



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

ODVODNĚNÍ STAVEBNÍ JÁMY - NUMERICKÁ ANALÝZA

DEWATERING OF FOUNDATION PIT - NUMERICAL ANALYSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Krejzar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LUMÍR MIČA, Ph.D.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Vojtěch Krejzar
Název	Odvodnění stavební jámy - numerická analýza
Vedoucí práce	doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2020
Datum odevzdání	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Ou, Ch-Y. (2006): Deep excavation, Theory and Practice, Taylor and Francis

Powers, J.P., Corwin, A.B., Schmall, P.C., Kaeck, W.E. (2007): Construction Dewatering and Groundwater Control, John Wiley and Son

Zdroje z internetu

Případné další podklady budou předány v průběhu řešení diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Tématem diplomové práce je ověření možnosti modelování odvodnění stavební jámy metodou konečných prvků (MKP). Cílem bude navrhnout možnost modelování odvodňovacích studní a jejich vliv na změnu hladiny vody v důsledku čerpání. Dále analyzovat vliv hustoty konečných prvků a stanovit velikost numerického modelu k řešené problematice. K ověření možnosti modelování odvodnění stavební jámy bude provedeno srovnání výpočty založených na analytickém přístupu. Analýza bude provedena na zvoleném příkladu, kde v podloží budou písky.

Při zpracovávání bakalářské práce vycházejte z výše uvedených podkladů a věnujte pozornost zejména těmto bodům:

1. Rešerše – současný stav v modelování odvodnění stavební jámy pomocí MKP.
2. Modelování studny v MKP pro dokonalou a nedokonalou studnu a srovnání s analytickým řešením.
3. Modelování odvodnění stavební jámy v MKP a srovnání s analytickým řešením.

Ve struktuře práce by měly být zejména tyto kapitoly:

1. Rešerše
2. Modelování
3. Shrnutí a diskuse
4. Závěr

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Předmětem práce je numerická analýza odvodnění stavební jámy. Úvodem jsou zmíněny příklady z praxe a shrnuty potřebné teoretické podklady. Jednotlivé dílčí problémy jsou modelovány jako 2D a 3D úlohy na zvoleném příkladu stavební jámy. Jsou srovnávány s analytickým řešením a teoretickými poznatky o daném problému. Studie se zaměřují na stanovení přítokového množství, tvar depresní křivky, určení velikosti numerického modelu a vliv hustoty sítě konečných prvků. Analyzovány jsou případy stacionárního proudění s volnou hladinou, povrchově odvodněná hydraulicky dokonalá stavební jáma, dokonalá a nedokonalá studna, soustava studní a pažená stavební jáma. V práci je navržen způsob modelování studny v MKP. Hlavním výstupem pak je 3D analýza odvodnění pažené stavební jámy pomocí soustavy nedokonalých studní.

KLÍČOVÁ SLOVA

Numerické modelování, metoda konečných prvků, hydraulika, proudění podzemní vody, pórový tlak, hladina podzemní vody, odvodnění, stavební jáma, studna, drén, depresní kužel, Plaxis 2D, Plaxis 3D

ABSTRACT

The subject of the presented thesis is a foundation pit dewatering numerical analysis. The study is introduced with practical examples and the summary of the necessary theory. Individual subtasks are modeled as two or three-dimensional problem on a chosen foundation pit example. A comparison with analytical methods and theoretical knowledge about the problem is made. The studies focus on specifying the pumped water quantity, the shape of the depression curve, determining the size of the numerical model and the influence of the finite element network density. The steady-state flow cases, water table aquifer, a well system, sheet pile wall cutoff effect, surface drained pit and partial penetration cases are analyzed. The work proposes a method of modeling a well by FEM. The main output is a 3D analysis of a submerged excavation dewatered with a partially penetrated well system.

KEYWORDS

Numerical modeling, finite element method, hydraulics, groundwater flow, pore pressure, water head, construction dewatering, foundation pit, well, drain, aquifer, partial penetration, drawdown, discharge, Plaxis 2D, Plaxis 3D

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJZAR, Vojtěch. *Odvodnění stavební jámy - numerická analýza*. Brno, 2021. 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Odvodnění stavební jámy - numerická analýza* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 15. 1. 2021

Bc. Vojtěch Krejzar
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Odvodnění stavební jámy - numerická analýza* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2021

Bc. Vojtěch Krejzar
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Lumíru Mičovi, Ph.D, za čas při četných online konzultacích, Ing. Václavovi Račanskému, Ph.D. za konzultaci a podnět k vypracování a dále své manželce za péči a podporu.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Rešerše - současný stav v modelování odvodnění stavební jámy	11
3	Cíle a metodika	13
3.1	Cíle práce.....	13
3.2	Metodika	14
3.2.1	Metody zkoumání	14
3.2.1.1.	Analytická metoda	14
3.2.1.2.	Numerická metoda	14
3.2.2	Postup práce	15
3.2.3	Zpracování výsledků	15
4	Matematické modelování - Teoretický rozbor	16
4.1	Odvodnění stavební jámy – analytický přístup.....	16
4.1.1	Rozdělení matematických modelů podle prostorové dimenze	16
4.1.2	Rozdělení matematických modelů podle časového režimu	17
4.1.3	Darcyho zákon	17
4.1.4	Řídící rovnice pohybu vody	17
4.1.5	Dupuitovy předpoklady.....	18
4.1.6	Ideální zvodeň	18
4.1.7	Rozdělení proudění podle tlakového režimu	19
4.1.8	Odvodnění stavebních jam	20
4.1.8.1.	Hlubkové odvodnění – studny	20
4.1.8.2.	Povrchové odvodnění	24
4.2	Odvodnění stavební jámy – numerický přístup	25
4.2.1	Numerické metody obecně	25
4.2.2	Řešení problému proudění podzemní vody v programu PLAXIS... ..	25
4.2.2.1.	Hydraulické podmínky	25
4.2.2.2.	Typy výpočtu proudění podzemní vody	27
4.2.2.3.	Způsoby výpočtu pórového tlaku	27
5	Matematické modelování - případové studie.....	27
5.1	Svahovaná stavební jáma odvodněná povrchově	27
5.1.1	Popis geometrie, geologie.....	28
5.1.2	Analytické řešení.....	28

5.1.3	Numerické modelování	28
5.1.3.1.	Přítok do jámy a tvar depresní křivky	29
5.1.3.2.	Vliv velikosti modelu	32
5.1.3.3.	Vliv součinitele hydraulické vodivosti na depresní křivku a na Q	35
5.1.3.4.	Vliv anizotropie	37
5.2	Pažená stavební jáma odvodněná studnami	37
5.2.1	Popis konstrukce, geologie	38
5.2.2	Návrh odvodnění	39
5.2.3	Analytické řešení	39
5.2.3.1.	Řešení skupiny studní	39
5.2.3.2.	Ověření specifického průtoku	40
5.2.4	Numerické modelování	41
5.2.4.1.	Modelování samostatné studny	41
5.2.4.2.	3D úloha – pažená jáma	48
6	Shrnutí výsledků a diskuse	57
7	Závěr	59

1 ÚVOD

Důležitou součástí projektů zakládání staveb pod úrovní hladiny podzemní vody je návrh způsobu odvodnění. V souladu s tendencemi současné výstavby nastává tento případ velmi často. Při návrhu odvodnění se zohledňuje řada faktorů: hydrogeologické podmínky, technické podmínky, jako parametry zakládaného objektu, negativní vlivy na okolí, způsob provádění a provozu odvodňovacího systému, ekonomické faktory a další.

Není-li problému podzemní vody během přípravy stavby věnována dostatečná pozornost, může docházet ke značným změnám v projektu během výstavby, zpožděním při jeho provádění, případně k úplnému přehodnocení stavebního záměru. Konečným důsledkem je celkové prodražení stavby.

Běžný způsob řešení úloh proudění podzemní vody spočívá v použití vzorců založených na kombinaci analytického a empirického přístupu. Potřeba získat přesné výsledky i ve složitějších, obecných případech vede k využití pokročilých výpočetních programů, které pracují na základě matematických numerických metod a ve spojení s rozvíjející se výpočetní technikou tvoří užitečný nástroj k řešení problému odvodnění.

2 REŠERŠE - SOUČASNÝ STAV V MODELOVÁNÍ ODVODNĚNÍ STAVEBNÍ JÁMY

Po prohledání veřejně dostupných zdrojů na internetu bylo konstatováno, že příklady řešení numerické analýzy odvodnění stavební jámy je velmi obtížné najít. Vhodný příklad řešení se nepodařilo nalézt zejména v českém jazyce, v anglickém jazyce už bylo hledání úspěšnější. Především pak schází odborné články popisující komplexní případ odvodnění modelovaný v programu PLAXIS, který je využit v rámci této diplomové práce.

Modelování proudění podzemní vody některou z numerických metod je možné za využití řady programových systémů, mezi nimi jsou například: ANSYS-FLOTRAN, AQUA, ABAQUS, COSMOS, MODFLOW, FEFLOW, FLOW-PATH, GMS, PLAXIS, PlaxFlow,... Programy se od sebe liší svým zaměřením, schopnostmi, možnostmi modelovat jednotlivé 3D a 2D úlohy.

V následujícím textu budou uvedeny některé příklady využití numerického modelu při návrhu odvodnění.

3D Model: Feasibility of Proposed Tunneling in a Stratified Aquifer

V publikaci (1), kapitola 7, str. 106-110 je představen příklad použití numerických metod v rámci studie proveditelnosti. Pro modelování je využíván systém MODFLOW. Úsek navrhovaného tunelu průměru 4,9 m prochází vrstevnatým zvodněným kolektorem štěrkovitých zemin glaciálního původu, s velmi variabilní propustností. Navrhovaná technologie ražby je *Tunnel Boring Machine* (TBM). Konstrukce primárního ostění vyžadovala snížení hladiny podzemní vody v předstihu před samotným tunelováním. Situaci komplikuje blízkost městského jímacího zařízení, jehož činnost nesmí být ovlivněna.

Komplexní řešení vyžadovalo vytvoření regionálního, lokálního a sub-lokálního modelu, Odvodnění je simulováno řadou studní v rozestupu cca 15 m na obou stranách podél trasy tunelu. Ustálené čerpané množství predikované pomocí modelu bylo v předstihu před čelbou 1,7 l/min na 1 m délky tunelu. V další fázi byl modelován vstup tunelu do řešené oblasti modelu. Ostění tunelu bylo modelováno jako drén. Po vstupu tunelu do oblasti kleslo množství čerpané studnami na cca 0,7 l/min/m. Většina přítoku tedy i přes navržený systém odvodnění skončila v tunelu. Na základě těchto výsledků se návrh snižování hladiny nejevil jako praktický a došlo ke změně tunelovací technologie na použití zeminového štítu (EPB) a vodotěsného ostění.

Plaxis 8.6. Groundwater lowering - "Public underground garage Kapucinski square" in Varaždin

Video dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=w1cEBNeDznY>.

Na videu z roku 2016 je možné shlédnout ukázkou modelování odvodnění pažené stavební jámy v programu Plaxis ver.8.6. Ve 2D je namodelován řez stavební jámou šířky 80 m a hloubky 6 m. V podloží se nachází písčité a štěrkovité zeminy. Definovány jsou jednotlivé fáze výkopu a v každé fázi je proveden výpočet ustáleného stavu proudění podzemní vody. Odvodnění je řešeno povrchově. V poslední fázi je usnadněno díky drenážním konstrukcím tvořeným ocelovými pažnicemi průměru cca 0,4 m vyplněným drenážním materiálem. Sledován je pokles hladiny v okolí a celkové množství vody přitékající dnem do stavební jámy. Provedením vodorovného řezu dnem jámy je zjištěno množství v jednotkách $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. Celkový přítok v příslušné fázi výkopu je stanoven vynásobením rozměrem jámy kolmo k rovině řezu a převedením na l/s.

Anchored Diaphragm Wall and Dewatering System for Libya Hotel

Článek v časopise *Deep foundations* z roku 2017 pojednává o projektu podzemních stěn a systému odvodnění na stavbě hotelu ve městě Tripoli v Libyi. V podloží se nachází písčité zeminy. Analýza odvodňovacího systému byla provedena za použití programu Plaxis. Jsou zde zváženy dva případy za různých podmínek propustnosti: 1) izotropní zemina 2) anizotropní propustnost zeminy ($k_x=10k_y$). Ke snížení hladiny bylo navrženo 31 studní po obvodu jámy, k tomu další studny za účelem monitorování. Skutečný celkový přítok do jámy dosahoval průměrně 10 000 m³/den po dobu jednoho roku.

3 CÍLE A METODIKA

3.1 Cíle práce

Diplomová práce se zaměřuje především na naplnění těchto cílů:

- Ověřit možnost modelování odvodnění stavební jámy metodou konečných prvků.
- Stanovit velikost numerického modelu k řešení problematice.
- Posoudit vliv hustoty sítě konečných prvků na přesnost výsledků.
- Navrhnout způsob modelování odvodňovacích studní, pochopit jeho fungování v rámci jednodušších případů a aplikovat ve složitějším uspořádání.
- Ukázat vliv jednotlivých prvků návrhu stavební jámy na čerpané množství vody a snížení hladiny.
- Provést srovnání numericky řešených případů s analytickým přístupem, případně s obecnými teoretickými poznatky o dané problematice a potvrdit tak platnost získaných výsledků.

Zpracované téma nabízí řadu dalších souvisejících oblastí, na které však v rámci rozsahu této diplomové práce nezbývá prostor.

Neřeší se:

- Modelování úloh v prostředí 2D rovinné deformace (rýhy, liniové drény,...)
- Modelování nestacionárního proudění
- Modelování tlakového proudění
- Proudění v nenasycených zeminách
- Modelování studny dalšími způsoby, které práce neřeší, např. pomocí prvku „well“.

- Další aspekty návrhu odvodnění, jimž se jinak má věnovat pozornost, např. vliv poklesu hladiny podzemní vody na okolí, způsob odvádění vody, apod.

3.2 Metodika

Diplomová práce je teoretického rázu. Úkoly vytyčené v kapitole 3.1 jsou zkoumány formou jednotlivých případových studií na zvolených příkladech stavební jámy.

3.2.1 Metody zkoumání

Metodou zkoumání je matematické modelování proudění podzemní vody, a to ve vztahu k odvodnění stavební jámy. V práci jsou aplikovány a vzájemně srovnávány dva základní přístupy: Analytická metoda a numerická metoda.

3.2.1.1 Analytická metoda

Pro jednotlivé zkoumané problémy existují známé a po desetiletí používané analytické způsoby řešení, které byly svého času odvozeny a vyvinuty, a jež jsou dobře popsány v příslušné odborné literatuře, pojednávající o hydraulice podzemních vod. Vybrané teoretické podklady, které jsou v diplomové práci používány, jsou shrnuty v kap. 4.1. Zejména jde o tyto případy:

- Samostatná hydraulicky dokonalá studna při stacionárním proudění s volnou hladinou
- Samostatná hydraulicky nedokonalá studna při stacionárním proudění s volnou hladinou
- Povrchově odvodněná stavební jáma
- Soustava studní

3.2.1.2 Numerická metoda

V této práci bude řeč výhradně o *metodě konečných prvků – MKP*. Za využití programů *PLAXIS 2D a PLAXIS 3D, verze 2018.01* budou modelovány dva základní typy úloh:

- 2D úloha – rotační symetrie

Tímto typem úlohy budou modelovány jednoduché případy se svislou osou symetrie (samostatná studna), nebo případy, které lze na osovou symetrii převést (stavební jáma čtvercového půdorysu). Síť je vždy tvořena 15-ti uzlovými konečnými prvky trojúhelníkového tvaru.

- 3D úloha

Ve 3D bude namodelována pažená stavební jáma, jejíž modelování za snížení rozměrovosti by vedlo ke značným chybám. Síť je tvořena tetraedrickými 10-ti uzlovými konečnými prvky.

Pro modelování studny je v obou případech zvolen prvek „*drain*“.

3.2.2 Postup práce

Za účelem dosažení výše popsaných cílů, aby bylo možné namodelovat komplexní případ odvodnění stavební jámy a mohli jsme se spolehnout na výsledky numerické analýzy, bylo nutné nejprve:

- Zorientovat se v prostředí programu a poznat jeho možnosti, co se týká modelování proudění podzemní vody.
- Pochopit chování modelu v reakci na změny vstupních parametrů a okrajových podmínek.
- Pochopit funkci speciálních prvků (*drain*) a poznat jejich praktická omezení.
- Ověřit, zda takto získané výsledky odpovídají analytickému řešení.

Za tímto účelem byl zvolen postup řešení jednotlivých dílčích problémů formou případových studií. Na jejich základě pak bylo přistoupeno k řešení komplexnějšího problému.

3.2.3 Zpracování výsledků

Výsledky numerických i analytických výpočtů jsou zpracovávány do grafů a tabulek v programu Excel.

Vypočtené hodnoty veličin (typicky průtok ke studni Q) jsou v osově symetrické úloze uváděny na jednotku rovinného úhlu [rad^{-1}]. Pro získání celkových hodnot jsou jednotkové hodnoty násobeny plným úhlem (2π).

Zmíněný průtok Q je z [$\text{m}^3 \cdot \text{day}^{-1}$] převáděn na jednotku [$\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$], která je se zřetelem na rozsah hodnot obvyklý v této práci pro představu vhodnější.

Závěrem srovnávacích tabulek je doplňováno zhodnocení formou rozdílu vyjádřeného v procentech, není-li uvedeno jinak:

$$\text{Rozdíl} = \frac{Q_{\text{NUMERICKY}} - Q_{\text{ANALYTICKY}}}{Q_{\text{ANALYTICKY}}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Geometrické výsledky numerického modelu, jako např. tvar depresní křivky, jsou přenášeny do grafů způsobem popsaným v kap. 5.1.3.1.

4 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ - TEORETICKÝ ROZBOR

V této části jsou uvedeny vybrané poznatky z odborné literatury, jež byly k vypracování práce potřebné, s daným problémem úzce souvisí nebo o které se opírají závěrečné komentáře. Součástí jsou také kapitoly, které stručným přehledem umožňují zařazení v širším kontextu.

4.1 Odvodnění stavební jámy – analytický přístup

Analytické metody umožňují řešení omezeného počtu úloh. Jsou založeny na značné idealizaci skutečnosti, proto je správné jejich výsledky považovat spíše za odhady skutečných poměrů. Jsou-li však aplikovány s rozumným uvážením a hodnoty vstupních veličin jsou odpovídající, mohou tyto odhady posloužit velmi dobře.

Mezi výhody analytických modelů patří např.:

- Jsou rychlé, umožňují rozhodování v počátečních stádiích přípravy stavby.
- Umožňují pochopit vliv jednotlivých proměnných na návrh.
- Jsou vhodné k rychlé kontrole, zda řešení poskytovaná složitějšími numerickými modely jsou ve shodě s realitou.

