



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**DETEKCE VSAKOVÁNÍ VODY DO ZEMIN
INJEKTOVANÝCH JÍLY METODOU EIS**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Marek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.

BRNO 2019



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
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Ondřej Marek
Název	Detekce vsakování vody do zemin injektovaných jíly metodou EIS
Vedoucí práce	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2019
Datum odevzdání	10. 1. 2020

V Brně dne 31. 3. 2019

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

BARSOUKOV, E., MACDONALD, J. (2005). Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications. 2nd ed. Hoboken, N. J.: Wiley-Interscience, c2005, xvii, 595 p. ISBN 04-716-4749-7.

BEAR, J. (1992). Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier.

BEAR, J., VERRUIJT, A. (1994). Modelling groundwater flow and pollution, Kluwer.

CÍSLEROVÁ, M., VOGEL, T. a kol. (2008). Transportní jevy ve vadózní zóně. Skriptum ČVUT v Praze, Fakulta stavební, KHMKI, KHH. 111s.

DUCHAN, D., ŘÍHA, J., ZACHOVAL, Z. (2014): Hydraulické aspekty infiltrace dešťových vod. Hydraulika vsakování dešťových vod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. ISBN 978-80-214-5017-2.

FEJFAROVÁ, M. (2014). Možnosti detekce obsahu vody v pórovitém prostředí metodou elektrické impedanční spektrometrie. Disertační práce obor Stavební inženýrství (nD) – Vodní hospodářství a vodní stavby. FAST VUT v Brně.

KUTÍLEK, M., KURÁŽ, V., CÍSLEROVÁ, M. (1993). Hydropedologie, ČVUT, Praha.

MIYAZAKI, T. (2006). Water flow in soils. Taylor & Francis group, Boca Raton, U.S.A.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešerše podkladů k problematice monitorování vsakování vody do zemin.

Rešerše podkladů o měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie.

Koncepce laboratorních experimentů a realizace měření.

Zpracování, dokumentace a vyhodnocení měření.

Předpokládaný rozsah práce 50 až 80 stran textu včetně grafů, tabulek a obrázků.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).

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

doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá studiem infiltrace vody do vzorků zeminy variantně injektované různými druhy jílu. Matrici zeminy reprezentoval homogenní písek, vzorky jílu dodala společnost LB Minerals, s.r.o. Analýza zeminy s injektovanými jíly byla zaměřena na těsnicí schopnost zkoumaných jílu pro případné využití ve stavební praxi pro konstrukci těsnících objektů. Ke sledování procesu infiltrace byl využit měřicí systém elektrické impedanční spektrometrie (EIS). Měření bylo provedeno měřicí aparaturou zhotovenou řešením mezinárodního projektu E!7614 aplikovaného výzkumu v programu EUREKA v rámci jeho udržitelnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

infiltrace vody, zemina, injektování jílu, elektrická impedanční spektrometrie

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the study of water infiltration into soil samples with various types of clay. The soil matrix was represented by homogeneous sand; clay samples were supplied by LB Minerals, Ltd. Soil analysis with injected clays was focused on sealing ability of examined clays for possible use in construction practice for the construction of sealing objects. Electric impedance spectrometry (EIS) measuring system was used to monitor the infiltration process. The measurement was carried out by a measuring apparatus made by the solution of the international project E! 7614 of applied research in the EUREKA program within its sustainability.

KEYWORDS

water infiltration, soil, injection of clay, electrical impedance spectrometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Ondřej Marek *Detekce vsakování vody do zemin injektovaných jíly metodou EIS*. Brno, 2019. 148 s., 3 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí své diplomové práce doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc. za konzultaci a rady při zpracování mé diplomové práce; Ing. Zuzaně Múnsterové za konzultaci při využívání přístroje Z-metr IV.

Rovněž děkuji své rodině za poskytnutí možnosti studia na vysoké škole, jejich velkou podporu, rady a zázemí, které mi pomohlo úspěšně zvládnout všechny roky na této škole, a také za pomoc při řešení a zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem přátelům, které jsem za dobu studia mohl potkat, za jejich rady a pomoc při studiu.

OBSAH

1	ÚVOD	1
1.1	Cíl práce.....	4
1.2	Metoda řešení.....	4
2	ÚVOD DO PROBLEMATIKY	5
2.1	Voda v zemině.....	5
2.2	Infiltrace	9
2.2.1	Průběh infiltrace v zemině	11
2.2.2	Hydraulická vodivost nasycená	13
2.3	Jíl – obecný popis a jeho použití.....	18
2.3.1	Injektáž zeminy.....	20
	Jílocementová směs	21
	Jílová suspenze	22
2.3.2	Použití jílu u přehrad a jejich těsnění	22
3	METODY DETEKCE INFILTRACE	25
3.1	Využití stopovačů.....	25
3.1.1	Charakteristika stopovačů	25
3.2	Barevné stopovače	26
3.2.1	Stopovače bez barevné odlišnosti	28
3.3	Geoelektrické metody	28
3.4	Metoda vsakovacích válců	37
3.5	Metody postřikovací	38
3.6	Metoda horizontální infiltrace	39
3.7	Měření kompaktním infiltrometrem	39
3.8	Mini Disk Infiltrometr	40
3.9	Hood infiltrometr	42
3.10	Gravimetrická metoda	44
4	ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE	46

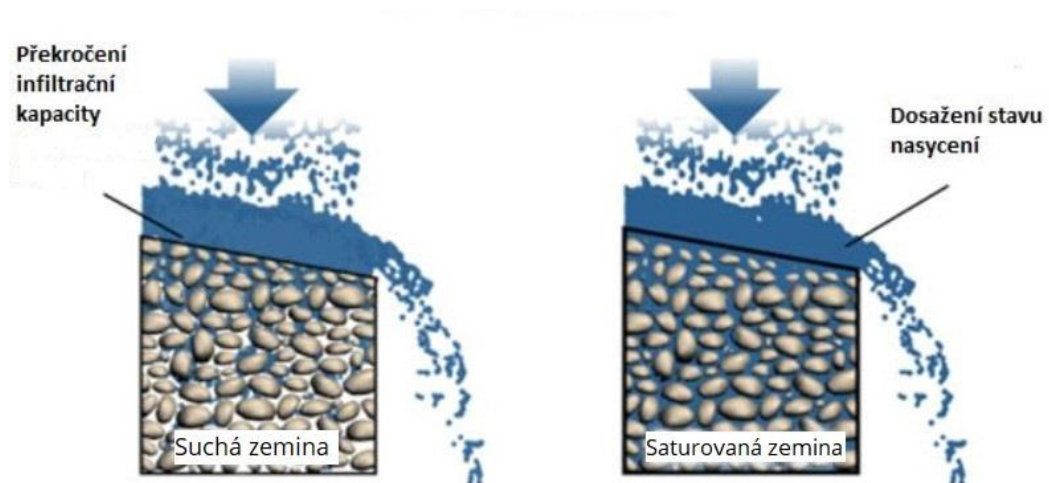
4.1	Princip metody.....	46
4.2	Přístroj Z-metr IV.....	47
5	EXPERIMENTÁLNÍ STANOVIŠTĚ A ZKOUMANÉ MATERIÁLY..	50
5.1	Experimentální stanoviště	50
5.2	Měřicí sondy.....	52
5.3	Přístroje použité při měření.....	54
5.4	Vzorek písku.....	55
5.5	Vzorky jílu	56
5.6	Příprava vzorků.....	57
6	VÝSTUPY Z MĚŘENÍ.....	61
6.1	100% PÍSEK.....	61
6.1.1	Vstupní parametry měření.....	61
6.1.2	Výsledky frekvenční analýzy	62
6.1.3	Výsledky měření	63
6.2	JÍL B01 20% , PÍSEK 80%.....	65
6.2.1	Vstupní parametry měření.....	65
6.2.2	Výsledky frekvenční analýzy	66
6.2.3	Výsledky měření	67
6.3	JÍL B01 40%, PÍSEK 60%.....	69
6.3.1	Vstupní parametry měření.....	69
6.3.2	Výsledky frekvenční analýzy	70
6.3.3	Výsledky měření	71
6.4	JÍL B01 60%, PÍSEK 40%.....	73
6.4.1	Vstupní parametry měření.....	73
6.4.2	Výsledky frekvenční analýzy	74
6.4.3	Výsledky měření	75
6.5	JÍL B01 80%, PÍSEK 20%.....	77
6.5.1	Vstupní parametry měření.....	77
6.5.2	Výsledky frekvenční analýzy	78
6.5.3	Výsledky měření	79
6.6	JÍL B01 100%.....	81
6.6.1	Vstupní parametry měření.....	81

6.6.2	Výsledky frekvenční analýzy	82
6.6.3	Výsledky měření	83
6.7	JÍL GEC 20%, PÍSEK 80%	86
6.7.1	Vstupní parametry měření.....	86
6.7.2	Výsledky frekvenční analýzy	87
6.7.3	Výsledky měření	88
6.8	JÍL GEC 40%, PÍSEK 60%	90
6.8.1	Vstupní parametry měření.....	90
6.8.2	Výsledky frekvenčních analýz	91
6.8.3	Výsledky měření	92
6.9	JÍL GEC 60%, PÍSEK 40%	94
6.9.1	Vstupní parametry měření.....	94
6.9.2	Výsledky frekvenční analýzy	95
6.9.3	Výsledky měření	96
6.10	JÍL GEC 80%, PÍSEK 20%	98
6.10.1	Vstupní parametry měření.....	98
6.10.2	Výsledky frekvenční analýzy	99
6.10.3	Výsledky měření	100
6.11	JÍL GEC 100%	102
6.11.1	Vstupní parametry měření.....	102
6.11.2	Výsledky frekvenční analýzy	103
6.11.3	Výsledky měření	104
6.12	JÍL GEM 20%, PÍSEK 80%	106
6.12.1	Vstupní parametry měření.....	106
6.12.2	Výsledky frekvenční analýzy	107
6.12.3	Výsledky měření	108
6.13	JÍL GEM 40%, PÍSEK 60%	110
6.13.1	Vstupní parametry měření.....	110
6.13.2	Výsledky frekvenční analýzy	111
6.13.3	Výsledky měření	112
6.14	JÍL GEM 60%, PÍSEK 40%	114
6.14.1	Vstupní parametry měření.....	114
6.14.2	Výsledky frekvenční analýzy	115
6.14.3	Výsledky měření	116
6.15	JÍL GEM 80%, PÍSEK 20%	118
6.15.1	Vstupní parametry měření.....	118
6.15.2	Výsledky frekvenční analýzy	119

6.15.3	Výsledky měření	120
6.16	JÍL GEM 100%	122
6.16.1	Vstupní parametry měření.....	122
6.16.2	Výsledky frekvenčních analýz	123
6.16.3	Výsledky měření	124
7	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	126
7.1	Jíl B01	126
7.2	Jíl GEC	128
7.3	Jíl GEM	130
7.4	Porovnání výsledků	132
8	ZÁVĚR	134
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	136
10	SEZNAM OSTATNÍCH ZDROJŮ.....	137
11	SEZNAM SYMBOLŮ A OZNAČENÍ	139
12	SEZNAM OBRÁZKŮ	140
13	SEZNAM GRAFŮ	144
14	SEZNAM TEBULEK	148
15	PŘÍLOHY	149
15.1	Technické listy vzorků jílu	149

1 ÚVOD

Zemina je neobnovitelný přírodní zdroj, otevřený systém, který je základem pro hospodaření a udržení života na Zemi. Význam zeminy a její ochrany je důležité zdůraznit hlavně v dnešní době, kdy působením lidstva dochází k její degradaci a někdy až devastaci. Zemina bez vody nemůže plnit základní funkce pro hospodaření a její užívání, a proto je mimořádně důležité sledovat vedle její kvality i obsah vody v ní. Voda v zemině je přirozenou součástí a její obsah závisí na typu zeminy. Obsah vody v zemině má značný vliv na schopnost zhutnění, což je jedním z rozhodujících parametrů pro využití ve stavebnictví. Vysušování zeminy se začíná stávat celoplanetárním problémem, a proto, že lidská populace neustále roste a její nároky a potřeby se zvyšují, je nevyhnutelné věnovat zvýšenou pozornost šetrnému hospodaření s vodou, a tím i vodnímu režimu zemin. Vodní režim zeminy je prostorové a časové uspořádání vody v zemině. Je to souhrn všech jevů vnikání vody do zeminy, jejího pohybu a zadržování v zemině. Jedním z klíčových dějů je infiltrace vody, tedy vsakování vody do zeminy póry pod vlivem gravitace a kapilárních sil. Právě infiltrace rozhoduje o tom, zda voda z atmosférických srážek bude odtékat zeminou, či při větší intenzitě, než je intenzita vsaku, povrchově (Obr.1.1.1).



Obr. 1.1.1 – Druhy povrchového odtoku [portal.chmi.cz]

Schopnost zemin vsakovat vodu je také odrazem klimatických podmínek, kdy vzhledem ke změnám teplot, a hlavně rozdělení intenzity dešťů, může zemina být neschopná k počáteční infiltraci vody do zemního profilu, případně může docházet k jejímu rychlému nasycení a následnému odtoku, což může způsobit degradaci a poškození zeminy. V dnešní době, kdy jsou deště spíše přívalové, kde za krátkou časovou jednotku je na malém území vysoká hodnota srážkového úhrnu, oproti deštům regionálním, kde se tento úhrn rozloží na větší plochu za delší časovou jednotku a zemina proto není tolik zatížena, je potřeba problém infiltrace zohlednit více než v dřívějších dobách. Jednou z možností, jak tento problém řešit, by bylo upravit zemní profil injektováním vhodných jílu a vytvořit tak jistou překážku rychlému odtoku infiltrované vody, ovšem při současném zabránění následnému vysoušení a popraskání zeminy např. meziřádkovou výsadbou vhodných doplňkových nekonkurenčních plodin.



Obr. 1.1.2 – Zemina s velkým obsahem nevhodného jílu vytvářejícího na jejím povrchu krustu [ceskatelevize.cz]

Jíly mohou zpomalit či úplně zamezit infiltraci vody, což se na druhou stranu v praxi využívá například při řešení těsnicí části přehrad či malých vodních nádrží, případně protipovodňových hrází. Právě tyto vodní stavby využívají zamezující funkce jílových zemin například u stavby středního či návodního těsnění, pro dosažení nepropustnosti vody stavbou a následného ohrožení její stability.

Výhoda jílovitých zemin pro stavbu těsnících částí spočívá v jejich vlastnostech, ale často i v dostupnosti v místě stavby, a tudíž i ekonomické výhodnosti, jelikož se můžou těžit v nedalekém okolí stavby a nemusí se dovážet. Nelze však vždy využít zeminy, které jsou v okolí a následuje pak volba dovozu, či umělého míchání v určitém poměru jílové zeminy s matricí, v mnoha případech tvořenou pískem či štěrkem dané frakce. Moje práce se zabývá otázkou, který druh jílu, z omezeného počtu dostupných vzorků, z časového hlediska nejvíce ovlivňuje proces infiltrace vody do zeminy. Ke sledování jsem použil nepřímou elektrickou metodu měření elektrické impedance zemin a ověřoval jak její možnosti pro uvedenou aplikaci, tak vhodnost konfigurace měřicího systému s přístrojem Z-metr IV.

1.1 CÍL PRÁCE

Předmětem diplomové práce s názvem „Detekce vsakování vody do zemin injektovaných jíly metodou EIS“ je ověřit a vyhodnotit vhodnost použití různých druhů jílu jako příměs, vybraných koncentrací, do zeminy určité frakce za účelem zadržování vody v zemině. Sledováno bylo časové hledisko procesu vsakování vody. Výsledky mohou doplnit současné znalosti aplikace jílu při stavbě těsnicího jádra přehrad, při využití jako obsypového materiálu, ojílování vrtů např. při vrtání studní, případně mohou být vodítkem pro úpravu zeminy k zabránění rychlého vsaku, a především odtoku infiltrované vody.

1.2 METODA ŘEŠENÍ

Určenou metodou detekující průběh vsakování vody do zeminy byla metoda elektrické impedanční spektrometrie (EIS). Pro měření a záznam naměřených hodnot se využíval přístroj Z-metr IV, jež byl vyvinut řešením mezinárodního projektu E!7614 v programu aplikovaného výzkumu EUREKA. Měřicí aparatura sestává z měřicích sond, vodičů a kalibrátoru. Jelikož se jedná o nepřímou elektrickou měřicí metodu, prováděl jsem zatěžování zeminy destilovanou vodou, abych eliminoval případné parazitní vlivy způsobené elektrickou vodivostí uvedeného zatěžovacího média, tj. vody. Dále jsem za matrici zeminy vhodné pro injektování jíly zvolil homogenní písčitého materiálu dostupný v laboratoři, čímž jsem zmírnil i tak vysokou časovou náročnost variantního uspořádání experimentu.

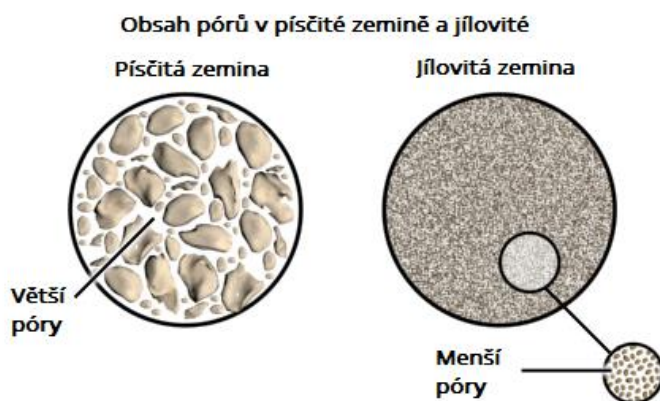
Pro splnění cíle diplomové práce jsem si od společnosti LB Minerals, s.r.o. zajistil dodání 4 druhů vzorků jílu, každý o maximální hmotnosti 5 kg. Dodání vzorků pro uvedený účel bylo bezplatné, za což společnosti děkuji. Hmotnost vzorků však poměrně výrazně limitovala, jak počet experimentů, tak i jejich variabilitu.

Měření probíhalo v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb na speciálním stanovišti vybudovaném k danému účelu, které umožnilo simulovat vertikální srážku např. z atmosférických srážek nebo z umělého zavlažování a následně sledovat vsakování vody do zemin upravených jistou koncentrací jílu.

2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

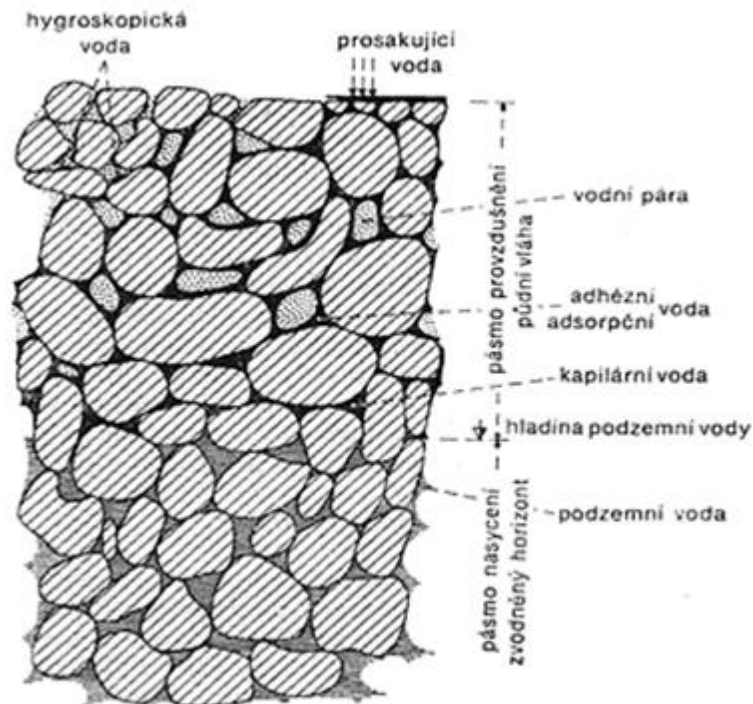
2.1 VODA V ZEMINĚ

Voda v zeminách je součástí přírodního prostředí a může se vyskytovat ve skupenství kapalném, plynném i pevném. Je označována jako podpovrchová voda, jejíž nejvýraznější část se do zemin dostává z oběhu vody v přírodě. Přítomnost podpovrchové vody je vázána na existenci volných prostor v zemině, jako jsou průliny či pukliny. Na základě hloubky následného vsaku vody do zeminy je možno podpovrchovou vodu rozdělit na půdní vodu a podzemní vodu. Jako půdní voda se označuje voda obsažená v půdě, která je důležitá pro růst rostlin. Při vsáknutí vody ze srážek hlouběji, voda prochází puklinami a propustnými částmi zeminy, až narazí na nepropustné zeminy, jako jsou například jíly. Tyto zeminy vodu zastaví a ta vyplní dutiny v nich. Takto uložená voda se nazývá podzemní. Jedním z výrazných mechanismů, jak voda z povrchu zemského proniká do zemin, je infiltrace (vsakování). Z povrchové vrstvy se voda do zeminy dostává účinkem gravitační síly. Z makroskopického hlediska jsou zeminy propustné materiály, kterými voda volně protéká filtračním pohybem vertikálním i horizontálním směrem přes propojené póry mezi pevnými částicemi (Obr.2.1.1). Vlastnosti zeminy jako je zrnitost, zhutnitelnost či mineralogické složení zásadně ovlivňují množství vody v zeminách. V zeminách s malými póry, jako jsou jíly, jílovité hlíny a jílnaté písky, se však nachází jen půdní vláha. Pohyb podzemní vody je vyvolán zejména gravitační silou a přenáší hydrostatický tlak.



Obr. 2.1.1 – Rozdíl velikosti pórů u písku (vlevo) a jílu (vpravo) [portal.chmi.cz]

Pásmo blízké zemskému povrchu, které není zaplněno souvislou hladinou vody, se označuje jako zóna aerace neboli provzdušnění (Obr.2.1.2). V ní přítomná voda se označuje jako půdní vláhá. Hluběji se nachází pásmo nasycení (Obr.2.1.2), v němž jsou póry zcela vyplněny vodou. Voda v tomto pásmu se označuje za vodu podzemní. Hranici mezi oběma zónami tvoří hladina podzemní vody (Ruda).



Obr. 2.1.2 – Rozložení druhů podpovrchové vody v zeminách [Netopil 1972]

Základními typy podpovrchové vody jsou:

- **Gravitační voda** – podléhá síle zemské přitažlivosti. V zemině je obsažena ve formě vody volné a vody kapilární. Voda volná souvisle vyplňuje póry zeminy pod hladinou podzemní vody. Voda kapilární vzlíná v pórech zeminy nad hladinu podzemní vody vlivem povrchového napětí.
- **Vázaná voda** – tvoří velmi tenkou vrstvu na povrchu minerálních částic. Podle vzdálenosti molekul vody od povrchu částice lze vodu vázanou rozdělit do dvou skupin, a to na vodu pevně vázanou a slabě vázanou. Síly ve vodě pevně vázané se odhadují na stovky až tisíce MPa, takže voda je pevná součást minerálních zrn.

Lze ji odstranit ohřevem nad 150 °C – 300 °C. Naopak síly ve vodě slabě vázané jsou výrazně menší a se vzdáleností vody od povrchu částice jejich účinnost klesá. Lze ji odstranit mechanicky například odstředěním či stlačením.

- **Strukturální voda** – je součástí minerálů v krystalické mřížce jako chemicky vázaná nebo krystalická. Chemicky vázaná voda se odstraňuje ohřevem nad 200 °C, kde se mění chemické složení a minerál se následně rozpadá. Krystalická voda si zachovává molekulární formu vody. Při ohřevu nad 60 °C mizí a minerály se mění na formy bezvodné.
- **Vodní pára** – se vyskytuje v pórech nenasycených zemin. V zemině se pohybuje podle jejího aktuálního napětí. Pohybuje se z teplejších míst do míst chladnějších, stejně tak jako z míst s vyšší vlhkostí do míst s nižší vlhkostí. Je významná při promrzání zemin. Vzniká výparem v prostředí o vyšší teplotě a při ochlazení může přejít v jinou formu kondenzací.
- **Led** – vzniká při poklesu teploty půdy pod 0 °C. Nejdříve se tvoří jako jinovatka z vodní páry půdního vzduchu, dále je pak zdrojem vzniku větších krystalů a jejich narůstání kapilární a adsorpční voda. Při zamrzání vody se zvětšuje její objem, vzniká podtlak a sání. Vzniklý tlak v povrchové vrstvě může narušit i velmi pevné povrchy. Led taje od povrchu terénu, přebytečná voda se nemůže přes hlubší zmrzlé vrstvy vsakovat a dochází tak k rozbředání zeminy, která následně ztrácí únosnost.

Půdní led

Zdrojem vody v zemině může být například infiltrace povrchové vody, vzlínání vody od hladiny podzemní vody, srážení vodních par na rozhraní zemina – vzduch, anebo hydroskopické pohlcování vodních par. Obsah vody v zemině ovlivňuje její vlastnosti a chování. Za obsah vody v zemině je považováno dle normy ČSN CEN ISO/TS 17892-1 množství vody, které se může standardně určit vysušováním zeminy v sušárně při teplotě 105 °C ± 5 °C, do doby, kdy je hmotnost vzorku konstantní. Pro většinu zemin je konstantní hmotnosti dosaženo po 24 hodinách. S rostoucí vlhkostí nebo stupněm nasycení dochází k nežádoucím změnám vlastností zeminy.

Vzrůstá-li stupeň nasycení zeminy, vzrůstá taky její plasticita, klesá smyková pevnost a ze stavebního hlediska dochází k celkovému zhoršení fyzikálních vlastností. Voda v zemině má rozhodující vliv nejen při navrhování základových konstrukcí, ale i zemních těles a vodních staveb. Přítomnost vody v zemině při budování konstrukcí může způsobit hned několik problémů jako je smršťování zeminy, bobtnání, nebo úplný rozpad zeminy ve vodě vlivem eliminace kapilárních sil.

V případě jílu a jílovitých zemin se v zemině nachází pouze půdní vláha. Podle prostředí, výskytu a způsobu pohybu vody lze půdní vláhu podle RNDr. Aleše Rudy, kromě již uvedené vodní páry a ledu, dále rozdělit:

Adsorpční voda (též adhezní) - tvoří na povrchu zrn nebo puklin nesouvislé nebo souvislé blanky o tloušťce 5 až 15 molekulárních vrstev, poutané k jejich povrchu fyzikálními silami přitažlivosti (adsorpčními). Tvoří se jak z vodní páry, tak i z infiltrující a filtrující vody. Při teplotě nižší než 0 °C se může v závislosti na tloušťce blanky měnit v led. Směrem do hloubky je její množství stálejší a výrazněji se snižuje jen v obdobích dlouhotrvajícího nedostatku srážek.

Kapilární voda - vyplňuje póry menší než 1 mm a pukliny menší než 0,25 mm, v nichž je k povrchu pevné hmoty poutána kapilární silou. Trvale se vyskytuje v jemnozrnných sypkých zeminách nad hladinou podzemní vody, kde vytváří pásmo kapilárního zdvihu. Pásmo kapilární vody se pohybuje ve vertikálním směru s hladinou podzemní vody. Může se při vsakování srážek vytvořit i ve svrchní vrstvě půdy. Zde není ovšem její množství stálé, protože mizí výparem a transpirací. Z toho důvodu se kapilární voda označuje také jako voda zavěšená.

Vsakující voda - proniká ze zemského povrchu do hlubší vrstvy půdy a dále prasklinami, trhlinami a volnými prostory. Z povrchové vrstvy proniká účinkem gravitace do hloubky, kde se jí část zadržuje na povrchu zemních částic jako voda kapilární a adsorpční. Hloubka jejího pronikání závisí jak na množství vody, které dopadne na zemský povrch, tak na její spotřebě směrem k jiným druhům půdní vody.

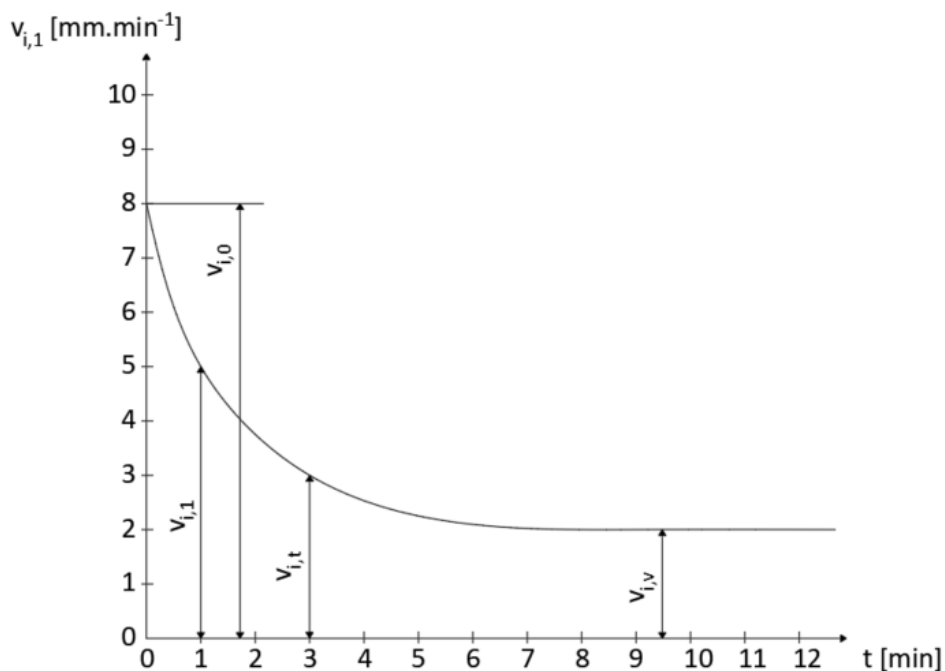
2.2 INFILTRACE

K základním elementárním hydrologickým procesům patří infiltrace (vsak), kdy voda vtéká do půdního, resp. zemního profilu přirozeně nebo uměle. Přirozeným způsobem infiltrace se rozumí vsak z dešťových srážek, tání sněhu či povrchových vod. Za umělou infiltraci se považuje vsakování vyvolané umělým zaplavením povrchu, např. zavlažování. Základními hydrologickými faktory, které proces infiltrace vody do zeminy ovlivňují, jsou intenzita a délka trvání atmosférických srážek. Z faktorů charakterizujících zeminy se jedná především o zrnitost (Obr.2.2.1), obsah organické hmoty, pórovitost, strukturu a vlhkost.



Obr. 2.2.1 - Infiltrace v zemině [portal.chmi.cz]

Infiltraci je možno rozdělit na stacionární a nestacionární. Při stacionární infiltraci je rychlost vsaku vody do zeminy konstantní a na spodním okraji profilu zeminy je hladina podzemní vody udržována na konstantní úrovni. Nestacionární infiltrace nastává, když se v čase $t = 0$ na povrchu zeminy změní okrajová podmínka. Popisuje se jako druh pohybu vody v zemině, kdy intenzita infiltrace závisí na množství povrchově dodané vody. Je-li množství dodané vody dostatečné, intenzita infiltrace se rovná vsakovací schopnosti zeminy, což je množství vody, které je zemina schopna přijmout za jednotku času od počátku vsakování. Změna intenzity infiltrace vody s časem je charakterizována tzv. vsakovací křivkou (Obr.2.2.2), která se s postupujícím časem asymptoticky blíží k horizontále.



Obr. 2.2.2 – Vsakovací křivka zeminy [gisak.vsb.cz]

Na obrázku 2.2.2 je uveden příklad vsakovací křivky, kde:

$V_{i,0}$... intenzita infiltrace na začátku infiltrace,

$V_{i,1}$... intenzita infiltrace v 1. minutě od začátku infiltrace,

$V_{i,v}$... ustálená (minimální) intenzita infiltrace,

$V_{i,t}$... intenzita infiltrace v čase t od začátku infiltrace.

Zvýšení vlhkosti zeminy obecně zmenšuje intenzitu infiltrace. Uzavřený vzduch, který před sebou tlačí vsakující se voda, proudí do hloubky na místa s menším tlakem. Postupně se však tlak vzduchu zvětšuje a nemůže-li vzduch unikat, snižuje se podstatně rychlost vsaku, neboť se snižuje celkový gradient potenciálu zemní vody o složku pneumatického potenciálu. Zvláště se vliv vzduchu uplatňuje při vsakování pod tlakem. Velký obsah pseudoagregátů, které se po zvlhčení rychle rozpadají, způsobuje, že při jejich rozpadu uvolněná vysoce disperzní zemní hmota ucpává hrubé póry, snižuje tím objem nekapilárních pórů a rychlost infiltrace se snižuje. Pokud dojde k probublání stlačeného vzduchu, rychlost infiltrace se na časově omezenou dobu náhle prudce zvýší (Kutílek, 1978).

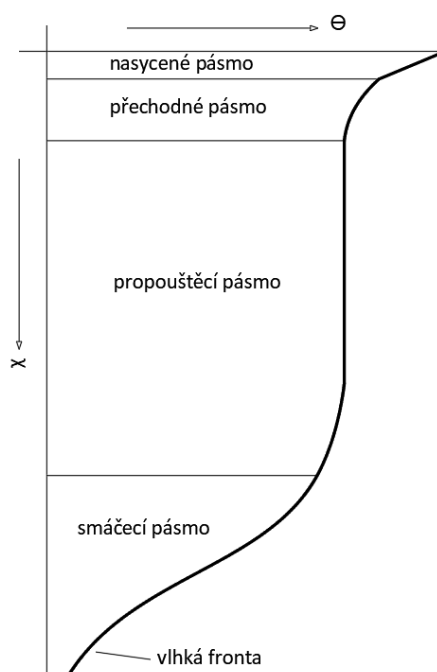
Rychlost vsaku se rovněž snižuje s mocností provlhlé zeminy, neboť se zvětšuje délka dráhy vsaku, a tím se snižuje hodnota gradientu potenciálu. Velikost infiltrace je celkové množství vody, které se vsákne do zeminy od počátku vsaku až do určité doby v čase t (Váša, 1975). Po delším čase dochází k ustálení rychlosti infiltrace. Při konstantní rychlosti infiltrace je vzrůst kumulativní infiltrace s časem lineární.

Za nejvýraznější faktory ovlivňující proces infiltrace vody do zeminy lze považovat klimatické podmínky, zhutnění zeminy, činnost organismů vyskytujících se v zemině a evapotranspiraci.

2.2.1 Průběh infiltrace v zemině

Infiltrace po dodání vody na povrch zeminy probíhá těsně u povrchu a s postupující dobou v její hloubce. V profilu zeminy podle Bodmana in Philip (1944) existují následující pásma (Obr.2.2.3):

- **nasycené pásmo** – vlhkost dosahuje maximální hloubky 1,5 cm
- **přechodné pásmo** – vlhkost do hloubky cca 5 cm
- **propouštěcí pásmo** – vlhkost se v čase a hloubce mění jen málo
- **smáčecí pásmo** – dochází k prudké změně vlhkosti s hloubkou a časem
- **vlhká fronta**



Obr. 2.2.3 – Infiltrační pásma [Bodman, 1944]

Voda při vsakování vniká do zeminy dutinami dvojího druhu. Nejsnadněji a nejrychleji proudí trhlinami vzniklými např. při objemových změnách zeminy vlivem vlhkostních změn a chodbičkami, vytvořenými živočichy např. dešťovkami, krtky apod., nebo po odumřelých kořenech rostlin (Obr.2.2.4).



Obr. 2.2.4 – Chodbičky v zemině tvořené dešťovkami [ekolist.cz]

Při vsaku se voda pohybuje především v nekapilárních pórech. Dochází však také k postupnému pohybu kapilární vody obsažené v zemině před vsakováním. To se týká především vody obsažené v semikapilárních pórech. Mnohem častěji voda vniká do zeminy nekapilárními póry. Určitý význam pro vsakování mohou mít semikapilární a kapilární póry, v nichž je však pohyb vsakující vody vlivem uplatnění kapilárních sil poměrně malý.

Větší zastoupení nekapilárních a volných pórů, které nejsou vyplněny vodou, podmiňuje relativně větší intenzitu infiltrace. Se vzrůstem mocnosti provlhčené vrstvy zeminy se intenzita vsaku snižuje. Fronta vsakující se vody není rovinnou plochou, nýbrž je vlivem dutin a nepravidelností ve stavbě zemního profilu zvlněná až jazykovitá, mnohdy s hlubokými záteky, předstihujícími značně frontu provlhčení. Určitý omezující vliv na rychlost vsakování může mít vzduch uzavřený v pórech zeminy vsakující vodou, což se projevuje dosti nápadně při vsakování po souvislém zatopení povrchu zeminy, např. při dodávkách vody, převyšujících svou intenzitou vsakovací schopnost zeminy (Váša, 1975).

2.2.2 Hydraulická vodivost nasycená

Hydraulická vodivost je fyzikální vlastnost zeminy, která představuje schopnost zeminy vést vodu. Jedná se o rychlost pohybu vody pórovitým prostředím zeminy při jednotkovém gradientu piezometrické výšky. Je závislá na několika faktorech, jako je vodivost zeminy, zrnitost, struktura, obsah a kvalita zemního humusu, objemové hmotnosti a mineralogickém složení jílové frakce, ale i na vlastnostech kapaliny. Proto se konvenčně stanovuje pro vodu o teplotě 15 °C. Roste se zvyšující se zrnitostí a pórovitostí, u písků a pískovců se pohybuje v řádech 10^{-3} m/s až 10^{-7} m/s. V nasycené zemině je označována písmenem k_s [m/s].

Hydraulická vodivost zeminy je základním parametrem transportu vody a látek v ní obsažených. Zjišťuje se pomocí geometrie pórů, jejich hustoty a vzájemného provázání. Právě z tohoto důvodu se hydraulická vodivost mění v závislosti na struktuře zeminy, tedy hloubce či ploše.

Jedná-li se o proudění vody v plně nasyceném prostředí, je hydraulická vodivost konstantou úměrnosti v Darcyho vztahu, který lze zapsat jako

$$q = k_s \cdot J \text{ [m/s]} \quad (2.1)$$

kde q ... specifický průtok [m/s],

J ... sklon čáry piezometrické výšky [%],

k_s ... hydraulická vodivost [m/s]

Pro stanovení hodnoty hydraulické vodivosti jsou využívány různé metody a postupy, které lze dělit na přímé a nepřímé.

Mezi přímé metody patří:

- **polní zkoušky** – realizují se na studnové lokalitě s různými typy čerpacích či vsakovacích pokusů,
- **laboratorní metody** – prováděné v laboratořích na odebraných vzorcích, využívají se propustoměry s konstantní hladinou nebo propustoměry s klesající hladinou.

Mezi metody nepřímé patří:

- využití empirických vztahů, založených na granulometrickém složení dané zeminy,
- analogie či matematické modely.

Za nejpřesnější určení hydraulické vodivosti lze označit provedení polních zkoušek, především proto, že hodnoty jsou získány na reálné zemině, daného složení a uložení. Tyto zkoušky jsou však velmi časově a finančně nákladné, a proto jejich použití v praxi není tak časté.



Obr. 2.2.5 – Ukázka vsakovacího pokusu [hydropedologie.agrobiologie.cz]

V tabulce níže jsou uvedeny orientační hodnoty hydraulické vodivosti.

Tab. 2.2.1 – Orientační hodnoty hydraulické vodivosti [Valentová]

Název typu zeminy	Propustnost k_p	Hydraulická vodivost k
Štěrký a štěrkopísky	propustné	$2 \cdot 10^{-4}$ až 10^{-3}
Hrubozrnný písek	velmi málo propustné	10^{-4} až $5 \cdot 10^{-4}$
Jemný písek, kyprý hlinitý písek		10^{-5} až $5 \cdot 10^{-5}$
Písky s jílovitými částicemi		10^{-6} až $2 \cdot 10^{-6}$
Ulehlý hlinitý písek		10^{-6} až $5 \cdot 10^{-6}$
Písčitá hlína		10^{-6} a méně
Jíly	nepropustné	10^{-8} a méně

2.2.3 Hydraulická vodivost nenasycená

V nenasycené zemině jsou póry mezi zrny zeminy vyplněny tekutinou, tj. nachází se v nich kapalina a plyn. Hydraulická vodivost v nenasycené zemině je funkcí vlhkosti (tlakové výšky) a její hodnota je rovněž závislá na teplotě kapalné (analogicky s nasycenou hydraulickou vodivostí). Retenční křivka vyjadřující závislost vlhkosti na tlakové výšce je základní charakteristikou každé nenasycené zeminy. Závislost vlhkosti na tlakové výšce je nelineární a neexistuje přesný matematický popis, proto jsou při jejím prokládání používány různé empirické vztahy. Z parametrů retenční křivky a nasycené hydraulické vodivosti lze vypočítat nenasycenou hydraulickou vodivost použitím Van Genuchtenova – Mualemova vzorce (1980).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, \quad (2.2)$$

kde θ_r a θ_s jsou reziduální a nasycená vlhkost zeminy, h je tlaková výška (zde je uvažována kladná hodnota) a α , m a n jsou empirické konstanty. S využitím Mualemova modelu (1976) je

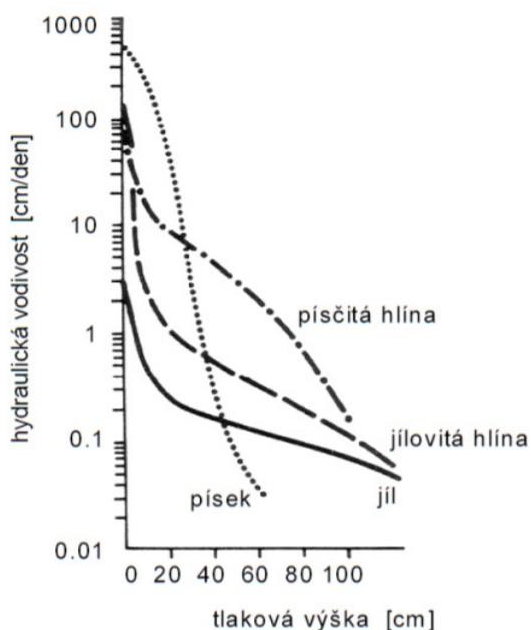
$$m = 1 - \frac{1}{n}. \quad (2.3)$$

U nízkých nebo naopak vysokých vlhkostí i malá změna vlhkosti znamená velkou změnu v tlakové výšce (Schwartz a Zhang, 2002). Reziduální vlhkost θ_r je vlhkost, která značí množství nepohyblivé vody v zemině. K této konstantě se blíží hodnota vlhkosti při zvyšování sacího tlaku. Maximální dosažitelná vlhkost zeminy se nazývá nasycená θ_s vlhkost. Hodnota θ_s závisí na pórovitosti materiálu a obecně bývá o 5 % – 10 % menší než pórovitost (Van Genuchten et al., 1991). Vstupní hodnota h_a je tlaková výška, při níž začíná klesat vlhkost zeminy, tj. do jejích pórů se dostane vzduch.

Retenční křivka má hysterezní charakter. Pro stejnou tlakovou výšku je vlhkost získaná při postupném vysušování vzorku vždy větší než vlhkost získaná postupným smáčením.

Hysterezi křivky způsobují čtyři hlavní příčiny - tzv. ink bottle efekt způsobený nejednotným tvarem pórů - zvláště pokud jsou velké dutiny propojeny malými kanály; efekt kontaktního úhlu, kdy poloměr zakřivení hladiny je při postupujícím menisku větší než při ustupujícím; uzavření vzduchových bublin ve slepých pórech; bobtnání nebo smršťování zeminy, které mění její strukturu (Hillel, 1980).

Nenasycená hydraulická vodivost vychází ze záporné tlakové výšky neboli vlhkostního potenciálu, nebo vlhkosti. Vychází-li se ze záporné tlakové výšky, označuje se nenasycená hydraulická vodivost $k(h)$. Jestliže se vychází z vlhkosti, značí se nenasycená hydraulická vodivost $k(\theta)$.



Obr. 2.2.6 –Funkce nenasycené hydraulické vodivosti pro různé mateirály
[storm.fsv.cvut.cz]

Nenasycená hydraulická vodivost je v podmínkách výrazně záporných tlakových výšek vyšší pro jemnozrnnou zeminu s malými póry než pro hrubozrnnou. Pro určení nenasycené hydraulické vodivosti existuje několik metod přímých a nepřímých.

Nepřímo se nenasycená hydraulická vodivost určí z výpočtu nasycené hydraulické vodivosti a retenční čáry půdní vlhkosti. Mezi přímé metody stanovení hodnoty nenasycené hydraulické vodivosti se řadí laboratorní metody, či terénní metody, které jsou blíže popsány v dalších kapitolách práce. Nasycení zeminy vodou má vliv na hodnotu jejího elektrického odporu. I malé množství kapaliny v pórech zeminy má za následek prudký pokles elektrického odporu (zvláště pokud jsou póry propojené). Závislost odporu na pórovitosti a výplni pórů popisuje **Archieho zákon**:

$$\rho_{horniny} = \rho_{kapaliny} A \Phi^{-m}, \quad (2.4)$$

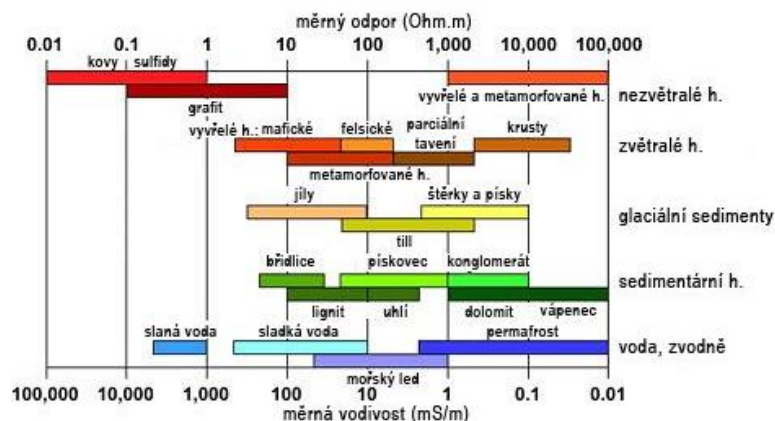
kde se ρ kapaliny rovná elektrickým vlastnostem kapaliny v pórech,

Φ ... je porozita,

A ... je strukturní koeficient,

m ... cementační koeficient.

Uvedené koeficienty popisují mikrogeometrii pórového prostoru, proto Archieho zákon popisuje nejen základní závislost mezi elektrickým odporem a objemem kapaliny v pórech, ale zahrnuje do výpočtu i geometrickou strukturu pórů (Klanica, 2012). Níže na obrázku jsou vyobrazeny hodnoty měrného elektrického odporu a měrné elektrické vodivosti v závislosti na druhu zeminy či minerálu.



Obr. 2.2.7 - Odpory běžných minerálů a zemin [geofyzika.webz.cz]

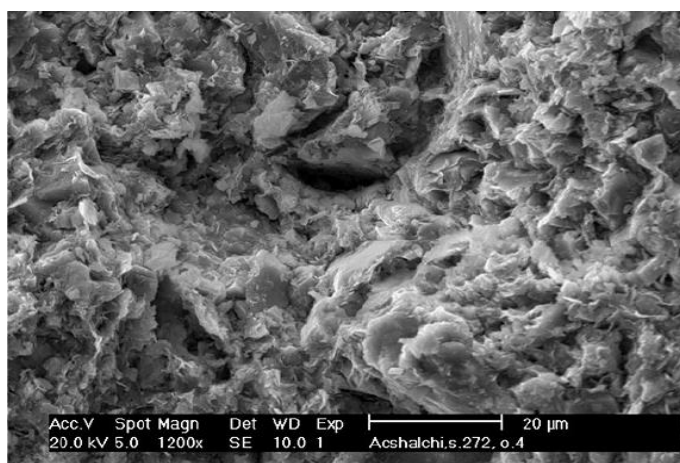
2.3 JÍL – OBECNÝ POPIS A JEHO POUŽITÍ

Jíl je sedimentární hornina, která vzniká rozkladem starších hornin, transportem různě velkých úlomků horninového materiálu, usazením materiálu transportovaného v pevném stavu nebo vyloučením látek v roztoku, k němuž dochází při chemických procesech nebo činností organismů. Vznik sedimentů lze tedy rozdělit na několik etap (Petránek,1993). Skládají se z:

- mechanického rozrušování,
- zvětrávání výchozí horniny,
- transportu produktů mechanického rozrušování či zvětrávání a jejich sedimentací.

Jíl je tedy nezpevněná usazená hornina složená z více než 50 % jílovité složky. Tvoří ji jílové minerály, pelitové frakce s velikostí jednotlivých zrn pod 2 μm . Je tvořen jílovými minerály rozdělenými do různých skupin, kterými jsou například podskupina kaolinitu, skupina smektitu, skupina vermikulitu a dále smíševrstevné jílové minerály a další. Vyjma jílových minerálů obsahuje jíl častokrát i další složky jako jsou slídy, křemenný prach, další skupiny minerálů, organickou hmotu a fluidy. Pokud převažuje v jílovité hornině uhličitán vápenatý, hovoří se o vápnitém jílu, který byl dříve označován jako slín (Melka,2014). Podle původu a složení se jíly dělí na:

- kaolinitické ,
- montmorillonitické ,
- illitové .



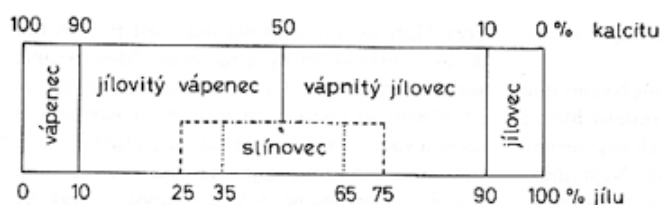
Obr. 2.3.1 – Fotografie jílu z elektronového mikroskopu [researchgate.net]

Jíl zásadně mění své vlastnosti v přítomnosti vody, v suché podobě je jíl sypkou horninou. Nezpevněné jíly jsou plastické, sypké jsou jen v případě, že byly vysušeny. Při styku s vodou mají tendenci nabývat na objemu (bobtnat), naopak při vysoušení se smršťují. Projevem smršťování jsou například bahenní praskliny (Obr.2.3.2). Jíly mají po usazení až 80% pórovitost, při stlačení však zmenšují objem, lupínky jílovitých minerálů se stávají rovnoběžné a vzhledem k vzájemné vazbě na atomární úrovni drží při sobě. Výskyt jílu je vázán na jejich vznik, který je spojen s mořskou sedimentací v rozsáhlých abysálních plošinách, kam se drobné částičky dostávaly pomocí vodních toků. Vzhledem k vázání výskytu jílu na mořské prostředí je jeho hojné zastoupení i na území ČR, kde vznikl převážně v období druhohor až čtvrtohor.



Obr. 2.3.2 – Fotografie jílu plastického (vlevo) a jílu vyschlého (vpravo) [depositphotos]

V mokřém stavu se jíl využívá jako ideální těsnicí vrstva, jelikož při nasycení vodou se stává pro další vodu naprosto nepropustným. Jíl je vhodný jako podklad či těsnicí část pro tělesa zemních hrází přehrad a další typy zemních hrází či podklad pod skládky. Dále se používá v cihlářství, jako pojivo hliněných omítek, na dusané podlahy, k výrobě přírodního linolea, v hrnčířství a pro další keramické výrobky.



Obr. 2.3.3 – Názvosloví hornin řady vápenec – jílovec (geology.cz)

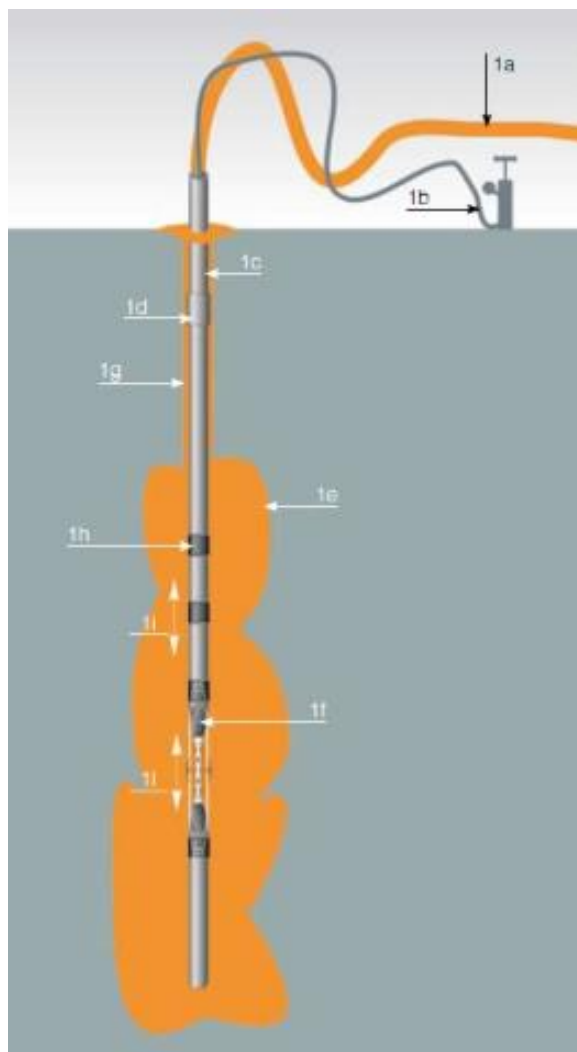
2.3.1 Injektáž zeminy

Z hlediska ekonomického a technického patří využití injektáží k metodám velice rozšířeným, zejména u sanací hrází, ale také při zlepšování vlastností zemin. Používá se například k provádění těsnicích stěn, mikropilot, horninových kotev apod. Při použití jílu se jedná především o snížení průsaku, jelikož jílem prostupuje voda velmi pomalu, a proto se volí jako jeden z hlavních materiálů pro provádění injektáže. Průběh injektáže je takový, že je injekční směs vháněna pod tlakem do zeminy. Tímto provedením vyplní vzniklé poruchy a trhliny, které jsou příčinou tvorby výronových ploch, resp. výronů vody s následným měřením průsaku.

