou toku a gradientem pórového tlaku, či celkové výšky. Vzhledem k tomu, že výpočet probíhá také v prostředí částečně nasycených zemin, je nutné korigovat koeficient hydraulické vodivosti

$K_{sat}$  plně nasycené zeminy relativním součinitelem propustnosti  $K_r$  (jinými slovy – v nenasyčené zemině je permeabilita menší, je tedy třeba v závislosti na záporném tlaku zmenšovat hodnotu koeficientu hydraulické vodivosti – to se děje za pomoci  $K_r$ , jakožto funkce záporného tlaku  $h_p$ ).

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

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

Kde  $i_g$  je jednotkový vektor ve směru tíhového zrychlení.

Je zřejmé, že  $K_r \in < 0; 1 >$ . Existuje několik přístupů k funkci  $K_r$ . Předpisy této funkce neboli modely součinitele relativní permeability, které umožňují do výpočtu zavést program Geo5 MKP, jsou van Genuchtenův, Gardnerův a Log-lineární model (poslední jmenovaný nebyl v práci užit). Předpis funkce van Genuchtenova modelu je:

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

Kde  $\alpha, n$  a  $m$  jsou regresní parametry modelu. Vztah mezi těmito parametry a retenční křivkou materiálu je popsán při jejich určování pro materiál těsnicího jádra VD Dalešice v kapitole 5.2.1

Gardnerův materiálový model je dán vztahy:

$$K_{r(h_p)} = e^{a \cdot h_p}$$

$$\theta = K_r^b$$

Kde  $\theta$  je normalizovaný obsah vody,  $e$  Eulerovo číslo a  $a, b$  parametry modelu. Další vztahy Gardnerova modelu jsou opět uvedeny dále, v kapitole 5.2.2

Je také zapotřebí vzít v úvahu zda  $K_{sat}$  bude stejné ve všech směrech, či se může lišit ve směru  $x$  a  $y$  (v případě 3D úlohy i ve směru  $z$ ). Gradienty  $h$  nebo  $p$  lze popsat vztahem pro 2D proudění (obdobně pro 3D proudění):

$$\nabla h = \left\{ \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right\}^T$$

Darcyho zákon je omezen na oblast lineárního laminárního proudění, které se vyskytuje v zeminovém prostředí, takže je aplikovatelný pro řešení většiny úloh proudění podzemní vody. [16]

## 4. STRUČNĚ O METODĚ KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (dále jen MKP – v anglickém jazyce Finite element method, FEM) je metoda numerického modelování, jejímž hlavním principem je rozdělení spojitých oblastí na geometrické obrazce (tvořící “sít”), v jejichž uzlech je pak výpočtem určována požadovaná veličina. Tímto principem se stává nedocenitelným pomocníkem v celé řadě oborů. Například z hlediska stavebnictví se metoda stává silným nástrojem pro výpočet napětí, sil a deformací. Lze s ní vypočítat uvedené veličiny i na geometricky či jinak složitých konstrukcích, kde je jednoduché analytické řešení či použití empirických vzorců nemožné, nebo příliš zkresluje skutečnost. To samé pak platí u řešení problémů geomechaniky (například sedání zemin) nebo právě u aproximace proudění podzemní vody. Nespornou výhodou metody je též přehlednost výsledků výpočtu a v závislosti na užitém konkrétním programu přehledné grafické zpracování výstupů.

Ani MKP ale nedokáže zachytit všechny aspekty skutečnosti, a tak je třeba si uvědomovat, že se jedná o její pouhou aproximaci a dle toho také přistupovat k výstupům metody. Určitá nepřesnost je přímo zakořeněna už v principu metody – požadovaná veličina je vypočtena v uzlech prvků (neboli v určitých bodech kontinua), zatímco v ploše (objemu) prvku je dopočítána pomocí matematické funkce (například lineární, polynomické) na základě uzlových hodnot, ta ale nemusí odpovídat (a většinou přesně neodpovídá) matematické funkci popisující veličinu. Další chyby mohou vyplývat například ze zadání vstupních parametrů (například parametrů zemin v geomechanice) – ty nemusí být zcela známé ani při důkladném průzkumu, aproximací problému (například zjednodušení geometrie), složitosti a stability výpočtu (například úprava parametrů v důsledku přílišné složitosti, kdy výpočet nekonverguje k řešení) [16].

### 4.1 Jednotlivé kroky MKP při řešení obecného problému

MKP se dá při velkém zjednodušení shrnout do následujících kroků:

1. Zadání geometrie zkoumané oblasti (geometrie hráze, stropní desky atd.)
2. Zadání parametrů a vlastností materiálů.
3. Zadání vlastností každé oblasti (obvykle přiřazení materiálů určitých vlastností).

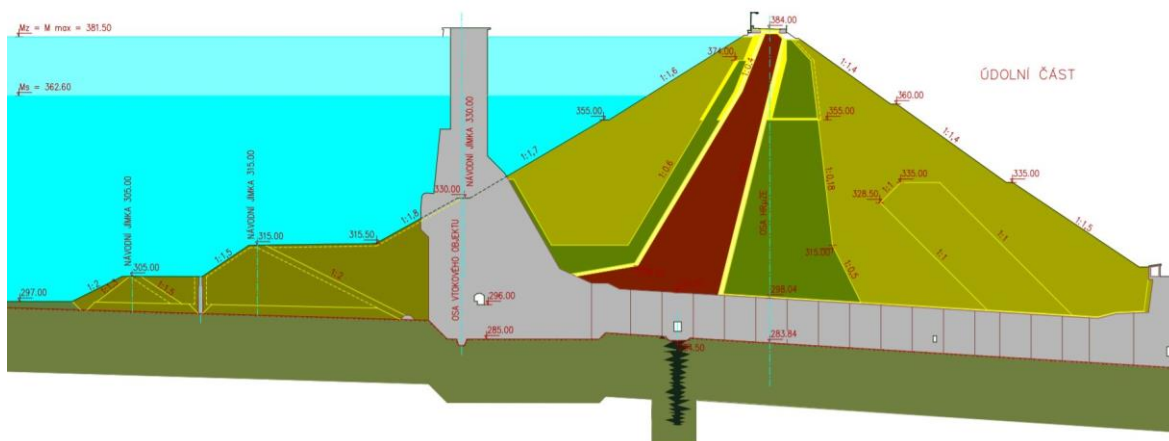
4. Diskretizace na jednotlivé prvky. Většina programů je vybavena automatickou generací sítě konečných prvků, lze ale i tak přistoupit k ručnímu zhuštění sítě v oblastech, kde se očekává rychlý vývoj hledané veličiny.
5. Přisouzení okrajových podmínek (například známé zatížení od vedlejší konstrukce, vtok nebo nepropustnost). V praxi jsou tyto podmínky obvykle přisuzovány určité linii, program sám přisoudí podmínky přímo uzlům.
6. Po převedení prvků do globálního souřadného systému se sestaví soustava lineárních či linearizovaných rovnic, pro počet rovnic je určující počet stupňů volnosti.
7. Proveďte řešení soustavy rovnic, které vytvoří aproximaci chování spojitě oblasti.
8. Vypočtené hodnoty se číselně či graficky zobrazí (postprocessing). Uživatel má možnost nahlížet a zpracovávat či exportovat různé dílčí výstupy (hodnoty vypočtených veličin). [16]

# 5. NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ VLHKOSTNÍCH POMĚRŮ TĚSNIČÍHO JÁDRA

## 5.1 Topologie modelu

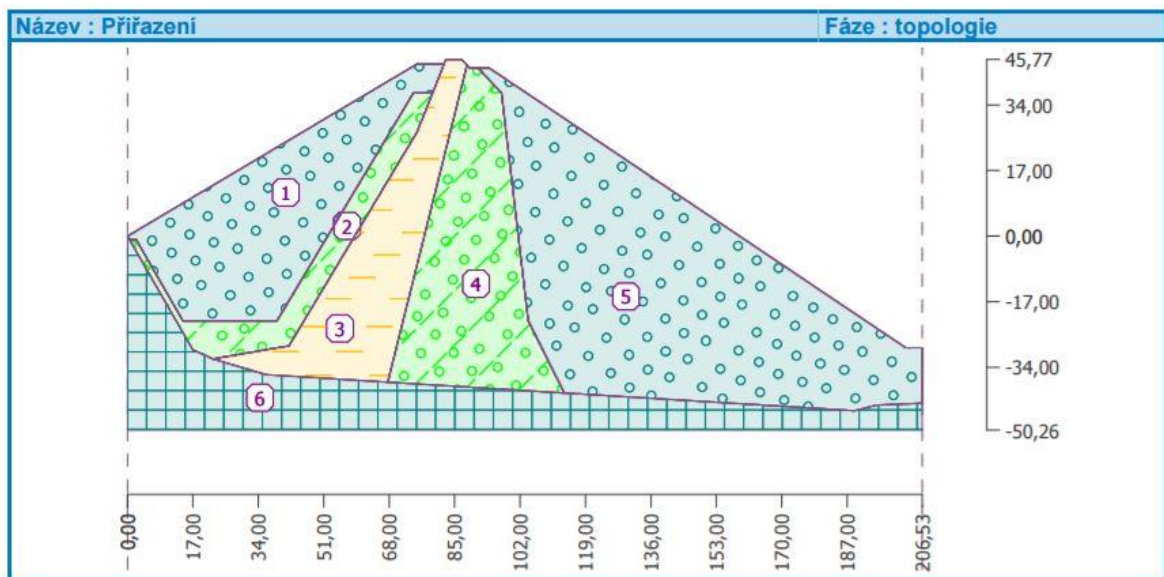
Numerické modelování proběhlo na příčném řezu přehradou v údolní části. Geometrie příčného řezu byla zjednodušena o nepodstatné geometrické prvky. Stejně tak byla zanedbána funkce filtrů. Tím vznikl profil hráze o třech, respektive čtyřech materiálech. Materiál těsnicího jádra – sprašové hlíny, materiál přechodové části – hlinitopísčité šterky, materiál stabilizační části – kamenitá sypanina a materiál vtokového objektu – beton, který byl uvažován jako prakticky nepropustný.

Schématický příčný řez údolní části:



Obrázek 14: Schématický příčný řez v údolní části hráze [17]

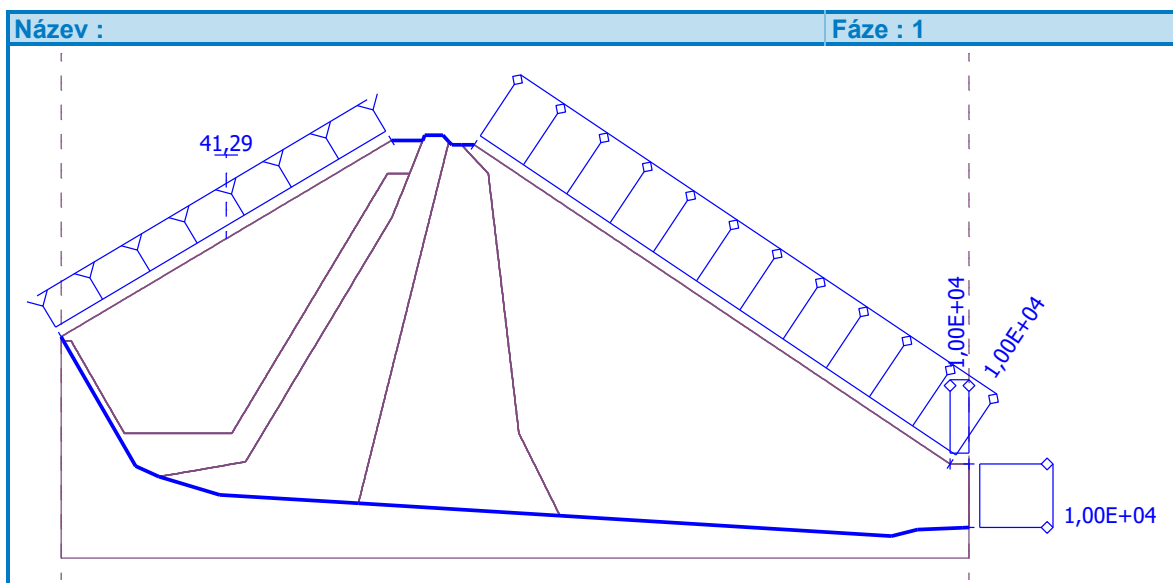
Z důvodu nutnosti zjednodušení geometrie byl návodní i vzdušní svah aproximován jednou úsečkou (zanedbání lavic na obou svazích), nebyly modelovány prvky komunikace na koruně hráze. Vzhledem k tomu, že cílem práce je zkoumání poměrů v těsnicím jádru, byla modelována jen část hráze nad vtokovým objektem. Bod [0,0] v programu GEO5 2017 – MKP byl určen v bodě horního styku návodního svahu a vtokového objektu (na kótě 336,95 m n.m.).