4.1.1 Rozdělení matematických modelů podle prostorové dimenze

Veličiny popisující proudění podzemní vody, např. piezometrická výška h , jsou obecně spojitými funkcemi polohy v prostoru a času: $h = h(x,y,z,t)$. Při většině praktických úloh dochází ke zjednodušení snížením rozměrnosti:

- *Jednorozměrné modely proudění* – zanedbáváme vertikální a příčnou složku proudění, použitelnost je vázána k *Dupuitovým předpokladům*, viz kap. 4.1.5. Specifické případy jsou:
 - *Paralelní proudění*, $h = h(x,t)$; např. liniové stavby, jímací galerie
 - *Proudění v rotačně symetrické soustavě*, $h = h(r,t)$; zejména pro popis studní.
- *Dvojměrné modely proudění* – zanedbáváme jednu ze složek proudění:
 - *Úlohy vertikální filtrace*, $h = h(x,z,t)$; vede k sestavování sítě proudnic a ekvipotenciál, např. řešení proudění vody pod jezy, štětovými stěnami, průsak hrázemi.
 - *Úlohy filtrace v horizontální rovině*, $h = h(x,y,t)$; např. řešení rozsáhlých zvodní, vázány k využití Dupuitových předpokladů.
- *Trojrozměrné modely proudění*

4.1.2 Rozdělení matematických modelů podle časového režimu

Modely proudění lze rozdělit podle toho, zda je popisováno v závislosti na čase:

- *Stacionární (ustálené) proudění* – veličiny se v čase nemění, $h = h(x,y,z)$
- *Nestacionární (neustálené) proudění* – veličiny jsou závislé na čase, $h = h(x,y,z,t)$

4.1.3 Darcyho zákon

Jedním ze stavebních kamenů teorie proudění podzemní vody je zákon, který na základě známého pokusu formuloval Henry Darcy (1856).

$$q = k \cdot i \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (4.1)$$

kde q je specifický průtok (m/s), k je součinitel hydraulické vodivosti (m/s) a i je hydraulický gradient, nebo také sklon čáry piezometrické výšky.

Součinitel hydraulické vodivosti závisí na vlastnostech horninového prostředí. Stanovení jeho velikosti je jedním z nejdůležitějších úkolů při řešení úloh proudění podzemní vody, neboť chyba při jeho stanovení má přímý dopad na správnost výsledků.

Protože skutečná rychlost proudění vody v jednotlivých pórech zeminy je nezměřitelná, je zavedena fiktivní veličina *specifický průtok (filtrační rychlost) q* , která předpokládá, že kapalina spojitě vyplňuje zkoumanou oblast a umožňuje matematický popis spojitými funkcemi.

4.1.4 Řídící rovnice pohybu vody

Matematický popis proudění vody spočívá ve vyjádření pohybovými rovnicemi za dodržení zákona zachování hmotnosti (rovnice spjitosti) a dosazení zobecněného Darcyho vztahu. *Řídící rovnice stacionárního pohybu vody v nehomogenním anizotropním pórovitém prostředí* je formulována takto:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (4.2)$$

V případě že součinitel hydraulické vodivosti $k_x = k_y = k_z = \text{konst.}$, přejde rovnice (4.2) na tvar tzv. *Laplaceovy rovnice*:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (4.3)$$

Úpravami a dosazením okrajových podmínek je možné odvodit řadu analytických vztahů používaných v hydraulice podzemní vody.

4.1.5 Dupuitovy předpoklady

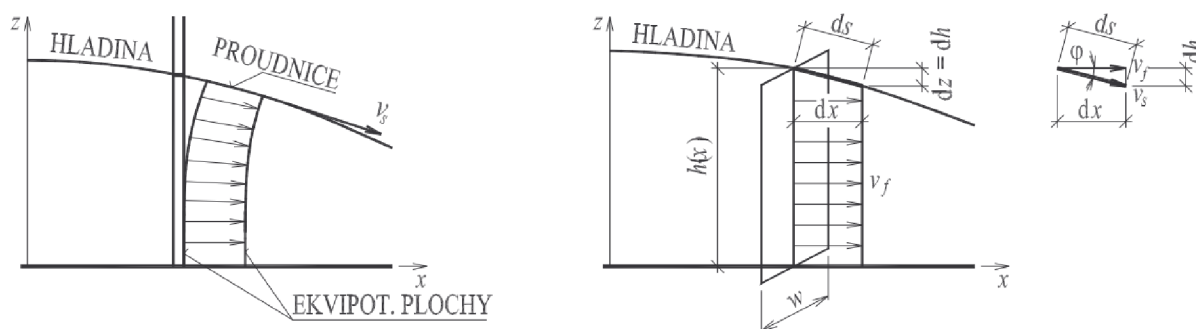
Na základě pozorování sklonů volné hladiny podzemní vody v přírodních podmínkách vyslovil Dupuit (1863) zjednodušující předpoklady, které výrazně usnadňují řešení úloh proudění podzemní vody.

V běžných podmínkách jsou sklony hladiny podzemní vody 1:100 ~ 1:1000, tedy velmi malé. Na tomto základě lze říct, že:

- Směr proudění je velmi blízký vodorovnému a je tak možné sklon dz/ds nahradit sklonem dh/dx . Pro specifický průtok q_x při stacionárním paralelním proudění ve směru osy x podle obr. 4-1, stanovený na základě Darcyho vztahu, pak platí:

$$q_x = -k_x i_x - k_x \frac{dz}{ds} \approx -k_x \frac{dh}{dx} \quad (4.4)$$

- Proudnice lze považovat za vodorovné přímky, ekvipotenciální plochy jsou svislé.
- Piezometrická výška dle obrázku je $h = h(x)$.
- Hydraulický gradient je po svislici konstantní a je dán sklonem volné hladiny v místě svislice.



Obr. 4-1 Dupuitovy předpoklady. Zdroj: (2)

Věcná přesnost modelů založených na těchto předpokladech je obvykle dostačující pro většinu praktických úloh. Výjimkou jsou oblasti, kde dochází k lokálnímu zvýšení hydraulického gradientu, např. na plášti studny.

4.1.6 Ideální zvoděň

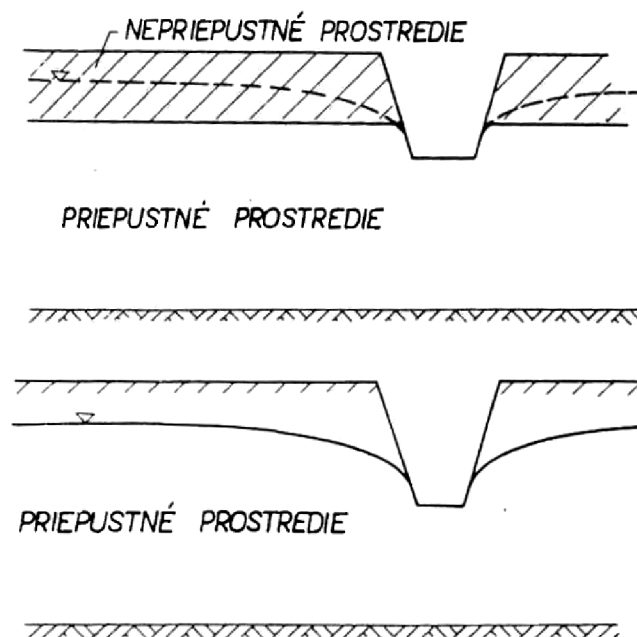
Zvoděň je definována jako vrstva zeminy plně nasycené vodou, která umožňuje její pohyb. Horní povrch zvodně tvoří *hladinu podzemní vody* (HPV). *Ideální zvoděň* je teoretický předpoklad, umožňující problém popsat matematickým modelem. Musí splňovat tyto předpoklady:

- Je *homogenní* a horizontálně sahá ve všech směrech až za oblast zájmu bez jakéhokoliv zdroje vody (např. infiltrace srážek) nebo odběru vody (evaporace), překážek či jiných okrajových podmínek.
- Tloušťka vrstvy je ve všech místech stejná, hladina je vodorovná.
- Je *izotropní*, tedy hydraulická vodivost je stejná ve všech směrech.
- Ze spodní strany je omezena nepropustným podložím (ve skutečnosti se jedná o vrstvu zeminy s hydraulickou vodivostí řádově nižší tak, že její propustnost lze zanedbat).
- Odvodňovací studna je bez tření, velmi malého průměru a proniká až na nepropustné podloží.

Další předpoklady, v nichž se realizují analytické výpočty proudění, jsou: nedeformovatelnost prostředí v důsledku proudění, konstantní hustota a objem proudící kapaliny, laminární režim proudění.

4.1.7 Rozdělení proudění podle tlakového režimu

- *Proudění s napjatou hladinou (též tlakové, artézské)* – Napjatá hladina může vzniknout ve zvodni omezené zespodu i shora nepropustnou vrstvou zeminy, kde tlak na hladině je větší než atmosférický. Po navrtání zvodně hladina vystoupá do tzv. piezometrické výšky.
- *Proudění s volnou hladinou (též beztlakové, gravitační)* – Není shora omezené nepropustnou vrstvou a v závislosti na okrajových podmínkách vytváří volnou hladinu.



Obr. 4-2 Shora: Tlakové proudění, beztlakové proudění. Zdroj: (3)

4.1.8 Odvodnění stavebních jam

Z hlediska způsobu odvodňování rozlišujeme:

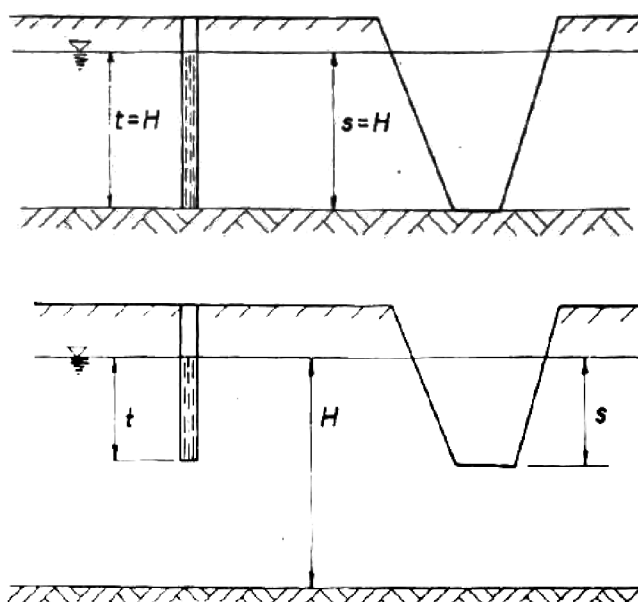
- *Povrchové odvodnění*
- *Hlubkové odvodnění*

Z hlediska orientace odvodňovacího zařízení:

- *Vertikální* – studny, soustavy studní, odvodňovací jehly, vertikální drény
- *Horizontální* – odvodňovací rýhy, sběrné štoly, horizontální drény

Z hlediska hloubky zabudování mohou být studny, rýhy nebo jámy:

- *Hydraulicky dokonalé (úplné)* – sahají až na nepropustné podloží
- *Hydraulicky nedokonalé (neúplné)* – nedosahují k nepropustnému podloží



Obr. 4-3 Dokonalá a nedokonalá studna (rýha). Zdroj: (3)

4.1.8.1. Hlubkové odvodnění – studny

Studny jsou svislá jímací zařízení obvykle kruhového půdorysu, zapuštěná do zvodněného kolektoru. Podle účelu rozeznáváme studny *jímací* a *vsakovací*, podle způsobu provádění *zděné* nebo *vrtané*.

Za předpokladu ideální zvodně (kapitola 4.1.6) a platnosti Dupuitova teorému (kapitola 4.1.5) je možné studny počítat jako rotačně symetrické úlohy.

4.1.8.1.1. Dosah účinnosti studny

Při čerpání vody ze studny dojde k vytvoření *depresního kužele* v jejím okolí. K hydraulickému řešení je třeba znát *dosah deprese* R (jinak také *poloměr depresního kužele*, *dosah vlivu studny*). Označuje vzdálenost od studny, ve které můžeme hladinu považovat za nesníženou.

Pro stanovení dosahu deprese jsou k dispozici různé empirické vzorce:

- Podle Sichardta:

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k} \quad (4.5)$$

- Podle Kusakina:

$$R = 575 \cdot s \cdot \sqrt{k \cdot H} \quad (4.6)$$

- Kozeny udává R jako funkci času:

$$R = 3 \cdot \sqrt{\frac{H \cdot k \cdot t}{n}} \quad (4.7)$$

Další teoretické poznatky jsou uvedeny v závěru kapitoly 5.1.3.2.

4.1.8.1.2. Hydraulické podmínky návrhu

Přílišný odběr podzemní vody může způsobit přetížení studny značnými hydraulickými gradienty na plášti. To má po určité době za následek vyplavování jemných částic, popř. zapískování nebo zakolmatování filtru, snížení účinnosti a celkové zkrácení doby životnosti. Hydraulické kritérium je dáno *mezním (kritickým) specifickým průtokem* q_{KRIT} [m/s] na plášti studny, který je empirickými vztahy stanoven z hydraulické vodivosti, popř. zrnitostních charakteristik materiálu zvodně.

Je zde uveden výčet podmínek na základě laboratorních měření různých autorů. Podmínky použití se liší v závislosti na konstrukčním uspořádání studny, a zejména na době čerpání. Jako příklad je doplněna výsledná hodnota q_{KRIT} pro $k = 10^{-4}$ m/s.

- Sichardt (1928):

$$q_{KRIT} = \frac{\sqrt{k}}{15} \quad \mathbf{0,667 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (4.8)$$

Bezpečnější úprava podle dalších autorů:

$$q_{KRIT} = \frac{\sqrt{k}}{30} \quad \mathbf{0,333 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (4.9)$$

- Abramov (1954):

$$q_{KRIT} = \frac{\sqrt[3]{k}}{30} \quad \mathbf{1,547 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (4.10)$$

- Pietraru (1982):

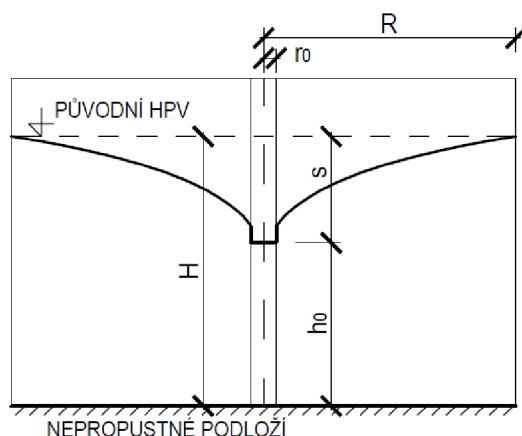
$$\begin{aligned} q_{KRIT} &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} && \text{pro } k = 1 \cdot 10^{-4} \sim 4 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ q_{KRIT} &= \mathbf{1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} && \text{pro } \mathbf{k = 0,6 \cdot 10^{-4} \sim 2 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \\ q_{KRIT} &= 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} && \text{pro } k = 0,15 \cdot 10^{-4} \sim 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned} \quad (4.11)$$

- Vzorec podle výzkumu VÚIS, doporučený v (3). Součinitel k se dosazuje v [m/den]:

$$q_{KRIT} = 80\sqrt[3]{k} \qquad 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \qquad (4.12)$$

4.1.8.1.3. Dokonalá studna s volnou hladinou

Na obr. 4-4 je schéma studny při proudění s volnou hladinou. Výsledné vztahy pro stanovení průtoku a tvaru depresního kužele jsou stanoveny za předpokladu platnosti Dupuitova teorému, na základě rovnice spojitosti a Darcyho vztahu.



Obr. 4-4 Studna při ustáleném proudění s volnou hladinou

Pro průtok Q k dokonalé studni za ustáleného proudění s volnou hladinou platí:

$$Q = -\pi k \frac{(H^2 - h_0^2)}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \qquad (4.13)$$

kde: k je součinitel hydraulické vodivosti [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

H je výška zvodně,

h_0 je výška vody ve studni,

R je dosah deprese studny,

r_0 je poloměr studny [m].

Geometrii depresního kužele lze v závislosti na vzdálenosti od osy studny vyjádřit jako:

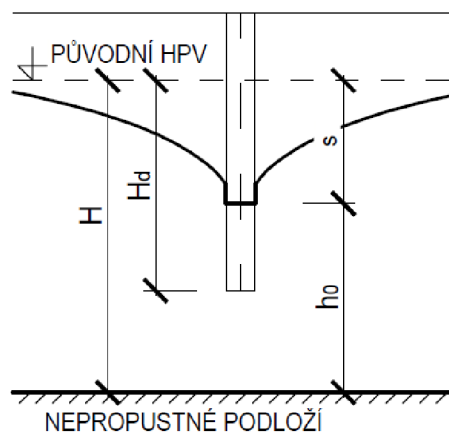
$$h(r) = \sqrt{-\frac{Q \ln \frac{r}{r_0}}{\pi k} + h_0^2} = \sqrt{\frac{H^2 - h_0^2}{\ln \frac{R}{r_0}} \cdot \ln \frac{r}{r_0} + h_0^2} \quad [\text{m}] \qquad (4.14)$$

kde: $h(r)$ je výška vodní hladiny nad nepropustným podložím ve vzdálenosti r od osy studny,
 r je vodorovná souřadnice vzdálenosti od studny.

4.1.8.1.4. Nedokonalá studna s volnou hladinou

Nedokonalá studna (viz obr. 4-5) je při větších mocnostech zvodněného kolektoru běžným typem. Jednotlivé efekty neúplnosti studny jsou popsány v závěru kapitoly 5.2.4.1.3.

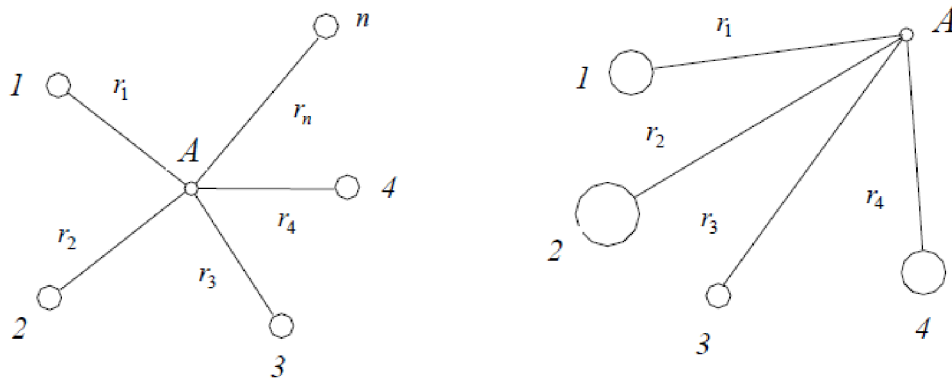
Různí autoři v jednotlivých publikacích podávají řadu možností řešení nedokonalých studní, které jsou většinou založeny na empirickém přístupu a platí za určitých podmínek. Tyto vztahy pak pochopitelně dávají různé výsledky, proto se doporučuje spočítat vícero z nich a konečné zvážení je na projektantovi.



Obr. 4-5 Nedokonalá studna při ustáleném proudění s volnou hladinou

4.1.8.1.5. Soustava dokonalých studní při ustáleném proudění s volnou hladinou

Využití soustavy studní je vhodné při potřebě snížení hladiny v širším území, např. stavební jámy. Analytické řešení soustavy dokonalých studní spočívá ve využití Dupuitových předpokladů a principu superpozice. Mějme soustavu n studní s poloměry $r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0n}$. Vzdálenosti středů studní k bodu A jsou r_1, r_2, \dots, r_n , viz obr. 4-6.



Obr. 4-6 Půdorysné schéma skupiny studní. Zdroj: (4)

Za předpokladu přibližně stejných odběrů $Q_1 \approx Q_2 \approx \dots \approx Q_n$, je možné celkový odběr soustavy $Q = n \cdot Q_i$, stanovit vzorcem

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h_A^2)}{\ln R - \frac{1}{n} \ln (r_1 r_2 \dots r_n)} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (4.15)$$

kde h_A je požadovaná hloubka vody v bodě A.

