VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

ODHAD EFEKTIVNÍ VELIKOSTI ZRNA ZEMIN APARATUROU EIS
ESTIMATING SOIL EFFECTIVE GRAIN SIZE BY EIS APPARATUS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE **Zuzana Chládová**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE **doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.**
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Zuzana Chládová
Název	Odhad efektivní velikosti zrna zemin aparaturou EIS
Vedoucí práce	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	24. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

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

GRUNTORÁD, J. (1985). Principy metod užité geofyziky. Praha: SNTL, Bratislava: Alfa, 190 s.

Klasifikace zemin, Mechanika hornin a zemin – cvičení 02. Inovace studijního oboru Geotechnika reg. č. CZ.1.07/2.2.00/28.0009. Dostupné z http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/MHZ-cviko-02.pdf.

KOŘÍNEK R. (2000). Mechanika hornin a zemin: podklady k přednáškám. Druhy vzorků. Brno, 2000. Dostupné také z: http://www.geotechnici.cz/wp-ontent/uploads/2012/08/MHZ-02.pdf

PETRÁNEK, J., BŘEZINA, J., BŘÍZOVÁ, E., CHÁB, J., LOUN, J., ZELENKA, P. (2016). Encyklopedie geologie. Nakladatelství: Česká geologická služba. ISBN: 978-80-7075-901-1.

ŠIMŮNEK, J., NIMMO, J. R. (2005). Estimating soil hydraulic parameters from transient flow experiments in a centrifuge using parameter optimization technique. Water Resources Research. April, Sv. 41, (4).

LAMBOJ, L., ŠTÉPÁNEK, Z. (2005). Mechanika zemin a zakládání staveb. vyd. [s.l.]: Vydavatelství ČVUT 214 s. ISBN 8001030946.

VAN DEN PUTTE, A. a kol. (2011): Estimating the parameters of the Green–Ampt infiltration equation from rainfall simulation data: Why simpler is better. Journal of Hydrology. Januar Sv. 476, (5), stránky 332-344.

WEIGLOVÁ, K. (2005). Mechanika zemin: Klasifikace zemin. BF02-M01. Brno: OHL ŽS.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešerše podkladů k problematice stanovení efektivní velikosti zrna zemin.

Rešerše podkladů o měřicí metodě elektrické impedanční spektrometrie.

Koncepce laboratorních experimentů a realizace měření.

Průběh měření a jeho dokumentace; výsledky měření, jejich zpracování a vyhodnocení, závěry.

Předpokládaný rozsah práce do 60 stran textu včetně grafů, tabulek a obrázků.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ 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 bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na možnost využití metody elektrické impedanční spektrometrie při odhadu efektivní velikosti zrna zemin. V prvním kroku řešení byla stanovena efektivní velikost zrna testovaných zemin ze zrnitostních křivek získaných sítovým rozborem a hustoměrnou zkouškou. Ve druhém kroku byly v laboratorních podmínkách provedeny frekvenční analýzy zkoumaných vzorků zemin. Výsledkem měření je doplnění závislosti měřicí frekvence analyzované zeminy na velikosti jejího efektivního zrna, na základě níž je možné pomocí frekvenční analýzy metodou elektrické impedanční spektrometrie usuzovat velikost efektivního zrna zeminy například při polních měřeních. Práce byla realizována v udržitelnosti projektu E!7614 programu EUREKA.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrická impedanční spektrometrie, zemina, křivka zrnitosti, efektivní zrno

ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the use of electrical impedance spectrometry and its possible application in the estimation of effective particle size of soil. The grain size curve of each soil sample was obtained by using the sieve analysis and aerometric method after which the effective particle size for each sample was determined. Thereafter the frequency analyzes of samples were performed under laboratory conditions using Z-meter. The results showed that it is possible to infer effective particle size when the frequency analysis is performed for example during field measurement. This research was carried out as part of the project E!7614 of the EUREKA program.

KEYWORDS

Electrical Impedance Spectrometry, Soil, Grain Size Curve, Effective Particle Size

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

CHLÁDOVÁ, Zuzana. *Odhad efektivní velikosti zrna zemin aparaturou EIS. Brno*, Brno, 2020. 74 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Odhad efektivní velikosti zrna zemin aparaturou EIS* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 28. 5. 2020

Zuzana Chládová
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Odhad efektivní velikosti zrna zemin aparaturou EIS* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 28. 5. 2020

Zuzana Chládová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala své vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc. za odborné vedení, podnětné rady, odbornou pomoc, kterou mi poskytovala při zpracování mé bakalářské práce a hlavně za čas, který mi věnovala.