Mezi vzniklé poruchy může patřit například vrstevní spáry, trhliny, pukliny atd. Vyplněním tohoto prostoru se zlepšují fyzikálně-mechanické parametry horniny, jako jsou pevnost v tlaku, modul deformace a hlavně propustnost. Při injektování nesoudržných zemin směs vyplňuje póry mezi zrny, což vede k vytvoření umělého geokompozitu.

Injektáž vždy začíná vyhloubením vrtu (Obr.2.3.4). U nesoudržných hornin se do vrtu vyplněného zálivkou osazuje manžetová trubka opatřená perforací v injektovaném úseku, která je překryta gumovými manžetami. Tím je zajištěna funkce zpětného ventilu.

Použitou injektážní směsí můžou být například jílové zálivky, a to především pro těsnicí účely. Pro snížení propustnosti obecně platí pravidlo, že největší zrno injekční směsi by mělo být alespoň 3× menší, než jsou póry injektovaného prostředí. Je to z důvodu snadného proniknutí zrn do vzniklých nespojitostí, dutin a kaveren. Tlaky, pod kterými je směs do hornin vháněna, závisejí na vlastnostech injektovaného prostředí a vlastnostech směsi. Tento tlak by neměl být větší než 80% smykové pevnosti injektovaného prostředí, aby při injektáži nedošlo k porušení struktury a charakteru horniny.



- 1a ... přívod injekční směsi
- 1b ... ovládání obturátoru
- 1c ... perforovaná injekční trubka
- 1d ... spojník
- 1e ... vytvrzená injekční směs
- 1f ... dvojitý obturátor
- 1g ... zálivka
- 1h ... gumová manžeta
- 1i ... etáž

Obr. 2.3.4 – Klasická injektáž

Jílocementová směs

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších směsí. Její využití je nejčastěji při injektování skalních hornin, nesoudržných zemin a také jako výplň těsnících podzemních stěn. Základní složkou je jí, který bývá především na bázi bentonitu, tzv. bentonitický jí.

Při použití jílocementové směsi je důležitá její funkce. Pokud má sloužit pro zpevnění soudržných zemin, nemusí se klást velký důraz na kvalitu jílu. U zemin nesoudržných je tomu opakem, jelikož jílová směs má minimální pevnost a v případě, že jsou póry větší, je vhodnější volit směs jílocementovou. Voda, která by tlakem na směs působila, by mohla způsobit vytlačení směsi do vzdálenějších pórů, což by vedlo k přerušení funkce těsnicí clony.

Pokud se tedy do směsi přidá cement, nabyde její pevnost, ale ztrácí se její schopnost dobrého průniku zeminou. To je způsobeno hrubější frakcí cementu. Směs by však neměla obsahovat větší množství cementu, než je 15 – 20 % k objemu hmotnosti jílu.

Jílová suspenze

Jílová suspenze je směs vyrobená z jílu a vody, případně vhodných chemikálií, které umožňují koagulování směsi po určité době. Výhodou oproti jílocementové směsi je použití upraveného bentonitu s deflokuačními a zpevňujícími přísadami. Při návrhu se velmi dbá o kvalitu použitého bentonitu, jelikož je požadováno, aby byla zrna menší než 20 µm, aby se zajistilo dobrého proniknutí do zeminy.

Po načerpání směsi do pórů zeminy směs nevykazuje prakticky žádnou pevnost. Je ovšem schopna odolávat velkým tlakům vody. Právě této vlastnosti se využívá tam, kde by se velmi těžko dostávala jílocementová směs, kvůli své větší zrnitosti. Příprava jílové směsi se provádí pomocí ultrazvuku nebo dezintegračního zařízení, aby se dosáhlo vytvoření stabilní suspenze, kde jsou částičky jílu řádně rozptýleny ve vodě.

2.3.2 Použití jílu u přehrad a jejich těsnění

Přehrada je příčná stavba na vodním toku, která jej přehrazuje a tvoří tak umělou vodní nádrž. Funkcí vodních nádrží je hned několik a můžou se navzájem kombinovat.

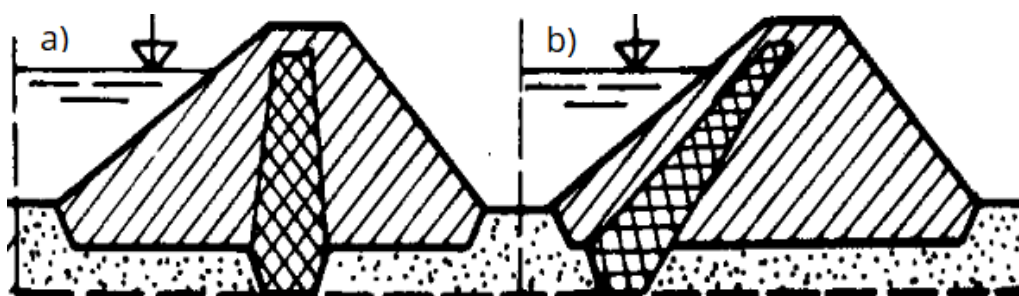
Základním rozdělením přehrad podle účelu je na:

- **ochranné** – chrání území a objekty směrem po toku od vodní nádrže před povodňovými vlnami,
- **zásobní** – zachycují nadbytečné průtoky v zásobním prostoru a akumulují vodu pro dobu nedostatku,
- **smíšené** – spojují funkci ochrannou a zásobní.

Dalších rozdělení přehrad je několik, ať už podle účelu, materiálu, tvaru konstrukce či statického působení. Všechny přehrady ale mají jedno společné, a to těsnicí část, která zabraňuje velkým průsakům skrz přehradní stavbu a následnému kolapsu celého vodního díla.

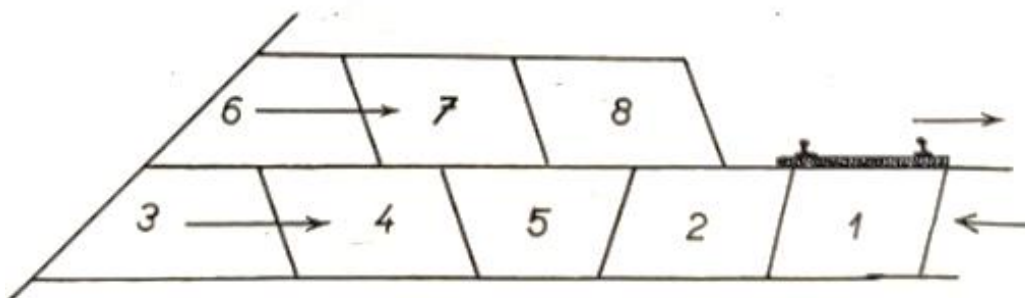
Těsnění může být prováděno z několika materiálů jako beton, železobeton, asfalt, ocel, plastické hmoty a také jíl. Jílové těsnicí jádro se provádí zejména u přehrad z místních materiálů, jako jsou přehrady zemní, kamenité či balvanité. U těchto přehrad se většinou buduje z místní zeminy, pokud to situace dovoluje a zemina je vhodná k těmto účelům. Takto prováděné přehrady jsou finančně méně nákladné, jelikož se nemusí materiál dovážet, ale může se těžit přímo v místě stavby. Právě jíl je velmi vhodným materiálem pro budování těsnicího jádra, jelikož se snadno přizpůsobuje deformacím a neporušuje se sedáním hráze. Navíc má malý koeficient propustnosti, a díky jeho nabývání objemu při styku s vodou může na určitou dobu zcela zabránit průsaku vody přes těsnicí jádro. Uvedená vlastnost je však zároveň jeho slabou stránkou, jelikož při vysychání se jíl výrazně objemově smršťuje a mohlo by tak dojít k jeho popraskání a tvorbě průsakových cest přes těsnicí jádro. Proto se musí jílové těsnicí jádro chránit mocnou vrstvou zemního materiálu, aby nedocházelo k výraznému vysychání, či případně promrznutí této vrstvy. Aby se těsnicí jádro dalo zpracovat a řádně zhutnit, nepoužívá se nikdy čistý jíl, nýbrž jílovité zeminy s příměsí písku a štěrku s největším zrnem 20 mm.

Vždy se přiklání k nalezení takové zeminy v blízkosti budoucího tělesa a snaží se, pokud možno, uměle nemíchat různé druhy zeminy pro dosažení hledaného poměru (Kratochvíl, 1961). V některých případech bylo umělé míchání úspěšně provedeno, je ale zapotřebí provést několik zkoušek, aby bylo předem dáno, jak se bude výsledná směs zemin chovat. Těsnění se umísťuje buď jako návodní, anebo středové. Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody. Výhodou návodního těsnění je, že voda neproniká do tak velké části hráze, jako je tomu u těsnění středového. Naopak může být oproti středovému těsnění snadněji poškozeno povětrnostními vlivy, či působením člověka.



Obr. 2.3.5 - Umístění těsnicího jádra a) vnitřní těsnicí jádro b) návodní těsnicí jádro

Těsnicí jádro se zapouští až do nepropustného podloží hráze, aby nedošlo k průsakům vody pod hrází. Pokud to situace nedovolí, může jílová těsnicí clona navazovat například na betonovou či štetovou stěnu. Tloušťka jádra závisí na součiniteli propustnosti použité zeminy a na výšce hráze. Obecně bývá šířka těsnicího jádra nízkých přehrad v úrovni základové spáry čtvrtina až šestina výšky hráze a směrem ke koruně hráze se zužuje až na minimum 1 m – 2 m. Jílové jádro se dusá nebo válcuje ve vrstvách současně s postupujícím násypem hráze.



Obr. 2.3.6 – Postup sypání zeminy hráze [Kratochvíl, 1961]

3 METODY DETEKCE INFILTRACE

Pro detekci procesu infiltrace vody v zemině se používá několik metod, ke kterým patří využití stopovačů (tracerů), geoelektrické metody, metoda vsakovacích válců, metoda postřikovací, metoda horizontální infiltrace, případně měření kompaktním infiltrometrem (Kutílek, 1966).

3.1 VYUŽITÍ STOPOVAČŮ

Stopovače jsou využívány v podpovrchové hydrologii už více než sto let při řešení výzkumných a praktických úkolů. V minulosti byly stopovače využívány k identifikaci zdrojů znečištění pitné vody. Dnes se využívají zejména tehdy, když není možné získat informaci o proudění vody zemním prostředím přímým měřením, nebo by měření bylo finančně a technicky náročné. Stopovače se využívají především k monitorování účinnosti a dopadů hnojení na zemědělsky využívané zeminy, dále k simulacím nehody při úniku kontaminované látky do zeminy či průsaku skládek (Zumr 2008).

3.1.1 Charakteristika stopovačů

Stopovače jsou speciální látky, či látky, které jsou charakteristické některými svými vlastnostmi, jako je například barva, teplota atd., které je možné během experimentu monitorovat a sledovat tak jejich průběh. Stopovací látka musí být tedy odlišná od ostatních látek, které jsou obsaženy ve sledovaném systému. Výsledkem použití stopovačů v zemině jsou průnikové čáry zachycující změnu koncentrace aplikované látky po průchodu tímto prostředím.

Stopovače lze rozdělit na dvě základní skupiny, a to na tzv. barevné stopovače a stopovače, které nevyužívají barevné odlišnosti. Stopovače pracují na následujících principech (Zumr 2008):

- do vsakovací studně se v nasycené zóně aplikuje puls vody o jiné teplotě, než je pozadí,
- využití stabilních a radioaktivních izotopů, jako jsou deuterium, anionty Cl^- a Br^- , bromid.

Základní požadavky na vlastnosti ideálního stopovače (dle Flury a Wai 2003) jsou:

- během přenosu se stopovač pohybuje konzervativně a jeho charakteristiky jsou silně podobné vodě.
- Při šíření prostředím nedochází k sorpci na půdních zrnech a stěnách puklin a po dobu experimentu nedegraduje.
- Výskyt přirozeného stopovače ve sledovaném prostředí není, nebo jeho koncentrace je velmi nízká.
- Při změně chemismu zemního roztoku zůstávají vlastnosti stopovače stejné.
- Pozorovat stopovač je možno přímo vizuálně nebo pomocí chemické analýzy.
- Stopovač nesmí mít žádný nebo minimální toxický dopad na člověka a studované prostředí.

3.2 BAREVNÉ STOPOVAČE

Využití barevných stopovačů se může hledat zejména při vyznačení cesty proudění. Jejich cílem je detekovat vybrané oblasti proudění rozpuštěných látek a vody v zemině. Pohyb stopovače lze sledovat vizuálně, nebo je možné odebírat vzorky a analyzovat koncentraci stopovače laboratorně. V případě vizuálního pozorování musí být stopovač na půdním pozadí dobře viditelný, a to jak v půdním roztoku, tak sorbovaný na půdních zrnech.



Obr. 3.2.1 – Vertikální řez po aplikaci barevného stopovače [Zumr 2008]

Všechny barevné stopovače sorbují, s cílem obarvovat jiné látky, proto jejich největší výhodou je snadná detekce i při nízkých koncentracích. K dalším výhodám patří jednoduché zjištění koncentrace, jednoduchá vizualizace, nízká toxicita a nízká cena, která umožňuje aplikaci stopovačů na poměrně velkých územích.

Nevýhodou je však velikost organických molekul, kterými jsou stopovače tvořeny, adsorpce na půdních zrnech a degradace. Experimenty s barevnými stopovači jsou ve většině případů destruktivní, tudíž pokusy nemohou být ve stejné lokalitě opakovány pro potvrzení výsledků.

Barevné stopovače lze rozdělit na fluorescenční a nefluorescenční. Fluorescenční stopovače mají výhodu lehké detekce i při velmi nízkých koncentracích, a to i na tmavých půdách, kde je běžné barvivo špatně viditelné. Pro jejich vizualizaci je potřeba zařízení emitující UV záření, tudíž je nelze jednoduše využít pro detekci cest proudění vody při experimentech v terénu.



Obr. 3.2.2 – Experiment s fluorescenčním stopovačem Rhodamine 6G, vizualizace preferenční oblasti proudění [Zumr 2008]

3.2.1 Stopovače bez barevné odlišnosti

Radionuklidové metody

Mezi další stopovací metody lze zařadit například radionuklidové metody, které využívají radioaktivního záření k určení distribuce přirozených a umělých zdrojů radioaktivního záření měřením aktivity radiace na povrchu, ve vrtech a ve vzduchu. V praxi se využívá zavedení slabých radioaktivních stopovačů při určování pohybu podzemních vod, a to hlavně v karotáži (Metodická příručka MŽP 2010).

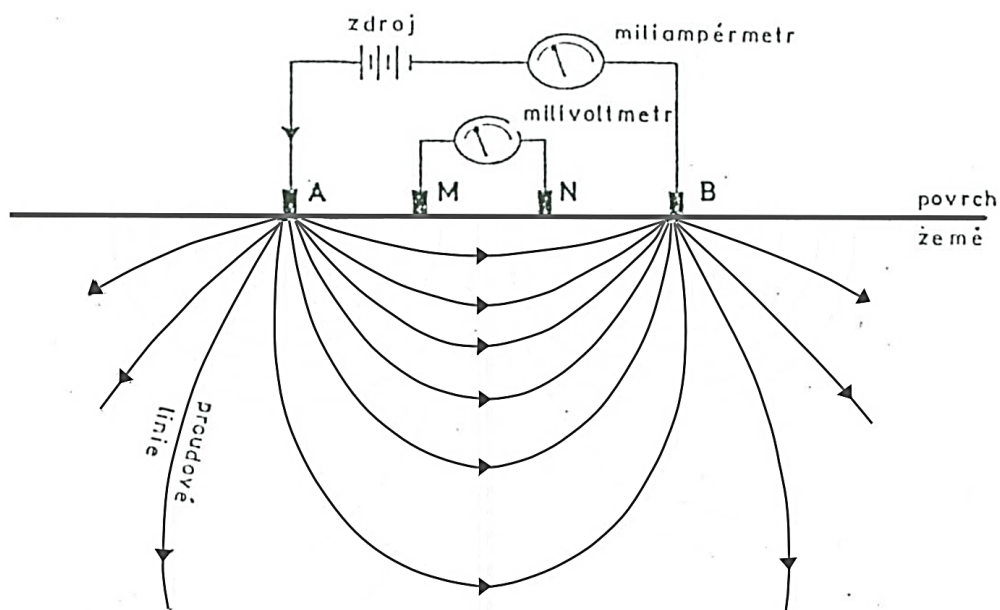
Termometrie

Termometrie využívá jako stopovače teplo. Metoda se využívá v hydrogeologii hlavně pro zjišťování skrytých výronů podzemních vod nejlépe v době vysokého kontrastu jejich teploty vzhledem k povrchovým meteorologickým podmínkám. Nejčastější je využití termometrie v karotážních aplikacích, kde slouží ke zjišťování přítoků vod do vrtů, které se liší teplotně od výplachu (Metodická příručka MŽP 2010).

3.3 GEOELEKTRICKÉ METODY

Geoelektrické metody patří mezi nejpoužívanější a nejrozmanitější geofyzikální metody používané v inženýrském a hydrogeologickém průzkumu. Uplatňuje se v nich zejména měrný elektrický odpor neboli rezistivita prostředí ρ či měrná elektrická vodivost σ , tj. převrácená hodnota měrného elektrického odporu, které jsou úzce závislé na hydrogeologických parametrech horninového prostředí.

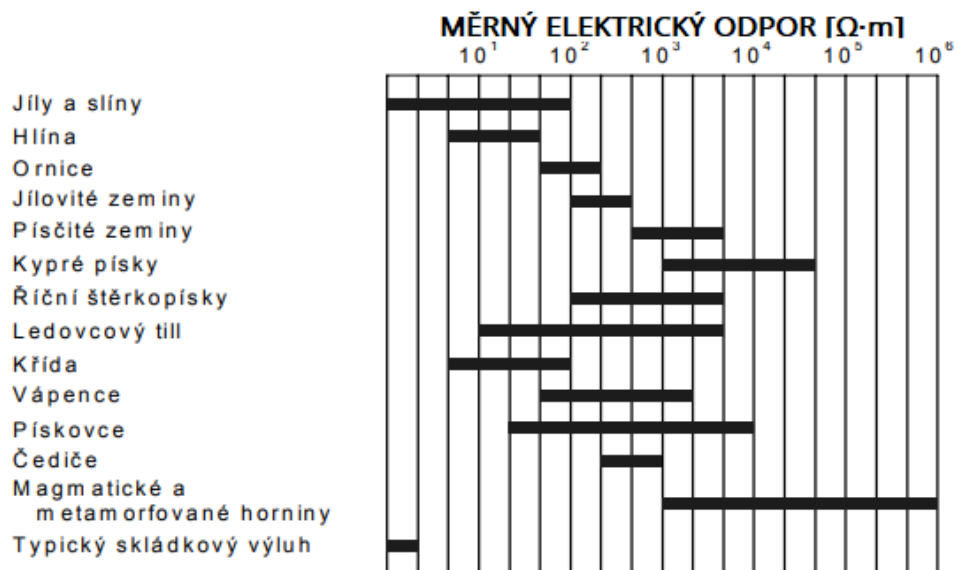
Měrný elektrický odpor zemin se zjišťuje tzv. stejnosměrnými odporovými metodami, jejichž princip je patrný z Obr.3.3.1. Do zeminy se uzemněnými proudovými elektrodami A (+ pól) a B (-pól) zavede elektrický proud I měřený miliampérmetrem a mezi měřicími elektrodami M a N se měří elektrické napětí U milivoltmetrem. Zdrojem proudu jsou baterie nebo generátory. Podle Ohmova vztahu se pak určí měrný elektrický odpor ρ zeminy v okolí měřicího systému ze vztahu $\rho = a \cdot U/I$. Konstanta a je závislá na vzdálenostech jednotlivých elektrod.



Obr. 3.3.1 – Princip odporových metod [Příručka MŽP 2010]

Měrný elektrický odpor zeminy závisí na litologii a obsahu vody v pórech. Jeho hodnota se zvyšuje s obsahem a vodivostí porézní vody, ale také s obsahem vodivých minerálů v zeminách (např. grafit, sulfid, jílovité minerály). Jílové minerály vzhledem k obsahu vázané vody často vytváří mocné vrstvy v sedimentárních souvrstvích, kde působí jako vrstva zabraňující pohybu podzemních vod, tzv. hydrogeologický izolátor. Rozsah hodnot měrných elektrických odporů různých zemin znázorňuje Obr.3.3.2.

Minimálně propustné se jeví kompaktní neporušené krystalinické horniny, které bývají elektricky nevodivé, protože v nich převládající horninotvorné minerály jsou většinou dobrými elektrickými izolátory (křemen, kalcit, živce, slídy). Naopak porézní sedimenty s průlinovou propustností (písky, štěrky) či puklinové krystalinické horniny (vyvřeliny a metamorfity) usnadňují ve svých pórech akumulaci podzemních vod, jejichž obsah snižuje elektrický odpor hornin. Nazývají se hydrogeologické kolektory. Odporové metody mají značný význam při oceňování hydrogeologických podmínek a stupně porušení zemin, se kterým stoupá celkový objem volných pórů v zemině (pórovitost) a možnost jejich zaplnění elektricky vodivou podzemní vodou.



Obr. 3.3.2 - Charakteristický rozsah hodnot měrných odporů různých hornin [Macháček]

Elektrické odporové metody se dělí (dle příručky MŽP, 2010) na:

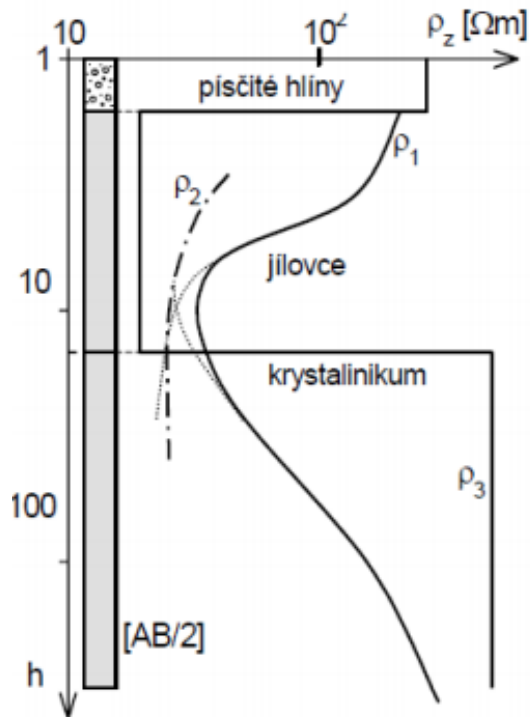
- **profilování** – měření podél profilu o daném hloubkovém dosahu,
- **sondování** – měření na jednom bodě s rostoucím hloubkovým dosahem,
- **multielektrodové uspořádání** – komplexní kombinované simultánní měření sondážně profilové,
- **odporové sondování** – slouží ke zjišťování změn elektrického odporu zemin a hornin s hloubkou průzkumu, která se zvětšuje se zvyšováním rozměrů elektrodového uspořádání.

Elektrická odporová profilování lze podle poměru vzdálenosti napěťových elektrod ke vzdálenosti proudových elektrod (MN/AB) rozdělit na profilování potenciálová ($\sim 0,3$) a gradientová ($\ll 0,2$), přičemž rozlišení nehomogenit v rozsahu jednoho uzemnění je nepřímo úměrné tomuto poměru. U dipólových uspořádání je v tomto smyslu rozhodující poměr vzdáleností napěťových elektrod ke vzdálenosti středů obou dipólů. Také některá tříelektrodová uspořádání (druhá proudová nebo napěťová elektroda v „nekonečnu“) jsou díky vysoké rozlišovací schopnosti zejména při mapování tenkých líniových vodičů (dislokace a poruchové linie) nezastupitelná. Jedná se především o kombinované odporové profilování (KOP) (Kaláb, 2015).

Profilování	Schéma uspořádání
Wennerovo	
Schlumbergerovo	
Středový gradient	
Kombinované	
Dipólové osové	
Leeovo	
Kombinovaný středový gradient	

Obr. 3.3.3 – Nejčastěji užívaná uspořádání při stejnosměrném odporovém profilování [Kaláb, 2015]

Vertikální elektrické sondování (VES) je principiálně stejné jako profilování, od něhož se liší tím, že sleduje odporové změny vertikálním směrem pod studovaným bodem tím způsobem, že se postupně zvětšuje délka uspořádání jednotlivých měřicích elektrod. Sondování slouží k určení subhorizontálních rozhraní odporově kontrastních vrstev a poloh (Kroová a Karous, 1999). Vynesením závislosti naměřených hodnot elektrických odporů na poloviční vzdálenosti AB se dostane tzv. sondážní křivka (Obr.3.3.4), jež je interpretovatelná jako závislost zdánlivého měrného elektrického odporu na hloubce pod středem uspořádání (při horizontálním zvrstvení). Z těchto měření se zpracovávají vertikální izoohmické řezy (kvalitativní interpretace) a hloubkové řezy geoelektrické (kvantitativní interpretace), ve kterých jsou litologické poměry popsány z hlediska jejich odporových vlastností (Kaláb, 2015).



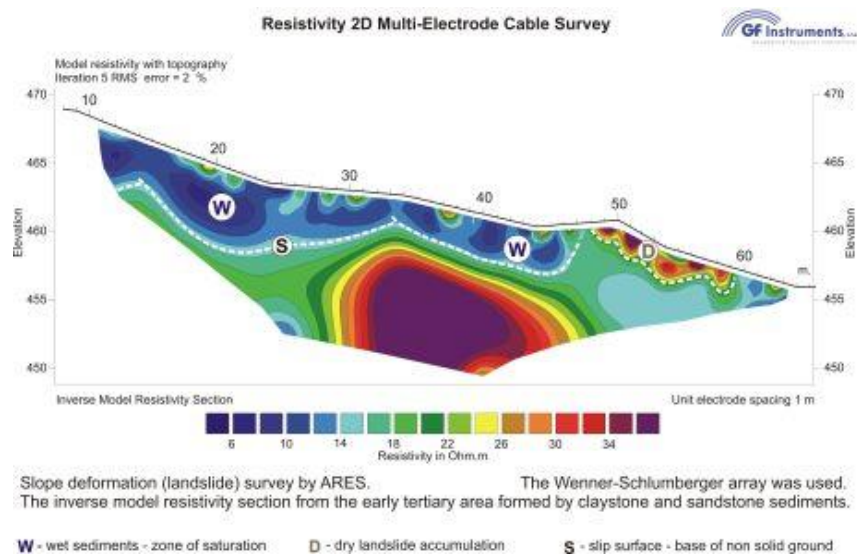
Obr. 3.3.4 – Ukázka sondážní křivky VES ve třívrstevném prostředí [Macháček]



Obr. 3.3.5 – Multielektrodová souprava ARES II (vlevo), měřicí sonda (vpravo) [GF Instruments, s.r.o.]

Spojením sondážních a profilových měření se získá tzv. multielektrodová metoda měření. Jde o rozmístění desítek nebo i stovek elektrod podél měřené linie se vzájemnou konstantní vzdáleností.

System je řízen aparaturou, která podle zadaného schématu postupně spíná jednotlivé elektrody jako proudové a potenciálové. Tím jsou získána data, která představují profilová měření s různým uspořádáním elektrod i různým hloubkovým dosahem, a současně jsou získána data vertikálního elektrického sondování v jednotlivých bodech profilu. Touto metodikou jsou získány izoohmické řezy, které je možno interpretovat na rozložení zdánlivých měrných elektrických odporů.

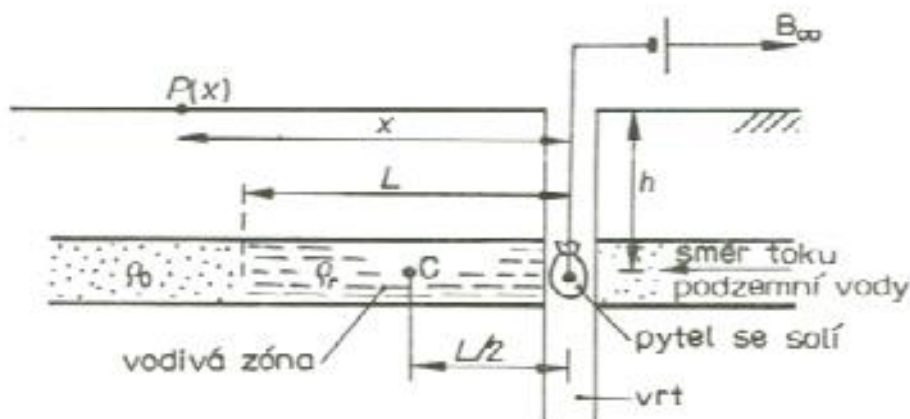


Obr. 3.3.6 – Interpretace naměřených dat [GF Instruments, s.r.o.]

Některé další elektromagnetické parametry hornin se k identifikaci anomálií využívají méně často. Např. elektrická permitivita ϵ se projevuje jen při vysokých frekvencích budicího signálu. Extrémní hodnoty ϵ z běžných přírodnin má jen voda, a proto se používá její měření pro stanovení obsahu porézní vody. Rovněž magnetická susceptibilita κ se uplatňuje jen ve vysokofrekvenčních elektromagnetických polích, ale její měření je pohodlněji prováděno magnetickým průzkumem (Příručka MŽP 2010).

Metoda nabitého tělesa sleduje pohyb (kuchyňská sůl NaCl) uměle mineralizované, a tudíž vodivé zóny o měrném elektrickém odporu ρ_r v podzemní vodě (na Obr.3.3.7 horizontálně čárkovaná šrafa) v propustné vodonosné vrstvě (tečkovaně, odpor ρ_o).

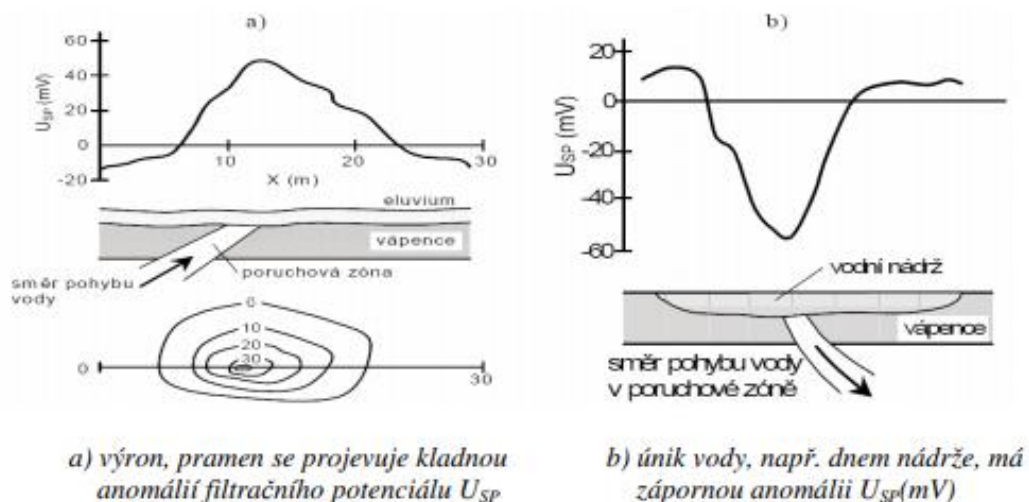
Do vrtu se zapustí do pytle se solí elektroda A, která vodivou zónu elektricky nabije (proto metoda nabitého tělesa). Tato vodivá zóna je unášena podzemní vodou ve směru jejího toku a její sledování měření elektrických veličin na povrchu umožňuje určit směr a rychlost proudění podzemní vody.



Obr. 3.3.7 - Metoda nabitého tělesa slouží pro sledování pohybu podzemní vody [MŽP 2010]

Měření existujících přirozených elektrických stacionárních polí se většinou označuje jako metoda spontánní polarizace nebo spontánních potenciálů (SP). Existence přirozeného stacionárního elektrického pole v zemině má svůj původ v elektrochemických reakcích prostředí, které jsou souborně označovány jako elektrochemická aktivita prostředí.

Z těchto polí jsou pro hydrogeologické aplikace nejdůležitější filtrační spontánní potenciály (FSP), vznikajících filtrací podzemní vody (s nosiči el. náboje - ionty - tvoří slabý elektrolyt) průlinovým prostředím. Směr pohybu kladných iontů je totožný s pohybem podzemní vody. Měření slabých napětí (v milivoltech mV) na povrchu tak zjistí pohyb podzemní vody jako směr kladného napětí. V místě výronu vody z podzemí (Obr.3.3.8 a) se vytváří kladné napětí $+U_{SP}$, v místě vsaku naopak napětí záporné (Obr.3.3.8 b) (MŽP 2010).



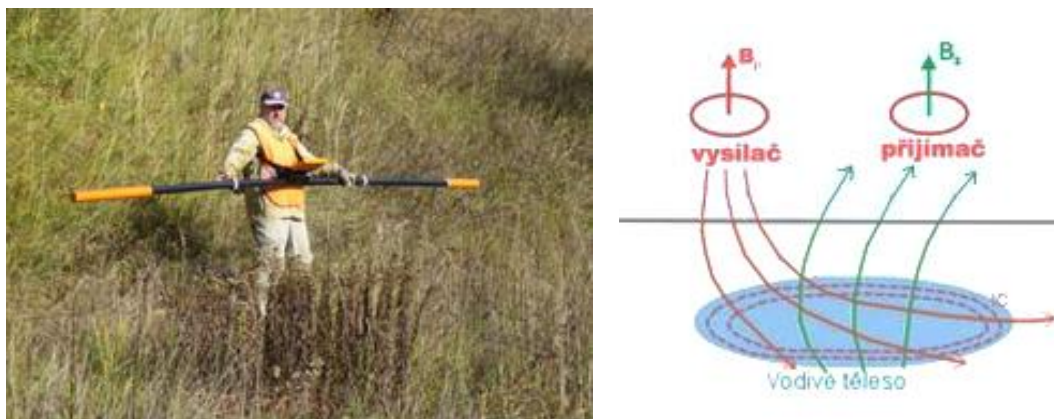
Obr. 3.3.8 – Příklad metody spontánní polarizace FSP pro sledování pohybu podzemních vod [MŽP 2010]

Metoda FSP slouží:

- ke sledování směru a rychlosti proudění podzemní vody,
- vyhledání míst vsaků a skrytých výronů podzemní vody (Obr.3.3.8),
- určení míst porušení těsnících a izolačních hydrologických bariér (podzemních stěn, ochranných fólií, hrází),
- detekci úniků z produktovodů,
- lokalizaci dalších míst, kde vznikají filtrační potenciály prouděním podzemní vody průlinovým prostředím.

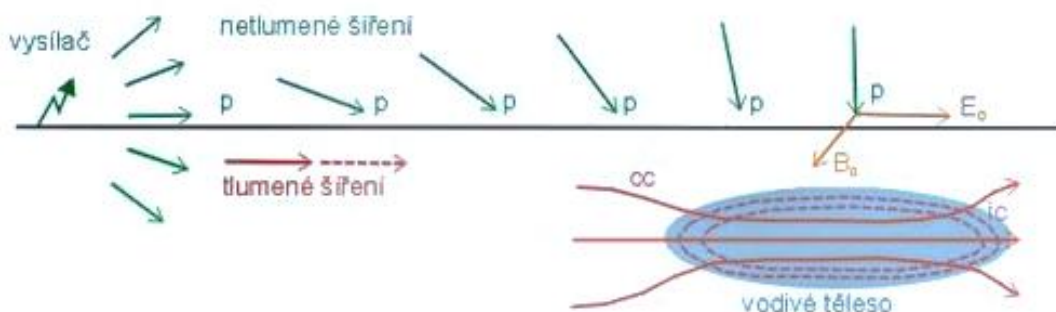
Elektromagnetické metody tvoří velmi rozsáhlou skupinu metod a jsou využívány hlavně v mělkém průzkumu do několika desítek metrů pro sledování měrných odporů prostředí podobně jako metody odporové.

Nejčastěji je využívána tzv. metoda dipólového elektromagnetického profilování (DEMP). Zdrojem signálu jsou antény napájené střídavým proudem různých frekvencí (zdrojový dipól), přijímací anténou se měří (Obr.3.3.9) anomálie indukované ve vodivém zemním prostředí. Změnou frekvence zdrojového pole se mění hloubkový dosah, čehož využívají metody elektromagnetického (frekvenčního nebo přechodového) sondování – čím vyšší frekvence, tím menší hloubkový dosah. Hloubkový dosah se rovněž zvětšuje s rostoucí vzdáleností obou dipólů.



Obr. 3.3.9 – Ukázka terénního měření (vlevo) a principu metody DEMP (vpravo) [kcas.cz]

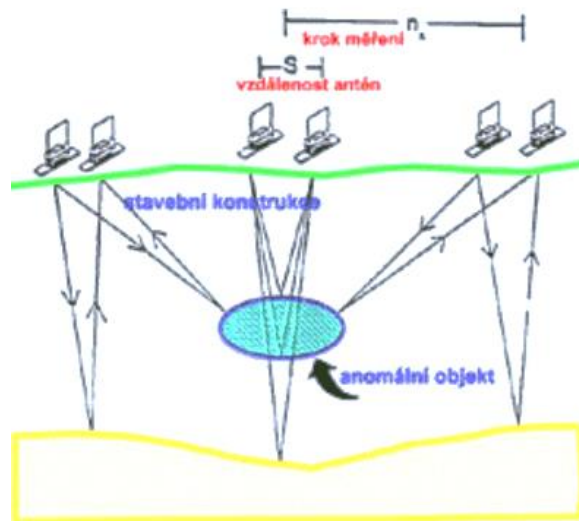
Z dalších elektromagnetických metod se uplatňuje metodicky nenáročná a finančně efektivní metoda velmi dlouhých vln (VDV), která využívá pole navigačních radiostanic pracujících v rozsahu VDV vln – desítky kHz. Generovaný signál se šíří na velké vzdálenosti od vysílačů a proniká do zemního masívu do hloubek až kolem sto metrů (Obr.3.3.10). Při postupu je jeho charakter pozměňován a ovlivňován geologickými nehomogenitami.



Obr. 3.3.10 – Princip metody VDV [kcas.cz]

Moderní georadarová metoda (zkratka GPR z angl. Ground Penetrating Radar) je založena na vyslání elektromagnetických (EM) pulzů/signálů o vysoké vlastní frekvenci (řádově 50 MHz - 1 000 MHz) pod povrch a registraci času příjmu signálu po odrazu od podpovrchových reflexních rozhraní do hloubek mnoha metrů.

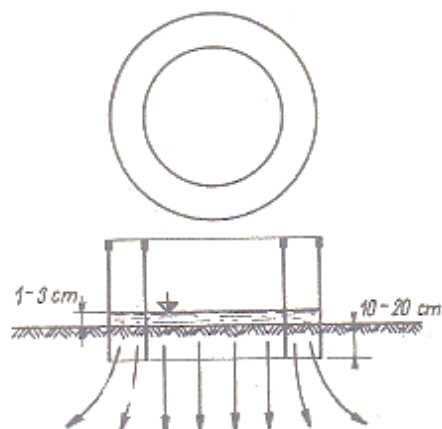
Vzdálenost a krok měření po profilu závisí na povaze řešeného úkolu. Vysílaný signál přijatý po odrazu od těles v zemině je aparaturou dále zpracováván a je možné jej sledovat na obrazovce připojeného počítače, kde se postupně přímo v terénu vykreslí celý geofyzikální řez po profilu. Georadarové řezy dávají detailní obraz mělkého geologického řezu, nemají však dostatečnou možnost klasifikovat prostředí podle fyzikálních či jiných parametrů.



Obr. 3.3.11 – Princip měření GPR [kcas.cz]

3.4 METODA VSAKOVACÍCH VÁLČŮ

Metoda vsakovacích válců je založena na měření objemu vody, která se vsakuje mezi soustřednými válci. Používají se dva soustředné válce, různého průměru, kdy plocha vnějšího válce je 1,73 krát větší než plocha vnitřního válce. Válce se zarážejí do hloubky 10 cm – 20 cm na vybrané ploše, která musí být před pokusem očištěna a porost sestříhán nůžkami. Ve vnitřním válci je umístěn hrot, kontrolující hladinu vody. Na dno válce je umístěna perforovaná deska, která zabraňuje rozplavování povrchu při nalévání vody do válce (Kameníčková 2009). Ve vnitřním válci je sledováno množství zasáknuté vody v závislosti na čase, vnější válec slouží k zachování svislosti proudnic ve vnitřním válci (Obr.3.4.1)



Obr. 3.4.1 – Soustředné válce a směr proudnic [Kutílek 1978]

Měření spočívá v dolévání známého objemu vody nad referenční úroveň stabilizovanou měrným hrotem. Čas a objem vody přilévané do válce se zaznamenává. Minimální výška hladiny je 1 cm – 4 cm. Měření je ukončeno, když dojde k relativnímu ustálení rychlosti infiltrace.



Obr. 3.4.2 – Ukázka praktického použití [hydropedologie.agrobiologie.cz]

3.5 METODY POSTŘIKOVACÍ

Metoda postřikovací se nejvíce využívá na lesních půdách, jelikož použití metody vsakovacích válců kvůli kořenovému systému stromů by bylo obtížné. Při této metodě se půdní infiltrace stanoví jako rozdíl mezi dodaným množstvím vody a povrchovým odtokem ze sledované plochy. Uvedená metoda se nejvíce blíží přirozeným srážkám (Riedl, 1973).

3.6 METODA HORIZONTÁLNÍ INFILTRACE

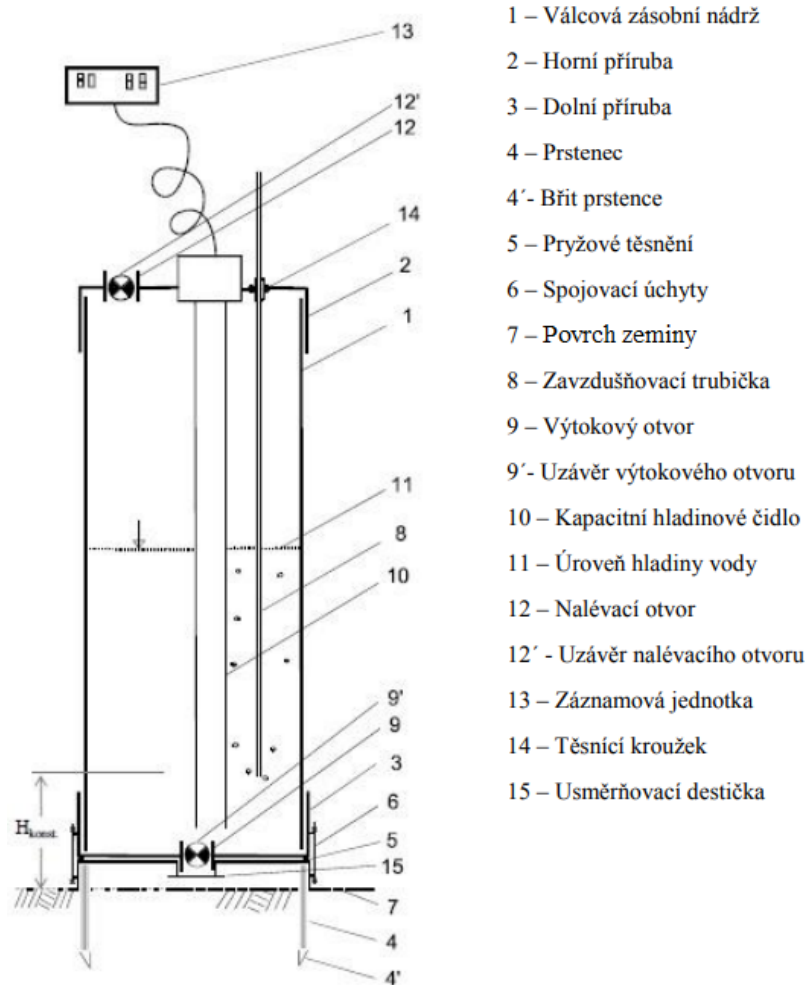
Při metodě horizontální infiltrace se do sešroubované kolony nahutní vyschlá zemina a kolona se upevní do horizontální polohy. Používá se zde Mariottovy láhve (Obr.3.6.1). Vyschlá zemina se postupně zatěžuje vodou a nechá se infiltrovat, dokud čelo zvlhčení nedosáhne přibližně poloviny délky kolony. Poté se uzavře přívod vody a změří se čas od počátku měření. Poté se zemina vyjme a umístí do sušárny. Po vysušení při 105°C se změří vlhkost a hmotnost zeminy (Kutílek, 1966).



Obr. 3.6.1 – Mariottova láhev [helago-cz.cz]

3.7 MĚŘENÍ KOMPAKTNÍM INFILTROMETREM

Přetlakový infiltrometr je sestaven ze čtyř základních dílů (Obr.3.7.1) – zásobní válcové nádrže, která funguje na principu Mariottovy láhve, prstence sloužícího pro zaražení do zeminy, hladinového čidla a záznamové jednotky tzv. dataloggeru. Základní princip zkoušky je takový, že voda je přiváděna do zeminy takovou rychlostí, jakou se vsakuje. Tím se zjišťuje okamžitá intenzita vsaku vody do zeminy na zvoleném rozhraní půdního profilu (Kulhavý a kol., 2007). Měření může vykazovat jistou odlišnost naměřených dat a vyžaduje proto provedení vždy více pokusů v zájmové oblasti.



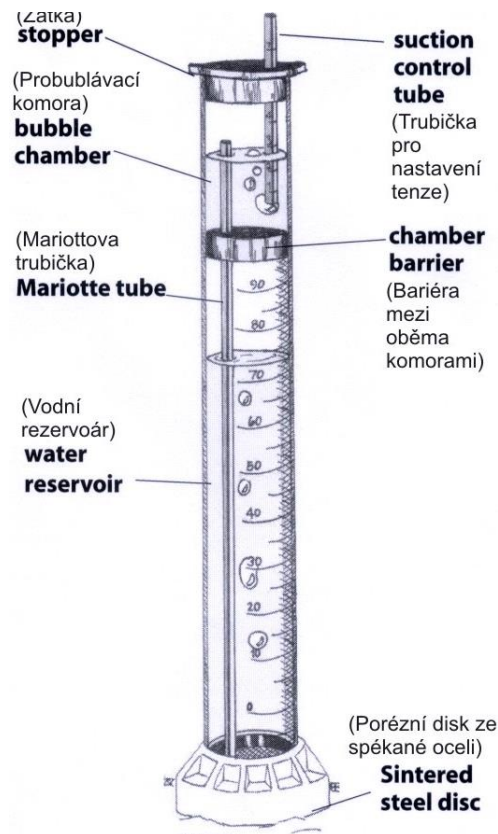
Obr. 3.7.1 – Schéma kompaktního přetlakového infiltrometru [Kulhavý a kol., 2007]

Z důvodu omezeného objemu zásobní válcové nádrže, je limitující kumulativní infiltrace 280 mm až 300 mm v případě, že se počítá i s objemem potřebným k zaplnění prostoru nad povrchem zeminy. Infiltrometr je vhodný zejména pro měření velmi malé rychlosti infiltrace a pro zeminy s vysokou infiltrační schopností.

3.8 MINI DISK INFILTROMETR

Mini disk infiltrometr je malé zařízení s manuální obsluhou, které slouží k měření nenasycené hydraulické vodivosti při tlakových výškách od -0,5 cm do -6,0 cm. Infiltrometr sestává ze dvou komor umístěných nad sebou v jedné trubici (Obr.3.8.1).

Obě komory jsou na začátku měření naplněny vodou. Poloha trubičky v horní komoře reguluje tlakovou výšku, při které bude voda infiltrována. Spodní komora je kalibrována a objem je označen v ml. Spodní část infiltrometru je tvořena porézním diskem ze spékané nerezové oceli. Tento disk má průměr 4,5 cm a tloušťku 0,3 cm (Matula, Mihalíková 2013).



Obr. 3.8.1 – Schéma Mini Diskového infiltrometru [hydropedologie.agrobiologie.cz]

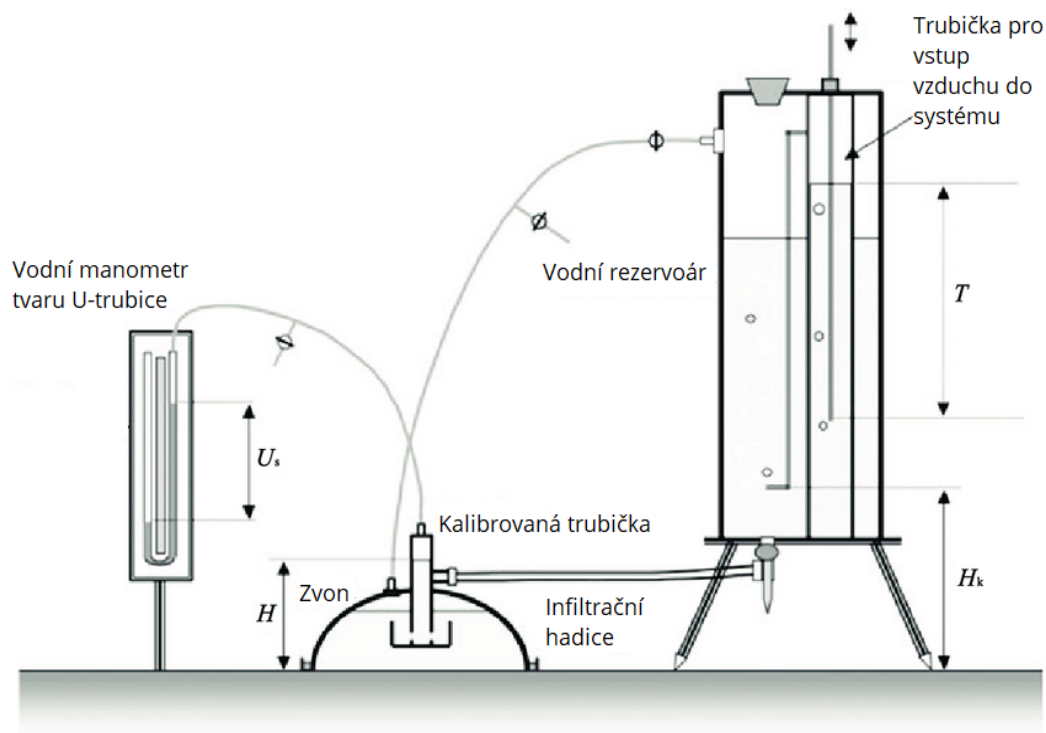
Vzhledem k malému průměru disku, je umístění na povrch snadné. Povrch, na který se disk umísťuje, musí být urovnaný. Jakmile se infiltrometr umístí, začne se voda ze spodní komory infiltrovat do zeminy. Zaznamenávají se hodnoty poklesu hladiny ve spodní komoře v průběhu času, ze kterých se následně vypočítá hodnota nenasycené hydraulické vodivosti. Kvůli malé testované oblasti je doporučeno tento experiment několikrát opakovat v různých místech zájmové oblasti.



Obr. 3.8.2 – Ukázka použití Mini Disk infiltrometru

3.9 HOOD INFILTROMETR

Hood infiltrometr je zařízení sloužící k měření nasycené a nenasycené hydraulické vodivosti zemin. Výhodou oproti jiným typům infiltrometrů jako například výše zmíněný Mini Disk infiltrometr je, že v případě tohoto zařízení je voda v přímém kontaktu se zemínou, do které je infiltrována. Zařízení nevyžaduje žádnou membránu či disk. Pro použití stačí zkrátit rostlinný pokryv pod zvonem („hood“) na výšku cca 5 mm (Matula, Mihalíková, 2013). Při použití jiných infiltrometrů, kde se mezi kontaktní plochou vody a zeminy nachází membrána či disk, která vytváří přídatnou vrstvu a může mít vliv na průběh infiltrace, by měla být zohledněna v rámci analýzy dat. Měřicí aparatura sestává z vodního rezervoáru, infiltračního zvonu a infiltrační hadice (Obr.3.9.1)



Obr. 3.9.1 – Schéma Hood infiltrometru [researchgate.net]

Postup měření spočívá v zatlačení kovového válce do zeminy nejlépe 1,5 cm – 2,0 cm hluboko a umístění zvonu do jeho středu. Mezera mezi zvonem a kovovým válcem se utěsní jemným pískem, který se zvlhčí. Zvon se pomocí hadice připojí k rezervoáru vody a dále k vodnímu manometru. Připojí se datalogger, který zaznamenává výšky hladiny vody v rezervoáru. Vyjme se trubička, kterou se do systému dodává vzduch. Vodou se až po značku naplní probublávací věž a poté se trubička vrátí zpět. Dále se naplní vodou i manometr ve tvaru U-trubice. Zvon se naplní vodou z rezervoáru otevřením ventilu na hadici a po naplnění se ventil znovu uzavře. Následuje nastavení požadované tlakové výšky, při které má infiltrace probíhat a uvedení dataloggeru do provozu. Celý proces se spustí otevřením hlavního ventilu, kdy začne infiltrace vody do zeminy. Datalogger zobrazuje a ukládá hodnoty výšky hladiny vody v rezervoáru spolu s hodnotou aktuálního množství infiltrované vody v mm poklesu hladiny vody za nastavený čas (Matula, Mihalíková 2013).