4.1.8.2. Povrchové odvodnění

4.1.8.2.1. Hydraulicky dokonalá stavební jáma při proudění s volnou hladinou

Jámu libovolného půdorysu lze po převedení na fiktivní kruhový půdorys o poloměru r_0 spočítat jako samostatnou studnu. Je-li poměr stran do cca 1:4 až 1:5, spočítá se náhradní poloměr podle vzorce

$$r_0 = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad [m] \quad (4.16)$$

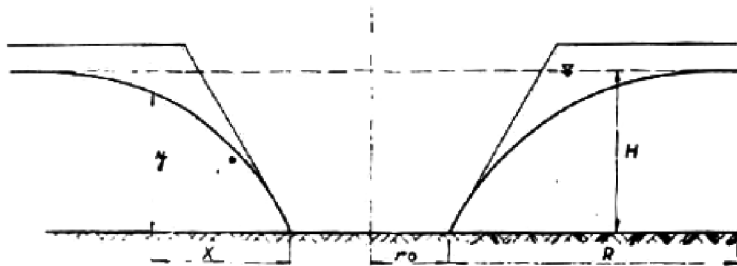
kde A je plocha jámy a r_0 náhradní poloměr. Za předpokladu snížení hladiny až na úroveň dna jámy je celkové přítokové množství Q :

$$Q = \pi k \frac{H^2}{\ln \frac{R + r_0}{r_0}} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (4.17)$$

Rovnice depresní křivky:

$$h(r) = \sqrt{\frac{H^2}{\ln \frac{R + r_0}{r_0}} \cdot \ln \frac{r + r_0}{r_0}} \quad [m] \quad (4.18)$$

Schéma dokonalé stavební jámy je na obr. 4-7:



Obr. 4-7 Hydraulicky dokonalá stavební jáma

4.2 Odvodnění stavební jámy – numerický přístup

4.2.1 Numerické metody obecně

Numerické modely popisují podzemní proudění detailně. Umožňují zohlednit případy nehomogenity, anizotropie, převládajícího vertikálního směru proudění, zvláštních okrajových podmínek, komplexnějšího prostorového uspořádání nebo analýzy neustáleného proudění.

Nejčastěji používané numerické metody jsou *metoda konečných diferencí* a *metoda konečných prvků – MKP*.

Přes nesporné výhody numerických modelů je třeba mít na paměti, že:

- Jde pouze o aproximaci skutečného chování podzemní vody.
- Síla výpočetního výkonu nevynahradí špatnou kvalitu vstupních dat.
- Numerický model je možné považovat za spolehlivý až po verifikaci a kalibraci daty z terénu.
- Model nenahrazuje praktické zkušenosti a znalosti získané při návrhu odvodňovacích systémů a při pozorování jejich chování v praxi.

4.2.2 Řešení problému proudění podzemní vody v programu PLAXIS

V následujícím textu bude shrnut přehled funkcionality, kterou program umožňuje ve vztahu k řešenému problému.

4.2.2.1 Hydraulické podmínky

Způsoby, jak zadat podmínky pro výpočet proudění podzemní vody, jsou tyto:

4.2.2.1.1 Water level

Water level (hladina vody) je základní možný způsob generování pórových tlaků v modelu. Definuje se pomocí lomené čáry (ve 3D pomocí bodů plochy). Lze tak vytvořit ve vrstvách zeminy volnou nebo napjatou hladinu, definovat polohu

hladiny závislou na čase. Hladina je vytvořena buď automaticky ze zadané sondy, nebo manuálně uživatelem.

4.2.2.1.2. Boundary conditions

Kterékoli linii na okraji modelu (v případě 3D i ploše) je možné předepsat hydraulickou okrajovou podmínku. V programu jsou dostupné tyto okrajové podmínky:

Seepage – Voda může volně proudit. Obvykle se používá na horním povrchu a bočních stěnách modelu.

Closed – Hranice, která je pro proudění nepropustná. Používá se u spodního okraje modelu, kde simuluje nepropustné podloží.

Head - „Ručně“ předepsaná výška vodního sloupce. Může být definována jako konstantní nebo proměnná v závislosti na pozici a na čase.

Inflow – Definuje množství vody, které skrz podmínku přitéká do modelu.

Outflow – Definuje množství vody, které skrze podmínku odtéká pryč.

Infiltration – Definuje vsakování nebo odpařování z povrchu modelu. Na rozdíl od podmínky *Inflow* je ovlivněna schopností zeminy přijmout/uvolnit vodu.

4.2.2.1.3. Drain

Prvek „drain“ je speciální hydraulická podmínka, přiřazená liniové geometrické entitě (v Plaxis 3D může jít i o plošnou entitu). Funkce je v podstatě ekvivalentní s okrajovou podmínkou *Head*, na rozdíl od ní však jde o prvek umístěný uvnitř oblasti. Chování drénu může být v režimu *Normal*, nebo *Vacuum*. V režimu *Normal* je třeba předepsat piezometrickou výšku h (v této DP je označena jako h_{drain}) vzhledem k počátku souřadnic. V uzlech drénu, které jsou níže, nejsou pórové tlaky ovlivněny. V režimu *Vacuum* je možné zadat podtlak a simulovat tak vakuové čerpání.

4.2.2.1.4. Well

Prvek „well“ lze použít pro předepsání hodnoty specifického průtoku vody vsakované či odčerpávané ze zeminy. Chování může být v režimu *Extraction* (odebírání vody ze zeminy) nebo *Infiltration* (vsakování vody). Zadávané parametry jsou $|Q_{well}|$ - hodnota průtoku vody za jednotku času, a h_{min} – definuje minimální možnou výšku hladiny ve studni. Při snížení na tuto úroveň se další odběr zastaví.

4.2.2.1.5. Interfaces

Kontaktní prvky umí simulovat nepropustnou konstrukci. Chování při proudění se definuje ve vlastnostech přilehlé zeminy.

4.2.2.2. Typy výpočtu proudění podzemní vody

Proudění vody lze počítat buď samostatně, nebo společně s deformační analýzou. K dispozici jsou tyto možnosti:

Groundwater flow only – Umožňuje řešení samostatného problému proudění podzemní vody. Možnost této volby je pouze v první fázi výpočtu, v dalších fázích je typ nastaven automaticky shodně.

Fully coupled flow-deformation analysis – Analýza současného vzniku deformací a pórových tlaků v nasycených nebo částečně nasycených zeminách, jako důsledek časově závislých změn hydraulických okrajových podmínek.

4.2.2.3. Způsoby výpočtu pórového tlaku

Phreatic – Přímé stanovení pórových tlaků ze zadané globální hladiny podzemní vody. Je k dispozici pouze v první fázi výpočtu (*initial phase*).

Steady state groundwater flow – Výpočet pórových tlaků při ustáleném stavu proudění na základě zadání hydraulických okrajových podmínek. Klíčovým krokem je dosažení ustáleného tvaru vodní hladiny, řeší se iteračními metodami.

Transient groundwater flow – Výpočet pórových tlaků při neustáleném stavu proudění na základě zadání časově závislých hydraulických okrajových podmínek.

Use pressures from previous phase – V některých případech je možné použít vypočtené pórové tlaky z rodičovské fáze jako vstup pro další analýzu.

5 MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ - PŘÍPADOVÉ STUDIE

V této kapitole je zpracována stěžejní část diplomové práce, jejímž cílem je objasnění řešené problematiky pomocí prostředků popsaných v kapitole 3.2. Jsou zde řešeny dva případy – svahovaná a pažená stavební jáma. V rámci těchto jam jsou pak analyzovány jednotlivé dílčí problémy.

5.1 Svahovaná stavební jáma odvodněná povrchově

Pro ověření základních principů chování numerického modelu byl zvolen jednoduchý případ svahované stavební jámy tak, aby splňoval předpoklady známých analytických řešení a zaručil porovnatelnost obou přístupů.

5.1.1 Popis geometrie, geologie

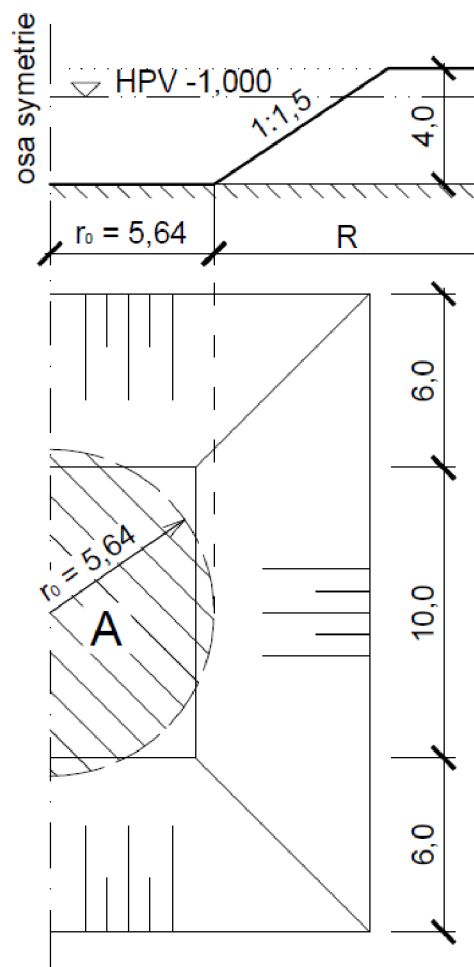
Svahovaná stavební jáma je čtvercového půdorysu o rozměrech 10x10 m, hloubky 4,0 m. Výkop je proveden až na nepropustné podloží, jáma je tedy z hydraulického hlediska dokonalá. Sklon svahu je navržen v poměru 1:1,5. Okolní prostředí tvoří homogenní izotropní vrstva písčité zeminy, se součinitelem hydraulické vodivosti zeminy $k = 10^{-4}$ m/s (8,64 m/den). V hloubce 4,0 m pod terénem se nachází nepropustné podloží. Hladina podzemní vody je 1,0 m pod povrchem terénu.

5.1.2 Analytické řešení

Analytické řešení spočívá v převedení jámy na osamělou hydraulicky dokonalou studnu s náhradním poloměrem r_0 , viz (4.16). Plocha jámy $A = 100$ m². Snížení hladiny s je rovno mocnosti zvodněné vrstvy $H = 3,0$ m, poloměr dosahu depresního kužele R je uvažován v hodnotě podle Sichardta. Přítok Q do jámy je spočítán v rámci kapitoly 5.1.3.1 v Tab. 5-1, podle rovnice (4.17). Tvar depresní křivky je vyjádřen rovnicí (4.18) a její průběh je zobrazen v Graf 5-1.

5.1.3 Numerické modelování

Numerický model je koncipován jako osově symetrická úloha. Svahovaná čtvercová jáma je nahrazena modelem jámy s kruhovým půdorysem o poloměru r_0 , sklon svahu je zachován v poměru 1:1,5. Model byl po délce rozdělen na sekce, jejichž aktivací a deaktivací je možné měnit vzdálenost okrajové podmínky s předepsanou nesníženou výškou hladiny (poloměr dosahu R). V blízkosti jámy bylo provedeno zjemnění, úměrně k narůstajícímu hydraulickému gradientu.



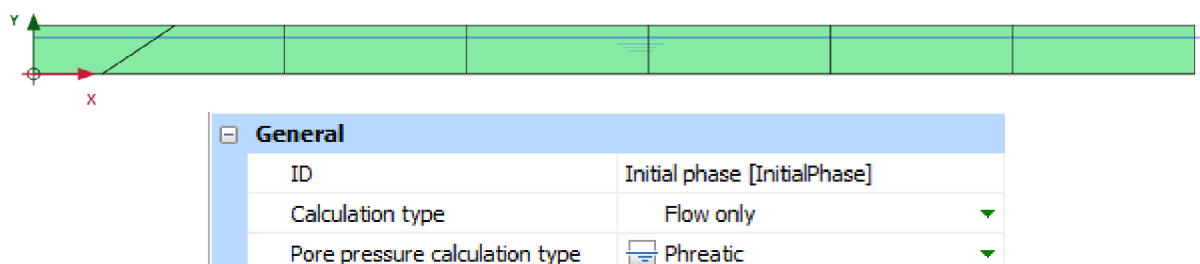
Obr. 5-1 Řez a půdorys svahované jámy



Obr. 5-2 Síť konečných prvků

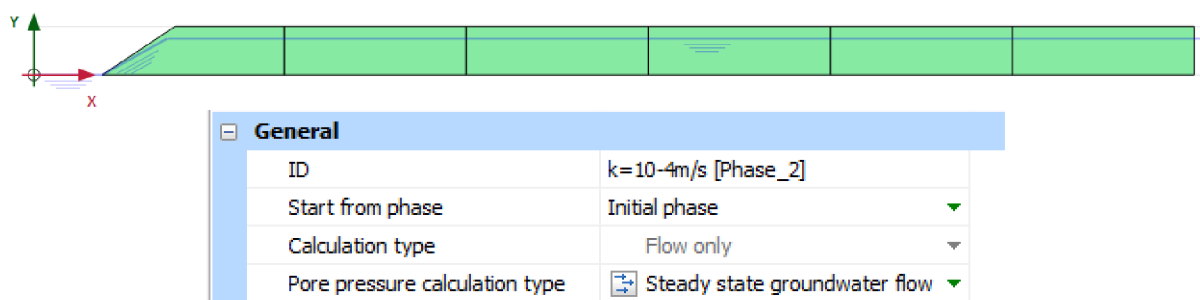
Okrajové podmínky $XMin$ a $YMin$ jsou pro proudění uzavřené. Výpočet probíhá vždy ve dvou fázích:

- Fáze 1 (*Initial phase*) – Generování hydrostatického tlaku ve stavu před výkopem jámy:



Obr. 5-3 Fáze 1 - model a nastavení výpočtu

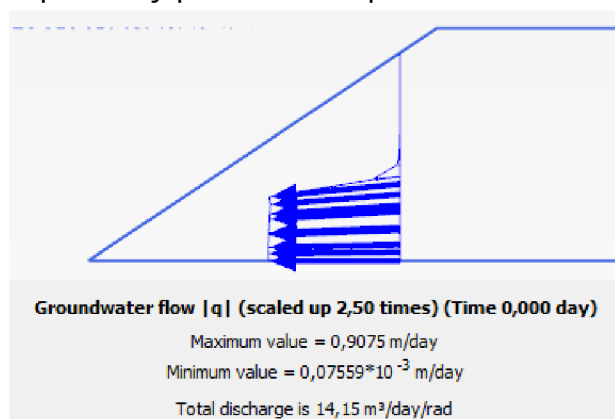
- Fáze 2 – Deaktivace zeminy v jámě a zavedení nové hladiny snižené na úroveň dna jámy:



Obr. 5-4 Fáze 2 - model a nastavení výpočtu

5.1.3.1. Přítok do jámy a tvar depresní křivky

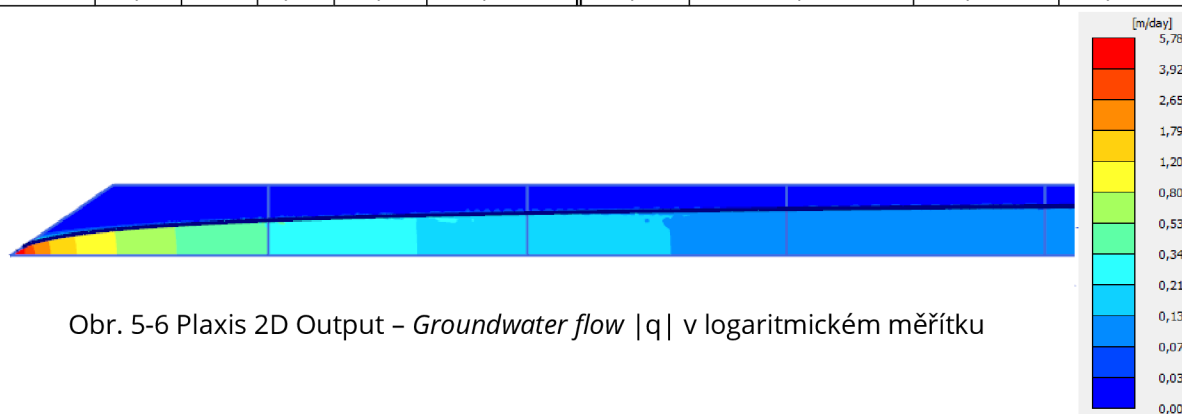
V tab. 5-1 je srovnán analytický výpočet přítokového množství do hydraulicky dokonalé stavební jámy a průtok naměřený v numerickém modelu pomocí integrace na svislém řezu, viz obr. 5-5. „Měřící profil“ byl umístěn pro všechny studie v téže vzdálenosti od osy symetrie, v místě s vysokou hustotou sítě tak, aby statistická odchylka, daná tvarem sítě, byla stále stejná. Na dalším Obr. 5-6 je vykreslen specifický průtok v ekvipotenciálním zobrazení.



Obr. 5-5 Měření průtoku ve 2D modelu pomocí řezu

Tab. 5-1 Výpočet přítoku do svahované jámy

Analytické řešení						Plaxis 2D, osová symetrie			Rozdíl
k	s = H	A	r ₀	R	Q	R	Q	Q	
[m.s ⁻¹]	[m]	[m ²]	[m]	[m]	[l.s ⁻¹]	[m]	[m ³ .day ⁻¹ .rad ⁻¹]	[l.s ⁻¹]	[%]
10 ⁻⁴	3,0	100	5,64	90,00	0,999	90,00	14,15	1,029	3,02%



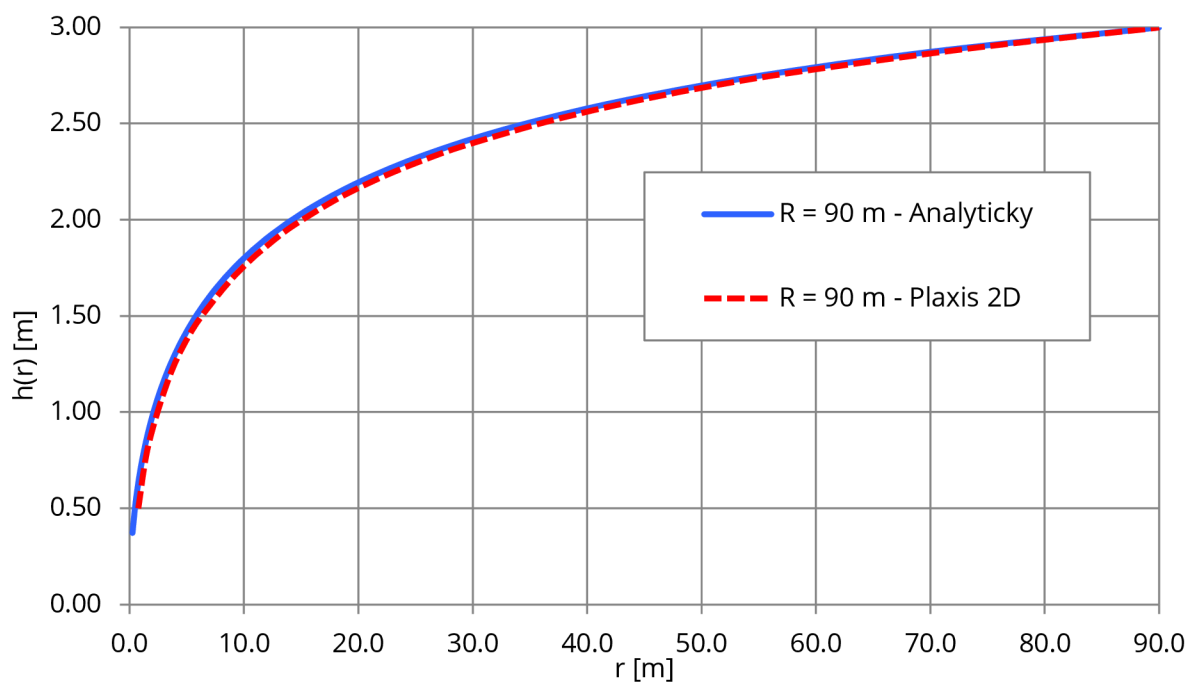
Obr. 5-6 Plaxis 2D Output – Groundwater flow |q| v logaritmickém měřítku

Tvar depresní křivky ve srovnání s analytickým řešením je zobrazen v Graf 5-1. Malé písmeno r na vodorovné ose označuje vzdálenost od jámy, $h(r)$ je výška hladiny nad nepropustným podložím ve vzdálenosti r od jámy. V grafu Graf 5-2 je zobrazeno totéž za využití logaritmického měřítka, které poskytuje jasnější informaci o tvaru depresní křivky blíže k počátku.