Rovněž děkuji panu Luboši Pařílkovi, řemeslníkovi Ústavu vodních staveb, za realizaci a údržbu měřicího pracoviště včetně měřicí sondy pro měření elektrické impedance zemin, Ing. Zuzaně Műnsterové, doktorandce Ústavu vodních staveb, za praktickou pomoc při měření přístrojem Z-metr IV a zajišťování vzorků zemin a Ing. Ivaně Kameníčkové, Ph.D., odborné asistentce Ústavu vodního hospodářství krajiny, za umožnění provedení hustoměrných zkoušek zemin a odbornou pomoc při jejich zpracování.

Poděkování také patří mé rodině, zejména mojí mamce za moc dobré obědy a mým přátelům za psychickou podporu v nejlepších čtyřech letech mého života na VUT.

OBSAH

1 Úvod 10

1.1 Cíl práce 11

1.2 Metoda řešení 11

2 Zrnitost zeminy 12

2.1 Křivka zrnitosti 12

2.2 Klasifikace zemin pro inženýrské účely 14

3 Metody zrnitostního rozboru 15

3.1 Sítový rozbor 15

3.2 Elutriační metody 16

3.3 Sedimentační metody 17
3.3.1 Dekantační metoda 17
3.3.2 Pipetovací metoda 17
3.3.3 Hustoměrná metoda podle Casagrande 18

3.4 Další metody zrnitostní analýzy 19
3.4.1 Optická a elektronová mikroskopie 19
3.4.2 Laserová difrakční metoda 21
3.4.3 Elektrorezistivní metody 22
3.4.4 Akustická spektroskopie 23
3.4.5 Wolmanova metoda 23
3.4.6 Subjektivní odhad 24

4 Metoda elektrické impedanční spektrometrie 25

4.1 Princip metody 25

4.2 Měřicí aparatura 27

5 Průběh a výsledky Měření velikosti efektivního zrna zeminy aparaturou EIS ..29

5.1 Stanovení velikosti efektivního zrna zemin 29
5.1.1 Sítový rozbor 29
5.1.2 Hustoměrná zkouška 32

5.2 Měření elektrické impedance zemin 33

6 Diskuze výsledků měření 41

7 Závěr 52

8 Seznam použitých zdrojů 53

Seznam tabulek **55**

Seznam obrázků **56**

Seznam grafů **58**

Seznam použitých zkratek **59**

Seznam použitých symbolů **60**

Seznam příloh **61**

Příloha 1 – příklad zpracování dat ze sítového rozboru **62**

Příloha 2 – Příklad zpracování dat z měření hustoměrnou metodou **64**

Příloha 3 – příklad zpracování dat z měření elektrické impedance **66**

1 ÚVOD

Půda je nejsvrchnější vrstvou zemské kůry. Vzniká v procesu pedogeneze působením vnějších faktorů a času, a je produktem přeměn minerálních a organických látek. Nosná konstrukce objektu a jeho podloží působí jako jeden statický celek, a proto je třeba podloží staveb považovat za nedílnou součást každé konstrukce. Většinou je podloží tvořeno zeminou, což je označení pro nezpevněnou nebo slabě zpevněnou soudržnou i nesoudržnou horninu, s obsahem jak organických tak anorganických zrn.

Zemina je nepochybně důležitou součástí stavebnictví, s jejím působením a reakcemi se musí vždy počítat při návrhu staveb. Co do objemu využití se pravděpodobně jedná o nejrozšířenější stavební materiál. Zemina je například základním stavebním materiálem při výstavbě zemních těles násypů, hrází, přehrad, a dále se specifické zeminy používají například jako plnivo do betonů. Oproti ostatním stavebním materiálům má zemina ale podstatně složitější chování, kterým se zabývá mnoho vědních oborů, jako jsou mechanika zemin, pedologie, hydropedologie, geotechnika, geonika a další.

Při návrhu staveb je tedy nutno respektovat různé fyzikální a chemické vlastnosti zemin, mezi něž náleží i podíl určitých velikostních skupin zrn na celkovém složení zeminy. Každá zemina má svou unikátní zrnitost znázorněnou křivkou zrnitosti. Ta se běžně získává složitými zkouškami, které jsou relativně časově náročné. Například pro některé zeminy je nutné provést sítový rozbor, a doplnit jej o hustoměrnou zkoušku, takže doba nutná pro vykreslení zrnitostní křivky stoupne na více než 48 hodin laboratorního měření. Jedním z parametrů, který lze z křivky zrnitosti získat, a který je klíčový například při návrhu vodního koryta nebo při výpočtu průtoku dnových splavenin, je velikost efektivního zrna. Jedná se o velikost zrna zeminy, která reprezentuje celou různorodou směs velikostí zrn, a proto se velmi často využívá i ve výpočtech. Poněvadž však stanovení uvedeného parametru může být časově náročné, je tendence, především v technické praxi či při orientačních polních měřeních, najít a využívat metody umožňující odhad velikosti efektivního zrna zeminy. Jednou z možných cest by mohlo být využití metody elektrické impedanční spektrometrie.