Obrázek 15: Geometrie modelu

Oblastem 1 a 5 byl přisouzen materiál stabilizační části, oblastem 2 a 4 materiál přechodové části, oblasti 3 materiál těsnicího jádra a oblasti 6 materiál betonu, oblast 6 ale byla uvažována jako neaktivní.

Okrajové podmínky byly stanoveny takto:

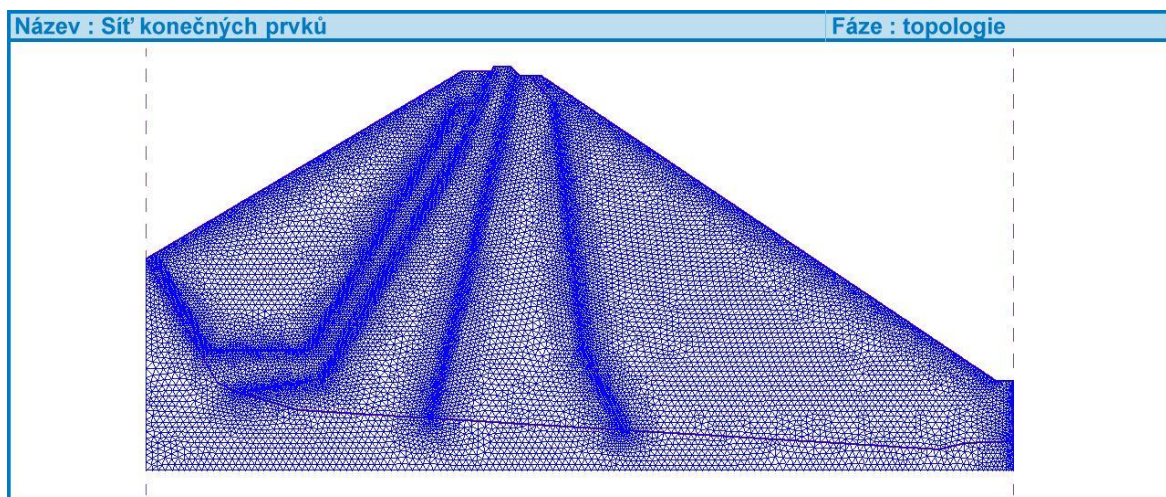


Obrázek 16: Okrajové podmínky

Nepropustná hranice na horním povrchu betonu a na koruně hráze, pórový tlak zadáný pomocí souřadnice HPV na návodním svahu (tato okrajová podmínka byla měněna v každé fázi dle změny hladiny), průsaková podmínka na vzdušném svahu i na vodorovné části za vzdušným svahem. Svislá linie dole na vzdušní straně byla určena jako průsaková také, ačkoli

ve skutečnosti končí betonovým objektem, a tudíž by měla být zavedena jako nepropustná. Tímto způsobem byl simulován nulový pórový tlak v místě patního drénu, který nebyl modelován.

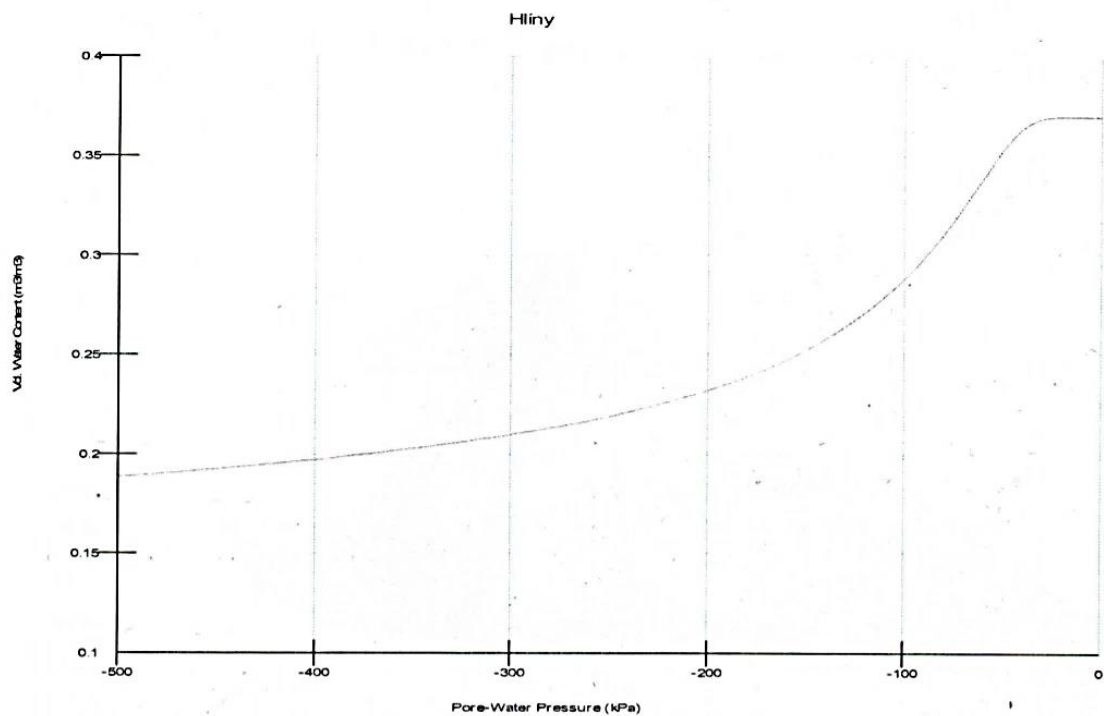
Byla vygenerována síť trojúhelníkových prvků o délce hrany 1,5 m se zahuštěním na velikost 0,5 m na rozhraních materiálů:



Obrázek 17: Síť konečných prvků

## 5.2 Materiálové modely

Jelikož hrubozrnné zeminy mají tu vlastnost, že při velkém záporném tlaku rychle ztrácejí vlhkost a také proto, že cílem práce je zkoumat vlhkostní poměry těsnicího jádra, byla právě jádru věnována největší pozornost, co se parametrů materiálu týká. Z přílohy Studie opravy koruny hráze [8] byla získána retenční křivka (ta reprezentuje závislost objemové vlhkosti zeminy na záporné tlakové výšce) materiálu těsnění. V rámci studie byla křivka vytvořena v programu GeoStudio na základě čáry zrnitosti, pórovitosti a meze tekutosti (tyto vlastnosti byly autorům známy z laboratorních testů odebraných vzorků materiálu těsnicího jádra).



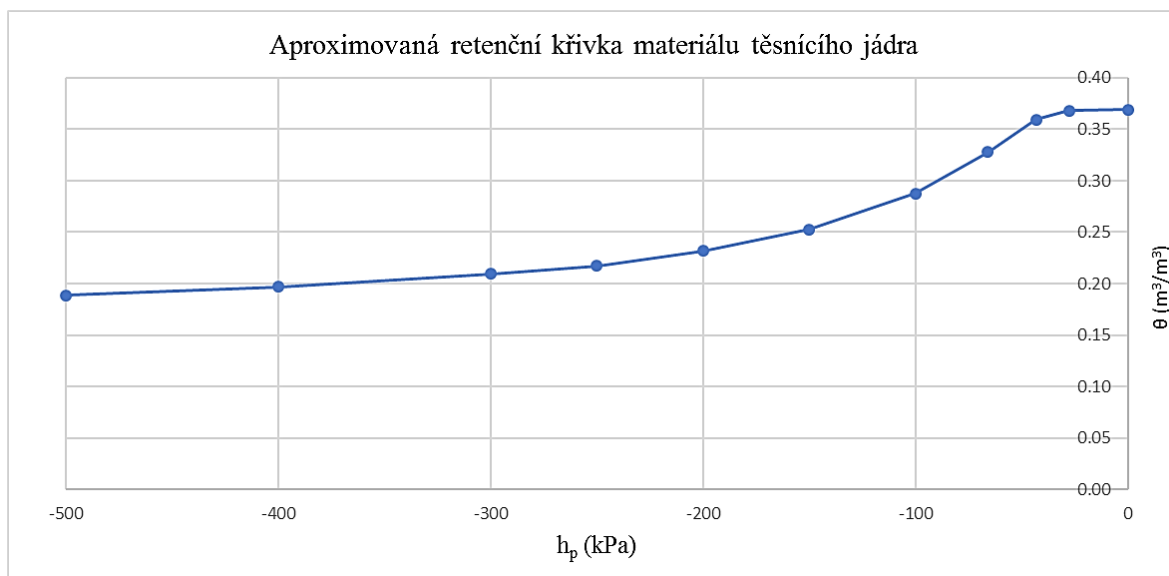
Graf 1: Retenční křivka zeminy těsnicího jádra [8]

Z křivky byly pomocí programu AutoCAD odměřeny souřadnice několika jejích bodů, výběr bodů probíhal tak, aby body zachytily tvar křivky. Křivka tak byla po intervalech lineárně aproximována. Data byla zpracována v programu Excel:

Tlak $h_p$ kPa	Tlak $h_p$ m v.s.	Objemová vlhkost $\theta$ $m^3/m^3$
-500	-51.0	0.19
-400	-40.8	0.20
-300	-30.6	0.21
-250	-25.5	0.22
-200	-20.4	0.23
-150	-15.3	0.25
-100	-10.2	0.29
-65.8	-6.7	0.33
-43.1	-4.4	0.36
-27.5	-2.8	0.37
0	0	0.37

Tabulka 4: Body retenční křivky





Graf 2: Retenční křivka po úsecích lineárně aproximovaná

Bylo přistoupeno k určitému zjednodušení a to sice, že v plně nasycené zemině jsou všechny póry beze zbytku vyplněny vodou (ve skutečnosti může být malý objem pórů v zemině takový, že se do něj voda i při plném nasycení nedostane). Protože platí:

$$\theta = n \cdot S$$

kde  $\theta$  je objemová vlhkost (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),  $n$  pórovitost a  $S$  stupeň nasycení (-), pak při plném nasycení ( $S = 1$ ), které nastane při  $h_p = 0$  kPa, je pórovitost rovna objemové vlhkosti. Z tabulky bodů retenční křivky lze tedy určit pórovitost -  $n = 0,37$ . Do programu Geo5 MKP se nezadává pórovitost, ale bezrozměrné číslo pórovitosti  $e$  (přesněji počáteční číslo pórovitosti  $e_o$ ). To bylo vypočteno dle vzorce:

$$e = \frac{n}{1 - n}$$

$$e = \frac{0,37}{1 - 0,37} = 0,59$$

### 5.2.1 Určení parametrů pro van Genuchtenův model

Van Genuchtenův model operuje s třemi regresními parametry  $\alpha$ ,  $n$  a  $m$  ( $n$  označuje parametr, nikoliv pórovitost jako v předchozím textu – pro přehlednost tento parametr uvádím dále jako  $n_G$ ). Jelikož  $m = 1 - 1/n_G$ , bylo zapotřebí určit parametry  $\alpha$ ,  $n_G$  tak, aby tzv. fitovaná retenční křivka odpovídala co možná nejvíce původní aproximované retenční křivce. Výpočet probíhal v programu Excel.