3.10 GRAVIMETRICKÁ METODA

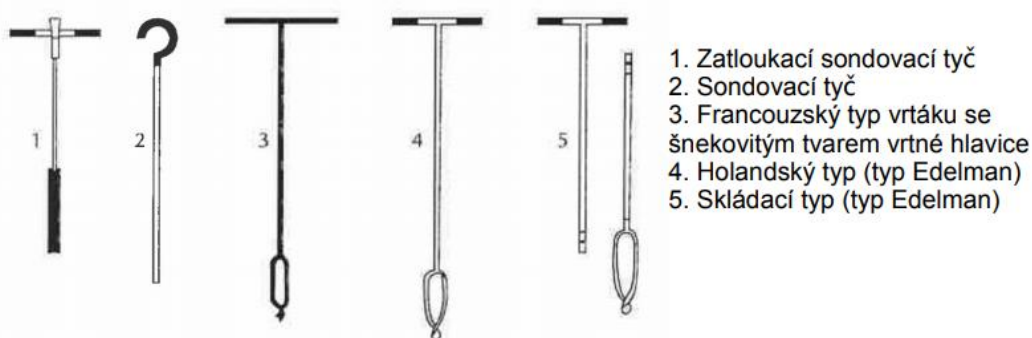
Hlavní náplní gravimetrické metody je zjištění vlhkosti zeminy v odebraném vzorku. Jedná se o velmi přesnou metodu, na druhou stranu velmi časově náročnou a pracnou. Nutno podotknout, že se jedná o metodu destruktivní, jelikož se vzorek zeminy odebírá ze zkoumaného území. Proto gravimetrická metoda není vhodná k dlouhodobému sledování vlhkosti zeminy. Vzorek se při menším množství odebírá sondýrkou, v případě většího množství odebraného vzorku se využívá tzv. Edelmanův vrták. Metoda se může používat v laboratořích, ale i v terénu. Nejdůležitější je okamžité stanovení hmotnosti vlhkého vzorku, aby výpar neovlivnil výsledek. Je důležité použití přesných kalibrovaných vah, aby se co nejvíce zmenšila možná vnesená chyba do výpočtu. Následně se vzorek o hmotnosti 10 g – 20 g suší při teplotě 105°C do konstantní hmotnosti, zpravidla stačí 6 hodin. Po vysušení se vzorek znovu zváží a jeho hmotnost m_z se zapíše. Hmotnost vody m_w potřebná k dosažení do vztahu se vypočte jako rozdíl hmotnosti vlhkého vzorku a hmotnosti vysušeného vzorku. Vztah pro výpočet hmotnostní vlhkosti zeminy w :

$$w = \frac{m_w}{m_z} = \frac{\text{hmotnost vody}}{\text{hmotnost suché půdy}} \quad (3.10.1)$$

w ... je hmotností vlhkost zeminy [g/g] = $w \cdot 100$ [%],

m_w ... je hmotnost vody [g],

m_z ... je hmotnost suché půdy [g]



Obr. 3.10.1 – Ukázka používaných nástrojů na odběr porušeného vzorku [Hammerová]

Terénní gravimetrie je založená na měření tíhového pole přesnými gravimetry a interpretaci rozložení hustot geologického prostředí z tíhových anomálií. Na základě hustotních kontrastů je možné diferencovat různé litologické typy, vyhledávat porušené zóny – tektoniku, detekovat podzemní dutiny (umělé i přírodní, prázdné či zaplněné vodou), sledovat reliéf podloží s vyššími hustotami a mapovat rozložení a mocnosti pokryvu a antropogenních uloženin – např. skládek s menšími hustotami deponovaného materiálu.



Obr. 3.10.2 – Gravimetr CG-5 při terénním měření

Vzhledem k dosahované přesnosti současných přístrojů lze hovořit o gravimetrii (běžné práce pro geologický průzkum a geodézii) a o mikrogravimetrii (sledování drobných objektů či jevů při hustotě měření v síti jednotek metrů).

4 ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

Elektrická impedanční spektrometrie (EIS) je odporová elektromagnetická metoda, která umožňuje studium fyzikálně chemických vlastností anorganických i organických materiálů nedestruktivní cestou. Použitím metody lze analyzovat chemickou čistotu materiálu, obsah vody v pevných nebo sypkých materiálech, zjistit koncentraci nevodivých látek ve vodě nebo elektrolytech, koncentraci iontů v roztocích apod (Sedlák, Štoll, 2002).

4.1 PRINCIP METODY

Princip metody spočívá v měření frekvenční charakteristiky elektrické impedance testovaného materiálu v komplexním tvaru. Sledována je tedy buď závislost elektrického odporu a reaktance materiálů na kmitočtu napájecího signálu, nebo je provedeno měření elektrické impedance na jednom zvoleném kmitočtu. (Patočka, 2006)

Kmitočtovou charakteristiku elektrické impedance Z lze vyjádřit jako

$$Z(j\omega) = R + j\omega X, \quad (4.1)$$

kde

R ... je reálná část elektrické impedance, v ideálním případě představuje kmitočtově nezávislý elektrický odpor [Ω],

X ... je imaginární část elektrické impedance je kmitočtově závislá reaktance [Ω],

j ... je imaginární jednotka,

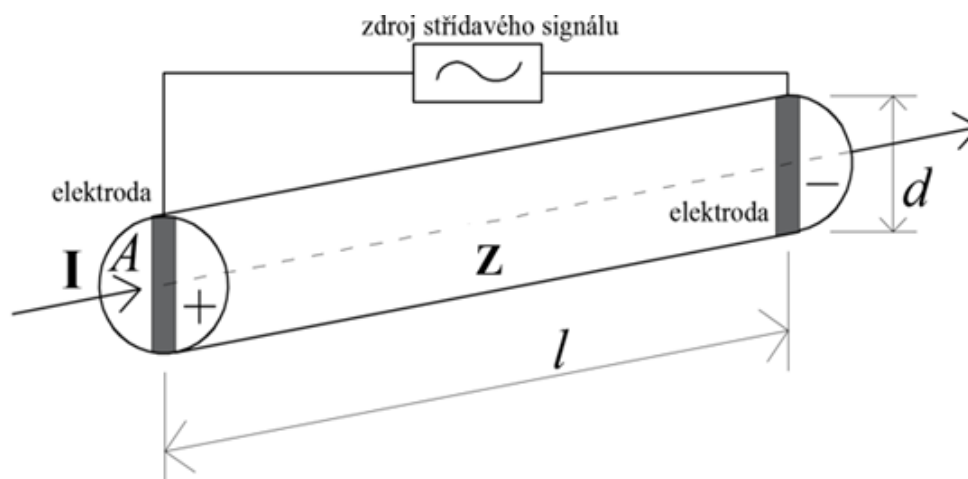
ω ... je úhlový kmitočet [rad/s]

Pro úhlový kmitočet platí

$$\omega = 2\pi f, \quad (4.2)$$

kde f [Hz] je kmitočet budicího střídavého harmonického signálu.

Pro názornější představu (Obr.4.1.1) lze elektrickou impedanci považovat za dvojpól obsahující rezistory a akumulční prvky, které popisují zdánlivý elektrický odpor a fázový posuv napětí proti proudu při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence.



Obr. 4.1.1 – Schéma měření elektrické impedance materiálu

Voda, obsahující určité množství rozpuštěných minerálních solí, se z pohledu elektrotechniky řadí mezi vodiče. Je charakteristická svým elektrickým odporem R [Ω] resp. elektrickou vodivostí G [S] vyjádřenou jeho převrácenou hodnotou

$$G = \frac{1}{R}. \quad (4.3)$$

Obecně lze konstatovat, že čím nižší je hodnota elektrického odporu R , tím vyšší je pravděpodobný obsah vody v měřeném profilu zeminy a opačně, resp. čím vyšší je hodnota elektrické vodivosti G tím vyšší je pravděpodobný obsah vody v měřeném profilu zeminy.

4.2 PŘÍSTROJ Z-METR IV

Přístroj Z-metr IV (Obr.4.2.1) byl navržen a realizován řešením mezinárodního projektu E!7614 v programu aplikovaného výzkumu EUREKA. Jeho aplikace je založena (Pařílková, 2016) na principu měření elektrické impedance materiálů obsahujících elektricky vodivé ionty.

Je součástí měřicí aparatury s kontaktním způsobem měření, kterou lze využívat ve stavebnictví, ale také při práci v laboratoři. Základem přístroje Z-metr IV je 32 bitový výkonný mikroprocesor s jádrem Cortex-M3.

Použitý mikroprocesor pracuje na frekvenci 120 MHz a má kapacitu 1 MB paměti flash a 128 kB paměti RAM. Přístroj je napájen dvěma dobíjecími akumulátory typu Li-Ion. Jejich kapacita je dostatečná pro 16 hodinový kontinuální provoz. Dobíjení přístroje probíhá prostřednictvím 5V/1A napájecího adaptéru nebo prostřednictvím zařízení s rozhraním USB (Universal Serial Bus). Uživatelské prostředí zajišťuje LC displej a klávesnice, z níž je možné provádět nastavení přístroje, a to včetně dlouhodobého automatického autonomního provozu. Naměřená data jsou v textovém formátu ukládána na SD kartu, která není vyměnitelná. K naměřeným datům je přístup umožněn propojením s počítačem, notebookem, tabletem apod. opět pomocí USB kabelu, nebo přes rozhraní Bluetooth. Zpracování dat se zpravidla realizuje v programu MS Excel.



Obr. 4.2.1 – Přístroj Z-metr IV

Na vrchní části těla Z-metru IV se nachází dva 25 pinové konektory typu CANON (Obr.4.2.2), které slouží k připojení měřicích sond.

Součástí měřicí sady je kalibrátor (Obr.4.2.2 a), který umožňuje kalibraci reálné složky (rezistence) elektrické impedance v rozmezí $10 \Omega - 1 \text{ M}\Omega$. Propojení kalibrátoru s přístrojem je rovněž provedeno konektorem typu CANON.



a)

b)

Obr. 4.2.2 – a) konektor CANON, b) krytka konektoru

Tab. 4.2.1 – Specifikace základních parametrů přístroje Z-metr IV [Pařílková, Radkovský – Manuál k přístroji Z-metr IV]

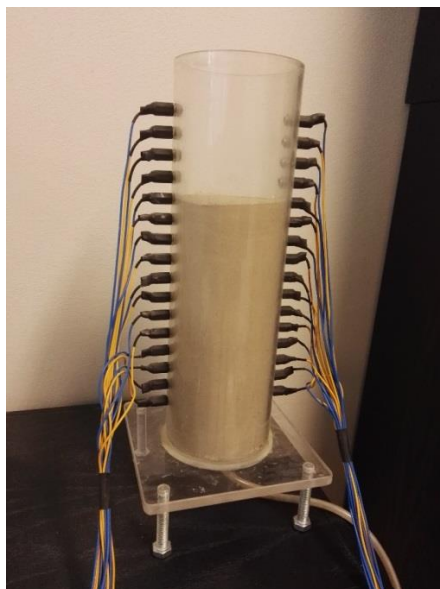
specifikace elektrické měřicí části	
měřicí rozsah impedance	10 Ω – 1 $\text{M}\Omega$
měřicí frekvence	100 Hz – 200 kHz
přesnost modulu Z	$\pm 2\%$ z rozsahu
přesnost fáze	$\pm 2^\circ$
měřicí napětí sinusové s nulovou střední hodnotou	
amplituda měřicího napětí	0,2 V; 1,0 V
interní přepínač	až 16 kanálů
externí přepínač	až 256 kanálů
dlouhodobé měření na jedné lokalitě	maximální vzdálenost mezi sondami a měřicí jednotkou až 60 m (při použití tzv. aktivních sond)
měřicí funkce	bez záznamu dat, manuální ovládání, automatické ovládání
volitelné automatické spouštění – vestavěnou klávesnicí nebo externě z mobilní aplikace	
možnost připojit sadu čidel pro měření teplot	
specifikace komunikace s okolím	
základní komunikační rozhraní	USB 2.0, SD karta, Bluetooth
výstupní formát datového souboru	standardní "*.csv"
možnost připojit GSM modem pro dálkový přenos dat a dálkové ovládání přístroje	
možnost připojit a zpracovávat i další zákaznická čidla (po úpravě HW a SW přístroje) - nutno konzultovat (např. snímač výšky hladiny)	
napájení	
napájení	bateriové s dobíjecími články
doba kontinuálního provozu [h]	16
napájecí napětí [V]	3,7
maximální napájecí napětí [V]	5

5 EXPERIMENTÁLNÍ STANOVIŠTĚ A ZKOUMANÉ MATERIÁLY

Pro realizaci laboratorního experimentu bylo nutno vybudovat experimentální stanoviště a zvolit vhodnou a dostupnou zeminu pro injektování jíly. Matrici zeminy, do níž byly variantně injektovány dostupné vzorky jílu dodané společností LB Minerals, s.r.o. tvořil vzorek 0/2 praného písku společnosti Štěrkopísek Bratčice, s.r.o. z lokality u obce Bratčice.

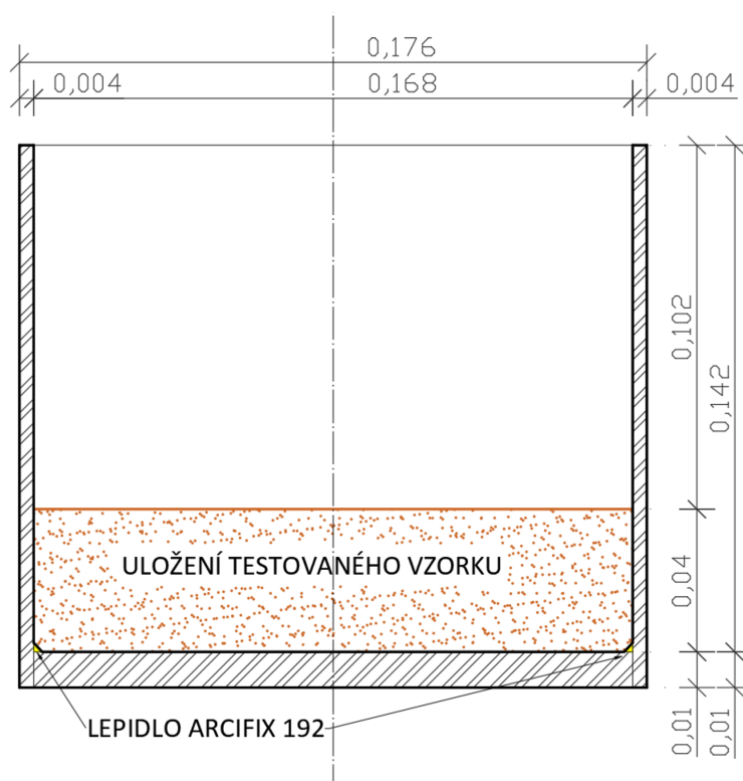
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ STANOVIŠTĚ

Před realizací laboratorního experimentu v jeho variantním řešení bylo nutné vybudovat fyzikální stanoviště, na kterém se měření provádělo. Pro první pokusy byla použita válcová nádoba (Obr.5.1.1) z předchozího experimentu, která byla využívána na měření průsaku vody zeminou. Byla realizována z 0,55 m vysoké trubky Plexiglas GS, která byla po svém obvodu osazena sondami na detekci změny elektrické impedance, což umožňuje změření velikosti průsaku zeminou. Dno válce bylo tvořeno rovněž z plexiskla, které bylo opatřeno čtyřmi šroubovicemi, které sloužily k vyrovnání nádoby. Její výhodou bylo, že elektrody tvořící sondu metody EIS nezasahovaly do měřeného prostředí.



Obr. 5.1.1 – Primární nádoba používaná na experiment

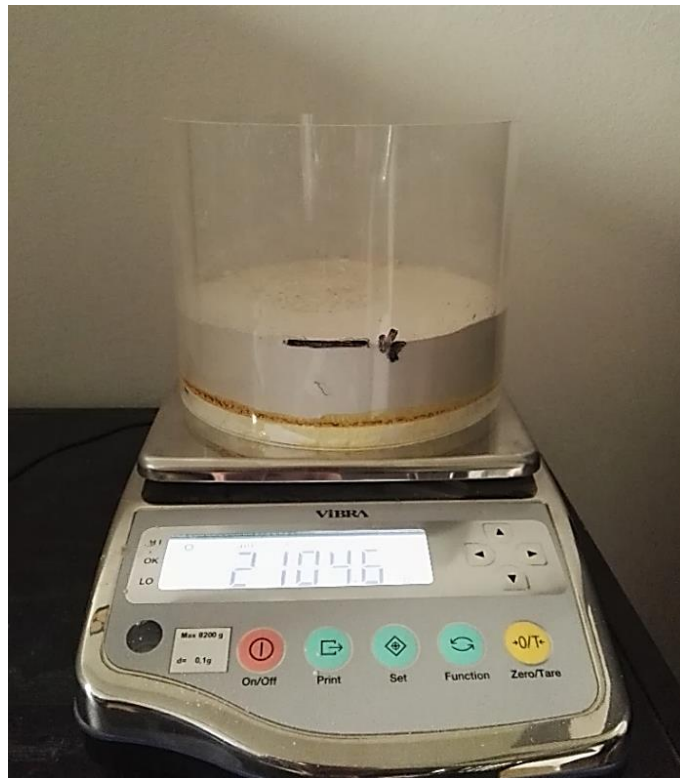
Po několika provedených experimentech bylo zřejmé, že se nádoba musí nahradit. Důvodem byla hmotnost materiálů pro naplnění válce. Vzhledem k omezenému množství, co do hmotnosti i jejich počtu, získaných vzorků jílu a časové náročnosti experimentu bylo nutné měřicí stanoviště modifikovat. Na základě uvedených ukazatelů jsem navrhl novou válcovou nádobu (Obr.5.1.2), která byla realizována ze dvou materiálů, do níž byla zemina ukládána. Plášť válce tvořila opět Plexiglas GS trubka (organické sklo) o výšce 0,142 m, vnitřním průměru 0,168 m a tloušťce stěny 0,004 m. Dno bylo realizováno z bílé PVC desky o tloušťce 0,010 m. Vodotěsné spojení obou materiálů bylo provedeno elektricky nevodivým jednosložkovým polymerizačním lepidlem Acrifix 192 pro plasty.



Obr. 5.1.2 - Řez testovací nádobou s uložením testovaného vzorku

Po primárních zkouškách s použitím nové válcové nádoby se ukázalo, že je pro experiment vhodná, a proto byla používána po celou dobu. Sondy zde již nebyly usazeny po bocích, jelikož nízká vrstva zkoušeného materiálu zajistila, že místo několika sond se využila jediná párová sonda připojená k přístroji Z-Metr IV.

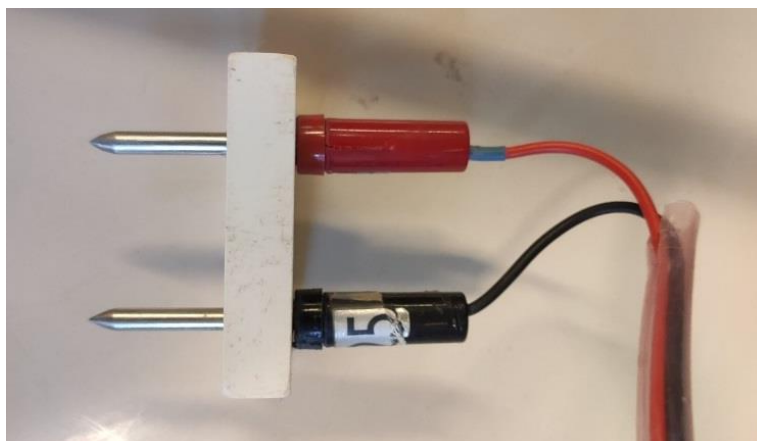
Redukce velikosti válce docílila snížení potřebného času na kompletní průsak vody zkoušeným vzorkem. Také redukce počtu sond způsobila snížení množství zapisovaných dat, což vedlo k možnosti zvětšit četnost a dobu měření, což bylo u některých vzorků potřeba.



Obr. 5.1.3 – Experimentální stanoviště

5.2 MĚŘICÍ SONDY

Pro experiment byla zvolena párová sonda (Obr.5.2.1), která byla osazena na hranolu z PVC materiálu o rozměrech 0,05 m × 0,05 m × 0,01 m. Hranol zajišťoval stabilitu sondy v testovaném vzorku bez, a především při zatížení vodou, paralelní umístění elektrod sondy, jejich konstantní vzájemnou vzdálenost a míru vniknutí do vzorku. Délka elektrod sondy vystupující z hranolku je 0,025 m, vnější průměr je 0,004 m a jsou vyrobeny z tyče 316s31 nerezavějící oceli (Tab.5.2.1).



Obr. 5.2.1 – Měřicí sonda

Tab. 5.2.1 – Specifikace základních parametrů nerezavějící oceli [RS Components Sp.z.o.o.]

Vlastnost	Hodnota
Materiál	316s31 nerezová ocel
Forma	Tyč
Délka	1,5m
Vnější průměr	4mm
Tepelná vodivost	16,3 W/m při 100°C
Pevnost v tahu	515
Vhodnost	Chemické a námořní zařízení, Fotografické, Potraviny
Tvrдость	95 HB
Hustota	8g/cm ³

Podrobnosti o výrobku

316 Tyč a plech z nerezavějící oceli

Vlastnosti C = 0,08 maximální, Ni 12,0, Cr17, Mo 2.25

Související specifikace AS2837-1986-316, AISI TYPE 316, ASTM A276-316

Používá se zejména v chemickém a Allied průmyslu, zejména v podmínkách koroze v důlních podmínkách

Poznámka: Všechny rozměry jsou jmenovité.

Standardy CS10088:Pt 3:2005

Tyč, plech a trubka - jakost 316 (A4)

Austenitické nerezové oceli jsou vzhledem k obsahu molybdenu vysoce odolné proti korozi. Jsou nemagnetické a vhodné pro aplikace, jako jsou fotografická, potravinářská, chemická a námořní zařízení.

5.3 PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI MĚŘENÍ

Vlhkost testovaného vzorku byla měřena vlhkoměrem Voltcraft FM-400 (Obr.5.3.2) připojenou vidlicovou sondou. Před každým měřením byly všechny sondy a části přístrojů omyty destilovanou vodou, aby se zabránilo zkreslení výsledků měření. Každý den byla zaznamenána teplota v místnosti, kde experiment probíhal. Dále byla v daných časových intervalech měřena teplota vzorku pomocí teploměru značky Sunartis (Obr.5.3.1), aby se mohl sledovat i vnitřní stav vzorku a případný vliv teploty na výsledky měření.



Obr. 5.3.1 – Teploměr Sunartis



Obr. 5.3.2 – Vlhkoměr Voltcraft FM-400

5.4 VZOREK PÍSKU

Matrici experimentu v jeho variantním řešení tvořil vzorek písku, který se těží nedaleko obce Bratčice v Jihomoravském kraji. Bratčický písek je vhodný zejména pro realizaci vysokopevnostních betonů, cementových potěrů a mazanin do exteriérů a interiérů.



Obr. 5.4.1 – Bratčický písek (naja.cz)

Velikost efektivního zrna použitého vzorku písku je 1,0 mm. Uvedené velikosti frakce jsem dosáhl třepáním dodaného materiálu vysušeného v laboratorní sušárně ECOCELL při teplotě 105 °C na třepačce Endecotts Octagon 200 přes sadu normových sít. Jednalo se o jednotnou sadu kontrolních sít s předepsanou velikostí čtvercových ok (2,5; 2; 1,6; 1; 0,63; 0,5; 0,25; 0,1; 0,063) mm, kdy nejhustší síto je v sadě umístěno dole a nejřidší síto v sadě je umístěno nahoře (ČSN EN 933-1) Vzorek homogenního písku byl pro experiment využit jako matrice, do níž byly variantně injektovány dostupné vzorky jílu. Homogenita vzorku matrice společně se zatěžováním vzorků destilovanou vodou vyloučila další úkazy a problémy při měření jako jsou parazitní přechodové odpory na elektrodách, ulpívání vodního mikrofilmu na zrnek zeminy apod.



Obr. 5.4.2 – Ilustrační fotografie bratčického písku

5.5 VZORKY JÍLŮ

Pro svůj výzkum jsem kontaktoval několik firem, abych získal co možná nejvíce vzorků na variabilní provedení experimentu. Bohužel se ozvalo jen malé množství z kontaktovaných firem, a vzhledem k jejich omezené nabídce či nevěli dále spolupracovat, mi byla nakonec pouze firma LB Minerals, s.r.o. ochotna bezplatně zaslat celkem 4 vzorky různých jíílů, které mají v nabídce. Tímto bych chtěl ještě jednou poděkovat firmě LB Minerals, s.r.o. za ochotu a profesionální spolupráci. Získal jsem tedy celkem čtyři vzorky jíílů, a to konkrétně:

- jííl žáruvzdorný mletý – označení MJ B01 61 B1
- jííl cyprisový mletý – označení MJ GEC 60 GEC
- jííl plastický mletý – označení MJ GEM 60 GEM
- jííl plastický mletý – označení MJ GEP 61 GEP

Výhodou spolupráce s firmou LB Minerals, s.r.o. bylo, že ke každému vzorku jsem obdržel i technický list, takže jsou vzorky přesně specifikované. Technické listy jednotlivých vzorků jsou uvedeny v části přílohy č. 15.1 - TECHNICKÉ LISTY VZORKŮ JÍLŮ, která se nachází na konci práce. Příklad obsahu technického listu je uveden v následující tabulce:

Tab. 5.5.1 – Chemická analýza vzorku GEC vyjmuta z technického listu

GEC – bentonický jííl – Chemická analýza	
Ztráta žíháním při 1100°C [%]	7,0 – 8,0
SiO ₂ [%]	54,0 – 58,0
Al ₂ O ₃ [%]	18,0 – 20,0
Fe ₂ O ₃ [%]	7,5 – 9,5
TiO ₂ [%]	1,3 – 1,8
CaO [%]	1,2 – 1,5
MgO [%]	2,2 – 3,2
Na ₂ O [%]	0,1 – 0,3
K ₂ O [%]	2,7 – 3,5

Množství každého vzorku bylo 5 kg, což zaručovalo dostatečné množství na vytvoření škály po dvaceti procentech obsahu jílu v matrici. Po prvních testovacích experimentech, kdy se řešila volba modelu, se vzorek plastického jílu s označením GEP spotřeboval v takovém množství, že by již nevystačil na celou škálu plánovaných experimentů, a proto byl z experimentu vyřazen.

5.6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro každé měření bylo potřeba připravit určité množství vzorku, odpovídající požadovanému poměru písku ku jílu. Po prvním pokusném měření byla stanovena přibližná hmotnost vzorku, aby jeho objem byl dostačující na úplné vyplnění válcové nádoby do požadované výšky. Výška vzorku byla vždy totožná při každém měření a na nádobě byla zaznamenána ryskou ve výšce 0,04 m ode dna. Správného poměru písku a jílu bylo dosaženo přesným odvážením pomocí laboratorní váhy od výrobce Vibra s označením CJ-3200CE (Obr.5.6.1), která byla před každým měřením ustavena pomocí libely umístěné na váze.



Obr. 5.6.1 – Laboratorní váha Vibra CJ-3200CE

Po odvážení potřebného množství jílu a písku byly vzorky smíchány do vědra (Obr.5.6.2), které bylo upraveno na jejich potřebné a dostačující promíchání, aby se zaručilo co možná nejlepšího a konzistentního rozložení vzorku v nádobě. Osazeno je plastovým PVC víkem, které je opatřeno gumovým těsněním zajišťujícím těsnost spojení víka s vědrem. Ta byla ještě zvýšena několika šrouby, které víko pevně přidržovaly a vzorek se tak mohl dostatečně promíchat. Uvedený postup byl zvolen z důvodu absence míchacího zařízení zemin v laboratoři. Lze však konstatovat, že pro uvedený experiment byl postačující.



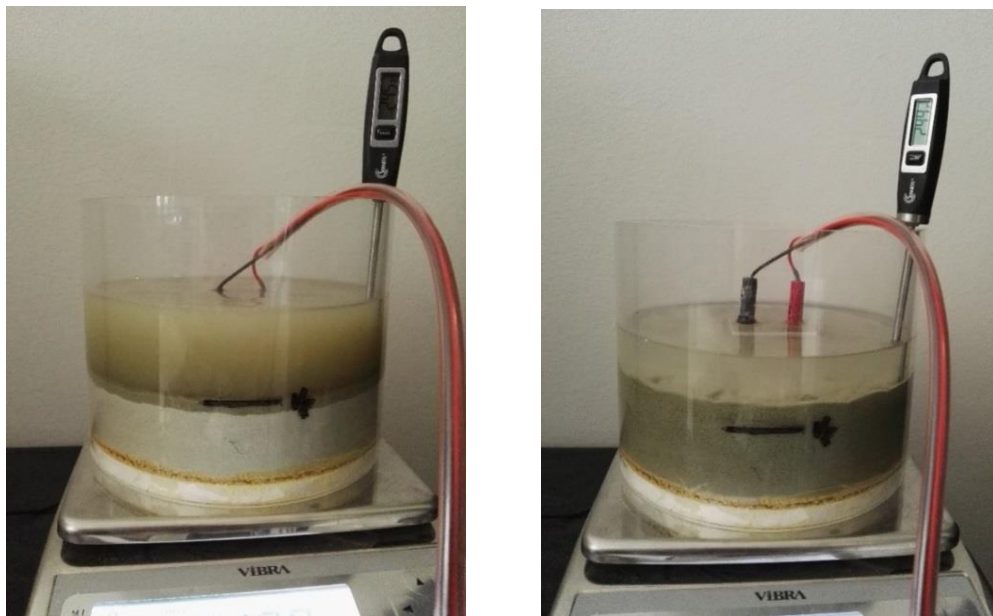
Obr. 5.6.2 - Vědro na promíchání vzorku

Po dostatečném promíchání jílu s pískem se výsledný vzorek po malých vrstvách vsypával do měřicí válcové nádoby. Každá vrstva byla zhutněna plastovým dusadlem a propíchnutím, aby se dosáhlo co možná nejlepšího zhutnění celého vzorku v nádobě, a hlavně se vyhnulo nedostatečnému zhutnění u stěn nádoby a následnému tvoření privilegované cesty, což by výrazným způsobem ovlivnilo výsledky měření.

U každého zkoušeného vzorku byly před zatížením destilovanou vodou zapsány hodnoty hmotnosti samostatného vzorku, dále hmotnost vzorku při osazení sondy a teploměru. Následně byla spuštěna frekvenční analýza suchého vzorku za pomoci přístroje Z-metr IV. Poté byl vzorek zatížen 1 litrem destilované vody a byly zapsány hodnoty hmotnosti, teploty a počáteční vlhkosti vzorku.

Dále byla zaznamenána výška hladiny vody, která vznikla ihned po zatížení vzorku vodou, aby se zjistilo, jak velké bylo počáteční zatížení vzorku. Při všech těchto úkonech již běželo samostatné měření průběhu syčení vzorku, které trvalo někdy až desítky hodin, aby se dosáhlo vizuálního kvazi nasycení vzorku. V průběhu měření byla po určitém časovém kroku zapisována teplota a vlhkost vzorku, aby bylo možné stanovit a vykreslit průběh změny jejich hodnot, a případně tak zjistit či vyloučit vliv těchto hodnot na průběh syčení vzorku.

Po dosažení vizuálního kvazi nasycení vzorku vodou a ustálení vlhkosti se měření zastavilo a znovu se takto nasycený vzorek zvážil včetně veškeré osazené měřicí techniky, tj. měřicích sond a teploměru. Dále se změřila výška hladiny, která ve většině případů zůstala nad vrchní vrstvou vzorku, aby se i takto zjistilo množství vsáklé vody do vzorku a v případě vyššího procentuálního zastoupení jílu ve vzorku se měřením přírůstkem materiálu vzorku nad kontrolní rysku sledovala i jeho bobtnavost. Poté se spustila druhá frekvenční analýza, aby se zjistil stav vzorku po ukončení měření a plném nasycení. Následně byla zapsána hmotnost vzorku bez veškerého měřicího zařízení.



Obr. 5.6.3 – Porovnání hladiny vody při začátku pokusu a na konci pokusu

Poté se z povrchu vzorku voda opatrně odsála a znovu se celý vzorek zvážil, aby se zjistilo, jakou hmotnost má kvazi nasycený vzorek zeminy. Po zjištění všech potřebných hodnot byl vzorek z válcové nádoby vyjmut do plechové nádoby a vložen do sušárny.

Jelikož množství používaného písku nebylo dostatek, musel se každý vzorek po ukončení měření a vyjmutí z měřicí válcové nádoby vysušit, vyjmout či případně rozdrtit vzniklé hroudy, vyprat pod tekoucí vodou, znovu vysušit a následně na třepačce Endecotts Octagon 200 (Obr.5.6.4) přesít přes skupinu normových sít o velikosti oka (2,5; 2; 1,6; 1; 0,63; 0,5; 0,25; 0,1; 0,063) mm. Uvedeným postupem získaný homogenní vzorek matrice o velikosti oka 1 mm byl po případném doplnění požadované hmotnosti používán cyklicky.



Obr. 5.6.4 - Třepačka Endecotts Octahon 200

6 VÝSTUPY Z MĚŘENÍ

6.1 100% PÍSEK

Jako první měření byl zvolen vzorek písku, abych zjistil, jak rychlý bude průběh vsakování vody do vzorku a zjistil, jak vypadá průběh frekvenční analýzy na vzorku bez přidaného jílu. Hmotnosti jsou uvedené včetně hmotnosti nádoby, ve které byl vzorek uložen. V závorkách jsou uvedeny hmotnosti bez nádoby.

6.1.1 Vstupní parametry měření

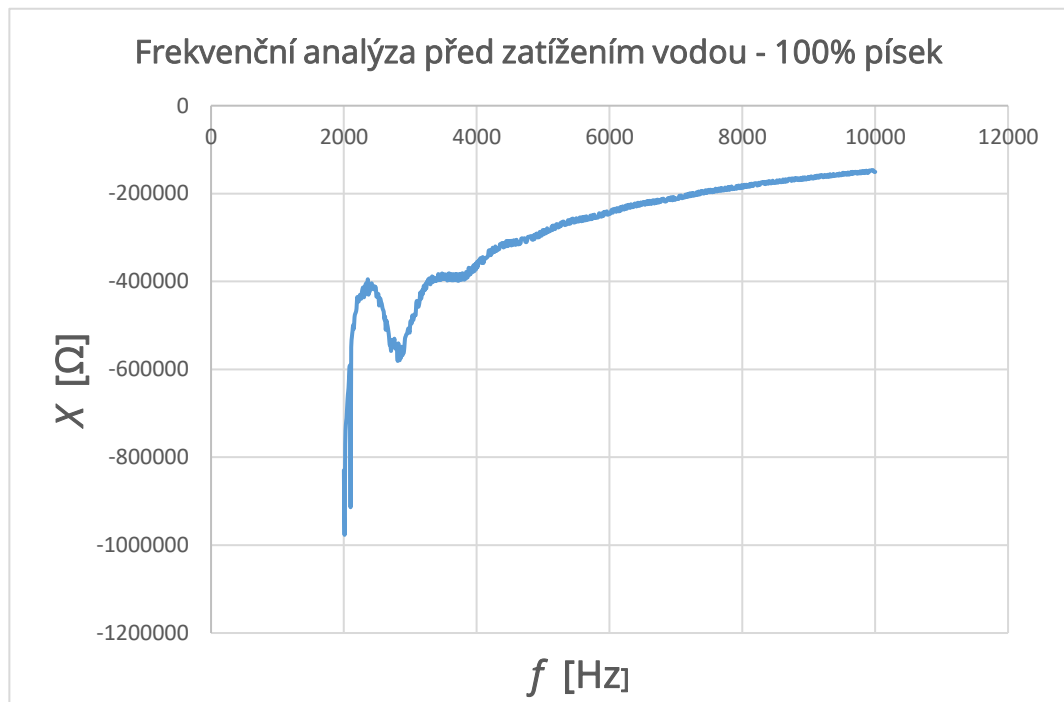
Teplota v místnosti:	24 °C	
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m	
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,221 kg	(1,524 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,317 kg	(1,620 kg)



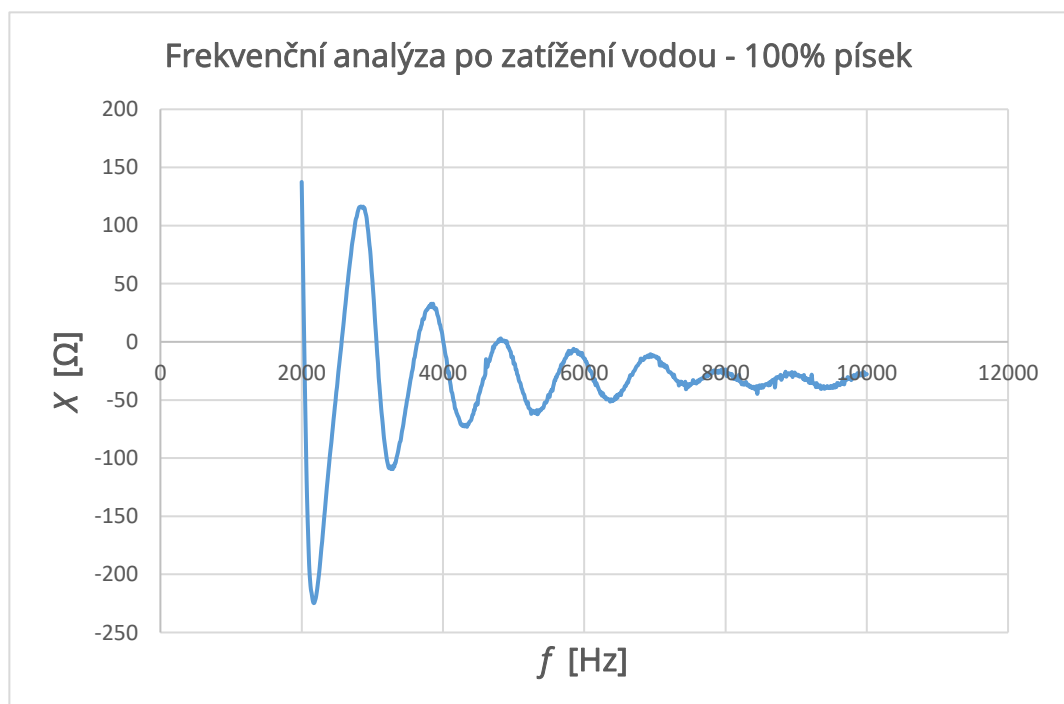
Obr. 6.1.1 - Vzorek 100% písek před zatížením vodou

6.1.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.1.1 – Frekvenční analýza před zatížením vodou - 100% písek

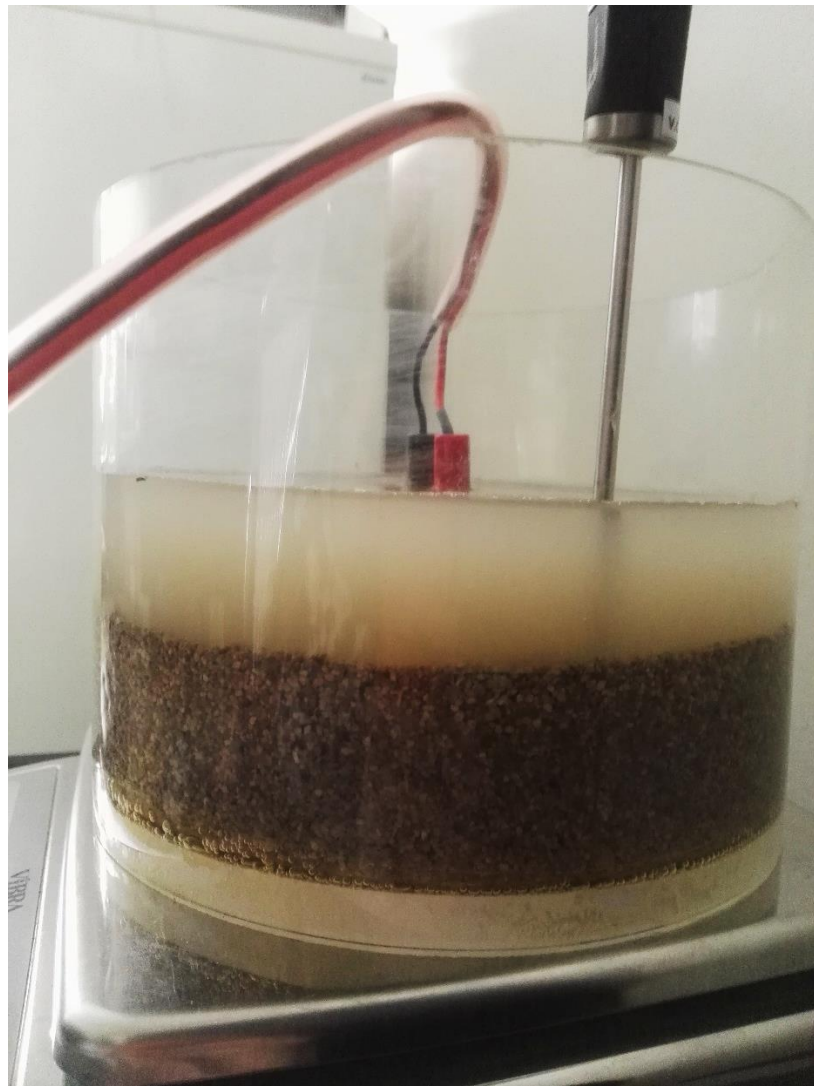


Graf. 6.1.2 – Frekvenční analýza po zatížení vodou - 100% písek



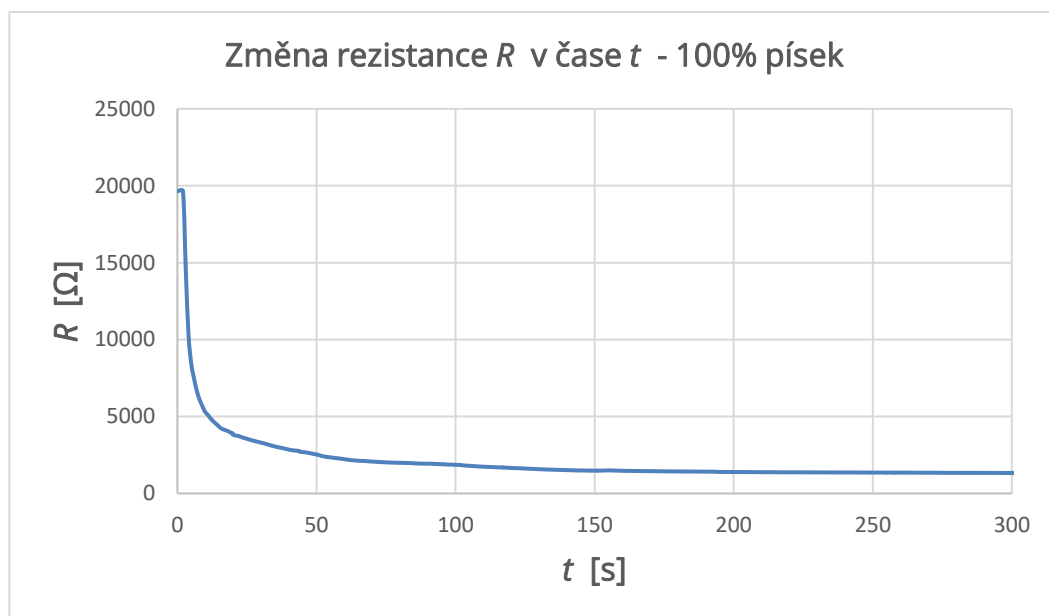
6.1.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,075 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,055 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,293 kg (2,596 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	3,196 kg (2,498 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,532 kg (1,835 kg)



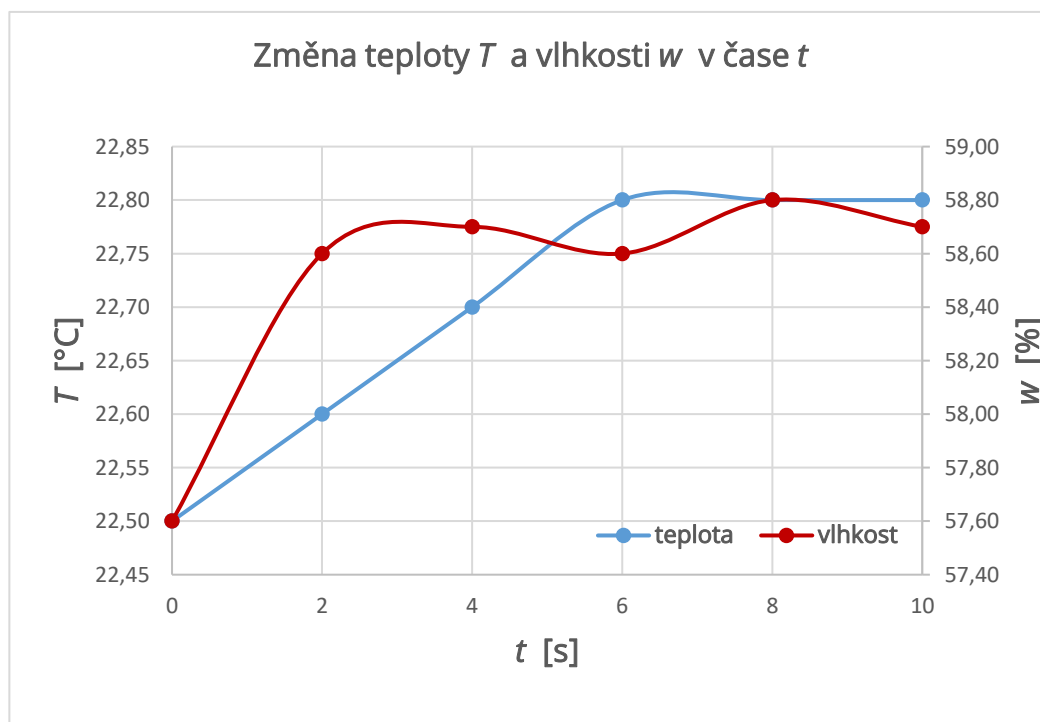
Obr. 6.1.2 – Zatížený vzorek 100% písek vodou

Graf. 6.1.3 – Změna rezistance R v čase t – 100% písek



Jak je z grafu patrné, doba průsaku vody vzorkem písku je v řádu několika desítek sekund. Přibližně za 200 s dojde ke kvazi-nasycení vzorku v nádobě.

Graf. 6.1.4 – Změna teploty T a vlhkosti w v čase t

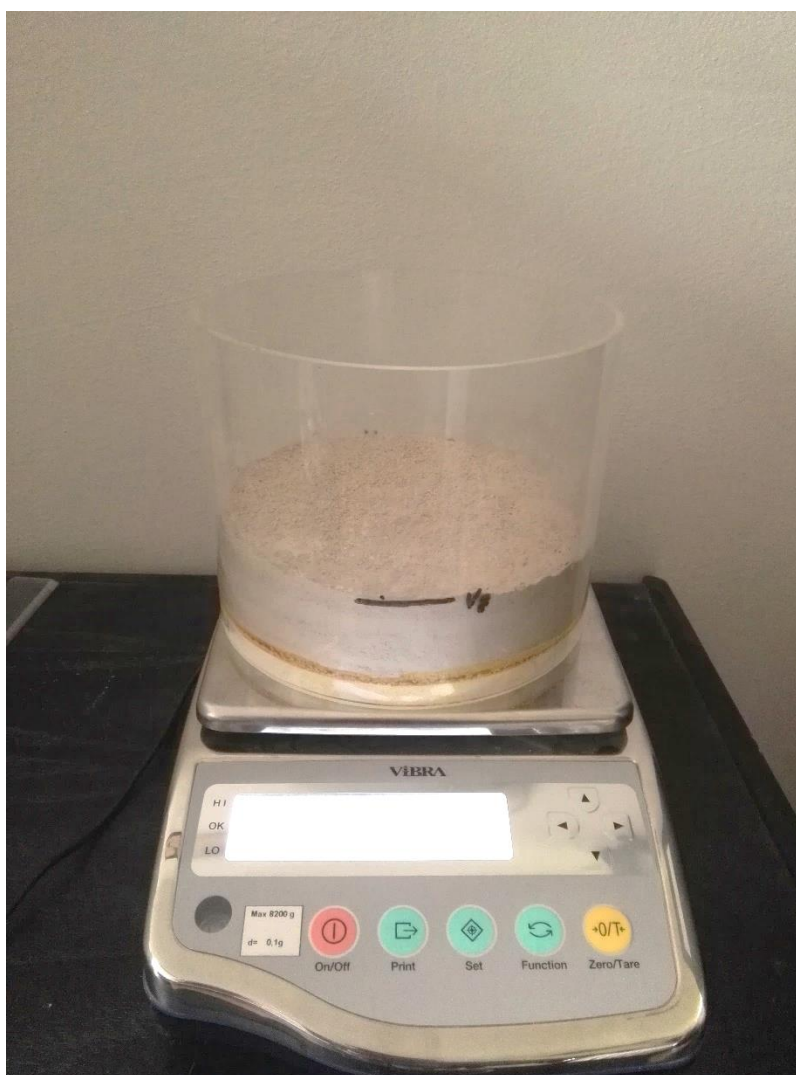


6.2 JÍL B01 20% , PÍSEK 80%

Pro druhé měření byl připraven vzorek zeminy s hmotnostním poměrem 20% jílu žáruvzdorného s označením B01 a 80% písku o velikosti efektivního zrna 1 mm.

