

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VSAKOVANÍ VODY Z POLNÍCH EXPERIMENTŮ

A NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ

COMPAREMENT OF RESULTS FROM INFILTRATION TESTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Dominik Blahut

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DAVID DUCHAN, Ph.D.

BRNO 2017



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	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
PRACOVISŤE	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Dominik Blahut
NÁZEV	Srovnání výsledků vsakování vody z polních experimentů a numerického modelování
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. David Duchan, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.

Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, vol. 44, 1980, ISSN 1435-0661.

LU, N., LIKOS, W. J., 2004. Unsaturated Soil Mechanics, John Wiley & Sons, New Jersey, 556 p. ISBN 0-471-44731-5.

FREDLUND, D.G., RAHARDJO, H. 2007. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley & Sons. 1993. ISBN: 978-0-471-85008-3, 552 p.

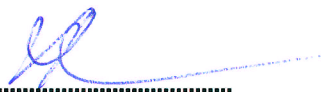
ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Na vybrané lokalitě a popřípadě v laboratoři budou provedeny vsakovací experimenty. Dále budou provedeny zkoušky pro zjištění základních vlastností zeminy. Poté bude vsakovací experiment simulován pomocí vybraných numerických modelů. Výsledky z experimentů a z numerického modelování budou vzájemně srovnány.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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



Ing. David Duchan, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKTY A KLÍČOVÁ SLOVA

Abstrakt

Cílem diplomové práce je srovnání výsledků vsakování vody z polních zkoušek, z laboratoře a z numerického modelování na dvou vybraných lokalitách. Prvním úkolem práce je rešeršní činnost popisu obou lokalit a jejich přilehlého území. Práce se dále zabývá polními zkouškami vsakování založené na využití zarážecích válců, nejprve teoreticky postupy jednotlivých metod, a poté vlastním praktickým měřením v terénu. Dále se z odebraných vzorků zemin provede měření v laboratoři, nejdříve na propustoměrech, a poté se provede zrnitostní zkouška, ze které se pomocí empirických vzorců odvodí hydraulická vodivost. Nakonec se využije numerického modelování a dojde ke srovnání všech výsledků. V závěrečné fázi práce jsou poskytnuta doporučení pro vsakování na jednotlivých lokalitách a srovnání jednotlivých metod vsakování.

Klíčová slova

vsakování, hydraulická vodivost, propustoměr, zrnitost, numerické modelování

Abstract

The aim of this thesis is to compare the results of water infiltration from field tests, from laboratories and from numerical modeling at two selected locations. The first objective is the search procedure and the description of both sites and its adjacent areas. Further work continues with infiltration field tests using ring infiltrometer, at first theoretically for each method, and then practically with own personal measurements in the field. Further from the collected soil samples the measurements are performed in the laboratory, first in the permeameter, and followed by the grain size distribution test, from which the hydraulic conductivity is derived by using empirical formulas. At last the numerical modeling is used and all the results are compared. In the final phase of thesis the recommendations are given for infiltration at various locations and comparison of the infiltration methods.

Keywords

infiltration, hydraulic conductivity, permeameter, grain size distribution, numerical modeling

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Dominik Blahut *Srovnání výsledků vsakování vody z polních experimentů a numerického modelování*. Brno, 2017. 65 s., 14 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. David Duchan, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

.....

podpis autora

Dominik Blahut

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Duchanovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce. Mé poděkování patří též mým přátelům za pomoc při měření v terénu.

OBSAH

1	ÚVOD	10
1.1	CÍLE PRÁCE	10
1.2	ÚVOD DO PROBLEMATIKY VSAKOVÁNÍ.....	10
2	POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ	12
2.1	GEOMORFOLOGIE	12
2.1.1	Poloha a popis lokality	13
2.1.2	Přiřazení ke geomorfologické jednotce	14
2.1.3	Charakteristika pozemku	15
2.1.4	Základní hydrologická data	15
2.1.5	Klimatické poměry	16
2.2	DOSAVADNÍ PROZKOUMANOST	16
2.2.1	Vrtná prozkoumanost.....	16
2.2.2	Hydrogeologie	18
2.2.3	Sesuvy	18
2.2.4	Poddolovaná území	19
2.2.5	SURIS – surovinový informační subsystém	19
2.3	GEOLOGICKÁ STAVBA ŠIRŠÍHO OKOLÍ	19
2.3.1	Přiřazení k regionálně geologické jednotce	20
2.3.2	Charakteristika přiřazené jednotky	22
2.4	HYDROGEOLOGIE	23
2.4.1	Propustnost horninového prostředí	24
2.4.2	Podzemní voda.....	24
2.5	GEODYNAMICKÉ JEVY	24
3	METODY STANOVENÍ HYDRAULICKÉ VODIVOSTI	25
3.1	POLNÍ ZKOUŠKY	26
3.1.1	Bouwerova metoda	26
3.1.2	Girinského metoda	30

3.1.3	Metoda dle ČSN EN- ISO 22282-5	33
3.2	LABORATORNÍ METODY	36
3.3	EMPIRICKÉ VZTAHY.....	39
3.3.1	Zrnitost.....	39
3.3.2	Odvození hydraulické vodivosti z křivek zrnitosti	42
3.4	NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ.....	47
3.4.1	Obecný postup modelování	48
3.4.2	Dvourozměrné rotačně symetrické proudění – HYDRUS 2D.....	49
4	SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	53
4.1	VYHODNOCENÍ VSAKOVACÍ ZKOUŠKY IN SITU	54
4.2	LABORATORNÍ STANOVENÍ V PROPUSTOMĚRU	54
4.3	VYHODNOCENÍ Z EMPIRICKÝCH VZTAHŮ NA ZÁKLADĚ ZRNITOSTNÍHO ROZBORU.....	54
4.4	ODHADEM PODLE ZATŘÍDĚNÍ MATERIÁLU	54
4.5	MODELOVÝM ŘEŠENÍM.....	55
5	ZÁVĚR.....	56
	POUŽITÁ LITERATURA	58
	SEZNAM TABULEK	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	62
	SEZNAM PŘÍLOH.....	65

1 ÚVOD

1.1 CÍLE PRÁCE

Diplomová práce je zaměřená na srovnání výsledků vsakování vody z polních zkoušek, z laboratoře a numerického modelování na dvou vybraných lokalitách, a to lokalitě Rajhrad a lokalitě Oleksovice. Obě lokality budou podrobně popsány z hlediska geomorfologie, dosavadní prozkoumanosti, geologické stavby širšího okolí, hydrogeologie a geodynamických jevů. V práci se bude rozebírat a srovnávat zejména hydraulická vodivost a koeficient vsaku. Dále budou popsány polní metody vsakování s využitím zarážecích válců a následně vyhodnoceny výsledky z vlastní práce v terénu. Posléze budou v práci popsány postupy měření v laboratoři, a to hydraulické vodivosti a pórovitosti. Vlastní měření v laboratoři bude vyhodnoceno v tabulkách přiložených v příloze. Hydraulická vodivost odebraných zemín se odvodí pomocí platných empirických vztahů z křivek zrnitosti, které budou určeny ze síťového rozboru zeminy, popřípadě z aerometrické zkoušky. Nakonec se provede numerické modelování provedeného vsakování na základě naměřených hodnot v terénu, které bude orientačně sloužit jako porovnání hydraulické vodivosti. Závěrem budou srovnány výsledky všech metod včetně doporučení pro praktické využití.

1.2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VSAKOVÁNÍ

Dešťové vody jsou tradičně odváděny z urbanizovaných území městským kanalizačním systémem. To může vést k předimenzování kanalizačních stok a k přetěžování čistíren odpadních vod. Dalším negativním aspektem je zmenšování přirozeného doplňování zásob podzemní vody. Tyto negativní dopady je možné částečně kompenzovat umělou infiltrací srážkových vod ze zpevněných ploch. Základním cílem hospodaření se srážkovými vodami je jejich návrat do přirozeného oběhu vody. Jedná se zejména o retenci srážkových vod vsakováním do horninového prostředí pomocí vsakovacích zařízení.[9]

Vrácení dešťové vody zpátky do přírody se provádí pomocí vsakovacích zařízení různých typů. Pro návrh vsakovacích zařízení na vsakování srážkových vod byla v poslední době sestavena řada podkladů. Jedná se o domácí (především norma ČSN 75 9010[17]) a také zahraniční technické normy (ASTM D3385-09[19], ASTM D5126/D5126M[20], ATV Merkblatt M153[18], DIN 19682-7[21]) a literaturu (Hlavínek a kol. 2007, Vitek 2008). Podklady jsou vhodné vodítka při předběžných úvahách návrhu vsakovacích zařízení.[9]

Vsakovací zařízení lze rozdělit z konstrukčního hlediska na:

- plošné vsakování (umělá vsakovací plocha),
- vsakovací průlehy (terénní snížení),

- vsakovací rýha (příkop),
- vsakovací šachta (studna),
- vsakovací suchá vodní nádrž (poldr),
- malé vodní nádrže s retenčním prostorem a vsakováním břehy.[9]

Pro správný návrh vsakovacích zařízení je nutné provést průzkum území, který umožní získat geotechnické vlastnosti zemin. Cílem průzkumných prací a jejich vyhodnocení je poskytnout údaje o vrstvách a charakterizovat jejich fyzikální a hydrogeologické vlastnosti. V projektech geologických prací navržené průzkumné objekty a hydrodynamické zkoušky jsou základním nástrojem pro ověření geologické situace na vybrané lokalitě.[9]

2 POPIS ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

V rámci diplomové práce byly vybrány dvě lokality, a to lokalita v Rajhradě a lokalita v Oleksovicích, které budou dále podrobně popsány. Lokality byly vybrány z hlediska dostupnosti, možnosti aplikace vody, druhu zeminy, možnosti neomezeného vrtání, kopání a vsakování na pozemcích.

Při popisování území se jedná o maximální využití všech dostupných údajů, které již byly o dané lokalitě získány někdy v minulosti a docílit tak učinit nový průzkum co nejehospodárnější. Tento průzkum zahrnuje šetření ohledně historie lokality, využití základního a aplikovaného geologického průzkumu, studium stávajících map a v neposlední řadě také využití údajů uložených v archívu České geologické služby – Geofondu. Dále je nutná podrobná rekognoskace zkoumaného území, která se vykonává osobní obchůzkou, prohlídkou a pozorováním v terénu, při kterém lze podrobně zachytit charakter místa a pochopit stávající vazby na širší okolí. Při rekognoskaci je nutností studovat inženýrské sítě, i ty skryté a porovnávat je s údaji v situacích a mapách. V rámci této práce se bude popisovat území z hlediska:

- geomorfologie,
- dosavadní prozkoumanosti,
- geologické stavby širšího okolí,
- hydrogeologie,
- geodynamických jevů.[1]

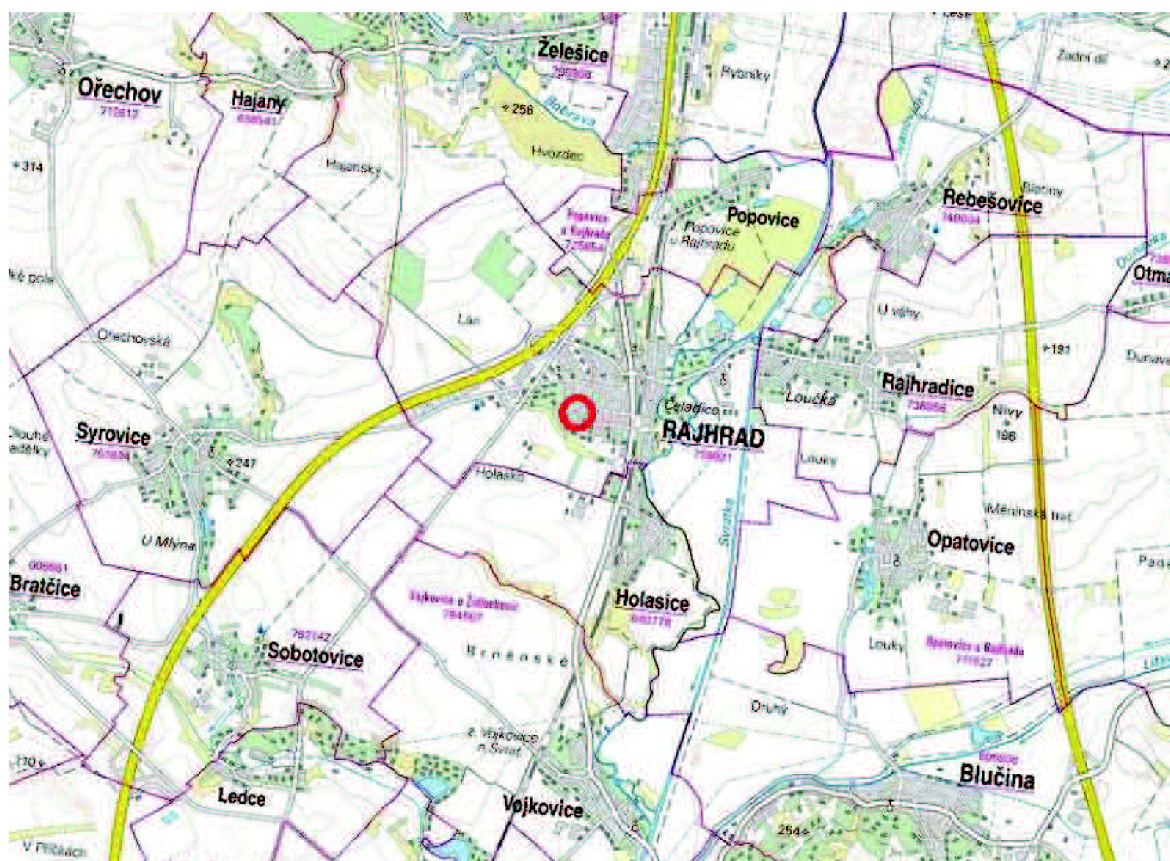
2.1 GEOMORFOLOGIE

Geomorfologie je vědní disciplína úzce spjata s geologií, která studuje tvary zemského povrchu, které jsou výsledkem působení endogeologických a exogeologických činitelů a také geografických faktorů.[3]

2.1.1 Poloha a popis lokality

Lokalita Rajhrad

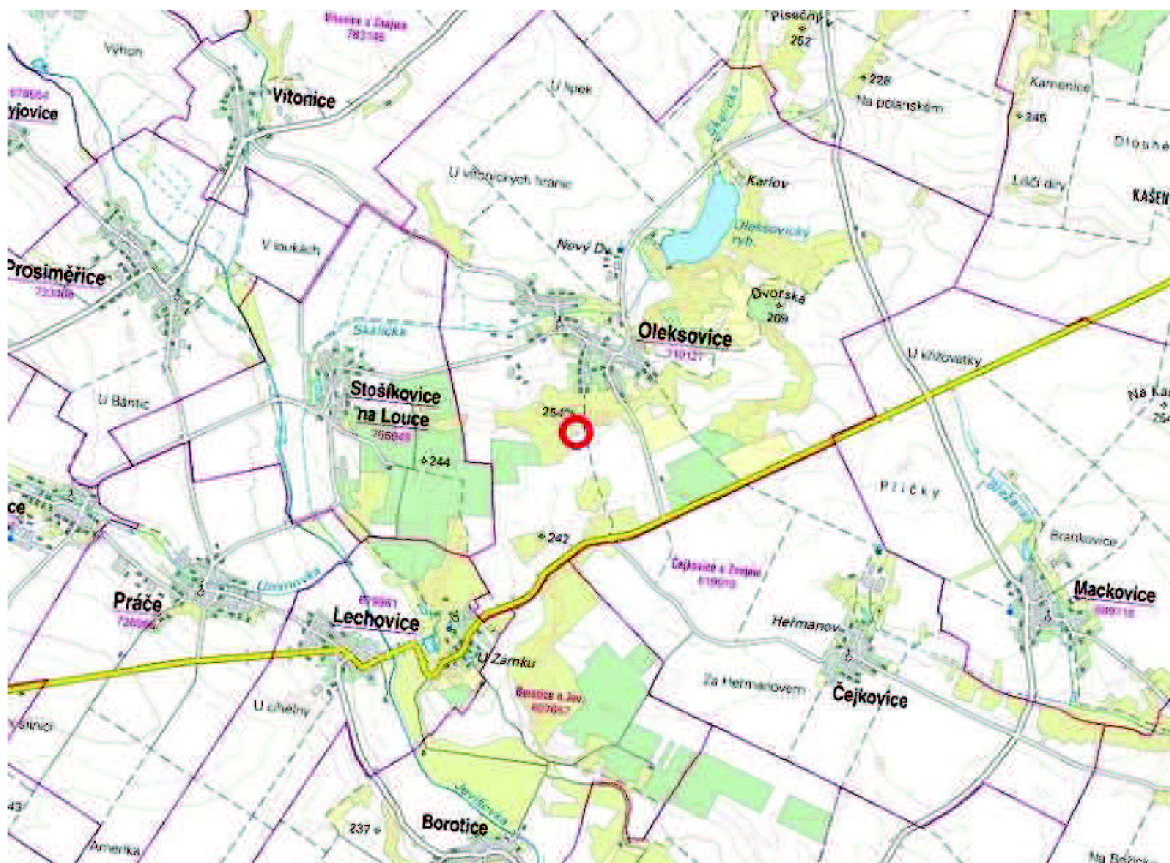
První lokalita se nachází v Jihomoravském kraji v okrese Brno – venkov ve městě Rajhrad na pozemku Kláštera sester Těšitelek vedle kostela Božského Srdce Ježíšova. Sestry v areálu provozují domov pro seniory, z armádního objektu v bývalé zahradě vznikl Dům léčby bolesti s hospicem sv. Josefa.



Obr. 1 Geografická mapa 1:50 000 – Rajhrad – červeně označena lokalita[4]

Lokalita Oleksovice

Zkoumaná oblast se nachází z hlediska geografie v Jihomoravském kraji v okrese Znojmo, v obci se statusem městyse Oleksovice. Místo je orientováno jižně od obce v blízkosti staré pískovny a Přírodní památky Oleksovické vřesoviště s hnízdištěm břehule.



Obr. 2 Geografická mapa 1:50 000 – Oleksovice – červeně označena lokalita[4]

2.1.2 Přiřazení ke geomorfologické jednotce

Lokalita Rajhrad

Vybrané území z geomorfologického hlediska patří do:

Systém	Alpsko-Himalájský systém
Subsystém.....	Karpaty
Provincie.....	Západní Karpaty
Subprovincie.....	Vněkarpatské sníženiny
Oblast.....	Západní Vněkarpatské sníženiny
Celek.....	Dyjskosvratecký úval
Podcelek	Rajhradská pahorkatina
Okrsek	Syrovická pahorkatina

Syrovická pahorkatina je okrsek s neogenními sedimenty a spojenými terasami Svratky a Svitavy překryté spraší.[5]

Lokalita Oleksovice

Zkoumané území z geomorfologického hlediska patří do:

Systém	Alpsko-Himalájský systém
Subsystem.....	Karpaty
Provincie.....	Západní Karpaty
Subprovincie.....	Vněkarpatské sníženiny
Oblast.....	Západní Vněkarpatské sníženiny
Celek.....	Dyjskosvratecký úval
Podcelek	Drnholecká pahorkatina
Okrsek	Olbramovická pahorkatina

Olbramovická pahorkatina je nížinná pahorkatina tvořená neogenními a čtvrtohorními sedimenty.[5]

2.1.3 Charakteristika pozemku

Lokalita Rajhrad

Místo průzkumu se nachází na parcele číslo 256/1 v katastrálním území Rajhrad. Parcela obsahuje zastavěnou plochu a nádvoří, průzkum byl proveden na zahradě. Příjezd k pozemku je možný po asfaltové komunikaci. V blízkosti určeného místa vedou inženýrské sítě, a to zejména kanalizační potrubí. Z hlediska morfologie terénu leží pozemek na rovině. Nadmořská výška se zde pohybuje okolo 220 m n. m.[4]

Lokalita Oleksovice

Místo průzkumu se nachází na parcele číslo 9439 v katastrálním území Oleksovice. Parcela je umístěna na poli, tudíž druhem pozemku je orná půda. Příjezd k pozemku je možný po polní cestě, která vede z obce. Co se týče inženýrských sítí, tak parcelou žádné nevedou. Z morfologického hlediska leží pozemek téměř na rovině. Nadmořská výška přímo v místě průzkumu je přibližně 245 m n. m.[4]

2.1.4 Základní hydrologická data

Lokalita Rajhrad

Na posuzované parcele se nenachází žádná vodní nádrž a ani tudy neprotéká žádný vodní tok. Nejbližší vodní tok se nachází ve vzdálenosti 770 m a nazývá se Vojkovický náhon, který se dále vlévá do řeky Svratky.

Lokalita Oleksovice

Na určeném pozemku se nenachází žádná vodní nádrž a ani tudy neprotéká žádný vodní tok. Nejbližší vodní tok se nazývá Skalička, protéká obcí Oleksovice a nalézá se 1,1 km od lokality. Na již zmíněném toku se v obci nachází také vodní nádrž Oleksovice rybníčního charakteru, která je vzdálená 1,7 km.