Pro každý tlak  $h_p$  (viz Tabulka 4) byla dle stanovených parametrů zeminy spočítána nová hodnota  $\theta$  následujícím způsobem:

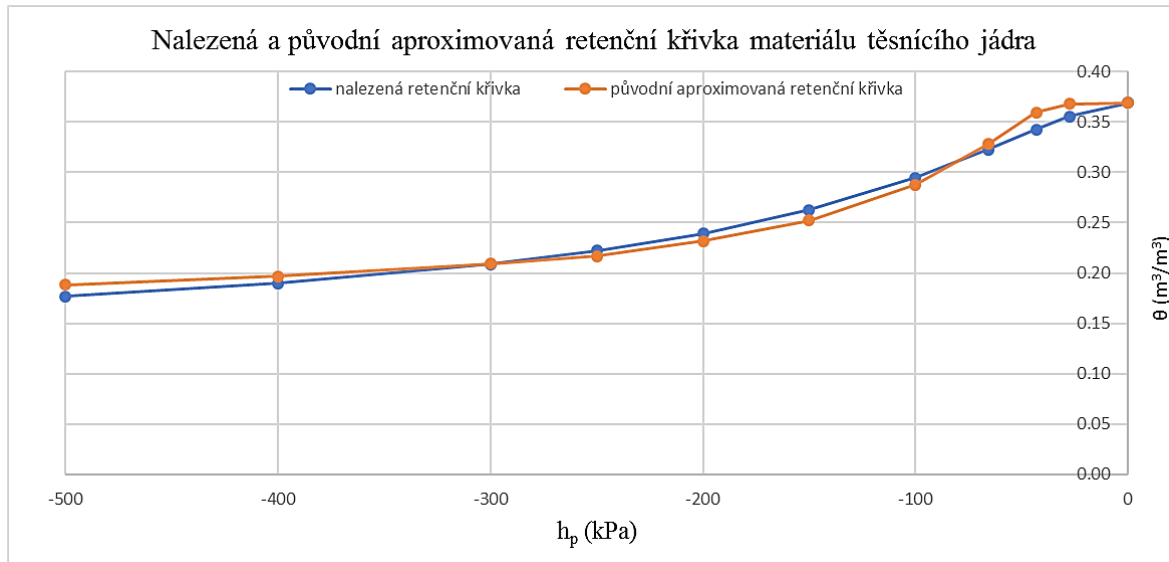
$$\theta = \left( \frac{1}{1 + (\alpha \cdot h_p)^{n_G}} \right)^m$$

$$S = S_r + (S_{sat} - S_r) \cdot \theta$$

$$\theta = n \cdot S$$

Kde  $\theta$  je normalizovaný obsah vody a  $S_{sat}$  saturovaný stupeň nasycení ( $S_{sat} = 1$ ), reziduálnímu stupni nasycení  $S_r$  byla pro tento výpočet přidělena odhadnutá hodnota 0,25. Pro počáteční výpočet byly stanoveny parametry  $\alpha, n_G$  rovné 1. Následně byl zaveden další sloupec tabulky, ve kterém byla pro každou dvojici původní  $\theta$  a vypočtené  $\theta$  spočten kvadrát rozdílu. Byla provedena suma těchto rozdílů na druhou. Nyní bylo možno použít funkci Řešitel. Jako proměnné modelu byly stanoveny právě buňky obsahující hodnoty hledaných parametrů  $\alpha, n_G$ , zatímco účelová funkce byla přiřazena buňce sumy rozdílů na druhou, ve které byla hledána hodnota 0. Tímto způsobem byla nalezena retenční křivka na základě metody nejmenších čtverců a zjištěny hodnoty parametrů:

$$\alpha = 0,011, n_G = 1,685$$



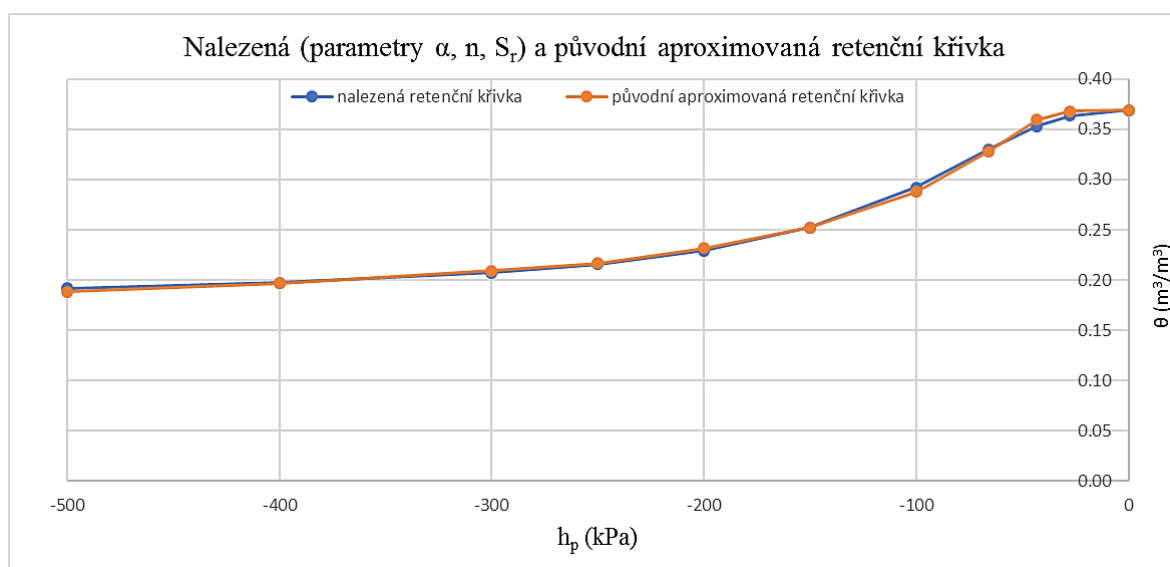
Graf 3: Srovnání původní aproximované a nalezené retenční křivky

Pro optimalizaci parametrů byly užity tři metody – gradientní, simplexová a evoluční algoritmus. Tabulka byla tedy dvakrát zkopírována a hledání řešení bylo provedeno třikrát, tak aby bylo možno porovnat výsledky zmíněných metod. Prezentovaný graf a hodnoty parametrů byly dosaženy pomocí gradientní metody, která dosahovala nejmenší hodnoty

sumy rozdílů na druhou - 0,0009 (oproti hodnotě 0,0015, která vyšla shodně při použití simplexové metody a metody evolučního algoritmu).

V rámci snahy o co nejpřesnější zachycení tvaru retenční křivky byl výpočet proveden znovu zavedením tří proměnných parametrů – nově byl jako proměnný parametr určen i reziduální stupeň nasycení  $S_r$ . Nejpřesnější se opět ukázala gradientní metoda řešitele, která dosáhla hodnoty 0,0001 v buňce sumy rozdílů vypočtené a hledané  $\theta$  na druhou. Vzhledem k tomu, že tento způsob approximoval tvar křivky přesněji, byly výsledky tohoto výpočtu určeny jako parametry zadávané do programu pro numerické modelování GEO5 2017 - MKP:

$$\alpha = 0,011; n_G = 2,56; S_r = 0,486$$



Graf 4: Srovnání původní aproximované a retenční křivky nalezené pomocí tří proměnných

Užitá metoda nejmenších čtverců by ještě mohla být rozšířena o váhovou funkci, aby tak bylo dosaženo přesnějších výsledků v určité oblasti záporných tlaků. Tato metoda byla vyzkoušena u optimalizace dvou proměnných, ale vzhledem k tomu, že řešení pomocí tří proměnných dosáhlo dostatečné přesnosti v celém rozsahu retenční křivky, nebyla váhová funkce zaváděna.

## 5.2.2 Určení parametrů pro Gardnerův model

Gardnerův materiálový model je řízen parametry  $a, b$ . Optimalizace hodnot těchto parametrů proběhlo obdobným způsobem jako v případě van Genuchtenova modelu. Vztah mezi parametry  $a, b$  a objemovou vlhkostí byl vyjádřen z rovnic:

$$K_r = e^{a \cdot h_p}$$

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$\theta = K_r^b$$

Kde  $\theta$  je normalizovaný obsah vody a  $\theta_r$  reziduální objemová vlhkost,  $\theta_s$  potom nasycená vlhkost,  $K_r$  součinitel relativní permeability a  $e$  Eulerovo číslo. Položením rovnosti  $K_r = K_r$  a následnou úpravou rovnice bylo dosaženo vztahu:

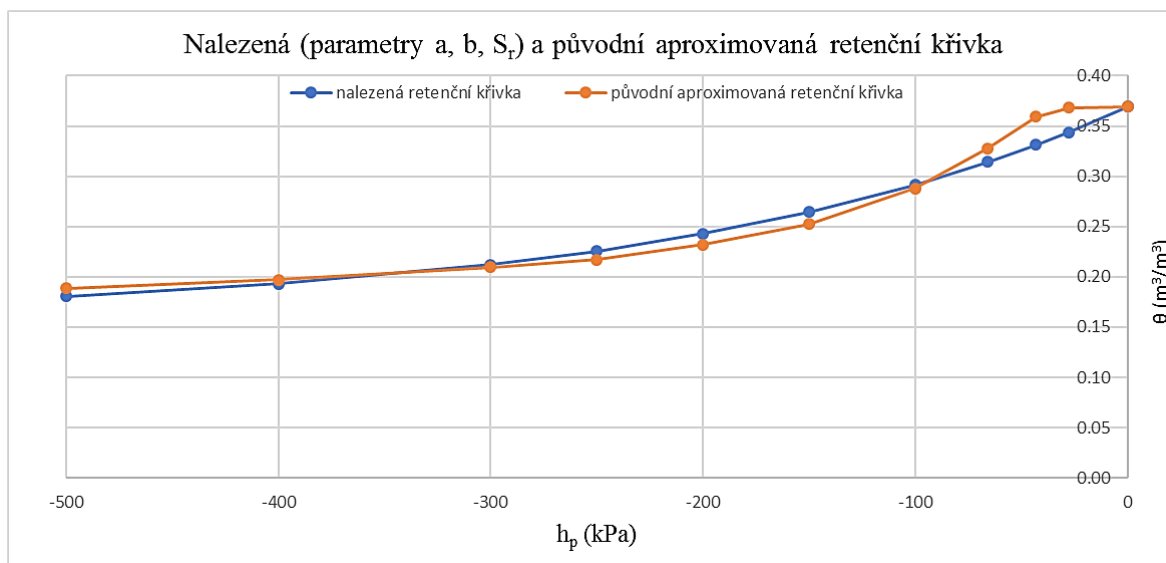
$$\theta = (e^{a \cdot h_p})^b \cdot (\theta_s - \theta_r) + \theta_r$$

Protože:

$$\theta = n \cdot S \text{ a proto } \theta_r = n \cdot S_r,$$

bylo opět možné kromě parametrů  $a, b$  jako další proměnnou zvolit i reziduální stupeň nasycení  $S_r$ . Řešení o třech proměnných opět přineslo tvar retenční křivky bližší tvaru původní aproximované retenční křivky. Nejpřesnějších výsledků bylo dosaženo gradientní metodou funkce Řešitel (se součtem kvadrátů rozdílů 0,002). Takto byly stanoveny parametry:

$$a = 0,048; b = 0,096; S_r = 0,434$$



Graf 5: Srovnání původní aproximované a retenční křivky nalezené

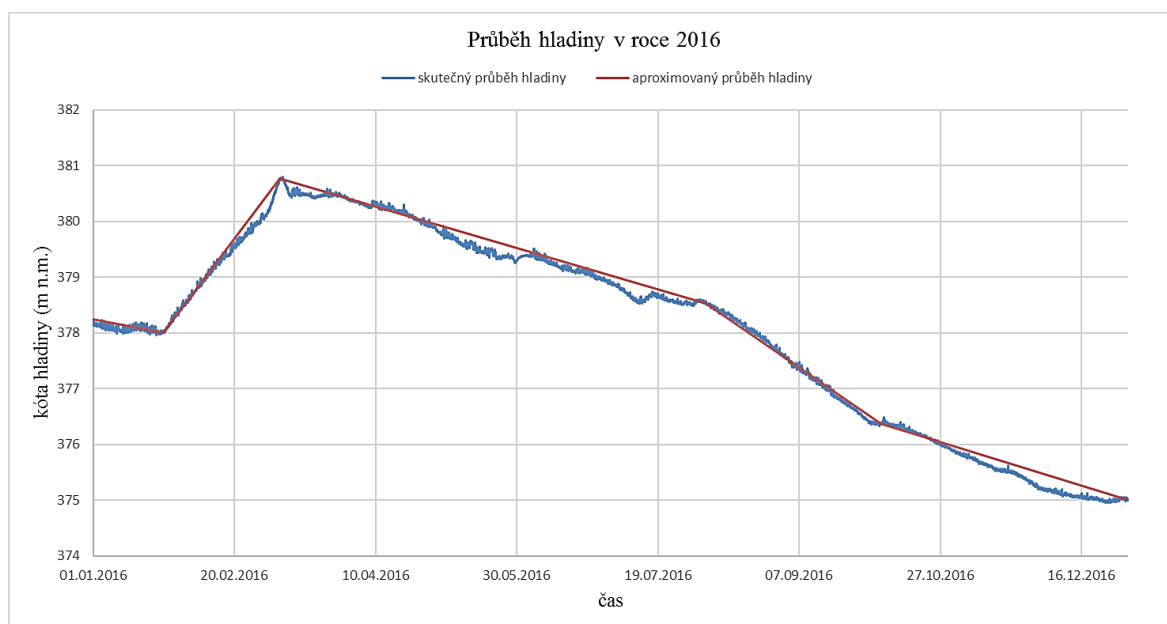
### 5.3 Kalibrace modelu

Protože by bylo zadávání podrobného průběhu hladin v roce 2016 [9] příliš složité, a navíc z hlediska této studie i zbytečné, bylo přistoupeno k po úsecích lineární aproximaci. Byly vybrány určité body průběhu (dny), v nichž dochází k podstatné změně vývoje průběhu hladiny:

Datum	Počet dní	Kóta hladiny (m n.m.)	Výška hladiny nad bodem [0,0] v modelu (m)
01.01.2016		378.2	41.29
26.01.2016	25	378.0	41.05
07.03.2016	41	380.8	43.82
05.08.2016	151	378.5	41.57
06.10.2016	62	376.4	39.42
01.01.2017	87	375.0	38.06

Tabulka 5: Body aproximovaného průběhu hladiny

Průběh hladiny a jeho aproximace je zřejmá z následujícího grafu:



Graf 6: Skutečný [9] a po úsecích lineárně aproximovaný průběh hladiny v roce 2016