6.2.1 Vstupní parametry měření

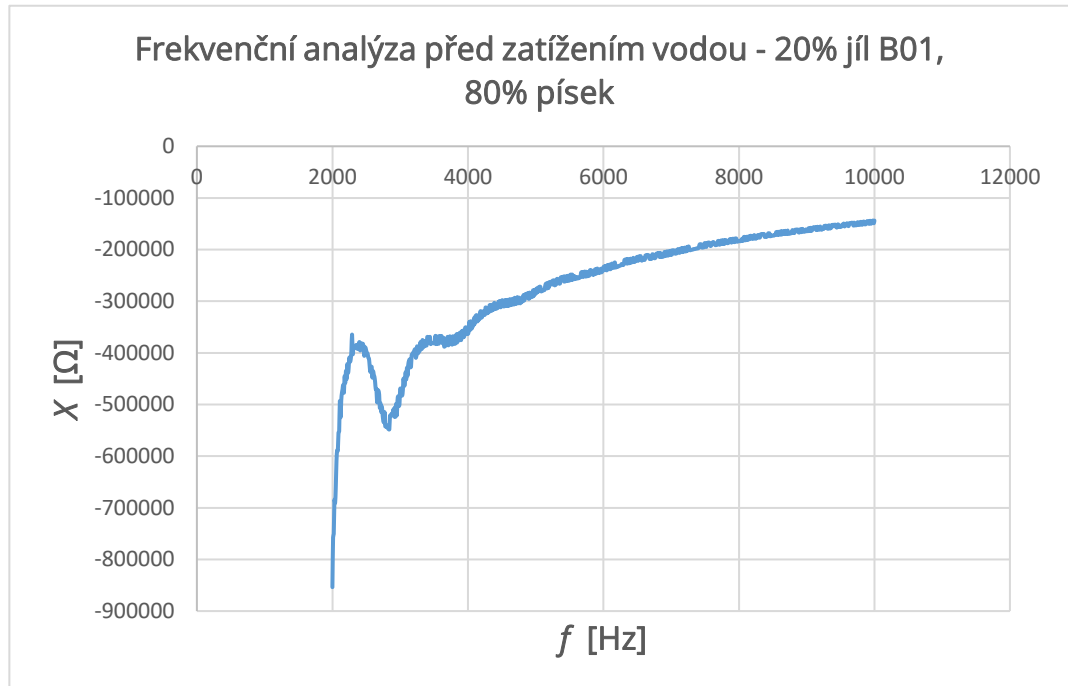
Teplota v místnosti:	24 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,315 kg (1,618 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,406 kg (1,709 kg)



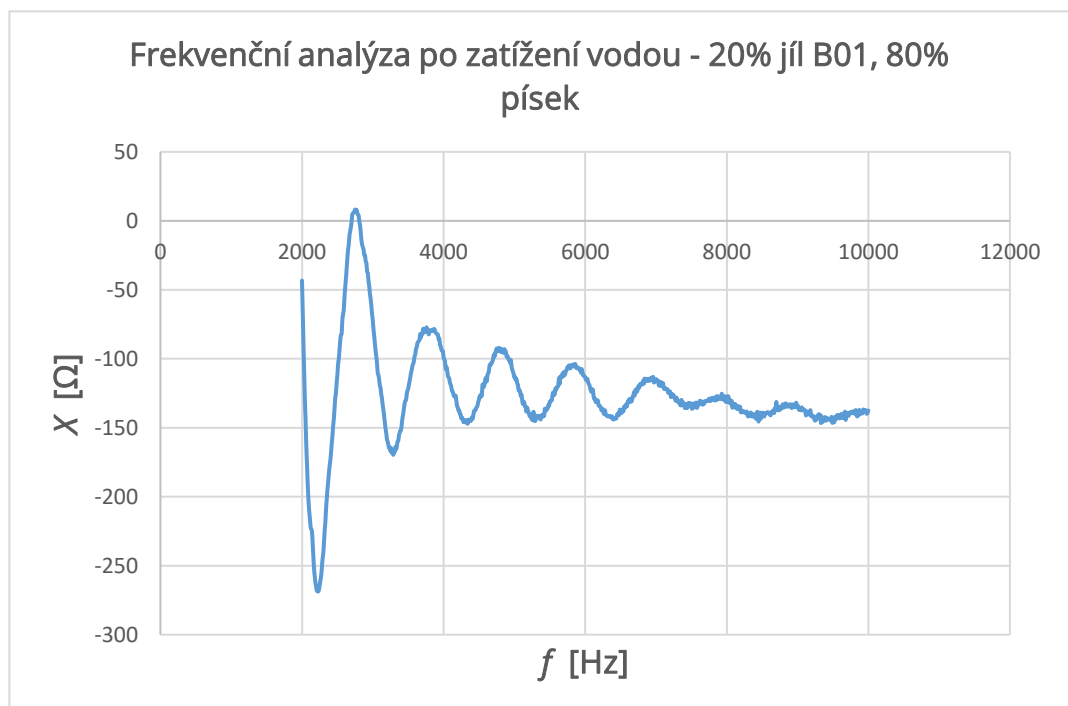
Obr. 6.2.1 – Vzorek zeminy 20% jílu B01 a 80% písek

6.2.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.2.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 20% jílu B01, 80% písek

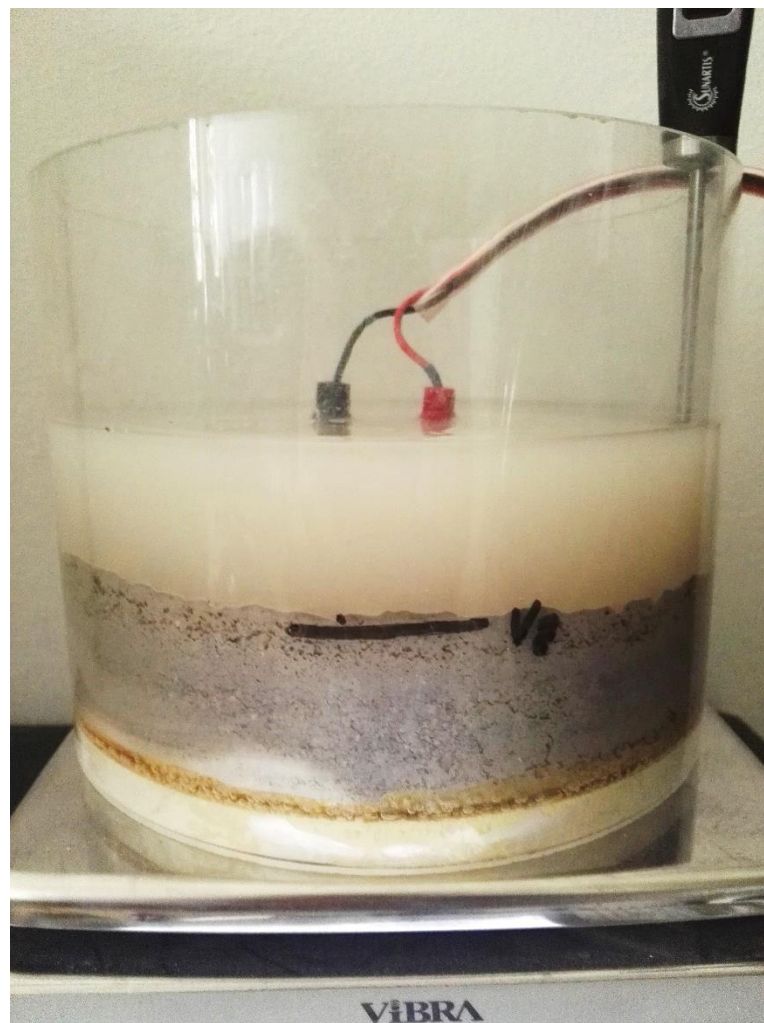


Graf. 6.2.2 Frekvenční analýza po zatížení vodou - 20% jílu B01, 80% písek



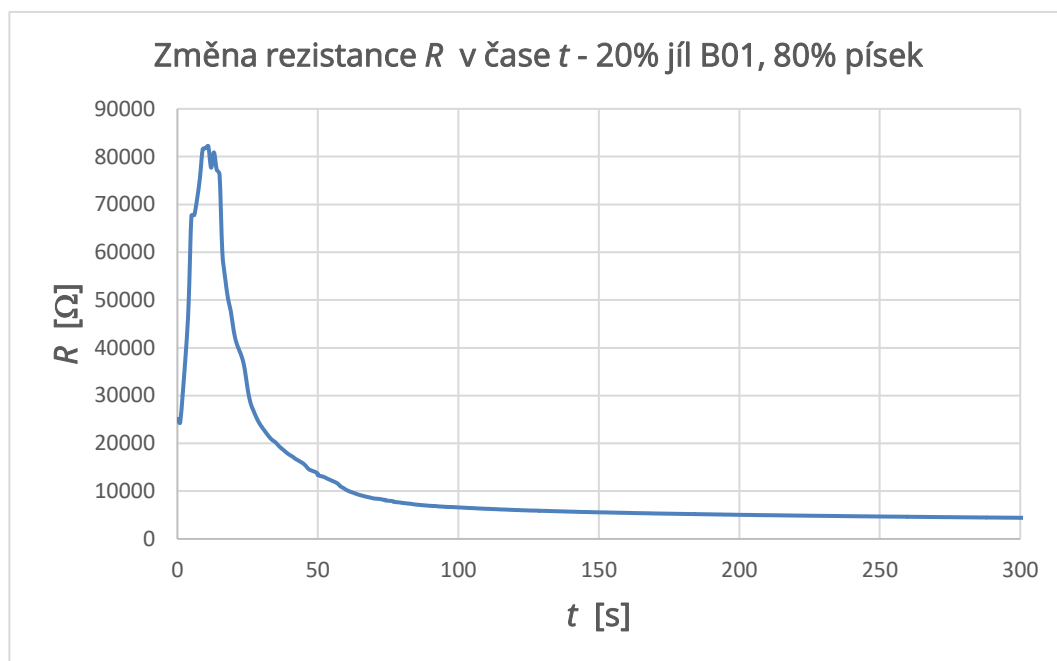
6.2.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,08 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,076 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,346 kg (2,649 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	3,251 kg (2,554 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,570 kg (1,873 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,003 m



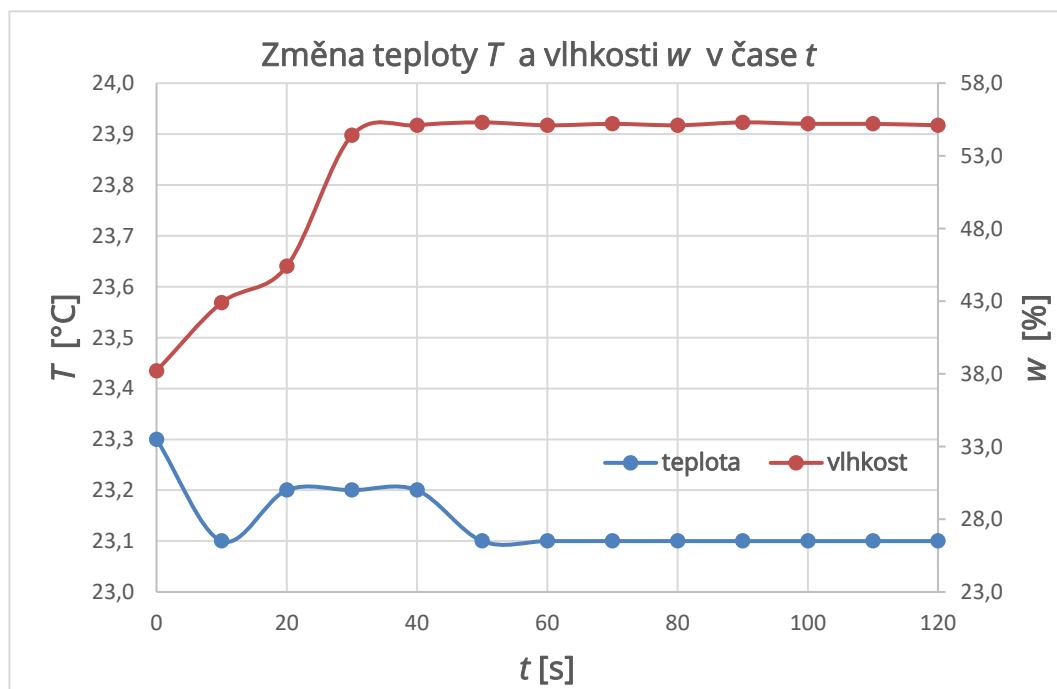
Obr. 6.2.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 20% jílu B01

Graf. 6.2.3 – Změna rezistance R v čase t - 20% jílu B01, 80% písek



Z grafu je zřejmá změna doby vsaku a doby zadržení vody na povrchu zeminy, než k vsaku vody začalo docházet, která je patrná ve vrcholu grafu. Již 20% obsah jílu ve vzorku se podílí na jistém zlepšení těsnicích vlastností vzorku.

Graf. 6.2.4 – Změna teploty T a vlhkosti w v čase t

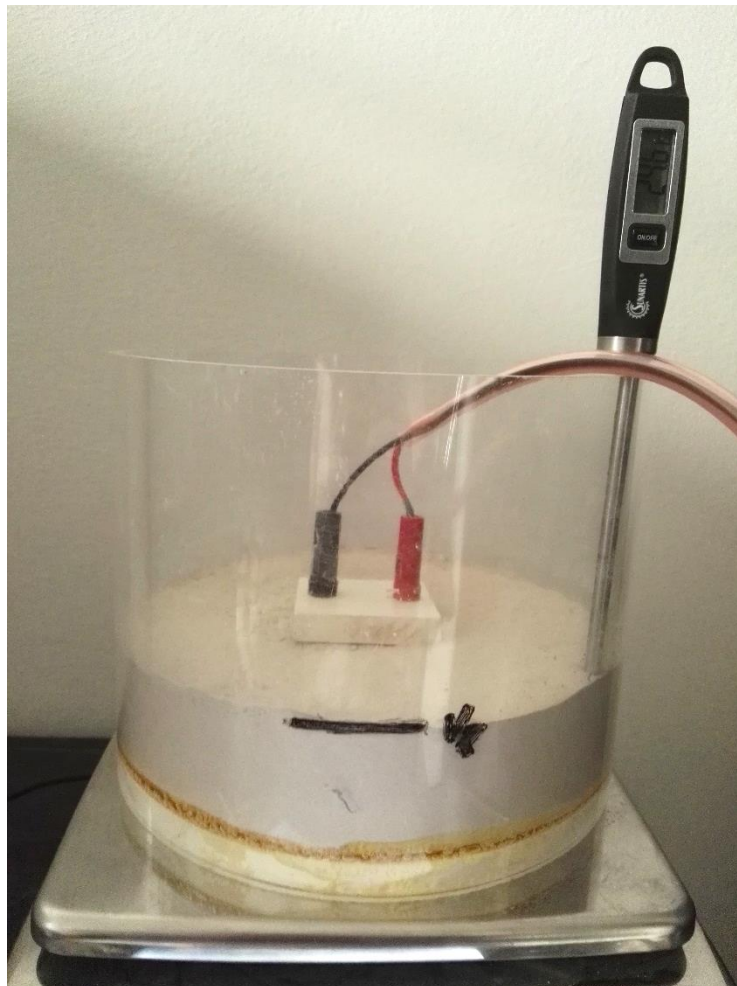


6.3 JÍL B01 40%, PÍSEK 60%

Vzorek s poměrem 40% jílu žáruvzdorného s označením B01 a 60% písku o velikosti efektivního zrna 1 mm.

6.3.1 Vstupní parametry měření

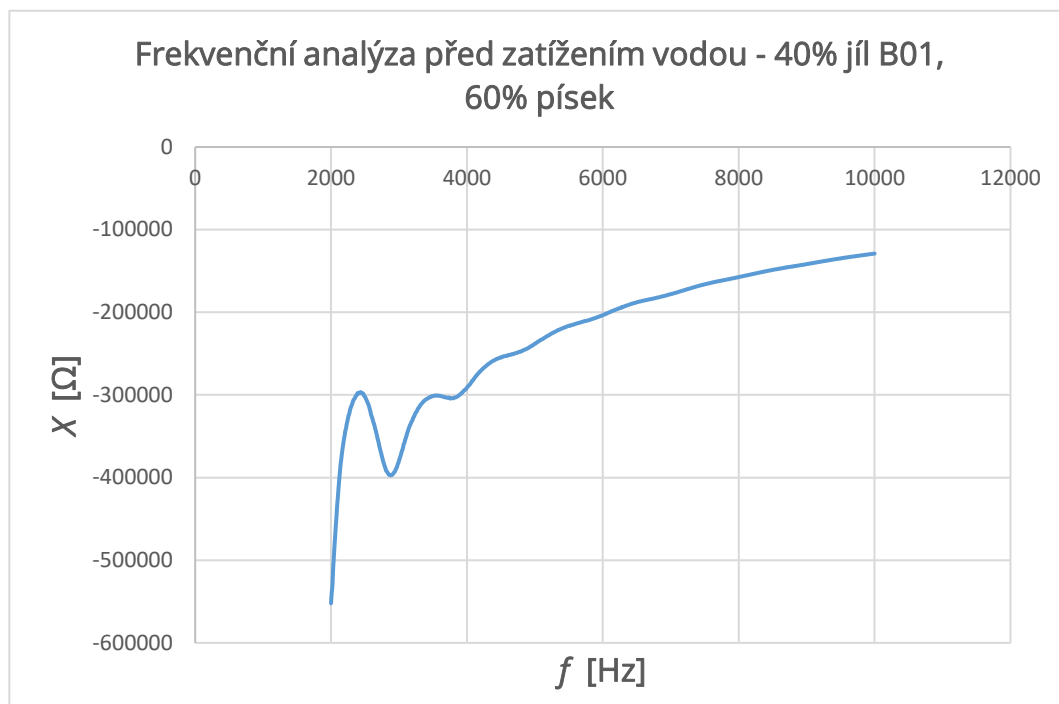
Teplota v místnosti:	24,4 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,105 kg (1,408 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,196 kg (1,499 kg)



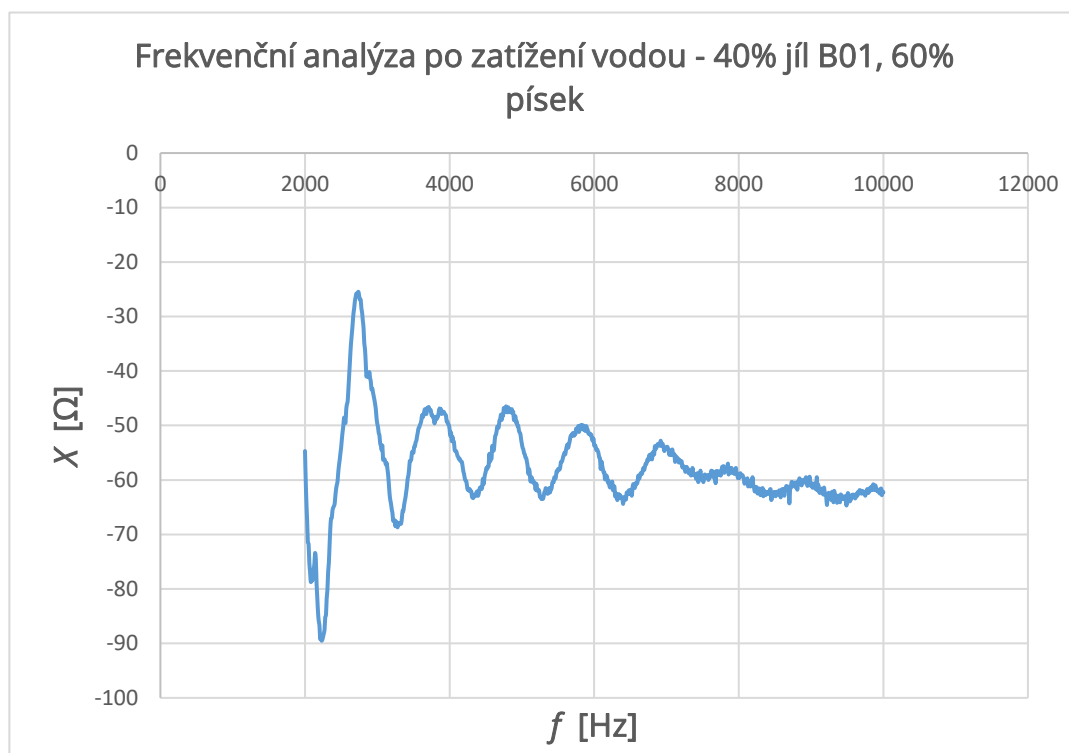
Obr. 6.3.1 – Vzorek zeminy 40% jílu B01 a 60% písek

6.3.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.3.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 40% jílu B01, 60% písek

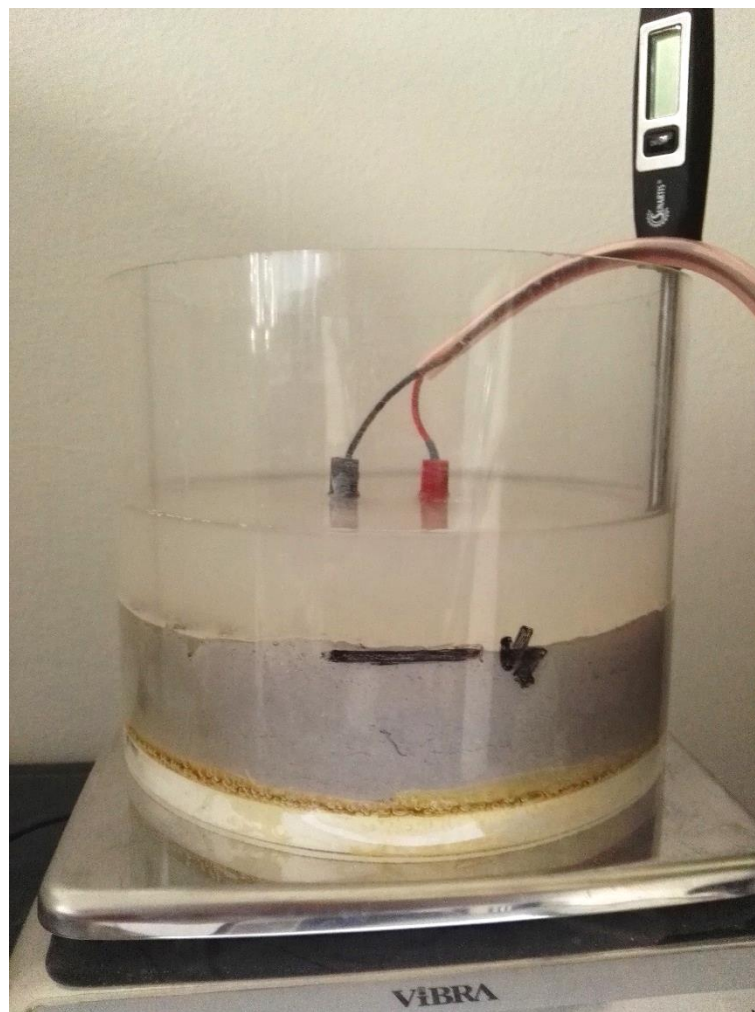


Graf. 6.3.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 40% jílu B01, 60% písek



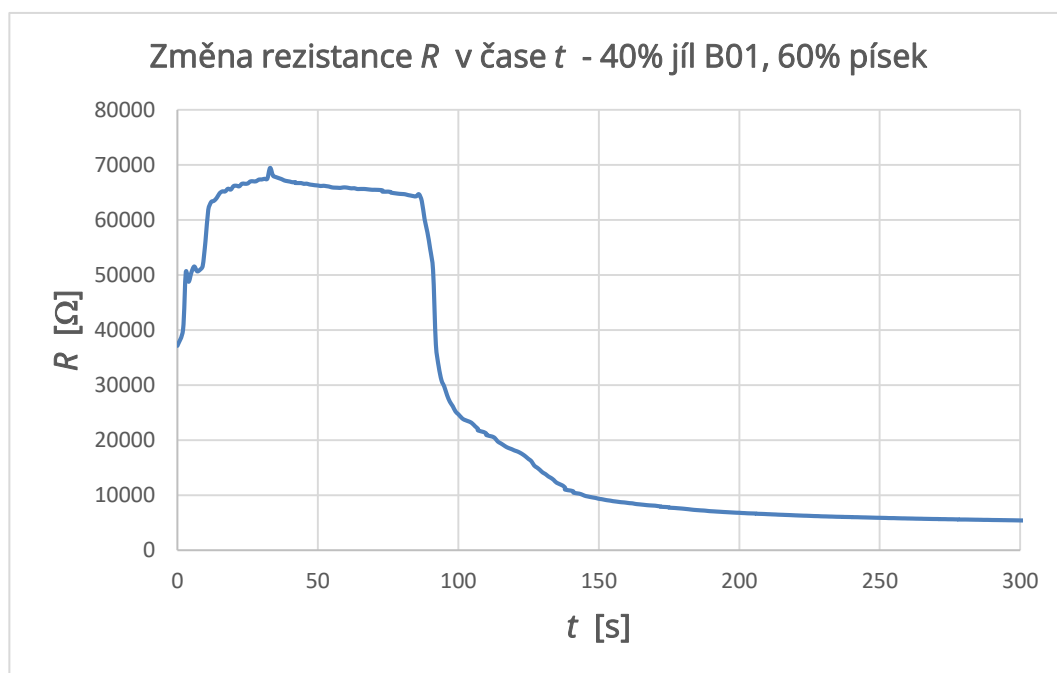
6.3.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,084 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,069 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,135 kg (2,438 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	3,020 kg (2,323 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,436 kg (1,739 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,001 m



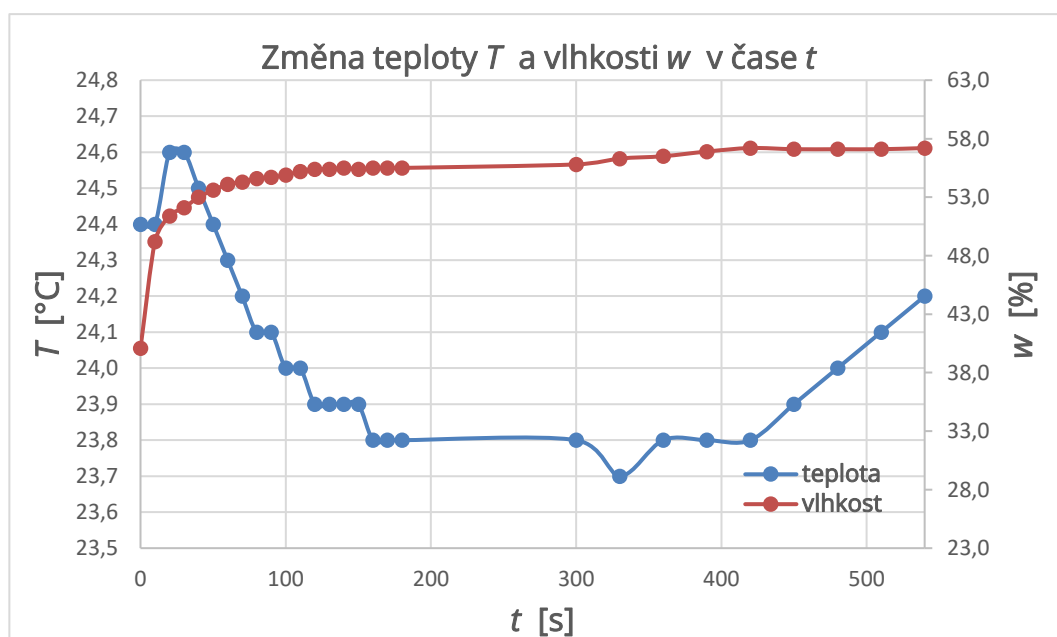
Obr. 6.3.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 40% jílu B01

Graf. 6.3.3 - Změna rezistance R v čase t - 40% jílu B01, 60% písek



Z výsledku je zřejmé, že větší procentuální zastoupení jílu vůči písku prodlužuje dobu od zatížení vzorku vodou po její vsak do vzorku. Například oproti předchozímu měření, kdy bylo ve vzorku použito 20% jílu B01, je u tohoto pokusu s obsahem jílu B01 60% velikost doby zdržení několikanásobně větší.

Graf. 6.3.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t

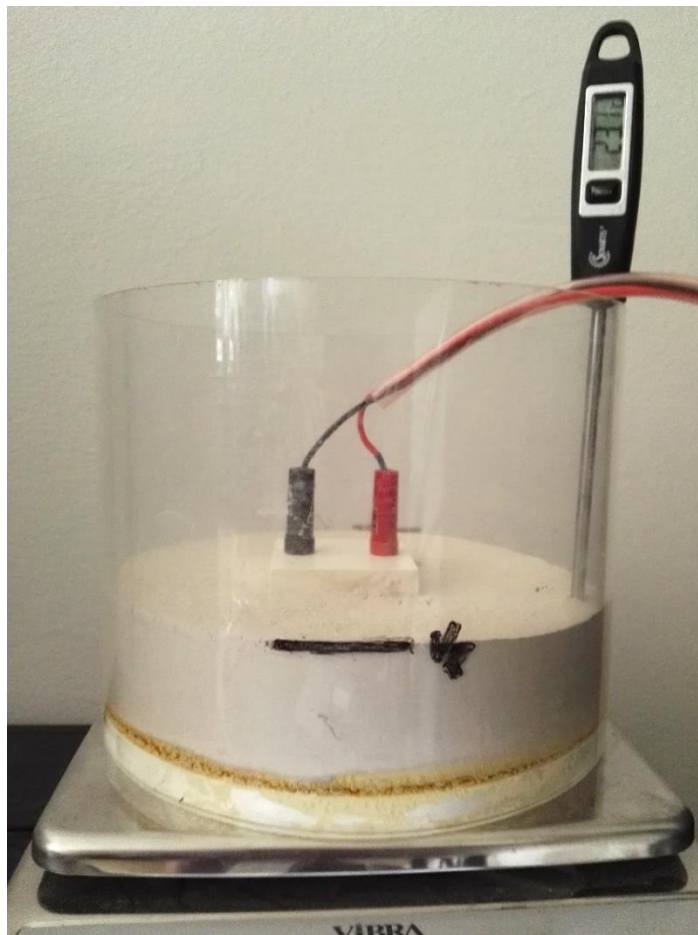


6.4 JÍL B01 60%, PÍSEK 40%

Zastoupení jílu ve vzorku zeminy bylo zvýšeno na 60% a písku sníženo na 40%. Lze si povšimnout, že vzhledem k většímu množství jílu je hmotnost vzorku zeminy výrazně nižší. V uvedeném poměru jílu a písku ve vzorku již začalo docházet k problémům se zhutnitelností. Vzorek byl výrazně kypřejší.

6.4.1 Vstupní parametry měření

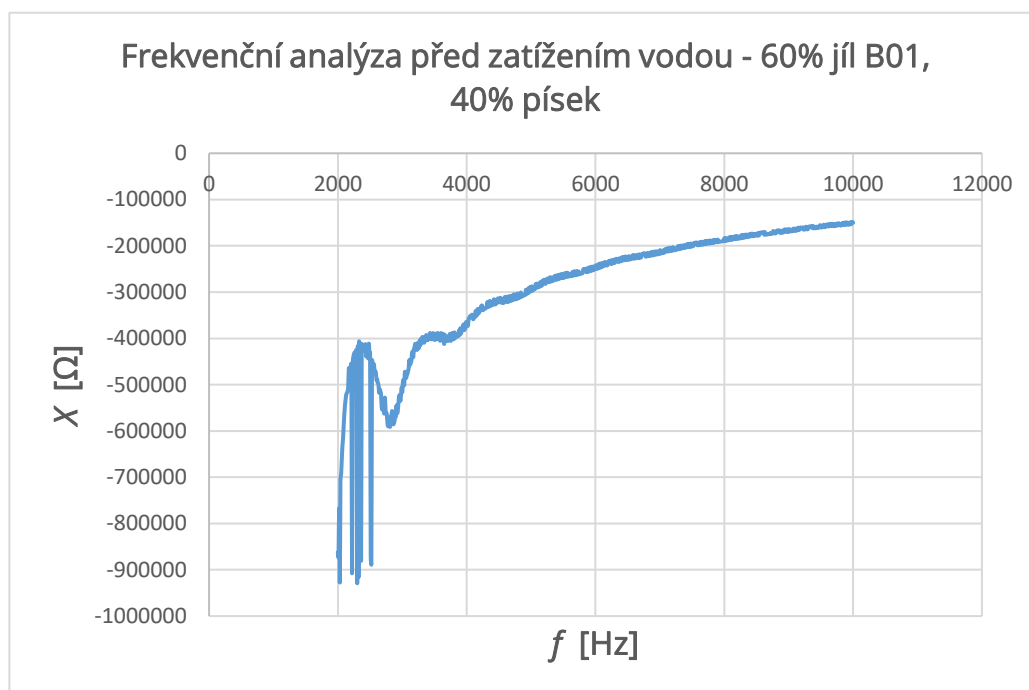
Teplota v místnosti:	26,4 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,683 kg (0,986 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	1,776 kg (1,079 kg)



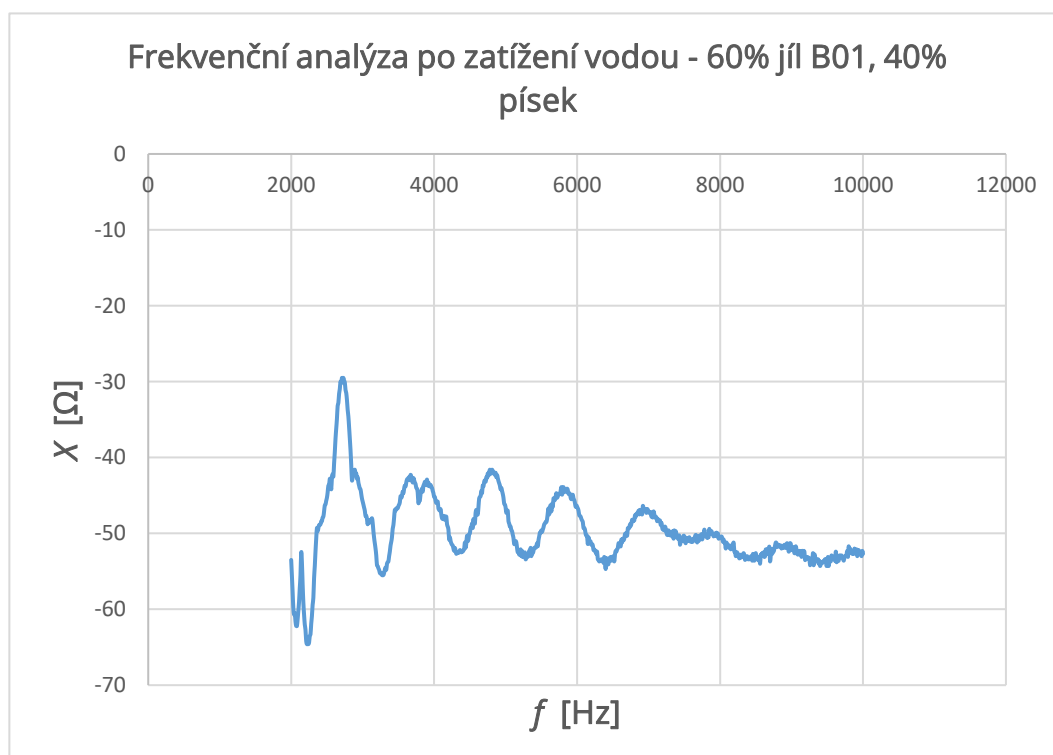
Obr. 6.4.1 - Vzorek zeminy 60% jílu B01 a 40% písek

6.4.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.4.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 60% jílu B01, 40% písek

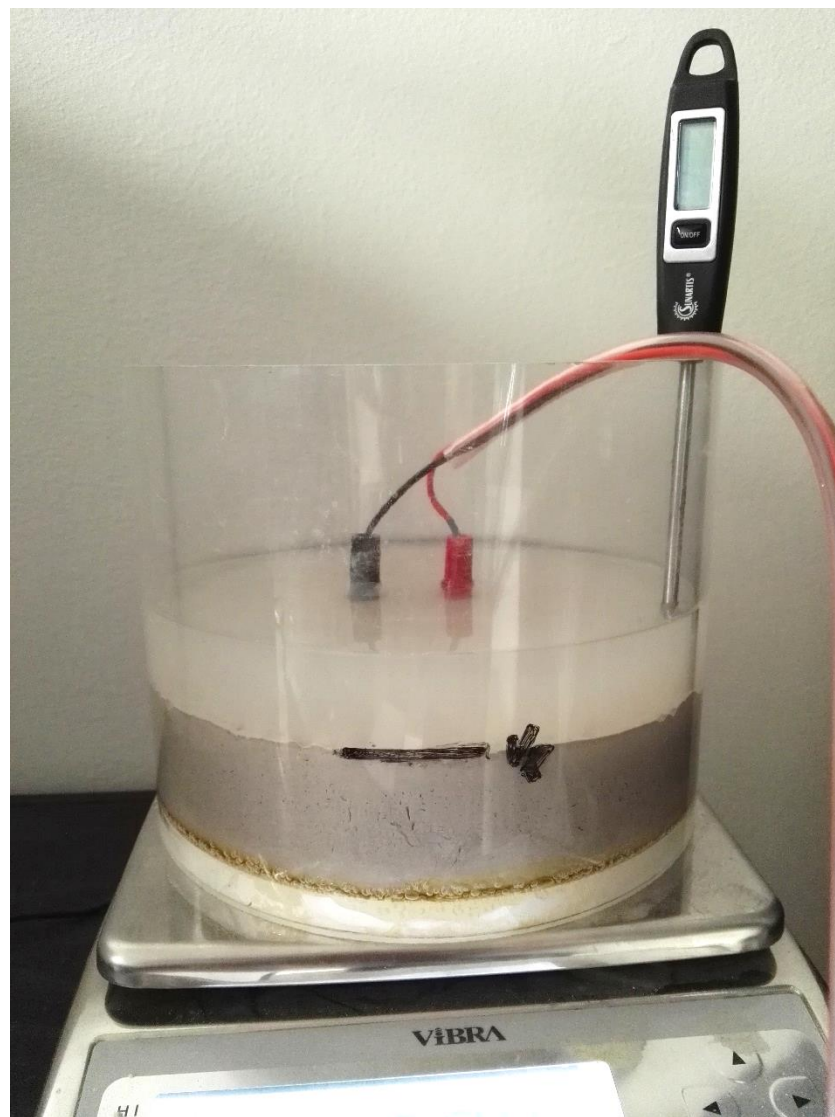


Graf. 6.4.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 60% jílu B01, 40% písek



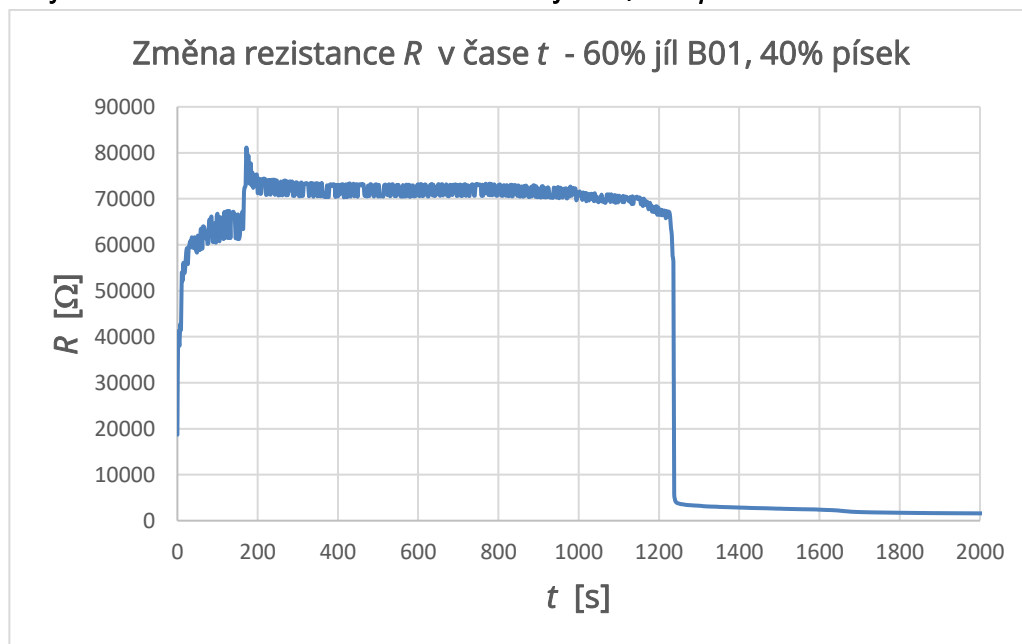
6.4.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,085 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,071 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,766 kg (2,069 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,654 kg (1,957 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,103 kg (1,406 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,0 m



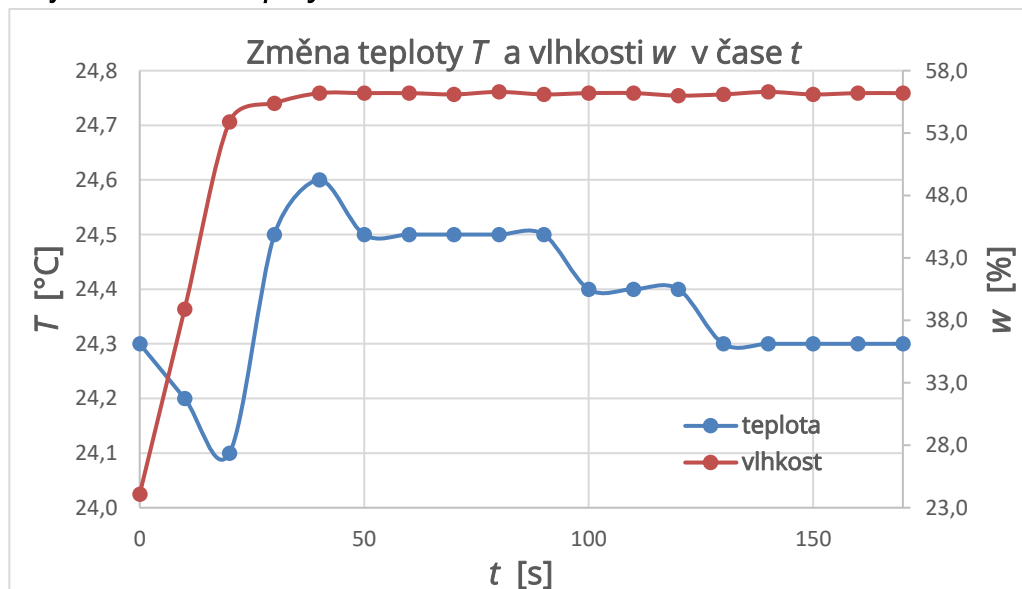
Obr. 6.4.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 60% jílu B01

Graf. 6.4.3 - Změna rezistance R v čase t - 60% jílu B01, 40% písek



Na grafu lze pozorovat, že se zvětšením procentuálního zastoupení jílu ve vzorku se opět zvětšila doba zadržení vody na povrchu vzorku před jejím vsakem do vzorku. V předchozím případě byla doba zadržení 86 s, kdežto v tomto případě 60% zastoupení jílu je doba zadržení okolo 1228 s, což je 14× delší doba.

Graf. 6.4.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t

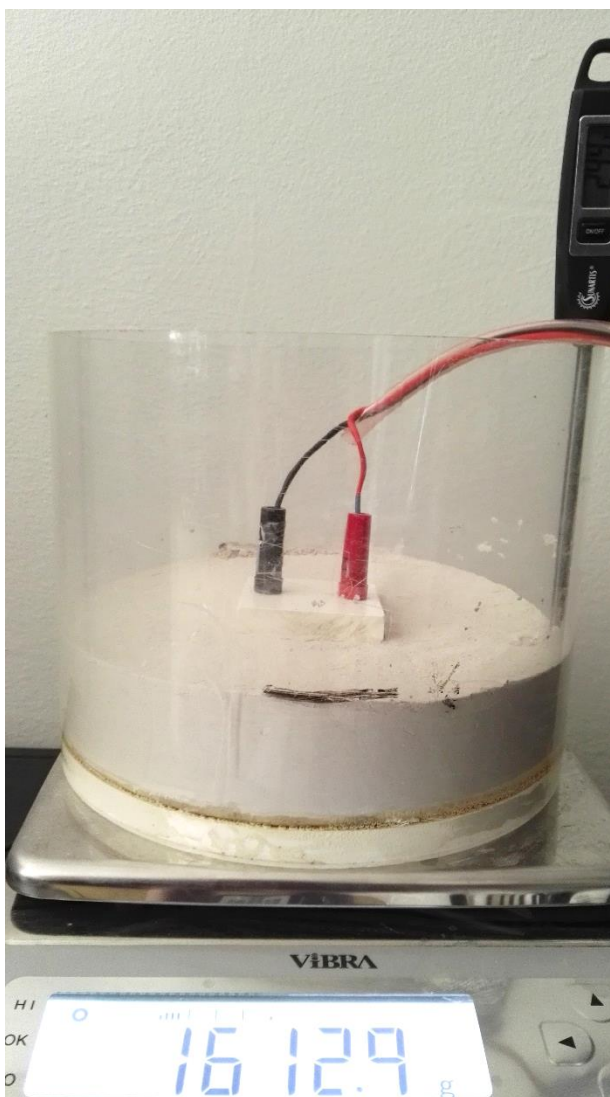


6.5 JÍL B01 80%, PÍSEK 20%

Při zvýšení procenta jílu na 80% bylo hutnění opět o něco obtížnější, jelikož jíl v surovém stavu je velmi jemný a jeho zhutnění bylo velmi obtížné, což odpovídá i nižší hmotnosti výsledného vzorku.

6.5.1 Vstupní parametry měření

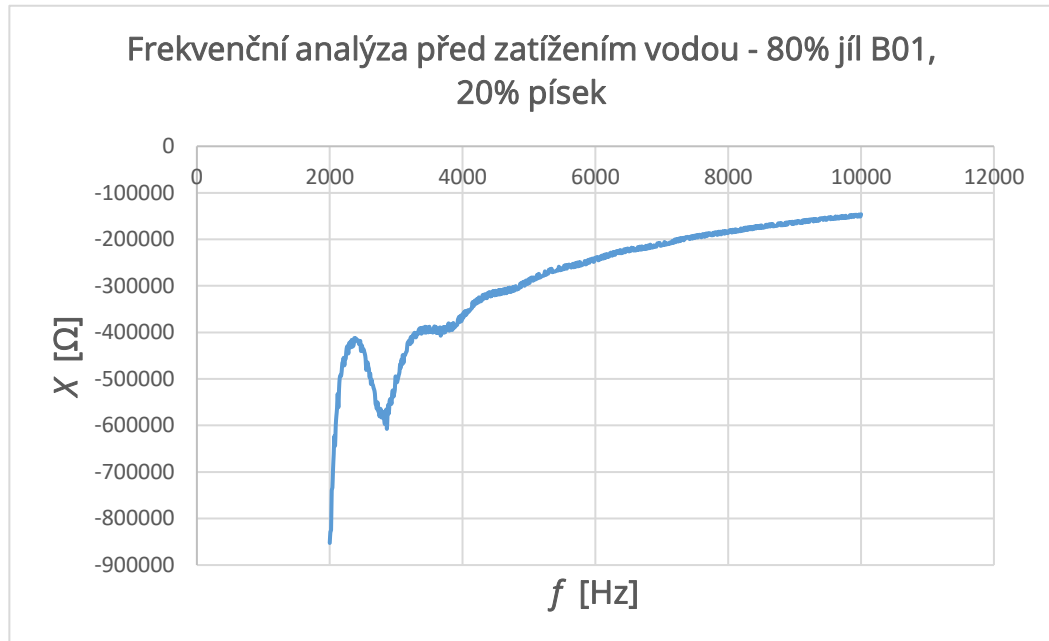
Teplota v místnosti:	27 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,525 kg (0,828 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	1,612 kg (0,915 kg)



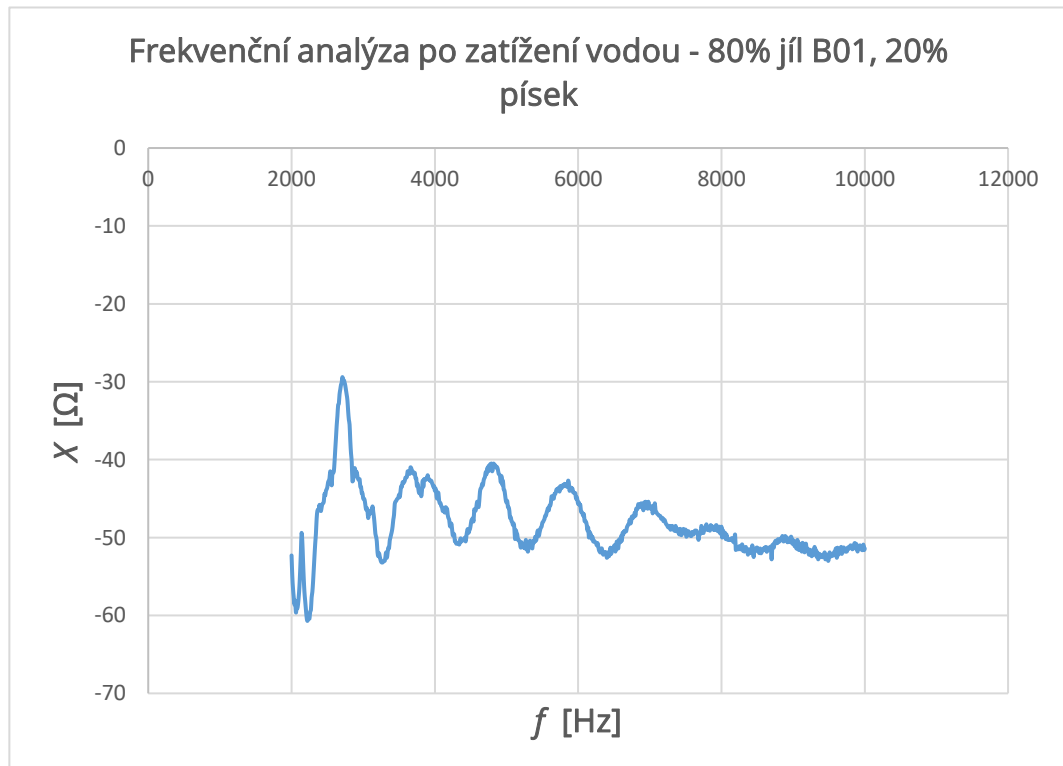
Obr. 6.5.1 - Vzorek zeminy 80% jílu B01 a 20% písek

6.5.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.5.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 80% jííl B01, 20% písek

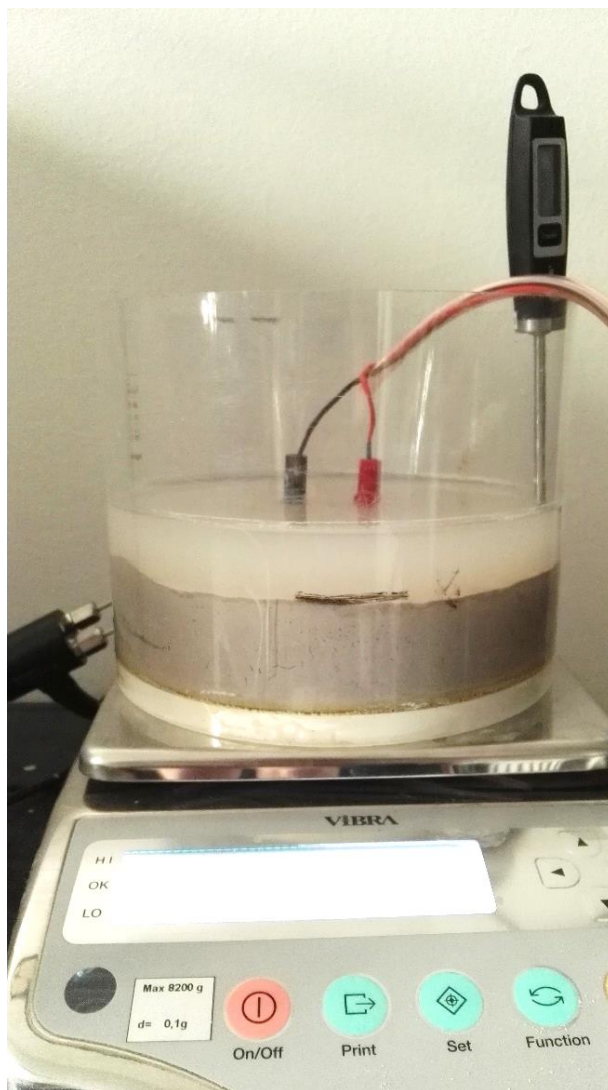


Graf. 6.5.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 80% jííl B01, 20% písek



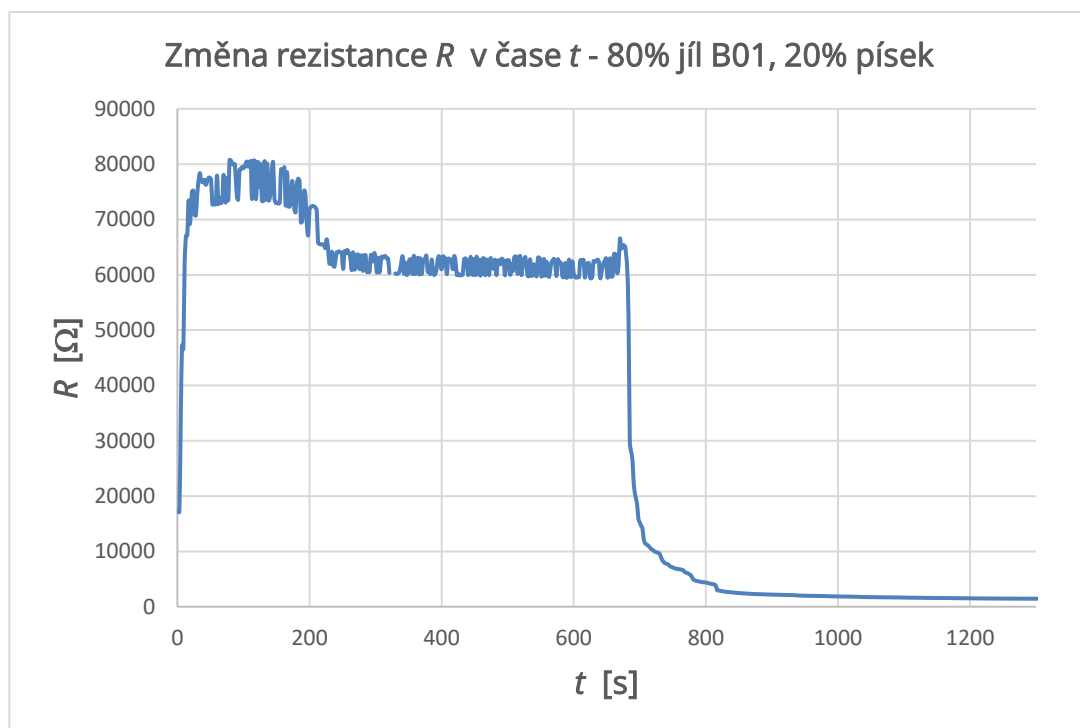
6.5.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,083 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,064 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,572 kg (1,875 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,463 kg (1,766 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	1,949 kg (1,252 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,0 m



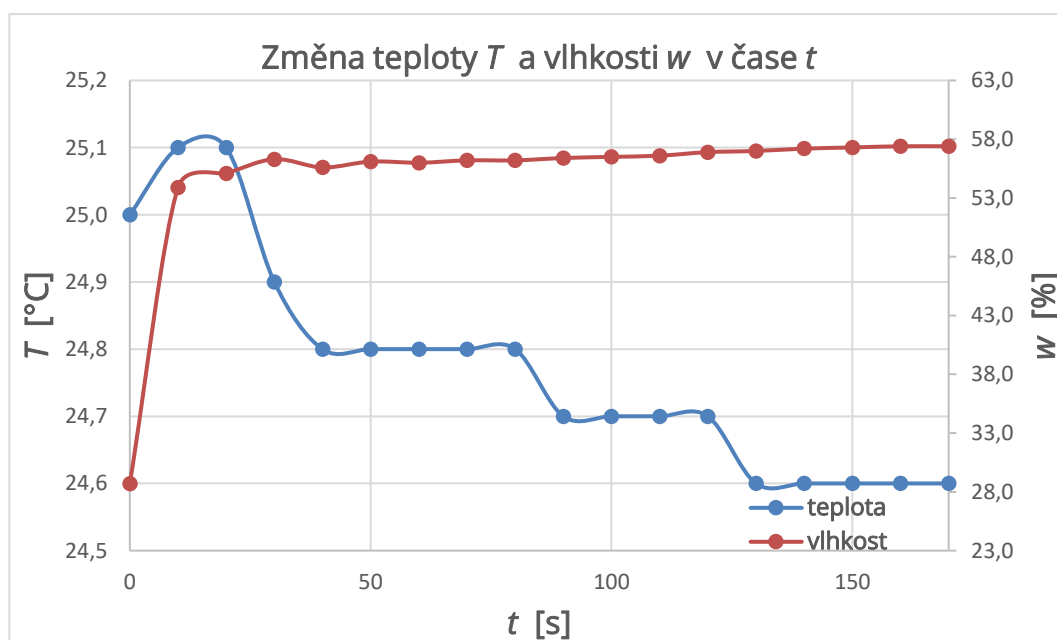
Obr. 6.5.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 80% jílu B01

Graf. 6.5.3 - Změna rezistance R v čase t - 80% jílu B01, 20% písek



Zajímavostí je, že při zvýšení procentuálního zastoupení jílu ve vzorku z 60% na 80% nedošlo k prodloužení doby zadržetí vody na povrchu vzorku zeminy, jako tomu bylo v předchozím případě, ale naopak k jejímu zkrácení na polovinu, a to na 678 s.