2.1.5 Klimatické poměry

Lokalita Rajhrad

Průměrná roční teplota vzduchu se v lokalitě Rajhrad pohybuje mezi 9 – 10 °C. Průměrná zimní teplota je mezi -1 a -2 °C, průměrná teplota v létě se pohybuje v rozmezí 19 – 20 °C. Průměrný roční úhrn srážek se pohybuje okolo 450 – 500 mm, přičemž ve vegetačním období spadne v průměru 300 – 350 mm.[14]

Lokalita Oleksovice

Průměrná roční teplota vzduchu se zde pohybuje stejně jako v předchozí lokalitě mezi 9 – 10 °C. Průměrná zimní teplota je kolem -2 °C, průměrná teplota v létě je kolem 18 °C. Průměrný roční úhrn srážek je 450 – 500 mm, jako v lokalitě Rajhrad.[14]

2.2 DOSAVADNÍ PROZKOUMANOST

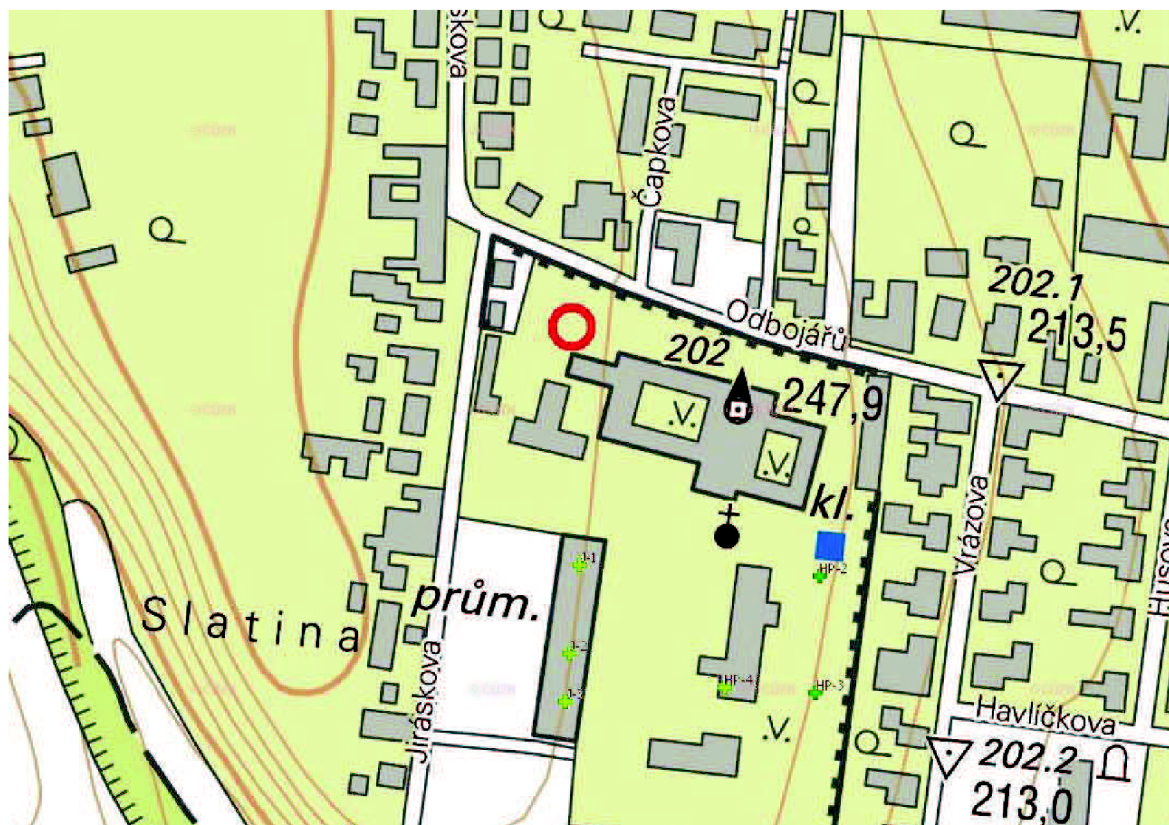
Jedná se o čísla a názvy zpráv vrtů, druhy, lokalizace, hloubka, rok provedení a účel objektu (tab. 1), které jsou v nejbližším okolí zkoumané lokality (obr. 3). Dosavadní prozkoumanost slouží jako předběžný nástin toho, co je možno v dané lokalitě očekávat.[2]

2.2.1 Vrtná prozkoumanost

Lokalita Rajhrad

Tab. 1. Vrtná prozkoumanost - Rajhrad[2]

Název	Druh	Hloubka [m]	Souřadnice			Zaměření	Účel	Rok	Signatura
			X	Y	Z				
HP-2	vrt svislý	18	1172843.9	600139.5	216.0	zaměřený	monitorovací, indikační, sanační	1984	GF P042679
HP-3	vrt svislý	17	1172897.4	600141.3	215.5	zaměřený	monitorovací, indikační, sanační	1984	GF P042680
HP-4	vrt svislý	12.5	1172894.8	600183.1	217.2	zaměřený	monitorovací, indikační, sanační	1984	GF P042681
J-1	vrt svislý	13	1172838.8	600249.3	217.8	zaměřený	inženýrsko-geologický	1986	GF P055472
J-2	vrt svislý	13	1172879.4	600253.9	217.7	zaměřený	inženýrsko-geologický	1986	GF P055473
J-3	vrt svislý	13	1172901.3	600255.7	217.6	zaměřený	inženýrsko-geologický	1986	GF P055474

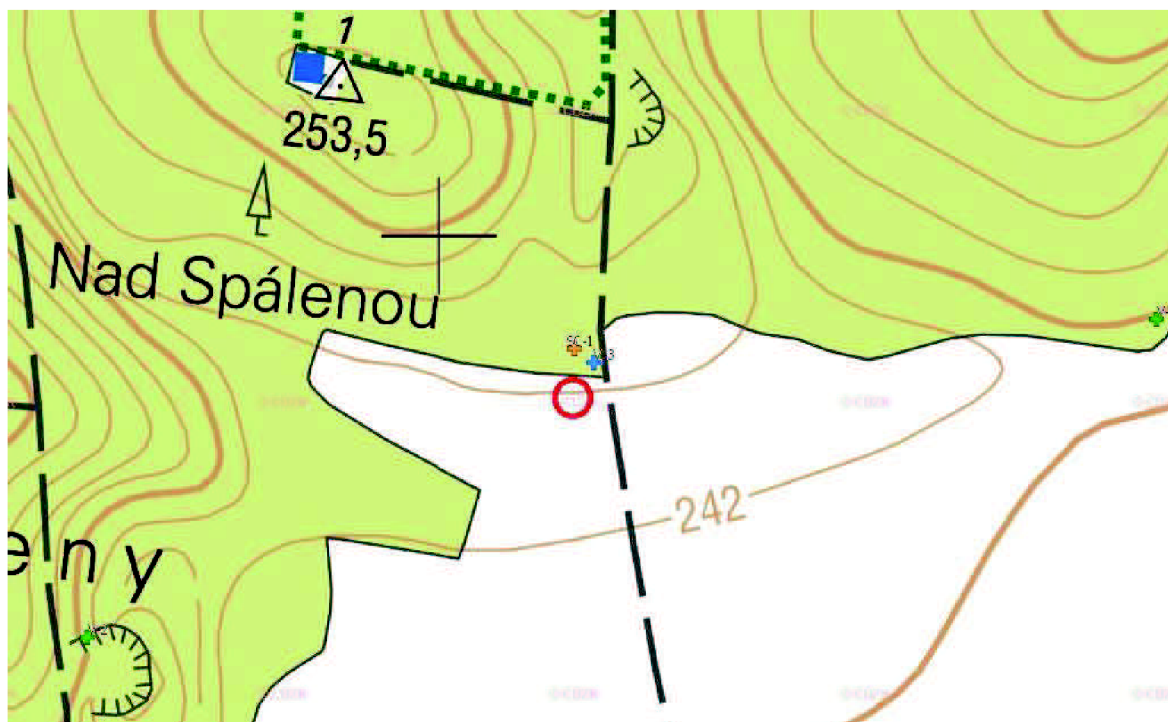


Obr. 3 Vrtná prozkoumanost 1:2000 – Rajhrad – červeně označeno místo průzkumu[2]

Lokalita Oleksovice

Tab. 2. Vrtná prozkoumanost - Oleksovice[2]

Název	Druh	Hloubka [m]	Souřadnice			Zaměření	Účel	Rok	Signatura
			X	Y	Z				
SC-1	kopaná sonda	10	1191051.0	627940.3	244.9	zaměřený	ložiskový na nerudy	1970	GF P022237
V-2	vrt svislý	23	1191177.4	628154.2	239.9	zaměřený	ložiskový na nerudy	1970	GF P022237
V-3	vrt svislý	28	1191057.0	627931.8	244.4	zaměřený	ložiskový na nerudy	1970	GF P022237
V-4	vrt svislý	22	1191037.8	627684.7	240.0	zaměřený	ložiskový na nerudy	1970	GF P022237



Obr. 4 Vrtná prozkoumanost 1:2000 – Oleksovice – červeně označena lokalita[2]

2.2.2 Hydrogeologie

Lokalita Rajhrad

V blízkosti lokality byly provedeny dva hydrogeologické průzkumy, a to na vrtech HP-2 a HP-3, které jsou uvedeny v tab. 1. Podzemní voda by se zde měla pohybovat v rozmezí 2 – 3,2 m pod terénem.[2]

Lokalita Oleksovice

Podzemní voda z vrtů 1972 dosahuje 15 m pod terénem.[2]

2.2.3 Sesuvy

Lokalita Rajhrad

V posuzované území a ani v jeho těsné blízkosti k žádnému sesuvu nedošlo a proto jím lokalita přímo ohrožena není. Nejbližší bodový sesuv nastal v roce 1997 v nedaleké obci Syrovce vzdálené 3,6 km vzdušnou čarou od posuzované lokality. Tento sesuv je nadále aktivní, stav je suchý, sanován je stabilizační konstrukcí a má sklon 15°. Nejbližší plošný sesuv se stal v roce 1963 v obci Blučina, která je vzdálená 4,2 km od lokality. Plošný sesuv je aktivní, na některých místech se vytvořila jezírka a sanován nijak nebyl. Na svahu ukloněném 30 – 35° se vytvořila rozsáhlá sesuvná oblast a charakteristickou morfologií. Sesuv se projevuje jako kerný.[2]

Lokalita Oleksovice

V oblasti Oleksovic a ani v jeho přilehlých částech nikdy k žádnému sesuvu nedošlo, a proto jím místo průzkumu nijak ohroženo není. Nejbližší sesuv nastal v roce 1963 ve vzdálené obci Dyje, která se nachází 10,6 km JZ od místa průzkumu. Sesuv byl charakterizován jako plošný, stupeň aktivity měl aktivní, jednalo se o suchý stav, sanován nijak nebyl a měl sklon 20°. [2]

2.2.4 Poddolovaná území

Lokalita Rajhrad

Zájmová oblast nikdy v minulosti ohrožena poddolováním nebyla. Nejbližší poddolované území se nachází v obci Želešice vzdáleném 3,9 km od lokality. Základní surovinou zde byla polymetalická ruda. Poddolování se zde projevuje haldami a propadlinami. V této lokalitě a přilehlém území jde pouze o ojedinělé místo a žádné další poddolování se u lokality nenachází. [2]

Lokalita Oleksovice

Stejně jako v předchozí lokalitě se zde žádná poddolovaná území nenachází ani tím pádem jím není ani nijak ohrožena. Nejbližší poddolované místo se nalézá v 5,1 km vzdálené obci Prácheň. Základní těžená surovina zde byla železná ruda a stářím je datováno do 19. století. [2]

2.2.5 SURIS – surovinový informační subsystém

Lokalita Rajhrad

V popisovaném území se nenachází žádné nerostné bohatství ani jiný materiál vhodný k těžbě. V blízkém okolí se nachází rozlehlá oblast s názvem Svahy Českého masívu, kde se těží ropa a hořlavý zemní plyn. [2]

Lokalita Oleksovice

V určené lokalitě se nachází plošná ložiska nevyznačených nerostů, konkrétně surovina šterkopísek. Jako těžený nerost je považován písek a šterk. Těžba zde probíhala dřívější povrchová. [2]

2.3 GEOLOGICKÁ STAVBA ŠIRŠÍHO OKOLÍ

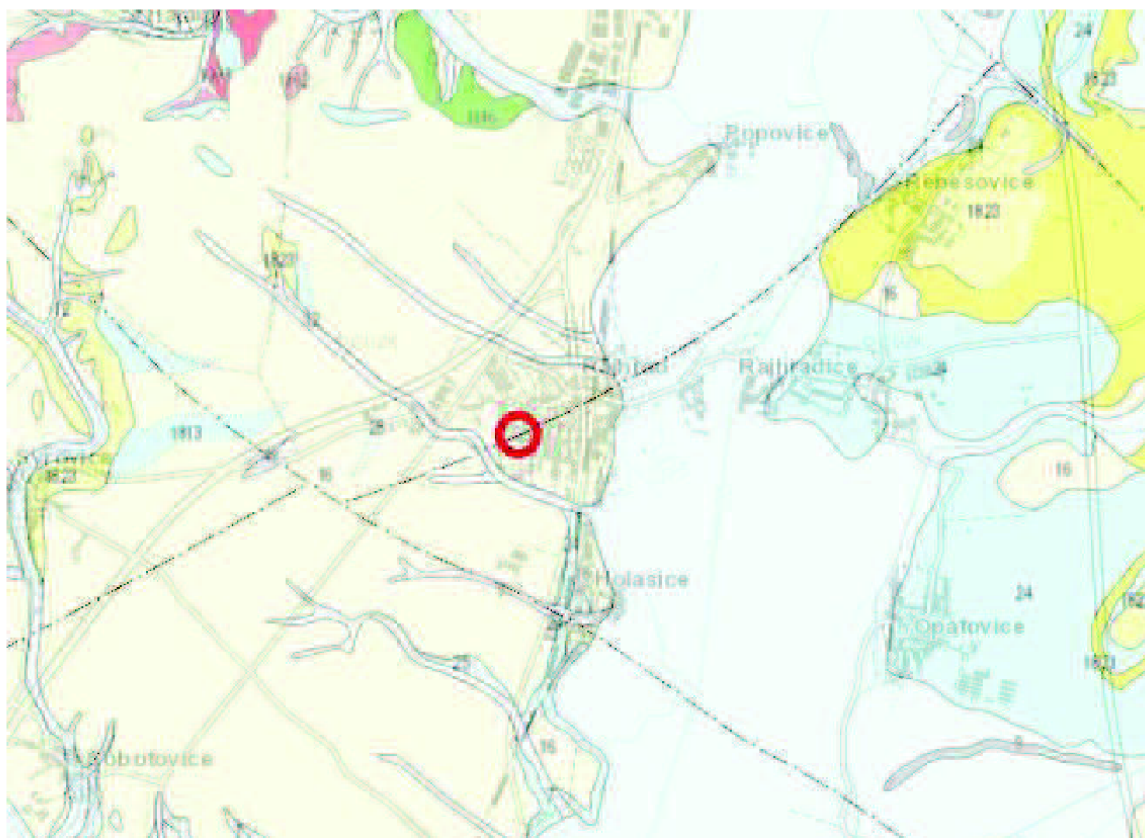
Na území celé České republiky se nacházejí dvě základní geologické jednotky, které jsou součástí daleko větších geologických struktur, tvořících základ celé geologické stavby Evropy. Jedná se o:

- Český masív patří k části Evropy, která byla formována kadomskou orogenezí a poté výrazně přetvořena variskou orogenezí.
- Západní Karpaty, které jsou součástí pásebného pohoří vzniklého alpskou orogenezí, která v jejím průběhu vytvořila nejvyšší pásebné pohoří na naší planetě.[6]

2.3.1 Přiřazení k regionálně geologické jednotce

Obě dvě zkoumané lokality se nachází na území geologické jednotky Západní Karpaty, obalové jednotky Karpatská předhlubeň. Karpatská předhlubeň spolu s vídeňskou pánví je složitá vnitrohorská deprese orientovaná souhlasně s průběhem pohoří. Mocnost sledů sedimentárních hornin dosahuje až 5000 m. Zde se jedná o neogenní klastické sedimenty zastoupené hlavně slepenci, pískovci, šterky, písky, jíly až vápnitými jíly a jílovcí. Tektonickou stavbu ovlivňují poklesové zlomy, z nichž většina navazuje na předterciární tektoniku.[6]

Lokalita Rajhrad



Obr. 5 Geologická mapa 1:50 000 – červeně vyznačena lokalita Rajhrad[2]

1824	vápnitý jíl (šlir), s polohami vápnitých písků a štěrků
1821	vápnitý jíl (těgl), místy s polohami písků
1823	hlavka - píský, štěrky se zpevněnými polohami pískovce, slepence
1813	štěrky, písčité štěrky
1820	vápenec
12	písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment
24	písek, štěrk
16	spraš a sprašová hlína
9	slatina, rašelina, hnilokal
7	smíšený sediment
20	sediment deluvioeolický
6	nivní sediment
1102	biotický granodiorit
1103	biotický až leukokrání granit
1116	ultramafit, serpentinit

Obr. 6 Legenda ke geologické mapě (obr. 5)[2]

Lokalita Oleksovice



Obr. 7 Geologická mapa 1:50 000 – červeně označena lokalita Oleksovice[2]

1838	křemenné štěrky, jemnozrnné písky
1842	vápnitý jíł (šlír), místy s polohami písků
1824	vápnitý jíł (šlír), s polohami vápnitých písků a štěrků
1821	vápnitý jíł (tégi), místy s polohami písků
1847	vápnité a nevápnité jílovce, prachovité jílovce a prachovce, jíly, místy ryolitové tufity a tufické jíly
1834	štěrky, štěrkovitý písky, písky
1294	ortorula
1163	granulit
28	písek, štěrk
7	smíšený sediment
8	nivní sediment
12	písčito-hlinitý až hlinito-písčitý sediment
16	spraš a sprašová hlína
13	kamenitý až hlinito-kamenitý sediment

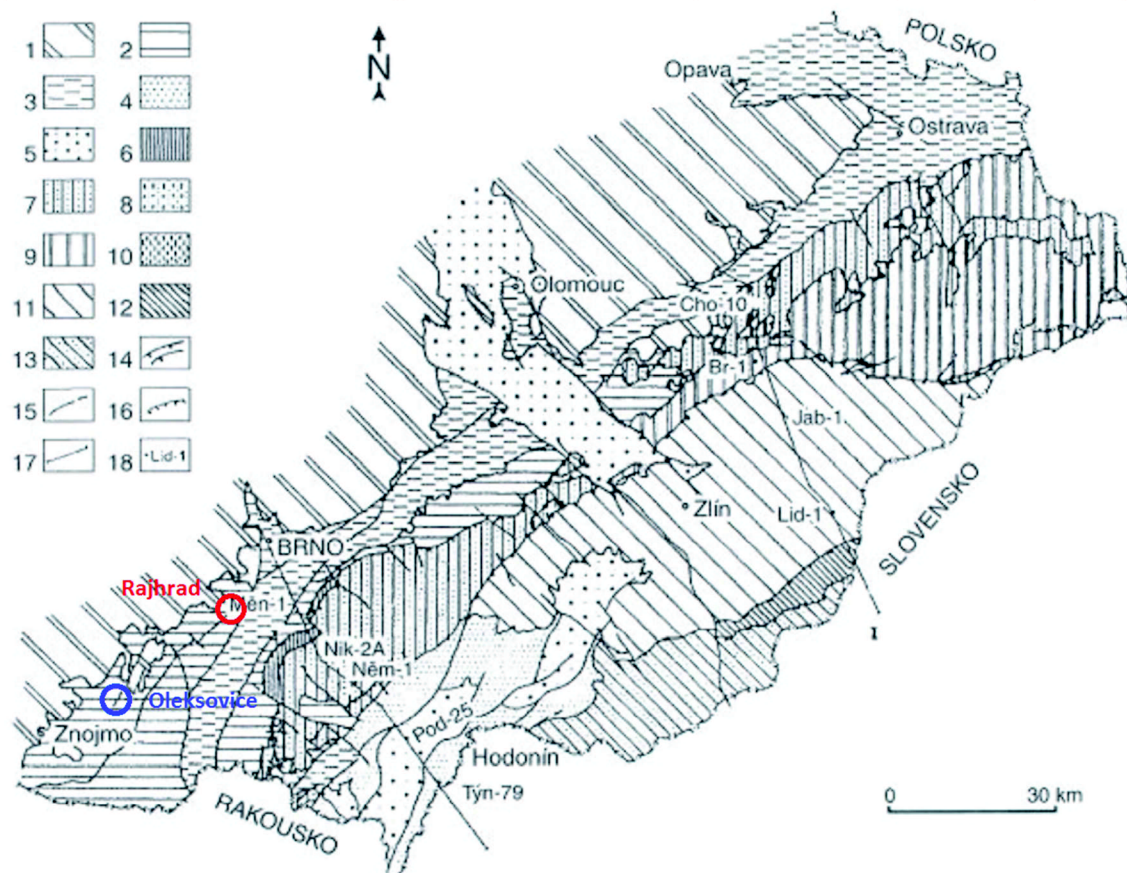
Obr. 8 Legenda ke geologické mapě (obr. 7)[2]

2.3.2 Charakteristika přiřazené jednotky

Lokalita Rajhrad, lokalita Oleksovice

Západní Karpaty mají velice složitou geologickou stavbu. Až do konce prvohor je vývoj souběžný z Českým masívem. V triasu nastává transgrese druhohorního moře, které zde setrvalo po celé druhohory. První velká fáze vrásnění začíná koncem křídý, při kterém se usazené mezozoické sedimenty složitě vrásní a přesunují přes sebe. Moře ustupuje na okraj vrásnicí se geosynkliály. Zde se poté usazování za stálého tektonického neklidu pokračuje až přes svrchní křídý a celý paleogén. Uprostřed třetihor se projevuje další fáze vrásnění, při kterém se flyšové vrstvy přesunují přes okraj Českého masívu. V neogénu nastává další transgrese a moře zalévá předhlubeň Karpat na hranici s Českým masívem.[7]

Obr. 11.2.1 Regionální geologické dělení Západních Karpat na našem území
(podle usnesení České stratigrafické komise 1994, 1995 in Chlupáč a kol., 2002)



1 - Český masiv; 2 - spodní miocén karpatské předhlubně (eggenburg-karpat); 3 - střední miocén (baden); 4 - svrchní miocén (sarmat-pannon); 5 - pliocén; 6 - pouzdřanská jednotka; 7 - ždánická a podslezská j.; 8 - zdounecká j.; 9 - slezská j.; 10 - předmagurská j.; 11 - račanská j. magurské skupiny příkrovů; 12 - bystrická j. magurské skupiny příkrovů; 13 - bělokarpatská j. magurské skupiny příkrovů; 14 - příkrovy a přesmyky; 15 - zlomy; 16 - okraj transgrese; 17 - linie geologických řezů; 18 - vrty.