Tento aproximovaný průběh hladiny byl vymodelován v programu GEO5 2017 – MKP. Modely byly vytvořeny dva (dva nezávislé soubory), jeden užíval pro těsnicí jádro Gardnerova materiálového modelu, druhý van Genuchtenova (s parametry určenými v kapitole 5.2.1 a 5.2.2). Jelikož se ale při dalších výpočtech ukázal model s užitím van Genuchtenova modelu pro těsnicí jádro jako výhodnější z hlediska stability výpočtu při numerickém modelování, další práce již probíhala právě s tímto modelem. Parametry stabilizační a přechodové části byly určeny tak, aby program dokázal provádět výpočet a

zároveň nebyly příliš vzdálené reálnému stavu, hodnoty  $K_{sat}$  byly převzaty z předešlé studie [8]. Byly tedy zadané parametry a vlastnosti materiálů takto (výstup z programu):

#### Parametry zemín

##### stabilizační část - kamenitá sypanina

Koef. filtrace ve směru X :	$k_{x,sat} =$	8,640E+00 m/den
Koef. filtrace ve směru Z :	$k_{z,sat} =$	8,640E+00 m/den
Počáteční číslo pórovitosti :	$e_0 =$	0,12
Model přechodové vrstvy :	Gardner	
Parametr modelu :	$a =$	0,10 1/m
Reziduální stupeň nasycení :	$S_r =$	0,150
Parametr modelu :	$b =$	0,10

##### přechodová část - hlinitopísčité štěrky

Koef. filtrace ve směru X :	$k_{x,sat} =$	8,640E-01 m/den
Koef. filtrace ve směru Z :	$k_{z,sat} =$	8,640E-01 m/den
Počáteční číslo pórovitosti :	$e_0 =$	0,30
Model přechodové vrstvy :	Gardner	
Parametr modelu :	$a =$	0,10 1/m
Reziduální stupeň nasycení :	$S_r =$	0,250
Parametr modelu :	$b =$	0,10

##### těsnící jádro - sprašové hlíny

Koef. filtrace ve směru X :	$k_{x,sat} =$	8,640E-04 m/den
Koef. filtrace ve směru Z :	$k_{z,sat} =$	8,640E-04 m/den
Počáteční číslo pórovitosti :	$e_0 =$	0,59
Model přechodové vrstvy :	van Genuchten	
Parametr modelu :	$\alpha =$	0,011 1/m
Parametr modelu :	$n =$	2,560
Reziduální stupeň nasycení :	$S_r =$	0,486

Obrázek 18: Parametry zemín

Je zjevné, že aproximovaný průběh hladiny by bylo lze vymodelovat v šesti fázích, ale protože zadání velké změny pórových tlaků během jedné fáze způsobovalo nestabilitu výpočtu, byl průběh vymodelován v osmi fázích. U první fáze byl výpočet proveden výpočtem ustáleného proudění, tím byl určen počáteční stav. Další fáze již představují určitý časový úsek a byly provedeny užitím výpočtu neustáleného proudění. V každé fázi (krom první, kde je výpočet proveden výpočtem ustáleného proudění) byl zadán lineární nárůst okrajových podmínek, tedy aby program lineárně zvyšoval, respektive snižoval hladinu po celou dobu trvání fáze tak, jak odpovídá aproximovanému průběhu hladin v roce 2016.

### 5.3.1 Kalibrace na základě průsaků

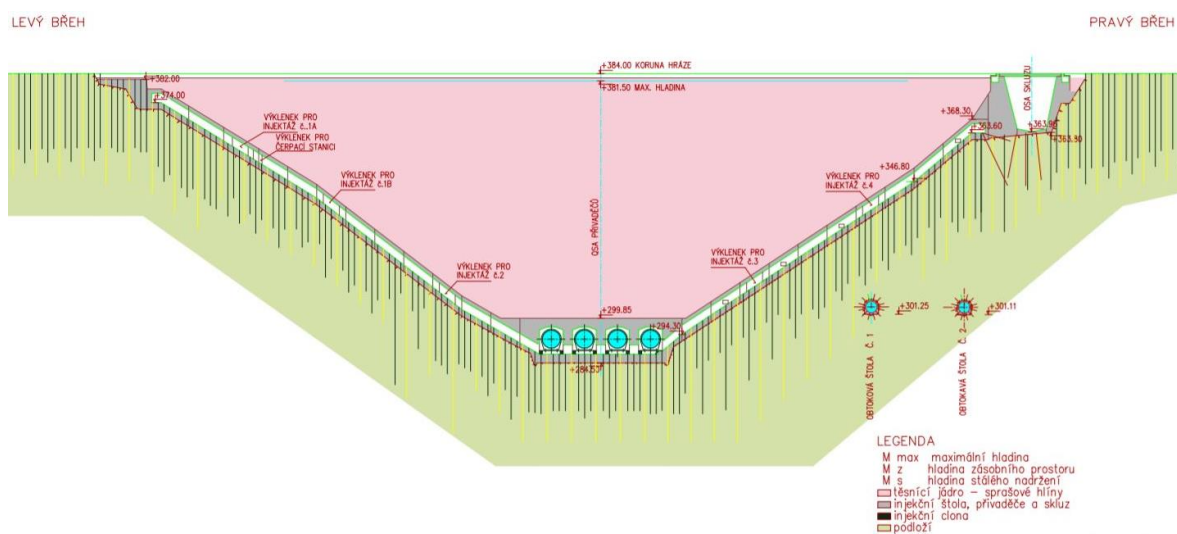
Poskytnutý hodinový průběh průsaků zemní částí hráze [9] je tvořen hodnotami průsaků oblastí nad betonovým vtokovým objektem či nad betonovou injekční chodbou (tedy bez zahrnutí průsaků pod základovou sparou) v období 1.2.2016 – 22.12.2016. Tyto průsaky však jsou celkové, zahrnují i průsaky z obou svahových částí hráze. Bylo tedy přistoupeno

k jejich redukci, tak aby byla získána přibližná hodnota průsaku pouze údolní (modelovanou) částí.

Stanovení poměru průsaku údolní a svahovou částí proběhlo na základě Myslivcova vzorce:

$$Q = \frac{K_{sat} H^2}{(t_2 - t_1)^2} \cdot \left[ \frac{L_1}{2} \cdot (t_2 + t_1) + \frac{L_2}{2} \cdot (t_2 - 3t_1) + t_1 \cdot \frac{t_1 L_2 - t_2 L_1}{(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1} \right]$$

Kde  $K_{sat}$  je nasycená hydraulická vodivost těsnicího jádra,  $H$  výška ode dna nádrže po hladinu,  $t_1$  šířka těsnění pod korunou hráze a  $t_2$  u dna,  $L_1$  délka hráze v úrovni hladiny a  $L_2$  u dna. Vzorec platí pro symetrická údolí – údolí VD Dalešice není zcela symetrické, ale zároveň není výrazně asymetrické, a tedy pro výpočet přibližné hodnoty bylo lze vzorec použít.



Obrázek 19: Schématický podélný řez hrázi [17]

Výpočet dle Myslivcova vzorce byl proveden pro každou hladinu z průběhu hladin v únoru 2016. Jednotlivé průsaky za časové úseky změn hladiny byly sečteny. To samé bylo provedeno po položení rovnosti  $L_1 = L_2$ , tím byl proveden výpočet průsaku dle Myslivcova vzorce pouze v údolní části. Porovnáním obou hodnot byl učiněn závěr, že údolní částí prosakuje asi 50 % objemu celkových průsaků zemní částí hráze.

Sumou redukovaných hodinových průsaků bylo dosaženo hodnoty průsaku údolní částí hráze 11 656 m<sup>3</sup> za období 1.2.2016 – 22.12.2016.

Program GEO5 2017 – MKP vypočte pro každou fázi průsak v m<sup>3</sup>/den/m. Bylo tedy třeba v každé fázi vynásobit hodnotu průsaku šířkou údolní části hráze ( $L = 63,8$  m, hodnota odměřena v programu AutoCAD ze schématického podélného řezu hrázi) a počtem dní fáze. Protože ale byl modelován průběh hladiny za celý rok 2016 a hodnoty průsaků získány pouze v uvedeném období, bylo třeba určit kolik dní z fáze spadá do období 1.2.2016 – 22.12.2016.

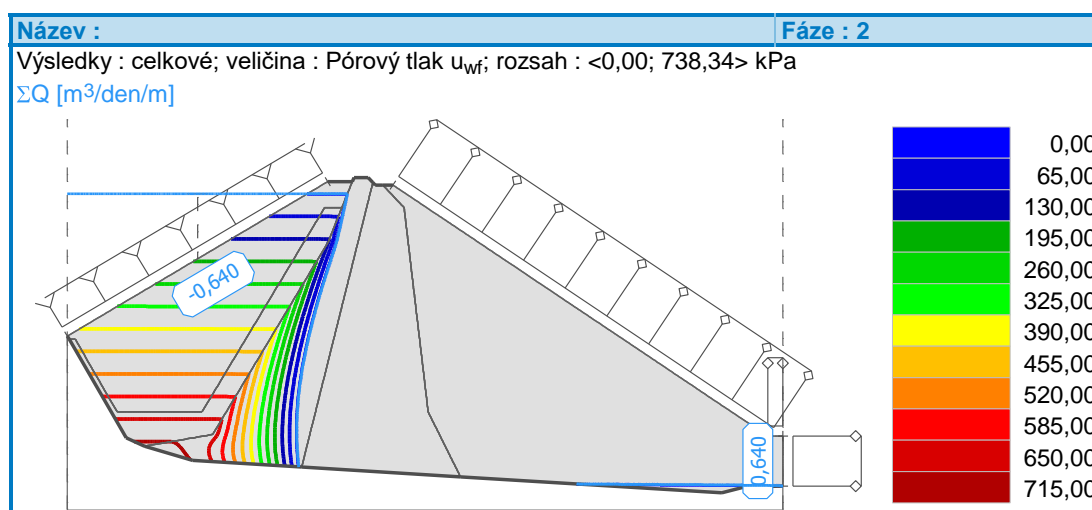
Tedy první fáze nespadá do období vůbec, z druhé je potřeba odečíst 6 lednových dnů a z poslední 10 z konce prosince a z prvního dne ledna 2017.

Hodnoty průsaků získané numerickým modelováním a jejich přepočty na celkový průsak za zkoumané období dokumentuje následující tabulka:

Trvání fáze	Průsak $q$	Průsak $Q$ za dobu trvání fáze	Dnů ve fázi ve zkoumaném období	Průsak $Q$ z fáze ve zkoumaném období
den	$\text{m}^3/\text{den}/\text{m}$	$\text{m}^3/\text{fáze}$	den	$\text{m}^3/\text{zkoumaná část fáze}$
25	0.358	571	0	0
41	0.351	918	35	784
75.5	0.366	1763	75.5	1763
75.5	0.362	1744	75.5	1744
31	0.358	708	31	708
31	0.351	694	31	694
87	0.341	1893	77	1675
			Suma	7368

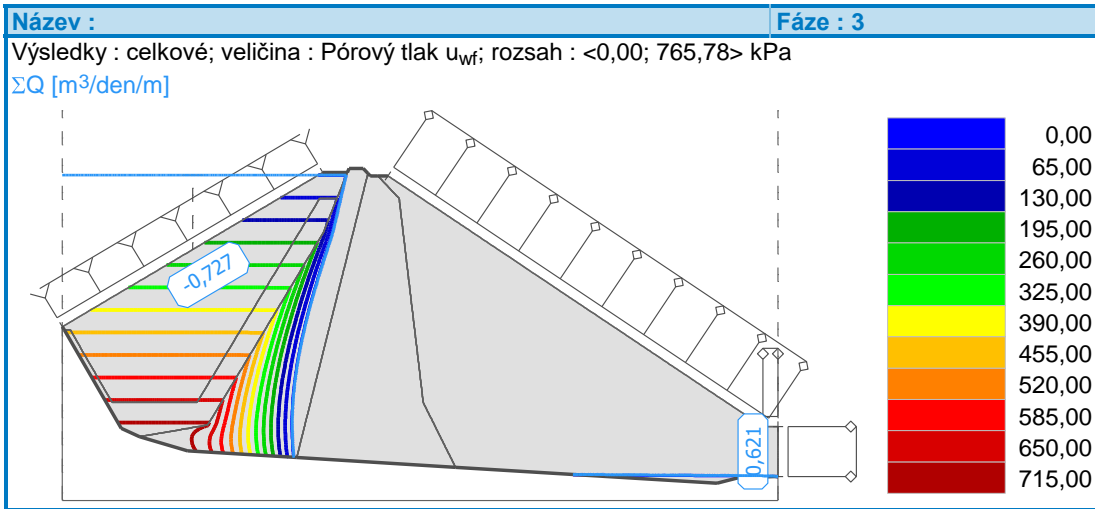
Tabulka 6: Hodnoty průsaků dle modelu

Protože dosažená hodnota průsaku za uvedené období dosahuje  $7\,368\text{ m}^3$ , což je méně než předpokládaná reálná hodnota průsaku za období ( $11\,656\text{ m}^3$ ), bylo přistoupeno k opravě  $K_{sat}$  těsnicího jádra. V dosavadním modelu byl materiál uvažován jako izotropní (což je zřejmé z uvedených parametrů), avšak ve skutečnosti bude materiál anizotropní – v důsledku hutnění materiálu během výstavby je propustnost větší ve směru vodorovném, tedy ve směru osy  $x$ . Byla tedy zvětšena hodnota  $K_{x,sat}$  přibližně na dvojnásobek a průběh hladiny v roce 2016 byl vymodelován s novou hodnotou  $K_{x,sat} = 0,00172\text{ m}/\text{den}$ . Vývoj pórového tlaku a hodnoty průsaků dokumentují následující výstupy z programu (fáze 1 byla opět provedena výpočtem ustáleného proudění, a tedy nemá časový rozměr a není zahrnuta):