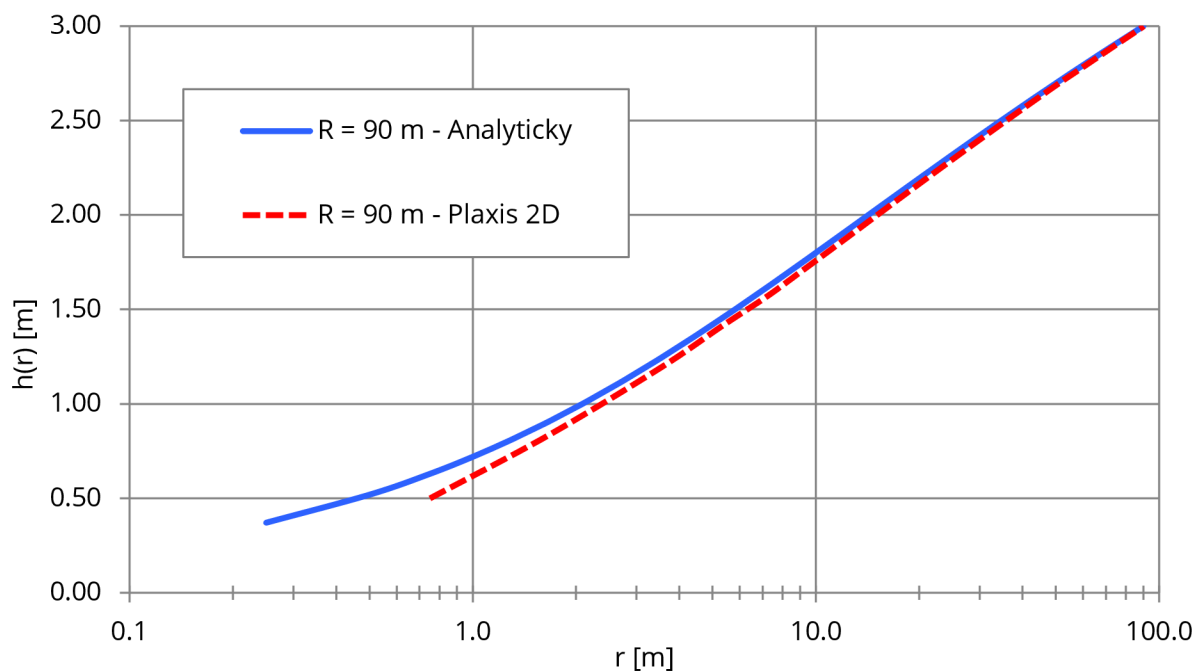
Analytické řešení, založené na Dupuitových předpokladech, dává v logaritmickém zobrazení přímkový tvar depresní křivky, viz např. graf Graf 5-6. V literatuře (1) se uvádí, že taková křivka je bez větší chyby až od hodnoty $r > 1,0H$. Při menších hodnotách r není dostatečně splněn předpoklad malých sklonů hladiny. Ačkoliv existují i jiné přístupy, pro spolehlivější řešení hladiny v blízkosti studny autoři tamtéž (1) doporučují použít numerické metody.

Grafy v logaritmickém měřítku chybu při malých vzdálenostech od studny názorně ukazují.

Graf 5-1 Srovnání analytického a numerického řešení tvaru depresní křivky

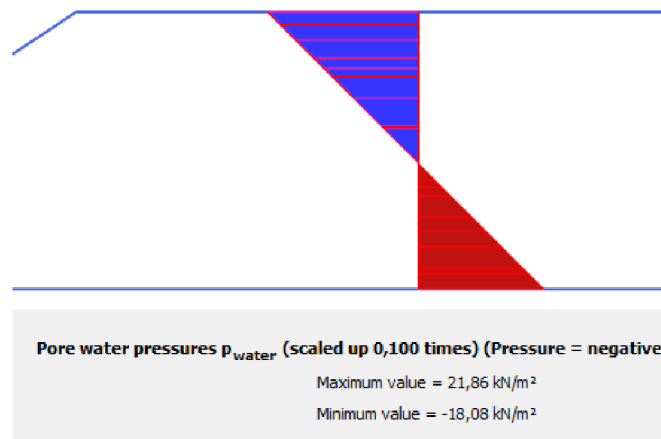


Graf 5-2 Srovnání analytického a numerického řešení tvaru depresní křivky v logaritmickém měřítku



Poznámka: Možný způsob získání souřadnic hladiny z programu

Používaná verze programu Plaxis Output neumožňuje geometrii hladiny získat automaticky, např. ve formě tabulky souřadnic. Výšku hladiny, resp. pokles, však lze v libovolné pozici změřit „ručně“ pomocí svislého řezu a obrazce pórových tlaků (p_{water}).



Obr. 5-7 Zobrazení průběhu pórových tlaků po výšce pomocí řezu

Řez je proveden na celou výšku modelu. Dolní část grafu zobrazuje tlak pod hladinou vody, horní část je sání. V bodě nulového pórového tlaku se nachází volná hladina. Je-li průběh pórových tlaků lineární, vzdálenost nulového bodu od horního nebo dolního okraje lze dopočítat ze znalosti délky řezu, maximální a minimální hodnoty pórového tlaku, viz obr. 5-7. Přemístováním řezu ve směru osy X (použitím klávesové zkratky ctrl+= a ctrl+-) je možné výšku hladiny určit v jakékoli vzdálenosti od počátku.

Závěry:

- Hodnota přítoku do jámy, zjištěného oběma způsoby, je v podstatě totožná.
- Depresní křivky získané numericky a analyticky se (mimo krátkou oblast v blízkosti jámy) navzájem překrývají.
- Osově symetrická úloha proudění lze za stejných okrajových podmínek namodelovat způsobem odpovídajícím analytickému řešení.

5.1.3.2. Vliv velikosti modelu

Cílem studie je ověřit, jaký má velikost modelu vliv na výsledky. Předpokládá se, že na tomto základě pak bude možné navrhnout vhodnou velikost matematického modelu, například nalezením místa v určité vzdálenosti od jámy, kde se hladina nachází v nesnížené výšce.

Stejný výpočet jako v kap. 5.1.3.1 byl proveden pro 4 různé modely s R rovno 30, 45, 90 a 180 m. Zahrnutý jsou i poloměry doporučované empirickými vztahy:

- podle Kusakina: $R = 575 \cdot s \cdot \sqrt{k \cdot H} = 575 \cdot 3 \cdot \sqrt{10^{-4} \cdot 3} = 29,88 \doteq 30,0 \text{ m}$
- podle Sichardta: $R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k} = 3000 \cdot 3 \cdot \sqrt{10^{-4}} = 90,0 \text{ m}$

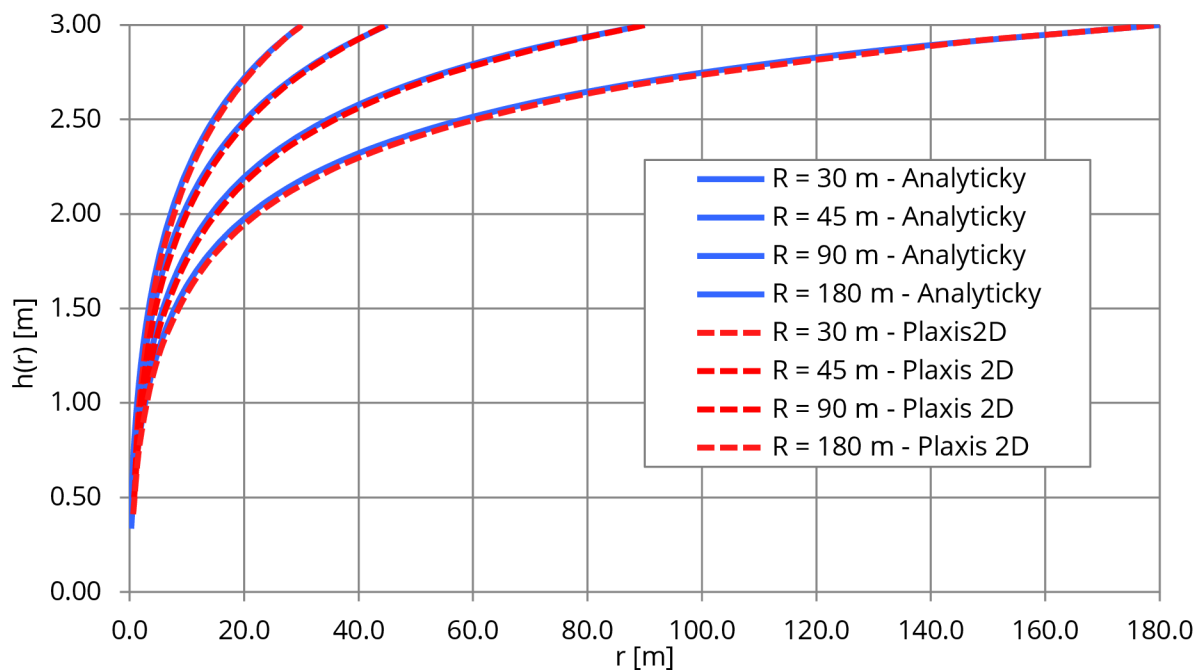
V Tab. 5-2 je stanoven pro dané R výsledný přítok Q , zjištěný numericky a analyticky a jejich vzájemná míra odlišnosti.

Tab. 5-2 Srovnání analyticky a numericky zjištěného přítoku pro různé R

R	Analyticky	Plaxis 2D, osová symetrie		Rozdíl
	Q	Q	Q	
[m]	[l.s ⁻¹]	[m ³ .day ⁻¹ .rad ⁻¹]	[l.s ⁻¹]	[%]
30,0	1,534	22,50	1,636	6,69%
45,0	1,288	18,22	1,325	2,86%
90,0	0,999	14,15	1,029	3,02%
180,0	0,809	11,29	0,821	1,46%

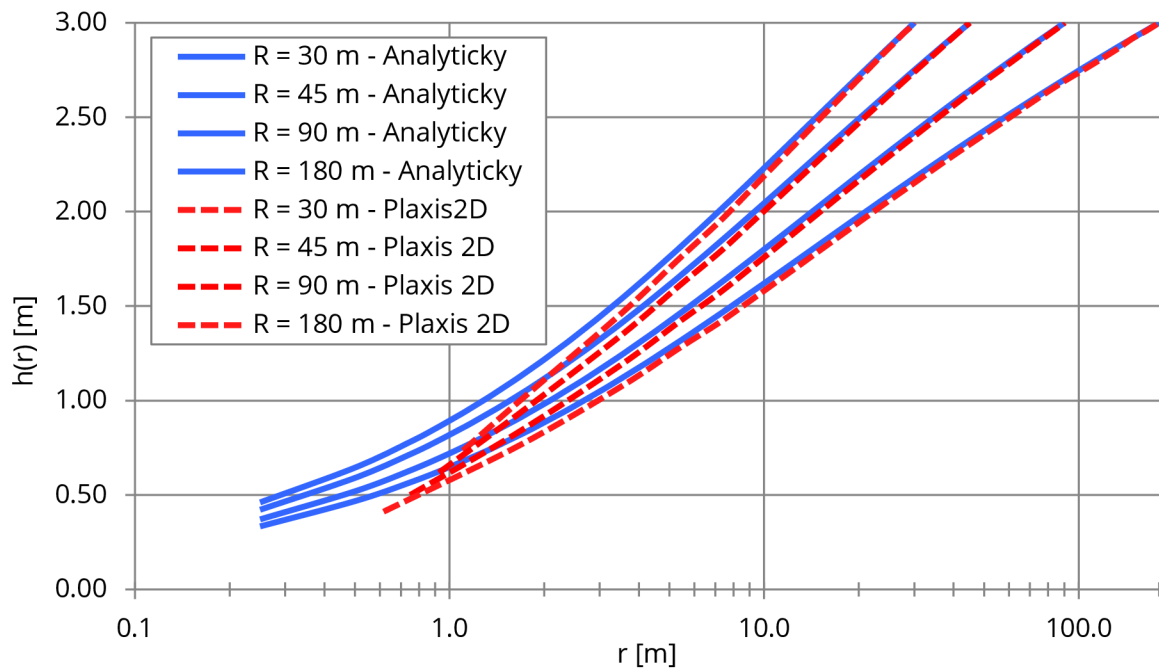
V Graf 5-3 jsou pak zobrazeny příslušné depresní křivky stanovené oběma metodami. V dalším grafu Graf 5-4 je totéž zobrazeno s logaritmickým měřítkem.

Graf 5-3 Tvar depresní křivky pro různé R , stanovený analyticky a numericky



Graf 5-4 Tvar depresní křivky pro různé R , stanovený analyticky a numericky, zobrazený v logaritmickém měřítku

Závěry:



Závěry učiněné na základě znalosti analytických vztahů jsou potvrzovány numerickým modelováním.

- Jsou-li okrajové podmínky nastaveny identicky, je výsledný přítok i tvar depresní křivky odpovídající analytickému řešení.
- Rozdíl mezi přítokem Q zjištěným analyticky a numericky s rostoucí velikostí se zmenšuje.
- S rostoucím R přítok do jámy klesá. Vzhledem k čerpanému množství je volba menšího poloměru R na stranu bezpečnou.
- Zároveň se R ve vzorcích (4.17) nachází v logaritmu, s rostoucí hodnotou tak jeho vliv na přítok klesá. V praxi pak správnost výsledku ovlivňuje spíše chyba při stanovení součinitele hydraulické vodivosti, než přesnost určení poloměru R .
- Potvrzuje se, že v ideální zvodni, kterou předpokládá analytické řešení, sahá depresní kužel do nekonečna. V ohraničené oblasti matematického modelu bude při ustáleném proudění místo s nesníženou hladinou vždy až na jeho okraji.
- Problém proudění podzemní vody je totiž ve skutečnosti závislý i na čase a měl by být stanovován na základě předpokládané doby trvání stavby. Vzorce pro ustálené proudění pouze popisují specifický případ neustáleného proudění v určitém čase po zahájení čerpání, kdy poloměr vlivu studny právě dosáhl vzdálenosti R .

- Empirické vztahy, které neoperují s vlivem času, tedy představují zjednodušení situace. To ale pro většinu běžných případů nemá na konečné čerpané množství rozhodující vliv. Problematika stanovení poloměru R je dobře diskutována např. v (1) nebo (4).
- V této diplomové práci již není dále věnována pozornost proudění v závislosti na čase a velikost výpočetních modelů (analytických i MKP) bude stanovena za využití empirických vztahů.

Z různých důvodů, např. je-li model při uvažovaném poloměru dosahu příliš rozměrný, je možné jej zmenšit a okrajové podmínce předepsat výšku hladiny odpovídajícím způsobem sníženou oproti původní hladině. Velikost přítoku Q zůstane zachována.

Uvažujme zmenšení poloměru R je z 90 m na 45 m. Ze vzorce (4.18) lze spočítat, že výška hladiny ve vzdálenosti 45 m je 2,642 m nad nepropustným podložím. Po dosazení nových okrajových podmínek do (4.17) pak obdržíme stejný přítok, jako při původních podmínkách. Tyto okrajové podmínky jsou použity i v numerickém řešení. Obojí je zapsáno v Tab. 5-3.

Tab. 5-3 Výpočet zmenšeného modelu

	H	R	Analyticky	Plaxis 2D, osová symetrie		Rozdíl
			Q	Q	Q	
	[m]	[m]	[l.s ⁻¹]	[m ³ .day ⁻¹ .rad ⁻¹]	[l.s ⁻¹]	[%]
Původní model:	3.000	90.0	0.999	14.15	1.029	3.02%
Zmenšený model:	2.642	45.0	0.999	14.36	1.044	4.55%

Uvedená alternativa řešení je možná pouze v jednoduchém případě, za který lze řešenou hydraulicky dokonalou jámu považovat. V případech složitějších je potřebné tuto variantu ověřit podrobněji.

5.1.3.3. Vliv součinitele hydraulické vodivosti na depresní křivku a na Q

Na stejném modelu byl ověřen přítok a tvar depresní křivky pro zeminy s různým součinitelem hydraulické vodivosti. Při řešení byly vzaty v úvahu součinitele v hodnotě 10^{-1} až 10^{-8} . V tab. 5-4 je zpracován výpočet přítoku s poloměrem deprese stanoveným empiricky pro dané k .

Tab. 5-5 považuje poloměr R za konstantní a je porovnáván s numerickým modelem. Tvar depresní křivky byl již uveden výše v Graf 5-1 a je shodný pro všechny uvažované součinitele k .