Graf. 6.5.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.6 JÍL B01 100%

Vzorek zeminy reprezentuje jíł s označením B01. Jeho hutnění bylo velmi těžké, jelikož jíł je velmi jemný a dusadlem skoro nezhutnitelný. Dusadlo bylo využíváno vzhledem k dostupnému vybavení v laboratoři a z důvodu dodržení stejného postupu hutnění u všech vzorků.

6.6.1 Vstupní parametry měření

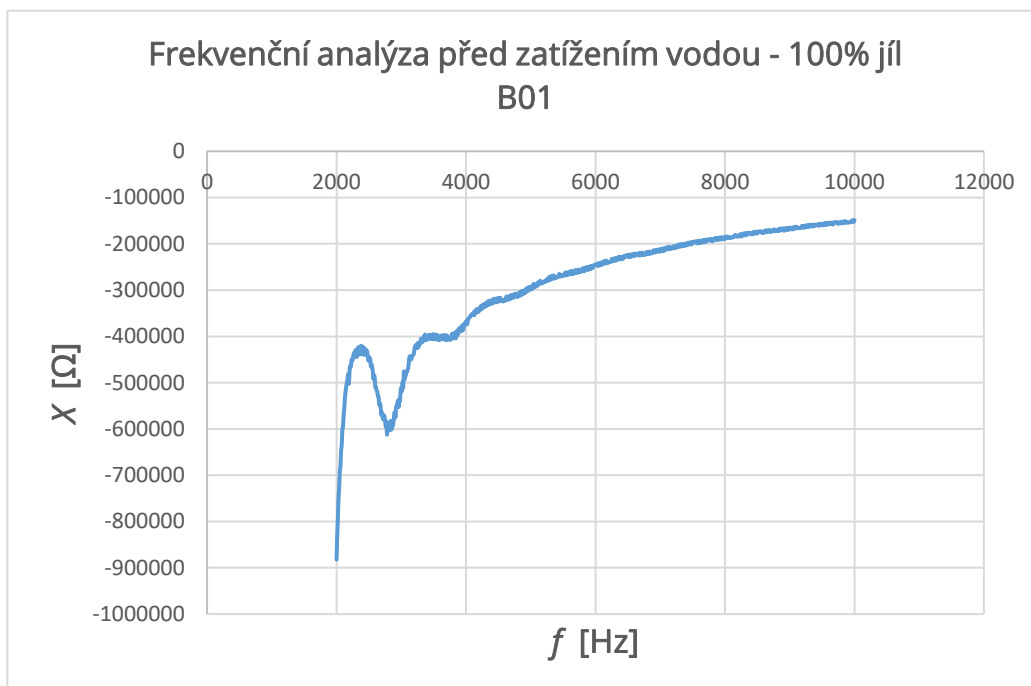
Teplota v místnosti:	26,7 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,481 kg (0,784 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	1,574 kg (0,877 kg)



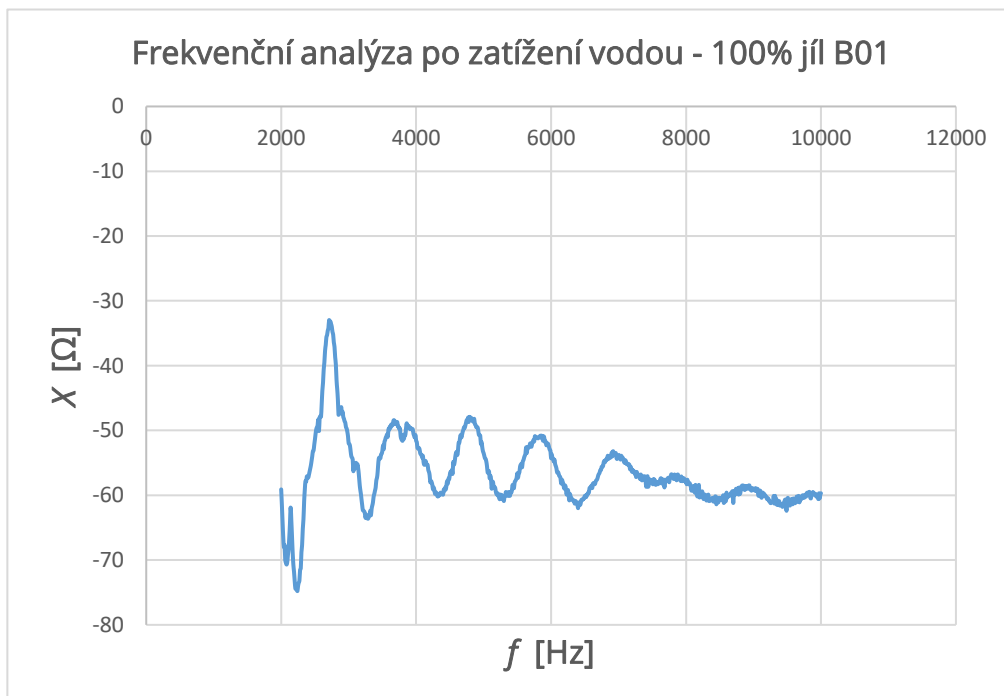
Obr. 6.6.1 – Vzorek zeminy 100% jíł B01

6.6.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.6.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 100% jíl B01

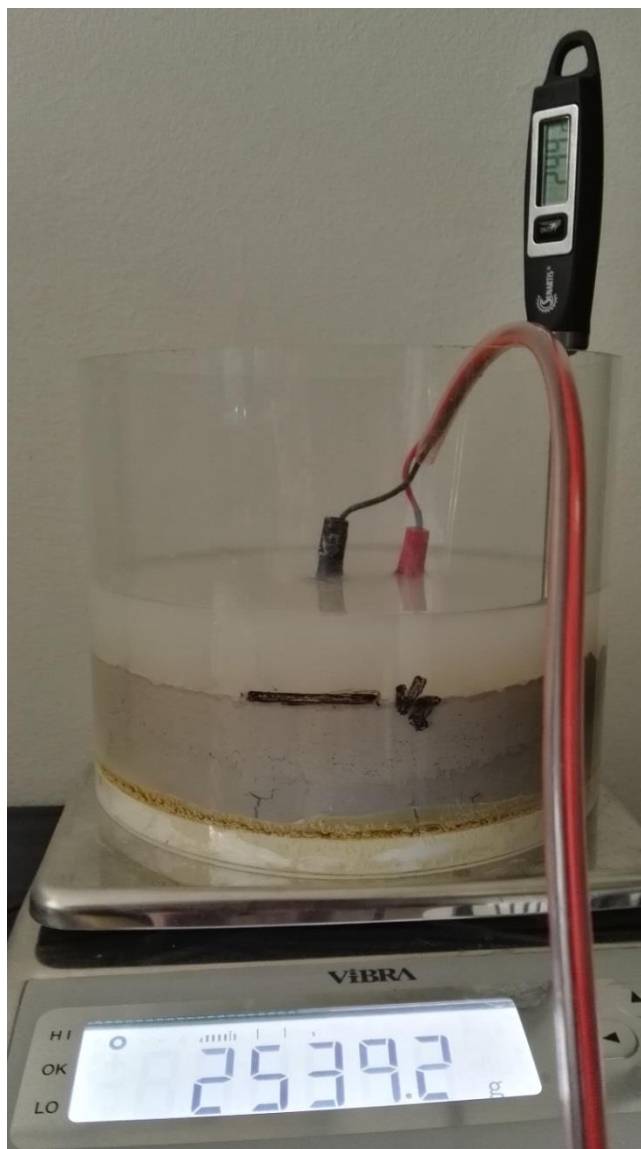


Graf. 6.6.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou - 100% jíl B01



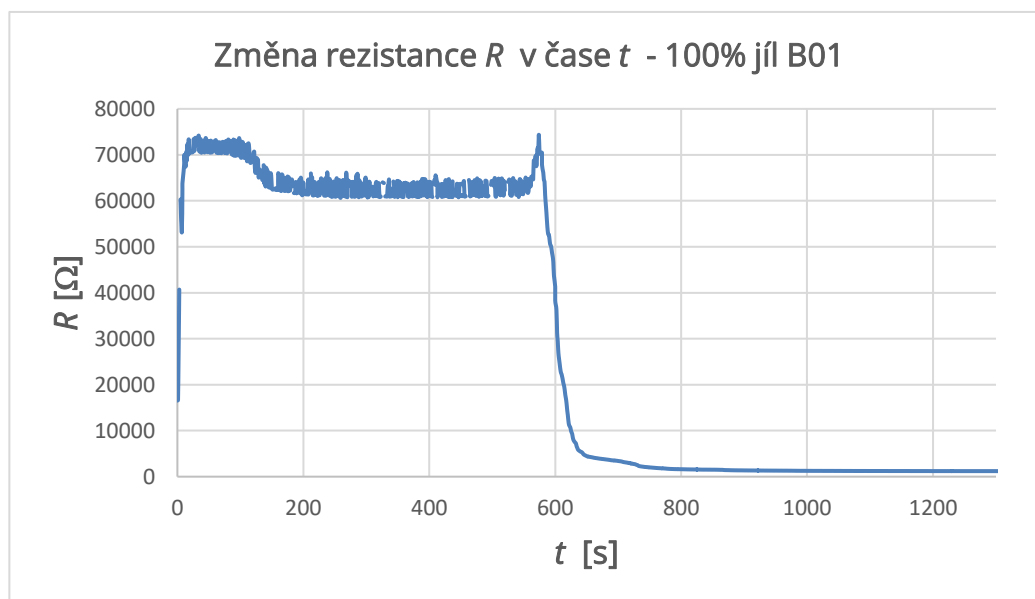
6.6.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,084 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,076 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,542 kg (1,845 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,443 kg (1,746 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	1,891 kg (1,194 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,0 m



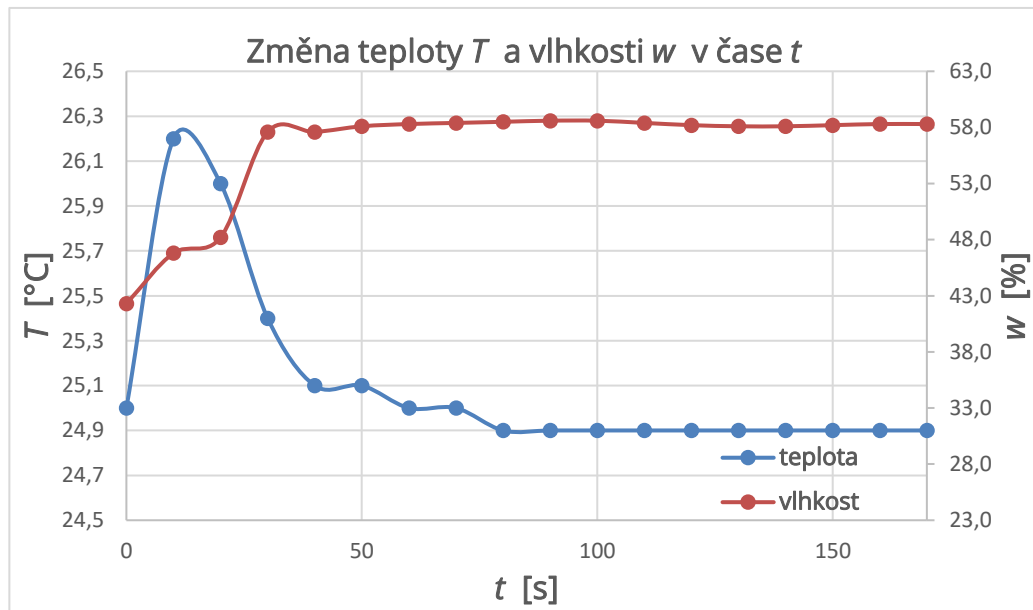
Obr. 6.6.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 100% jílu B01

Graf. 6.6.3 - Změna rezistance R v čase t - 100% jílu B01



Na základě grafického výstupu lze konstatovat, že celková doba zadržetí vody na povrchu vzorku zeminy je 572 s. Proces vsakování vody do vzorku jílu B01 však obsahuje několik fází. Je zřejmé, že nejprve se po dobu cca 150 s vsakuje voda do hloubky cca 0,5 cm. Následně téměř skokovou změnou postupuje do hloubky přibližně 1,5 cm až 2,0 cm, kde pravděpodobně v důsledku převládajícího horizontálního proudění vody setrvává po dobu přibližně 430 s. Následné prudké zvýšení hodnot rezistance R je zřejmě důsledkem vytěšňování vzduchu uzavřeného v pórech zeminy a navazující prudký pokles hodnot R je způsoben zavodněním měřeného profilu vzorku zeminy. Bobtnání vzorku nebylo pozorováno. Lze tedy usoudit, že lze dosáhnout lepší funkčnosti jílu s označením B01 jako těsnění, když obsahuje jisté procento písku dané frakce.

Graf. 6.6.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t

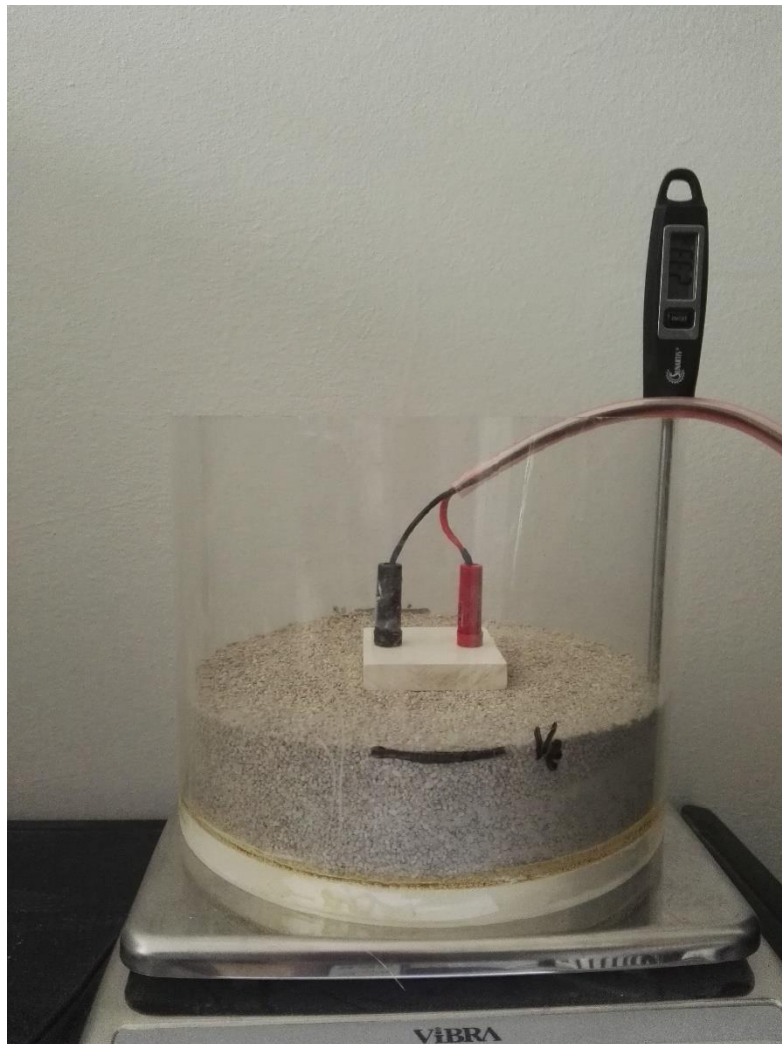


6.7 JÍL GEC 20%, PÍSEK 80%

Pro další zkoumaný vzorek bylo použito 20% jílu cyprisového s označením GEC a 80% písku.

6.7.1 Vstupní parametry měření

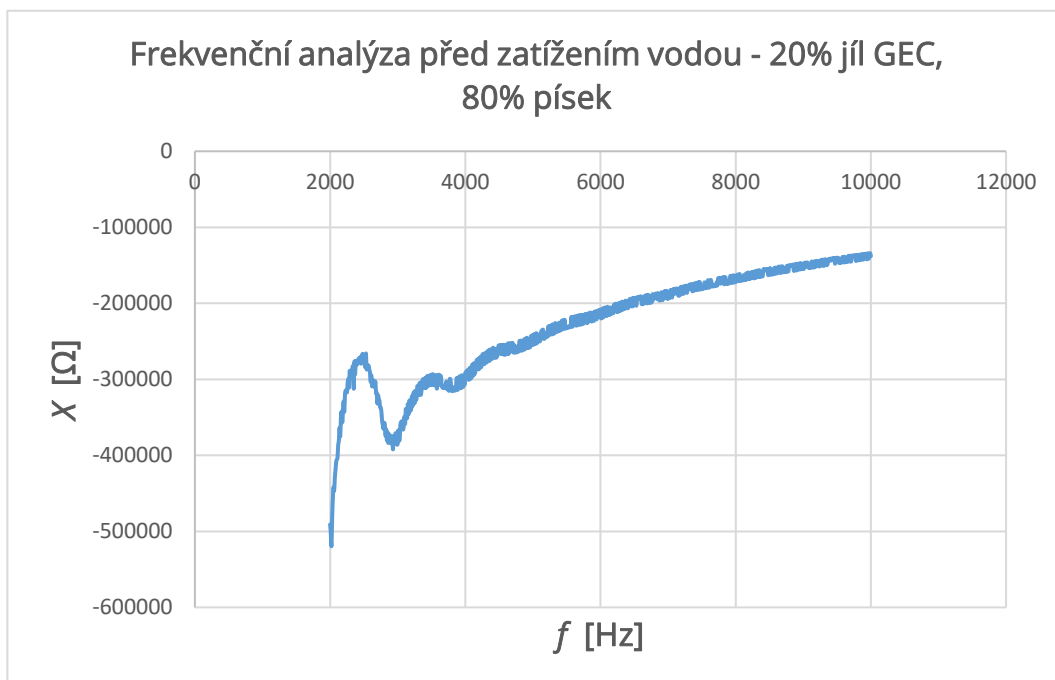
Teplota v místnosti:	24,3 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,164 kg (1,467 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,252 kg (1,555 kg)



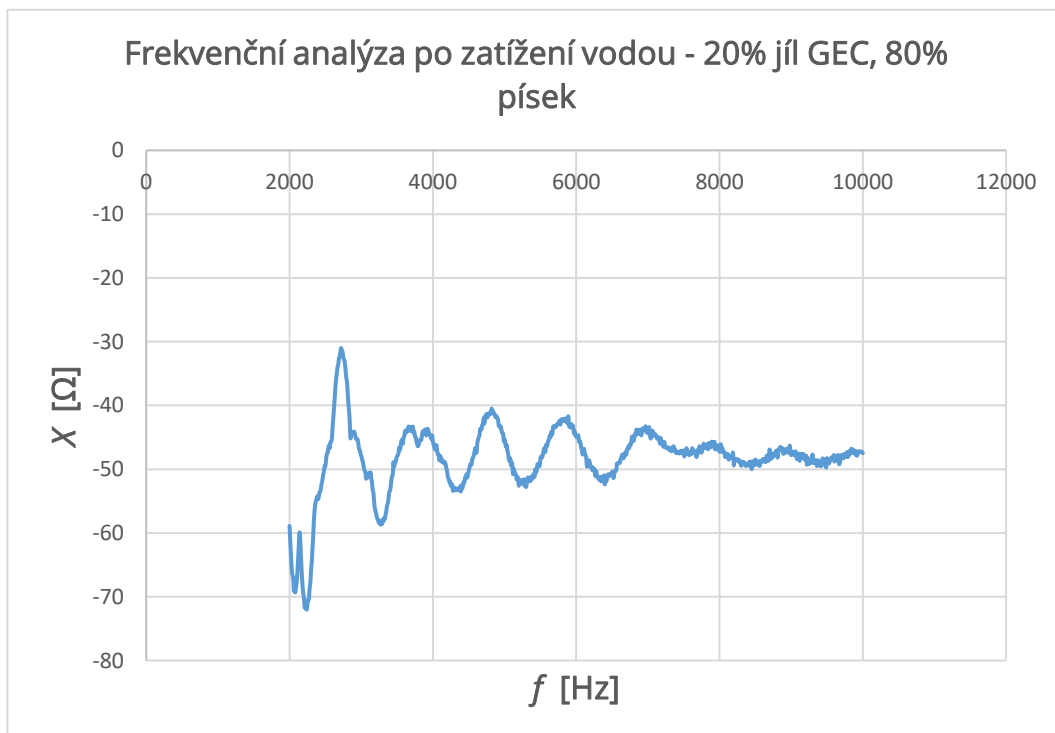
Obr. 6.7.1 – Vzorek zeminy 20% jíl GEC a 80% písek

6.7.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.7.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 20% jíł GEC, 80% písek

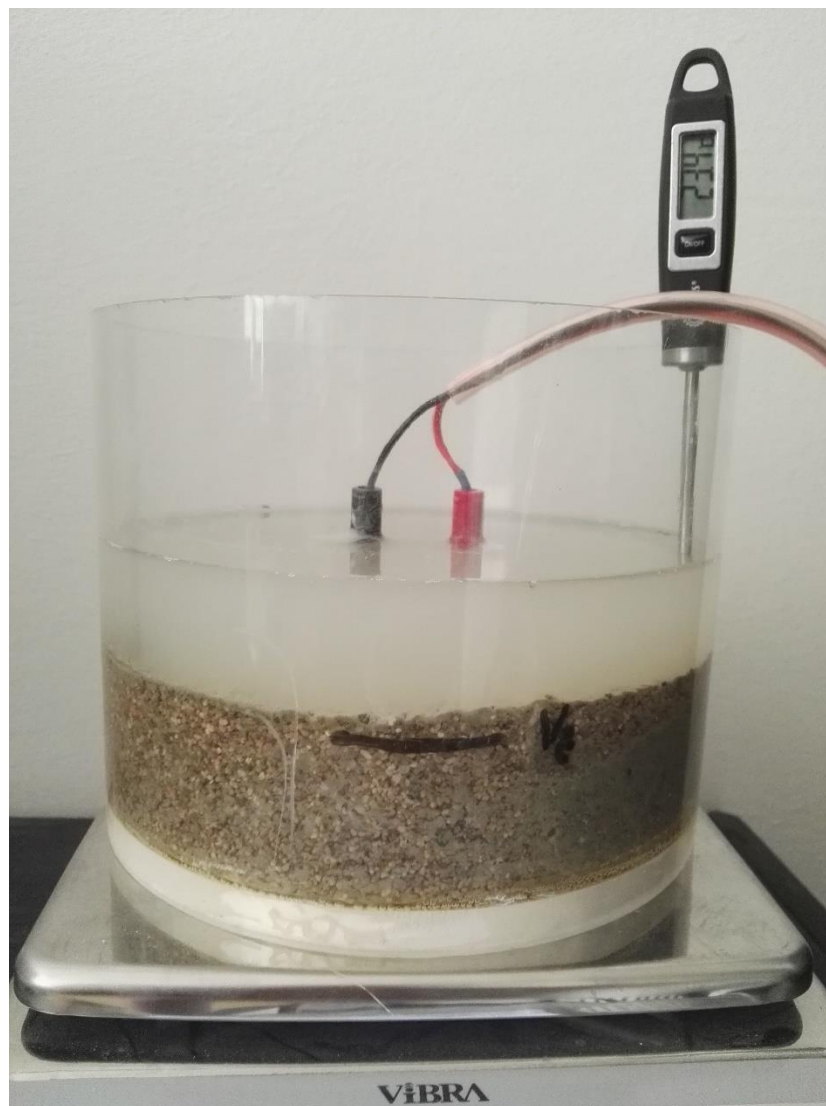


Graf. 6.7.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 20% jíł GEC, 80% písek



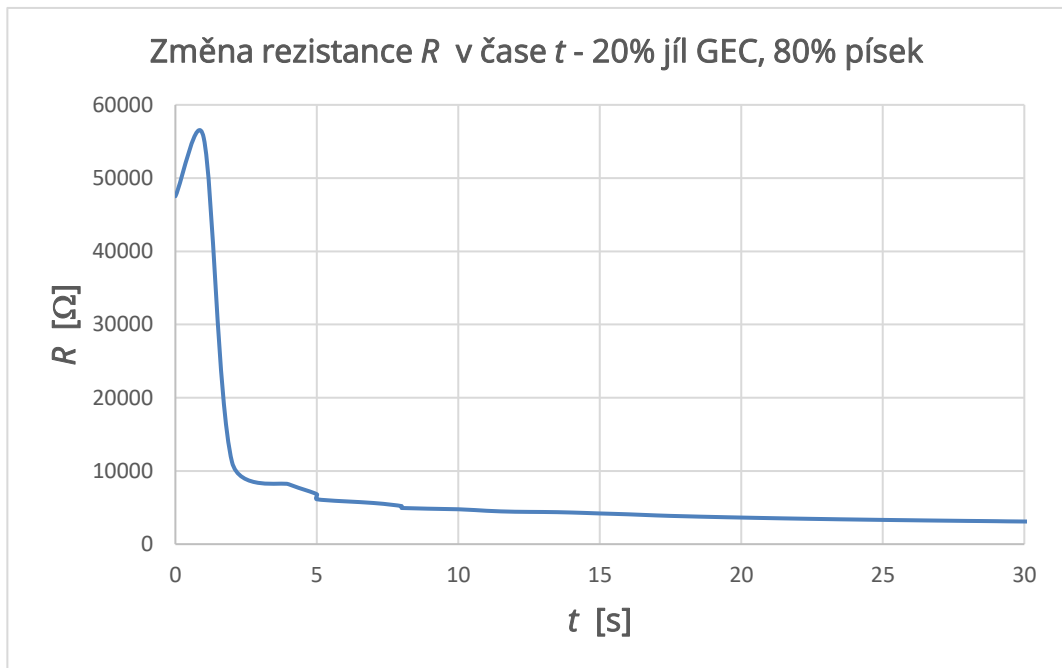
6.7.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,08 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,075 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,233 kg (2,536 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	3,140 kg (2,442 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,598 kg (1,901 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,005 m



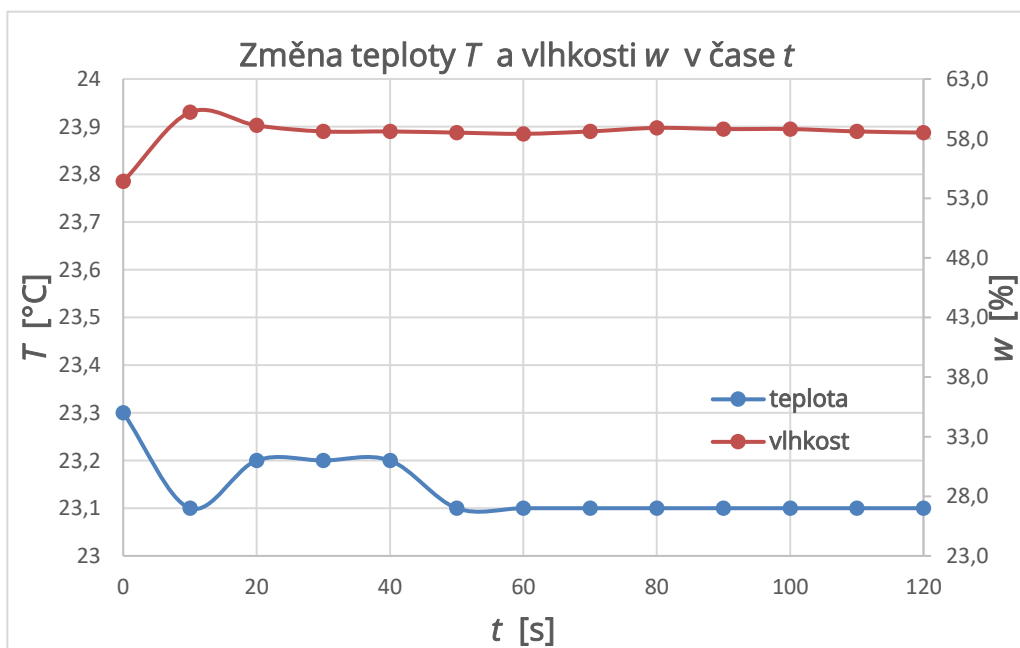
Obr. 6.7.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 20% jílu GEC

Graf. 6.7.3 - Změna rezistance R v čase t - 20% jílu GEC, 80% písek



U uvedeného vzorku zeminy je doba zadržetí vody před vsakem do vzorku necelá sekunda. Po cca 30 s je možné profil zeminy měřený sondou EIS považovat za kvazi nasycený, neboť křivka $R = f(t)$ měla konstantní průběh. Jíl GEC bobtná, v uvedeném zastoupení po zatížení vodou zvýšil objem vzorku zeminy o 12,5 %.

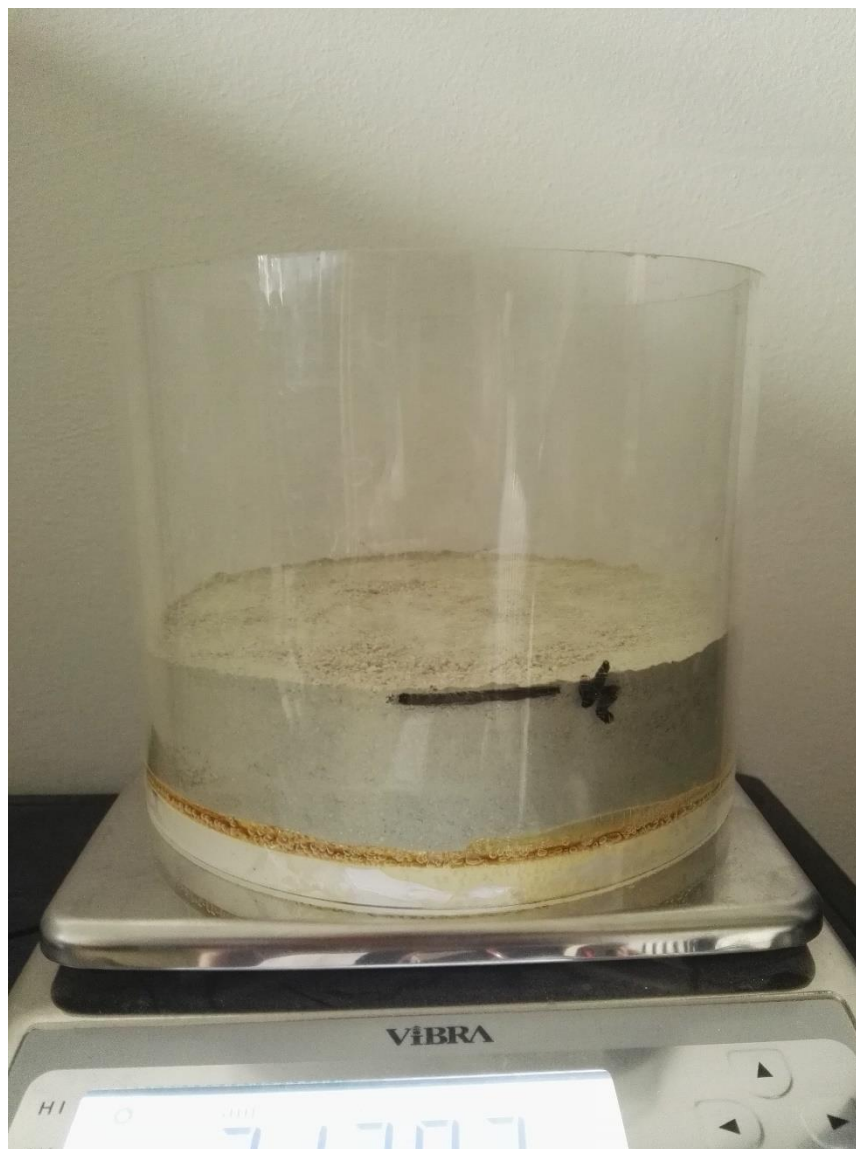
Graf. 6.7.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.8 JÍL GEC 40%, PÍSEK 60%

6.8.1 Vstupní parametry měření

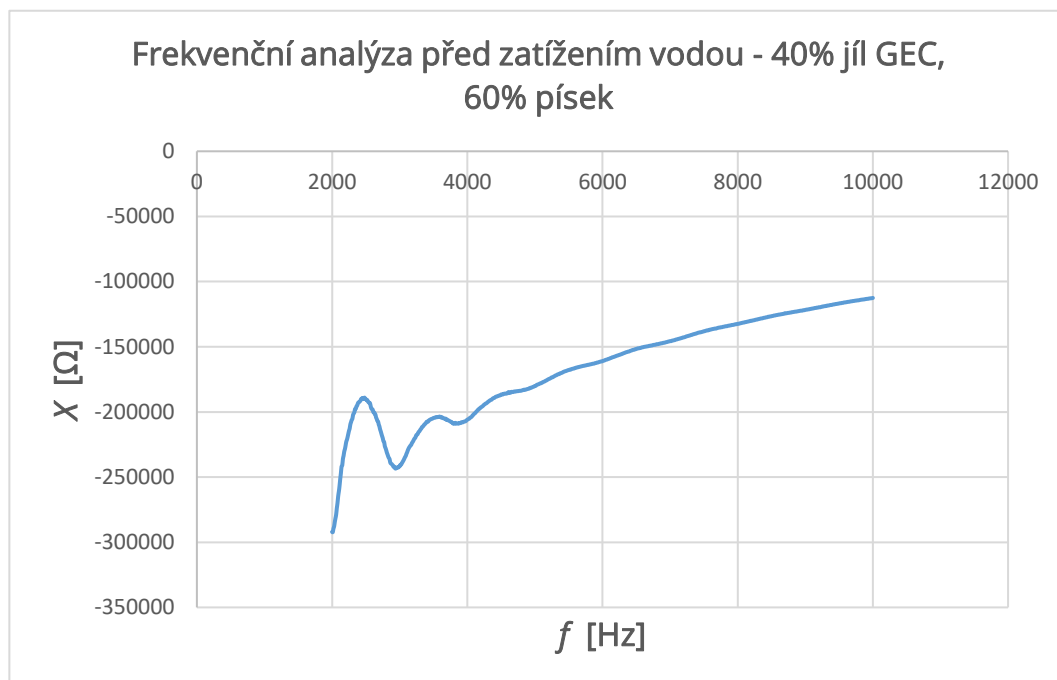
Teplota v místnosti:	23,6 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,128 kg (1,431 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,225 kg (1,528 kg)



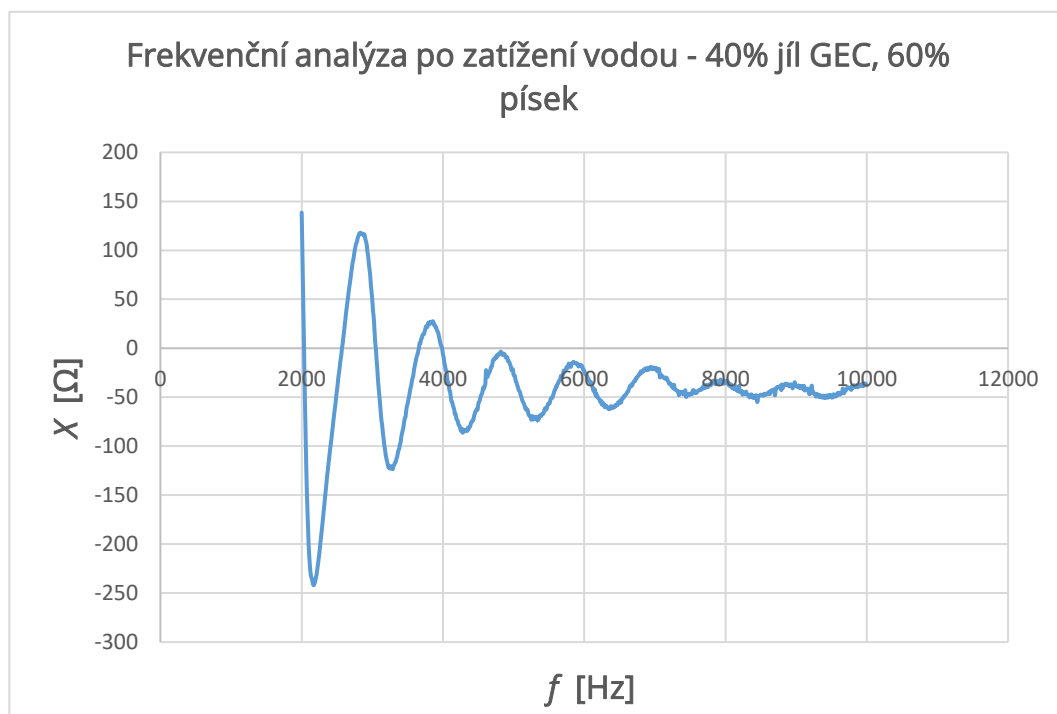
Obr. 6.8.1 – Vzorek zeminy 40% jílu GEC a 60% písek

6.8.2 Výsledky frekvenčních analýz

Graf. 6.8.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 40% jíł GEC, 60% písek

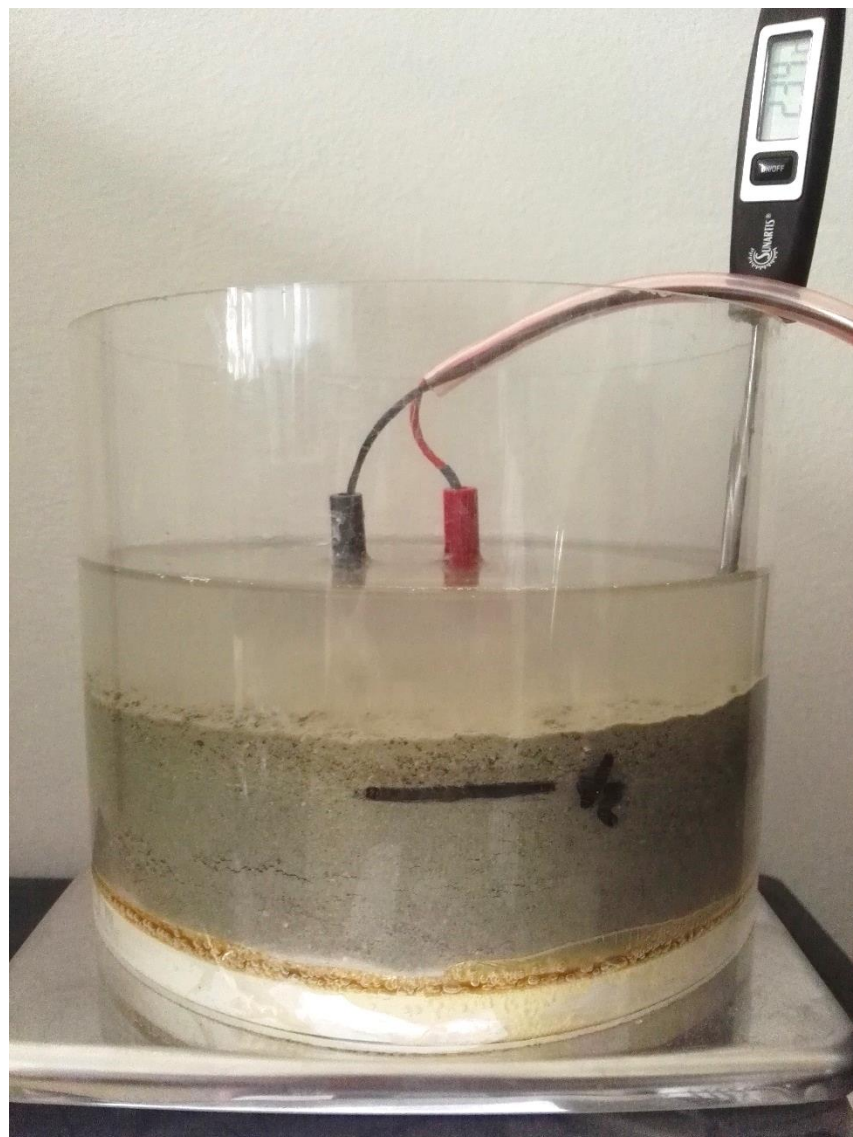


Graf. 6.8.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 40% jíł GEC, 60% písek



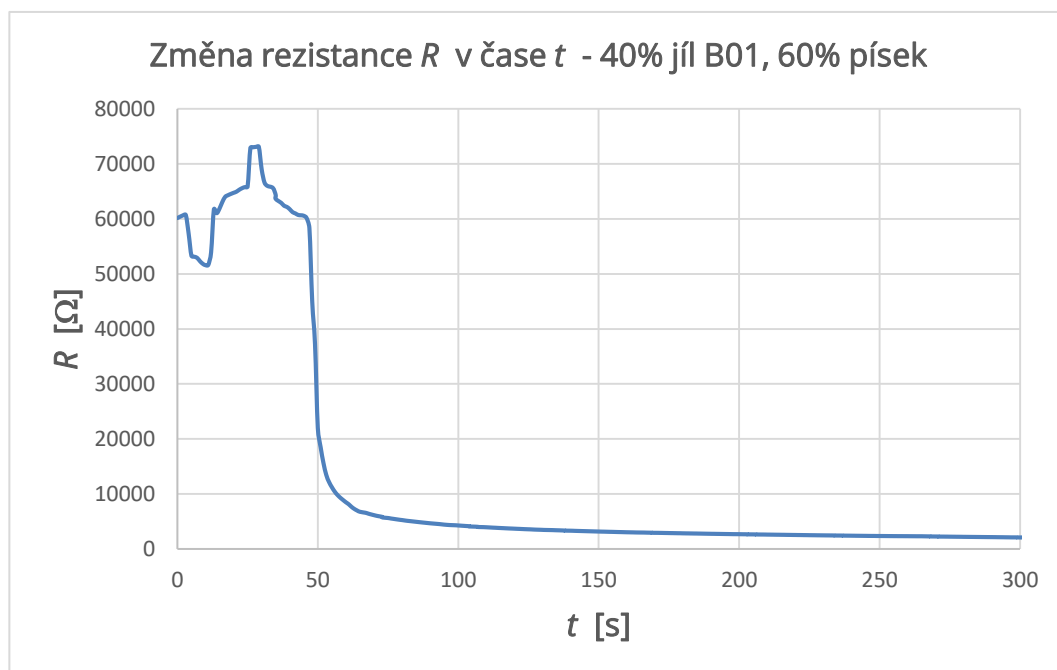
6.8.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,086 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,074 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,214 kg (2,517 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	3,120 kg (2,423 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,594 kg (1,896 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,011 m



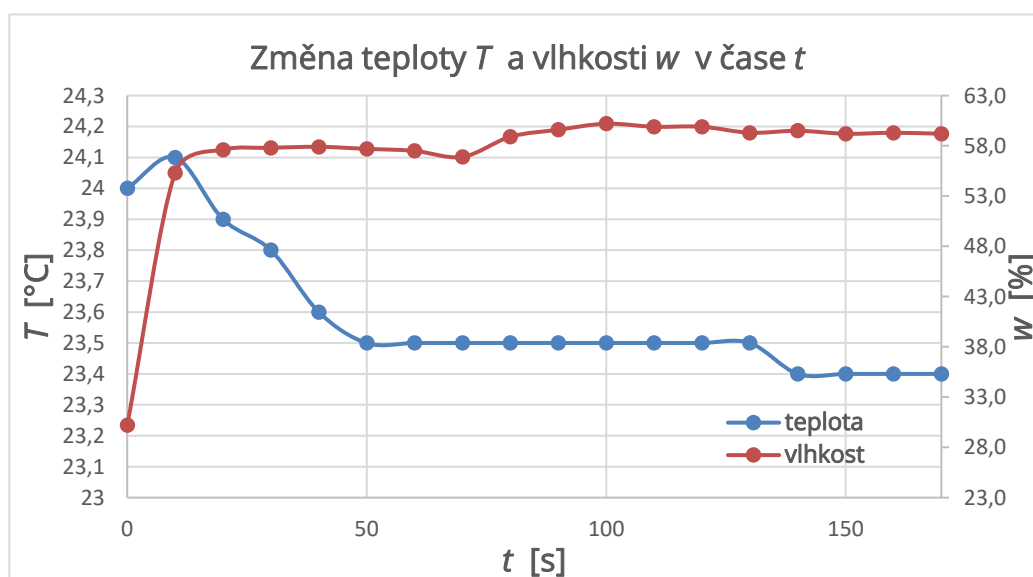
Obr. 6.8.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 40% jílu GEC

Graf. 6.8.3 - Změna rezistance R v čase t - 40% jílu GEC, 60% písek



Počáteční pokles hodnot R v čase $t = 3$ s lze přisoudit preferenční cestě proudění vody do měřeného profilu a nárůst v čase $t = 25$ s úniku vzduchu. Další 20% navýšení podílu jílu ve směsi vzorku způsobí téměř 50% zvětšení doby zadržení vody na jeho povrchu. Po cca 200 s lze považovat průběh křivky $R = f(t)$ za konstantní, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jílu GEC zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 27,5 %.

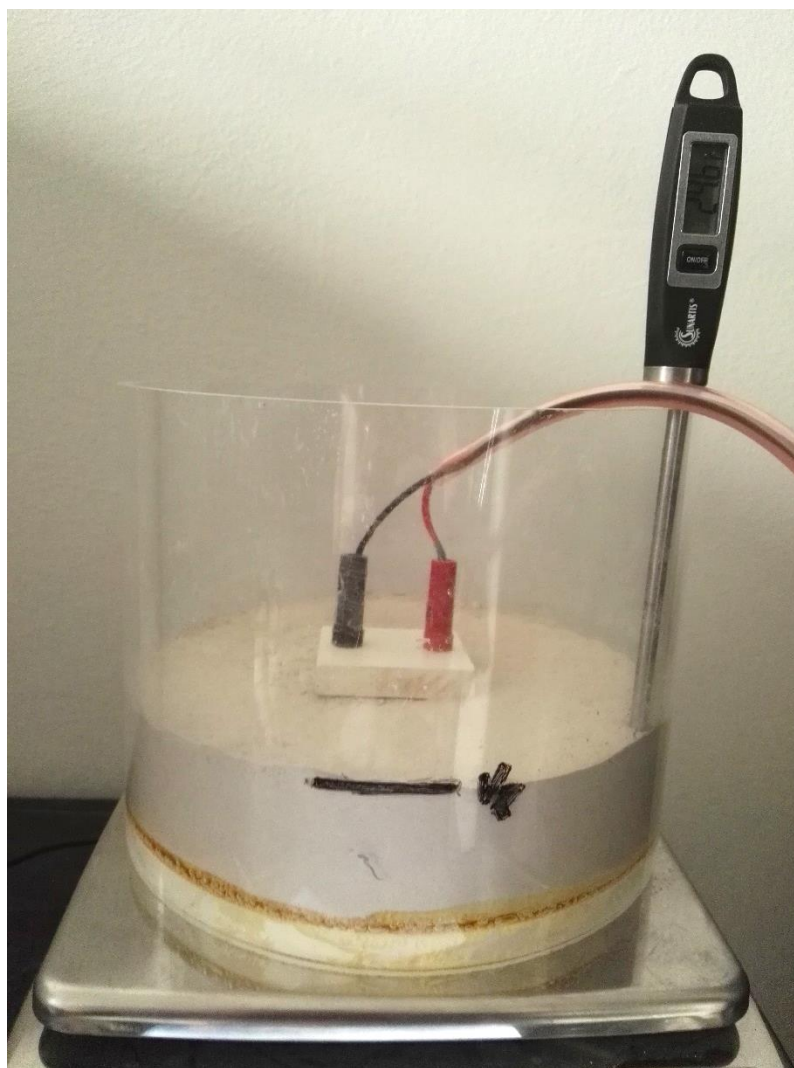
Graf. 6.8.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.9 JÍL GEC 60%, PÍSEK 40%

6.9.1 Vstupní parametry měření

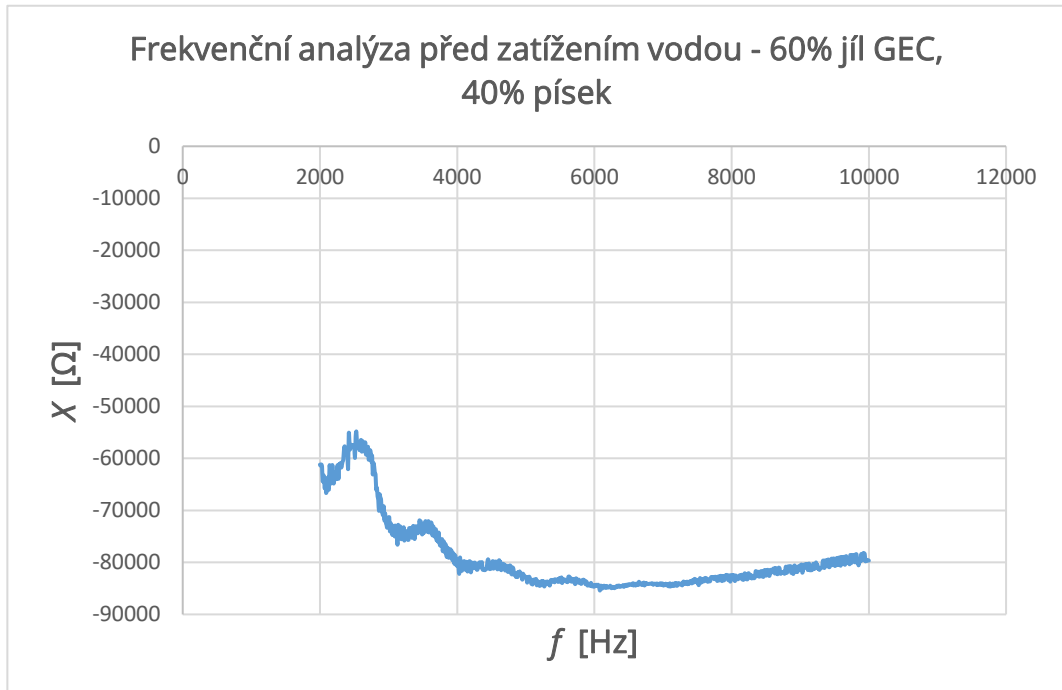
Teplota v místnosti:	25,7 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,959 kg (1,262 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,056 kg (1,359 kg)



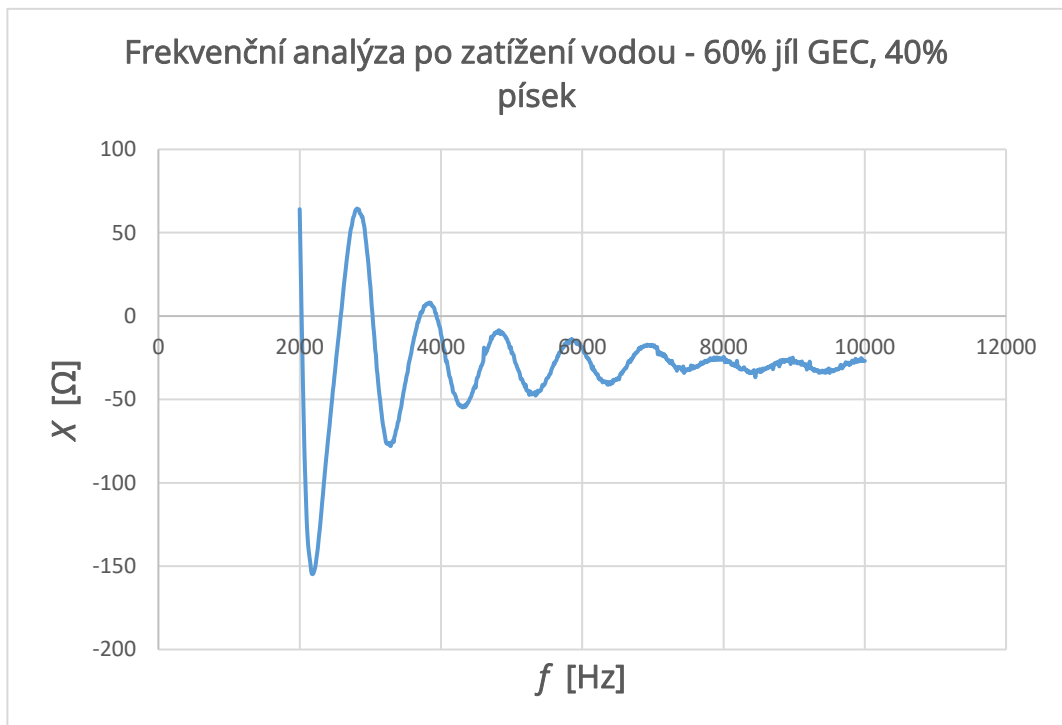
Obr. 6.9.1 - Vzorek zeminy 60% jílu GEC a 40% písek

6.9.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.9.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 60% jíł GEC, 40% písek

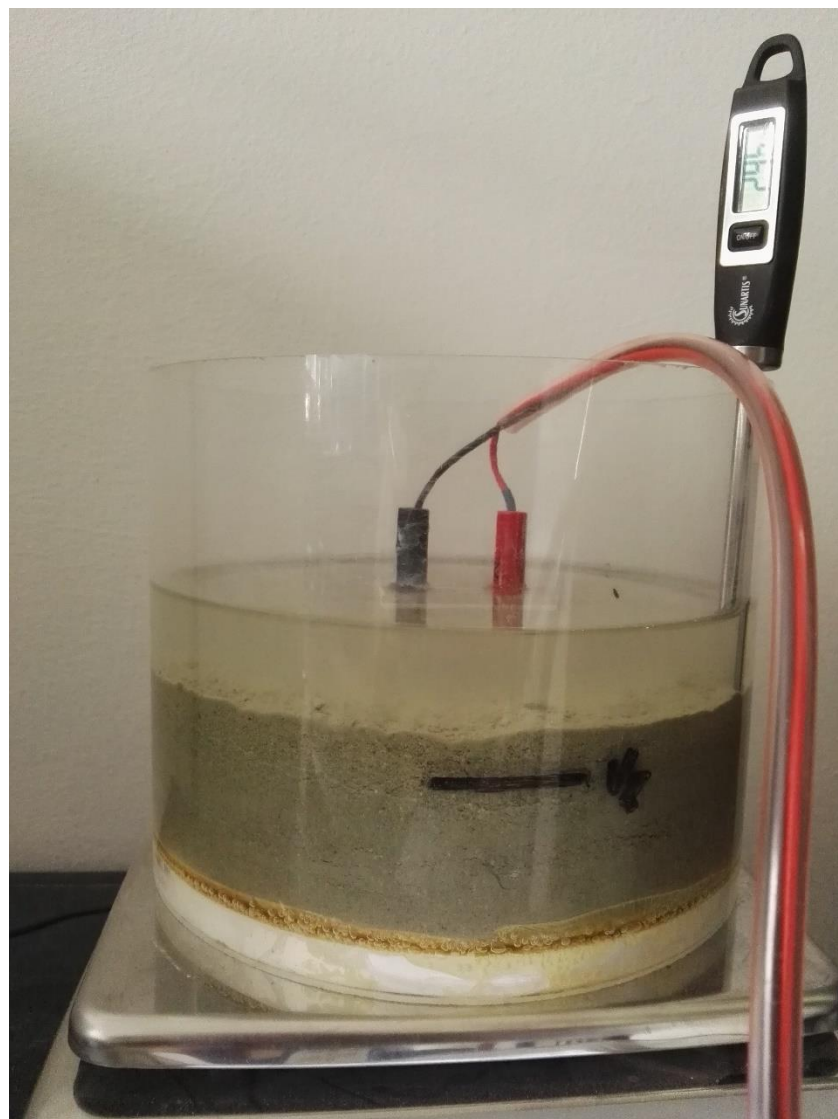


Graf. 6.9.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 60% jíł GEC, 40% písek



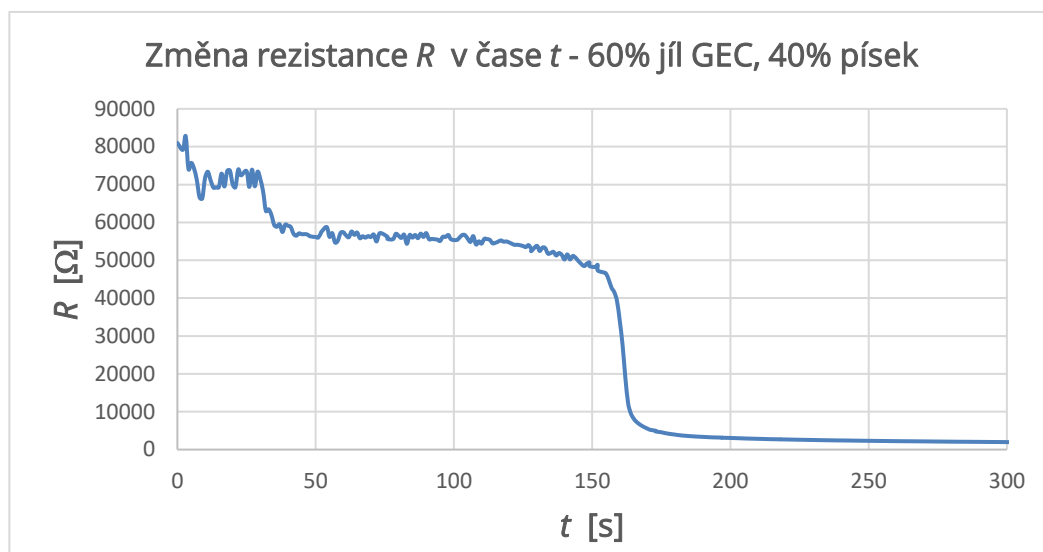
6.9.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,084 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,074 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,998 kg (2,301 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,905 kg (2,208 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,512 kg (1,814 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,01 m



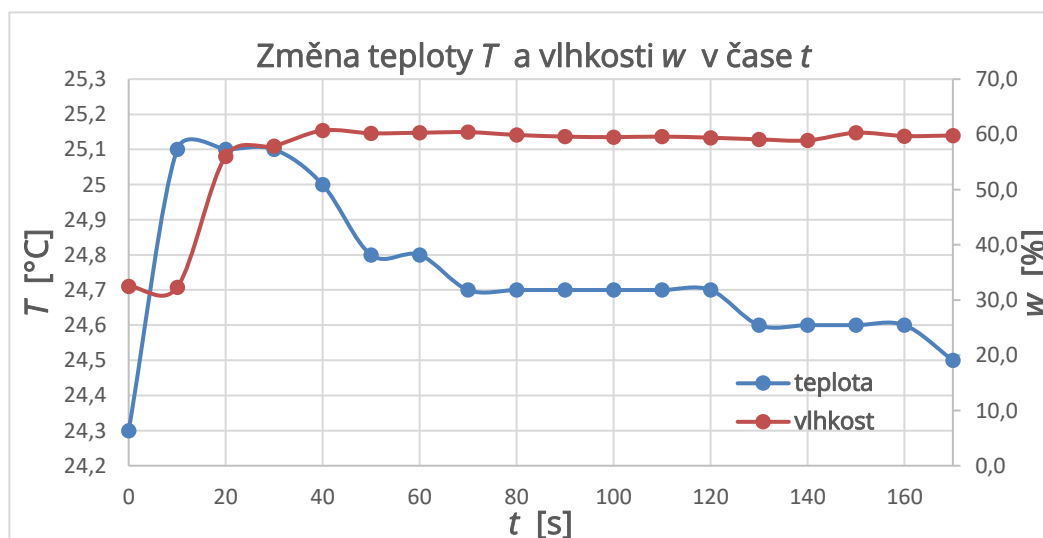
Obr. 6.9.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 60% jílu GEC

Graf. 6.9.3 - Změna rezistance R v čase t - 60% jílu GEC, 40% písek



Oproti předchozímu měření, kde byl obsah jílu GEC 40%, je při jeho 60% zastoupení doba zadržení vody na povrchu vzorku zeminy 155 s, oproti předchozím 47 s, tj. přibližně 3× delší. Stejně jako u vzorku s jílem B01 lze pozorovat postupný proces vsaku vody do jednotlivých hloubek se střídáním vertikálního a horizontálního směru proudění vody. Výrazný únik vzduchových bublin měřeným profilem zaznamenán nebyl. Průběh křivky $R = f(t)$ lze považovat za konstantní cca od 250 s, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jílu GEC zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 25,0 %, což je obdobné jako u předchozího vzorku.