Obr. 9 Regionální dělení Západních Karpat

Neogenní sedimenty tvoří dvě hlavní pánve, a to vněalpskou a vnitroalpskou. Transgrese moře vněalpské pánve, na kterém se nachází obě zkoumaná území, začíná na počátku miocénu, kdy se usazují sedimenty písčité a šterkovité. U pobřeží se usazují hrubší sedimenty (šterky a písky, popř. slepence a pískovce), ve větší hloubce spíše jíly, částečně slinité. Vrstvy se vyznačují především velkým množstvím zkamenělin.[7]

Tektonické poměry jsou celkem jednoduché. Pánev má synklinární tvar, takže nejstarší vrstvy vystupují na okraji, nejmladší jsou uprostřed. Vrstvy nejsou zvrásněny, zapadají pod mírným úklonem do středu pánve a jsou porušeny četnými poklesovými dislokacemi.[7]

2.4 HYDROGEOLOGIE

Hydrogeologie je geologický obor zabývající se především zajišťováním vodních zdrojů a problémy s tím spojených.[5] Dále se zabývá studiem podzemních vod a je součástí

hydrologie, která se zabývá studiem všech terestrických vod, a proto se zabývá také částečně i povrchovými vodami a atmosférickými procesy.[8]

2.4.1 Propustnost horninového prostředí

Lokalita Rajhrad, lokalita Oleksovice

Propustnosti horninového prostředí se rozumí schopnost pórovitého prostředí propouštět tekutinu vlivem hydraulického gradientu. Propustnost se vyjadřuje koeficientem propustnosti, který bude rozebrán podrobně v další části práce na obou lokalitách. Rychlost proudění je místo od místa jiné a tudíž jsou pro výpočet nutná značná zjednodušení. Podle toho, jak voda prostupuje horninami, je rozpoznán typ propustnosti, a to propustnost průlinová (u obou lokalit), která je typická obvykle pro písčité a štěrkovité zeminy.[3]

2.4.2 Podzemní voda

Lokalita Rajhrad

V blízkém okolí parcely se nachází jedna studna 400 m jižně od lokality, která je opatřena pumpou, ale nedá se do ní ovšem dostat a proto nebylo možné zjistit více informací o hladině podzemní vody. Nenachází se zde ani žádné prameny, ani ochranná pásma vodních zdrojů. Z vrtů se pohybuje podzemní voda v rozmezí 2 – 3,2 m pod terénem.

Lokalita Oleksovice

Z průzkumu mezi místními obyvateli přilehlého okolí byla zjištěna hladina podzemní vody 6 až 10 m pod povrchem. Nejbližší studna se nachází 600 m severně od lokality. V okolí se nachází několik pramenů, nejbližší asi 1200 m severozápadně v těsné blízkosti potoka Skalička. Jedná se o artézskou studnu původně určenou jako zdroj vody pro místní zemědělský podnik, nyní volně vyvěrá. Co se týče ochranných pásem, tak je vyhlášeno ochranné pásmo I. stupně v oploceném areálu vodního zdroje pro obec Oleksovice, které se nachází zhruba 130 m od již zmiňované artézské studně. Podle zkušenosti místních obyvatel je voda velmi tvrdá, obsahuje velké množství manganu a železa a proto je nutná její úprava.

2.5 GEODYNAMICKÉ JEVY

Lokalita Rajhrad, lokalita Oleksovice

Místa průzkumu obou lokalit neleží v geologické struktuře příznivé pro vznik svahových pohybu ani jiných nestabilit. Posuzované oblasti se nenachází ani v místě, které by bylo ohroženo erozní činností. V určených místech bychom se neměli setkat s žádnými krasovými jevy, ani s žádným zemětřesením.

3 METODY STANOVENÍ HYDRAULICKÉ VODIVOSTI

Mezi základní parametry horninového prostředí charakterizující vsakovací schopnost horninového prostředí patří koeficient vsaku a hydraulická vodivost.

Hodnota koeficientu vsaku je základní vstupní podklad pro návrh vsakovacího zařízení, charakterizuje vsakovací schopnost prostředí. Pro stanovení koeficientu vsaku se používají vsakovací zkoušky s ustálenou nebo s neustálenou hladinou. Jejich výhodou je jednoduchost provádění zkoušek. Mezi další výhody patří to, že hodnota koeficientu vsaku zahrnuje charakteristiky blízkého geologického prostředí jako je vlhkost, nehomogenita, anizotropie, propustnost, úroveň hladiny podzemní vody. Hlavní nevýhodou těchto zkoušek je, že koeficient vsaku vystihuje pouze podmínky během vsakovací zkoušky a nemusí tak poskytovat spolehlivé podklady pro návrh vsakovacího zařízení.[9]

Hydraulická vodivost se zjišťuje hlavně v případech potencionálního ovlivnění okolních objektů provozem vsakovacího zařízení, kdy je nutností popsat cestu infiltrované vody horninovým prostředím i ve zvodněném kolektoru. Pro stanovení hydraulické vodivosti se používají tyto metody:

Přímé metody, které se dělí na:

- polní zkoušky realizované většinou různými typy čerpacích nebo vsakovacích zkoušek,
- laboratorní metody realizované na odebraných vzorcích zeminy.

Nepřímé metody, které se dělí na:

- metody využívající empirických vztahů jednotlivých autorů založených na vyhodnocení granulometrického složení daného materiálu,
- metody vedoucí k získání globální hodnoty hydraulické vodivosti prostředí kalibrací matematických modelů nebo pomocí analogie.[9]

Základním předpokladem pro návrh vsakovacího zařízení srážkových vod do horninového prostředí je existence takového horninového prostředí, které je propustné a schopné odvádět vsakované vody. Všeobecně se doporučuje hydraulická vodivost větší než $k = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [9]

V rámci této práce budou využity tyto metody:

- polní zkoušky založené na využití zarážecích válců,
- laboratorní metody využívající propustoměr s konstantním spádem,
- metody využívající empirické vztahy z křivek zrnitosti dle jednotlivých autorů,
- numerické modelování rotačně symetrické pomocí programu HYDRUS 2D.

3.1 POLNÍ ZKOUŠKY

Pro vypracování polních zkoušek bylo využito metodické příručky pro vsakování [9]. Polní zkoušky se dle jejich povahy používají pro stanovení koeficientu vsaku a hydraulické vodivosti. Polní zkoušky lze dělit z hlediska použitého zařízení, a to na:

- zkoušky s využitím vystrojených nebo nevystrojených vrtů,
- zkoušky s využitím šachtice,
- zkoušky s využitím zářezového válce (jeden válec nebo dva koncentrické válce).

Zkoušky založené na využití zářezových válců mohou být prováděny z povrchu terénu nebo ze dna kopané sondy. Při zkoušce prováděné z povrchu terénu se před zaražením zarovná povrch půdy, při kopané sondě se vyhloubí do hloubky zkoušené vrstvy zeminy a vyrovná se dno. Při vyrovnávání dna by neměly vzniknout trhliny, zemina by neměla být příliš suchá ani příliš pevná z důvodu popraskání při zaražení (možnost zvlhčit zeminu). V případě porušení zeminy obklopující stěnu válce, upěchuje se narušená zemina v blízkosti vnitřní a vnější stěny válce, aby byla zemina stejně pevná jako před porušením.

Polní zkoušky, které lze realizovat s využitím zářezových válců jsou:

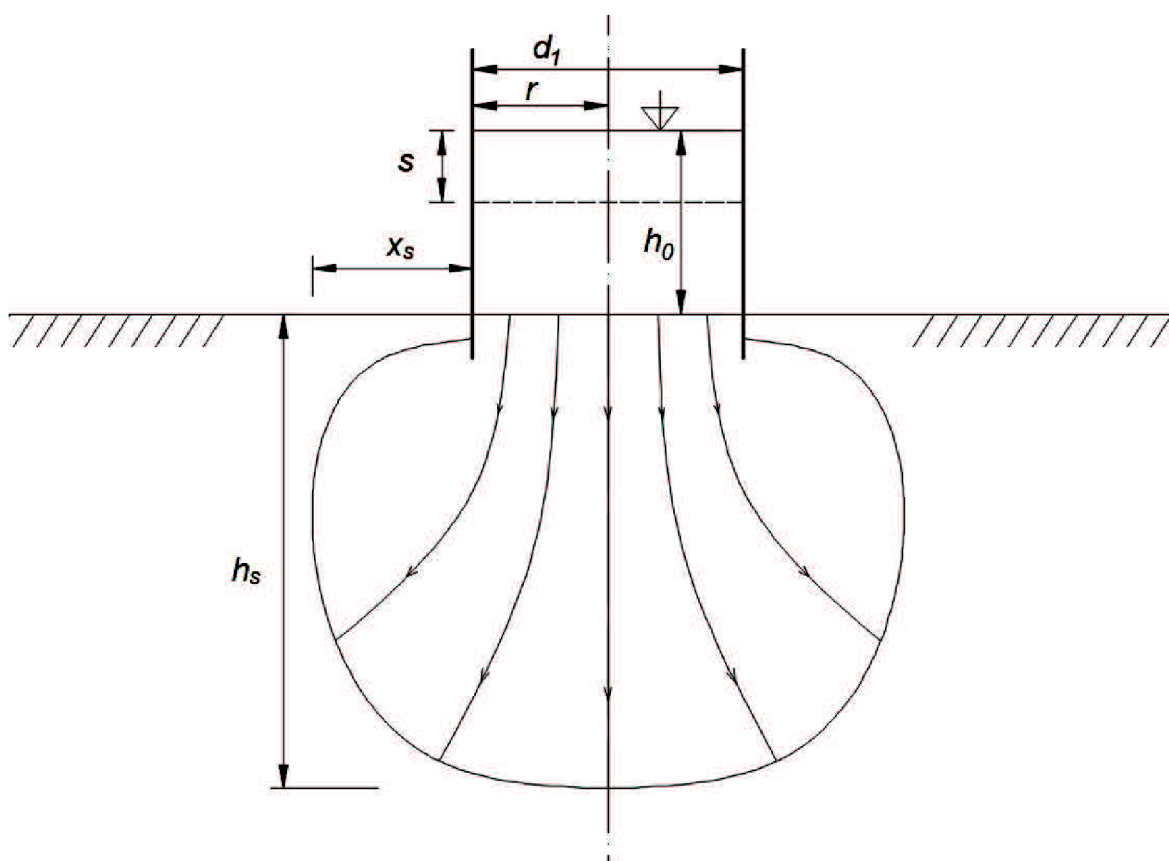
- Bouwerova metoda,
- Girinského metoda,
- Metoda dle ČSN EN- ISO 22282-5.[9]

3.1.1 Bouwerova metoda

Jedná se o metodu s využitím jednoho vsakovacího válce za podmínek neustálené hladiny vody ve válci. Válec je zaražen do hloubky asi 5 m. Získané veličiny jsou koeficient vsaku a hydraulická vodivost. Dále se u této metody zjišťuje hloubka vsaku a vzdálenost boční infiltrace od válce.

Podmínky provádění

- Metoda předpokládá užití jednoho vsakovacího válce.
- Doporučený vnitřní průměr válce je $d_l = 0,6$ m.
- Vsakování probíhá pouze dnem válce.
- Měření se provádí za podmínek neustálené hladiny vody ve válci.
- Zkoušené prostředí je nenasycená zóna.[9]



Obr. 10 Vsakovací zkouška při využití jednoho válce[9]

Postup provádění

- Do válce se nalije voda tak, aby výškový rozdíl mezi úrovní hladiny ve válci a dnem vsakovacího válce byl $h_0 = 0,3$ m (z důvodů ne tak vysokého válce bylo pro vlastní měření použito $h_0 = 0,15$ m).
- Vždy po snížení hladiny o $s = 0,05$ m se doplní voda na původní úroveň hladiny h_0 .
- Zaznamenává se čas od zahájení zkoušky a snížení hladiny s .
- Po ukončení zkoušky se stanoví vzdálenost boční infiltrace od pláště šachtice x_s a hloubka vsaku h_s odkopem nebo pomocí vrtné soupravy.[9]

Vyhodnocení zkoušky

Výsledkem zkoušky je suma dílčích poklesů hladiny s_n za časový interval t_n ke konci zkoušky, kdy dojde k ustálení intenzity vsaku. Z výsledků měření se stanoví infiltrační rychlost v_{in} (= koeficient vsaku k_v) bezprostředně pode dnem válce

$$v_{in} = \frac{s_n}{t_n}, \quad (3.1)$$

kde v_{in} ... infiltrační rychlost [$m \cdot s^{-1}$],

s_n ... snížení hladiny [m],

t_n ... časový interval [s].

Následně se stanoví infiltrační rychlost v_{iw} v zamokřené zóně hlouběji pod dnem válce ze vztahu

$$v_{iw} = \frac{v_{in} \cdot r^2}{(r+x_s)^2}, \quad (3.2)$$

kde v_{iw} ... infiltrační rychlost (hlouběji v zamokřené zóně) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

v_{in} ... infiltrační rychlost (bezprostředně pod dnem) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

r ... poloměr válce [m],

x_s ... vzdálenost zamokřené zóny od válce (stanoví se odkopem) [m].

Vztah pro stanovení hydraulické vodivosti se stanoví úpravou vztahu vycházejícího z Darcyho rovnice aplikované pro vertikální však při vsakovací zkoušce

$$k = \frac{v_{iw} \cdot h_s}{h_p + h_s + h_k}, \quad (3.3)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

v_{iw} ... infiltrační rychlost (hlouběji v zamokřené zóně) [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

h_s ... hloubka vsaku pod dnem válce (změří se v in situ vrtnou soupravou nebo dle vztahu 3.4) [m],

h_p ... průměrná výška vodního sloupce ve válci v závěrečné fázi zkoušky [m],

h_k ... kapilární výška (odhadem z tabulek podle Bindemana) [m].

Hloubka vsaku pod dnem válce se stanoví in situ odkopem h_s pod dnem válce po zkoušce nebo pomocí vztahu

$$h_s = \frac{r^2 \cdot \Sigma s}{n_a \cdot (r+x_s)^2}, \quad (3.4)$$

kde h_s ... hloubka vsaku pod dnem válce [m],

r ... poloměr válce [m],

Σs ... součet snížení hladiny během celé vsakovací zkoušky [m],

n_a ... aktivní pórovitost [-]

x_s ... vzdálenost zamokřené zóny od válce (stanoveno odkopem) [m]. [9]

Vlastní měření, lokalita Rajhrad

Postup vyhodnocení lokality Rajhrad je následující:

- Nejprve se stanovila rychlost infiltrace $v_{in} = 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ze vztahu (3.1), která se rovná koeficientu vsaku k_v .
- Rychlost infiltrace v_{in} se přepočítala dle vztahu (3.2) na infiltrační rychlost $v_{iw} = 5,32 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, v zamokřené zóně hlouběji pod válcem.
- Dále se stanovila hodnota aktivní pórovitosti $n_a = 0,05$ jako odhad pro hlinité zeminy.
- Hloubka vsaku $h_s = 2,17 \text{ m}$ se stanovila in situ pomocí vrtné soupravy a také pomocí aktivní pórovitosti ze vztahu (3.4) $h_s = 2,31 \text{ m}$.
- Kapilární výška byla stanovena odhadem pomocí tabulky (podle Bindemana) $h_k = 0,4 \text{ m}$ pro hlinité zeminy.
- Hydraulická vodivost se vypočítala podle vztahu (3.3) $k = 4,32 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Měření trvalo přibližně 2000 s.



Obr. 11 Čerpání vody do vsakovacího válce

Lokalita Oleksovice

Postup vyhodnocení lokality Oleksovice je daný následovně:

- Nejprve se stanovila rychlost infiltrace $v_{in} = 3,04 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ze vztahu (3.1), která se rovná koeficientu vsaku k_v .
- Rychlost infiltrace v_{in} se přepočítala dle vztahu (3.2) na infiltrační rychlost $v_{iw} = 1,68 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, v zamokřené zóně hlouběji pod válcem.
- Dále se stanovila hodnota aktivní pórovitosti $n_a = 0,2$ jako odhad pro písčité zeminy.
- Hloubka vsaku se stanovila pomocí aktivní pórovitosti ze vztahu (3.4) $h_s = 0,69 \text{ m}$.
- Kapilární výška byla stanovena odhadem pomocí tabulky (podle Bindemana) $h_k = 0,1 \text{ m}$ pro písčité zeminy.
- Hydraulická vodivost se vypočítala podle vztahu (3.3) $k = 1,30 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Měření trvalo přibližně 7000 s.

Diskuze

Protokol o měření pro lokalitu Rajhrad s vyhodnocením a se všemi náležitostmi je uveden v příloze č. 1 – A a protokol o měření pro lokalitu Oleksovice s vyhodnocením a se všemi náležitostmi je uveden v příloze č. 2 – A. Nevýhodou této zkoušky je, že pro vyhodnocení je nutné identifikovat dosah boční infiltrace, kdy stanovení této hodnoty v terénu je velmi obtížné. Koeficient vsaku je stanoven pro podmínky vsakování dnem válce, což nemusí odpovídat vsaku skutečným vsakovacím zařízením. Hodnoty hydraulické vodivosti může být také ovlivněna výskytem nestejnorodých zemin v podloží válce. U lokality Rajhrad mohlo být měření ovlivněno deštěm a také blízkostí hladiny podzemní vody.[9]

3.1.2 Girinského metoda

Girinského metoda je metoda vsakování s využitím jednoho vsakovacího válce za podmínek ustálené hladiny vody ve válci. Válec bude zaražen do hloubky přibližně 5 cm. Získané veličiny budou koeficient vsaku a hydraulická vodivost. Metoda neuvažuje s hloubkou vsaku, ani se vzdáleností boční infiltrace, výpočet je vztažen pouze k infiltraci dnem válce.

Podmínky provádění

- Doporučený průměr válce je $d_l = 0,3$ až $0,6 \text{ m}$.
- Vsakování vody ve válci probíhá pouze dnem válce.
- Měření se provádí za podmínek udržování konstantní polohy vody ve válci.
- Zkoušené prostředí je nenasycená zóna.[9]

Postup provádění

- Do válce se nalije voda tak, aby výškový rozdíl mezi úrovní hladiny ve válci a dnem válce byl $h_0 = 0,1$ až $0,2$ m (pro vlastní měření $h_0 = 0,1$ m)
- Je nutné udržovat konstantní hladinu vody ve válci (pro vlastní měření byl užit pákový kulový ventil pro regulaci průtoku)
- Zaznamenává se přítok vody do válce Q_{ZK} . [9]

Vyhodnocení zkoušky

Výsledkem zkoušky je přítok vody Q_{ZK} ke konci zkoušky, kdy dojde k ustálení přítoku vody do válce. Při přepočtu na plochu dna válce lze stanovit koeficient vsaku

$$k_v = \frac{Q_{ZK}}{A_{ZK}}, \quad (3.5)$$

kde k_v ... koeficient vsaku [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

Q_{ZK} ... přítok vody do válce [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$],

A_{ZK} ... plocha dna válce [m^2].

Pro stanovení hydraulické vodivosti při vsakovacích zkouškách v šachtici vystrojené jedním válcem s eliminací účinku laterální infiltrace odvodil Girinský vztah

$$k = 0,6944 \cdot \xi \cdot Q_{ZK}, \quad (3.6)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],

ξ ... součinitel zahrnující vliv boční filtrace závisející na $h_0 + h_k$ a vnitřním průměru válce d_l (tabulka Dobrzański 1956) [m^{-2}],

Q_{ZK} ... přítok vody do válce [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]. [9]

Vlastní měření, lokalita Rajhrad

Postup vyhodnocení je následující:

- Koeficient vsaku $k_v = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ se vypočítal z ustáleného přítoku do válce $Q_{ZK} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ke konci zkoušky dosazením do vztahu (3.5).
- Kapilární výška byla stanovena odhadem pomocí tabulky (podle Bindemana) $h_k = 0,4$ m pro hlinité zeminy.
- Na základě průměru válce d_l a $h_0 + h_k$ se stanoví z tabulky součinitel $\xi = 1,93$.
- Hydraulická vodivost se vypočítala dosazením součinitele ξ a ustáleného přítoku Q_{ZK} do vztahu (3.6) $k = 1,70 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- Doba provádění zkoušky trvala z důvodu ustálení přítoku asi 1 hodinu.

Lokalita Oleksovice

Postup vyhodnocení je daný následovně:

- Koeficient vsaku $k_v = 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ se vypočítal z ustáleného přítoku $Q_{ZK} = 5,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ke konci zkoušky dosazením do vztahu (3.5).
- Kapilární výška byla stanovena odhadem pomocí tabulky (podle Bindemana) $h_k = 0,1 \text{ m}$ pro písčité zeminy.
- Na základě průměru válce d_l a $h_0 + h_k$ se stanoví z tabulky součinitel $\zeta = 4,07$.
- Hydraulická vodivost se vypočítala dosazením součinitele ζ a ustáleného přítoku Q_{ZK} do vztahu (3.6) $k = 1,52 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Doba trvání zkoušky byla z důvodu ustálení přítoku asi 1,5 hodiny.