Tab. 5-4 Výpočet přítoku pro dané k s poloměrem R určeným empiricky

Analyticky				
k	$s = H$	r_0	R (Sichardt)	Q
$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$
10^{-1}	3.0	5.64	2846.05	454.2
10^{-2}	3.0	5.64	900.00	55.68
10^{-3}	3.0	5.64	284.60	7.175
10^{-4}	3.0	5.64	90.00	0.999
10^{-5}	3.0	5.64	28.46	0.157
10^{-6}	3.0	5.64	9.00	0.0296
10^{-7}	3.0	5.64	2.85	0.0069
10^{-8}	3.0	5.64	0.90	0.0019

Tab. 5-5 Výpočet přítoku pro dané k s konstantním poloměrem R

k	Analyticky				Plaxis 2D, osová symetrie		Rozdíl
	R	H	r_0	Q	Q	Q	
$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{m}]$	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\text{m}^3\cdot\text{day}^{-1}\cdot\text{rad}^{-1}]$	$[\text{l}\cdot\text{s}^{-1}]$	$[\%]$
10^{-1}	90.0	3.0	5.64	999	14150	1029	3.02%
10^{-2}	90.0	3.0	5.64	99.9	1415	102.9	3.02%
10^{-3}	90.0	3.0	5.64	9.99	141.5	10.29	3.02%
10^{-4}	90.0	3.0	5.64	0.999	14.15	1.029	3.02%
10^{-5}	90.0	3.0	5.64	0.0999	1.415	0.1029	3.02%
10^{-6}	90.0	3.0	5.64	0.00999	0.1415	0.01029	3.02%
10^{-7}	90.0	3.0	5.64	0.000999	0.01415	0.001029	3.02%
10^{-8}	90.0	3.0	5.64	0.0000999	0.001415	0.0001029	3.02%

Závěry:

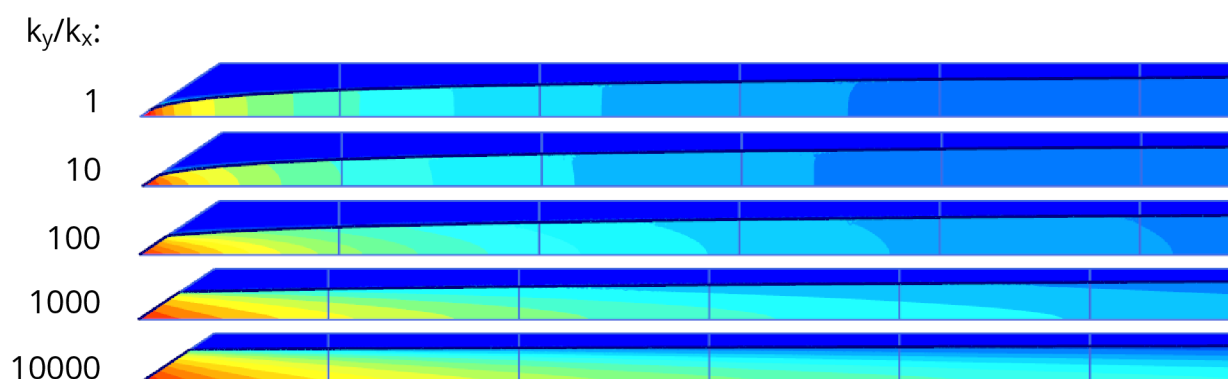
- Chování matematického modelu souzní s analytickým řešením. Přítok do jámy je za předpokladu stejné velikosti modelu přímo úměrný součiniteli hydraulické vodivosti.
- Tvar depresní křivky je při ustáleném proudění zcela nezávislý na k . Pravdivost tvrzení lze ukázat na *základní řídicí rovnici ustáleného filtračního proudění* (4.2). Je-li součinitel hydraulické vodivosti $k_x=k_y=k_z=\text{konst.}$, potom rovnice přejde na (4.3), kde součinitel hydraulické vodivosti nehraje roli.

5.1.3.4. Vliv anizotropie

Předchozí (i následující) studie byly založeny na předpokladu izotropního prostředí, kde součinitel hydraulické vodivosti k je stejný v horizontálním i vertikálním směru ($k_x = k_y$). V přirozeném prostředí se však často projevuje vliv vrstevnatosti, např. u kvartérních sedimentů, kdy je propustnost ve svislém směru řádově nižší. V této studii je prozkoumáno chování modelu při zavedení anizotropie. Sledovaná míra anizotropie je vyjádřena poměrem k_y/k_x , v hodnotách podle Tab. 5-6. Poslední dva vyjmenované poměry jsou pouze hypotetické, nad rámec reálných hodnot. Tvary získaných depresních křivek je zřejmé z obr. 5-8.

Tab. 5-6 Uvažovaná míra anizotropie

k_y/k_x	k_x [m.s ⁻¹]	k_y [m.s ⁻¹]
1	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴
10	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵
100	10 ⁻⁴	10 ⁻⁶
1000	10 ⁻⁴	10 ⁻⁷
10000	10 ⁻⁴	10 ⁻⁸



Obr. 5-8 Tvar depresní křivky získaný pro různou míru anizotropie

Závěry:

- Tvar depresní křivky i způsob proudění je anizotropií zřetelně ovlivněn. Při větším poměru k_y/k_x je vertikální pohyb částic vody zpomalen a křivka je plošší.

5.2 Pažená stavební jáma odvodněná studnami

Druhá série případových studií se zaměřuje na modelování hloubkového způsobu odvodnění, který je realizován pomocí vrtaných odvodňovacích studní.

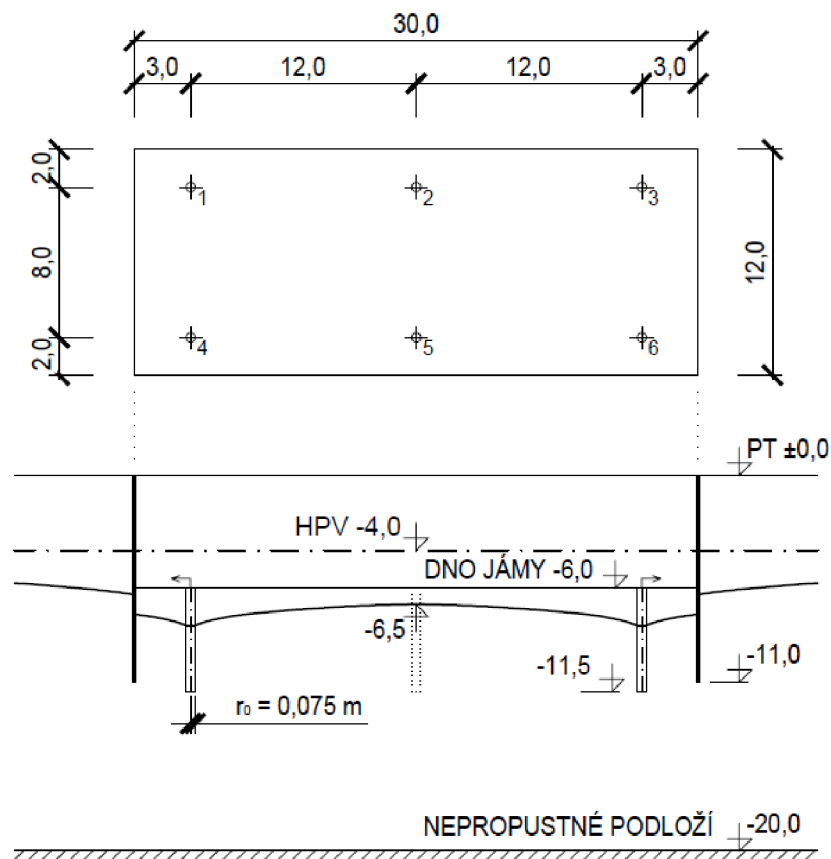
Jako modelový příklad byla zvolena pažená stavební jáma, konstrukce velmi častá v praxi.

5.2.1 Popis konstrukce, geologie

Jako vzor pro volbu geometrie pažené stavební jámy posloužil *Příklad 2 – Excavation in sand*, uvedený v manuálu Plaxis 3D 2018 (5). Jeho původní geometrie byla následně upravena a přizpůsobena.

Jde o relativně malou stavební jámu o rozměrech 12x30 m, hloubky 6,0 m. Jáma je zajištěna pažením, podporovaným kotvami a rozpěrami. Hloubka vetknutí je navržena 5,0 m pod dno jámy. V řešených studiích nehraje roli typ konstrukce pažení, pouze se předpokládá jeho úplná vodotěsnost. Voda skrz pažící konstrukci neproudí.

V podloží se nachází homogenní izotropní vrstva písčité zeminy se součinitelem hydraulické vodivosti $k = 10^{-4}$ m/s (8,64 m/den). Tíha nasycené zeminy je $\gamma_{SAT} = 20,0$ kN/m³. V hloubce 20,0 m pod terénem se nachází nepropustné podloží. Hladina podzemní vody je 4,0 m pod povrchem terénu.



Obr. 5-9 Schéma pažené stavební jámy včetně návrhu odvodnění. (půdorys a řez)

5.2.2 Návrh odvodnění

Požadavkem je snížit hladinu podzemní vody 0,5 m pod dno jámy, tedy na úroveň -6,5 m. Snížení uprostřed jámy $s = 2,5$ m. Za tímto účelem byla navržena skupina šesti studní, rozmístěných po vnitřním obvodu jámy, viz obr. 5-9. Studny jsou vrtané, průměru 150 mm. Použito je typické vstrojení perforovanou zárubnicí s filtrační obsypovou vrstvou a s osazeným čerpadlem. Zárubnice je perforovaná v celé délce. Navržená hloubka studny je 7,5 m pod úroveň původní HPV, jakožto trojnásobek požadovaného snížení hladiny (podle doporučení v (3) a (4)).

Studny se většinou navrhují jako nedokonalé, ale v této práci je analyzována i dokonalá studna, protože k ní existuje analytické řešení a bude tak možné srovnání s MKP a s nedokonalou studnou.

5.2.3 Analytické řešení

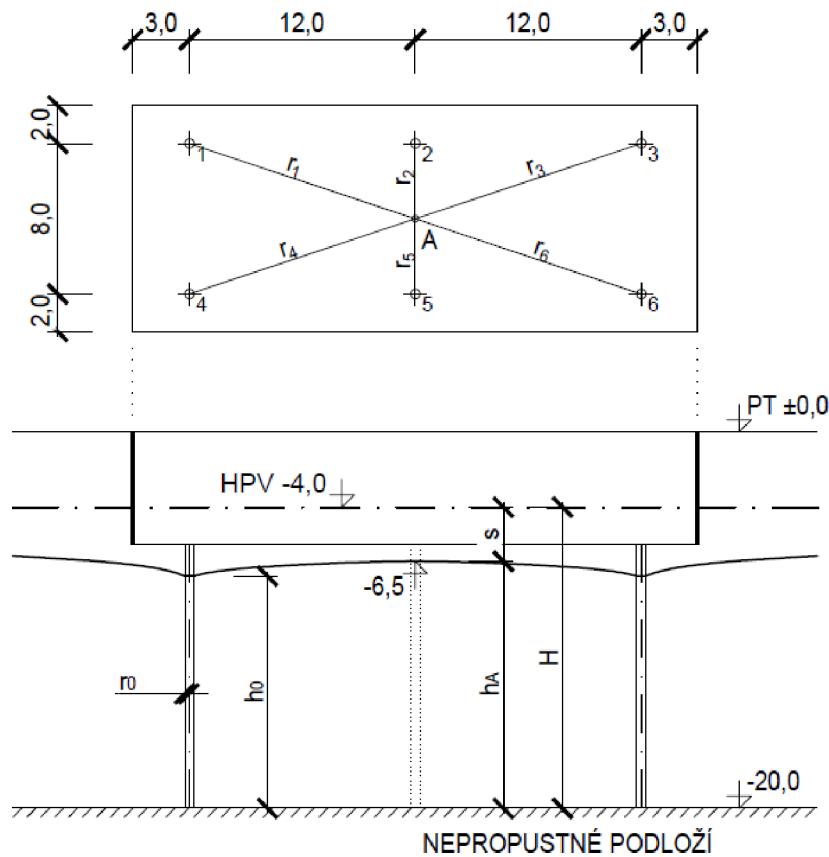
V této kapitole je aplikován přístup k řešení odvodnění pomocí analytických vztahů, které jsou k dispozici. Zde však není možné se vyhnout určitým zjednodušením.

Součástí výpočtu je také posouzení specifického průtoku na plášti studny.

5.2.3.1 Řešení skupiny studní

Zjednodušeně se lze na navržené uspořádání podívat jako na soustavu dokonalých studní, viz obr. 5-10, jejíž řešení bylo popsáno v kap. 4.1.8.1.5. Výsledek provedeného výpočtu poslouží ke srovnání s numerickým řešením v kapitole 5.2.4.2.

Snížení se má uvažovat v těžišti skupiny studní - označeno jako bod A.



Obr. 5-10 Skupina dokonalých studní (půdorys a řez)

Vstupní parametry:

$$s = 2,5 \text{ m}$$

$$H = 16 \text{ m}$$

$$h_A = H - s = 16 - 2,5 = 13,5 \text{ m}$$

$$R = 3000s\sqrt{k} = 3000 \cdot 2,5 \cdot \sqrt{10^{-4}} = 75,0 \text{ m (Sichardt)}$$

Počet studní $n = 6$

$$r_2 = r_5 = 4,0 \text{ m}$$

$$r_1 = r_3 = r_4 = r_6 = \sqrt{4^2 + 12^2} = 12,65 \text{ m}$$

Celkové odebírané množství podle (4.15):

$$Q = \frac{\pi k(H^2 - h_A^2)}{\ln R - \frac{1}{n} \ln(r_1 r_2 \cdots r_n)} = \frac{\pi \cdot 10^{-4} \cdot (16^2 - 13,5^2)}{\ln 75,0 - \frac{1}{6} \ln(12,65^4 \cdot 4^2)} = 0,01070 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 10,7 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Na 1 studnu připadá:

$$\frac{Q}{6} = 0,00178 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 1,78 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

5.2.3.2. Ověření specifického průtoku

Specifický průtok na plášti studny musí být menší než mezní:

$$q < q_{KRIT} \tag{5.1}$$

a stanoví se podle rovnice:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h_0} = \frac{0,00178}{2 \cdot \pi \cdot 0,075 \cdot 12} = 3,16 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.2)$$

h_0 je hloubka vody na plášti studny. Zde je odhadnuta vyjádřením z rovnice (4.14) za zjednodušujícího předpokladu, že na snížení v bodě A se podílí pouze jedna nejvzdálenější studna.

$$h_0 = \sqrt{h_A^2 - \frac{Q_1 \ln \frac{r_1}{r_0}}{\pi k}} = \sqrt{13,5^2 - \frac{0,00178 \cdot \ln \left(\frac{12,65}{0,075} \right)}{\pi \cdot 10^{-4}}} = 12,4 \doteq 12 \text{ m} \quad (5.3)$$

Skutečná hloubka vody v jednotlivých studních se bude při stejných odběrech lišit. Mezní (kritický) specifický průtok q_{KRIT} se určuje na základě empirických vztahů uvedených v kapitole 4.1.8.1.2. Vzhledem k dočasnému charakteru odvodňovacího systému stavební jámy není třeba volit nejopatrnější kritérium, ale postačí např. (4.11):

$$q_{KRIT} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Předpokládá se vhodně zvolená zrnitost obsypu, vhodně zvolená perforace zárubnice a dočasný charakter odvodňovacího systému.

Posouzení:

$$q = 3,16 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < q_{KRIT} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vyhovuje, hydraulické podmínky na plášti jsou splněny.

5.2.4 Numerické modelování

Navržené řešení odvodnění je již příliš obecné a není možné jej jednoduše a spolehlivě spočítat analytickou cestou. Numerická analýza je v tomto případě vhodnější, neboť umožňuje zohlednit další vlivy, jako pažící konstrukce pod dnem jámy či nedokonalost studní a poskytnout tak výsledky bližší realitě.

V prvním kroku je nejdříve analyzováno chování samotné studny, v dalším pak model celé stavební jámy.

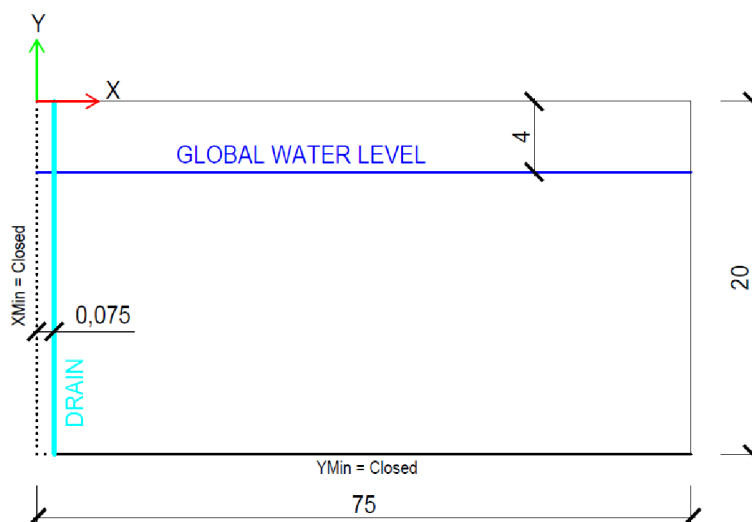
5.2.4.1 Modelování samostatné studny

Studnu je možné namodelovat ve 2D za podmínek rotační symetrie, anebo v trojrozměrném modelu pomocí speciálních konečných prvků, viz 4.2.2.1. V obou případech byl použit speciální prvek „drain“.

Popis 2D modelu:

Počátek souřadného systému je umístěn na terénu, osa Y představuje osu studny. Do vzdálenosti 0,075 m v horizontálním směru byl umístěn prvek „drain“ délky 20 m. Odsunutím od osy Y je simulován poloměr studny (tomuto kroku se

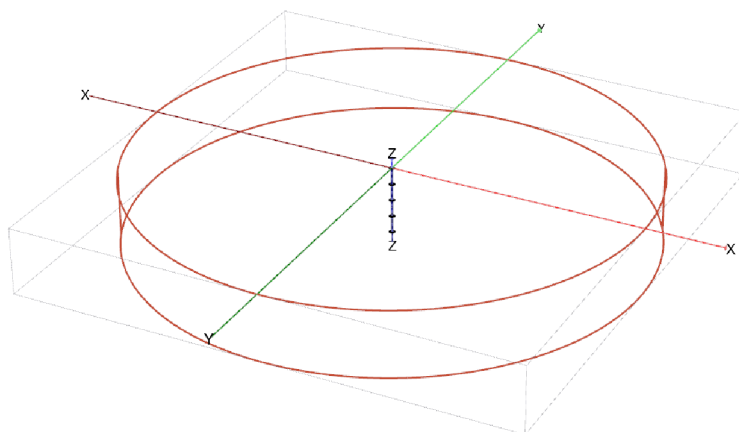
věnuje kap 5.2.4.1.2). Celková výška modelu je 20 m, šířka je stanovena empiricky pro snížení 2,5 m hodnotou $R = 75$ m. Geometrie je zřejmá ze schématu na obr. 5-11. V blízkosti studny bylo provedeno zjemnění sítě. Globální hladina vody je definována v hloubce -4,0 m. Okrajové podmínky X_{Min} a Y_{Min} jsou pro proudění uzavřené (*Closed*), ostatní hranice jsou otevřeny (*Seepage*). Postup i typ výpočtu je u všech studií stejný jako v kapitole 5.1.3.



Obr. 5-11 Schéma modelu studny v osové symetrii

Popis 3D modelu:

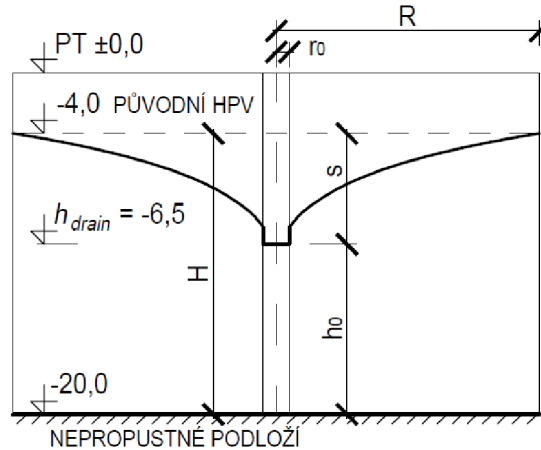
Trojrozměrný model je analogický k výše popsanému 2D. Těleso modelu je ve tvaru válce o poloměru 75 m a výšce 20 m. V jeho ose je umístěn prvek „drain“ délky 20 m. Směrem k ose symetrie je provedeno zjemnění sítě. Globální hladina je definována 4,0 m pod terénem. Pro proudění je uzavřena pouze podstava, ostatní okrajové podmínky jsou otevřené.