Graf. 6.9.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.10 JÍL GEC 80%, PÍSEK 20%

6.10.1 Vstupní parametry měření

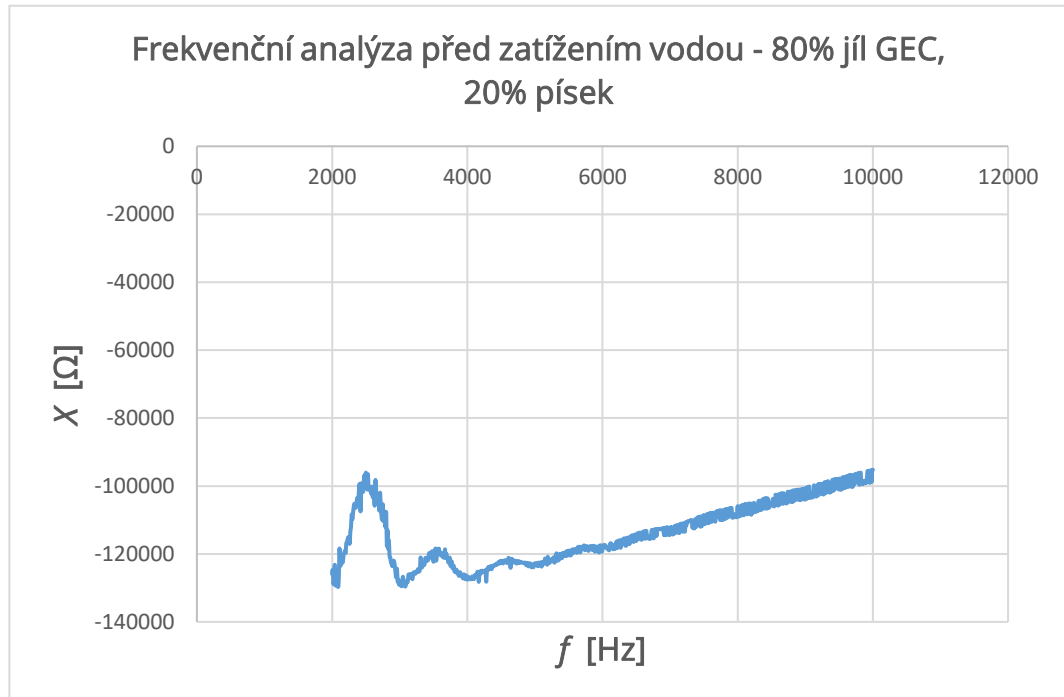
Teplota v místnosti:	25,6 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,850 kg (1,153 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	1,942 kg (1,245 kg)



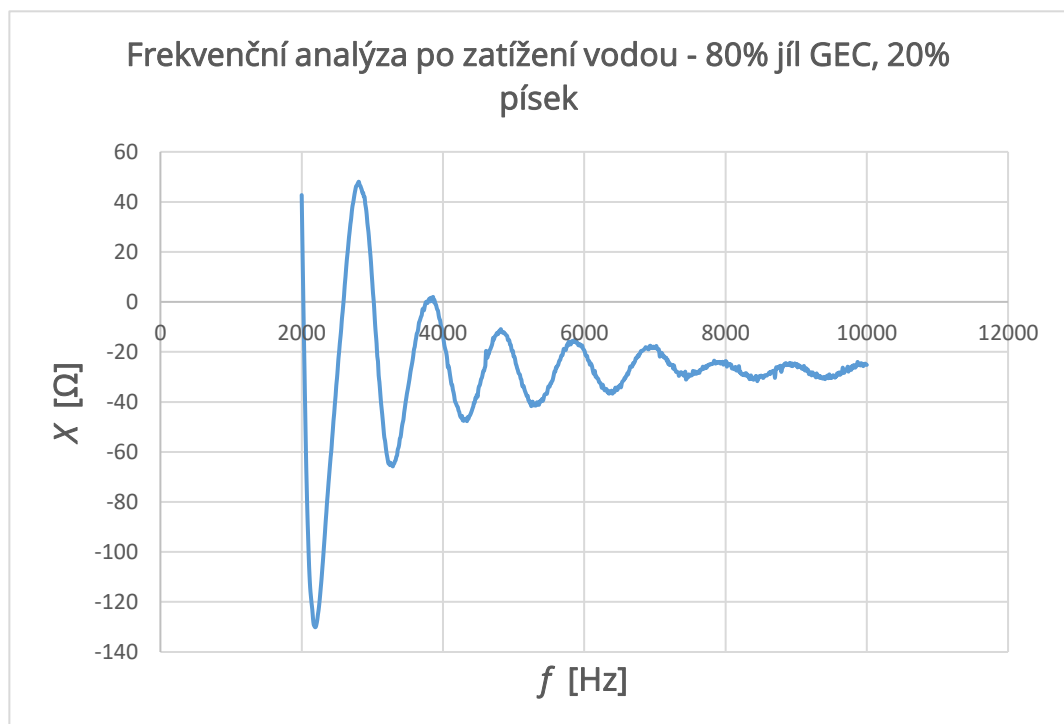
Obr. 6.10.1 – Vzorek zeminy 80% jílu GEC a 20% písek

6.10.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.10.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 80% jíł GEC, 20% písek

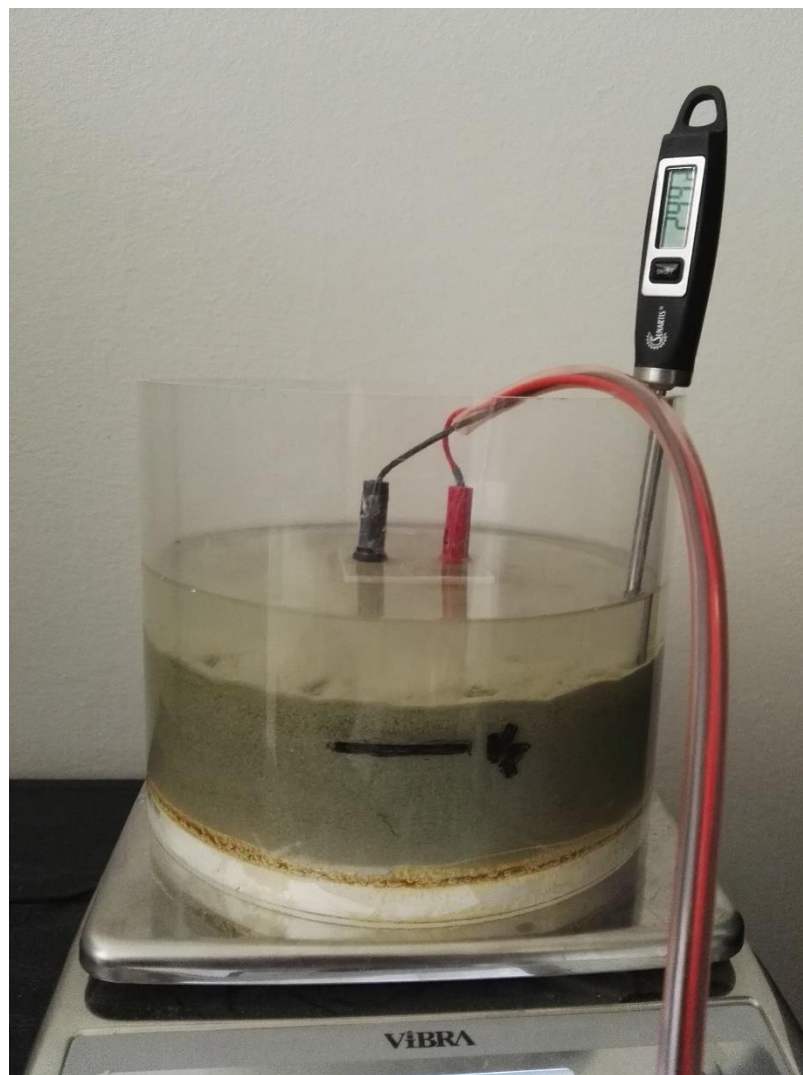


Graf. 6.10.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou - 80% jíł GEC, 20% písek



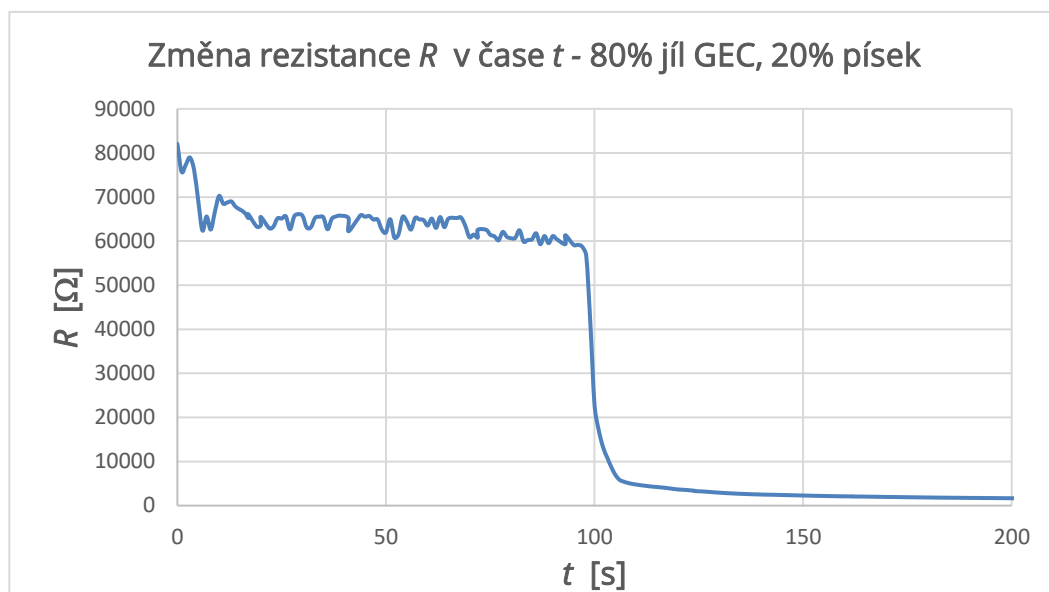
6.10.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,084 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,074 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,914 kg (2,217 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,821 kg (2,123 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,456 kg (1,759 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,013 m



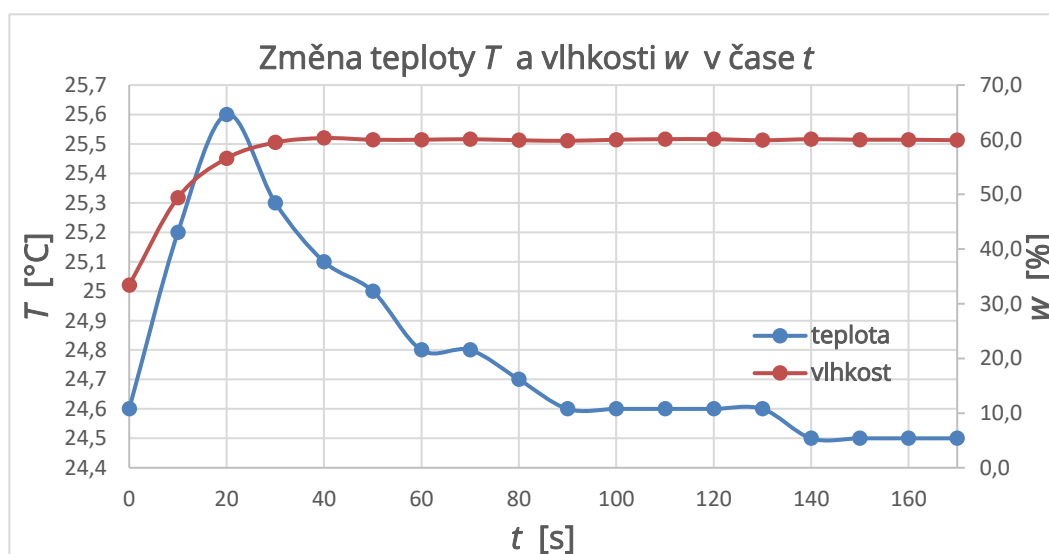
Obr. 6.10.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 80% jí GEC

Graf. 6.10.3 - Změna rezistance R v čase t - 80% jílu GEC, 20% písek



Na grafu lze pozorovat, že stejně jako u vzorku s jílem B01, při zvýšení zastoupení jílu ve vzorku na 80 % došlo ke snížení doby zadržetí vody na povrchu vzorku, zde byla zjištěna doba 90 s. Rovněž lze konstatovat, že po velmi rychlém, v řádu 20 s, vsaku do hloubky cca 2,0 cm po dobu 70 s pravděpodobně převládal horizontální směr proudění bez výrazného úniku vzduchu. Průběh křivky $R = f(t)$ lze považovat za konstantní cca od 160 s, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jílu GEC zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 32,5 %.

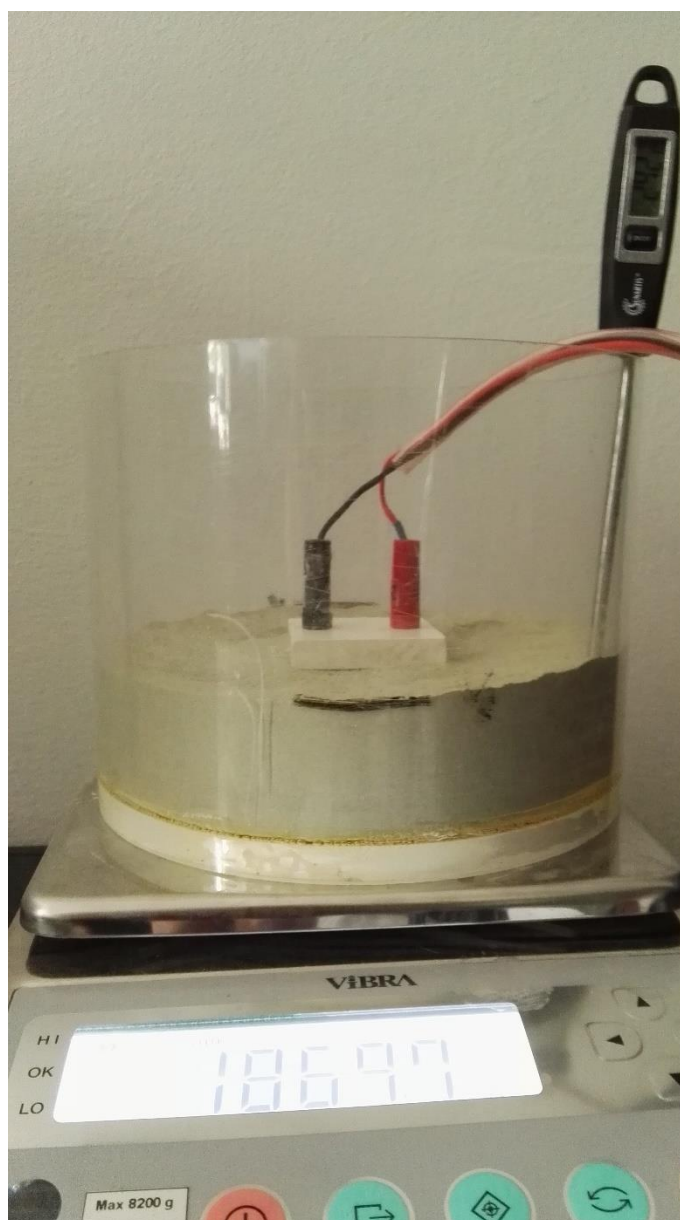
Graf. 6.10.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.11 JÍL GEC 100%

6.11.1 Vstupní parametry měření

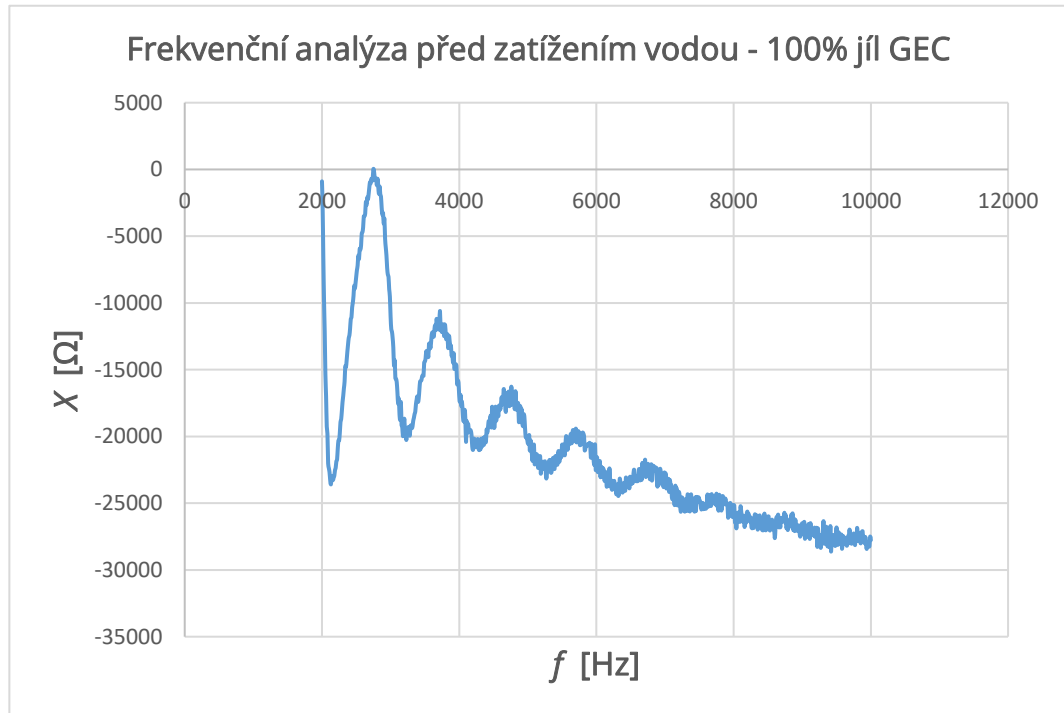
Teplota v místnosti:	26,2 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,773 kg (1,076 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	1,869 kg (1,172 kg)



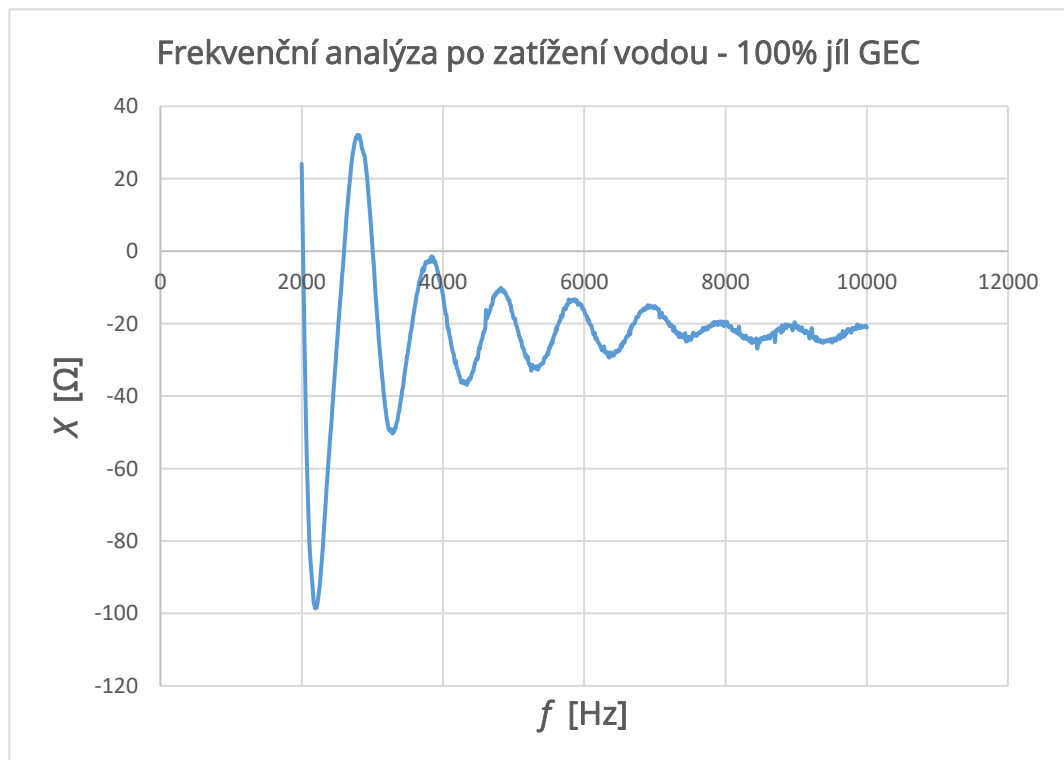
Obr. 6.11.1 – Vzorek zeminy 100% jílu GEC

6.11.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.11.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 100% jíł GEC

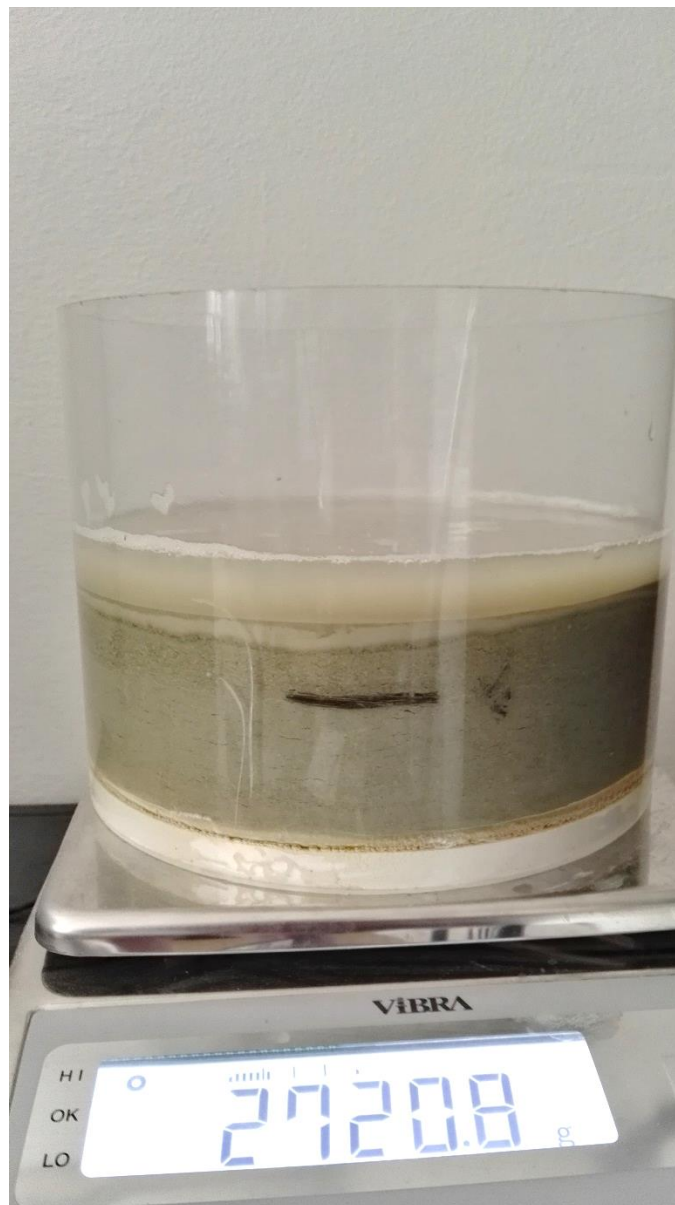


Graf. 6.11.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou - 100% jíł GEC



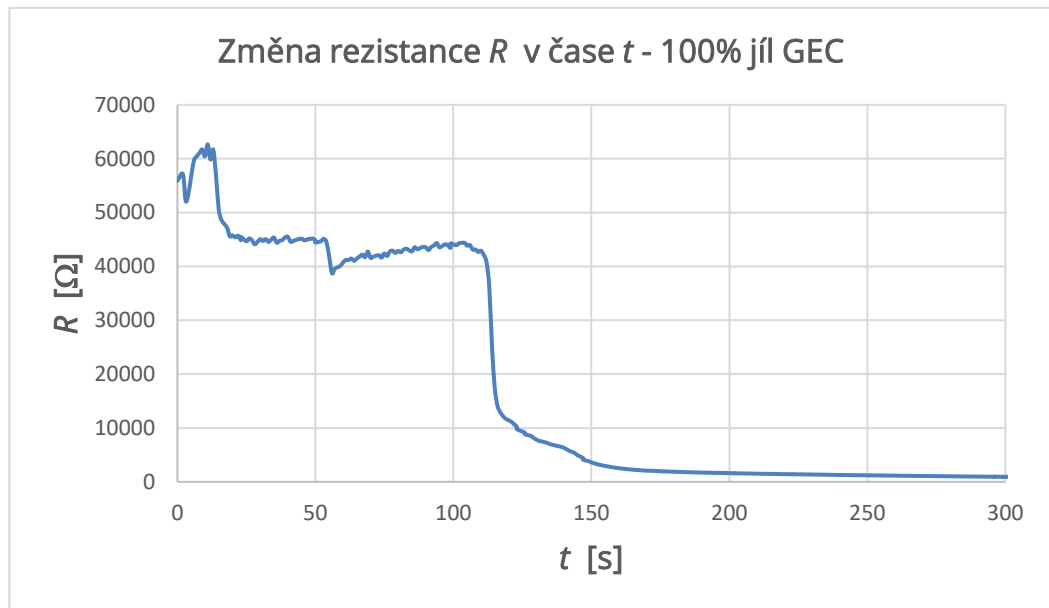
6.11.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,084 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,074 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,817 kg (2,120 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,721 kg (2,024 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,410 kg (1,713 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,013 m



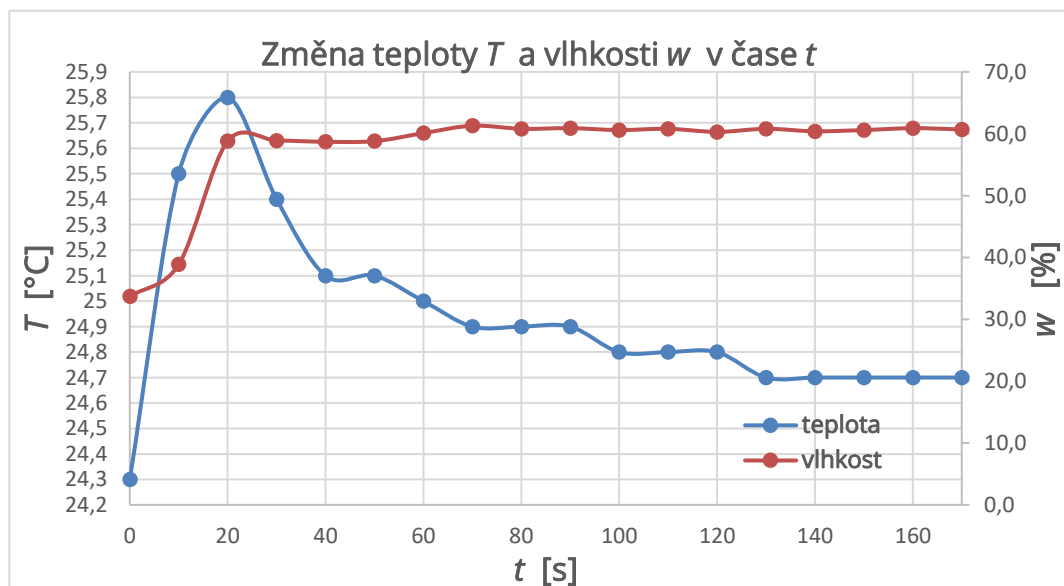
Obr. 6.11.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 100% jílu GEC

Graf. 6.11.3 - Změna rezistance R v čase t - 100% jílu GEC



V případě vzorku jílu GEC lze proti předcházející variantě experimentu konstatovat prodloužení doby zadržetí vody na povrchu vzorku o 23 s, tj. na celkových 113 s. Výrazný převládající směr vertikálního proudění vody byl zaznamenán ve 30 s a 60 s od zatížení povrchu vzorku vodou. Průběh křivky $R = f(t)$ lze považovat za konstantní cca od 300 s, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jílu GEC zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 32,5 %, což je obdobné jako u předchozího vzorku.

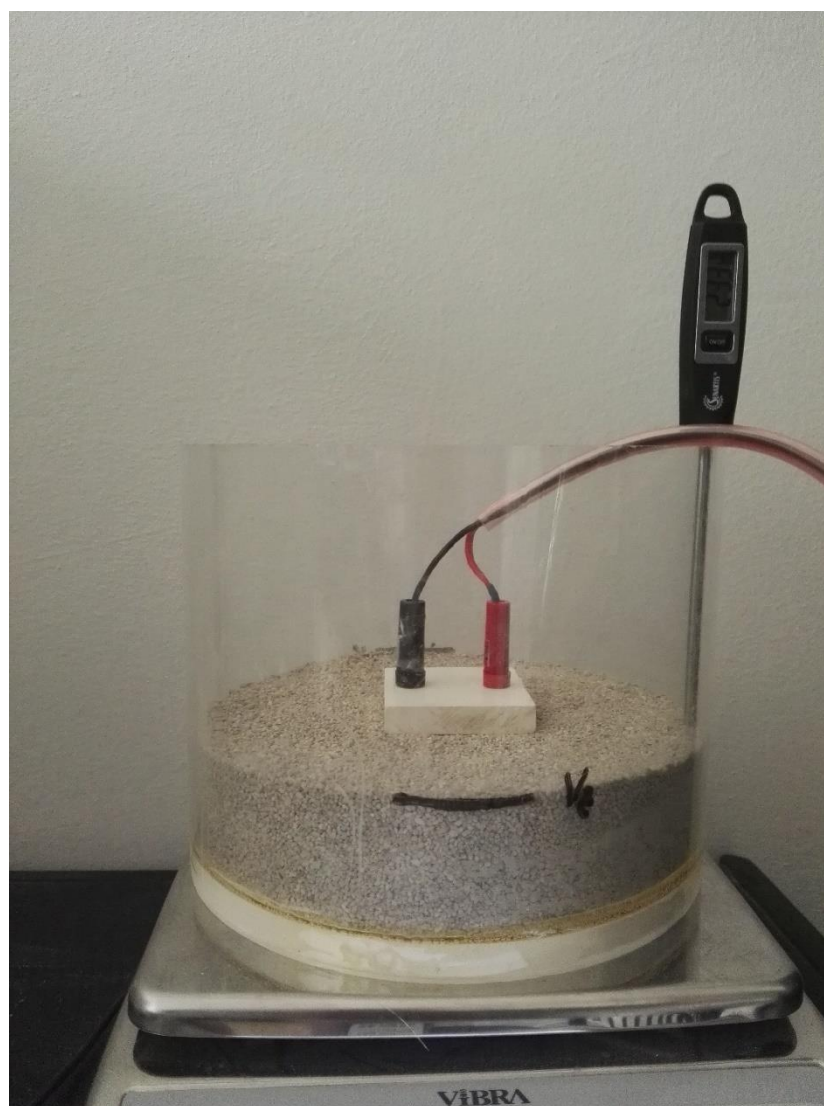
Graf. 6.11.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.12 JÍL GEM 20%, PÍSEK 80%

6.12.1 Vstupní parametry měření

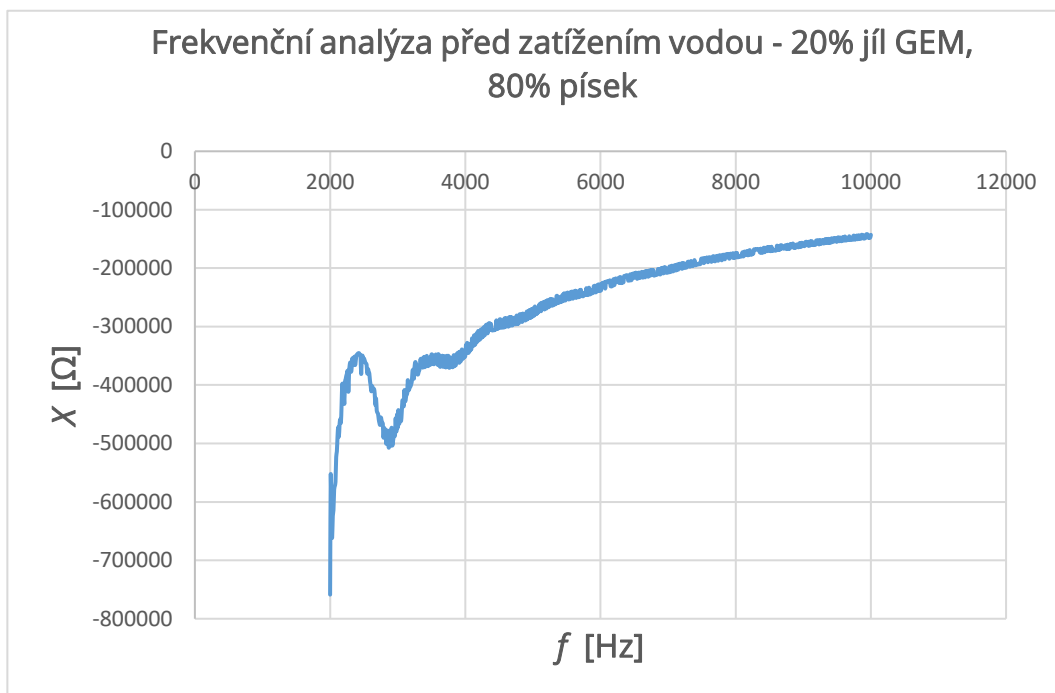
Teplota v místnosti:	24,3 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,244 kg (1,546 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,333 kg (1,636 kg)



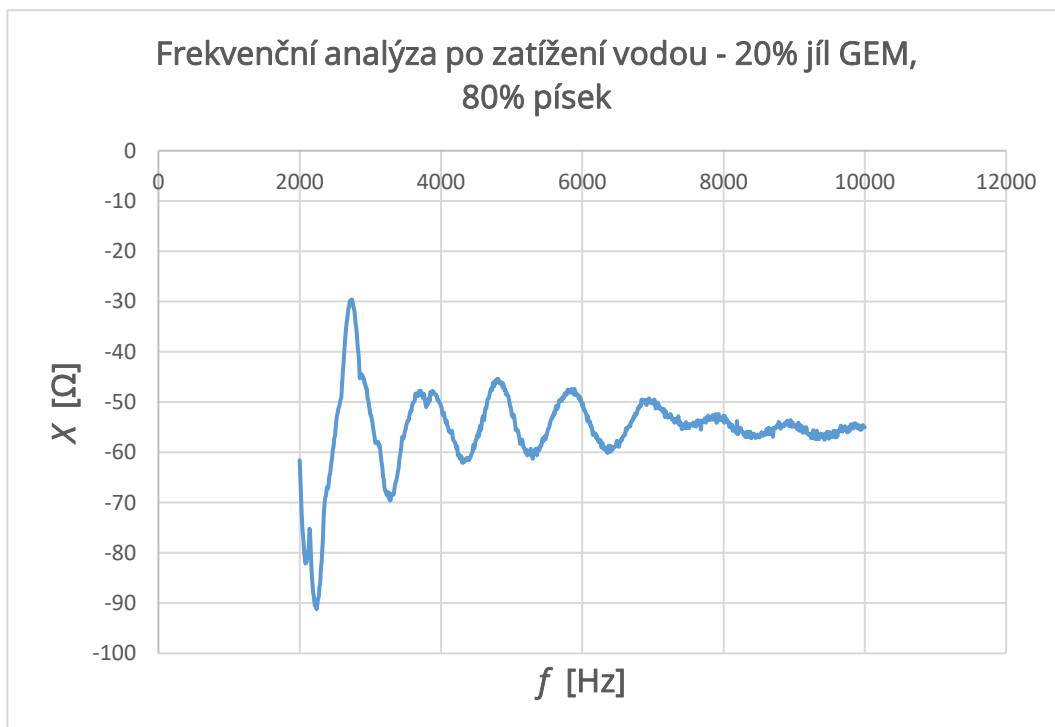
Obr. 6.12.1 – Vzorek zeminy 20% jílu GEM, 80% písek

6.12.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.12.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 20% jíl GEM, 80% písek

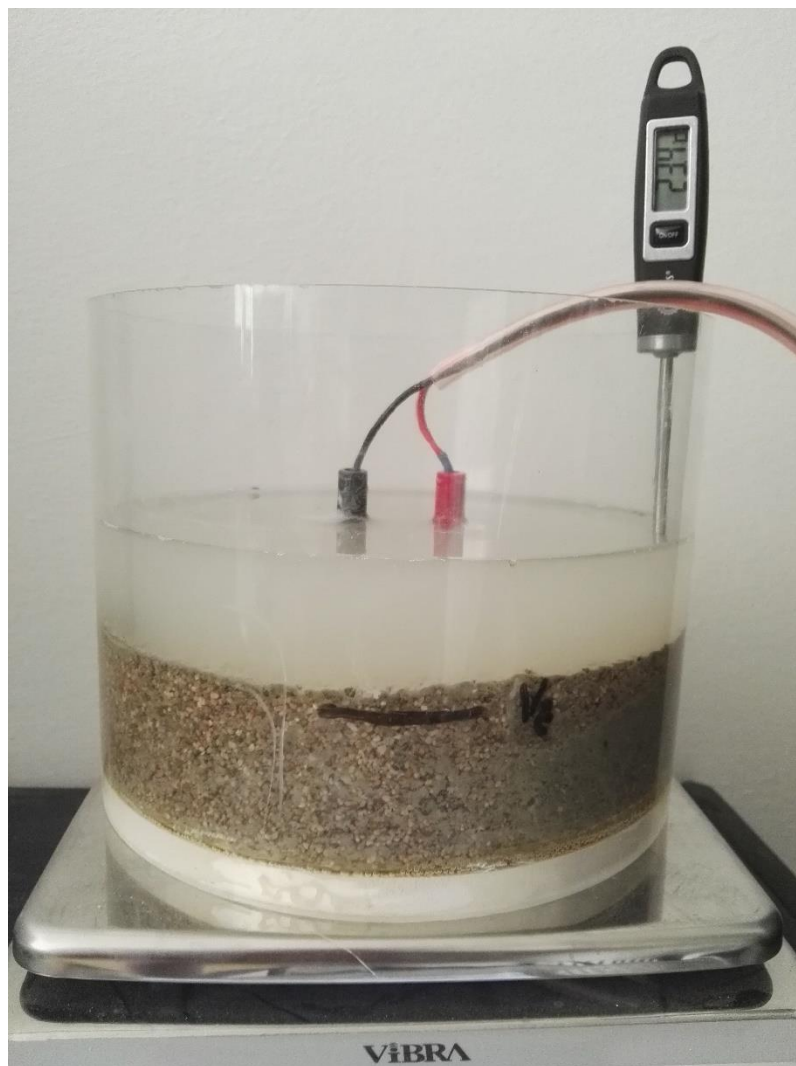


Graf. 6.12.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou - 20% jíl GEM, 80% písek



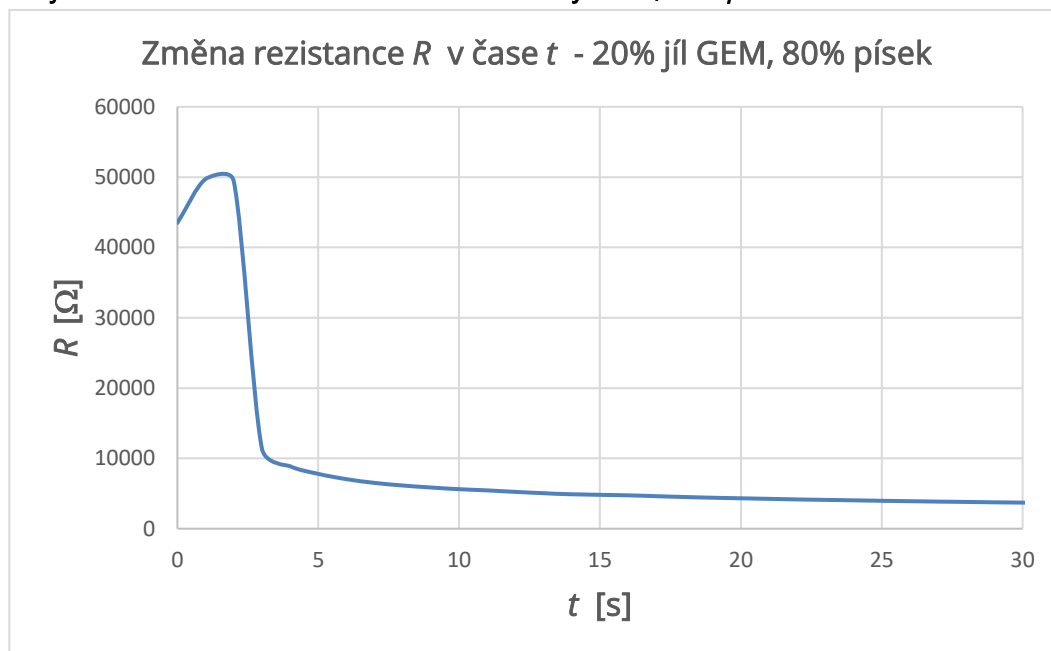
6.12.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,084 m
Výška hladiny po ukončení měření:	0,076 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,327 kg (2,630 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	3,234 kg (2,537 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,672 kg (1,975 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,004 m



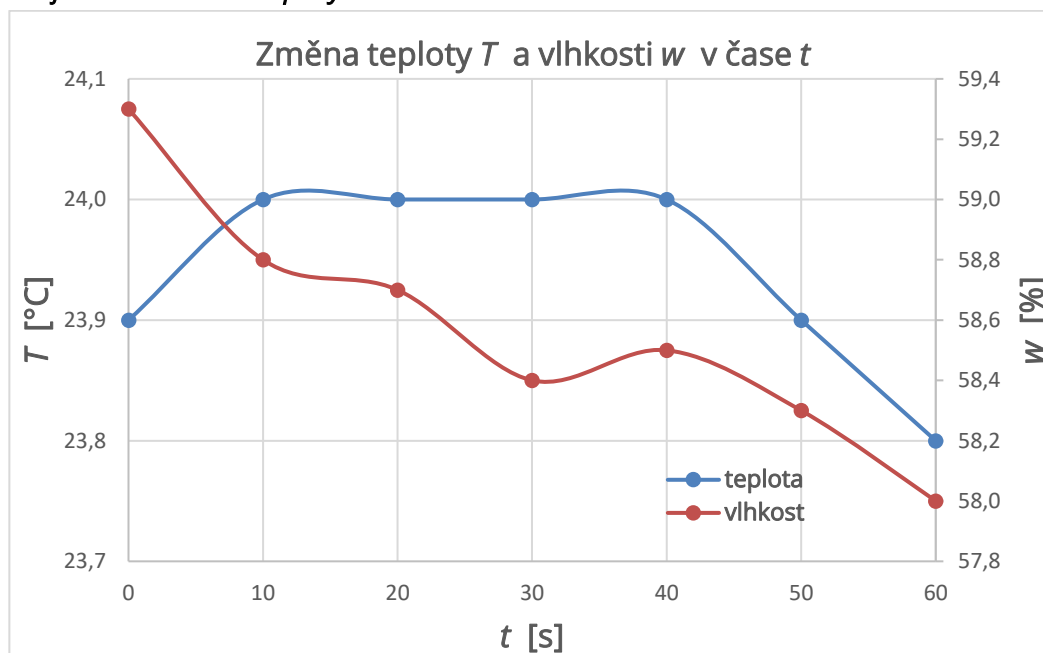
Obr. 6.12.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 20% jílu GEM

Graf. 6.12.3 – Změna rezistance R v čase t - 20% jílu GEM, 80% písek



Z grafu je patrné, že při 20% obsahu jílu GEM ve vzorku zeminy je doba zadržetí vody na jeho povrchu krátká, cca 2 s. Výrazný je však únik vzduchu hned po zatížení vzorku. Průběh křivky $R = f(t)$ lze považovat za konstantní cca od 20 s, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jílu GEM zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 10,0 %.