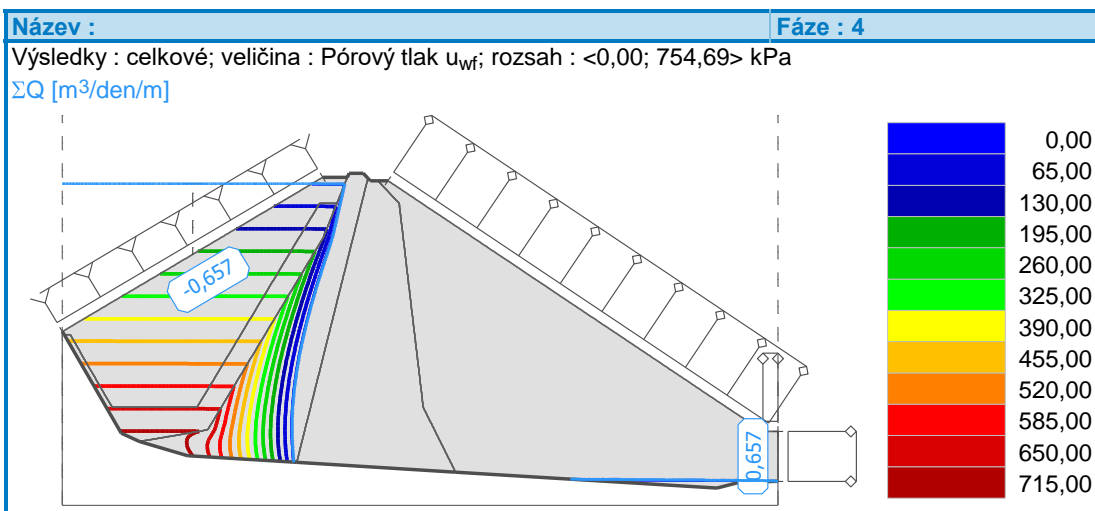


Obrázek 20: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 2

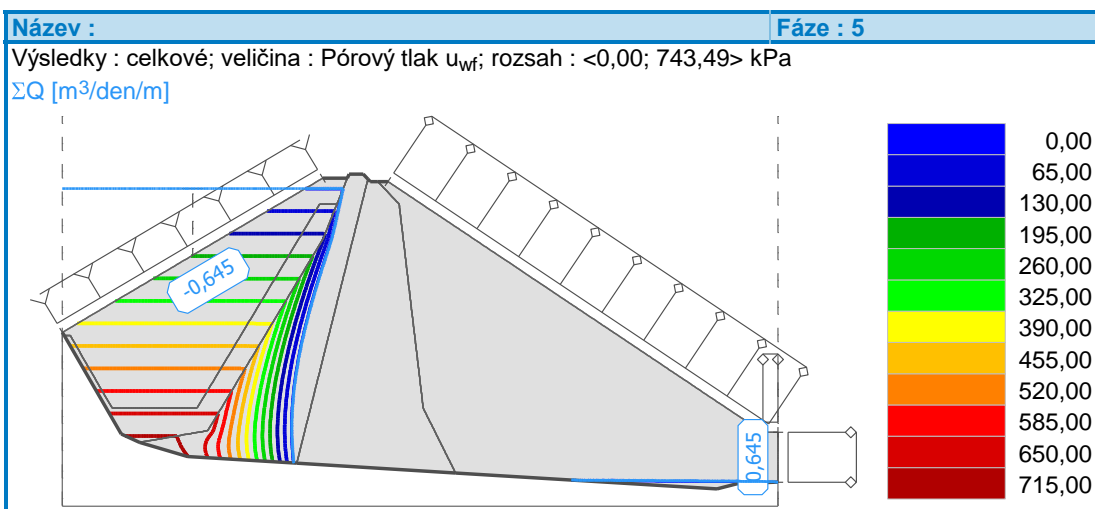




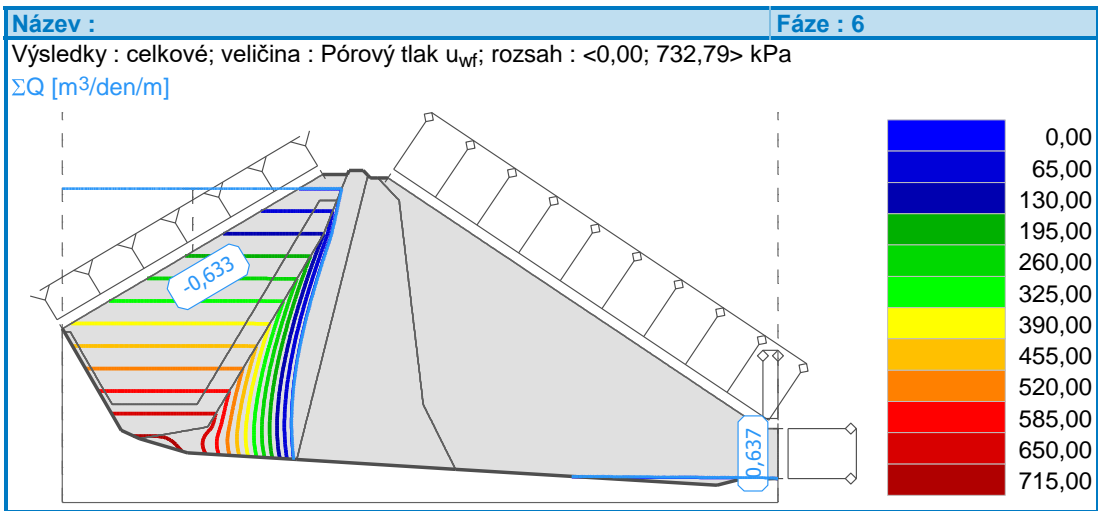
Obrázek 21: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 3



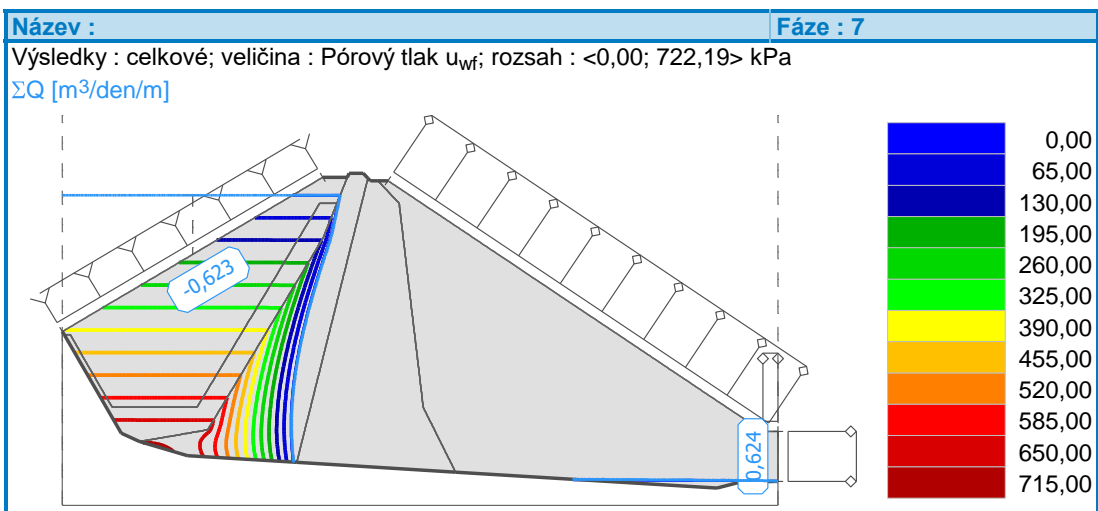
Obrázek 22: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 4



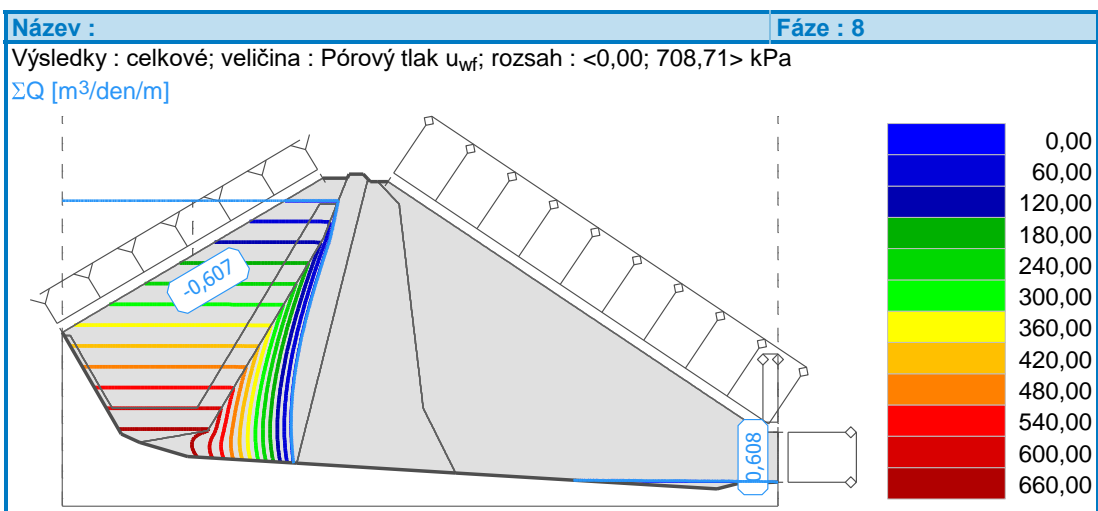
Obrázek 23: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 5



Obrázek 24: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 6



Obrázek 25: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 7



Obrázek 26: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 8

Vyhodnocení průsaků za účelem porovnání s předpokládanou reálnou hodnotou průsaku proběhlo obdobným způsobem jako před změnou  $K_{x,sat}$  :

Trvání fáze	Průsak q	Průsak Q za dobu trvání fáze	Dnů ve fázi ve zkoumaném období	Průsak Q z fáze ve zkoumaném období
den	m <sup>3</sup> /den/m	m <sup>3</sup> /fáze	den	m <sup>3</sup> /zkoumaná část fáze
25	0.640	1021	0	0
41	0.621	1624	35	1387
75.5	0.657	3165	75.5	3165
75.5	0.645	3107	75.5	3107
31	0.637	1260	31	1260
31	0.624	1234	31	1234
87	0.608	3375	77	2987
			Suma	13139

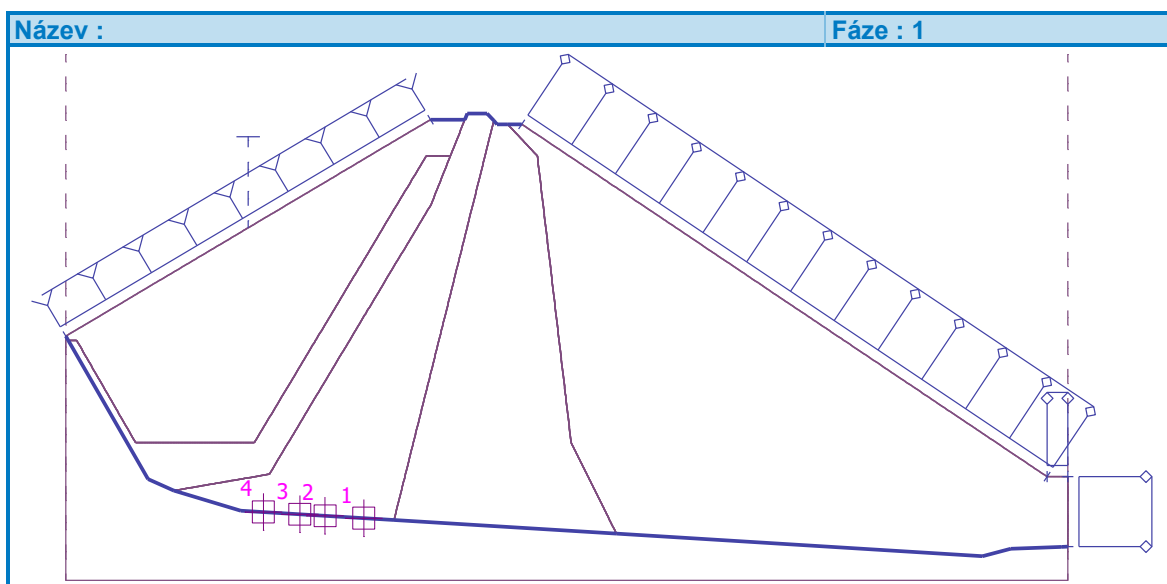
*Tabulka 7: Hodnoty průsaků dle modelu po změně nasycené hydraulické vodivosti ve vodorovném směru*

Hodnota průsaku za zkoumané období je v tomto případě 13 139 m<sup>3</sup>, což je blíže hodnotě 11 656 m<sup>3</sup> než hodnota získaná z přechozího modelu a pro další výpočty byl tedy užít model s opraveným  $K_{x,sat}$  .