Obr. 5-12 Pohled na 3D model studny

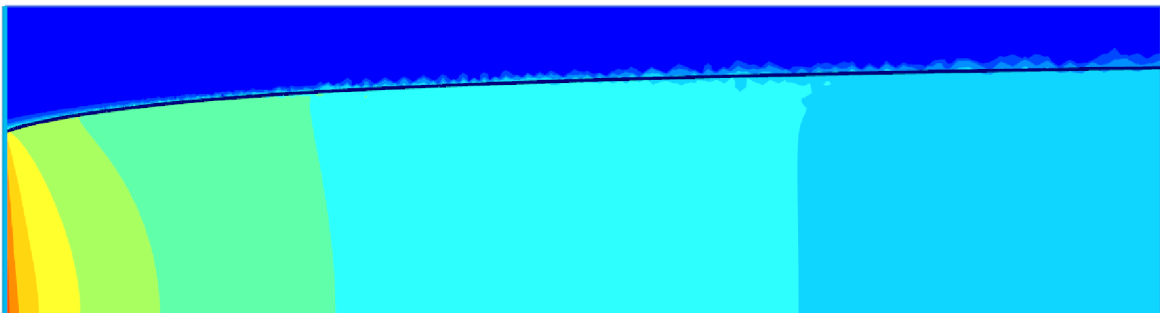
5.2.4.1.1. Srovnání 2D a 3D modelu studny s analytickým řešením pro různé snížení hladiny

Různého snížení hladiny ve studni bylo docíleno nastavením drénu – volbou parametru h_{drain} v hodnotách -6,5 m až -20,0 m, což představuje snížení 2,5 m až 16,0 m. Vztah mezi používanými výškami je ujasněn na obr. 5-13. Poslední hodnota představuje maximální snížení až k nepropustnému podloží.

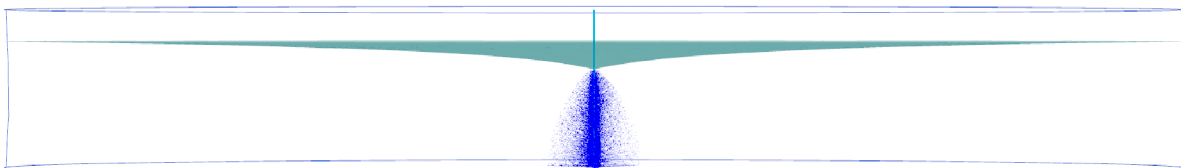


Obr. 5-13 Schéma dokonalé studny při stacionárním proudění s volnou hladinou. Je zaznačen význam parametru h_{drain} vzhledem k počátku souřadného systému na úrovni terénu.

V tab. 5-7 je pro dané snížení s uveden přítok Q , vypočítaný s poloměrem deprese podle Sichardta, a přítok za předpokladu konstantního R . Výsledky numerické 2D a 3D analýzy, jejich srovnání s analytickým řešením a mezi sebou navzájem jsou uvedeny v tabulce tab. 5-8.



Obr. 5-14 2D analýza – ekvipotenciální zobrazení proudění



Obr. 5-15 3D analýza – zobrazení proudění pomocí šipek (boční pohled)

Tab. 5-7 Analytický výpočet studny podle rovnice (4.13) pro R dle Sichardta a R konstantní

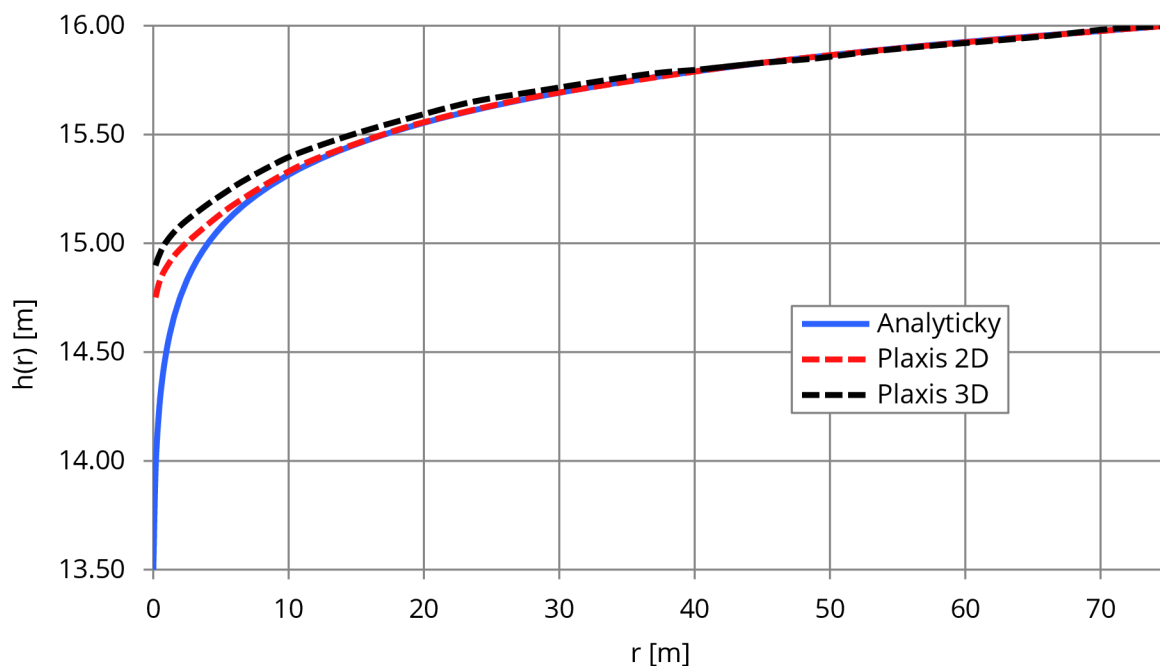
s	Analyticky							
	k	r_0	H	h_0	R (Sichardt)	Q	R	Q
[m]	[m.s ⁻¹]	[m]	[m]	[m]	[m]	[l.s ⁻¹]	[m]	[l.s ⁻¹]
2,5	10 ⁻⁴	0.075	16	13.5	75.0	3.35	75.0	3.35
6,5	10 ⁻⁴	0.075	16	9.5	195.0	6.62	75.0	7.54
10,5	10 ⁻⁴	0.075	16	5.5	315.0	8.50	75.0	10.27
14,5	10 ⁻⁴	0.075	16	1.5	435.0	9.20	75.0	11.54
16,0	10 ⁻⁴	0.075	16	0	480.0	9.18	75.0	11.64

Tab. 5-8 Výsledky 2D a 3D analýzy studny

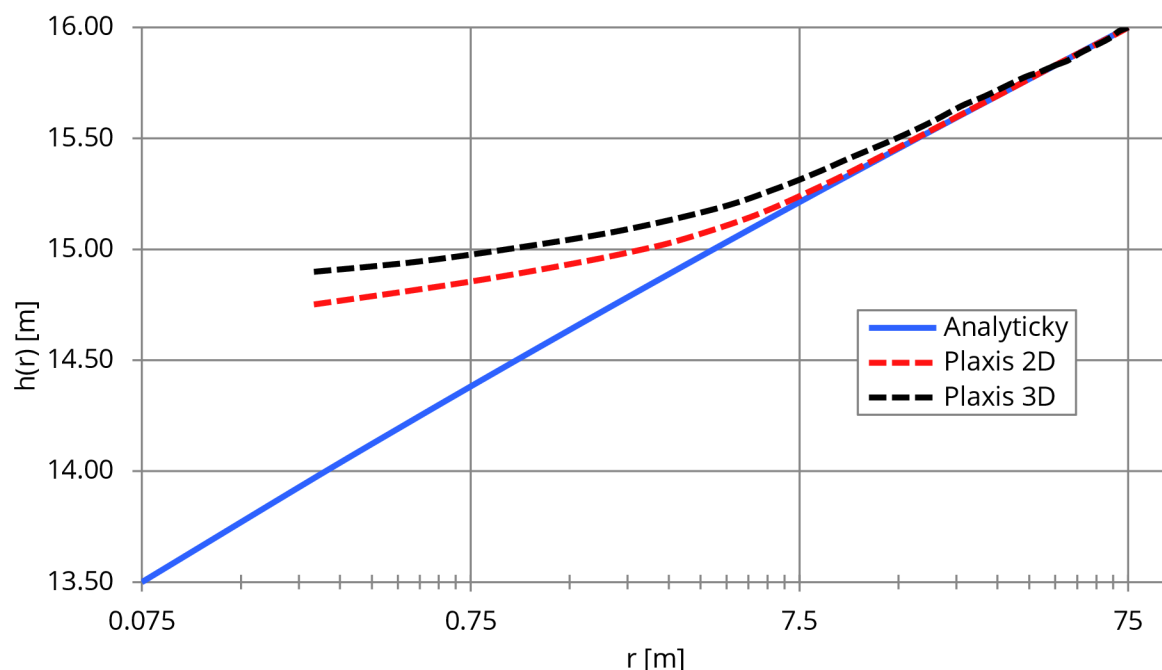
h_{drain}	Plaxis 2D, osová symetrie			Plaxis 3D			Rozdíl mezi 2D a 3D
	Q	Q	Rozdíl	Q	Q	Rozdíl	
[m]	[m ³ .day ⁻¹ .rad ⁻¹]	[l.s ⁻¹]	[%]	[m ³ .day ⁻¹]	[l.s ⁻¹]	[%]	[%]
-6,5	45.98	3.34	-0.31%	255.16	2.95	-12.0%	-11.7%
-10,5	103.37	7.52	-0.28%	573.93	6.64	-11.9%	-11.6%
-14,5	140.74	10.24	-0.31%	783.43	9.07	-11.7%	-11.4%
18,5	158.23	11.51	-0.29%	881.55	10.20	-11.6%	-11.3%
-20,0	159.65	11.61	-0.28%	889.99	10.30	-11.5%	-11.3%

Všechny tři způsoby stanovení depresní křivky jsou vyneseny v grafech Graf 5-5 a Graf 5-6 pro snížení 2,5 m.

Graf 5-5 Tvar depresní křivky dle 2D a 3D analýzy MKP pro $s = 2,5$ m, ve srovnání s analytickým řešením



Graf 5-6 Tvar depresní křivky dle 2D a 3D analýzy MKP pro $s = 2,5$ m, ve srovnání s analytickým řešením, v logaritmickém zobrazení



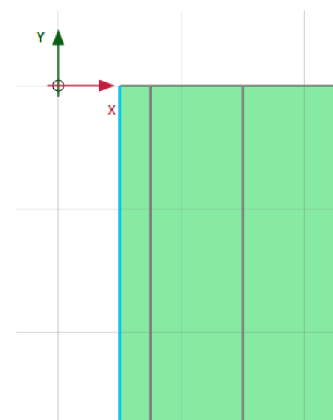
Závěry:

- Průtok ke studni lze určit pomocí 2D modelu s využitím prvku „drain“, a to ve velké shodě s analytickým řešením.
- Hodnoty průtoku ke studni, stanovené pomocí 3D modelu s prvkem „drain“, byly přibližně o 12 % menší. To může být způsobeno slabinou v použití prvku „drain“ v rámci trojrozměrného modelu, a sice že neumožňuje simulaci poloměru studny.
- Tvar depresní křivky podle (4.14) dává v logaritmickém zobrazení přímku a navazuje na hladinu vody ve studni.
- Naproti tomu depresní kužel určený numericky se v oblasti blíže ke studni odchyluje od analytického řešení a vytváří na plášti studny *výronovou plochu*. Tento jev odpovídá reálnému chování a je v literatuře podrobně zdůvodněn, např. (4). Podle rovnice popisující průběh volné hladiny platí, že částice vody při volné hladině se může pohybovat nejvýše pod hydraulickým gradientem rovným jedné. Numerický model tuto skutečnost respektuje.
- Z toho plyne, že výška hladiny ve studni není totožná se vsakovací výškou. Tu je však nutné znát, např. pro ověření specifického průtoku na plášti studny. V rámci výsledků numerického řešení její hodnotu zjistíme stanovením místa průniku vodní hladiny s okrajovou podmínkou.

5.2.4.1.2. Vliv odsunutí drénu od osy symetrie

Následujícím pokusem v osově symetrickém modelu je ověřena možnost simulace poloměru studny odsunutím drénu od osy symetrie. Jsou uvažovány poloměry r_0 v hodnotách 0 až 5 m.

2D model z předchozí kapitoly byl upraven tak, aby bylo možné v jednotlivých fázích aktivovat drén v příslušné vzdálenosti od osy Y. Zemina „uvnitř“ studny je deaktivována. V tab. 5-9 je porovnání analytického řešení pomocí rovnice (4.13) a numerického řešení.



Obr. 5-16 Odsunutí drénu (detail)

Tab. 5-9 Ověření vlivu odsunu drénu od osy symetrie

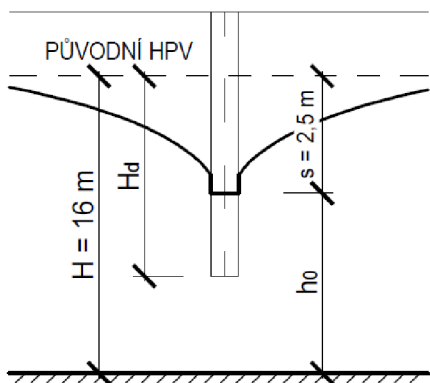
r_0	Analyticky					Plaxis 2D, osová symetrie		
	k	H	h_0	R	Q	Q	Q	Rozdíl
[m]	[$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	[m]	[m]	[m]	[$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	[$\text{m}^3\cdot\text{day}^{-1}\cdot\text{rad}^{-1}$]	[$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]	[%]
0	10^{-4}	16	13.5	75	-	27.695	2.01	-
0.05	10^{-4}	16	13.5	75	3.17	43.391	3.16	-0.40%
0.075	10^{-4}	16	13.5	75	3.35	45.928	3.34	-0.42%
0.15	10^{-4}	16	13.5	75	3.73	51.225	3.73	-0.08%
0.5	10^{-4}	16	13.5	75	4.62	63.614	4.63	0.05%
1.5	10^{-4}	16	13.5	75	5.92	82.588	6.01	1.41%
5.0	10^{-4}	16	13.5	75	8.56	118.089	8.59	0.37%

Závěry:

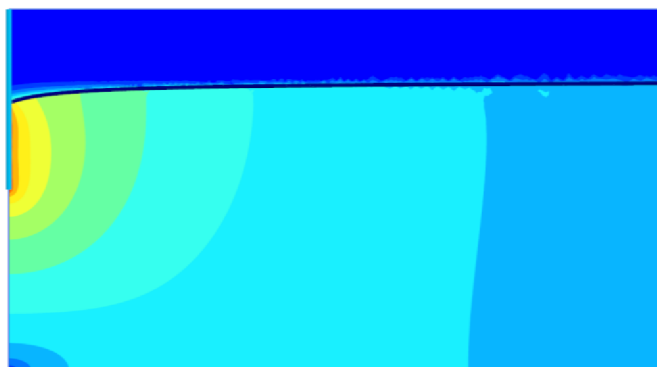
- Přítok získaný numericky velikostí odpovídá analytickému řešení pro všechny uvažované poloměry studny. V osově symetrickém numerickém modelu je tedy možné poloměr studny výše popsaným způsobem modelovat.

5.2.4.1.3. Nedokonalá studna při ustáleném proudění s volnou hladinou

Nedokonalou studnu lze snadno modelovat volbou délky prvku „drain“ tak, aby nedosahoval až ke spodnímu okraji modelu. Model byl vytvořen s různou hloubkou studny. Získaný přítok je uveden v tab. 5-10. Snížení je zachováno konstantně $s = 2,5$ m, H_d označuje hloubku dna studny pod původní HPV, viz obr. 5-18. $H_d = 16$ m představuje studnu dokonalou. V posledním sloupci tabulky je vyjádřen poměr přítoku do nedokonalé studny vzhledem k dokonalé. Tvar depresního kužele je vyneseno do Graf 5-7 pro vybrané 4 případy.



Obr. 5-18 Schéma nedokonalé studny

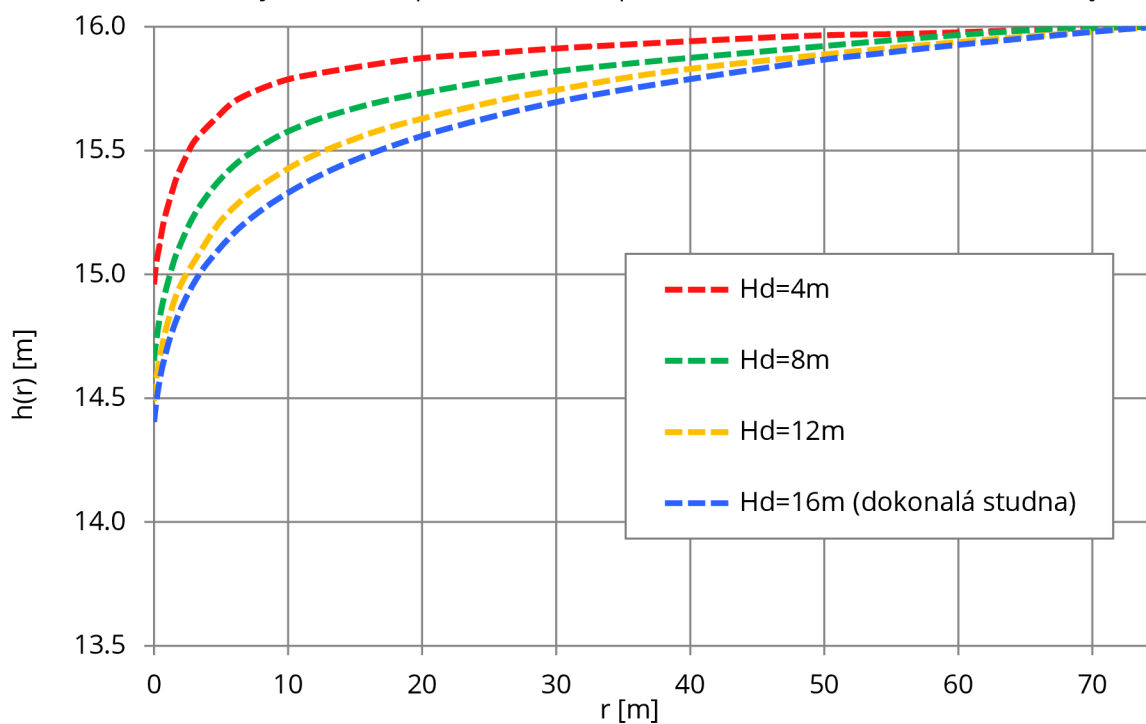


Obr. 5-17 2D analýza proudění k nedokonalé studni

Tab. 5-10 Výsledky 2D analýzy nedokonalé studny

		Plaxis 2D, osová symetrie		
s	H _d	Q	Q	Q _{dokonalé} /Q _{nedokonalé}
[m]	[m]	[m ³ .day ⁻¹ .rad ⁻¹]	[l.s ⁻¹]	
2.5	16.0	45.904	3.34	1.00
2.5	14.0	42.929	3.12	0.94
2.5	12.0	38.378	2.79	0.84
2.5	10.0	33.189	2.41	0.72
2.5	8.0	27.401	1.99	0.60
2.5	6.0	20.980	1.53	0.46
2.5	4.0	13.835	1.01	0.30

Graf 5-7 2D analýza - tvar depresního kužele pro danou hloubku nedokonalé studny H_d



Závěry:

Studie vlivu nedokonalé studny potvrzuje poznatky z odborné literatury (1).