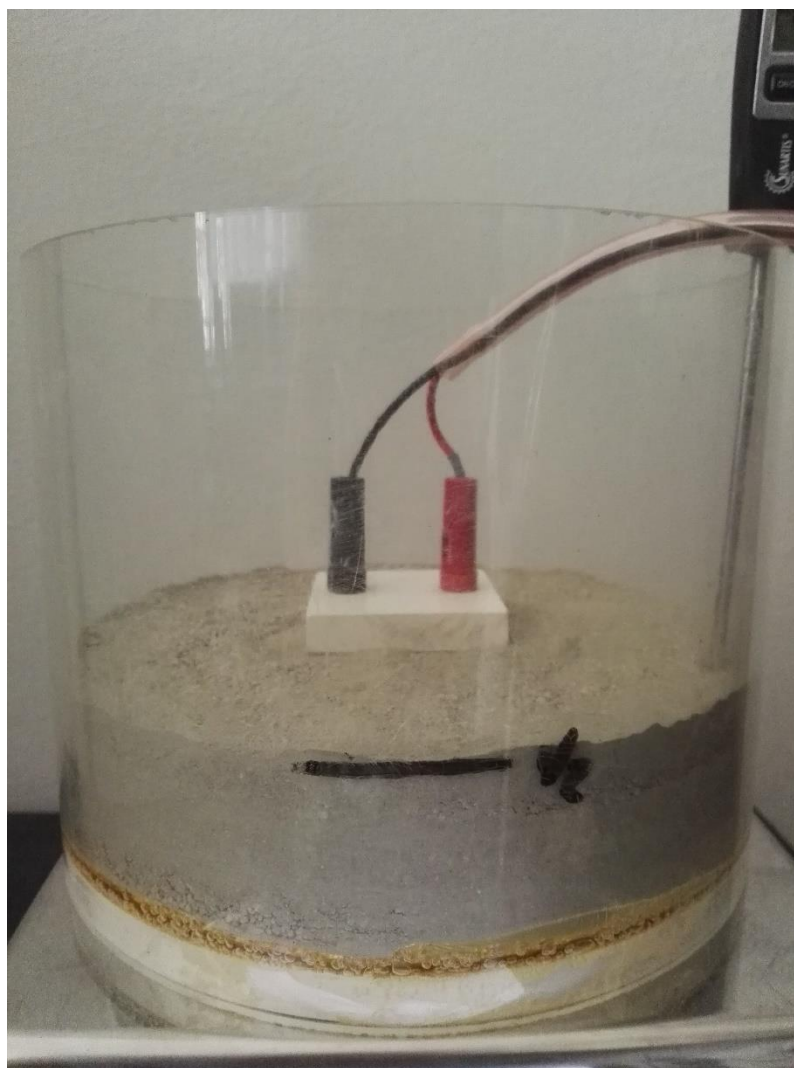
Graf. 6.12.4 – Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.13 JÍL GEM 40%, PÍSEK 60%

6.13.1 Vstupní parametry měření

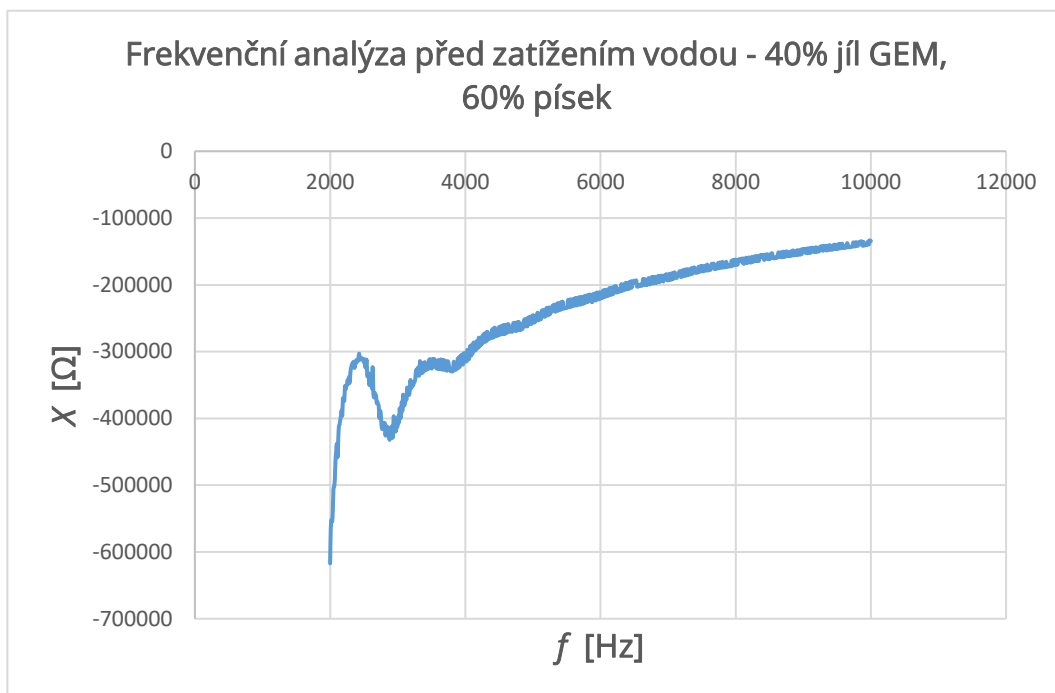
Teplota v místnosti:	25,0 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,194 kg (1,497 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,291 kg (1,594 kg)



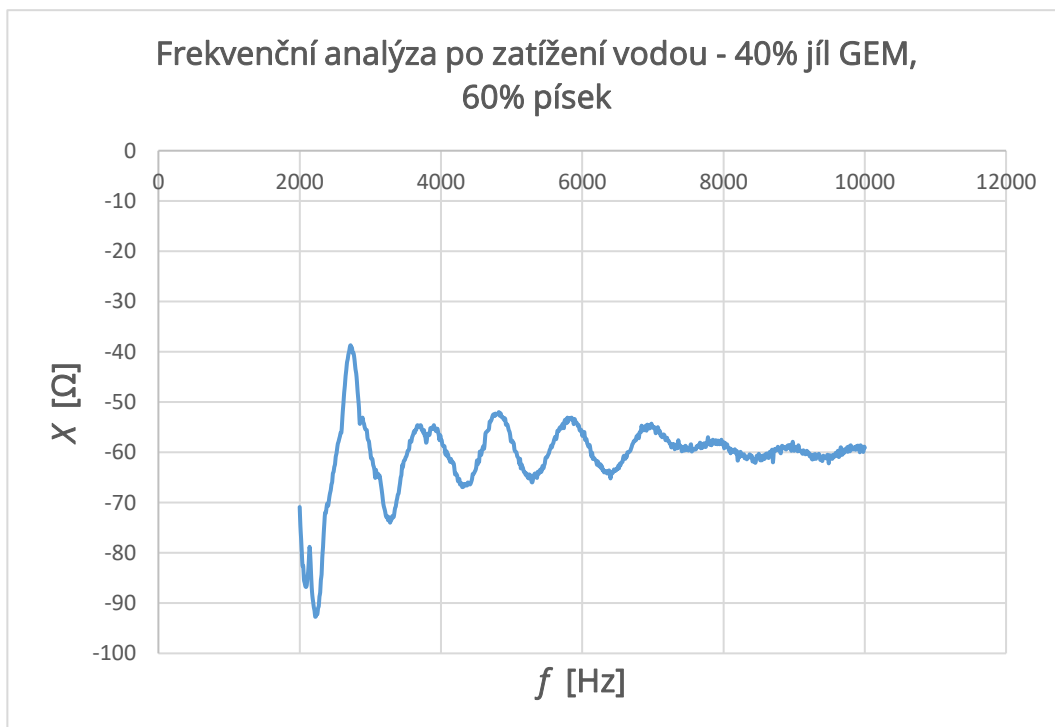
Obr. 6.13.1 - Vzorek zeminy 40% jílu GEM, 60% písek

6.13.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.13.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 40% jííl GEM, 60% písek

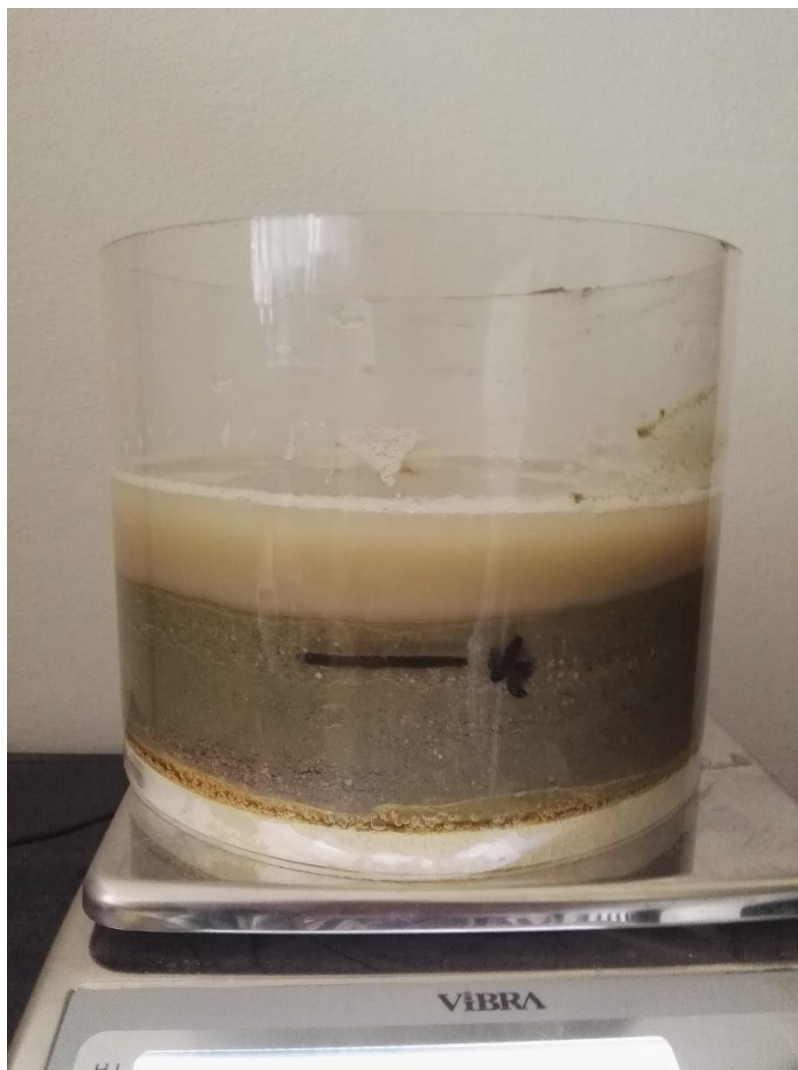


Graf. 6.13.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou - 40% jííl GEM, 60% písek



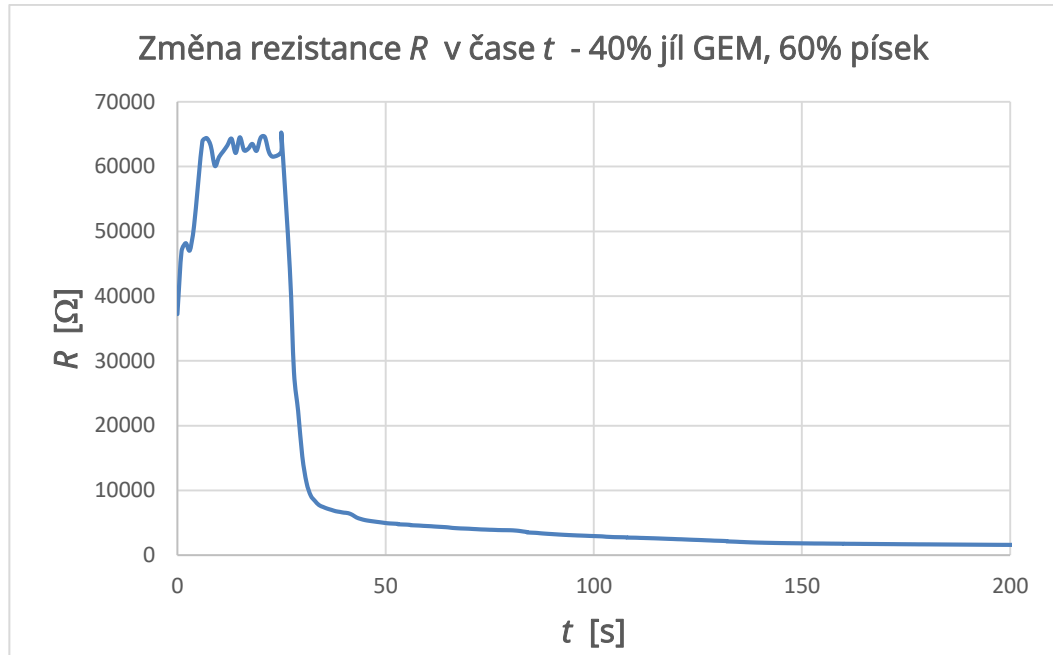
6.13.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,086 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,077 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,274 kg (2576,6 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	3,181 kg (2,484 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,721 kg (2,024 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,01 m



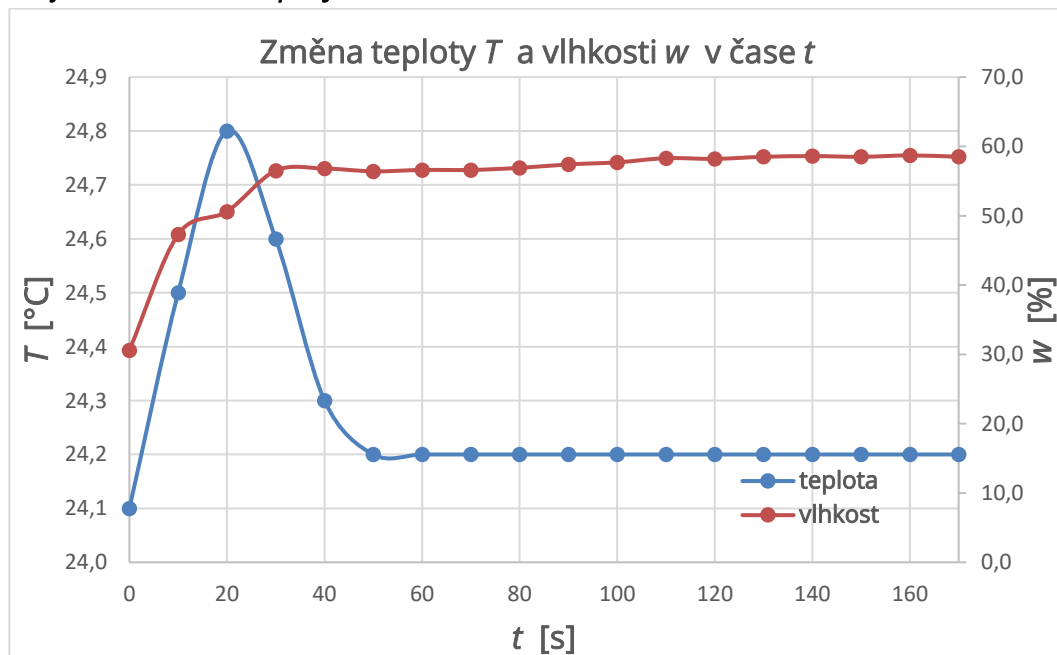
Obr. 6.13.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 40% GEM

Graf. 6.13.3 - Změna rezistance R v čase t - 40% jílu GEM, 60% písek



Po zvětšení koncentrace jílu GEM ve vzorku zeminy vzrostla doba zdržení na 25 s. Po zatížení vzorku zeminy vodou je zřejmý skokový nárůst hodnot R , což může souviset s výrazným únikem vzduchu ze vzorku. Průběh křivky $R = f(t)$ lze považovat za konstantní cca od 160 s, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jílu GEM zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 25,0 %.

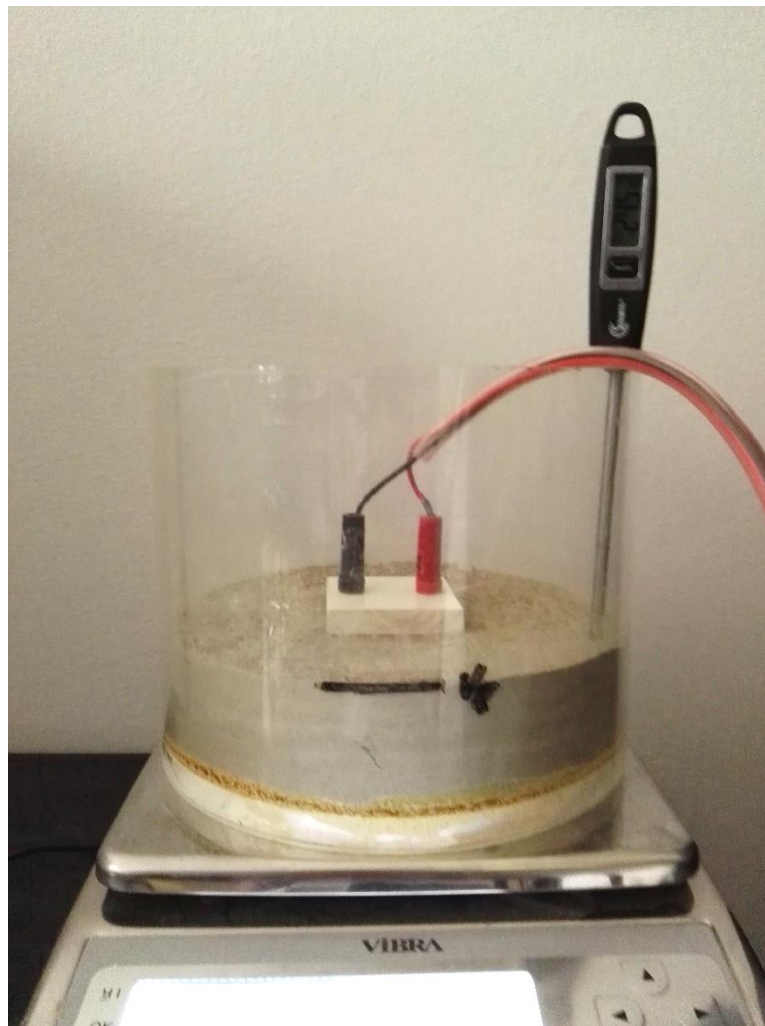
Graf. 6.13.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.14 JÍL GEM 60%, PÍSEK 40%

6.14.1 Vstupní parametry měření

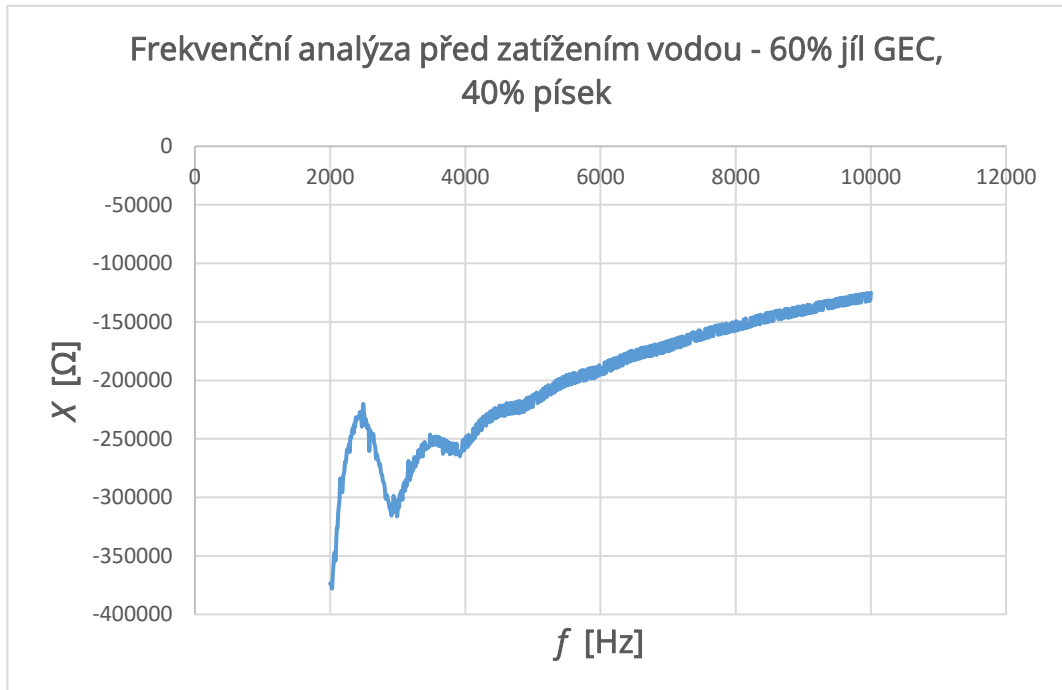
Teplota v místnosti:	24,0 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	2,008 kg (1,310 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,104 kg (1,407 kg)



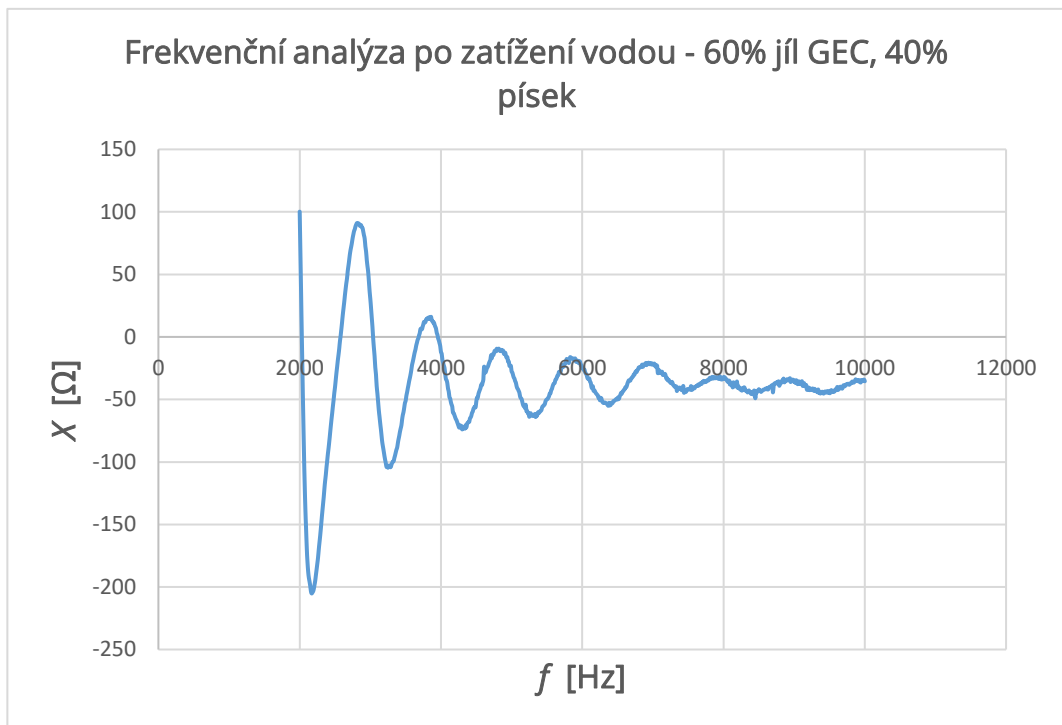
Obr. 6.14.1 – Vzorek zeminy 60% jílu GEM, 40% písek

6.14.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.14.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 60% jííl GEC, 40% písek

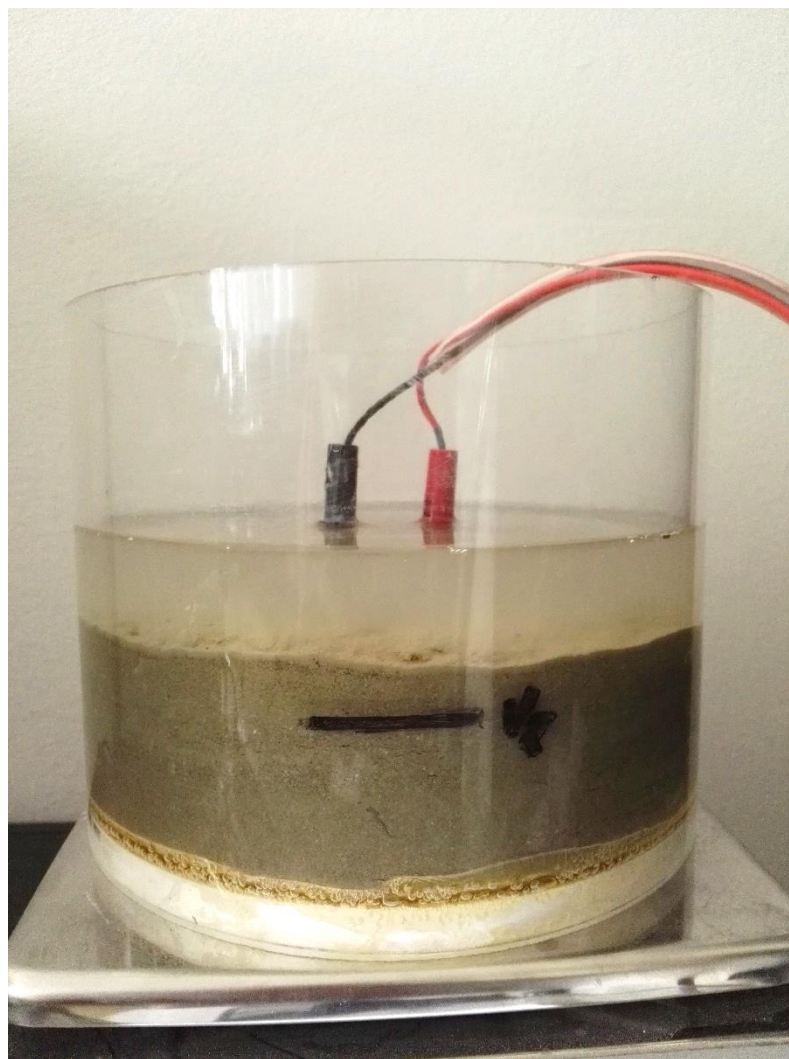


Graf. 6.14.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou - 60% jííl GEC, 40% písek



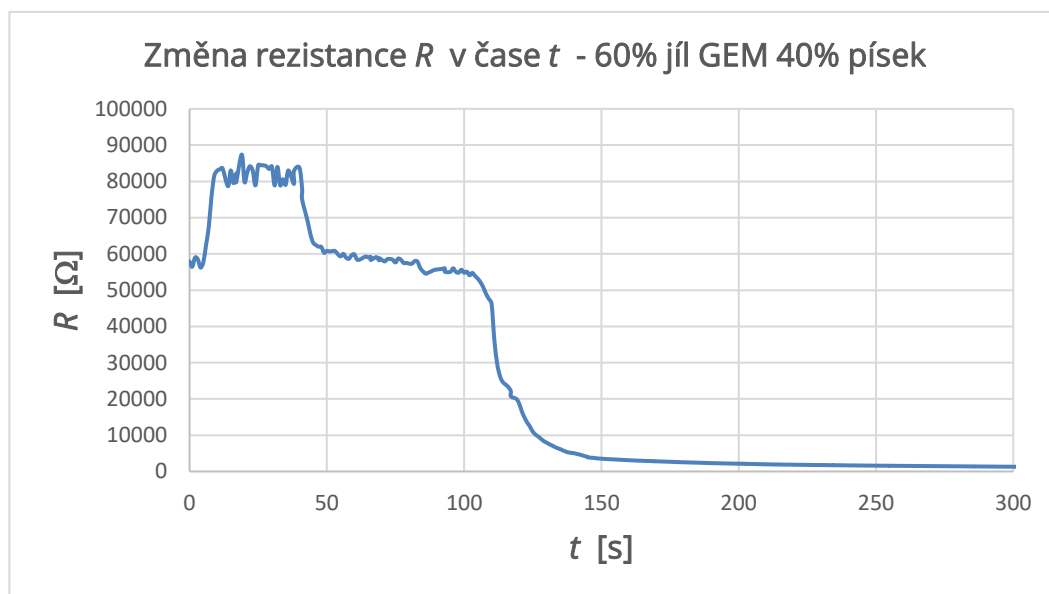
6.14.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,085 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,075 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	3,076 kg (2,379 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,979 kg (2,282 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,559 kg (1,862 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,01 m



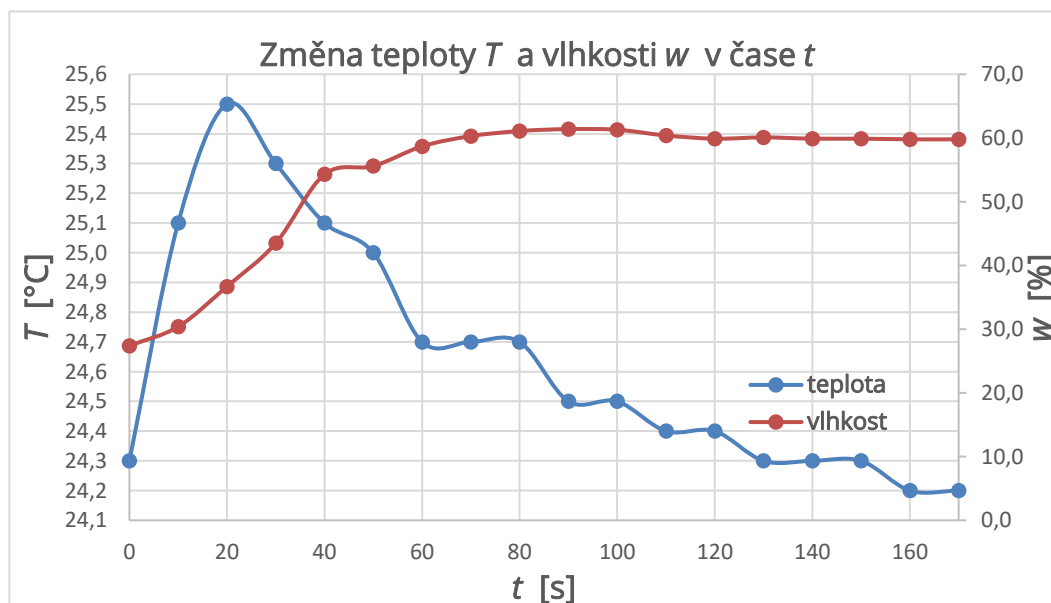
Obr. 6.14.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 60% jíl GEM

Graf. 6.14.3 - Změna rezistance R v čase t - 60% jíł GEM, 40% písek



Doba zdržení vody na povrchu vzorku je 106 s, což je téměř 5× delší doba než u předchozího vzorku. Na základě zjištěného průběhu křivky $R = f(t)$ lze v počáteční fázi konstatovat porušení vzduchového filmu na povrchu vzorku s následným únikem vzduchu a střídání horizontálního a vertikálního směru proudění vody ve vzorku. Za konstantní lze průběh křivky považovat cca od 250 s, a tedy měřený profil za kvazi nasycený. V uvedeném zastoupení jíł GEM zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 25,0 %, což je obdobné jako u předchozího vzorku.

Graf. 6.14.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.15 JÍL GEM 80%, PÍSEK 20%

6.15.1 Vstupní parametry měření

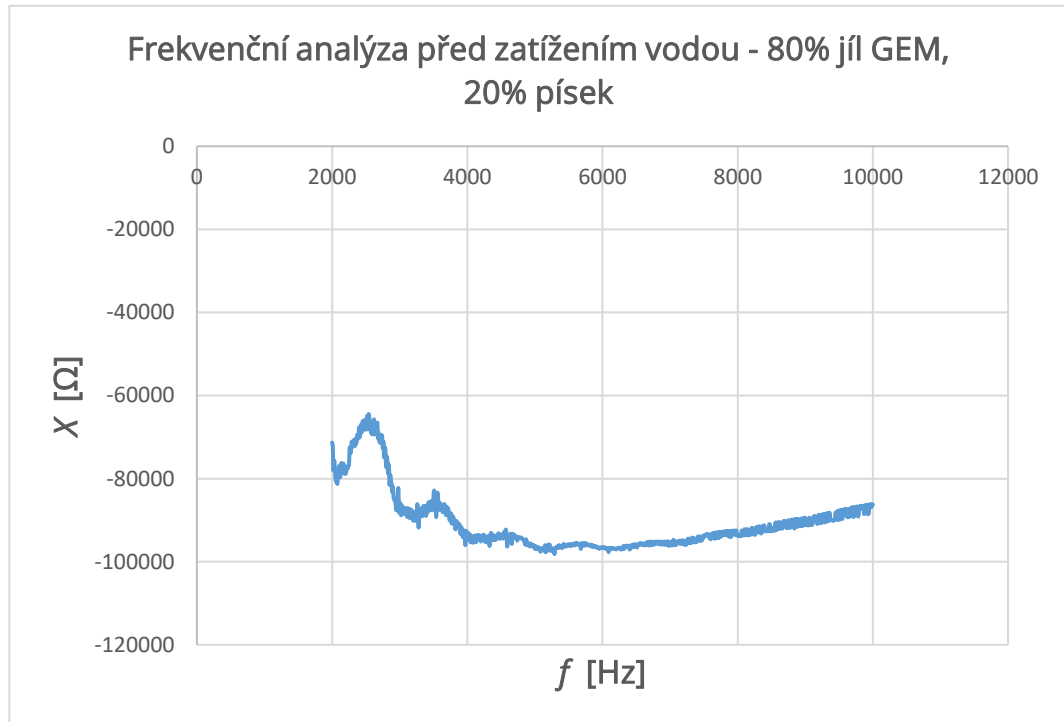
Teplota v místnosti:	25,0 °C	
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m	
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,927 kg	(1,230 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	2,021 kg	(1,323 kg)



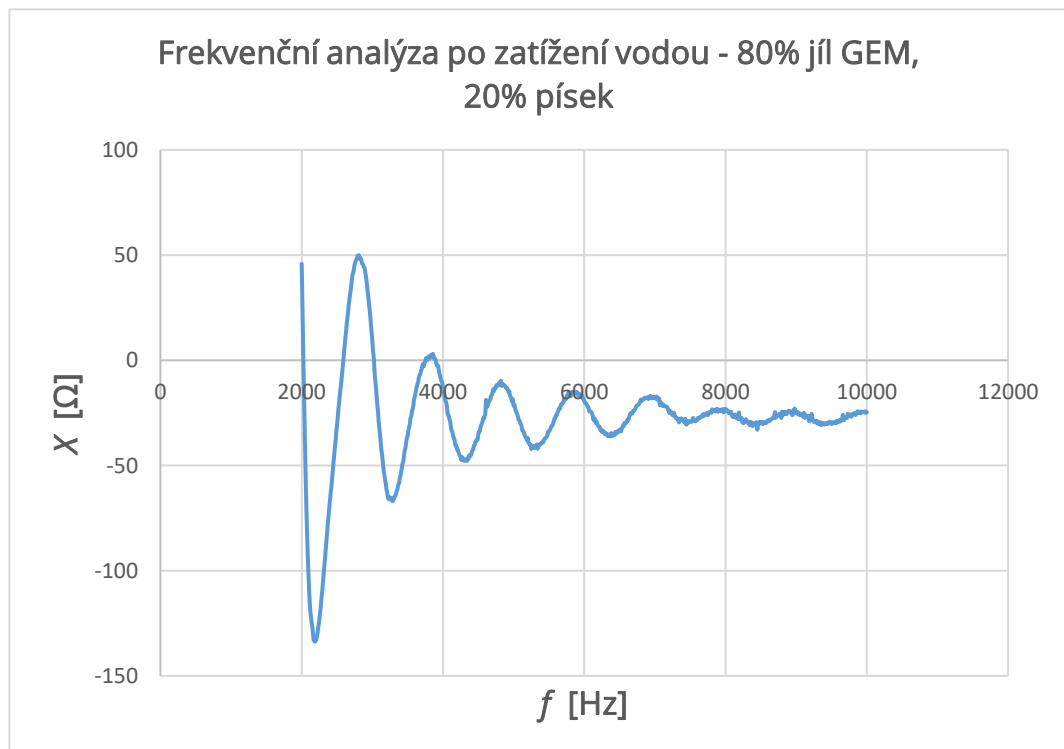
Obr. 6.15.1 - Vzorek zeminy 80% jílu GEM, 20% písek

6.15.2 Výsledky frekvenční analýzy

Graf. 6.15.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou - 80% jíł GEM, 20% písk

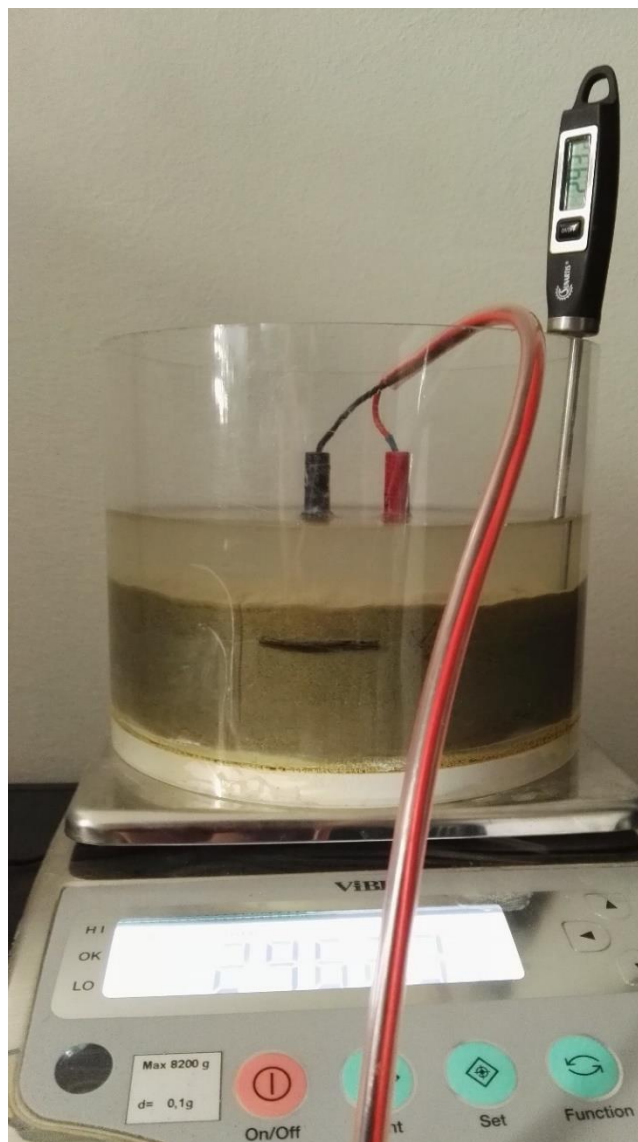


Graf. 6.15.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou - 80% jíł GEM, 20% písk



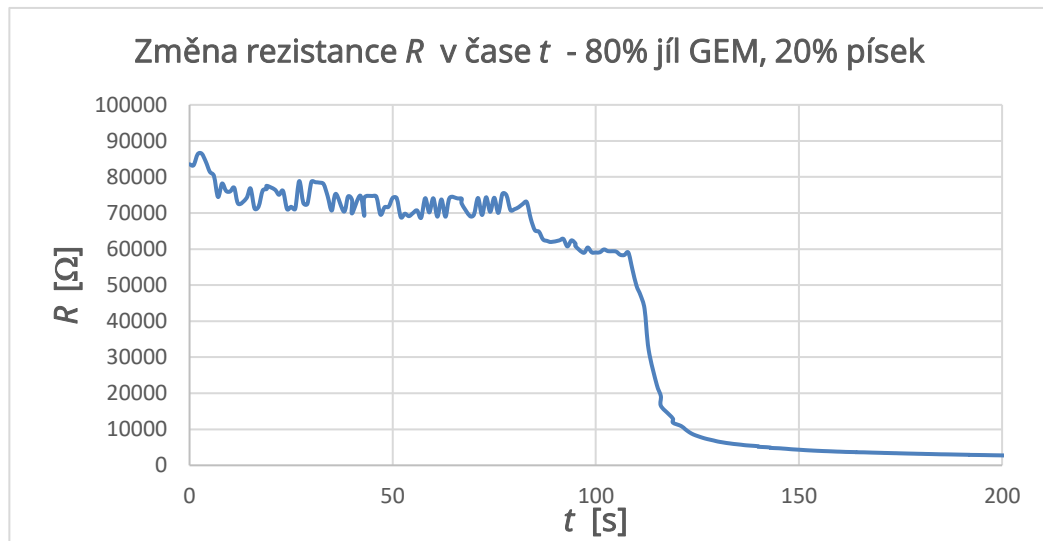
6.15.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,084 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,073 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,962 kg (2,265 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,866 kg (2,169 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,488 kg (1,791 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,013 m



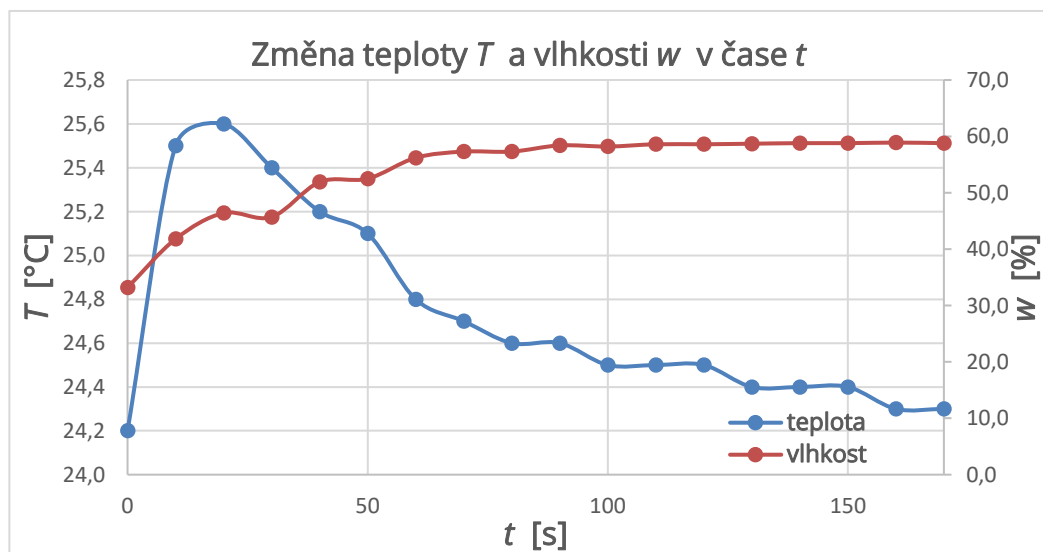
Obr. 6.15.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 80% jíly GEM

Graf. 6.15.3 - Změna rezistance R v čase t - 80% jílu GEM, 20% písek



I přes zvýšení obsahu jílu GEM ve vzorku zeminy o 20% se doba zdržení změnila pouze o 2 s na celkových 108 s. Lze tedy konstatovat, že u typu jílu GEM nemá jeho zastoupení nad cca 60% větší dopad na zdržení vody na povrchu vzorku. V počáteční fázi lze pozorovat převládající horizontální směr proudění s výrazným únikem vzduchu charakterizovaným oscilacemi hodnot rezistance do 80 s od počátku zatížení. Dále následuje v měřeném profilu výrazný vsak vody tj. vertikální směr proudění s již nevýraznými oscilacemi hodnot R . Průběh křivky $R = f(t)$ lze považovat za konstantní od cca 200 s, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jílu GEM zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 32,5 %.

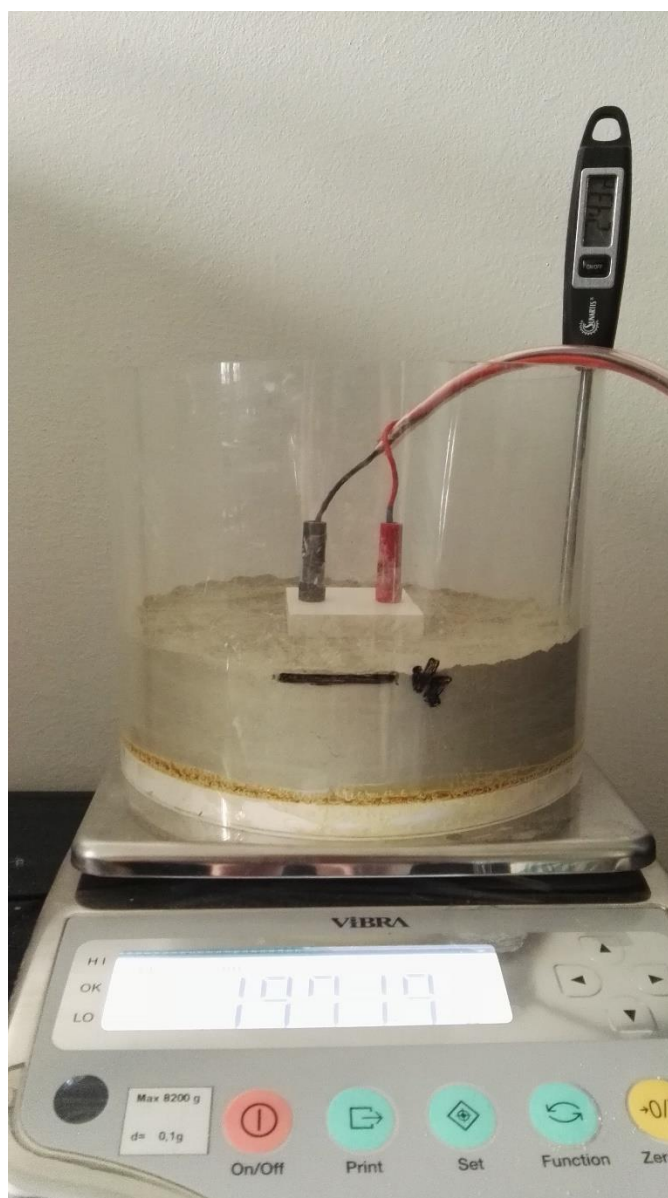
Graf. 6.15.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



6.16 JÍL GEM 100%

6.16.1 Vstupní parametry měření

Teplota v místnosti:	25,5 °C
Výška vzorku v nádobě:	0,04 m
Hmotnost vzorku s nádobou:	1,879 kg (1,182 kg)
Hmotnost se sondou a teploměrem:	1,973 kg (1,276 kg)



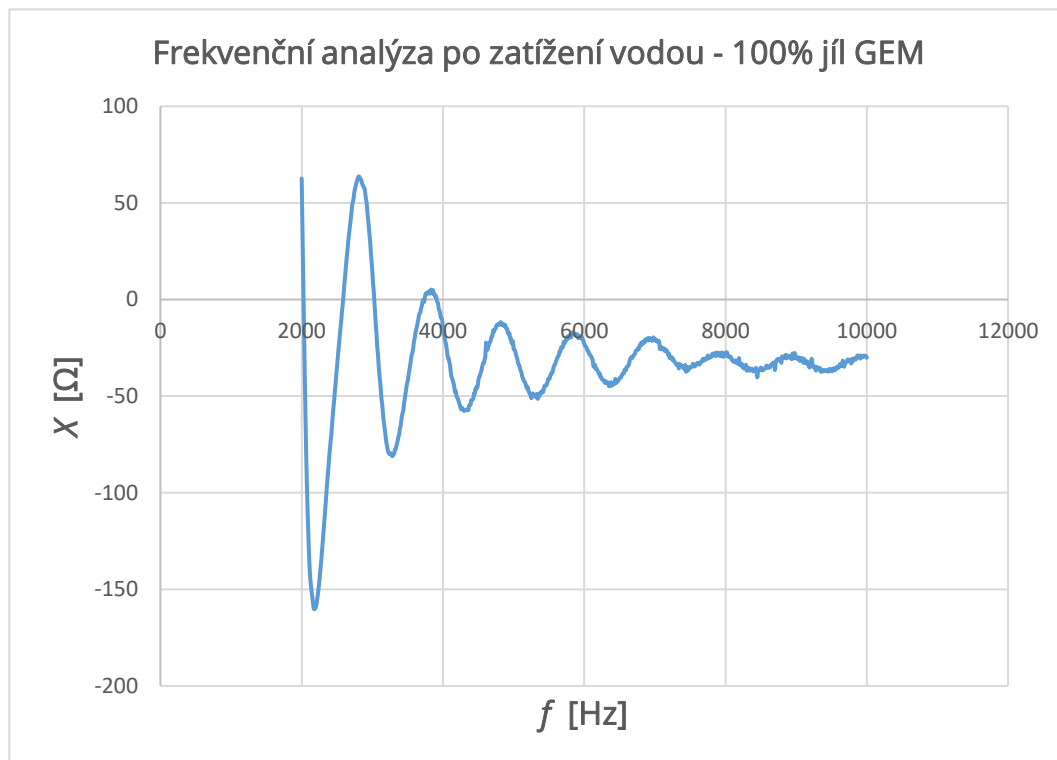
Obr. 6.16.1 - Vzorek zeminy 100% jíł GEM

6.16.2 Výsledky frekvenčních analýz

Graf. 6.16.1 - Frekvenční analýza před zatžením vodou - 100% jíł GEM

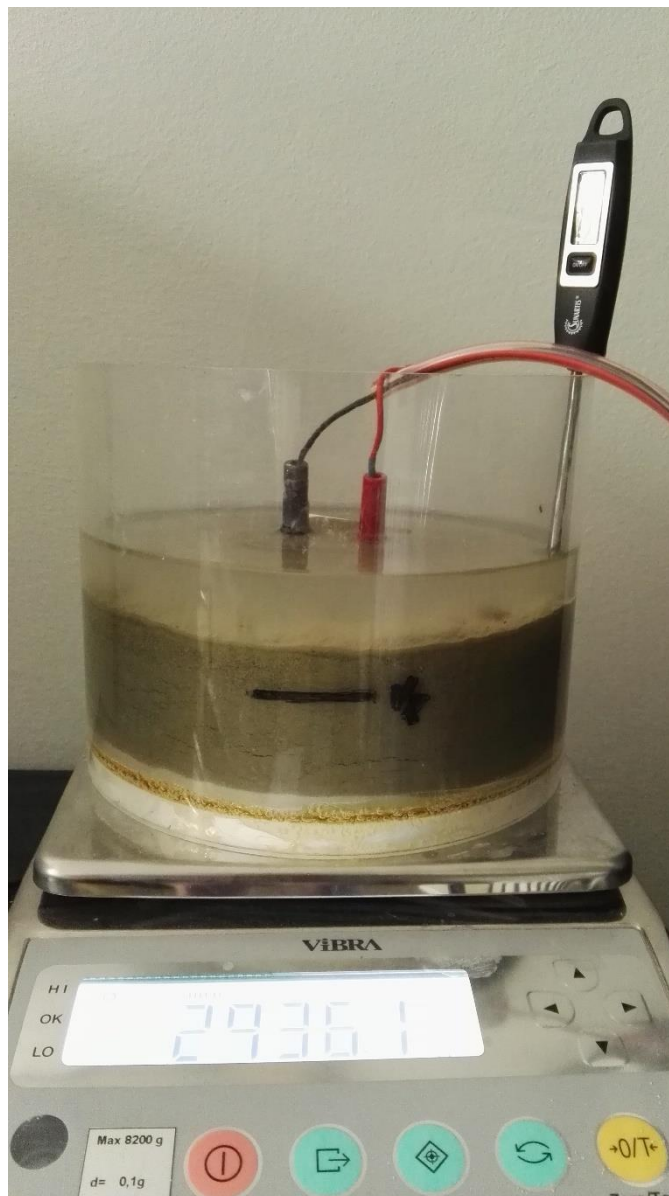


Graf. 6.16.2 - Frekvenční analýza po zatžení vodou - 100% jíł GEM



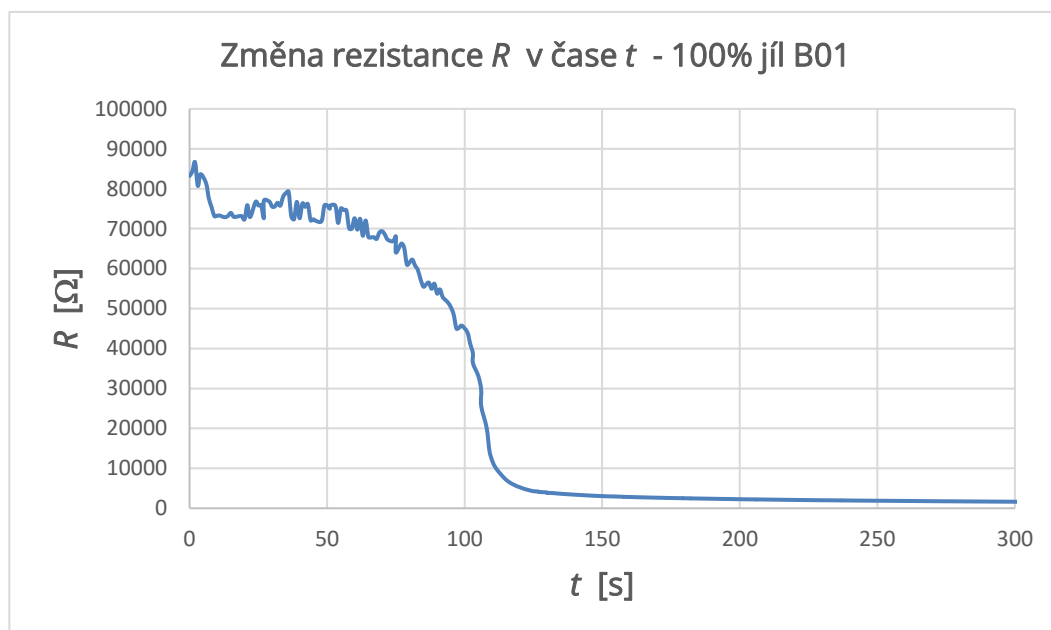
6.16.3 Výsledky měření

Výška hladiny vody po zatížení vzorku:	0,085 m
Výška hladiny vody po ukončení měření:	0,075 m
Hmotnost vzorku s vodou a příslušenstvím:	2,936 kg (2,239 kg)
Hmotnost bez příslušenství na konci měření:	2,845 kg (2,148 kg)
Hmotnost nasyceného vzorku:	2,508 kg (1,811 kg)
Změna výšky vzorku nad původní rysku:	0,015 m



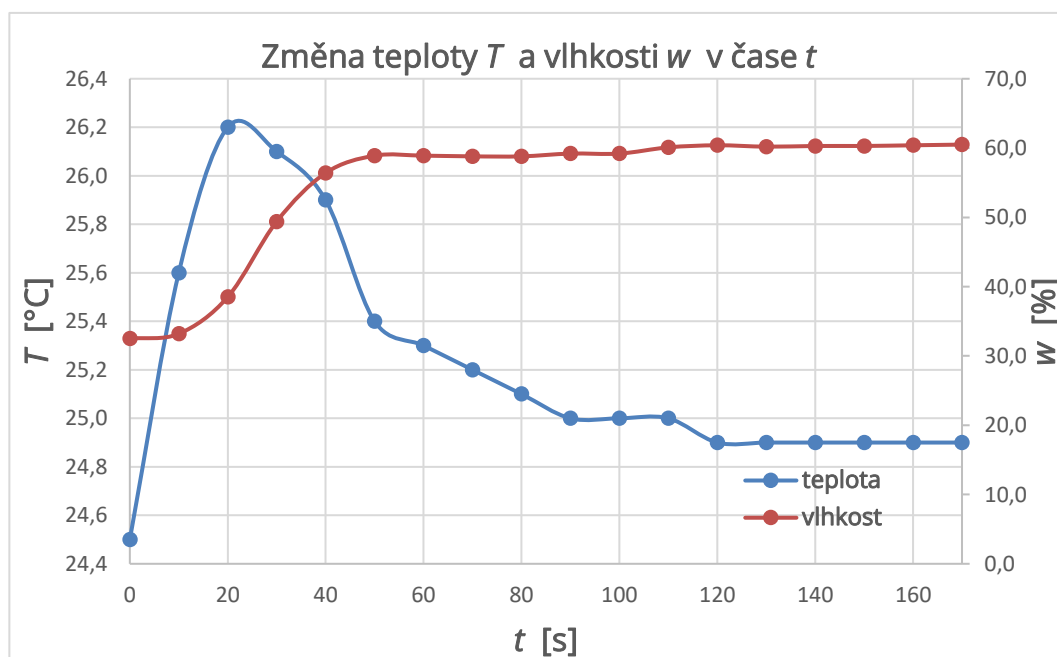
Obr. 6.16.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 100% jílu GEM

Graf. 6.16.3 - Změna rezistance R v čase t - 100% jííl GEM



Při použití vzorku 100% jííl GEM lze pozorovat, že se doba zdržení vody na jeho povrchu oproti předchozímu měření znovu snížila, a to na 59 s. Průběh křivky $R = f(t)$ lze považovat za konstantní cca 250 s, a tedy měřený profil za kvazi-nasycený. V uvedeném zastoupení jííl GEM zvýšil objem vzorku zeminy po zatížení vodou o 37,5 %, což je o 5 % více jako u předchozího vzorku.