Obr. 12 Zarážení válce

Diskuze

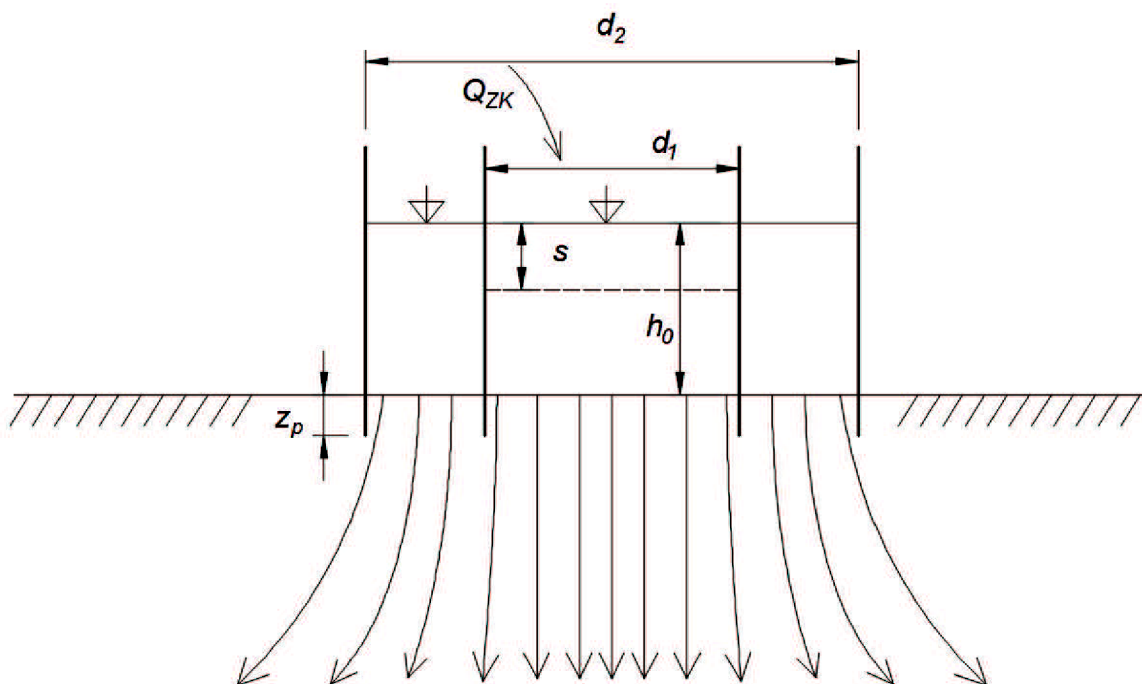
Protokol o měření pro lokalitu Rajhrad s vyhodnocením a se všemi náležitostmi je uveden v příloze č. 1 – B a protokol o měření pro lokalitu Oleksovice s vyhodnocením a se všemi náležitostmi je uveden v příloze č. 2 – B. Co se týče nepřesností u této metody, je oproti vsakovacímu zařízení výpočet koeficientu vsaku vztažen pouze k infiltraci dnem válce. Naopak vyhodnocení této zkoušky je velmi snadné.[9]

3.1.3 Metoda dle ČSN EN- ISO 22282-5

Tato metoda počítá s využitím vsakovacího dvojt válce za podmínek ustálené hladiny vody ve válci dle ČSN EN- ISO 22282-5 [22]. Válec bude zaražen do hloubky přibližně 5 cm. Získané veličiny budou koeficient vsaku a hydraulická vodivost, která se dá určit ze dvou vztahů, je-li k dispozici hloubka vsaku.

Podmínky provádění

- Metoda předpokládá použití vsakovacího dvojt válce.
- Doporučený průměr vnitřního válce je minimálně 200 mm.
- Průměr vnějšího válce by měl být alespoň dvojnásobkem průměru válce vnitřního.
- Vsakování probíhá pouze dnem válců.
- Měření probíhá za podmínek udržování konstantní hladiny vody ve válcích
- Zkoušené prostředí je nenasycená zóna.[9]



Obr. 13 Vsakovací dvojt válec – metoda dle ČSN[9]

Postup provádění

- Zaražení válců do hloubky větší než 50 mm.
- V obou válcích je udržován konstantní výškový rozdíl mezi úrovní hladiny a dnem válce $h_0 = 0,1$ až $0,2$ m (pro vlastní měření $h_0 = 0,1$ m), kdy rozdíl mezi úrovní hladin v obou válcích by měl být menší než 5 mm.
- Měření přítoku vody Q_{ZK} probíhá zvlášť ve vnitřním a zvlášť ve vnějším válci (pro vlastní měření byl užit pákový kulový ventil pro regulaci průtoku).

- Objem dodané vody obvykle bývá třikrát větší do vnějšího válce než do válce vnitřního.[9]

Vyhodnocení zkoušky

Výsledkem této zkoušky je přítok vody Q_{ZK1} do vnitřního válce a Q_{ZK2} do vnějšího válce ke konci zkoušky, kdy dojde k ustálení přítoku vody. Koeficient vsaku se stanoví ze vztahu

$$k_v = \frac{Q_{ZK1} + Q_{ZK2}}{\pi \cdot d_2^2 / 4}, \quad (3.7)$$

kde k_v ... koeficient vsaku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_{ZK1} ... přítok vody do vnitřního válce [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_{ZK2} ... přítok vody do vnějšího válce [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

π ... matematická konstanta 3,14 [-],

d_2 ... průměr vnějšího válce [m].

Za předpokladu vertikálního směru proudnic z vnitřního válce odpovídá infiltrační rychlost odvozená z přítoku Q_{ZK1} do vnitřního válce hydraulické vodivosti k . Použití vnějšího válce nemusí vždy zajistit optimální podmínky zkoušky (roztékání do stran, stlačení vnitřních proudnic). Za předpokladu jednotkového hydraulického sklonu ve vertikálním směru

$$k = \frac{Q_{ZK1}}{A_{ZK1}}, \quad (3.8)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_{ZK1} ... přítok vody do vnitřního válce [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

A_{ZK1} ... plocha dna vnitřního válce [m^2].

Vyhodnocení hydraulické vodivosti se provádí s využitím předchozího vztahu nebo přesněji s uvážením kapilárních vlastností zeminy

$$k = \frac{Q_{ZK1} \cdot h_s}{A_{ZK1} \cdot (h_k \cdot h_0 \cdot h_s)}, \quad (3.9)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_{ZK1} ... přítok vody do vnitřního válce [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

h_s ... hloubka vsaku pode dnem válce (změřeno in situ vrtnou soupravou) [m],

A_{ZK1} ... plocha dna vnitřního válce [m^2],

h_k ... kapilární výška (odhadem podle Bindemana) [m],

h_0 ... výškový rozdíl mezi úrovní hladiny ve válci a dnem válce [m]. [9]

Vlastní měření, lokalita Rajhrad

Postup vyhodnocení vlastního měření lokality Rajhrad je:

- Koeficient vsaku $k_v = 5,11 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ byl vypočítán pomocí součtu ustálených přítoků $Q_{ZK1} = 1,81 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $Q_{ZK2} = 1,17 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do obou válců dosazením do vztahu (3.7).
- Kapilární výška byla stanovena odhadem pomocí tabulky (podle Bindemana) $h_k = 0,4 \text{ m}$ pro hlinité zeminy.
- Hydraulická vodivost $k = 1,81 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ byla určena přesněji ze vztahu (3.9), dále pak ze vztahu (3.8) $k = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Doba trvání zkoušky z důvodu ustálení hladiny byla přibližně 1,5 hodiny.

Lokalita Oleksovice

Postup vyhodnocení lokality Oleksovice je následující:

- Koeficient vsaku $k_v = 5,63 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ byl vypočítán pomocí součtu ustálených přítoků $Q_{ZK1} = 2,97 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $Q_{ZK2} = 1,19 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do obou válců dosazením do vztahu (3.7).
- Kapilární výška byla stanovena odhadem pomocí tabulky (podle Bindemana) $h_k = 0,1 \text{ m}$ pro písčité zeminy.
- Hydraulická vodivost $k = 2,87 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ byla určena přesněji ze vztahu (3.9), dále pak ze vztahu (3.8) $k = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Doba trvání zkoušky z důvodu ustálení hladiny byla přibližně 2 hodiny.



Obr. 14 Vsakovací dvojválec – po měření

Diskuze

Protokol o měření pro lokalitu Rajhrad s vyhodnocením a se všemi náležitostmi je uveden v příloze č. 1 – C a protokol o měření pro lokalitu Oleksovice s vyhodnocením a se všemi náležitostmi je uveden v příloze č. 2 – C. Mezi hlavní nevýhody patří to, že bez měření dodávaného množství vody do vnějšího válce koeficient vsaku nelze stanovit. Dva koncentrické válce nemusí zcela eliminovat laterální infiltraci a výsledná hydraulická vodivost tak může být nadhodnocena, výsledky ovšem bývají zpravidla přesnější než u metod s využitím jednoho válce.[9]

3.2 LABORATORNÍ METODY

Laboratorní metody slouží ke stanovení nasycené hydraulické vodivosti většinou porušených vzorků zeminy. Zpravidla se používají některé z modifikací Darcyho přístroje. Laboratorní metody se používají pro ověření nebo doplnění polních zkoušek. Podle konstrukce a uspořádání se rozlišují následující přístroje, a to:

- propustoměr s konstantním spádem,
- propustoměr se zmenšujícím se spádem.[9]

Propustoměr s konstantním spádem je přístroj ve tvaru svíslého válce se dnem tvořeným sítkou s vhodnou velikostí oka. Ve dvou průřezích se odečítají úrovně piezometrických výšek. Dále se měří vzdálenost průřezů s piezometry, měří se průtok a celková průřezová plocha válce. Proudění je jednorozměrné a stacionární. Hydraulická vodivost se stanoví ze vztahu

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h}, \quad (3.10)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

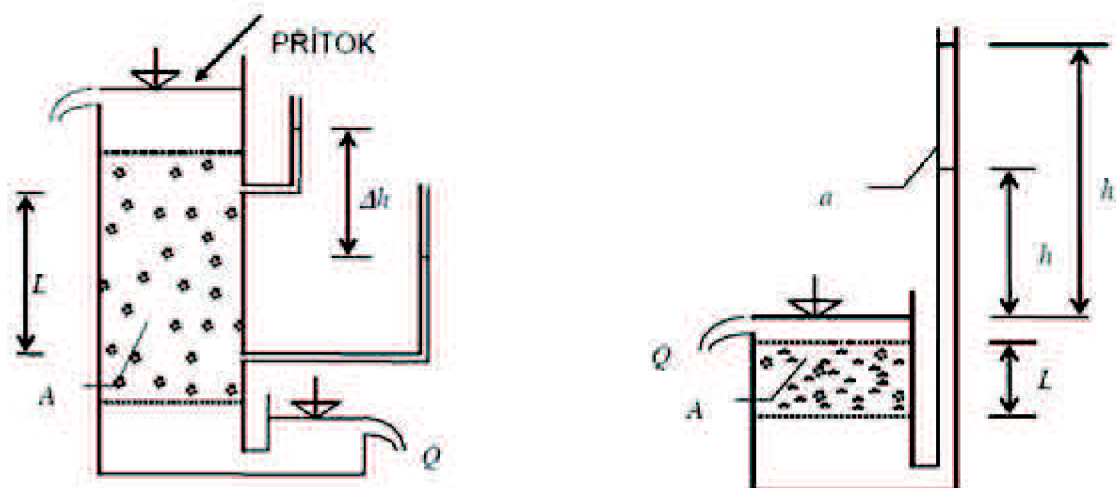
Q ... průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

L ... vzdálenost průřezů s piezometry [m],

A ... plocha válce [m^2],

Δh ... rozdíl úrovní piezometrické výšky [m].

Propustoměr se zmenšujícím se spádem se používá při větších sklonech a menších propustnostech zemin, kdy nelze tak jednoduše dosáhnout ustáleného stavu. Spád i průtok se během měření mění.[9]



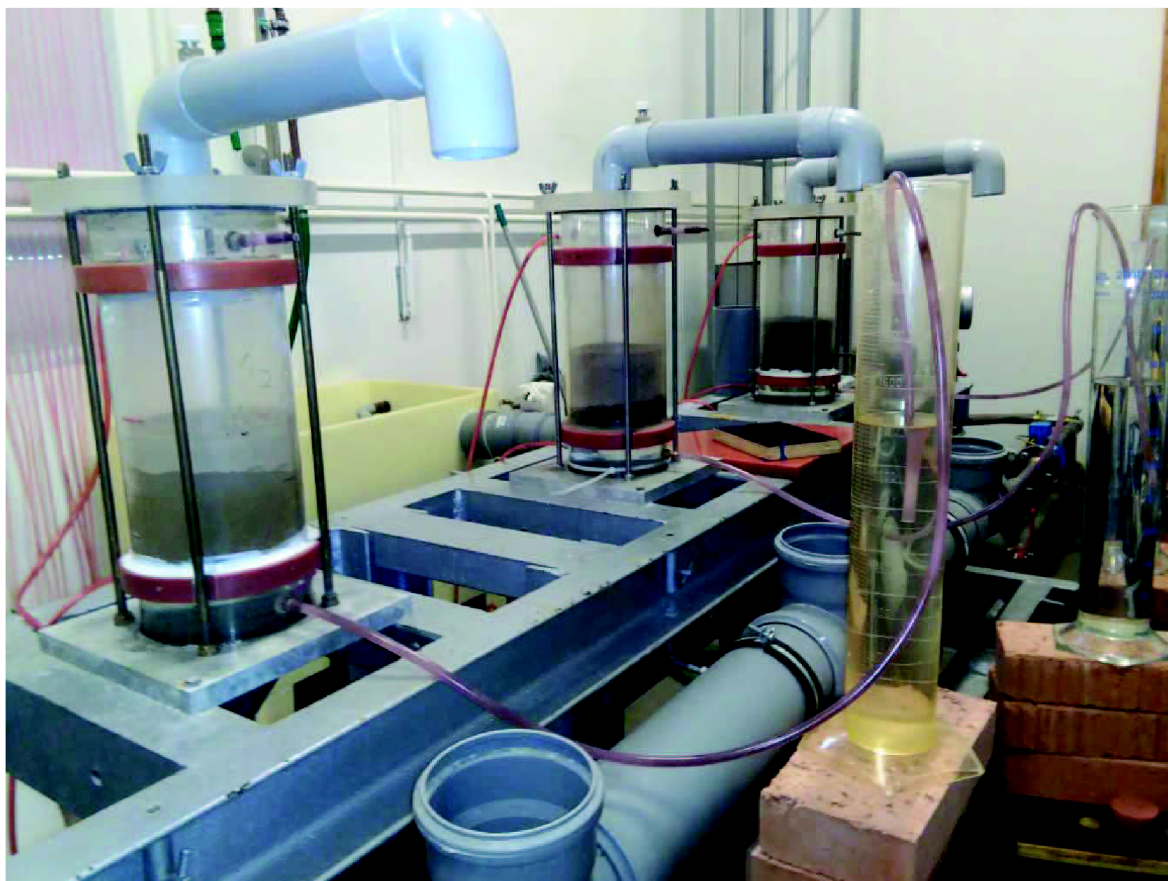
Obr. 15 Propustoměry s konstantním (vlevo) a zmenšujícím se spádem (vpravo)[9]

Vlastní měření

V rámci této diplomové práce bylo provedeno měření pórovitosti a hydraulické vodivosti v laboratoři na propustoměru s konstantním spádem.

Postup měření:

- 1) Před samotným měřením se zváží hmotnost válce (propustoměru). Vnitřní povrch válce se vyčistí a vysuší.
- 2) Propustoměr se naplní zeminou do výšky asi 130 mm, zemina se zhutní, popřípadě se použije vibrování.
- 3) Vyrovná se horní povrch zeminy a naplněný propustoměr se zváží.
- 4) Naplní se odměrný válec vodou, který bude potřeba pro měření pórovitosti a zváží se.
- 5) Propustoměr se vloží do přístroje.
- 6) Propustoměr se naplní se vodou z nádrže na hladinu "0" (obr. 16).
- 7) Udržuje se voda vytékající z nádrže, aby se uvolnil vzduch z piezometru.
- 8) Hladina v propustoměru poklesne na bod "0".
- 9) Připojí se trubice a naplní propustoměr vodou na úroveň bodu "1" (obr 16).
- 10) Pokračuje se v plnění. Hladina vody v odměrném válci nesmí být vyšší než 50 mm nad hladinou vody v propustoměru.
- 11) Jakmile hladina vody v propustoměru dosáhne 10 mm nad úroveň zeminy, pozastaví se zkouška zablokováním trubice.
- 12) Zváží se hmotnost zbytkové vody v odměrném válci a změří délky h_1 a h_2 (obr 16).
- 13) Dále se pokračuje naplnění vody přes propustoměr z odměrného válce
- 14) Otevře se ventil z nádrže do propustoměru, změří se teplota vody v nádrži a teplota vzduchu.



Obr. 17 Měření pórovitosti propustoměry v laboratoři

3.3 EMPIRICKÉ VZTAHY

Pomocí empirických vztahů lze orientačně stanovit hodnotu nasycené hydraulické vodivosti na základě výsledků rozboru zeminy, a to zejména granulometrického složení. Z empirických vztahů lze hodnotu hydraulické vodivosti určovat pouze po pečlivém zvážení a s ohledem na kritéria, které byly pro vztahy odvozeny. Hydraulická vodivost je ve vzorcích vyjádřena jako funkce geometrických vlastností horninového prostředí (pórovitosti, efektivního průměru zrna, stejnozrnnosti), teploty a viskozity kapaliny. Metody jsou použitelné především pro porovnání charakteristik propustnosti u různých odebraných zemin.[9]

3.3.1 Zrnitost

Zrnitost, zvaná též granulometrické složení udává počet velikostních skupin zrn na celkovém složení zeminy. Granulometrické složení zemin se znázorňuje graficky křivkou zrnitosti. Zrnitostní křivka se vynáší do souřadnicového systému, kde na vodorovné ose jsou v logaritmickém měřítku průměry zrn a na svislé ose v lineární stupnici procentuální podíly vysušené zeminy. Důvod vynášení v logaritmickém měřítku je takový, že menší zrna mají vlastnosti zemin jako celku podstatně větší vliv než zrna velká.

Pro zjištění granulometrického složení se používají nejčastěji tyto dvě metody:

- síťový rozbor pro nesoudržné zeminy,
- areometrická zkouška pro soudržné zeminy.

Tyto dvě metody se zpravidla kombinují z důvodu širokého zastoupení zrn v zemině. Oběma metodami se stanovují ekvivalentní průměry. Hlavním předpokladem je, že všechna propadlá zrna bez ohledu na tvar mají stejný průměr jako otvory v sítích. U aerometrické zkoušky, která se vyhodnocuje na základě Stokesova zákona, se předpokládá kulatý tvar zrn.[10]

Síťový rozbor zeminy

Používá se při zjištění zrnitosti zeminy u nesoudržných materiálů. Provádí se pomocí prosévání přes sadu sít s vhodně zvolenými otvory.

Postup měření:

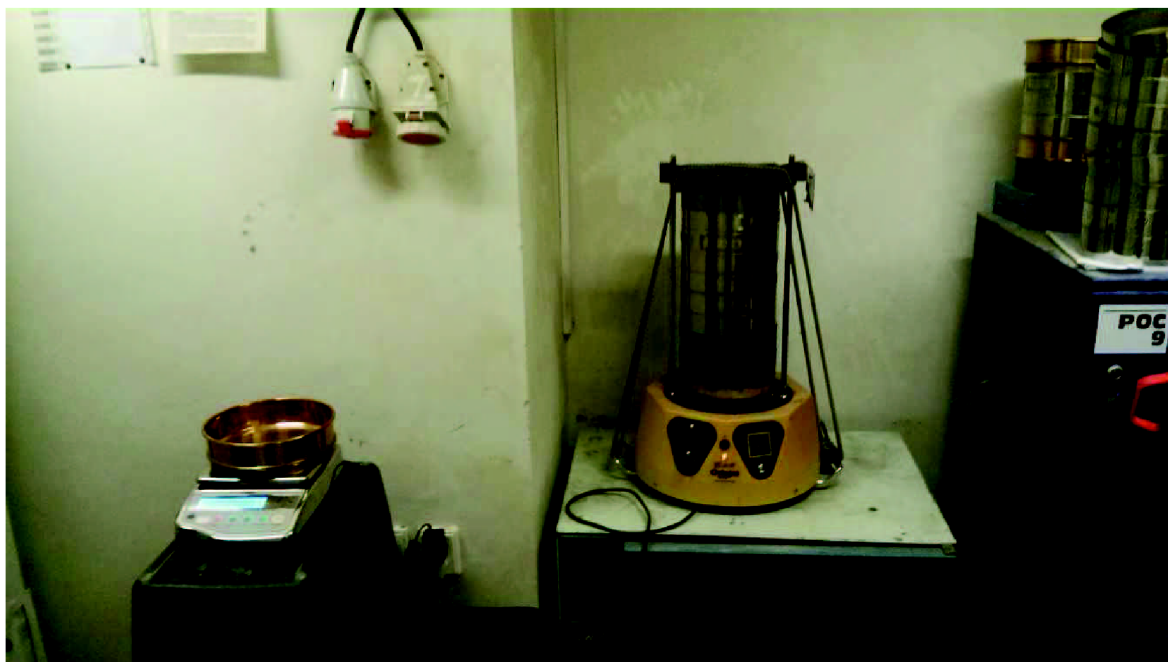
- 1) Podle typu zeminy se zvolí vhodný typ navážky určené pro rozbor (kolem 1000 g).
- 2) Poté se navážka vysuší při 105 °C do stálé hmotnosti.
- 3) Zvážená, předem proplavená a vysušená zemina se vsype na připravená síta.
- 4) Síta se uzavrou víkem a vloží se přibližně na 10 minut do vibračního stroje.
- 5) Nakonec se zváží jednotlivé frakce a zjistí se hmotnostní podíly na příslušných sítích.
- 6) Vypočítá se procentuální podíl zbytků zeminy na jednotlivých sítích z celkové navážky

$$Z = \frac{m}{\Sigma m} \cdot 100, \quad (3.11)$$

kde Z ... procentuální podíl příslušné frakce [%],
 m ... hmotnost zeminy na jednotlivých sítích [g],
 Σm ... celková hmotnost prosévané zeminy [g].