### 5.3.2 Porovnání skutečných hodnot pórového tlaku s výsledky modelu

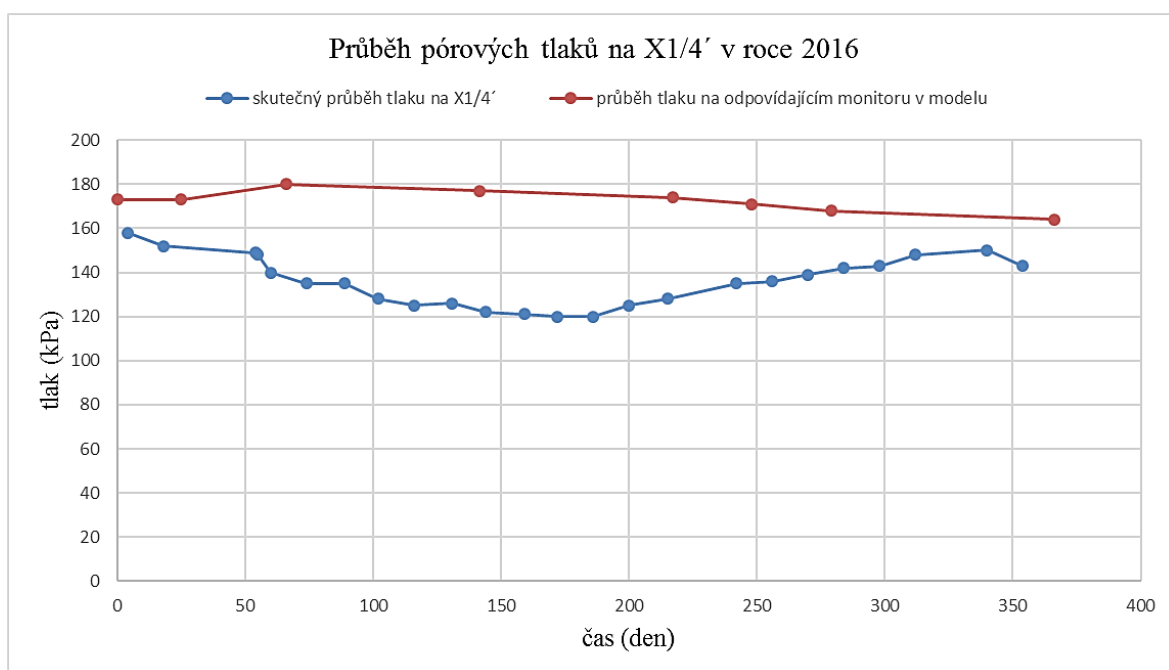
S výsledky numerické analýzy byly porovnány průběhy pórových tlaků na tlakoměrných krabicích MAIHAK [9], které jsou umístěny v oblasti těsnicího jádra a nesou označení X1/4, X2/4, X3/4, X4/4 a X1/4', X2/4', X3/4', X4/4'. Jedná se o dvě řady krabic, umístěných na horním povrchu vtokového objektu, přičemž poloha měřicího zařízení X1/4 v příčném řezu je stejná jako poloha v příčném řezu X1/4', respektive X2/4 odpovídá X2/4' etc. Řady mají jiné půdorysné umístění – řada X1/4, X2/4, X3/4, X4/4 je blíže pravému břehu, zatímco řada X1/4', X2/4', X3/4', X4/4' je instalována uprostřed šířky vtokového objektu. Pro porovnání byla vybrána data z řady tlakoměrných zařízení X1/4', X2/4', X3/4', X4/4'.

V programu GEO5 2017 – MKP byly vytvořeny 4 monitory svojí polohou odpovídající skutečné poloze tlakoměrných krabic (číslo monitoru odpovídá prvnímu číslu v názvu simulované tlakoměrné krabice):



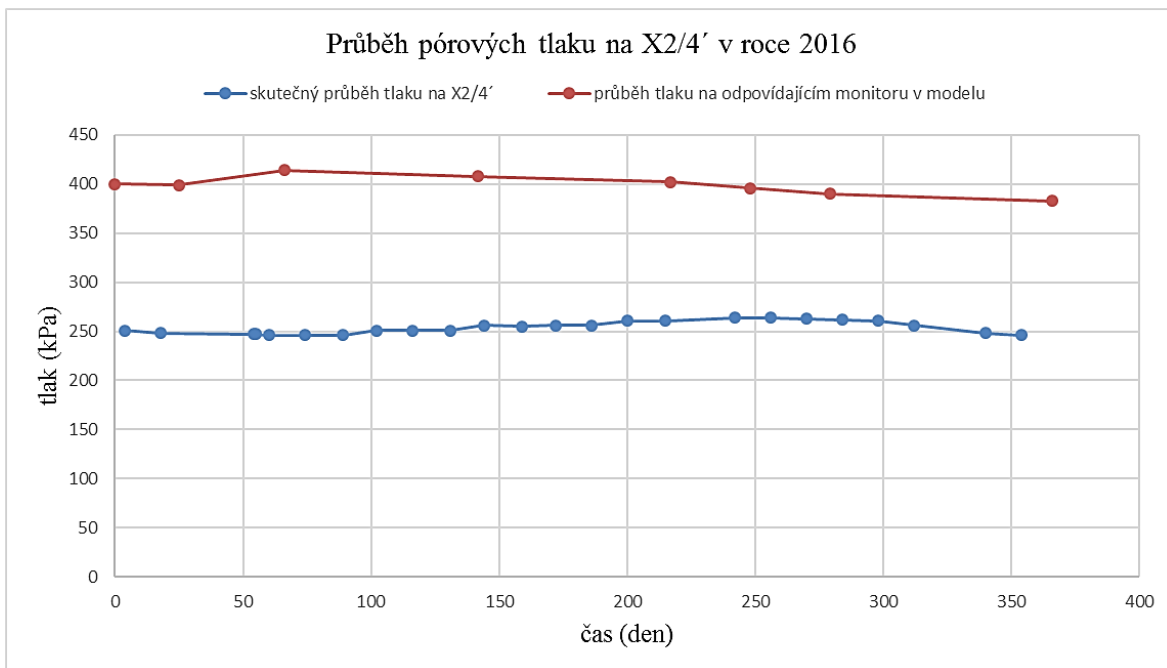
Obrázek 27: Monitory simulující tlakoměrná zařízení

Data z monitorů v průběhu modelovaného roku 2016 byla zpracována do tabulky. Nejvíce se model blíží realitě na straně těsnění bližší vzdušnému svahu. Tlak v místě tlakoměrného zařízení X1/4' se liší asi o 2–5 m vodního sloupce:



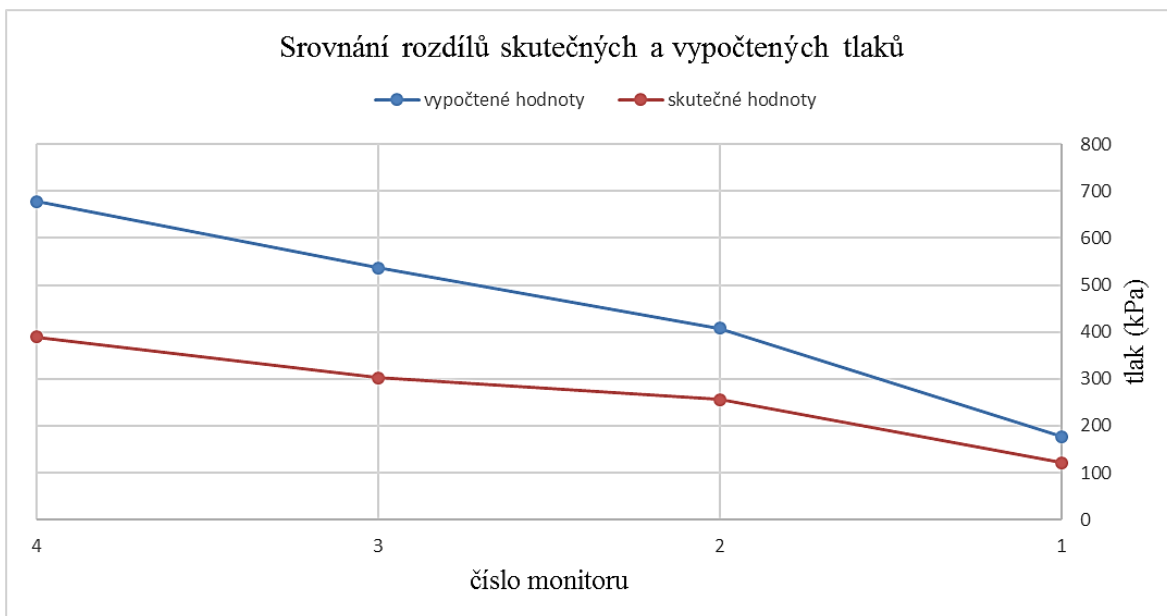
Graf 7: Průběh skutečného a vypočteného tlaku na tlakoměrném zařízení X1/4' v roce 2016

Nárůst rozdílu v měřených a modelovaných hodnotách tlaku při posunu k následujícímu tlakoměrnému zařízení je patrný z dalšího grafu:



Graf 8: Průběh skutečného a vypočteného tlaku na tlakoměrném zařízení X2/4' v roce 2016

Konečně nárůst rozdílu mezi skutečným a vypočteným tlakem směrem k návodnímu líci přehrady dokumentuje následující graf – na vodorovné ose jsou čísla monitorů (měřících zařízení), v pořadí odpovídajícímu příčnému řezu. Hodnoty jsou vzaty z konce května 2017:



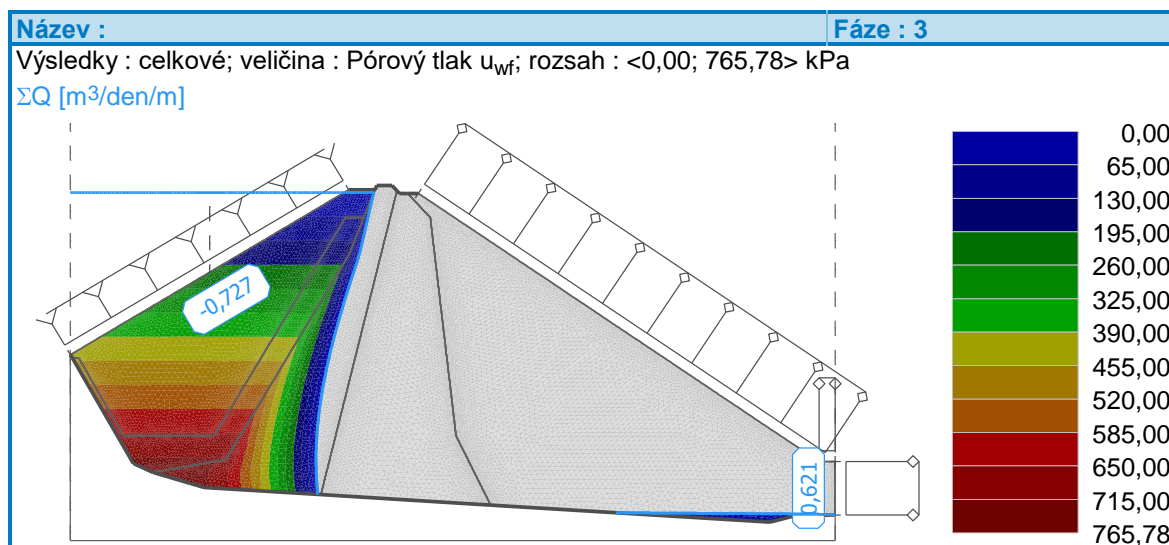
Graf 9: Srovnání rozdílů skutečných a vypočtených tlaků na X1/4', X2/4', X3/4' a X4/4'

Z toho bylo lze usuzovat, že:

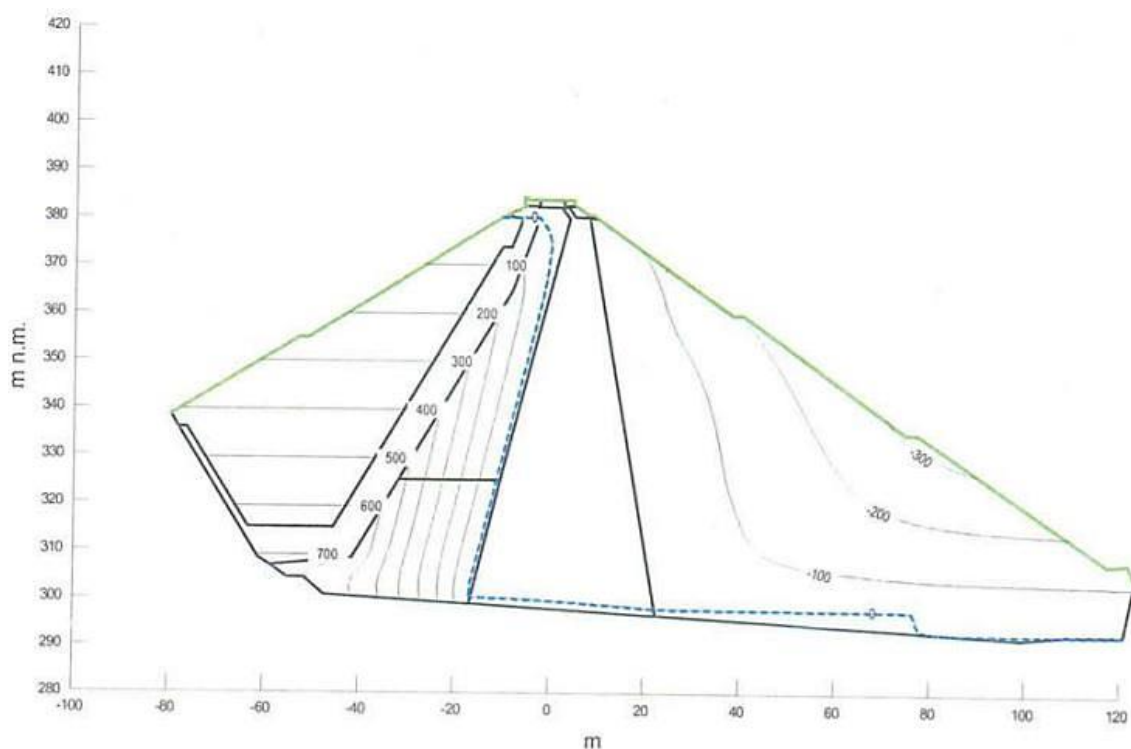
1. Ve skutečnosti má oproti modelu stabilizační a přechodová část daleko větší vliv na pokles hladiny podzemní vody.
2. V těsnicím jádru hladina podzemní vody neklesá tak rychle, hladina v těsnicím jádru má menší sklon (je více vodorovná). Pravděpodobně je reálná hodnota nasycené propustnosti ve svislém směru  $K_{z,sat}$  menší, než jaká byla užitá v modelu.

Pro získání modelu, který by lépe aproximoval skutečnost, by bylo zapotřebí důkladné kalibrace na základě měřených tlaků. Tato kalibrace by ale pravděpodobně vyžadovala opakovaně upravovat různé parametry všech materiálů a jako taková je nad rámec předkládané práce. Tato podkapitola však ukazuje některé aspekty nepřesnosti modelu, a jako taková ukazuje směr pro případné další práce.

Na druhou stranu, je možné konstatovat, že i předešlá studie [8] nebrala ohled na skutečné tlaky, jak vyplývá z následujícího porovnání průběhu HPV prezentovaného v [8] (hladina na kótě 380,5 m n.m.) a z výstupu 3. fáze, kdy je hladina na velmi podobné kótě (380,8 m n.m.):



Obrázek 28: Rozložení pórových tlaků a průběh HPV



Obr. č. 5 Pórové tlaky v hrázi při zásobní hladině 380,50 m n. m.

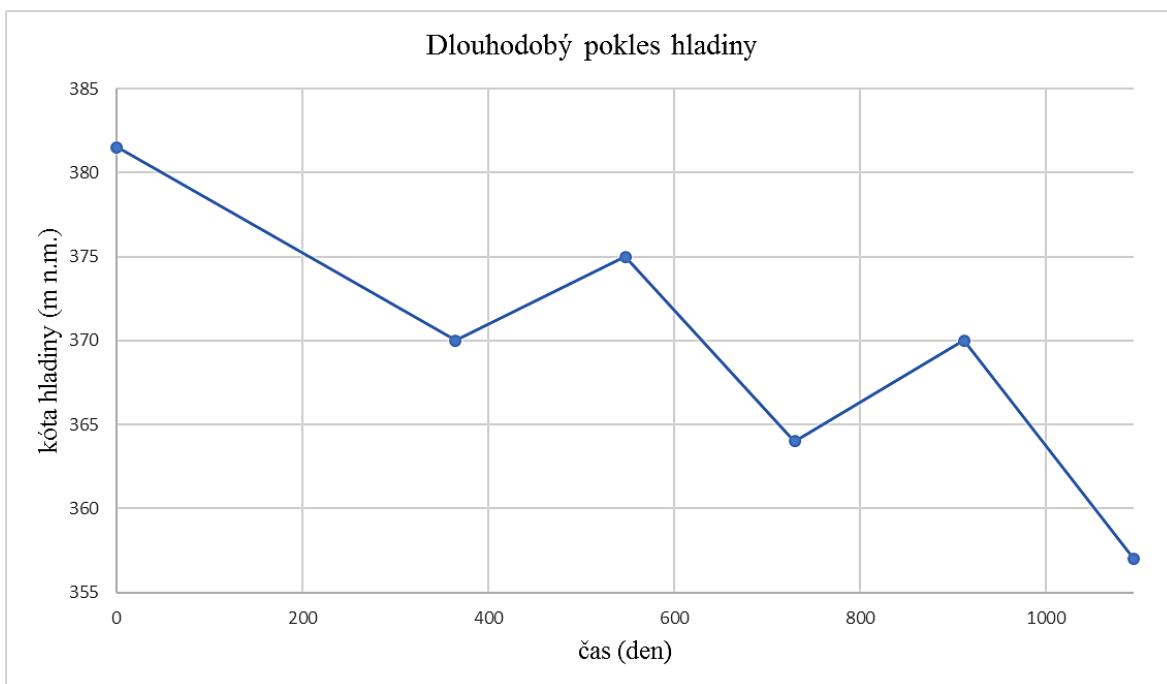
Obrázek 29: Rozložení pórových tlaků a průběh HPV prezentovaný v předešlé studii [8]

## 5.4 Model dlouhodobého poklesu hladiny

Po předešlých krocích byl modelován myšlený dlouhodobý pokles hladiny. Pokles byl vytvořen přibližně stejný jako byl na základě klimatického scénáře RB2 vytvořen v [8]. Bylo uvažováno, že během tří let klesne hladina z maximální úrovně (381 m n.m.) pod úroveň stálého nadržení na kótu 357 m n.m. s dvěma mírnými vzestupy hladiny v důsledku srážkové dotace.

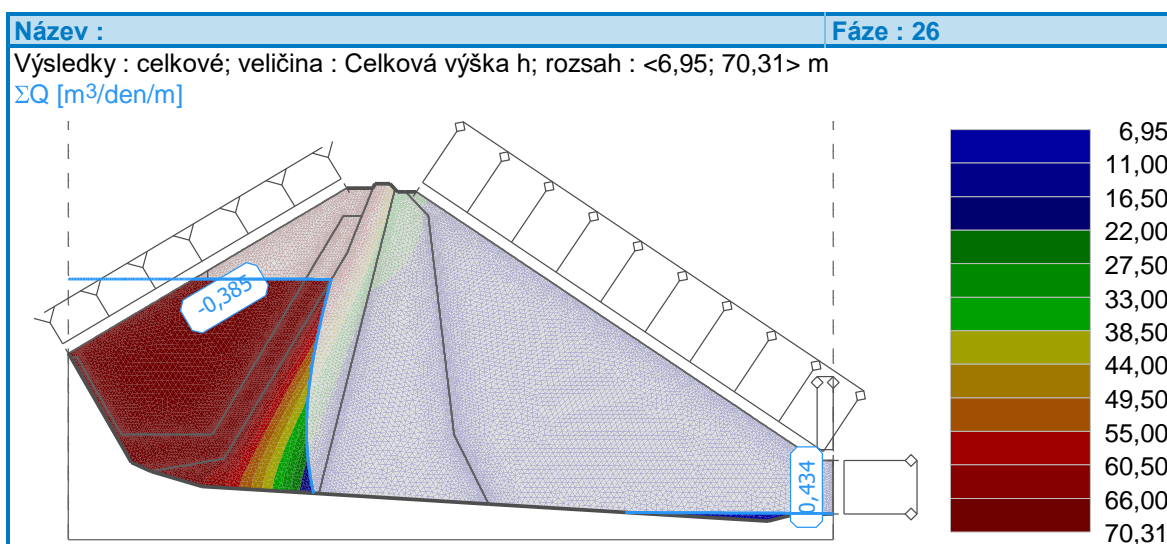
Počet roků od počátku	Počet dnů od počátku	Trvání (den)	Kóta hladiny (m n.m.)	Výška hladiny nad bodem [0,0] v modelu (m)
0	0		381.5	44.55
1	365	365	370	33.05
1.5	547.5	182.5	375	38.05
2	730	182.5	364	27.05
2.5	912.5	182.5	370	33.05
3	1095	182.5	357	20.05

Tabulka 8: Uvažovaný průběh hladiny



Graf 10: Uvažovaný průběh hladiny

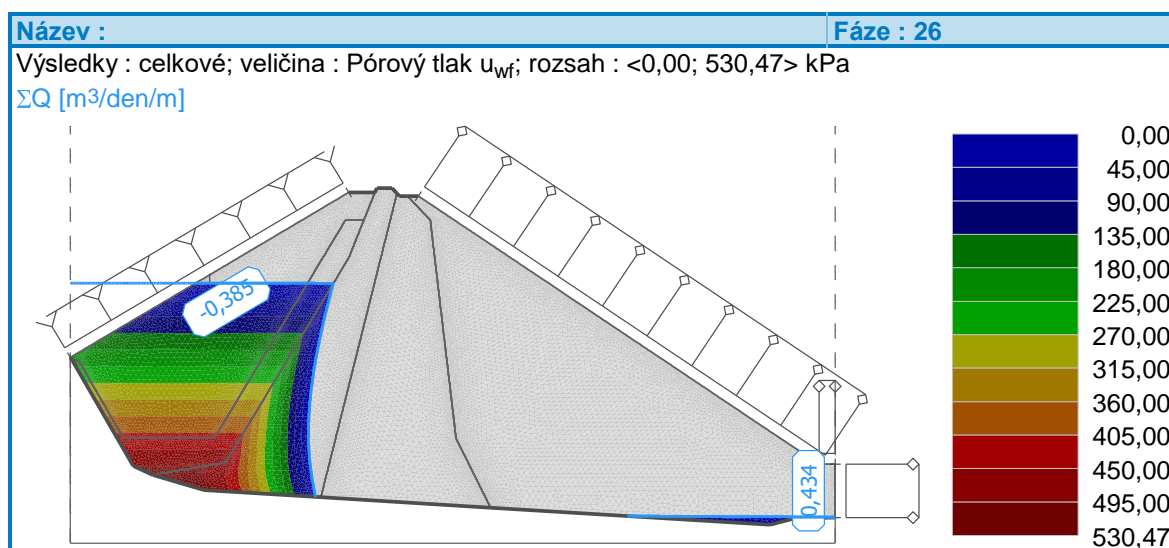
Tento průběh hladiny byl navázán na předešlý model průběhu hladiny v roce 2016 tak, že prvotní nárůst hladiny na maximální hladinu byl uvažován za období 30 dnů. Průběh byl vymodelován pro zajištění stability výpočtu v 18 fázích. V poslední fázi bude dle modelu vypadat průběh HPV takto (zobrazena celková výška v m):



Obrázek 30: Fáze 26 – hladina na kótě 357 m n.m., celková výška h

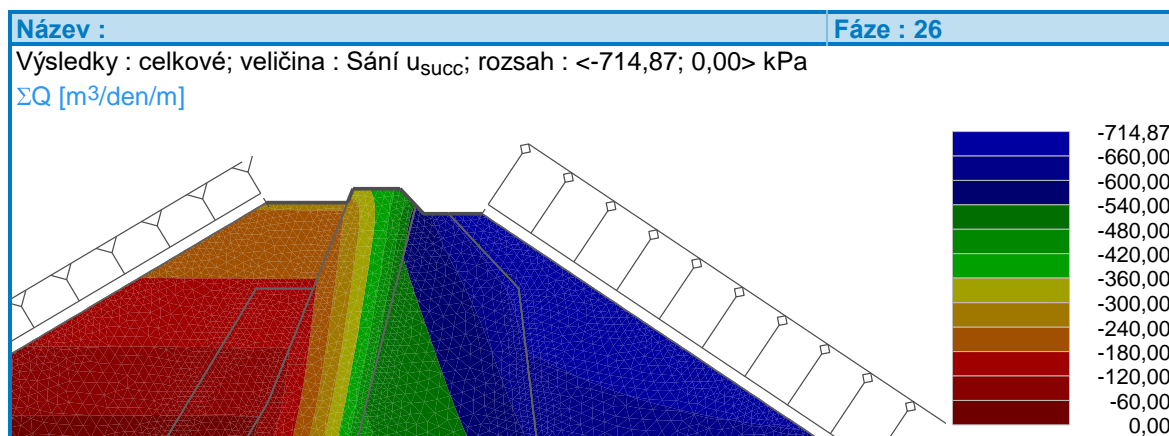


Rozložení pórových tlaků je pak vidět na následujícím výstupu z programu.