Graf. 6.16.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t



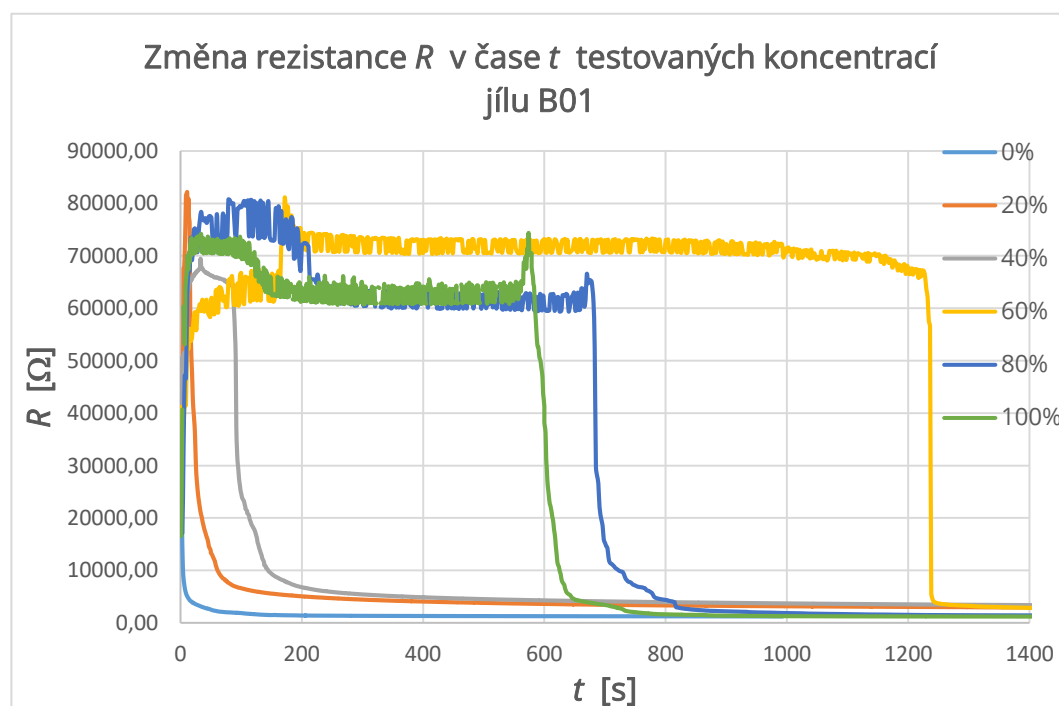
7 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Hlavní sledovanou složkou elektrické impedance ve výstupech měření byla změna hodnoty rezistance R v závislosti na čase t . Změna rezistance ukazuje časovou prodlevu od doby zatížení vzorku zeminy vodou, začátek vsakování vody do vzorku po dobu, kdy dochází k ustálení měřených hodnot R . Po uvedené době ustálení je možné konstatovat, že se vzorek zeminy nachází při respektování vnějších podmínek měření ve kvazi-nasyceném stavu. Použité vzorky jsou popsány jednotlivými koncentracemi obsažených zemin (písek, jíl), které vyjadřují jejich hmotnostní zastoupení ve vzorku.

7.1 JÍL B01

Pro testované vzorky byl použit žáruvzdorný vazný jíl s označením B01. Jedná se o jíl s vysokým obsahem kaolínu. Vyznačuje se velmi dobrou vazností a slínavostí. Běžně se používá k výrobě vysoce žáruvzdorných materiálů jako je např. šamot, dlaždice, stavební kameniny.

Graf. 7.1.1 – Změna rezistance R v čase t při různých koncentracích jílu B01



Ze všech použitých jílu vykazuje právě jíl s označením B01 nejlepší vlastnosti, co se týče délky zadržetí vody na povrchu vzorku od jeho zatížení vodou až po počátek vsaku. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při koncentraci 60% jílu B01 ve zkoušeném vzorku.

Uvedená koncentrace jílu B01 ve vzorku zeminy vykazuje zdaleka největší dobu zadržení vody a oproti například 80% koncentraci jílu ve vzorku je doba zadržení vody skoro dvojnásobná. Konkrétně doba zadržení vody u vzorku s koncentrací 60% je 1228 s a doba zadržení vody u vzorku s koncentrací 80% je 678 s. Zhoršení doby zadržení je zde tedy o 550 sekund, tedy necelých 45%. Třetí nejlepší hodnotu doby zadržení vody vykazuje vzorek s použitím čistého jílu s hodnotou 572 sekund, kde je zhoršení o 656 sekund, tedy 53%. Získané výsledky z měření vzorků s použitým jílem B01 jsou obsaženy v tabulce 7.1.1.

Tab. 7.1.1 - Porovnání jednotlivých výsledků různých koncentrací jílu B01

Koncentrace jílu [%]	Koncentrace písku [%]	Doba zadržení vody [s]	Bobtnání vzorku [m]	Množství vody ve vzorku [l]
0	100	2	0	0,311
20	80	15	0,003	0,255
40	60	86	0,001	0,331
60	40	1228	0	0,420
80	20	678	0	0,424
100	0	572	0	0,410

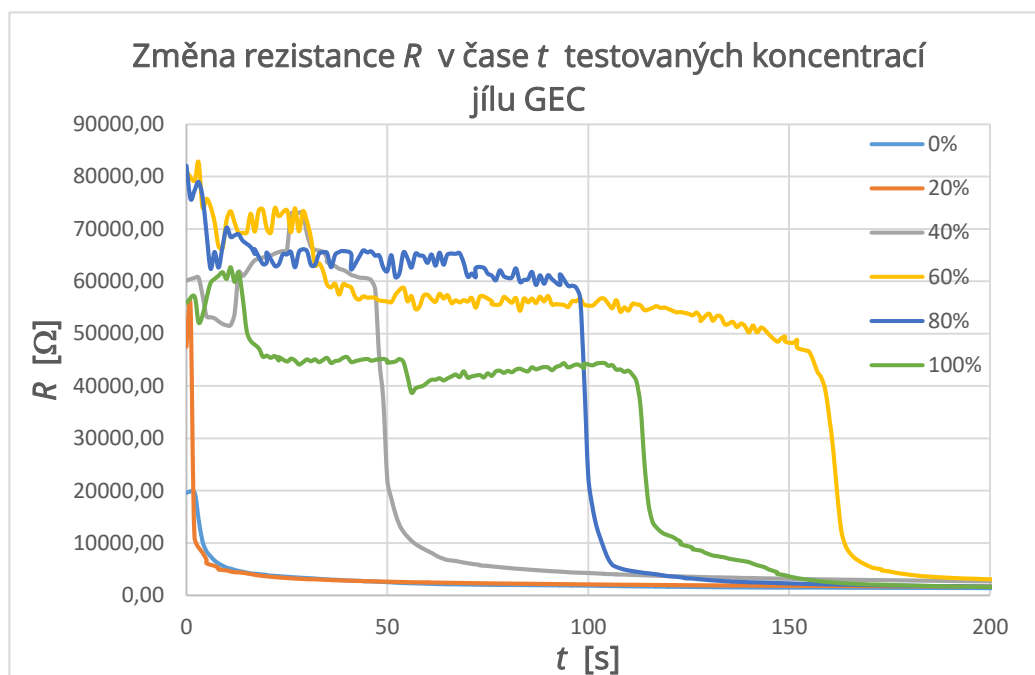
Zjištěnou výhodou jílu B01 je jeho nízké, až nulové bobtnání při vyšších koncentracích. K ustálení hodnot rezistance R u vzorku s koncentrací jílu 60% dochází v 1251 sekundě, od počátku zatížení vzorku vodou. U vzorku 80% dochází k ustálení hodnot rezistance po 822 sekundách a u vzorku s koncentrací jílu 100% po 749 sekundách. U koncentrací nižších jsou tyto doby velmi malé a pro reálné využití tyto koncentrace dle mého názoru nemají praktického využití.

Po zhodnocení výsledků jednotlivých koncentrací jílu B01 v homogenní matici písku o velikosti zrna 1 mm bych řekl, že nejvhodnější je použití vzorku s obsahem jílu 60%, jelikož vzhledem ke své dlouhé době zadržení vody bude vhodný pro tvorbu těsnících částí staveb. Pro nízkou hodnotu koncentrace jílu B01 ve směsi bude vhodný i z ekonomického hlediska pro reálné použití v praxi.

7.2 JÍL GEC

Pro skupinu dalších měření byl použit bentonitický jíl s označením GEC. Jíl GEC je vysoce plastický, vazný s vysokou sorpční schopností. Použitelný je jíl GEC zejména jako aglomerační pojivo, zadržující vodu a živiny. Dodavatel doporučuje jeho využití pro výrobu pěstitelských substrátů.

Graf. 7.2.1 – Změna rezistance R v čase t při různých koncentracích jílu GEC



Ze souhrnného grafu 7.2.1 je patrné, že neúčinnější koncentrace jílu GEC ve vzorku, která zaručí nejdelší dobu zadržení vody po zatížení vzorku na povrchu, je 60%. Časový úsek od momentu zatížení vzorku vodou až po dobu začátku vsaku vody do vzorku je u koncentrace 60% jílu 155 s. Zajímavým se jeví zjištění, že navýšením koncentrace jílu GEC v homogenní matrici písku o dalších 20% resp. 40% se dosáhne výsledků horších. Z grafu je patrné, že doba zadržení vody po začátek vsaku u 80% zastoupení jílu ve vzorku je 98 s, což je necelá polovina oproti 60% koncentraci jílu ve vzorku a ve vzorku jílu GEC je to 110 s, což je o 29 % nižší doba. Časový rozdíl 100% jílu oproti nejlepšímu výsledku 60% koncentrace je 44 sekund, tudíž nastalo zhoršení o 28% a u vzorku s koncentrací 80% je časový rozdíl od nejlepšího výsledku 57 sekund, tedy necelých 37%.

Získané výsledky z měření u vzorků s použitým jílem GEC jsou obsaženy v tabulce 7.2.1.

Tab. 7.2.1 - Porovnání jednotlivých výsledků různých koncentrací jílu GEC

Koncentrace jílu [%]	Koncentrace písku [%]	Doba zadržení vody [s]	Bobtnání vzorku [m]	Množství vody ve vzorku [l]
0	100	2	0	0,311
20	80	1	0,005	0,434
40	60	47	0,011	0,465
60	40	155	0,01	0,552
80	20	98	0,013	0,606
100	0	111	0,013	0,637

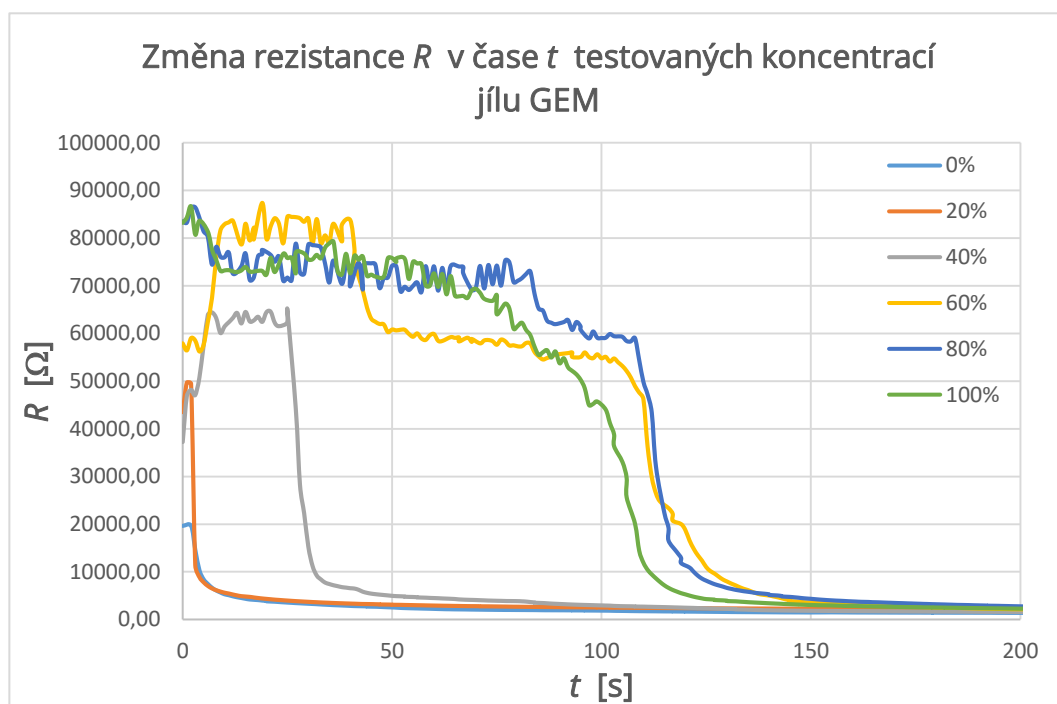
Oproti předchozímu vzorku jílu s označením B01 dochází k výraznému bobtnání vzorků, a to s přibývajícím obsahem jílu GEC ve vzorku. K největšímu bobtnání dochází u 80% a 100% koncentrace testovaného jílu, a to až o 0,013 m, což vzhledem k mocnosti testovaného vzorku 0,04 m je změna o 32,5%, která jistě při použití v praxi není zanedbatelná a musela by se tedy při využití tohoto jílu zohlednit.

Doba ustálení hodnot rezistance R je u vzorků s obsahem jílu GEC různá (Graf 7.2.1). Nejmenší dobu ustálení rezistance vykazuje vzorek s použitou koncentrací jílu 20%, a to 7 s. Nejdelší doba ustálení je u vzorku s obsahem jílu 60%, a to 185 s od počátku zatížení vzorku vodou.

7.3 JÍL GEM

Bentonitický jíl s označením GEM je dle výrobce vhodný jako vazná složka slévárenských písků při výrobě forem. Zároveň je vhodný jako minerální těsnění skládek, studní, tunelů, hloubkových staveb apod. a lze jej použít i do těsnicích injektáží.

Graf. 7.3.1 – Změna rezistance R v čase t při různých koncentracích jílu GEM



Z grafu 7.3.1 je patrné, že nejdelší časovou prodlevu od doby zatížení vzorku vodou, vykazuje směs 80% jílu GEM a 20% písku, kde je doba zdržení vody 108 s. Velmi podobný průběh vsaku vykazuje i testovaná směs, která obsahovala 60% jílu GEM, kde je na začátku měření zřejmý náhlý skok v nasycení, poté co byl vzorek zatížen destilovanou vodou. Tento skok může zohledňovat prvotní nasycení svrchní části vzorku, z důvodu náhlého zatížení větším objemem vody. Jedním z dalších důvodů tohoto skoku může být i jistá nehomogenita vzorku, kde svrchní část z důvodu udusání mohla obsahovat větší podíl písku než použitého jílu. Jak je z grafu patrné, vzorek, který byl tvořen pouze z jílu GEM, dosahoval horší časové prodlevy zdržení vody od doby zatížení vzorku.

Získané výsledky z měření u vzorků s použitým jílem GEM jsou obsaženy v Tab. 7.3.1.

Tab. 7.3.1 – Porovnání jednotlivých výsledků různých koncentrací jílu GEM

Koncentrace jílu [%]	Koncentrace písku [%]	Doba zadržení vody [s]	Bobtnání vzorku [m]	Množství vody ve vzorku [l]
0	100	2	0	0,311
20	80	2	0,004	0,429
40	60	25	0,010	0,527
60	40	106	0,010	0,552
80	20	108	0,013	0,561
100	0	101	0,015	0,629

U koncentrace 60% jílu GEM je doba zadržení vody 106 s, což je oproti koncentraci 80% jílu GEM zhoršení o necelé 2%. Tohoto faktu lze z ekonomického hlediska využít, jelikož náklady na případné použití jílu by byly menší, ale účinnost by se nezmenšila natolik, aby měla ve výsledku velký vliv. Naopak je tomu u koncentrace 100%, kde se doba zadržení zmenšila o 7 s, což je zhoršení doby zadržení o 6,5%. V tomto případě je patrné, že není hospodárné použití čistého jílu, jelikož se nedosáhne téže účinnosti jako u nižších koncentrací. Navíc je nutné zohlednit velké bobtnání vzorků u velkých koncentrací, kdy u čistého jílu vzorek po zatížení vodou nabobtnal o 0,015 m, tedy o 37,5% oproti původní výšce vzorku 0,04 m. Co se týče nižších koncentrací jílu GEM ve vzorku zeminy, jako 40% a 20%, tak z výsledků plyne, že tyto koncentrace nejsou nejvhodnější na reálné použití. U koncentrace 20% je zadržení tak minimální, že i bez použití tohoto jílu by doba zadržení byla stejná. U koncentrace 40% jílu je patrné jisté zlepšení, tudíž následné použití této koncentrace v praxi by záleželo na způsobu užití. K ustálení hodnot rezistance R dochází u vzorků s koncentrací 100%, 80% a 60% v zásadě ve stejný čas, a to okolo hodnoty 150 s. U vzorků s nižší koncentrací je rozhodující ovšem doba, kdy se hodnoty rezistance začnou prudce měnit a dochází tedy k přerušení těsnicí schopnosti vzorku.

7.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole jsou navzájem graficky (Graf 7.4.1) a tabelárně (Tab.7.4.1) porovnány vzorky zeminy s obsahem jílu, které v předchozích kapitolách vykazovaly nejlepší výsledky doby zadržení vody ve vzorku po jeho povrchovém zatížení destilovanou vodou.

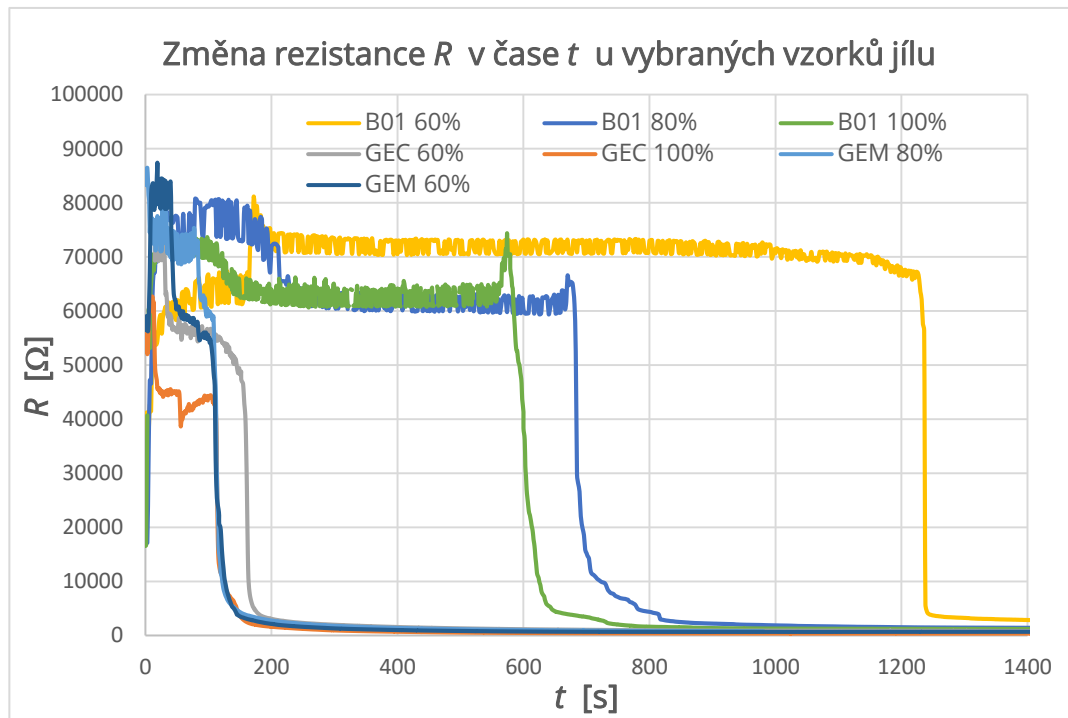
Tab. 7.4.1 – Porovnání výsledků jednotlivých druhů jílu

Označení	Koncentrace jílu [%]	Koncentrace písku [%]	Doba zadržení vody [s]	Bobtnání vzorku [m]	Množství vody ve vzorku [l]
B01	60	40	1228	0	0,420
B01	80	20	678	0	0,424
B01	100	0	572	0	0,410
GEC	60	40	155	0,01	0,552
GEC	100	0	111	0,013	0,637
GEM	80	20	108	0,013	0,561
GEM	60	40	106	0,01	0,552

V tabulce 7.4.1 je uvedeno srovnání výsledků testovaných vzorků zeminy s obsahem jílu hodnocených vzhledem k délce doby zadržení vody na povrchu vzorku. Nejdélší dobu zadržení vody vykazuje jíl s označením B01, jejíž hodnoty několikanásobně přesahují ostatní zkoumané vzorky. Vzorek dále vykazuje téměř nulové bobtnání v uvedených koncentracích resp. v našich podmínkách neměřitelné. Skutečnost potvrzuje další výsledek, a to množství vody vsáknuté ve vzorku, které je oproti vzorkům s jílem GEC nižší v průměru o 42 % a s jílem GEM o 33 %. Výsledky jednotlivých změn rezistance a doby jejich ustálení ve vybraných vzorcích jsou zřejmé z grafu 7.4.1.

Pro představu rozdíl doby zadržení vody u nejlepšího vzorku, tedy 60% koncentrace jílu B01 a vzorku s nejmenší hodnotou uvedenou v tabulce, tedy 60% koncentrace jílu GEM, je 1122 sekund. Vzorek jílu GEM je tedy několikanásobně méně vhodný pro použití při tvorbě těsnicí části.

Graf 7.4.1 – Porovnání změn rezistance R v čase t u vybraných vzorků jílu



8 ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo posoudit vhodnost použití mnou získaných a zkoumaných jííl jako příměsí vybraných koncentrací do zeminy určité frakce. Po celou dobu experimentu jsem se snažil zachovávat co nejstálější podmínky měření, aby bylo eliminováno ovlivnění výsledků měření dalšími faktory jako například kolísání teplot a vlhkosti vzduchu v místnosti, teplot vzorků zemin, teplot zatěžovací vody atd. Vzhledem k vysokým venkovním teplotám při průběhu experimentu, jsou na grafech vnitřní teploty v místnosti, které jsou součástí každého měření, patrné jisté rozdíly teplot, které jsou však pro každé z měření v toleranci $\pm 2 \%$, což odpovídá udávané přesnosti měřicího systému s přístrojem Z-metr IV. Výsledky měření by proto neměly být nijak zásadně ovlivněny. V průběhu experimentu byla také měřena vlhkost vzorku, která následně byla též zpracována do grafů. Jednalo se pouze o jistou kontrolu a potvrzení předpokladu, že zkoumané vzorky byly i po zatížení a ustálení měřených hodnot elektrické vodivosti kvazi-nasyceny. Ověření bylo provedeno nejprve vizuální kontrolou a po splnění této podmínky se zkoumalo, zda se v průběhu několika dalších časových kroků, po kterých se tato veličina měřila, její hodnota měnila v definovaných mezích. Pokud byla splněna podmínka jak vizuální, tak ustáleného stavu vlhkosti, byl vzorek prohlášen za kvazi-nasycený a měření bylo ukončeno. Jak vyplývá z vyhodnocení provedených měření, jako nejvhodnější jííl pro konstrukci těsnících prvků z dostupných a mnou testovaných vzorků vyplývá žáruvzdorný vazný jííl s označením B01. Jak bylo po variantním uspořádání experimentu zjištěno, použití jíilu B01 pro stavbu těsnících objektů je nejvhodnější od koncentrace 60% jíilu ku 40% písku o frakci 1 mm. Uvedený výsledek byl vyhodnocen jako nejlepší z celé skupiny testovaných jíílů, jelikož výsledný čas, po který byl vzorek po zatížení vodou schopen zadržet vodu byl o 89,9% lepší, jako průměrná hodnota ze všech provedených měření.

Konkrétně byl čas zdržení 1128 s. Jíl B01 i při jiných koncentracích jako například 80 % či 100 %, stále vykazoval lepší výsledky, co se doby zdržení vody týče, než ostatní testované jíly, z čehož plyne i velká variabilita použitelných koncentrací jílu B01 při použití ve stavební praxi. V některých případech lze za jeho další výhodu považovat jeho nízké, až nulové bobtnání.

Uvedená vlastnost je při budování těsnicích prvků objektů vítána, jelikož při nárůstu objemu jílu při styku s vodou a následnému vysychání, které způsobuje zpětný pokles objemu jílu, dochází k prasklinám, což vede k porušení těsnicí funkce. Je třeba brát v úvahu, že mnou získané výsledky lze vztáhnout jen na použití těchto jílu společně s pískem o zrnitosti 1 mm, který byl v experimentu používán. Jak velkou roli hraje zrnitost písku na průběh a délku vsakování společně s přídavkem jílu nebylo možné z časových důvodů zjistit. Nedostatečné bylo také množství vzorku písku, který stejně jako vzorky jílu je velmi obtížné ve větším množství opatřit. Z uvedených důvodů a z časového hlediska nemohl být experiment rozsáhlejšího charakteru. Proto bych jako další zajímavou oblast prací doporučoval zhuštění procentuálního zastoupení jílu ve vzorku, a doplnění mnou zkoumané řady o další výsledky.

Posledním ze závěrů z mého měření je použití metody EIS pro realizovaný typ experimentu. Dle mého názoru je metoda pro detekování infiltrace do zeminy vhodná a má několik výhod, jako je jednoduchá obsluha přístroje Z-metr IV a přehledné zpracování výsledků do textových souborů, ze kterých se následně pohodlně vytváří grafy závislosti reaktance na čase a jde tak rychle zjistit hledané informace a vyhodnotit průběh infiltrace vody do vzorků zeminy. Při použití automatického měření lze také v případě zajištění zdroje napájení touto metodou sledovat kontinuálně průběhy infiltrace vody přímo ve vodních dílech na dálku, což může zajistit zlepšení kontroly a přehledu o technickém stavu vodního díla a případné poruše na těsnicím objektu.

V Brně, dne 22. prosince 2019

Bc. Ondřej Marek

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL, *Elektřina a magnetismus*, Vyd, 2., opr, a rozš, Praha: Academia, 2002, ISBN isbn80-200-1004-1,

PAŘÍLKOVÁ, J., RADKOVSKÝ, K. *Manuál Z-metr IV*, 2016,

ŘÍHA, Jaromír, *Hydraulika podzemní vody*, MODUL 01 – studijní opora

MELKA, Karel; ŠŤASTNÝ, Martin, *Encyklopedický přehled jílových a příbuzných minerálů*, 1, vyd, Praha: Academia, 2014, 914 s, (Neživá příroda), ISBN 978-80-200-2369-8,

NETOPIIL, R, a kol, *Fyzická geografie*, 1, vydání, Praha: SPN, 1984, 272 s,

ZUMR, David, *Využití barevných stopovačů pro popis preferenčního proudění v půdě*, In: Juniorstav 2008 – 10, Odborná konference doktorského studia [CD-ROM], Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2008, s, 259- 266, ISBN 978-80-86433-45-5,

KALÁB, Z, (2015): Geotechnický monitoring – specializovaná část, *Geofyzikální průzkum pro geotechnickou praxi*, <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/geofyzikalni-monitoring.pdf> Učební text VŠB TUO, FAST, Ostrava, 31stran,

PELÍŠEK I., KULHAVÝ Z., ČMELÍK M., 2013: *Měření hydroopedologických charakteristik pro určení účinnosti modernizace drenáží*. Sborník konference Voda, půda a rostliny, Křtiny, 29.- 30.5. 2013, ISBN 978-80-87577-17-2,

KRATOCHVÍL, Stanislav. *Vodní nádrže a přehrady*. Praha: Československá akademie věd, 1961,

HOBST, Leonard. *Technologie sypaných hrází*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984,

VÁŠA, Jiří. *Retence, pohyb a charakteristika půdní vody*. Praha, 1975,

KUTÍLEK, Miroslav. *Vodohospodářská pedologie: vysokoškolská učebnice*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1978. Řada stavební literatury.

10 SEZNAM OSTATNÍCH ZDROJŮ

<https://cs.wikipedia.org/wiki/J%C3%ADl>

<http://atlas.horniny.sci.muni.cz/sedimentarni/jil.html>

http://geologie.vsb.cz/geologie/KAPITOLY/5_horniny_v_praxi/5_horniny_stav_praxi.htm

<https://www.naja.cz/pisek-bratcice>

<https://cs.wikipedia.org/wiki/J%C3%ADl>

<https://cz.depositphotos.com/26270049/stock-photo-dry-clay.html>

https://www.researchgate.net/figure/Photo-of-clay-sample-by-scanning-electron-microscope-Philips-XL30-ESEM_fig2_226765566

<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?jil>

<http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?voda>

<https://cz.rs-online.com/web/p/tyce-a-pruty-z-nerezove-oceli/6614835/>

<http://www.geofyzika.webz.cz/princelekt.php>

<http://hydropedologie.agrobiologie.cz/index.html>

https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pedf/ps14/fyz_geogr/web/pages/11-podpovrchova-voda.html

http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/runoff_cz/index.htm

<http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/voda-v-zeminach>

http://gisak.vsb.cz/GISacek/GISacek_2005/Sbornik/bohmer/bohmer.html

[https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodiky_ekologicke_zateze/\\$FILE/OES-Vyuz_GFM_pri_OVZ-20101228.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/metodiky_ekologicke_zateze/$FILE/OES-Vyuz_GFM_pri_OVZ-20101228.pdf)

<http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/geofyzikalni-monitoring.pdf>

http://www.kcas.cz/?page=geofyzika/metody_pruzkumu/mereni_geofyzikalnim_pulznim_radarem

http://storm.fsv.cvut.cz/data/files/p%C5%99edm%C4%9Bty/VYV/VYV-Z-podtlakovy_infiltrometr.pdf

<https://www.ceskatelevize.cz/porady/1181680258-tyden-v-regionech-brno/317281381890603-tyden-v-regionech/>

11 SEZNAM SYMBOLŮ A OZNAČENÍ

Symbol	název	jednotka
EIS	elektrická impedanční spektrometrie	[-]
R	rezistance	[Ω]
X	kmitočtově závislá reaktance	[Ω]
j	imaginární jednotka	[-]
ω	úhlový kmitočet	[rad/s]
G	elektrická vodivost	[S]
f	frekvence budicího signálu	[Hz]
t	čas	[s]
T	teplota	[$^{\circ}\text{C}$]
W	vlhkost	[%]
$V_{i,0}$	intenzita infiltrace na začátku infiltrace	[mm.min ⁻¹]
$V_{i,1}$	intenzita infiltrace v 1.minutě od začátku	[mm.min ⁻¹]
$V_{i,v}$	ustálená intenzita infiltrace	[mm.min ⁻¹]
$V_{i,t}$	intenzita infiltrace v čase t od začátku	[mm.min ⁻¹]
k	hydraulická vodivost	[m/s]
q	specifický průtok	[m/s]
J	sklon čáry piezometrické výšky	[%]
σ	měrná elektrická vodivost	[S]
ρ	rezistivita prostředí	[Ω]
I	elektrický proud	[A]
VES	vertikální elektrické sondování	[-]
$M\check{Z}P$	Ministerstvo životního prostředí	[-]
SP	spontánní potenciál	[-]
FSP	filtrační spontánní potenciál	[-]
$DEMP$	dipólové elektromagnetické profilování	[-]
m_z	hmotnost suché půdy	[g]
m_w	hmotnosti vody	[g]
w	hmotnostní vlhkost zeminy	[g/g]

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1.1.1 – Druhy povrchového odtoku [portal.chmi.cz]</i>	1
<i>Obr. 2.1.1 – Rozdíl velikosti pórů u písku (vlevo) a jílu (vpravo) [portal.chmi.cz]</i>	5
<i>Obr. 2.1.2 – Rozložení druhů podpovrchové vody v zeminách [Netopil 1972]</i>	6
<i>Obr. 2.2.1 – Infiltrace v zemině [portal.chmi.cz]</i>	9
<i>Obr. 2.2.2 – Vsakovací křivka zeminy [gisak.vsb.cz]</i>	10
<i>Obr. 2.2.3 – Infiltrační pásma [Bodman, 1944]</i>	11
<i>Obr. 2.2.4 – Chodbičky v zemině tvořené dešťovkami [ekolist.cz]</i>	12
<i>Obr. 2.2.5 – Ukázka vsakovacího pokusu [hydropedologie.agrobiologie.cz]</i>	14
<i>Obr. 2.2.6 – Funkce nenasycené hydraulické vodivosti pro různé materiály [storm.fsv.cvut.cz]</i>	16
<i>Obr. 2.2.7 – Odporů běžných minerálů a zemin [geofyzika.webz.cz]</i>	17
<i>Obr. 2.3.1 – Fotografie jílu z elektronového mikroskopu [researchgate.net]</i>	18
<i>Obr. 2.3.2 – Fotografie jílu plastického (vlevo) a jílu vyschlého (vpravo) [depositphotos]</i>	19
<i>Obr. 2.3.3 – Názvosloví hornin řady vápenec – jílovec [geology.cz]</i>	19
<i>Obr. 2.3.4 – Klasická injektáž</i>	21
<i>Obr. 2.3.5 – Umístění těsnicího jádra a) vnitřní těsnicí jádro b) návodní těsnicí jádro</i>	24
<i>Obr. 2.3.6 – Postup sypání zeminy hráze [Kratochvíl, 1961]</i>	24
<i>Obr. 3.2.1 – Vertikální řez po aplikaci barevného stopovače [Zumr 2008]</i>	26
<i>Obr. 3.2.2 – Experiment s fluorescenčním stopovačem Rhodamine 6G, vizualizace preferenční oblasti proudění [Zumr 2008]</i>	27
<i>Obr. 3.3.1 – Princip odporových metod [Příručka MŽP 2010]</i>	29
<i>Obr. 3.3.2 – Charakteristický rozsah hodnot měrných odporů různých hornin [Macháček]</i>	30

<i>Obr. 3.3.3 – Nejčastěji užívaná uspořádání při stejnosměrném odporovém profilování [Kaláb, 2015]</i>	31
<i>Obr. 3.3.4 – Ukázka sondážní křivky VES ve třívrstevném prostředí [Macháček]</i>	32
<i>Obr. 3.3.5 – Multielektrodová souprava ARES II (vlevo), měřicí sonda (vpravo) [GF Instruments, s.r.o.]</i>	32
<i>Obr. 3.3.6 – Interpretace naměřených dat [GF Instruments, s.r.o.]</i>	33
<i>Obr. 3.3.7 - Metoda nabitého tělesa slouží pro sledování pohybu podzemní vody [MŽP 2010]</i>	34
<i>Obr. 3.3.8 – Příklad metody spontánní polarizace FSP pro sledování pohybu podzemních vod [MŽP 2010]</i>	35
<i>Obr. 3.3.9 – Ukázka terénního měření (vlevo) a principu metody DEMP (vpravo) .[kcas.cz]</i>	36
<i>Obr. 3.3.10 – Princip metody VDV [kcas.cz]</i>	36
<i>Obr. 3.3.11 – Princip měření GPR [kcas.cz]</i>	37
<i>Obr. 3.4.1 – Soustředné válce a směr proudnic [Kutílek 1978]</i>	38
<i>Obr. 3.4.2 – Ukázka praktického použití [hydropedologie.agrobiologie.cz]</i> 38	
<i>Obr. 3.6.1 – Mariottova láhev [helago-cz.cz]</i>	39
<i>Obr. 3.7.1 – Schéma kompaktního přetlakového infiltrometru [Kulhavý a kol., 2007]</i>	40
<i>Obr. 3.8.1 – Schéma Mini Diskového infiltrometru [hydropedologie.agrobiologie.cz]</i>	41
<i>Obr. 3.8.2 – Ukázka použití Mini Disk infiltrometru</i>	42
<i>Obr. 3.9.1 – Schéma Hood infiltrometru [researchgate.net]</i>	43
<i>Obr. 3.10.1 – Ukázka používaných nástrojů na odběr porušeného vzorku [Hammerová]</i>	44
<i>Obr. 3.10.2 – Gravimetr CG-5 při terénním měření</i>	45
<i>Obr. 4.1.1 – Schéma měření elektrické impedance materiálu</i>	47
<i>Obr. 4.2.1 – Příklad přístroje Z-metr IV</i>	48
<i>Obr. 4.2.2 – a) konektor CANON, b) krytka konektoru</i>	49

<i>Obr. 5.1.1 – Primární nádoba používaná na experiment</i>	50
<i>Obr. 5.1.2 - Řez testovací nádobou s uložením testovaného vzorku</i>	51
<i>Obr. 5.1.3 – Experimentální stanoviště</i>	52
<i>Obr. 5.2.1 – Měřicí sonda</i>	53
<i>Obr. 5.3.1 – Teploměr Sunartis</i> <i>Obr. 5.3.2 – Vlhkoměr Voltcraft FM-400</i>	54
<i>Obr. 5.4.1 – Bratčický písek (naja.cz)</i>	55
<i>Obr. 5.4.2 – Ilustrační fotografie bratčického písku</i>	55
<i>Obr. 5.6.1 – Laboratorní váha Vibra CJ-3200CE</i>	57
<i>Obr. 5.6.2 - Vědro na promíchání vzorku</i>	58
<i>Obr. 5.6.3 – Porovnání hladiny vody při začátku pokusu a na konci pokusu</i>	59
<i>Obr. 5.6.4 - Třepačka Endecotts Octahon 200</i>	60
<i>Obr. 6.1.1 - Vzorek 100% písek před zatížením vodou</i>	61
<i>Obr. 6.1.2 – Zatížený vzorek 100% písek vodou</i>	63
<i>Obr. 6.2.1 – Vzorek zeminy 20% jílu B01 a 80% písek</i>	65
<i>Obr. 6.2.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 20% jílu B01</i>	67
<i>Obr. 6.3.1 – Vzorek zeminy 40% jílu B01 a 60% písek</i>	69
<i>Obr. 6.3.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 40% jílu B01</i>	71
<i>Obr. 6.4.1 - Vzorek zeminy 60% jílu B01 a 40% písek</i>	73
<i>Obr. 6.4.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 60% jílu B01</i>	75
<i>Obr. 6.5.1 - Vzorek zeminy 80% jílu B01 a 20% písek</i>	77
<i>Obr. 6.5.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 80% jílu B01</i>	79
<i>Obr. 6.6.1 – Vzorek zeminy 100% jílu B01</i>	81
<i>Obr. 6.6.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 100% jílu B01</i>	83
<i>Obr. 6.7.1 – Vzorek zeminy 20% jílu GEC a 80% písek</i>	86
<i>Obr. 6.7.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 20% jílu GEC</i>	88
<i>Obr. 6.8.1 – Vzorek zeminy 40% jílu GEC a 60% písek</i>	90

<i>Obr. 6.8.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 40% jílu GEC</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 6.9.1 - Vzorek zeminy 60% jílu GEC a 40% písek</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 6.9.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 60% jílu GEC</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 6.10.1 – Vzorek zeminy 80% jílu GEC a 20% písek</i>	<i>98</i>
<i>Obr. 6.10.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 80% jílu GEC ...</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 6.11.1 – Vzorek zeminy 100% jílu GEC.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 6.11.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 100% jílu GEC .</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 6.12.1 – Vzorek zeminy 20% jílu GEM, 80% písek.....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 6.12.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 20% jílu GEM ...</i>	<i>108</i>
<i>Obr. 6.13.1 - Vzorek zeminy 40% jílu GEM, 60% písek</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 6.13.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 40% GEM.....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 6.14.1 – Vzorek zeminy 60% jílu GEM, 40% písek.....</i>	<i>114</i>
<i>Obr. 6.14.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 60% jílu GEM ..</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 6.15.1 - Vzorek zeminy 80% jílu GEM, 20% písek</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 6.15.2 - Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 80% jílu GEM ...</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 6.16.1 - Vzorek zeminy 100% jílu GEM</i>	<i>122</i>
<i>Obr. 6.16.2 – Zatížený vzorek zeminy po ukončení měření 100% jílu GEM</i>	<i>124</i>

13 SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf. 6.1.1 – Frekvenční analýza před zatížením vodou - 100% písek.....</i>	62
<i>Graf. 6.1.2 – Frekvenční analýza po zatížení vodou - 100% písek</i>	62
<i>Graf. 6.1.3 – Změna rezistance R v čase t – 100% písek.....</i>	64
<i>Graf. 6.1.4 – Změna teploty T a vlhkosti w v čase t</i>	64
<i>Graf. 6.2.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 20% jílu B01, 80% písek.....</i>	66
<i>Graf. 6.2.2 Frekvenční analýza po zatížení vodou – 20% jílu B01, 80% písek.....</i>	66
<i>Graf. 6.2.3 – Změna rezistance R v čase t - 20% jílu B01, 80% písek</i>	68
<i>Graf. 6.2.4 – Změna teploty T a vlhkosti w v čase t</i>	68
<i>Graf. 6.3.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 40% jílu B01, 60% písek.....</i>	70
<i>Graf. 6.3.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 40% jílu B01, 60% písek</i>	70
<i>Graf. 6.3.3 - Změna rezistance R v čase t - 40% jílu B01, 60% písek</i>	72
<i>Graf. 6.3.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	72
<i>Graf. 6.4.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 60% jílu B01, 40% písek.....</i>	74
<i>Graf. 6.4.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 60% jílu B01, 40% písek</i>	74
<i>Graf. 6.4.3 - Změna rezistance R v čase t - 60% jílu B01, 40% písek</i>	76
<i>Graf. 6.4.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	76
<i>Graf. 6.5.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 80% jílu B01, 20% písek.....</i>	78
<i>Graf. 6.5.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 80% jílu B01, 20% písek</i>	78
<i>Graf. 6.5.3 - Změna rezistance R v čase t - 80% jílu B01, 20% písek</i>	80
<i>Graf. 6.5.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	80

<i>Graf. 6.6.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 100% jíł B01</i>	82
<i>Graf. 6.6.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 100% jíł B01.....</i>	82
<i>Graf. 6.6.3 - Změna rezistance R v čase t - 100% jíł B01</i>	84
<i>Graf. 6.6.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	85
<i>Graf. 6.7.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 20% jíł GEC, 80% písek.....</i>	87
<i>Graf. 6.7.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 20% jíł GEC, 80% písek</i>	87
<i>Graf. 6.7.3 - Změna rezistance R v čase t - 20% jíł GEC, 80% písek.....</i>	89
<i>Graf. 6.7.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	89
<i>Graf. 6.8.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 40% jíł GEC, 60% písek.....</i>	91
<i>Graf. 6.8.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 40% jíł GEC, 60% písek</i>	91
<i>Graf. 6.8.3 - Změna rezistance R v čase t - 40% jíł GEC, 60% písek.....</i>	93
<i>Graf. 6.8.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	93
<i>Graf. 6.9.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 60% jíł GEC, 40% písek.....</i>	95
<i>Graf. 6.9.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 60% jíł GEC, 40% písek</i>	95
<i>Graf. 6.9.3 - Změna rezistance R v čase t - 60% jíł GEC, 40% písek.....</i>	97
<i>Graf. 6.9.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	97
<i>Graf. 6.10.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 80% jíł GEC, 20% písek.....</i>	99
<i>Graf. 6.10.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 80% jíł GEC, 20% písek.....</i>	99
<i>Graf. 6.10.3 - Změna rezistance R v čase t - 80% jíł GEC, 20% písek.....</i>	101
<i>Graf. 6.10.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	101
<i>Graf. 6.11.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 100% jíł GEC..</i>	103

<i>Graf. 6.11.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 100% jíł GEC</i>	103
<i>Graf. 6.11.3 - Změna rezistance R v čase t - 100% jíł GEC</i>	105
<i>Graf. 6.11.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t</i>	105
<i>Graf. 6.12.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 20% jíł GEM, 80% písek</i>	107
<i>Graf. 6.12.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 20% jíł GEM, 80% písek</i>	107
<i>Graf. 6.12.3 – Změna rezistance R v čase t - 20% jíł GEM, 80% písek</i>	109
<i>Graf. 6.12.4 – Změna teploty T a vlhkosti w v čase t</i>	109
<i>Graf. 6.13.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 40% jíł GEM, 60% písek</i>	111
<i>Graf. 6.13.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 40% jíł GEM, 60% písek</i>	111
<i>Graf. 6.13.3 - Změna rezistance R v čase t - 40% jíł GEM, 60% písek</i>	113
<i>Graf. 6.13.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t</i>	113
<i>Graf. 6.14.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 60% jíł GEM, 40% písek</i>	115
<i>Graf. 6.14.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 60% jíł GEM, 40% písek</i>	115
<i>Graf. 6.14.3 - Změna rezistance R v čase t - 60% jíł GEM, 40% písek</i>	117
<i>Graf. 6.14.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t</i>	117
<i>Graf. 6.15.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 80% jíł GEM, 20% písek</i>	119
<i>Graf. 6.15.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 80% jíł GEM, 20% písek</i>	119
<i>Graf. 6.15.3 - Změna rezistance R v čase t - 80% jíł GEM, 20% písek</i>	121
<i>Graf. 6.15.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t</i>	121
<i>Graf. 6.16.1 - Frekvenční analýza před zatížením vodou – 100% jíł GEM.</i>	123
<i>Graf. 6.16.2 - Frekvenční analýza po zatížení vodou – 100% jíł GEM</i>	123

<i>Graf. 6.16.3 - Změna rezistance R v čase t - 100% jílu GEM</i>	125
<i>Graf. 6.16.4 - Změna teploty T a vlhkosti w v čase t.....</i>	125
<i>Graf. 7.1.1 – Změna rezistance R v čase t při různých koncentracích jílu B01</i>	126
<i>Graf. 7.2.1 – Změna rezistance R v čase t při různých koncentracích jílu GEC</i>	128
<i>Graf. 7.3.1 – Změna rezistance R v čase t při různých koncentracích jílu GEM.....</i>	130
<i>Graf 7.4.1 – Porovnání změn rezistance R v čase t u vybraných vzorků jílu</i>	133

14 SEZNAM TEBULEK

<i>Tab. 2.2.1 – Orientační hodnoty hydraulické vodivosti [Valentová].....</i>	14
<i>Tab. 4.2.1 – Specifikace základních parametrů přístroje Z-metr IV [Pařílková, Radkovský – Manuál k přístroji Z-metr IV]</i>	49
<i>Tab. 5.2.1 – Specifikace základních parametrů nerezavějící oceli [RS Components Sp.z.o.o.]</i>	53
<i>Tab. 5.5.1 – Chemická analýza vzorku GEC vyjmuta z technického listu</i>	56
<i>Tab. 7.1.1 - Porovnání jednotlivých výsledků různých koncentrací jílu B01</i>	127
<i>Tab. 7.2.1 - Porovnání jednotlivých výsledků různých koncentrací jílu GEC</i>	129
<i>Tab. 7.3.1 – Porovnání jednotlivých výsledků různých koncentrací jílu GEM</i>	131
<i>Tab. 7.4.1 – Porovnání výsledků jednotlivých druhů jílu.....</i>	132

15 PŘÍLOHY

15.1 TECHNICKÉ LISTY VZORKŮ JÍLŮ

TECHNICKÝ LIST



Produkt: jíł B1 - žárovzdorný vazný jíł

jíł B1	
Lokalita	N. Ves II.
Vzhled a barva	světle modravě šedý
Chemické složení	
Ztráta žháním (%)	10,5 - 12,5
SiO ₂ (%)	48 - 52
Al ₂ O ₃ (%)	32 - 34
Fe ₂ O ₃ (%)	2,3 - 2,7
TiO ₂ (%)	0,8 - 1,2
CaO (%)	0,2 - 0,4
MgO (%)	0,2 - 0,4
Na ₂ O (%)	0,0 - 0,2
K ₂ O (%)	2,3 - 2,8
Žárovzdornost (°C)	1700 - 1730
Teplota slinutí (°C)	max. 1150
Vaznost (%)	min. 70
Zbytek na síti	
2 mm (%)	0
0,09 mm (%)	max. 2
Popis zbytku	křemen
Celkové smrštění při 1250°C (%)	17 - 20
Nasákavost při 1250°C (%)	max. 2
Barva, vzhled při 1250°C	šedozeleňá, slinutý
Mineralogický charakter	kaolinitový jíł

způsob úpravy	vlhkost	velikost	expediční možnosti
homogenizovaný	max. 28 %	kusový	volně ložený
sušený	max. 12 %	max. 80 mm	volně ložený, obří vaky
mletý	max. 8 %	max. 3 mm	obří vaky, pap.pytle, silokamion
mikro - mletý	max. 6 %	max. 0,1 mm	obří vaky, pap.pytle

LB MINERALS, s.r.o.,
pracoviště Skalná,
Tovární ul. 270,
351 34 Skalná,
Česká republika
www.lb-minerals.cz,
e-mail: minerals@cz.lasselsberger.com,
tel: +420 354 505 125

Vydáním nového technického listu ztrácí tento výtisk platnost.

Aktualizace 10/2017



TECHNICKÝ LIST
Název: GEC – bentonitický jíl
Charakteristika: vysoce plastický, vazný, bentonitický jíl s vysokou sorpční schopností
Použití: Jíl GEC je použitelný jako minerální aglomerační pojivo, zadržující vodu a živiny, zejména je vhodný pro výrobu pěstitelských substrátů.

Barva	
při těžební vlhkosti - 25 - 35%	šedozelená
při vlhkosti po sušení a mletí - 5 - 18%	světle šedozelená
Chemická analýza	
Ztráta žháním při 1100°C [%]	7,0 - 8,0
SiO ₂ [%]	54,0 - 58,0
Al ₂ O ₃ [%]	18,0 - 20,0
Fe ₂ O ₃ [%]	7,5 - 9,5
TiO ₂ [%]	1,3 - 1,8
CaO [%]	1,2 - 1,5
MgO [%]	2,2 - 3,2
Na ₂ O [%]	0,1 - 0,3
K ₂ O [%]	2,7 - 3,5
Granulometrie	
Zbytek na 0,063 mm (křemen atd.) [%]	max. 0,5
Mineralogické složení	
illit [%]	37
kaolinit [%]	10
montmorillonit [%]	25
křemen [%]	10
Technologické vlastnosti	
Propustnost (filtrační součinitel) [m.s. ⁻¹]	< 1x10 ⁻⁹
Plasticita –sorpce methylenové modři AMM [ml/g]	25-27

způsob úpravy	vlhkost	velikost	expediční možnosti
homogenizovaný	25 – 35 %	kusový	volně ložený
sušený	12 – 18 %	max. 80 mm	volně ložený, obří vaky
mletý	5 – 12 %	max. 3 mm	obří vaky, pap.pytle, silokamion

LB MINERALS, s.r.o.,
 pracoviště Skalná,
 Tovární ul. 270,
 351 34 Skalná,
 Česká republika
 www.lb-minerals.cz,
 e-mail: minerals@cz.lasselsberger.com,
 tel: +420 354 505 125

Vydáním nového technického listu ztrácí tento výtisk platnost.

Aktualizace 01/2016



TECHNICKÝ LIST

Název: GEM – bentonitický jíl

Charakteristika: vysoce plastický, vazný, bentonitický jíl

Použití: Jíl GEM je vhodný jako vazná složka slévarenských písků při výrobě forem. Tento jíl je také vhodný jako minerální těsnění skládek, studní, tunelů, hloubkových staveb apod., lze jej použít i do těsnících injektáží. Jíl GEM je použitelný i při výrobě hliněných omítek nebo jako minerální aglomerační pojivo.

Barva	
při těžební vlhkosti - 25 - 35%	zelená
při vlhkosti po sušení a mletí - 5 - 18%	světle zelená
Chemická analýza	
Ztráta žháním při 1100°C [%]	6,5 - 7,5
SiO ₂ [%]	54,0 - 58,0
Al ₂ O ₃ [%]	16,5 - 18,5
Fe ₂ O ₃ [%]	10,0 - 12,0
TiO ₂ [%]	1,0 - 1,3
CaO [%]	1,0 - 1,3
MgO [%]	2,5 - 3,5
Na ₂ O [%]	0,1 - 0,3
K ₂ O [%]	3,0 - 3,7
Granulometrie	
Zbytek na 0,063 mm (křemen atd.) [%]	0,6
Mineralogické složení	
illit [%]	36
kaolinit [%]	10
montmorillonit [%]	29
Technologické vlastnosti	
Propustnost (filtrační součinitel) [m.s ⁻¹]	< 1x10 ⁻⁹
Plasticita –sorpce methylenové modři AMM [ml/g]	28-32

způsob úpravy	vlhkost	velikost	expediční možnosti
homogenizovaný	25 – 35 %	kusový	volně ložený
sušený	12 – 18 %	max. 80 mm	volně ložený, obří vaky
mletý	5 – 12 %	max. 3 mm	obří vaky, pap.pytle, silokamion

LB MINERALS, s.r.o.,
pracoviště Skalná,
Tovární ul. 270,
351 34 Skalná,
Česká republika
www.lb-minerals.cz,
e-mail: minerals@cz.lasselsberger.com,
tel: +420 354 505 125

Vydáním nového technického listu ztrácí tento výtisk platnost.

Aktualizace 01/2016