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce je v souladu s jejím zadáním, na základě provedených experimentálních měření, diskutovat a určit, zda lze použít metodu elektrické impedanční spektrometrie (EIS) při odhadu velikosti efektivního zrna zeminy.

V rámci udržitelnosti řešení mezinárodního projektu aplikovaného výzkumu E!7614 v programu EUREKA „Automatizovaný systém pro analýzu vybraných charakteristik a procesů v porézním prostředí metodou EIS“ bude pro tato měření použit měřicí přístroj Z-metr IV. V letech 2014 až 2019 byla realizována měření efektivní velikosti zrna a byly provedeny frekvenční analýzy zkoumaných vzorků zemin. Výsledkem provedených analýz bylo vytvoření závislosti $f_M = \mathrm{f}\,(d_{ef})$.

Předmětem předložené bakalářské práce je uvedenou závislost doplnit o další měření a zhodnotit možnost využití metody EIS při odhadu velikosti efektivního zrna.

1.2 METODA ŘEŠENÍ

Ke splnění cíle práce jsem provedla experimenty za použití měřicího přístroje Z-metr IV, který je určen k laboratorním i polním měřením elektrické impedance pórovitých prostředí a byl na uvedeném pracovišti realizován řešením mezinárodního projektu aplikovaného výzkumu E!7614 v programu EUREKA. Měření probíhala v laboratorních podmínkách v Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb a Pedologické laboratoři Ústavu vodního hospodářství krajiny na Fakultě stavební Vysokého učení technického v Brně.

Pro práci jsem si vytyčila následující milníky:

- seznámení se s dosavadními výsledky mezinárodního projektu E!7614 v rámci programu EUREKA,
- provedení rešerše stanovování zrnitosti zemin,
- provedení rešerše měření elektrické impedance,
- seznámení se s principy měření stejnosměrnými a střídavými elektrickými měřicími metodami s ohledem na určení elektrické impedance,
- příprava vzorků zemin,
- provedení analýzy zrnitosti sítovým rozborem, popřípadě hustoměrnou zkouškou,
- měření elektrickými měřicími metodami s ohledem na určení elektrické impedance,
- analýza dat získaných měřením zrnitosti a elektrické impedance,
- doplnění již existující závislosti $f_M = \mathrm{f}\,(d_{ef})$,
- posouzení vhodnosti provedené analýzy při určování efektivního zrna zkoumané zeminy.

2 ZRNITOST ZEMINY

Dle inženýrsko-geologické klasifikace se zeminou rozumí hornina, jejíž částice nejsou vzájemně pevně spojeny. Za zeminu lze tedy považovat každou nezpevněnou nebo slabě zpevněnou soudržnou i nesoudržnou horninu [6].

Podle vzniku a stupně zpevnění se zeminy rozdělují na:

a) nesoudržné (sypké) zeminy – písky a štěrky,
b) soudržné zeminy – jíly.

Pro pochopení mechanického chování zeminy je třeba znát její strukturu. Struktura zeminy reprezentuje charakter a geometrické uspořádání pevných částic zrn zeminy a povahu vazeb mezi nimi.

Základním parametrem zeminy a jednou z jejích nejdůležitějších fyzikálních vlastností je zrnitost, která udává procentuální podíl jednotlivých frakcí v celkovém objemu hmotnosti dané zeminy. Zrnitost poskytuje popis zeminy založený na rozdělení jejích zrn do jednotlivých frakcí, přičemž zastoupení každé frakce často předurčuje i tvar a velikost zrn. Obecně lze zeminy nalézt ve velmi širokém spektru zrnitosti. Jedná-li se např. o zeminy stejnozrnné, potom se skládají ze zrn pouze jedné velikosti nebo velmi úzké frakce zrnitosti. K zrnitosti se vztahuje řada geotechnických a hydrogeologických vlastností zeminy.