Obrázek 31: Fáze 26 – hladina na kótě 357 m n.m., pórový tlak

Hodnoty sání neboli záporné tlakové výšky jsou pak zřejmé z následujícího výstupu. Zobrazen je detail těsnění pod korunou hráze, protože tato oblast bude případně ohrožena vysycháním nejdříve.



Obrázek 32: Fáze 26 – hladina na kótě 357 m n.m, záporný tlak

Dle tohoto modelu se vpravo pod korunou hráze může hodnota záporného tlaku v těsnicím jádře blížit hodnotě -550 kPa. Tato hodnota je mimo rozsah dostupné retenční křivky, ale pokud bychom lineárně extrapolovali počáteční část retenční křivky, bude tento záporný tlak odpovídat objemové vlhkosti  $\theta = 0,18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , což je asi poloviční objemová vlhkost oproti objemové vlhkosti při plném nasycení. To je hodnota o málo menší, než hodnota odečtená z obrázku č. 6 v předešlé studii, který prezentuje vymodelované rozložení objemové vlhkosti za obdobného stavu hladiny [8].

## 6. ZÁVĚR


Numerická analýza vlhkostních poměrů těsnicího jádra VD Dalešice úspěšně proběhla v programu GEO5 2017 – MKP. Byl modelován průběh hladiny v roce 2016 a proběhlo porovnání výsledků tohoto modelu s naměřenými hodnotami průsaků a pórových tlaků. Model byl kalibrován dle hodnot průsaků. Po kalibraci byl vymodelován myšlený dlouhodobý pokles hladiny.

Sledován byl vývoj objemové vlhkosti, respektive sání. Na konci modelovaného dlouhodobého poklesu hladiny byla spočtena nejnižší hodnota objemové vlhkosti v těsnicím jádře  $\theta = 0,18 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , tedy objemová vlhkost poloviční oproti objemové vlhkosti plně nasycené zeminy.

Vzhledem k tomu, že ke vzniku trhlin od vysychání může docházet při vstupu vzduchu do pórů materiálu, tedy již při malém sání a hodnotách objemové vlhkosti blízkých objemové vlhkosti plně nasycené zeminy (jak je popsáno v kapitole 2), je zřejmé, že vlhkostní poměry těsnicího jádra jsou v rozsahu potenciálního vzniku trhlin od vysychání.

Protože trhliny od vysychání vznikají při překročení pevnosti v tahu zeminy, bylo by pro posouzení rizika jejich vzniku na VD Dalešice zapotřebí znát hodnoty pevnosti v tahu materiálu těsnicího jádra při spočtených sáních. Lze tedy doporučit experimentální určení závislosti pevnosti v tahu materiálu na vlhkosti, respektive sání.

Konečně, protože vznik trhlin od vysychání je závislý nejen na vlhkosti a tahové únosnosti materiálu, ale i na rozložení napětí v oblasti, lze konstatovat, že případně je více ohrožena horní část těsnicího jádra, kde je menší přitížení. Pro vyšetření možnosti vzniku trhlin od vysychání by tedy bylo zapotřebí vytvořit napjatostní analýzu hráze a její výsledky interpretovat v souběhu s výsledky analýzy vlhkostních poměrů.

  
Praha, 27.5.2017

  
Jan Štícha

## 7. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH PODKLADŮ

- [1] VD Dalešice. *Povodí Moravy* [online]. -: Media Age Digital, 2010 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodni-dila/dalesice/>
- [2] *Manipulační řád pro Vodní dílo Dalešice*. Vodní díla - TBD a.s., 2015.
- [3] VD Mohelno. *Povodí Moravy* [online]. -: Media Age Digital, 2010 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/uzitecne/vodni-dila/mohelno/>
- [4] *Mapy.cz* [online]. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=16.1080827&y=49.1337269&z=13&l=0&q=Dale%C5%A1ice>
- [5] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Vyd. 1. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 8086660117.
- [6] U přehrady Dalešice opravují dělníci korunu hráze, po 40 letech. *O vodárenství* [online]. 2016 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://www.ovodarenstvi.cz/clanky/u-prehrady-dalesice-opravuji-delnici-korunu-hraze-po-40-letech>
- [7] Dalešice s opravou hráze končí, Vranov začne. Musí přibýt i přívoz. *Jihlava.idnes.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: [http://jihlava.idnes.cz/opravy-hrazi-na-prehradach-dalesice-a-vranov-fm3-/jihlava-zpravy.aspx?c=A160924\\_2275267\\_jihlava-zpravy\\_mv](http://jihlava.idnes.cz/opravy-hrazi-na-prehradach-dalesice-a-vranov-fm3-/jihlava-zpravy.aspx?c=A160924_2275267_jihlava-zpravy_mv)
- [8] PETR, J., S. HOLOMEK a P. HOLOMEK, J. HODÁK, ed. *Elektrárna Dalešice - Studie opravy koruny hráze: Příloha Těsnící jádro - posouzení vlivu poklesu hladiny a výsledky laboratorních zkoušek*. Brno: Vodní díla - TBD a.s., 2013.
- [9] *Soubor podkladů poskytnutý Vodní díla - TBD, a.s.*
- [10] ŘÍHA, Jaromír. *Ochranné hráze na vodních tocích*. Praha: Grada Publishing, 2010. Stavitel. ISBN 9788024735702.

- [11] Desiccation cracking of soil layers. KODIKARA, J.K., S.L. BARBOUR a D.G. FREDLUND. *Soilvision* [online]. Singapore, 2000 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.soilvision.com/subdomains/unsaturatedsoil.com/Docs/Research%20Papers/2000/Conference%20Papers/Desiccation%20cracking%20of%20soil%20layers.pdf>
- [12] WIN, San. *TENSILE STRENGTH OF COMPACTED SOILS SUBJECT TO WETTING AND DRYING*. Sydney, 2006. The University of New South Wales - School of Civil and Environmental Engineering.
- [13] SENTENAC, Philippe, Marcin ZIELINSKI a Mark DYER. *INFLUENCE OF THE DESICCATION FINE FISSURING ON THE STABILITY OF FLOOD EMBANKMENTS: FINAL REPORT INCLUDING LABORATORY STUDIES*. 2009. Dostupné také z: [https://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/downloads/UR14\\_2009%20Final%20version\\_nso.pdf](https://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/downloads/UR14_2009%20Final%20version_nso.pdf). University of Strathclyde.
- [14] PERON, Hervé, Lyesse LALOU, Tomasz HUECKEL a Liang HU. Desiccation cracking of soils. *Revue européenne de génie civil* [online]. 2009, **13**(7-8), 869-888 [cit. 2017-05-26]. DOI: 10.3166/ejece.13.869-888. ISSN 17747120. Dostupné z: <http://ejece.revuesonline.com/article.jsp?articleId=13758>
- [15] DYER, Mark, Stefano UTILI a Marcin ZIELINSKI. *THE INFLUENCE OF DESICCATION FINE FISSURING ON THE STABILITY OF FLOOD EMBANKMENTS*. 2007. Dostupné z: <https://web.sbe.hw.ac.uk/frmrc/downloads>. University of Strathclyde.
- [16] ŠEJNOHA, Michal, Jan PRUŠKA, Tomáš JANDA a Miroslav BROUČEK. *Metoda konečných prvků v geomechanice: teoretické základy a inženýrské aplikace*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 9788001057438.
- [17] *Soubor podkladů poskytnutý ČEZ, a. s., Vodní elektrárny*.

## 8. SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

### 8.1 Obrázky

Obrázek 1: Zájmová lokalita [4].....	3
Obrázek 2: Rekonstruovaná koruna hráze (foto autor 10.4.2017) .....	5
Obrázek 3: Injekční chodba (foto autor 10.4.2017) .....	6
Obrázek 4: Most k vtokovému objektu na PVE (foto autor 10.4.2017).....	6
Obrázek 5: Segmentové uzávěry bezpečnostního přelivu (foto autor 10.4.2017).....	7
Obrázek 6: Spadiště (foto autor 10.4.2017).....	8
Obrázek 7: Skluz (foto autor 10.4.2017) .....	8
Obrázek 8: Model hráze s měřicími přístroji [13] .....	13
Obrázek 9: Model po sedmidenním sušení v souvislosti s měřeným odporem [13].....	13
Obrázek 10: Trhliny od vysychání na koruně nové hráze [15] .....	14
Obrázek 11: Trhliny od vysychání pozorované ve zkušebním výkopu (v hloubce 600 mm pod povrchem) v protipovodňové hrázi Thorngumbald [15] .....	15
Obrázek 12: Trhliny od vysychání a jejich šířka v historické protipovodňové hrázi (hloubka výkopu 1 m) [15] .....	15
Obrázek 13: Síť trhlin od vysychání pozorovaná v ručně vykopaném zkušebním výkopu na koruně nové hráze [15].....	16
Obrázek 14: Schématický příčný řez v údolní části hráze [17].....	21
Obrázek 15: Geometrie modelu.....	22
Obrázek 16: Okrajové podmínky .....	22
Obrázek 17: Síť konečných prvků.....	23
Obrázek 18: Parametry zemin .....	30
Obrázek 19: Schématický podélný řez hrází [17] .....	31
Obrázek 20: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 2 .....	32
Obrázek 21: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 3 .....	33
Obrázek 22: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 4 .....	33
Obrázek 23: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 5 .....	33
Obrázek 24: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 6 .....	34
Obrázek 25: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 7 .....	34
Obrázek 26: Hodnoty pórového tlaku a hodnota průsaku ve fázi 8 .....	34

Obrázek 27: Monitory simulující tlakoměrná zařízení.....	36
Obrázek 28: Rozložení pórových tlaků a průběh HPV .....	38
Obrázek 29: Rozložení pórových tlaků a průběh HPV prezentovaný v předešlé studii [8]	39
Obrázek 30: Fáze 26 – hladina na kótě 357 m n.m., celková výška h.....	40
Obrázek 31: Fáze 26 – hladina na kótě 357 m n.m., pórový tlak .....	41
Obrázek 32: Fáze 26 – hladina na kótě 357 m n.m, záporný tlak .....	41

## 8.2 Tabulky

Tabulka 1: Rozdělení prostorů v nádrži [2].....	9
Tabulka 2: m-denní průtoky [2] .....	10
Tabulka 3: N-leté průtoky [2].....	10
Tabulka 4: Body retenční křivky .....	24
Tabulka 5: Body aproximovaného průběhu hladiny .....	29
Tabulka 6: Hodnoty průsaků dle modelu .....	32
Tabulka 7: Hodnoty průsaků dle modelu po změně nasycené hydraulické vodivosti ve vodorovném směru .....	35
Tabulka 8: Uvažovaný průběh hladiny.....	39

## 8.3 Grafy

Graf 1: Retenční křivka zeminy těsnicího jádra [8] .....	24
Graf 2: Retenční křivka po úsecích lineárně aproximovaná.....	25
Graf 3: Srovnání původní aproximované a nalezené retenční křivky .....	26
Graf 4: Srovnání původní aproximované a retenční křivky nalezené pomocí tří proměnných .....	27
Graf 5: Srovnání původní aproximované a retenční křivky nalezené .....	28
Graf 6: Skutečný [9] a po úsecích lineárně aproximovaný průběh hladiny v roce 2016 ....	29
Graf 7: Průběh skutečného a vypočteného tlaku na tlakoměrném zařízení X1/4' v roce 2016 .....	36
Graf 8: Průběh skutečného a vypočteného tlaku na tlakoměrném zařízení X2/4' v roce 2016 .....	37
Graf 9: Srovnání rozdílů skutečných a vypočtených tlaků na X1/4', X2/4', X3/4' a X4/4'	37
Graf 10: Uvažovaný průběh hladiny .....	40