- 7) Vykreslí se křivka zrnitosti

Pokud sítím o průměru ok 0,063 mm propadlo více jak 10 % z celkové hmotnosti navážky, je nutné provést již zmíněný další zrnitostní rozbor aerometrickou zkouškou pro zjištění velikosti jemnějších frakcí.[10]



Obr. 18 Sada sít s vhodně zvolenými otvory pro síťový rozbor zeminy

Areometrická (hustoměrná) zkouška

Používá se u soudržných zemin. Určuje se zrnitost na základě rychlosti usazování částic ve vodě. Teoretickým základem je Stokesův usazovací zákon

$$v = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{\rho_s + \rho_w}{\eta} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2, \quad (3.12)$$

kde v ... rychlost usazování částic v suspenzi [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

ρ_s ... hustota pevných částic [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

ρ_w ... hustota vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

η ... dynamická viskozita vody [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$],

d ... průměr zrn [mm].

Tato zkouška vychází z předpokladu, že když pevné částice v suspenzi postupně sedimentují, klesá jejich hustota. Hustota se měří v pravidelných intervalech Casagrandeho hustoměrem.

Postup zkoušky:

- 1) Připravená, vysušená zemina se zváží (kolem 50 g)
- 2) Zvážená zemina se protře za pomoci destilované vody sítím 0,063 mm.
- 3) Vzniklá suspenze se vlije do válce o obsahu 1000 ml, přidá se antikoagulant a doplní válec destilovanou vodou.

- 4) Proveďte se zkouška čtení aerometru, suspenze se promíchá, aerometr se vnoří do středu válce, nechá se ustálit a provede se kontrolní čtení.
- 5) Poté se aerometr vyjme a vloží do válce s destilovanou vodou.
- 6) Dále se míchá suspenze míchačkou asi 30 sekund. Ihned po skončení se zapnou stopky a vkládá se do válce aerometr. Po ustálení se zjišťuje hustota po 30 sekundách, 1 a 2 minutách. Aerometr se vždy po čtení vyjme a vloží do válce s destilovanou vodou.
- 7) Změří se teplota suspenze.
- 8) Nakonec se změří hustota s teplotou po 5, 15, 30 a 60 minutách a dále po 5, 8 a 24 hodinách.[10]

3.3.2 Odvození hydraulické vodivosti z křivek zrnitosti

Co se týče hydraulické vodivosti a granulometrického složení vzorku, je mezi nimi určitá souvislost. Obecně platí, že čím větší velikost zrn a čím je menší její rozptyl, tím je hodnota hydraulické vodivosti vyšší.[11]

Pro výpočet empirických vztahů byla použita dílčí zpráva projektu – Ověření empirických vztahů pro výpočet hydraulické vodivosti [12]. V rámci této práce byly použity tyto platné vztahy:

3.3.2.1 Hazenův vztah

Hazen v roce 1892 publikoval vztah, který se v současné literatuře vyskytuje ve dvou podobách. První vztah uvádí Kasenow a Odong ve tvaru

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot [1 + 10 \cdot (n - 0,26)] \cdot d_{10}^2, \quad (3.13)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

d_{10} ... velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ν ... kinematičká viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

n ... pórovitost [-].

Druhý vztah uvádějí Vuković a Soro ve tvaru

$$k = 11,6 \cdot C_H \cdot d_{10}^2 \cdot (0,7 + 0,03 \cdot T), \quad (3.14)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

d_{10} ... velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m],

T ... teplota vody [$^{\circ}\text{C}$],

C_H ... součinitel závislý na znečištění písku hlínou [-].

K analytickému vyjádření součinitele C_H lze využít vztahu podle Langa

$$C_H = 400 + 4000 \cdot (n - 0,26), \quad (3.15)$$

kde C_H ... součinitel závislý na znečištění písku hlínou [-],

n ... pórovitost [-].[12]

3.3.2.2 Slichterův vztah

Slichterova rovnice nezahrnuje nestejnorodost mechanického složení pórovitého prostředí.

Kasenow a Odong ve své literatuře uvádějí vztah ve tvaru

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot n^{3,287} \cdot d_{10}^2, \quad (3.16)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

n ... pórovitost [-],

d_{10} ... velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m].[12]

3.3.2.3 Beyerův vztah

Oproti většině autorů Beyer nedefinuje hydraulickou vodivost jako funkci pórovitosti.

Beyerův vzorec je uváděn ve tvaru

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 6 \cdot 10^{-4} \cdot \log \frac{500}{U} \cdot d_{10}^2, \quad (3.17)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

U ... číslo nestejnozrnnosti [-],

d_{10} ... velikost zrna odpovídajícího 10% propadu [m].

Pro určení rozsahu platnosti některých vztahů se užívá číslo nestejnozrnnosti, které je rozhodujícím kvalitativním znakem nesoudržných zemin, a charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti. Je definován jako

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (3.18)$$

kde U ... číslo nestejnozrnnosti [-],

d_{60} ... velikost zrn při 60% propadu [mm],

d_{10} ... velikost zrn při 10% propadu [mm].[12]

3.3.2.4 Zauerbrejův vztah

Zauerbrejův vzorec má tvar

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_Z \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \tau \cdot d_{17}^2, \quad (3.19)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

C_Z ... $3,75 \cdot 10^{-3}$ [-],

n ... pórovitost [-],

τ ... bezrozměrný parametr závislý na teplotě [-],

d_{17} ... velikost zrna odpovídajícího 17% propadu [m].[12]

3.3.2.5 Krügerův vztah

Ve vztahu od Krügera je problém v určení konstanty C_K , která je v různých literárních zdrojích uváděna v rozsahu $1 \cdot 10^{-3}$ až $1 \cdot 10^{-5}$. Krügerův vztah má tvar

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_K \cdot \frac{n}{(1-n)^2} \cdot d_e^2, \quad (3.20)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

C_K ... $4,35 \cdot 10^{-5}$ (dle literatury Vuković a Soro) [-],

n ... pórovitost [-],

d_e ... průměr efektivního zrna [m].[12]

3.3.2.6 Zunkerův vztah

Zunkerův vztah má následující tvar

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot C_{ZU} \cdot \left(\frac{n}{(1-n)} \right)^2 \cdot d_e^2, \quad (3.21)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

C_{ZU} ... součinitel pro vztah dle Zunkera $2,4 \cdot 10^{-3}$ (stejnozrné písky se zaoblenými zrny) [-],

n ... pórovitost [-],

d_e ... průměr efektivního zrna [m].[12]

3.3.2.7 Vztah USBR

United States Bureau of Reclamation (USBR) doporučuje vztah ve tvaru

$$k = \frac{g}{\nu} \cdot 4,8 \cdot 10^{-4} \cdot (1000 \cdot d_{20})^{0,3} \cdot d_{20}^2, \quad (3.22)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

g ... gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

d_{20} ... velikost zrna odpovídajícího 20% propadu [m].[12]

3.3.2.8 Pavličův vztah

Pavličův vztah je z důvodu lepších výsledků upraven Vjedjenjejevovým výzkumným ústavem, ve kterém je gravitační zrychlení nahrazeno číslem 4 ve tvaru

$$k = \frac{4 \cdot \varphi_1}{\nu} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{U} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_{17}^2, \quad (3.23)$$

kde k ... hydraulická vodivost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

φ_1 ... koeficient pro štěrkopísčité zeminy [-],

ν ... kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

U ... číslo nestejnozrnnosti [-],

n ... pórovitost [-],

d_{17} ... velikost zrna odpovídajícího 17% propadu [m].[12]

Vlastní měření, lokalita Rajhrad

Z křivek zrnitosti (příloha č. 4) lze odvodit potřebný průměr zrn při 10% propadu, který vyšel $d_{10} = 0,0577$ mm. Dále do některých vztahů je potřeba znát průměr zrn při 17% propadu, a 20% propadu, která vyšla $d_{17} = 0,0985$ mm a $d_{20} = 0,1425$ mm. Pro vypočítání čísla nestejnozrnnosti je potřeba ještě průměr zrn při 60% propadu, který je $d_{60} = 1,411$ mm.

Co se týče pórovitosti, tak je to objem pórů vyjádřený v procentech celkového objemu zeminy. Jedná se o číselný podklad k ocenění ulehlosti nebo nakypřenosti zeminy, pomocí

níž se usuzuje pevnost a stlačitelnost zeminy. Pro vlastní práci se vezme průměrná pórovitost naměřená v laboratoři $n = 0,3615$ (příloha č. 3).

Pro určení rozsahu platnosti některých vztahů se užívá číslo nestejnozrnnosti $U = 24,45$, které je rozhodujícím kvalitativním znakem nesoudržných zemin, a charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti. Dále se pak pro platnost vztahů užívá velikost efektivního zrna d_e .

V lokalitě Rajhrad mají platnost vztahy od čtyř autorů, a to konkrétně Slichterův vztah, Zauerbrejův vztah, Krügerův vztah a Pavčičův vztah. Všechny vypočítané vztahy i s dosazovanými veličinami a grafické znázornění pro srovnání výsledků jsou uvedeny v příloze č. 5. Zde jsou uvedeny pouze výsledné hodnoty hydraulické vodivosti:

- Slichterův vztah $k = 8,81 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Zauerbrejův vztah $k = 2,55 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Krügerův vztah $k = 1,57 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Pavčičův vztah $k = 1,66 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Lokalita Oleksovice

Z křivek zrnitosti (příloha č. 4) lze odvodit potřebný průměr zrn při 10% propadu, který vyšel $d_{10} = 0,151 \text{ mm}$. Dále do některých vztahů je potřeba znát průměr zrn při 17% propadu, a 20% propadu, která vyšla $d_{17} = 0,209 \text{ mm}$ a $d_{20} = 0,2335 \text{ mm}$. Pro vypočítání čísla nestejnozrnnosti je potřeba ještě průměr zrn při 60% propadu, který je $d_{60} = 0,5155 \text{ mm}$.

Co se týče pórovitosti, tak je to objem pórů vyjádřený v procentech celkového objemu zeminy. Jedná se o číselný podklad k ocenění ulehlosti nebo nakypřenosti zeminy, pomocí níž se usuzuje pevnost a stlačitelnost zeminy. Pro vlastní práci se vezme průměrná pórovitost naměřená v laboratoři $n = 0,254$ (příloha č. 3).

Pro určení rozsahu platnosti některých vztahů se užívá číslo nestejnozrnnosti $U = 3,41$, které je rozhodujícím kvalitativním znakem nesoudržných zemin, a charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti. Dále se pak pro platnost vztahů užívá velikost efektivního zrna d_e .

V lokalitě Oleksovice mají platnost vztahy od sedmi autorů, a to konkrétně Hazenův vztah, Slichterův vztah, Beyerův vztah, Zauerbrejův vztah, Zunkerův vztah, vztah USBR a Pavčičův vztah. Všechny vypočítané vztahy i s dosazovanými veličinami a grafické znázornění pro srovnání výsledků jsou uvedeny v příloze č. 5. Zde jsou uvedeny pouze výsledné hodnoty hydraulické vodivosti:

- Hazenův vztah (1) $k = 9,65 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Hazenův vztah (2) $k = 9,94 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,

- Slichterův vztah $k = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Beyerův vztah $k = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Zauerbrejův vztah $k = 2,92 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Zunkerův vztah $k = 6,50 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Vztah USBR $k = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
- Pavličův vztah $k = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.4 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ

Numerické řešení rovnic je nezbytné pro mnoho praktických problémů z důvodu komplikací v počátečních, okrajových podmínkách, geometrické oblasti, heterogenity půdy a hydrologických vlastnostech. Rozvoj numerických metod, které může představovat pro tyto vnitřní složitosti v typickém nastavení pro praktické problémy proudění, bylo předmětem intenzivního výzkumu v posledních 30 letech v oblasti hydrologie, pedologie, životního prostředí a geotechniky.[16]

Matematický model se řeší numericky pomocí známých metod, jako je například metoda konečných prvků (MKP), metoda konečných diferencí (MKD), metoda konečných objemů. Jednotlivé programové prostředky využívají různých numerických řešení, která mají své výhody i nevýhody.

Při modelování proudění podzemní vody je nutností v první fázi zvolit vhodný typ modelu. Volba typu modelu závisí především na typu řešené oblasti, což je řešené zařízení a na požadované přesnosti výstupů. Lze rozlišit tyto modely:

- nejjednodušší jednorozměrný (1D) model proudění podzemní vody,
- složitější dvourozměrný (2D) model proudění podzemní vody, které lze rozdělit na horizontální a vertikální podle převažujícího směru proudění,
- model prostorového (3D) proudění podzemní vody, z něhož vycházejí zjednodušené modely

Jednotlivé modely jsou tedy vhodné pro určité vsakovací zařízení. Využití 1D modelů je pro základní postihnutí rychlosti propagace vsakované vody a také pro plošné vsakování, kdy je směr proudění jednorozměrný. Využití 2D modelů proudění podzemní vody je v případě liniových zařízení typu rýhy, studny a šachty, kde dochází ke změně směru proudění převážně ve vertikální rovině. Nejsložitější model proudění ve 3D obsahuje rovnice všech tří směrů proudění a využívá se pro modelování složitých prostorových situací a objektů (např. nádrže), kde dochází k proudění ve všech směrech. V práci je využit HYDRUS 2D a vsakování v terénu je simulováno ve 2D rotační symetrii.[13]

HYDRUS 2D je komerčně vyvíjený software, který umožňuje výpočet proudění podzemní vody, proudění tepla a transport látek v 1D, ve 2D a ve 3D. Proudění lze modelovat jak ve zvodnělé zóně, tak i v zóně nezvodnělé.[13]

3.4.1 Obecný postup modelování

Obecný postup modelování proudění podzemní vody, který platí pro většinu metod je:

- diskretizace náhradní oblasti,
- zadání vlastností materiálů na oblasti,
- zadání okrajových podmínek,
- zadání počátečních podmínek,
- výpočet,
- zobrazení, export a zpracování výsledků.[13]

3.4.1.1 Diskretizace náhradní oblasti

V závislosti na zvoleném typu modelu a numerické metody je nutné zadat geometrii. Lze importovat geometrii oblasti z jiných programů (autocad, arcgis) nebo v podobě textových souborů obsahujících souřadnice bodů a linií. Dále je nutné provést diskretizaci náhradní oblasti, tzn. Vyplnění oblasti prvky a vytvoření výpočtové sítě. Tyto prvky tvoří trojúhelníky (MKP) nebo obdélníky (MKD).[13]

3.4.1.2 Zadání vlastností materiálů na oblasti

Na výpočtové síti je nutné každému prvku přiřadit materiálové vlastnosti. Při proudění podzemní vody v nenasycené zóně jde o hydraulické vlastnosti, které se zadávají v podobě parametrů retenční křivky a jejího vybraného modelu. Retenční křivky definují závislost hydraulické vodivosti, vlhkosti a sacího tlaku.[15]

3.4.1.3 Zadání okrajových podmínek

Okrajové podmínky se zadávají na hranice náhradní oblasti. Je možné zadat podmínky prvního druhu (Dirichletova) - tlakové výšky, vlhkosti zeminy a druhého druhu (Neumanova) - známý přítok. Tyto hodnoty lze zadat časově stálé po dobu výpočtu nebo časově proměnné.[13]

3.4.1.4 Zadání počátečních podmínek

Jedná se o známé hodnoty na počátku výpočtu. Počáteční podmínkou se rozumí známá sací výška nebo známá vlhkost zeminy. V případě stacionárního výpočtu má podmínka vliv na jeho délku a stabilitu, neovlivní však samotné výsledky hodnoty. V případě nestacionárního výpočtu má podmínka zásadní vliv na výsledky řešení.[13]

3.4.1.5 Výpočet

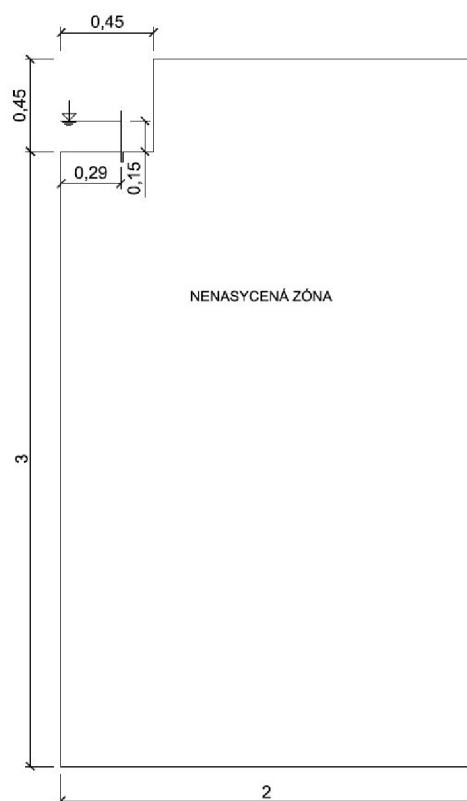
Před samotným výpočtem je potřeba ještě zadat parametry jako je přesnost výpočtu a velikost časového kroku. Délka výpočtu je závislá na zvolené numerické metodě, počtu prvků výpočtové sítě a v případě nestacionárního výpočtu na počtu časových kroků.[13]

3.4.1.6 Zobrazení, export a zpracování výsledků

V případě proudění podzemní vody v nenasycené zóně se jedná o piezometrické výšky, vlhkosti zeminy, vektory rychlosti proudění vody (směr a velikost). Dále je umožněno vykreslení výsledných hodnot ve vybraných časech na oblasti, vykreslení výsledných hodnot v závislosti na čase ve vybraném místě a zobrazení výsledků v textové formě.[13]

3.4.2 Dvourozměrné rotačně symetrické proudění – HYDRUS 2D

Numerické modelování je provedeno na základě měření v terénu pomocí Bouwerovy metody a zvolená oblast je pro obě dvě lokality stejná. Oblast byla zvolena ve 2D, rotačně symetrické proudění. Geometrie oblasti je patrná z obr. 19. Délka oblasti je 2 m, výška je 3 m. Hladina podzemní vody zde není uvažována, její poloha není známá a při zjišťování hloubky vsaku na ni nebylo naraženo. Válec má průměr 0,58 m a dno má hloubku 0,45 m pod terénem.



Obr. 19 Geometrie zvolené oblasti

Lokalita Rajhrad

Pro numerické modelování v lokalitě Rajhrad byly zadány vlastnosti materiálu, okrajové a počáteční podmínky těchto hodnot:

Parametry zeminy:

- reziduální vlhkost $\theta_r = 0,09$,
- nasycená vlhkost $\theta_s = 0,36$,
- nasycená hydraulická vodivost $k_s = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Okrajové podmínky byly voleny následovně:

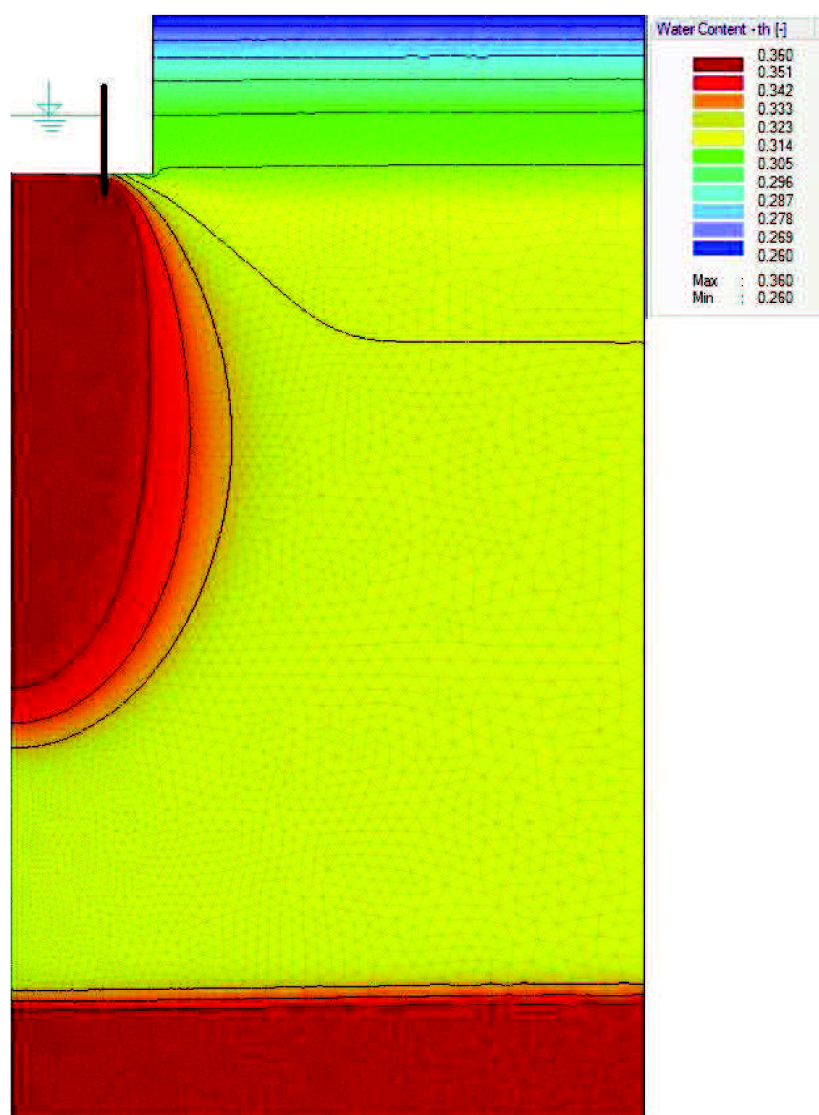
- na dně válce byla zvolena okrajová podmínka $h = 0,15 \text{ m}$ vody ve válci,
- na zbylých okrajových částech byla nastavena podmínka nepropustné hranice.