- Nedokonalá studna umožňuje dosáhnout stejného snížení hladiny při nižším čerpaném množství vody. To je přínosem zejména, je-li nakládání s odčerpanou vodou ekonomicky náročné.
- Depresní kužel je v blízkém okolí studny strmější, zatímco ve větší vzdálenosti dochází k nižšímu poklesu hladiny. Nedokonalá studna tak má menší negativní vliv na okolní zástavbu.
- Na druhou stranu se zmenšuje vsakovací plocha studny a ta již nemusí vyhovět hydraulickým kritériím.

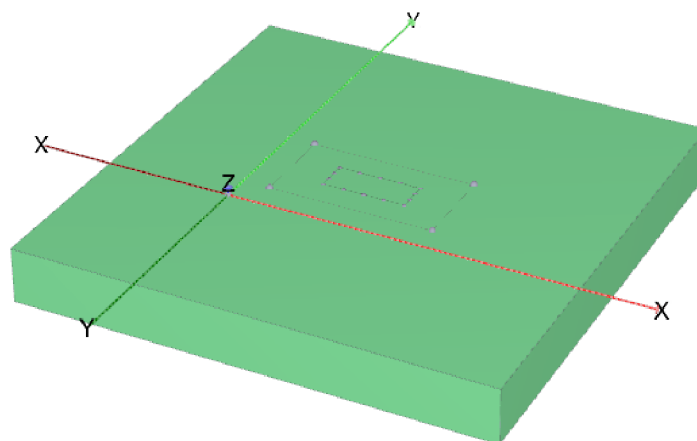
5.2.4.2. 3D úloha – pažená jáma

Analýza celé stavební jámy prostorovým modelem bude provedena nejprve za předpokladu, že jde o dokonalé studny a pažící konstrukce je ukončena u dna jámy. Dále s pažením prodlouženým pod dno jámy a nakonec odvodnění nedokonalými studnami. Pro tyto případy byl navržen následující sled studií:

1. Vliv hustoty sítě konečných prvků na přítok do stavební jámy.
2. Výpočet skupiny dokonalých studní pro různou hloubku vetknutí pažící konstrukce, přičemž nulové vetknutí a vetknutí navržené v 5.2.2 jsou jeho specifické případy.
3. Finální návrh odvodnění pomocí nedokonalých studní.

Popis 3D modelu pažené jámy:

Počátek souřadného systému je umístěn na horním povrchu modelu. Rozměry modelované oblasti jsou 172x172x20 m.



Obr. 5-19 Model pažené stavební jámy v axonometrickém zobrazení

Půdorysné rozměry jsou pro soulad s 5.2.3 odvozeny z principu náhradní studny. Náhradní poloměr je stanoven z půdorysné plochy stavební jámy:

$$r_0 = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 30}{\pi}} = 10,7 \text{ m}$$

Dosah deprese je vzat stejně jako při analytickém řešení skupiny studní: $R = 75 \text{ m}$.

Výsledná šířka i délka modelu je pak určena výrazem

$$2(R + r_0) = 2 \cdot (75 + 10,7) = 171,4 \doteq 172 \text{ m}.$$

Jáma je v rámci modelu umístěna centricky. Pažící konstrukce je modelována pomocí kontaktních prvků. Při analýze samotného proudění (*Flow only*), kdy nedochází k výpočtu napětí a deformací, postačí pažení modelovat pouze pomocí ploch (*Surfaces*) opatřených kontaktními prvky (*negative/positive interfaces*), prvky s definovanou tuhostí (*Plates*) nejsou použity. Kontaktní prvky jsou aktivními prvky v proudění a definovány jsou ve vlastnostech přilehlé zeminy jako nepropustné (*impermeable*). Studny jsou modelovány pomocí drénů, rozmístěných uvnitř jámy v polohách podle obr. 5-9, v délce dle příslušné úlohy. Síť konečných prvků byla zjemněna v několika úrovních s faktorem:

- 0,5 - v objemu cca 10 m kolem jámy
- 0,075 - v objemu pode dnem jámy uvnitř pažení
- 0,03125 - drény

Globální vodní hladina je definována v úrovni -4,0 m. Výpočet probíhá stejně jako v kapitole 5.1.3 vždy ve 2 fázích:

Fáze 1 (*Initial phase*) – Generování hydrostatického tlaku (*Phreatic*)

Fáze 2 – Aktivace pažení a drénů a výpočet ustáleného proudění (*Steady state groundwater flow*). Vzhledem k typu výpočtu není nutno „těžit“, neboli deaktivovat zeminu v jámě.

Za účelem splnění požadavku snížit hladinu 0,5 m pod dno jámy (na úroveň -6,5 m) byl aplikován iterativní postup. Opakováním výpočtu s různou velikostí parametru h_{drain} bylo nalezeno takové nastavení, při němž je snížení v daném bodě dosaženo.

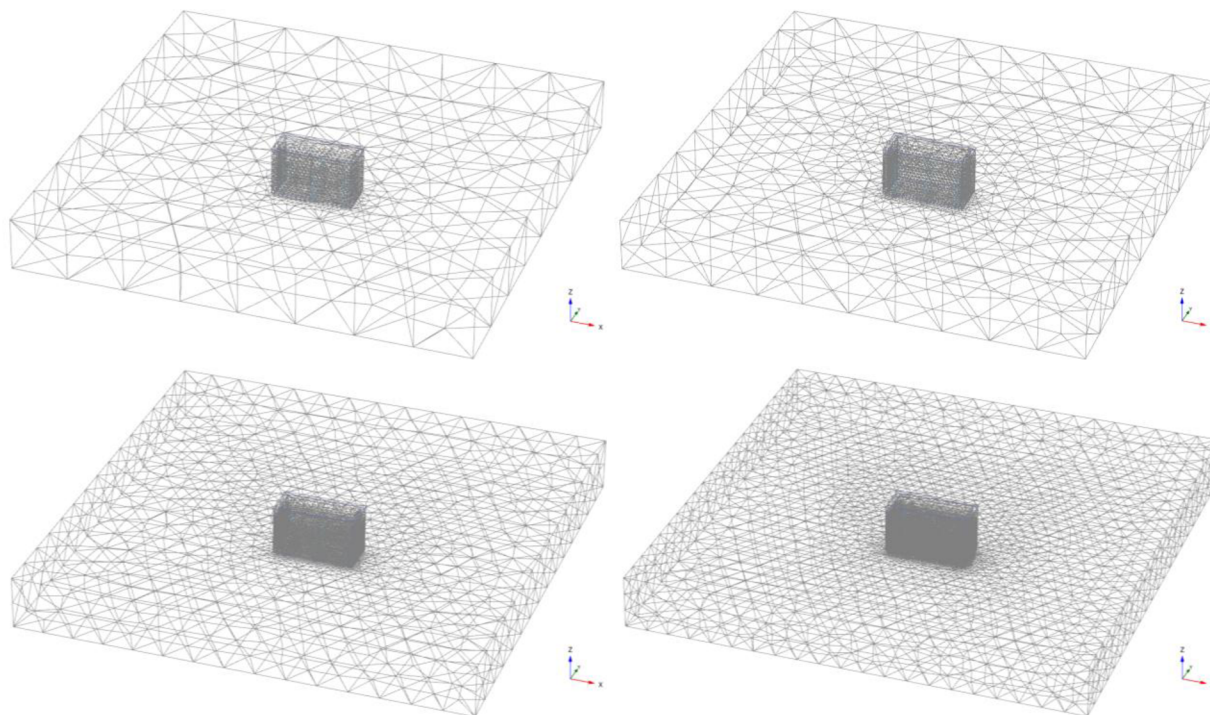
U analytického řešení je snížení vztahováno k těžišti skupiny studní, to je dále předpokládáno i v numerickém modelu.

5.2.4.2.1. Vliv hustoty sítě konečných prvků

Při řešení úloh pomocí metody konečných prvků je důležitá hustota sítě. Pro ověření vlivu hustoty sítě byl proveden výpočet skupiny dokonalých studní s

hustotou sítě konečných prvků v úrovních *Very coarse*, *Coarse*, *Medium* a *Fine*, viz obr. 5-20. Aby došlo k požadovanému snížení v bodě A (viz obr. 5-10), byla všem drénům shodně předepsána výška $h_{drain} = -7,23$ m.

Výsledné celkové přítoky Q jsou dány součtem přítoků z jednotlivých drénů, zaznamenány jsou v tab. 5-11 a zobrazeny v Graf 5-8.



Obr. 5-20 Vygenerovaná síť konečných prvků v úrovních *Very coarse*, *Coarse*, *Medium* a *Fine*

Tab. 5-11 Celkový přítok při různých úrovních hustoty sítě

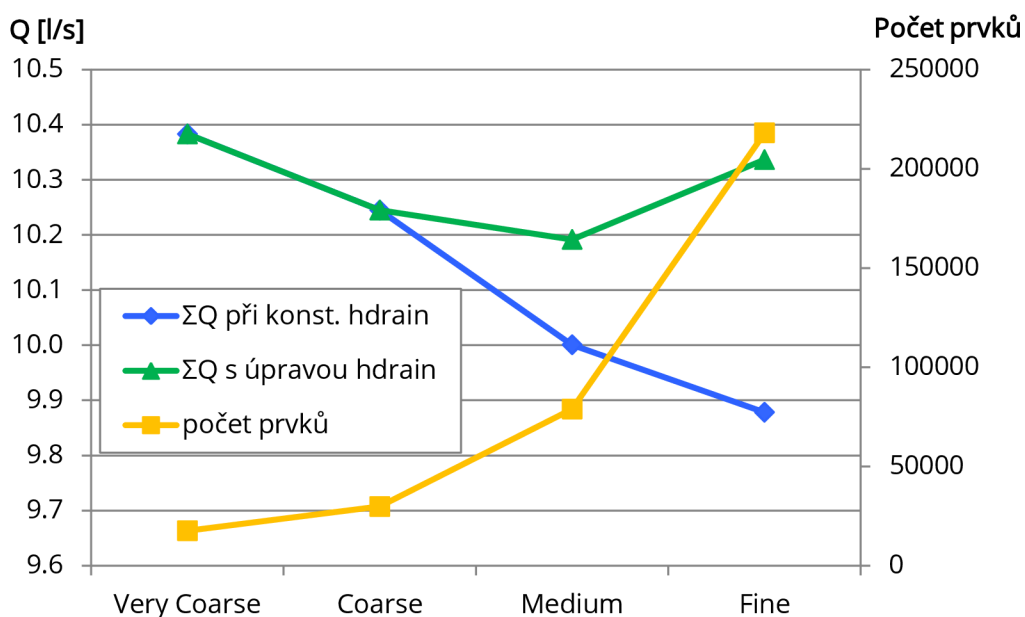
Hustota sítě	Počet prvků	h_{drain} [m]	Dosažené snížení hladiny v bodě A	Přítok do studny č.						ΣQ	ΣQ [l.s ⁻¹]
				1	2	3	4	5	6		
<i>Very coarse</i>	17639	-7.23	-6.50	163.46	124.12	161.11	160.89	125.48	162.03	897.10	10.4
<i>Coarse</i>	29807	-7.23	-6.51	158.88	124.49	159.02	158.88	124.85	159.05	885.16	10.2
<i>Medium</i>	78912	-7.23	-6.46	153.44	124.66	153.56	154.10	123.86	154.45	864.07	10.0
<i>Fine</i>	218083	-7.23	-6.38	151.48	123.42	151.77	152.01	123.15	151.65	853.48	9.9

Celkový přítok Q se s rostoucí hustotou sítě mění jen málo, přesto vykazuje mírnou klesající tendenci. To je dáno tím, že při vyšších hustotách sítě se mění tvar snížené hladiny vody a snížení na úroveň -6,5 m nebylo dosaženo. V dalším výpočtu v tab. 5-12 je proto potřebné snížení zajištěno pomocí úprav h_{drain} v nastavení drénů:

Tab. 5-12 Celkový přítok při různé hustotě sítě, za dosažení potřebného snížení v bodě A

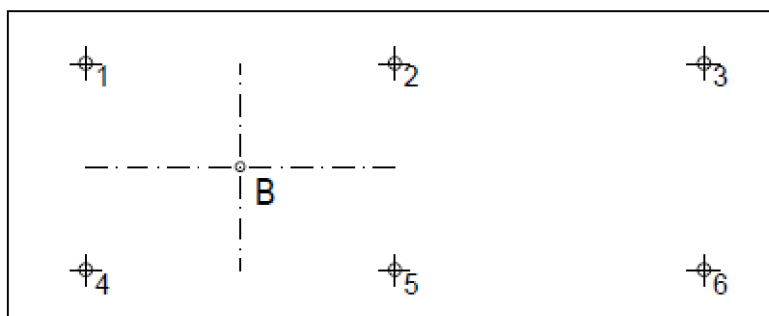
Hustota sítě	Počet prvků	h_{drain} [m]	Dosažené snížení hladiny v bodě A	Přítok do studny č.						ΣQ	ΣQ [l.s ⁻¹]
				1	2	3	4	5	6		
<i>Very coarse</i>	17639	-7.23	-6.50	163.46	124.12	161.11	160.89	125.48	162.03	897.10	10.4
<i>Coarse</i>	29807	-7.23	-6.51	158.88	124.49	159.02	158.88	124.85	159.05	885.16	10.2
<i>Medium</i>	78912	-7.30	-6.50	156.42	127.07	156.47	157.01	126.26	157.35	880.57	10.2
<i>Fine</i>	218083	-7.40	-6.50	158.47	129.16	158.75	159.07	128.92	158.71	893.07	10.3

Graf 5-8 Srovnání celkových přítoků pro různou hustotu sítě



Při pozorování tvaru hladiny (viz obr. 5-22, nebo ještě zřetelněji obr. 5-26) se ukázalo, že pro dané rozmístění studní je sice požadavek snížení splněn v bodě A, ale v rámci půdorysu jámy jsou místa, kde voda vystoupá výše.

V následujících úlohách, kde proudění ovlivňuje pažící konstrukce, se místo nejmenšího poklesu hladiny nachází uprostřed mezi studněmi 1, 2, 4, 5 (nebo 2, 3, 5, 6 - jáma je symetrická), viz obr. 5-21 a obr. 5-26. Označíme jej jako bod B a vůči tomuto bodu bude dále v analýzách MKP sledováno snížení.

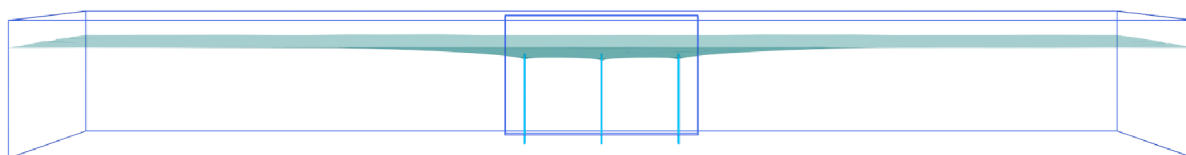


Obr. 5-21 Poloha bodu B, označujícího vrchol vzduť hladiny podzemní vody v jámě

V tab. 5-13 je výpočet modelu skupiny studní, u něhož je požadované snížení splněno v bodě B.

Tab. 5-13 Celkový přítok do jámy při splnění požadovaného snížení v bodě B

Hustota sítě	Počet prvků	h_{drain} [m]	Dosažené snížení hladiny v bodě B	Přítok do studny č.						ΣQ	ΣQ [l.s ⁻¹]
				1	2	3	4	5	6		
				[m ³ .day ⁻¹]							
<i>Medium</i>	78912	7.45	-6.50	162.69	132.07	162.82	163.37	131.30	163.64	915.88	10.6



Obr. 5-22 3D analýza skupiny studní - pokles hladiny

Závěry:

- Získané výsledky jsou platné pro uvažovaný poloměr deprese R a způsob lokálního zjemnění sítě, který byl aplikován v řešeném modelu.
- Vzhledem k malým rozdílům v přítoku lze říci, že hustota sítě na něj nemá vliv.
- Hustota sítě se projevuje spíše v přesnosti vykreslení plochy hladiny podzemní vody, zejména v blízkosti drénů. Pro dosažení stejného tvaru hladiny při všech úrovních hustoty tak bylo nutné provádět korekci h_{drain} .
- V dalších úlohách je, vzhledem k poměrně přijatelné časové náročnosti výpočtů, použít model s hustotou sítě *Medium*.

5.2.4.2.2. Vliv vetknutí pažící konstrukce na proudění

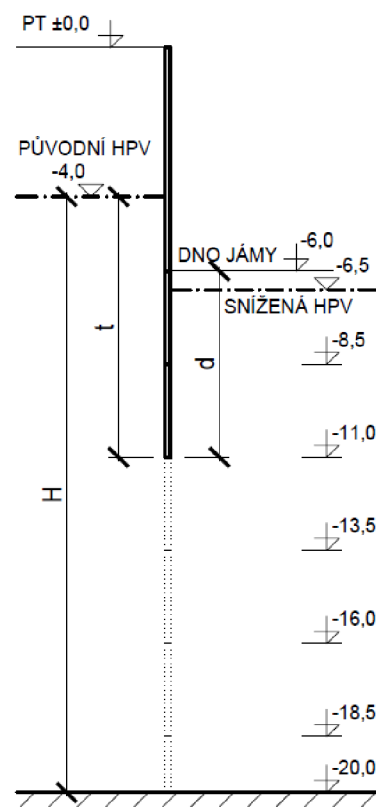
V této studii je prozkoumán efekt hloubky vetknutí pažící konstrukce na proudění. V literatuře, např. (6), lze nalézt různé graficko-početní způsoby řešení podtékání překážky pomocí proudových sítí, případně zpracované formou diagramů, např. jako je na obr. 5-24. Většinou se však jedná o dvojrozměrné úlohy, vhodné pro řešení liniových staveb.

Vztah přítokového množství a míry uzavření průtočného profilu, lze zjistit modelováním a zobrazit v diagramu.

V modelu skupiny studní z předchozí studie bylo aktivováno pažení pode dnem stavební jámy. Krajními případy jsou vetknutí 14 m (tj. až do nepropustného podloží) a 0 m (tj. případ v tab. 5-13. z předchozí studie). Interval mezi nimi byl rozdělen po 2,5 m úsecích. Situace je zřejmá z obr. 5-23, kde d označuje hloubku vetknutí konstrukce pod dno jámy, H je výška původní hladiny nad nepropustným podložím a t je ponoření konstrukce pod původní hladinu. Výška ve studních h_{drain} byla pro každou hloubku vetknutí nastavena dle tabulky tak, aby snížení v bodě B bylo stále na úrovni -6,5 m.

Celkový přítok do jámy je pak stanoven

sečtením průtoků z jednotlivých studní, viz tab. 5-14. Redukce Q v závislosti na t/H je zobrazena graficky v Graf 5-9 a srovnána s křivkou podle obr. Obr. 5-24.