Počáteční podmínka byla volena následovně:

- na dně válce - tlaková výška odpovídající okrajové podmínce,
- tlaková výška v nenasycené zóně – nastavena na $h = -0,1 \text{ m}$.

Zemina je uvažována jako písek hlinitý. Celkový čas simulace byl 2000 s. Náhradní oblast byla nahrazena 14360 2D elementy.

V průběhu simulace lze pozorovat postup prosáknuté vody z válce. Směr proudění je převážně do stran i dolů, avšak s převažujícím vertikálním směrem.



Obr. 20 HYDRUS 2D – vlhkost v čase 2000 s, červeně je plně nasycená zemina

Lokalita Oleksovice

Pro numerické modelování v lokalitě Oleksovice byly zadány vlastnosti materiálu, okrajové a počáteční podmínky těchto hodnot:

Parametry zeminy:

- reziduální vlhkost $\theta_r = 0,045$,
- nasycená vlhkost $\theta_s = 0,26$,
- nasycená hydraulická vodivost $k_s = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Okrajové podmínky byly voleny následovně:

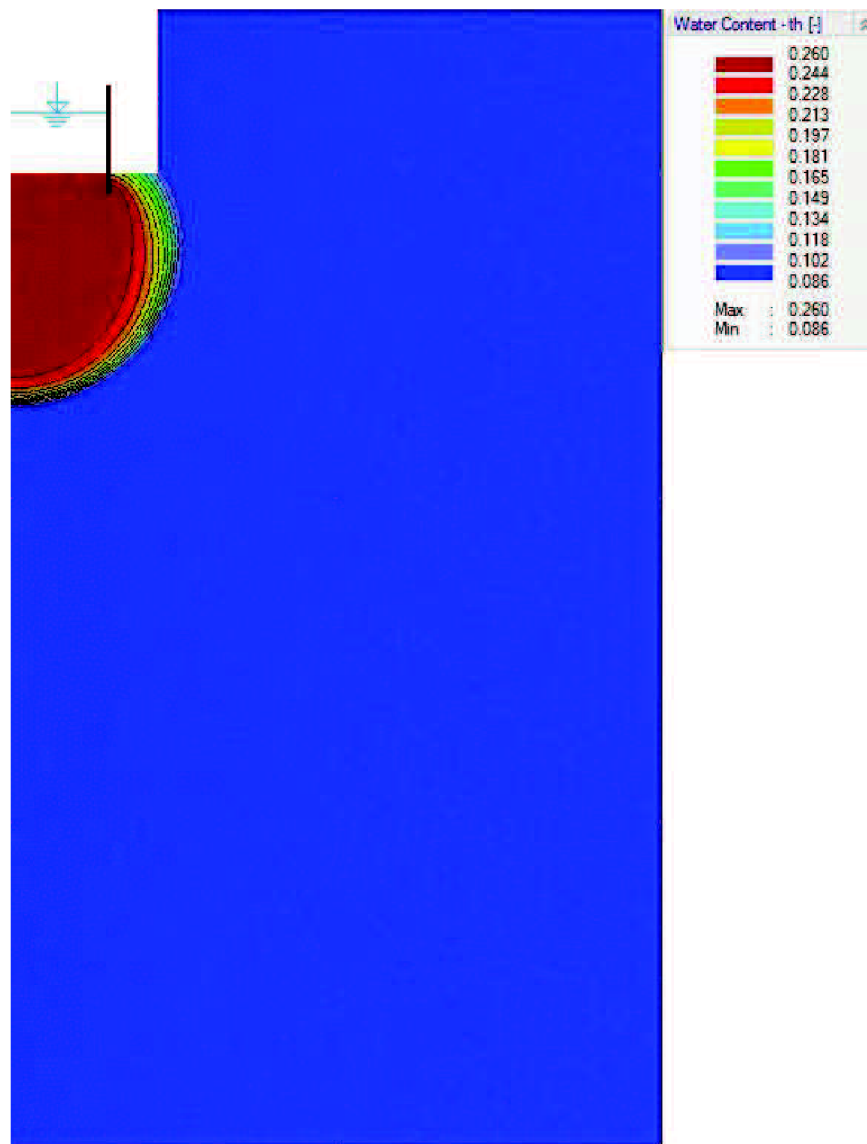
- na dně válce byla zvolena okrajová podmínka $h = 0,15 \text{ m}$ vody ve válci,
- na zbylých okrajových částech byla nastavena podmínka nepropustné hranice.

Počáteční podmínka byla volena následovně:

- na dně válce - tlaková výška odpovídající okrajové podmínce,
- tlaková výška v nenasycené zóně – nastavena na $h = -0,3$ m.

Zemina je uvažována jako písek. Celkový čas simulace byl 7000 s. Náhradní oblast byla nahrazena 14360 2D elementy.

V průběhu simulace lze pozorovat postup prosáknuté vody z válce. Směr proudění je převážně do stran i dolů, avšak s převažujícím vertikálním směrem.



Obr. 21 HYDRUS 2D – vlhkost v čase 7000 s, červeně je plně nasycená zemina, modře je zemina s vlhkostí téměř reziduální

4 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

Tab. 3. Srovnání výsledků vlastního měření hydraulické vodivosti a koeficientu vsaku

LOKALITA RAJHRAD

Vsakovací zkoušky in situ dle jednotlivých metod

Bouwer	$k = 4.32 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$k_v = 1.85 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Girinský	$k = 1.68 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$k_v = 1.55 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
ČSN	$k = 1.81 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$k_v = 5.11 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Laboratorně v propustoměru

$$k = 1.36 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Z empirických vztahů dle jednotlivých autorů

Slichter	$k = 8.81 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Zuerbreij	$k = 2.55 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Kruger	$k = 1.57 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Pavčič	$k = 1.66 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Odhadem z tabulek

$$k = 1.00 \cdot 10^{-4} \text{ až } 1.00 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \text{ zemina S3 - písek hlinitý}$$

Numericky modelovým řešením

$$k = 5.50 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

LOKALITA OLEKSOVICE

Vsakovací zkoušky in situ dle jednotlivých metod

Bouwer	$k = 1.30 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$k_v = 3.04 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Girinský	$k = 1.52 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$k_v = 6.67 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
ČSN	$k = 2.87 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$k_v = 5.63 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Laboratorně v propustoměru

$$k = 2.30 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Z empirických vztahů dle jednotlivých autorů

Hazen 1	$k = 9.65 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Hazen 2	$k = 9.94 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Slichter	$k = 1.89 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Beyer	$k = 2.22 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Zuerbreij	$k = 2.92 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Zunker	$k = 6.50 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
USBR	$k = 1.27 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Pavčič	$k = 1.84 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Odhadem z tabulek

$$k = 1.00 \cdot 10^{-4} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

zemina S2 - písek špatně zrněný

Numericky modelovým řešením

$$k = 1.30 \cdot 10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

4.1 VYHODNOCENÍ VSAKOVACÍ ZKOUŠKY IN SITU

Vyhodnocení vsakovací zkoušky in situ je nejpřesnější a nejspolehlivější metodou. Lze jí ověřit parametry zvodně přímo v lokalitě vsakování. Výstižnost stanovení hydraulické vodivosti závisí na způsobu provádění zkoušky (doba, proměnnost vsakovaného množství), na použitém zařízení (dvojválec) a na způsobu vyhodnocení zkoušky. U metod vsakování s využitím zářecích válců nelze jednoznačně určit, která by dávala přesnější výsledky, ačkoliv spolehlivější by měla být metoda dle ČSN z důvodu užití dvojválce. Ostatně se výsledky vlastního měření neliší o více než půl řádu v obou lokalitách. Avšak u lokality Rajhrad by měla být zohledněna blízkost hladina podzemní vody a také vydatnost dešťů v daném období.[9]

4.2 LABORATORNÍ STANOVENÍ V PROPUSTOMĚRU

Experimentální stanovení v propustoměru je laboratorním postupem, kdy je zkoušce podroben porušený vzorek omezeného rozsahu. Proto jsou pro problematiku vsakování tyto zkoušky málo vhodné a je potřeba je brát pouze jako doplňkové. Dále pak je nutné zohlednit, jestli se bere pouze jeden vzorek nebo více vzorků z různých míst, různých hloubek, různých vlhkostí a různého zhutnění. Hodnoty se mnohou použít pro numerické modelování, kdy je vsakování vody problematické.[9]

4.3 VYHODNOCENÍ Z EMPIRICKÝCH VZTAHŮ NA ZÁKLADĚ ZRNITOSTNÍHO ROZBORU

Vyhodnocení z empirických vztahů je zpravidla málo přesným postupem. Porovnání výsledků získaných empirickými vztahy s výsledky z polních zkoušek ukazují, že nejlepší výsledky poskytují u hlín vztahy Krügera a Pavčiče, a u písků vztahy Slichtera a Beyera. Nejlepší pro porovnání je provést výpočty od všech dostupných autorů, a po zjištění jejich platnosti vybrat ty správné. Nakonec je dobré provést vzájemné porovnání výsledků s ostatními metodami.[9]

4.4 ODHADEM PODLE ZATŘÍDĚNÍ MATERIÁLU

Odhad hydraulické vodivosti podle zatřídění materiálu (dle ČSN 73 1001) je nejméně přesným postupem, avšak je jedním z nejjednodušších. Je to pouze orientační postup a slouží především pro porovnání hodnot získaných přesnějšími postupy.[9]

4.5 MODELOVÝM ŘEŠENÍM

V modelovém řešení je mnoho nejistot a zjednodušení, která závisí na typu modelu, míře zohlednění geologických podmínek, okrajových a počátečních podmínkách, tvaru vsakovacího zařízení a mnoha dalších faktorech. V samotném vlastním měření bylo mnoho neznámých, a proto je nutné brát výsledky se značnou rezervou. Pro přesnější výsledky by bylo potřeba důkladnější geologický průzkum a také stanovit vlhkosti materiálů společně se stanovením retenčních křivek.[9]

5 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na srovnání výsledků vsakování vody z polních zkoušek a numerického modelování na dvou vybraných lokalitách. Nejprve byla provedena rešeršní část popisu území, kde byly popsány veškeré dohledané informace o obou lokalitách. Dále se provedly vsakovací zkoušky založené na využití zarážecích válců v terénu, které byly podrobně teoreticky popsány a vyhodnoceny. Poté se odebrali vzorky zeminy pro pozdější měření v laboratoři. Zde se nejprve provedlo měření pórovitosti a hydraulické vodivosti v propustoměrech, a dále síťový rozbor zeminy pro vykreslení křivky zrnitosti. Z těch se následně mohla pomocí empirických vztahů vypočítat hydraulická vodivost. Nakonec bylo provedeno numerické modelování již provedeného vsakování na základě naměřených hodnot v terénu. Na závěr byly všechny výsledky vzájemně porovnány.

V rámci polních zkoušek byly v terénu provedeny tři vsakovací zkoušky využívající zarážecích válců na každé lokalitě, když každá zkouška byla provedena podle určité metody. Nejspolehlivější výsledky dávala metoda dle ČSN, byla ale nejsložitější z hlediska použití dvojválece, množství vody a nutnosti ustálené hladiny. Bouwerova metoda byla jednoduchá, ale bylo u ní obtížné zjistit hloubku vsaku (vrtnou soupravou) a vzdálenost boční infiltrace od pláště válce (odkopem), které byly potřebné pro výpočet. V případě, že hloubka vsaku nebyla změřena v terénu, bylo nutností ji vypočítat. Do výpočtu ale byla vnesena další neznámá, a to aktivní pórovitost, která byla stanovena z odborné literatury. Další neznámou, která do výpočtu vnašela nepřesnosti, byla kapilární výška, která byla stanovena dle tabulky podle Bindemana. Girinského metoda s hloubkou vsaku nepočítala, ale bylo nutné zajistit ustálenou hladinu, což nebylo jednoduché.

V laboratoři se stanovila pórovitost a hydraulická vodivost v propustoměru. U lokality Rajhrad bylo obtížné vzorek při plnění propustoměru neporušit z důvodu různorodosti zeminy, na zemině z lokality Oleksovice to takový problém nebyl. Na každé lokalitě byla provedena tři měření hydraulické vodivosti a dvě měření pórovitosti na lokalitě Rajhrad a tři měření pórovitosti na lokalitě Oleksovice. Výsledky se lišily průměrně o jeden řád, z důvodů použití porušených vzorků, které nebyly vždy zhutněny stejně před měřením. Pro zajištění přesnějších výsledků by bylo potřeba provést větší počet měření a statisticky je vyhodnotit.

Hydraulická vodivost odvozena z empirických vztahů byla počítána dle jednotlivých autorů, které byli platné pro danou lokalitu. Do každého vzorce byly dosazovány stejné veličiny, ať už průměr zrn při určitém propadu, pórovitost (z vlastního měření), kinematická viskozita a další. Z tohoto důvodu se výsledky lišily pouze v přesnosti jednotlivých autorů. U lokality Rajhrad dával nejmenší výsledky Slichterův vztah, přičemž největší měl vztah podle Zauerbrejeva. U lokality Oleksovice udával nejmenší hodnotu vztah podle Pavčiče, naopak nejvyšší hodnotu hydraulické vodivosti měl vztah podle

Beyera, který ovšem nepočítá při svém odvození s pórovitostí. Pro zajištění přesnějších výsledků by bylo potřeba provést větší počet křivek zrnitosti a statisticky je vyhodnotit. Pro srovnání výsledků s dílčí zprávou projektu, ze které práce čerpá jednotlivé vztahy, je nejvhodnějším empirickým vztahem Hazenův a Beyerův vztah. Co se rozsahu použitelnosti týče, tak dílčí zpráva projektu [12] udává vztahy s největším rozsahem použitelnosti Slichterův a Terzaghiho vztah. Vlastní práce se tímto ztotožňuje jako s nejvhodnějším Beyerovým vztahem u lokality Rajhrad a použitelný pro obě lokality byl taktéž vztah Slichterův.

Numerické modelování bylo provedeno pouze orientačně na základě měření v terénu pomocí Bouwerovy metody vsakování. Obě lokality byly namodelovány pomocí programu HYDRUS 2D, kdy výsledky hydraulické vodivosti lokality Rajhrad vycházely o něco větší při srovnání s polními zkouškami v terénu. Důvodem mohlo být ovlivnění hladinou podzemní vody. Naopak výsledky z lokality Oleksovice se ztotožňovaly s již naměřenými hodnotami hydraulické vodivosti. Nepřesnosti byly způsobeny nedostatečným geologickým průzkumem a pouze odhadnutá vlhkost zeminy společně s odhadovaným stanovením retenčních křivek.

Co se týče výsledků v lokalitě Rajhrad, tak se naměřené hodnoty hydraulické vodivosti shodovaly s tabulkovými pro příslušnou zeminu. Dále je na lokalitě možnost vybudovat vsakovací zařízení, protože je její prostředí propustné a schopné odvádět vsakované vody. Nejhorší možná varianta vyšla z empirických vztahů podle Slichtera, ale i ta vyhovuje propustnému prostředí. V lokalitě je možné navrhnout vsakovací zařízení, ale je nutné ověřit polohu podzemní vody.

Ohledně výsledků v lokalitě Oleksovice, tak naměřené hodnoty hydraulické vodivosti nebyly totožné s těmi tabulkovými, vycházely hůře než tabulkové. Bylo to pravděpodobně zapříčiněno přílišnou ulehlostí zeminy při měření v terénu. Avšak i tato lokalita je vhodná pro vybudování vsakovacích zařízení, protože její prostředí je propustné a schopné odvádět vsakované vody. Nejhorší variantou bylo polní měření Bouwerovou metodou, která i přesto vyhověla propustnému prostředí. Nejlepší variantou byla metoda z empirických vztahů podle Beyera, která jako jediná vyhověla tabulkovým hodnotám. Lokalita je vhodná pro vsakování.

Závěrem je grafické srovnání výsledků naměřených a vypočtených hodnot hydraulické vodivosti obou lokalit, uvedené v příloze č. 6.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HORÁK, Vladislav. *Výuka v terénu: Geotechnický průzkum* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-01-10].
- [2] *Česká geologická služba* [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/>.
- [3] POSPÍŠIL, Pavel. *Geologie: Základy všeobecné a inženýrské geologie a hydrogeologie* [online]. 2004 [cit. 2017-01-10].
- [4] *Základní mapy ČR* [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/>
- [5] Geomorfologické členění Česka. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2015-05-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Geomorfologick%C3%A9_%C4%8Dlen%C4%Bn%C3%AD_%C4%8Ceska.
- [6] POSPÍŠIL, Pavel. *Geologie: Základy regionální geologie České republiky* [online]. 2004 [cit. 2017-01-10].
- [7] PETRŽÍLEK, Blahoslav a Eduard KOČÁREK. *Základy geologie: populární výklad o geologických vědách a všem, co s nimi souvisí*. Praha: Práce, 1959. Dostupné také z: <http://kramerius.mzk.cz/search/handle/uuid:a52375b0-81d1-11e4-a0ea-005056827e52>.
- [8] ŠRÁČEK, Ondřej a Tomáš KUCHOVSKÝ. 2003. *Základy hydrogeologie*. 1. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 177 s., [9] s. slovníček. ISBN 80-210-3146-8.
- [9] ŘÍHA, Jaromír. *Stanovení parametrů pro návrh vsakovacích zařízení srážkových vod: metodická příručka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2015. ISBN 978-80-214-5246-6.
- [10] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 186 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 978-80-7204-507-5.
- [11] ZÁRUBA, Quido a Vojtěch MENCL. *Inženýrská geologie: celostátní vysokoškolská učebnice*. 2., doplněné vydání. Praha: ČSAV, 1957, 486, [1] s.
- [12] ŘÍHA, Jaromír. *Užití metod vsakování a jejich vyhodnocování v návaznosti na porovnávání výsledků s laboratorními zkouškami na různých typech zemin a model pro návrh vsakovacích jímek: Ověření empirických vztahů pro výpočet hydraulické vodivosti* [online]. Brno, 2014 [cit. 2017-01-10].

- [13] DUCHAN, David, Jaromír ŘÍHA a Zbyněk ZACHOVAL. *Hydraulické aspekty infiltrace dešťových vod: hydraulika vsakování dešťových vod*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. Práce a studie Ústavu vodních staveb FAST VUT v Brně. ISBN 978-80-214-5017-2.
- [14] *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: http://chmu.cz/portal/dt?portal_lang=cs&menu=JSPTabContainer/P1_0_Home.
- [15] VAN GENUCHTEN, M. TH., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, 1980, ISSN 1435-0661.
- [16] LU, N., LIKOS, W. J., 2004. *Unsaturated Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New Jersey, 556 p. ISBN 0-471-44731-5.
- [17] ČSN 75 9010. 2012. Vsakovací zařízení srážkových vod.
- [18] ATV-DVWK. 2007. *Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser*, GFA Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e.V. ATV Merkblatt M153. 36 s.
- [19] ASTM D3385-09. *Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double-Ring Infiltrometer*. - ASTM International, 2009.
- [20] ASTM D5126/D5126M. *Standard Guide for Comparison of Field Methods for Determining Hydraulic Conductivity in Vadose Zone*. ASTM Internat., 1990.
- [21] DIN 19682-7. *Bestimmung der Versickerungsintensität mit dem Doppelzylinder - Infiltrometer - Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau*, Berlin, 1972.
- [22] ČSN EN ISO 22282-5 (72 1015) *Geotechnický průzkum a zkoušení - Hydrotechnické zkoušky - Část 5: Infiltrimetrické zkoušky*, 2012.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Vrtná prozkoumanost - Rajhrad[2].....	16
Tab. 2. Vrtná prozkoumanost - Oleksovice[2]	17
Tab. 3. Srovnání výsledků vlastního měření hydraulické vodivosti a koeficientu vsaku ...	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Geografická mapa 1:50 000 – Rajhrad – červeně označena lokalita[4].....	13
Obr. 2 Geografické mapa 1:50 000 – Oleksovice – červeně označena lokalita[4]	14
Obr. 3 Vrtná prozkoumanost 1:2000 – Rajhrad – červeně označeno místo průzkumu[2] ..	17
Obr. 4 Vrtná prozkoumanost 1:2000 – Oleksovice – červeně označena lokalita[2]	18
Obr. 5 Geologická mapa 1:50 000 – červeně vyznačena lokalita Rajhrad[2]	20
Obr. 6 Legenda ke geologické mapě (obr. 5)[2].....	21
Obr. 7 Geologická mapa 1:50 000 – červeně označena lokalita Oleksovice[2].....	21
Obr. 8 Legenda ke geologické mapě (obr. 7)[2].....	22
Obr. 9 Regionální dělení Západních Karpat.....	23
Obr. 10 Vsakovací zkouška při využití jednoho válce[9]	27
Obr. 11 Čerpání vody do vsakovacího válce.....	29
Obr. 12 Zarážení válce.....	32
Obr. 13 Vsakovací dvojjálec – metoda dle ČSN[9]	33
Obr. 14 Vsakovací dvojjálec – po měření	35
Obr. 15 Propustoměry s konstantním (vlevo) a zmenšujícím se spádem (vpravo)[9]	37
Obr. 16 Měření pórovitosti	38
Obr. 17 Měření pórovitosti propustoměry v laboratoři	39
Obr. 18 Sada sít s vhodně zvolenými otvory pro síťový rozbor zeminy	41
Obr. 19 Geometrie zvolené oblasti	49
Obr. 20 HYDRUS 2D – vlhkost v čase 2000 s, červeně je plně nasycená zemina.....	51
Obr. 21 HYDRUS 2D – vlhkost v čase 7000 s, červeně je plně nasycená zemina, modře je zemina s vlhkostí téměř reziduální	52