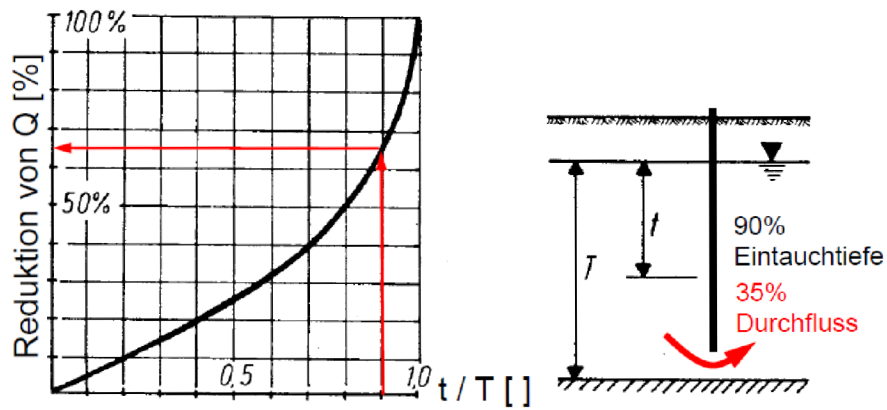


Obr. 5-23 Schéma vetknutí PK

Tab. 5-14 Přítok do stavební jámy při různém vetknutí PK

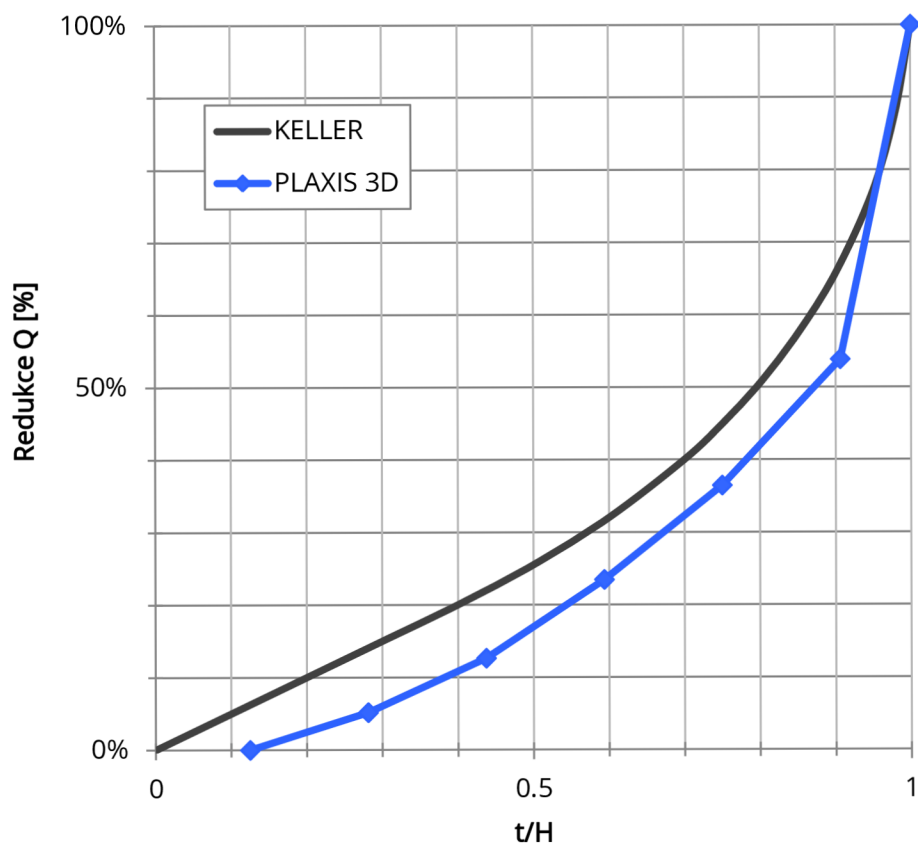
d	t	t/H	h_{drain}	Snížení	1	2	3	4	5	6	ΣQ	Redukce
[m]	[m]	[-]	[m]	v B	[l.s ⁻¹]						Q [%]	
0	2	0.13	-7,45	-6.50	1.88	1.53	1.88	1.89	1.52	1.89	10.6	0.00%
2.5	4.5	0.28	-7,30	-6.50	1.78	1.46	1.78	1.79	1.45	1.79	10.1	5.17%
5	7	0.44	-7,20	-6.51	1.63	1.36	1.64	1.64	1.35	1.64	9.3	12.64%
7.5	9.5	0.59	-7,08	-6.51	1.42	1.21	1.43	1.43	1.20	1.43	8.1	23.47%
10	12	0.75	-6,98	-6.51	1.17	1.02	1.18	1.18	1.01	1.18	6.7	36.45%
12.5	14.5	0.91	-6,85	-6.50	0.85	0.75	0.85	0.85	0.75	0.85	4.9	53.84%
14	16	1.00	-	-	0	0	0	0	0	0	0.0	100.00%

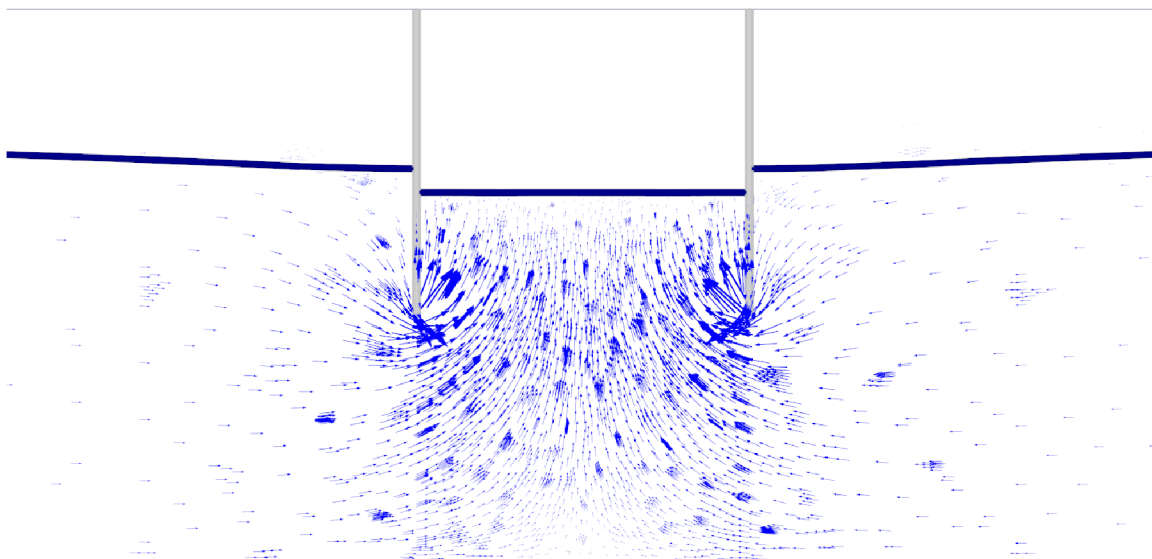
Třetí řádek v této tabulce je zvýrazněn, protože jde o případ navržený v kap. 5.2.2 a bude použit pro srovnání v následující studii.



Obr. 5-24 Digram popisující závislost „ponoření“ pažící konstrukce a průtoku. Zdroj: Poskytnuto firmou KELLER

Graf 5-9 Závislost redukce přítoku do jámy a míry vetknutí PK





Obr. 5-25 3D analýza proudění – podtékání pažící konstrukce (řez)

Závěry:

- Pažící konstrukce pod dnem stavební jámy působí příznivě vzhledem k čerpanému množství i k poklesu hladiny v okolí jámy. Z řezu na obr. 5-25 je možné pozorovat hydraulickou ztrátu způsobenou podtékáním překážky.
- Z grafu Graf 5-9 je patrná závislost průtoku na míře ponoření pažící konstrukce. Tvar křivky vykazuje velkou podobnost s diagramem na obr. Obr. 5-24, který popisuje tentýž problém za 2D podmínek.

5.2.4.2.3. Nedokonalé drény

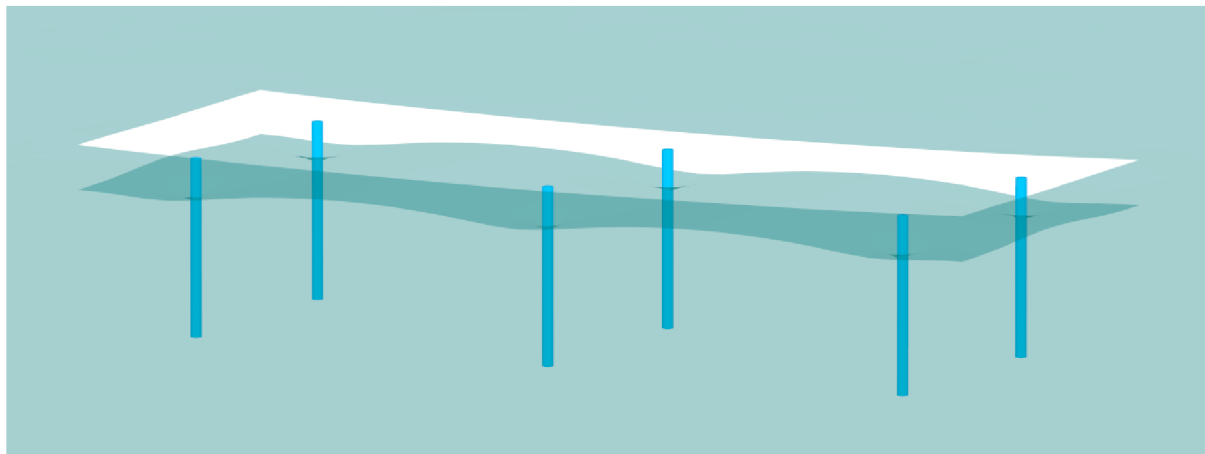
V praxi mnohdy není nutné ani ekonomicky výhodné, či dokonce není možné provádět vrtané studny až na nepropustné podloží. Cílem poslední studie je namodelovat případ pažené jámy odvodněné skupinou nedokonalých studní a ukázat jeho výhodnost oproti předchozímu řešení s dokonalými studnami.

Geometrie modelu je shodná s návrhem popsáním v kap. 5.2.2. Drény jsou namodelovány do hloubky 11,5 m, pažení je vetknuto 5,0 m pod dno jámy.

Výsledky jsou s předchozí variantou modelu porovnány tab. 5-15.

Tab. 5-15 Srovnání varianty dokonalých a nedokonalých studní

Model	h_{drain} m	Dosažené snížení hladiny v bodě B	číslo studny						ΣQ
			1	2	3	4	5	6	
Dokonalé studny	-7,20	-6.51	1.63	1.36	1.64	1.64	1.35	1.64	9.3
Nedokonalé studny	-8.90	-6.50	1.41	1.32	1.42	1.40	1.34	1.42	8.3



Obr. 5-26 3D analýza odvodnění stavební jámy - vizualizace snížené hladiny

Ověření specifického průtoku

Ověření provedeme u jedné z vnějších studní a u jedné ze studní uprostřed:

Studna č. 6:

Vsakovací délka: 4,3 m (změřeno v modelu)

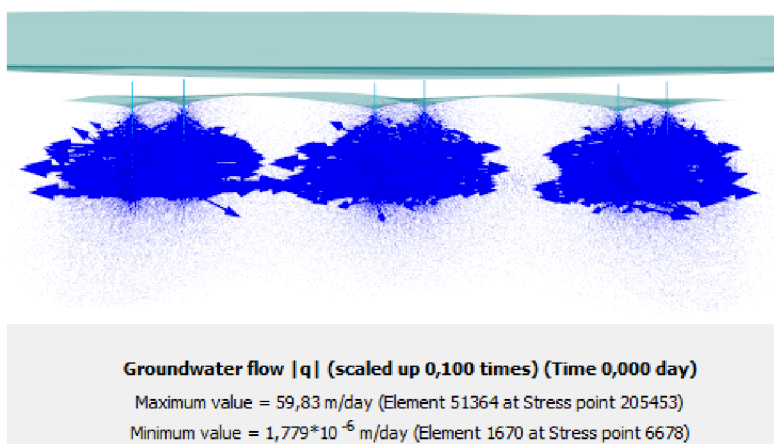
$$q = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h_0} = \frac{0,00142}{2 \cdot \pi \cdot 0,075 \cdot 4,3} = 0,701 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < q_{KRIT} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Studna č. 5:

Vsakovací délka: 4,1 m (změřeno v modelu)

$$q = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot h_0} = \frac{0,00134}{2 \cdot \pi \cdot 0,075 \cdot 4,1} = 0,694 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} < q_{KRIT} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Alternativně – maximální specifický průtok můžeme získat přímo z Plaxis Output, obr. 5-27. Zde je však nutno mít na paměti, že v modelu není zohledněn poloměr studny.



Obr. 5-27 3D analýza – proudění ke studním. Extrémní specifický průtok je 59,83 m/den.

$$q = 59,83 \text{ m. day}^{-1} = 0,692 \cdot 10^{-3} \text{ m. s}^{-1} < q_{KRIT} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m. s}^{-1}$$

Specifický průtok na plášti studní vyhovuje.

Závěry:

- Celkový přítok do jámy odvodněné nedokonalými studnami je 8,3 l/s. To je o 1,0 l/s méně, než v případě dokonalých studní. Jsou-li tedy studny navrženy jako nedokonalé, je odvodnění jámy možné při nižším čerpaném množství.
- Naproti tomu je riziko nedostatečné kapacity těchto studní, které je možné vyřešit jejich prohloubením, volbou většího průměru, nebo přidáním dalších studní.

6 SHRUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUSE

Po zhodnocení výsledků modelování a ověření shody s teoretickými poznatky byly v příslušných kapitolách vyvozeny konkrétní závěry. Tyto závěry jsou zde shrnuty a doplněny obecněji.

- Velikost numerického modelu se volí podle dosahu studny R . Tento rozměr se nepodařilo za použití numerických prostředků jednoznačně stanovit. Obecně určení skutečného poloměru dosahu studny je problém obtížný, ne však rozhodující. V praxi se většinou spoléhá na použití empirických vzorců.
- Bylo ověřeno, že součinitel hydraulické vodivosti nemá přímý vliv na tvar depresního kužele. Snížení hladiny za stacionárního proudění ovlivní pouze nepřímo přes empirické vztahy pro R .
- Naopak se prokázalo, že na tvar křivky má vliv anizotropie, tedy poměr vodorovného a svislého součinitele hydraulické propustnosti. Při vrstevnatém podloží je tvar křivky plošší.
- Modelování dokonalé studny ukázalo odchýlení analytického řešení od reality, způsobené zjednodušujícími předpoklady.
- Hustota sítě konečných prvků je kritickým faktorem. Je-li dodržena zásada zjemnění v oblasti vysokých gradientů, není hodnota přítoku do studny hustotou sítě významně ovlivněna. Přílišné zjemnění však má za následek časovou náročnost výpočtu i samotného generování sítě.
- Díky numerickému modelu je možné stanovit a zobrazit tvar snížené hladiny podzemní vody při libovolném uspořádání odvodňovacího

systemu. Obecně je modelovaný tvar hladiny odlišný od analytického řešení, zejména v místech s nezanedbatelným vertikálním prouděním. Pro dobrou shodu s teoretickými poznatky, jež byly uplatněny u samostatné studny, lze věřit přesnosti plochy i při složitějším uspořádání.

- Díky vizualizaci hladiny je možné provést kontrolu, zda je požadované snížení skutečně zajištěno v celé ploše jámy.
- Pažící konstrukce pode dnem redukuje přítok do jámy. Diagram, zobrazující závislost této redukce na míře vetknutí, odpovídá podobnému diagramu získanému z jiného zdroje.
- Závěry studie proudění k nedokonalé studni v osové symetrii odpovídají teoretickým poznatkům. Výhodou návrhu nedokonalých studní v případě odvodnění stavební jámy je kromě ekonomických úspor při jejich provádění také nižší čerpané množství nutné pro dosažení stejného snížení hladiny a menší pokles hladiny v okolí.
- Modelování studny pomocí prvku „drain“ je poměrně snadnou a přímočarou variantou, princip se shoduje s předepsáním liniové okrajové podmínky. V diplomové práci byla jeho funkce verifikována modelováním v osově symetrickém modelu a porovnáním s analytickým řešením. Chování vodní hladiny je v souladu s teorií. Při aplikaci ve 3D se vyskytla jistá odchylka, která mohla být způsobena nulovou tloušťkou, viz níže. Celkové ohodnocení se dá vyjádřit takto:

Výhody:

- Rychlost samotného modelování - změny v geometrii jsou otázkou chvíle, zejména vzhledem k dalším způsobům modelování studny, např. viz (7).
- Rychlost výpočtu - iterační výpočet s prvky „drain“ probíhal vždy hladce

Nevýhody:

- Nulová tloušťka prvku - znemožňuje zohlednit vliv průměru studny, zejména při použití ve 3D modelu. Ve dvojrozměrných osově symetrických modelech je tento nedostatek vyřešen odsunutím drénu od osy symetrie.
- Neumožňuje předepsat odebírané množství vody, to je vždy výsledkem výpočtu. Za tímto účelem je k dispozici prvek „well“, který však v této práci není využit. Rozdíl mezi těmito dvěma prvky bude nejvíce zřejmý provedením časově závislé analýzy.

Prvek „well“ bude ve všech časových krocích odebírat stejné množství vody, zatímco „drain“ se chová jako studna s neomezenou kapacitou, v prvním kroku bude vykazovat extrémní průtok, v dalších krocích bude klesat. Důsledkem bude dosažení ustáleného stavu za jiný časový úsek a při jiném snížení hladiny. Tuto hypotézu by bylo vhodné ověřit navazujícím výzkumem.

7 ZÁVĚR

Smyslem diplomové práce bylo ověřit možnost modelování odvodnění stavební jámy metodou konečných prvků. V rámci řešení tohoto zadání se podařilo rozhodnout o potřebné velikosti modelu a prověřit vliv hustoty sítě konečných prvků. Byl navržen způsob modelování studně pomocí prvku „drain“, jeho chování bylo úspěšně ověřeno a podloženo teoretickými poznatky. Na modelu pažené stavební jámy pak byl předveden vliv pažící konstrukce na proudění a efekt hydraulicky nedokonalých studní. Výsledkem analýzy byl celkový přítok do jámy a vizualizace poklesu vodní hladiny. Numerický přístup k řešení odvodnění jámy obecně umožnil zohlednit řadu vlivů, na něž jsou analytické metody krátké, zejména pak prostorový efekt v případě 3D analýzy.

Pro další studie je možno navrhnout například: modelování studny pomocí prvku „well“ při neustáleném proudění, zkoumání efektu poklesu hladiny pomocí sdružené analýzy, zahrnutí anizotropie, nehomogenity, či speciálních okrajových podmínek do modelu.

LITERATURA

1. POWERS, J. Patrick. *Construction dewatering and groundwater control: new methods and applications*. Hoboken, N.J. : J. Wiley, 2007. ISBN 978-0-471-47943-7.
2. JANDORA, Jan. *Hydraulika a hydrologie, modul 01*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2002.
3. GREGOR, Robert. *Odvodňovanie stavebných jám*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1990.
4. ŘÍHA, Jaromír. *Hydraulika podzemní vody, modul 01*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005.
5. BRINKGREVE, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M. *PLAXIS 2018 User manual*. místo neznámé : Delft University of technology&Plaxis bv, The Netherlands.
6. REDDI, Lakshmi N. *Seepage in soils: principles and applications*. Hoboken, N.J. : J. Wiley, 2003. ISBN 0-471-35616-6.
7. *Plaxis 8.6.Groundwater lowering - "Public underground garage Kapucinski square" in Varaždin*. [Online] <https://www.youtube.com/watch?v=w1cEBNeDznY>.
8. GALAVI, Vahid. *Groundwater flow, fully coupled flow deformation and undrained analyses in PLAXIS 2D and 3D*. : Plaxis Report, 2010.
9. TREVI Group. Anchored Diaphragm Wall and Dewatering System for Libya Hotel. *Deep foundations*. May/June 2017, stránky 14-19.