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

kol.	...	kolektiv	[-]
sv.	...	svatý	[-]
m n. m.	...	metrů nad mořem	[m n. m.]
m	...	metr	[m]
km	...	kilometr	[km]
°C	...	stupeň Celsia	[°C]
mm	...	milimetr	[mm]
GF	...	geologický profil	[-]
°	...	stupeň	[°]
JZ	...	jihozápad	[-]
k	...	hydraulická vodivost	[m·s ⁻¹]
cm	...	centimetr	[cm]
d _l	...	vnitřní průměr válce	[m]
r	...	poloměr válce	[m]
s	...	snížení hladiny	[m]
x _s	...	vzdálenost zamokřené zóny od válce	[m]
h _s	...	hloubka vsaku	[m]
h ₀	...	výška vody ve válci	[m]
S _n	...	suma dílčích poklesů hladiny	[m]
v _{in}	...	infiltrační rychlost (ve dně válce)	[m·s ⁻¹]
t _n	...	časový interval	[s]
v _{iw}	...	infiltrační rychlost (hlouběji)	[m·s ⁻¹]
h _p	...	průměrná výška vody na konci zkoušky	[m]
h _k	...	kapilární výška	[m]
n _a	...	aktivní pórovitost	[m]
k _v	...	koeficient vsaku	[m·s ⁻¹]
č.	...	číslo	[-]
Q _{ZK}	...	přítok vody do válce	[m ³ ·s ⁻¹]

A_{ZK}	...	plocha dna válce	$[m^2]$
ξ	...	součinitel zahrnující vliv boční infiltrace	$[-]$
d_2	...	vnitřní průměr vnějšího válce	$[m]$
z_p	...	hloubka zaražení válce	$[mm]$
Q_{ZK2}	...	přítok vody do vnějšího válce	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
π	...	matematická konstanta	$[-]$
Q	...	přítok	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
L	...	vzdálenost pružů s piezometry	$[m]$
A	...	plocha válce	$[m^2]$
Δh	...	rozdíl úrovní piezometrické vřýšky	$[m]$
h_1	...	délka vzorku v propustoměru	$[m]$
h_2	...	délka vody nad bílým sítem v propustoměru	$[m]$
bod 0	...	bod na propustoměru	$[-]$
bod 1	...	bod na propustoměru	$[-]$
n	...	pórovitost	$[-]$
h_4	...	délka vody pod bílým sítem v propustoměru	$[m]$
Z	...	procentuální podíl příslušné frakce	$[\%]$
m	...	hmotnost zeminy na jednotlivých sítích	$[g]$
Σm	...	celková hmotnost prosévané zeminy	$[g]$
v	...	rychlost usazování částic v suspenzi	$[m \cdot s^{-1}]$
g	...	gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
ρ_s	...	hustota pevných částic	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_w	...	hustota vody	$[kg \cdot m^{-3}]$
η	...	dynamická viskozita vody	$[N \cdot s \cdot m^{-2}]$
d	...	průměr zrn	$[mm]$
d_{10}	...	průměr zrn při 10% propadu	$[m]$
ν	...	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
T	...	teplota vody	$[^\circ C]$
C_H	...	součinitel závislý na znečištění písku hlínou	$[-]$

U	...	číslo nestejnozrnnosti	[-]
d_{60}	...	průměr zrn při 60% propadu	[mm]
C_Z	...	součinitel pro vztah Zauerebrejeva	[-]
τ	...	parameter závislý na teplotě	[-]
d_{17}	...	průměr zrn při 17% propadu	[m]
C_K	...	součinitel pro vztah Krügera	[-]
d_e	...	průměr efektivního zrna	[m]
C_{ZU}	...	součinitel pro vztah Zunkera	[-]
d_{20}	...	průměr zrn při 20% propadu	[m]
ϕ_1	...	koeficient pro štěrkopísčité zeminy	[-]
MKP	...	metoda konečných prvků	[-]
MKD	...	metoda konečných diferencí	[-]
1D	...	jednorozměrný model	[-]
2D	...	dvourozměrný model	[-]
3D	...	prostorový model (třírozměrný)	[-]
θ_r	...	reziduální vlhkost	[-]
θ_s	...	nasycená vlhkost	[-]
k_s	...	nasycená hydraulická vodivost	[m·s ⁻¹]
h	...	tlaková výška	[m]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Protokol o měření vsakování válcem – lokalita Rajhrad

Příloha č. 2: Protokol o měření vsakování válcem – lokalita Oleksovice

Příloha č. 3: Laboratorní měření – výpočty pórovitosti a hydraulické vodivosti

Příloha č. 4: Křivky zrnitosti

Příloha č. 5: Odvození hydraulické vodivosti z křivek zrnitosti

Příloha č. 6: Grafické srovnání hydraulické vodivosti z jednotlivých metod

Příloha č. 1 - A: Protokol o měření vsakování válcem - lokalita Rajhrad

Použitá metodika: Bouwerova metoda
Poloha a název lokality: Rajhrad, Klášter sester Těšitelek
Datum a jméno pracovníka: 15.10.2016, Dominik Blahut, Jan Balas
Charakter zeminy: sprašové hlíny
Hloubka odběru vzorku: 0.6 m
Průměry válců, hloubka zaražení: $d_1 = 0.58$ m
 $z_p = 0.05$ m
Způsob instalace válce: zaražení
Hladina vody ve válci: neustálená hladina

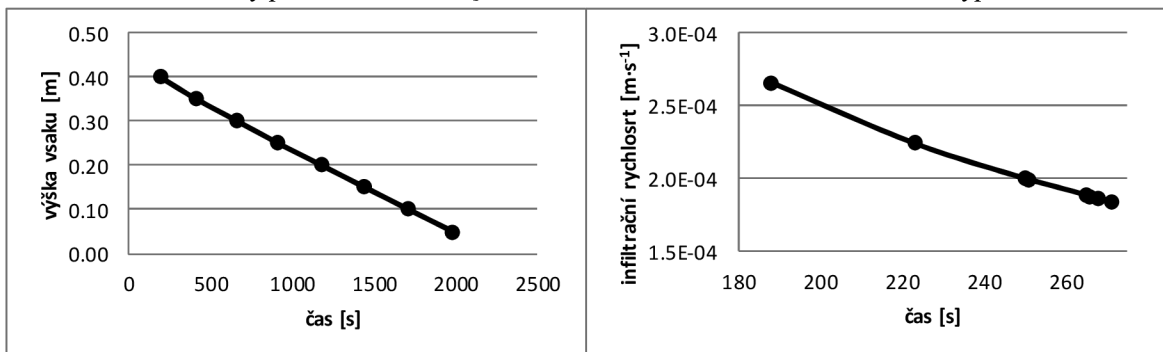
Výsledky měření:

s_n [m]	t [s]	výška vsaku [m]	v [m·s ⁻¹]	t_n [s]
0.05	188	0.40	2.66E-04	188
0.05	411	0.35	2.24E-04	223
0.05	662	0.30	1.99E-04	251
0.05	912	0.25	2.00E-04	250
0.05	1178	0.20	1.88E-04	266
0.05	1443	0.15	1.89E-04	265
0.05	1711	0.10	1.87E-04	268
0.05	1982	0.05	1.85E-04	271

aktivní pórovitost $n_a = 0.05$ odhad pro hlinité zeminy
vzdálenost zamokřené zóny od válce $x_s = 0.25$ m zjištěno odkopem
průměrná výška vody ve válci $h_p = 0.1$ m
kapilární výška $h_k = 0.4$ m hlinitá zemina (odhad z tabulek)
hloubka zamokřené zóny pod válcem $h_s = 2.17$ m zjištěno vrtnou soupravou

Vyhodnocení zkoušky:

infiltrační rychlost $v_{in} = 1.85E-04$ m·s⁻¹ = koeficient vsaku
infiltrační rychlost hlouběji pod válcem $v_{iw} = 5.32E-05$ m·s⁻¹
hydraulická vodivost $k = 4.32E-05$ m·s⁻¹
hloubka zamokřené zóny pod válcem $h_s = 2.31$ m stanovena výpočtem



Příloha č. 1 - B: Protokol o měření - lokalita Rajhrad

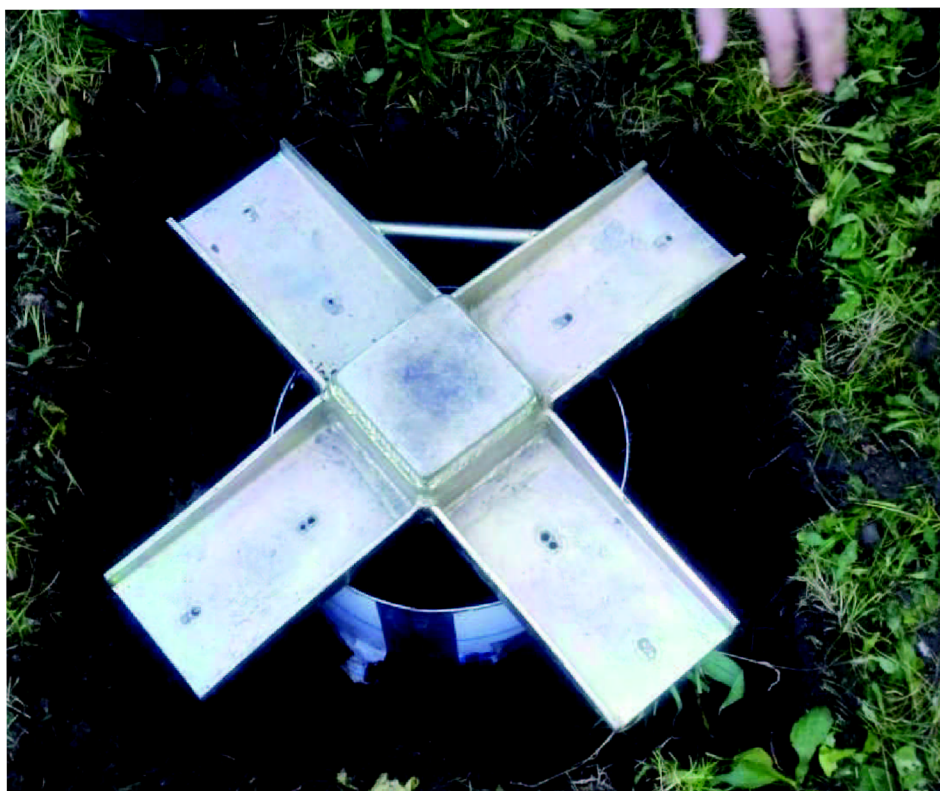
Použitá metodika:	Girinského metoda
Poloha a název lokality:	Rajhrad, Klášter sester Těšitelek
Datum a jméno pracovníka:	15.10.2016, Dominik Blahut, Jan Balas
Charakter zeminy:	sprašové hlíny
Hloubka odběru vzorku:	0.6 m
Průměry válců, hloubka zaražení:	$d_1 = 0.32 \text{ m}$ $z_p = 0.05 \text{ m}$
Způsob instalace válce:	zaražení
Hladina vody ve válci:	ustálená hladina

Výsledky měření:

přítok vody do válce	$Q_{ZK} = 1.25E-05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	
kapilární výška + výška vody ve válci	$h_0 + h_k = 0.5 \text{ m}$	
součinitel	$\xi = 1.93 \text{ m}^2$	odečten z tabulky (Dobžanski 1956), závislý na $h_k + h_0$ a d_1
plocha válce	$A_{ZK} = 0.080425 \text{ m}^2$	

Vyhodnocení zkoušky:

koeficient vsaku	$k_v = 1.55E-04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
hydraulická vodivost	$k = 1.68E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Zarážení vsakovacího válce

Příloha č. 1 -C : Protokol o měření - lokalita Rajhrad

Použitá metodika:	Metoda dle ČSN EN- ISO 22282-5
Poloha a název lokality:	Rajhrad, Klášter sester Těšitelek
Datum a jméno pracovníka:	15.10.2016, Dominik Blahut, Jan Balas
Charakter zeminy:	sprašové hlíny
Hloubka odběru vzorku:	0.6 m
Průměry válců, hloubka zaražení:	$d_1 = 0.32$ m $d_2 = 0.58$ m $z_p = 0.05$ m
Způsob instalace válce:	zaražení
Hladina vody ve válci:	ustálená hladina

Výsledky měření:

přítok vody do vnitřního válce	$Q_{ZK1} = 1.81E-06$ m ³ ·s ⁻¹	
přítok vody do vnějšího válce	$Q_{ZK2} = 1.17E-05$ m ³ ·s ⁻¹	
hloubka zamokřené zóny pod válcem	$h_s = 2.06$ m	zjištěno vrtnou soupravou
průměrná výška vody ve válci	$h_p = 0.1$ m	
kapilární výška	$h_k = 0.4$ m	hlinitá zemina (odhad z tabulek)

Vyhodnocení zkoušky

koeficient vsaku	$k_v = 5.11E-05$ m·s ⁻¹	
hydraulická vodivost	$k = 2.25E-05$ m·s ⁻¹	
hydraulická vodivost	$k = 1.81E-05$ m·s ⁻¹	přesněji s uvažováním kapilárních vlastností zeminy



Plnění vsakovacího dvoje válce

Příloha č. 2 - A: Protokol o měření vsakování válcem - lokalita Oleksovice

Použitá metodika: Bouwerova metoda
 Poloha a název lokality: Oleksovice, pískovna
 Datum a jméno pracovníka: 20.10.2016, Dominik Blahut, Jakub Knoflíček
 Charakter zeminy: písky
 Hloubka odběru vzorku: 0.8 m
 Průměry válců, hloubka zaražení: $d_1 = 0.58$ m
 $z_p = 0.05$ m
 Způsob instalace válce: zaražení
 Hladina vody ve válci: neustálená hladina

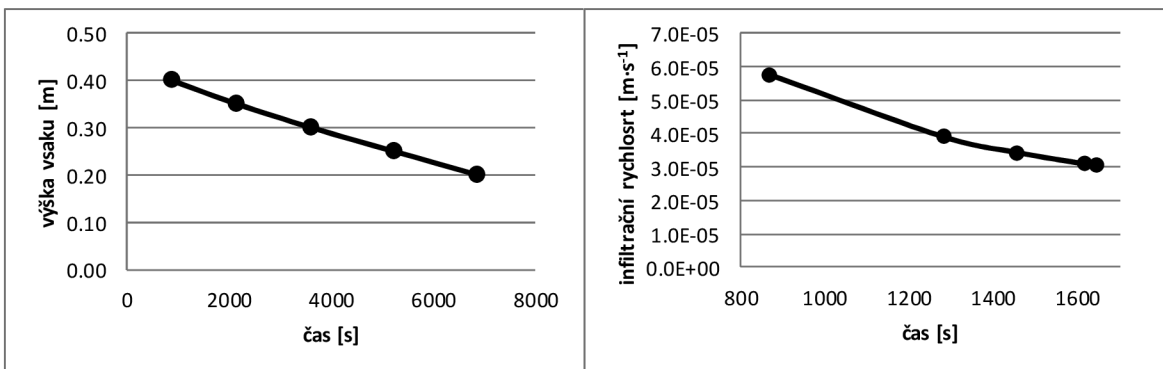
Výsledky měření:

s_n	t	výška vsaku	v	t_n
[m]	[s]	[m]	[m·s ⁻¹]	[s]
0.05	868	0.40	5.76E-05	868
0.05	2148	0.35	3.91E-05	1280
0.05	3604	0.30	3.43E-05	1456
0.05	5219	0.25	3.10E-05	1615
0.05	6864	0.20	3.04E-05	1645

aktivní pórovitost $n_a = 0.2$ odhad pro písčité zeminy
 vzdálenost zamokřené zóny od válce $x_s = 0.1$ m zjištěno odkopem
 průměrná výška vody ve válci $h_p = 0.1$ m
 kapilární výška $h_k = 0.1$ m písčité zemina (odhad z tabulek)

Vyhodnocení zkoušky:

infiltrační rychlost $v_{in} = 3.04E-05$ m·s⁻¹ = koeficient vsaku
 infiltrační rychlost hlouběji pod válcem $v_{iw} = 1.68E-05$ m·s⁻¹
 hydraulická vodivost $k = 1.30E-05$ m·s⁻¹
 hloubka zamokřené zóny pod válcem $h_s = 0.69$ m stanovena výpočtem



Příloha č. 2 - B: Protokol o měření - lokalita Oleksovice

Použitá metodika:	Girinského metoda
Poloha a název lokality:	Oleksovice, pískovna
Datum a jméno pracovníka:	20.10.2016, Dominik Blahut, Jakub Knoflíček
Charakter zeminy:	písky
Hloubka odběru vzorku:	0.8 m
Průměry válců, hloubka zaražení:	$d_1 = 0.32$ m $z_p = 0.05$ m
Způsob instalace válce:	zaražení
Hladina vody ve válci:	ustálená hladina

Výsledky měření:

přítok vody do válce	$Q_{ZK} = 5.36E-06$ m ³ ·s ⁻¹	
kapilární výška + výška vody ve válci	$h_0+h_k = 0.2$ m	
součinitel	$\xi = 4.07$ m ²	odečten z tabulky (Dobžanski 1956), závislý na h_k+h_0 a d_1
plocha válce	$A_{ZK} = 0.080425$ m ²	

Vyhodnocení zkoušky:

koeficient vsaku	$k_v = 6.67E-05$ m·s ⁻¹
hydraulická vodivost	$k = 1.52E-05$ m·s ⁻¹



Plnění vsakovacího válce

Příloha č. 2 - C: Protokol o měření - lokalita Oleksovice

Použitá metodika:	Metoda dle ČSN EN- ISO 22282-5
Poloha a název lokality:	Oleksovice, pískovna
Datum a jméno pracovníka:	20.10.2016, Dominik Blahut, Jakub Knoflíček
Charakter zeminy:	písky
Hloubka odběru vzorku:	0.8 m
Průměry válců, hloubka zaražení:	$d_1 = 0.32$ m $d_2 = 0.58$ m $z_p = 0.05$ m
Způsob instalace válce:	zaražení
Hladina vody ve válci:	ustálená hladina

Výsledky měření:

přítok vody do vnitřního válce	$Q_{ZK1} = 2.97E-06$ m ³ ·s ⁻¹	
přítok vody do vnějšího válce	$Q_{ZK2} = 1.19E-05$ m ³ ·s ⁻¹	
hloubka zamokřené zóny pod válcem	$h_s = 0.69$ m	zjištěno vrtnou soupravou
průměrná výška vody ve válci	$h_p = 0.1$ m	
kapilární výška	$h_k = 0.1$ m	hlinitá zemina (odhad z tabulek)

Vyhodnocení zkoušky

koeficient vsaku	$k_v = 5.63E-05$ m·s ⁻¹	
hydraulická vodivost	$k = 3.70E-05$ m·s ⁻¹	
hydraulická vodivost	$k = 2.87E-05$ m·s ⁻¹	přesněji s uvažováním kapilárních vlastností zeminy



Měření hloubky zaražení válce

Příloha č. 3: Laboratorní měření, tabulka pro výpočet pórovitosti

Číslo pokusu	Typ zeminy	Plocha propustoměru	Hmotnost propustoměru před měřením	Hmotnost suchého propustoměru	Hmotnost propustoměru včetně zeminy	Hmotnost zeminy	Hmotnost vody s válcem před měřením	Hmotnost vody s válcem po měření	Délka vzorku (od bodu měření)	Délka vzorku
ČP	-	S	$m_{p,p}$	m_{dry}	$m_{p,k}$	m_k	m_1	m_2	h_1	h_{1X}
-	-	m^2	kg	kg	kg	kg	kg	kg	m	m
1	písky - Oleksovice	0.011882	0.877	0.877	3.182	2.305	3.194	2.422	0.113	0.111
2	písky - Oleksovice	0.011882	0.919	0.900	2.847	1.928	2.386	1.514	0.100	0.098
3	hlíny - Rajhrad	0.011882	0.907	0.907	2.452	1.545	3.191	2.113	0.099	0.097
4	písky - Oleksovice	0.011882	0.887	0.887	2.991	2.104	2.384	1.480	0.105	0.103
5	hlíny - Rajhrad	0.011882	0.920	0.900	2.619	1.699	3.304	2.279	0.110	0.108

Délka vody nad bílým sítem (od bodu měření)	Délka vody nad bílým sítem	Délka od bodu "0" k bodu měření	Délka vody pod bílým sítem	Délka od bodu "0" po výšku hladiny	Součet	Objem vzorku zeminy	Objem vody v propustoměru	Objem kuliček z hustoty	Pórovitost z hmotnosti vody	Pórovitost z hmotnosti kuliček
h_2	h_{2X}	h_{4X}	h_4	H	H	V_1	V	V_k	n_1	n_2
m	m	m	m	m	m	m^3	m^3	m^3	-	-
0.124	0.122	0.027	0.021	0.1500	0.1500	0.0013	0.00072	0.00095	0.2177	0.2798
0.114	0.112	0.034	0.028	0.1470	0.1470	0.0012	0.00085	0.00080	0.2791	0.3178
0.118	0.116	0.033	0.027	0.1500	0.1500	0.0012	0.00102	0.00077	0.3700	0.3317
0.120	0.118	0.031	0.025	0.1500	0.1500	0.0012	0.00085	0.00087	0.2651	0.2918
0.123	0.121	0.034	0.028	0.1560	0.1560	0.0013	0.00099	0.00081	0.3530	0.3712

Příloha č. 3: Laboratorní měření, tabulky pro výpočet hydraulické vodivosti - pokus č. 1, 2, 3

Číslo pokusu	Typ zeminy	Měření číslo	Plocha propustoměru	Kinematická viskozita	Rozdíl piezometrických výšek	Délka vzorku	Objem vody	Čas	Průtok	Hydraulická vodivost	Hydraulický gradient	Skutečná hydraulická vodivost	Průměrná hydraulická vodivost
ČP	-	-	S	ν	d_h	l	dV	T	Q	k_u	J	k_r	k
-	-	-	m^2	$m^2 \cdot s^{-1}$	m	m	m^3	s	$m^3 \cdot s^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	-	$m \cdot s^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$
1	písek - Oleksovice (3.11.2016)	1	0.011882	1.067E-06	0.032	0.098	0.000008	80	1.00E-07	2.58E-05	0.327	2.51E-05	2.67E-05
		2			0.035	0.098	0.000010	70.57	1.42E-07	3.34E-05	0.357	3.25E-05	
		3			0.044	0.098	0.000009	64.08	1.40E-07	2.63E-05	0.449	2.56E-05	
		4			0.051	0.098	0.000009	55.84	1.61E-07	2.61E-05	0.520	2.54E-05	
		5			0.060	0.098	0.000014	69.43	1.94E-07	2.67E-05	0.612	2.60E-05	
		6			0.070	0.098	0.000010	45.19	2.21E-07	2.61E-05	0.714	2.54E-05	
2	hlína - Rajhrad (11.11.2016)	1	0.011882	1.054E-06	0.059	0.099	0.000017	70	2.36E-07	3.33E-05	0.596	3.24E-05	3.33E-05
		2			0.062	0.099	0.000018	70	2.50E-07	3.36E-05	0.626	3.27E-05	
		3			0.066	0.099	0.000019	70	2.64E-07	3.34E-05	0.667	3.25E-05	
		4			0.069	0.099	0.000020	70	2.79E-07	3.36E-05	0.697	3.28E-05	
		5			0.074	0.099	0.000021	70	3.00E-07	3.38E-05	0.747	3.29E-05	
		6			0.077	0.099	0.000022	70	3.14E-07	3.40E-05	0.778	3.31E-05	
		7			0.084	0.099	0.000025	70	3.50E-07	3.47E-05	0.848	3.38E-05	
		8			0.093	0.099	0.000027	70	3.86E-07	3.46E-05	0.939	3.37E-05	
		9			0.101	0.099	0.000031	70	4.36E-07	3.59E-05	1.020	3.50E-05	
		10			0.112	0.099	0.000033	70	4.64E-07	3.45E-05	1.131	3.37E-05	
		11			0.125	0.099	0.000036	70	5.14E-07	3.43E-05	1.263	3.34E-05	
3	písek - Oleksovice (11.11.2016)	1	0.011882	1.054E-06	0.036	0.105	0.000013	100	1.25E-07	3.07E-05	0.343	2.99E-05	2.90E-05
		2			0.041	0.105	0.000013	100	1.30E-07	2.80E-05	0.390	2.73E-05	
		3			0.044	0.105	0.000015	100	1.45E-07	2.91E-05	0.419	2.84E-05	
		4			0.048	0.105	0.000016	100	1.55E-07	2.85E-05	0.457	2.78E-05	
		5			0.052	0.105	0.000018	100	1.75E-07	2.97E-05	0.495	2.90E-05	
		6			0.055	0.105	0.000019	100	1.85E-07	2.97E-05	0.524	2.90E-05	
		7			0.064	0.105	0.000021	100	2.10E-07	2.90E-05	0.610	2.83E-05	
		8			0.070	0.105	0.000024	100	2.35E-07	2.97E-05	0.667	2.89E-05	
		9			0.079	0.105	0.000027	100	2.65E-07	2.96E-05	0.752	2.89E-05	
		10			0.090	0.105	0.000031	100	3.10E-07	3.04E-05	0.857	2.97E-05	
		11			0.103	0.105	0.000038	100	3.80E-07	3.26E-05	0.981	3.18E-05	

Příloha č. 3: Laboratorní měření, tabulky pro výpočet hydraulické vodivosti - pokus č. 4, 5, 6

Číslo pokusu	Typ zeminy	Měření číslo	Plocha propustoměru	Kinematická viskozita	Rozdíl piezometrických výšek	Délka vzorku	Objem vody	Čas	Průtok	Hydraulická vodivost	Hydraulický gradient	Skutečná hydraulická vodivost	Průměrná hydraulická vodivost
ČP	-	-	S	ν	d_h	l	dV	T	Q	k_u	J	k_r	k
-	-	-	m^2	$m^2 \cdot s^{-1}$	m	m	m^3	s	$m^3 \cdot s^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$	-	$m \cdot s^{-1}$	$m \cdot s^{-1}$
4	hlína - Rajhrad (16.11.2016)	1	0.011882	1.054E-06	0.093	0.097	0.000005	351	1.28E-08	1.13E-06	0.959	1.09E-06	1.16E-06
		2			0.101	0.097	0.000005	333	1.50E-08	1.21E-06	1.041	1.18E-06	
		3			0.104	0.097	0.000004	299	1.34E-08	1.05E-06	1.072	1.02E-06	
		4			0.111	0.097	0.000006	331	1.81E-08	1.33E-06	1.144	1.30E-06	
		5			0.124	0.097	0.000004	223	1.57E-08	1.03E-06	1.278	1.01E-06	
		6			0.145	0.097	0.000006	272	2.21E-08	1.24E-06	1.495	1.21E-06	
		7			0.154	0.097	0.000007	300	2.25E-08	1.19E-06	1.588	1.16E-06	
		8			0.160	0.097	0.000007	305	2.38E-08	1.21E-06	1.649	1.18E-06	
		9			0.170	0.097	0.000006	228	2.41E-08	1.16E-06	1.753	1.13E-06	
		10			0.180	0.097	0.000007	262	2.58E-08	1.17E-06	1.856	1.14E-06	
		11			0.190	0.097	0.000008	282	2.84E-08	1.22E-06	1.959	1.19E-06	
		12			0.199	0.097	0.000005	172	2.79E-08	1.14E-06	2.052	1.11E-06	
		13			0.209	0.097	0.000005	159	3.14E-08	1.23E-06	2.155	1.20E-06	
		14			0.264	0.097	0.000004	92	4.46E-08	1.38E-06	2.722	1.34E-06	
5	hlína - Rajhrad (24.10.2016)	1	0.011882	1.067E-06	0.078	0.108	-	-	4.99E-08	5.82E-06	0.722	5.82E-06	6.22E-06
		2			0.085	0.108	-	-	5.57E-08	5.99E-06	0.782	5.99E-06	
		3			0.089	0.108	-	-	5.77E-08	5.93E-06	0.819	5.93E-06	
		4			0.092	0.108	-	-	6.26E-08	6.22E-06	0.847	6.21E-06	
		5			0.095	0.108	-	-	6.56E-08	6.28E-06	0.880	6.28E-06	
		6			0.098	0.108	-	-	6.91E-08	6.41E-06	0.907	6.41E-06	
		7			0.100	0.108	-	-	7.13E-08	6.48E-06	0.926	6.48E-06	
6	písek - Olekovice (3.11.2016)	1	0.011882	1.067E-06	0.076	0.111	0.000010	97	1.03E-07	1.27E-05	0.685	1.24E-05	1.34E-05
		2			0.080	0.111	0.000014	114.23	1.18E-07	1.38E-05	0.721	1.35E-05	
		3			0.083	0.111	0.000016	134.86	1.15E-07	1.29E-05	0.748	1.26E-05	
		4			0.086	0.111	0.000015	115.31	1.30E-07	1.41E-05	0.775	1.38E-05	
		5			0.090	0.111	0.000015	110.85	1.35E-07	1.40E-05	0.811	1.37E-05	
		6			0.097	0.111	0.000010	65.32	1.53E-07	1.47E-05	0.874	1.44E-05	

Příloha č. 4: Křivky zrnitosti - lokalita Rajhrad

Hmotnostní a procentuální podíl zeminy na jednotlivých sítích

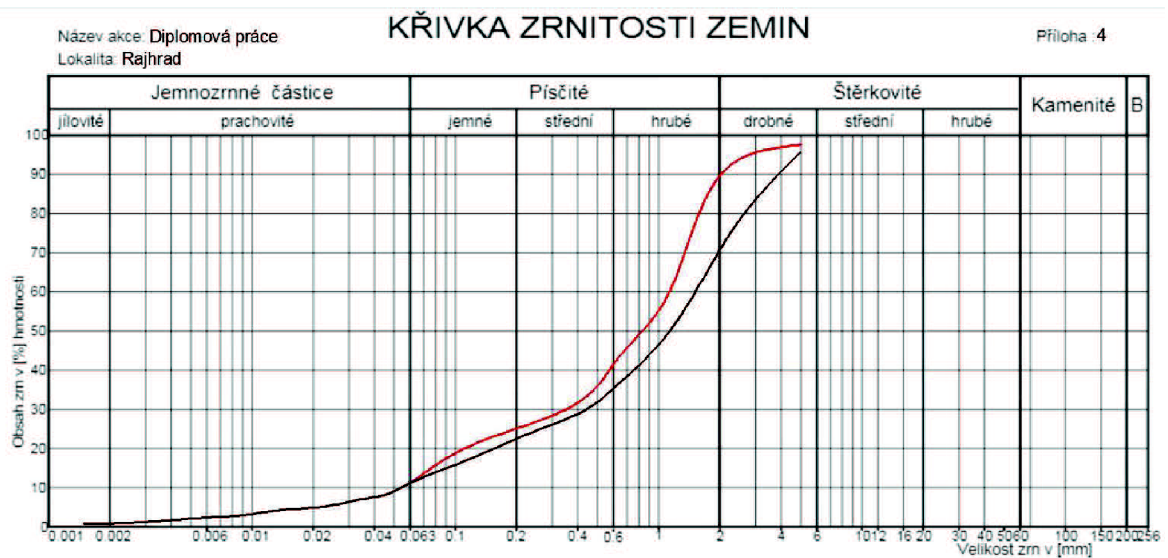
Tab. A

velikost ok [mm]	zůstalo na síť		propad sítím
	[g]	z [%]	[%]
5	36.1	3.54	96.46
2.5	187.8	18.43	78.03
1	319.5	31.36	46.67
0.63	109.3	10.73	35.94
0.5	45.4	4.46	31.48
0.25	79.6	7.81	23.67
0.1	70.6	6.93	16.74
0.063	60.3	5.92	10.83
0.0469	Aerometrická zkouška		8.61
0.0348			7.41
0.024			5.01
0.0145			3.74
0.0087			2.31
0.0055			1.41
0.0032			0.81
0.0016			0.25
0	0	0.00	0.00

Tab. B

velikost ok [mm]	zůstalo na síť		propad sítím
	[g]	z [%]	[%]
5	14.9	1.64	98.36
2.5	42.5	4.66	93.70
1	350	38.41	55.29
0.63	121.5	13.33	41.96
0.5	46.9	5.15	36.81
0.25	82.2	9.02	27.79
0.1	78.1	8.57	19.22
0.063	79	8.67	10.55
0	96.1	10.55	0.00

Z tabulky A byla vynesena křivka zrnitosti černé barvy, z tabulky B byla vynesena křivka zrnitosti červené barvy, ze kterých lze odvodit potřebné průměry zrn při určitém propadu. Z obou křivek se vzala průměrná hodnota.



Příloha č. 4: Křivky zrnitosti - lokalita Rajhrad

Hmotnostní a procentuální podíl zeminy na jednotlivých sítích

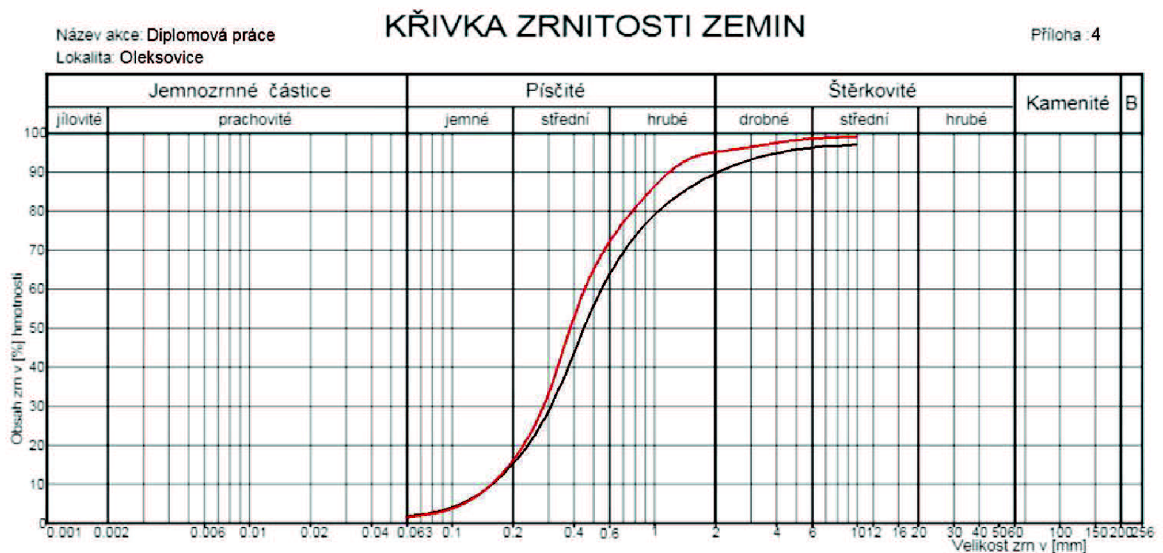
Tab. C

velikost ok [mm]	zůstalo na síti		propad sítem
	[g]	z [%]	[%]
10	23.2	2.19	97.81
5	17.3	1.64	96.17
2.5	50.6	4.79	91.38
1.6	57	5.39	85.99
1	69.4	6.56	79.43
0.5	235.8	22.30	57.13
0.25	383.9	36.31	20.82
0.1	181.4	17.16	3.67
0.063	27.7	2.62	1.05
0	11.1	1.05	0.00

Tab. D

velikost ok [mm]	zůstalo na síti		propad sítem
	[g]	z [%]	[%]
10	7.9	0.77	99.23
5	5.2	0.51	98.72
2.5	23.3	2.27	96.45
1.6	26.8	2.62	93.83
1	66.6	6.50	87.33
0.5	223.4	21.80	65.53
0.25	431.3	42.09	23.43
0.1	200.3	19.55	3.88
0.063	27.9	2.72	1.16
0	11.9	1.16	0.00

Z tabulky C byla vynesena křivka zrnitosti černé barvy, z tabulky D byla vynesena křivka zrnitosti červené barvy, ze kterých lze odvodit potřebné průměry zrn při určitém propadu. Z obou křivek se vzala průměrná hodnota.



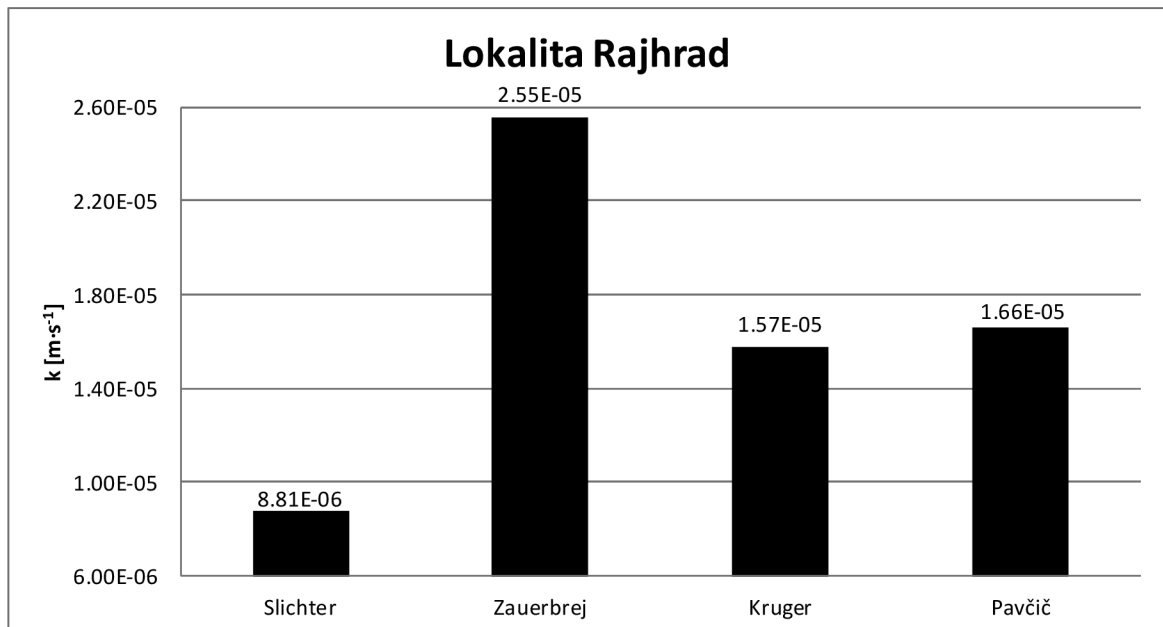
Příloha č. 5: Odvození hydraulické vodivosti z křivek zrnitosti

Lokalita Rajhrad

$d_{10} =$	0.0577 mm	z křivek zrnitosti
$d_{17} =$	0.0985 mm	z křivek zrnitosti
$d_{20} =$	0.1425 mm	z křivek zrnitosti
$d_{60} =$	1.411 mm	z křivek zrnitosti
$n =$	0.3615	z laboratoře průměrná hodnota
$U =$	24.45	dobře zrněná zemina
$\nu =$	$1.31E-06 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita pro 10°C
$g =$	$9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$C_Z =$	$3.75E-03$	
$\tau =$	0.807	pro 10°C
$C_K =$	$4.35E-05$	
$\phi_1 =$	1	pro štěrkopisčité zeminy
$d_{ef} =$	0.2331 mm	Kruger

Vyhodnocení hydraulické vodivosti

$k =$	$8.81E-06 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Slichter
$k =$	$2.55E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Zauerbrej
$k =$	$1.57E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Kruger
$k =$	$1.66E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Pavčíč



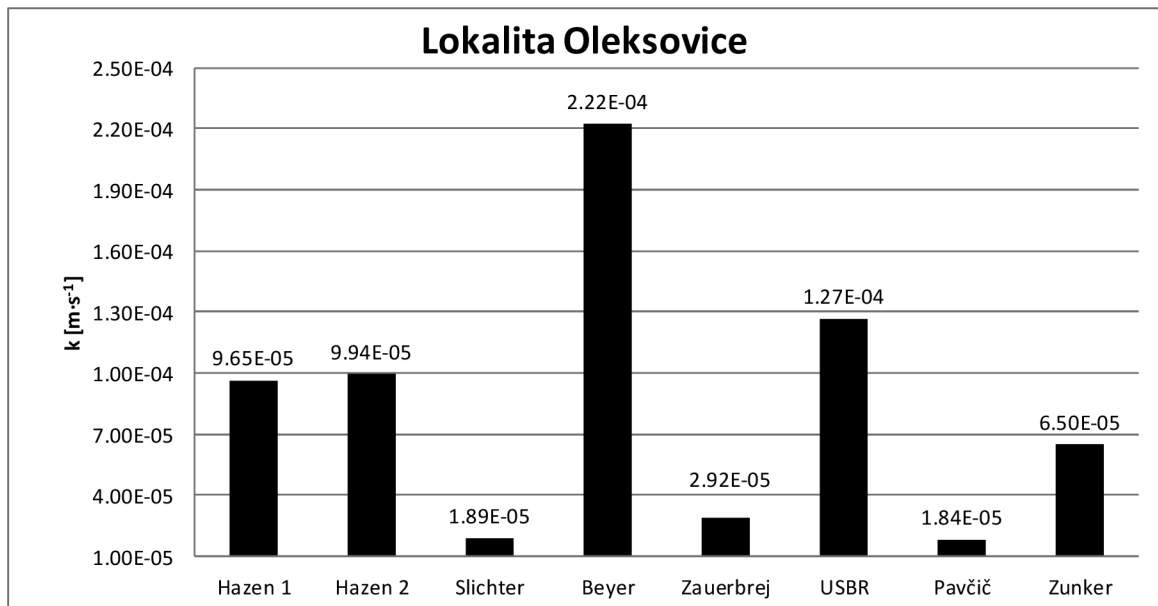
Příloha č. 5: Odvození hydraulické vodivosti z křivek zrnitosti

Lokalita Oleksovice

$d_{10} =$	0.151 mm	z křivek zrnitosti
$d_{17} =$	0.209 mm	z křivek zrnitosti
$d_{20} =$	0.2335 mm	z křivek zrnitosti
$d_{60} =$	0.5155 mm	z křivek zrnitosti
$n =$	0.254	z laboratoře průměrná hodnota
$U =$	3.41	stejná zemina
$\nu =$	$1.31E-06 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita pro 10°C
$g =$	$9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$C_B =$	1.30E-03	
$C_Z =$	3.75E-03	
$\tau =$	0.807	pro 10°C
$C_{ZU} =$	2.40E-03	
$C_U =$	0.00031	USBR
$\phi_1 =$	1	pro šterkopisčité zeminy
$d_{ef} =$	0.1764 mm	Zunker

Vyhodnocení hydraulické vodivosti

$k =$	$9.65E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Hazen 1
$k =$	$9.94E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Hazen 2
$k =$	$1.89E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Slichter
$k =$	$2.22E-04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Beyer
$k =$	$2.92E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Zauerbrej
$k =$	$6.50E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Zunker
$k =$	$1.27E-04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	USBR
$k =$	$1.84E-05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	Pavčič



Příloha č. 6: Grafické srovnání hydraulické vodivosti z jednotlivých metod