2.1 KŘIVKA ZRNITOSTI

Křivka zrnitosti je součtová křivka, která vyjadřuje kumulativní relativní četnost jednotlivých zrnitostních frakcí, daných jejich podílem na celkové hmotnosti zeminy [6]. Obsah jemných zrn ovlivňuje vlastnosti zemin obecně větší měrou než hrubší zrna. Aby bylo možné zeminu charakterizovat v celém rozpětí velikosti zrn, křivky zrnitosti se znázorňují zásadně v semilogaritmických souřadnicích. Na vodorovné logaritmické ose jsou vyneseny průměry zrna zeminy a na svislé lineární ose procentuální podíly hmotnosti vysušeného vzorku zeminy daného průměru oka [6]. Logaritmické vyjádření průměrů umožňuje dostatečně přesné znázornění podílu všech průměrů až do nejmenších.

Obrázek 1 – Křivka zrnitosti zeminy [22]

Zeminy lze definovat charakteristickými číselnými hodnotami [12],například d_{10}, d_{50}, d_{60} a d_{90}, kde d_{10} – je velikost zrn při 10 % propadu atd. Mezi charakteristické hodnoty zeminy se řadí i efektivní zrno zeminy d_{ef}, někdy také označované jako střední průměr zrna d_s nebo účinný průměr. Jedná se o průměr stejně velkých kulovitých zrn myšlené ideální zeminy, která má v určitém ohledu (např. z hlediska propustnosti pro vodu) stejné vlastnosti jako skutečná zemina. V praxi v oblasti malých zrn často udává přímo $d_{ef} = d_{10}$ [26].

Z křivky zrnitosti se d_{ef} vyjádří ze vztahu:

$$d_{ef} = \frac{\Sigma \Delta p_i \frac{d_1 + d_{(i+1)}}{2}}{100} \text{ [mm]} \qquad (2.1)$$

kde:

d_i je aritmetický průměr mezních velikostí jedné frakce,

p_i je procentuální obsah uvažované frakce z celkové hmotnosti daného vzorku.

Důležitou charakteristikou zrnitosti je také číslo nestejnozrnnosti C_u, které charakterizuje sklon střední části křivky zrnitosti a je definováno jako poměr průměrů zrn.

$$\mathrm{C_u} = \frac{\mathrm{d_{60}}}{\mathrm{d_{10}}} \text{ [–]}, \qquad (2.2)$$

kde:

d_{60} – je velikost zrn při 60 % dopadu,

d_{10} – je velikost zrn při 10 % dopadu.

Podle velikosti hodnoty C_u, kde lze zeminu označit jako *stejnozrnnou*, *středně zrněnou* a *dobře zrněnou*. Stejnozrnné zeminy mívají v přírodě obvykle vyšší pórovitost, jsou propustnější, mají menší smykovou pevnost a horší zhutnitelnost než zeminy dobře zrněné. Ty jsou výborným materiálem na budování zemních těles násypů, hrází a přehrad, zejména tehdy, mají-li plynule stoupající křivky zrnitosti (podobné křivkám optimální skladby kameniva pro betony).

Číslo křivosti C_c charakterizuje přibližně tvar křivky zrnitosti. Určuje se jako poměr průměrů zrn

$$\mathrm{C_c} = \frac{\mathrm{d_{30}^2}}{\mathrm{d_{10} d_{60}}} \quad \text{[–]}, \qquad (2.3)$$

kde:

d_{30} – je velikost zrn při 30 % propadu,

d_{60} – je velikost zrn při 60 % propadu,

d_{10} – je velikost zrn při 10 % propadu.

Číslo křivosti je pomocná hodnota v klasifikaci zemin. Zeminy s hodnotami C_c = 1 až 3 a považují za dobře zrněné, to znamená, že mají plynulé křivky zrnitosti. Hodnoty nižší, a nebo vyšší patří zeminám s chybějícími frakcemi, které mají stupňovité křivky s vodorovnými nebo málo stoupajícími úseky. Leží-li takový úsek v oblasti zrn < d_{30}, platí C_c > 3, pokud leží-li v oblasti zrn > d_{30}, platí C_c < 1. Zeminy s chybějícími frakcemi mohou mít nepříznivé vlastnosti. Například v dunajských písčitých štěrcích chybí zrna průměru 0,5 mm až 2,0 mm. Proudící voda může zrnka písku v pórech štěrku bez obtíží přemisťovat a vyplavovat [15].

2.2 KLASIFIKACE ZEMIN PRO INŽENÝRSKÉ ÚČELY

Klasifikace zemin pro inženýrské účely je založena na zatřídění zemin do skupin, tříd, v nichž mají určité konkrétní a velmi blízké vlastnosti. Například v případě jemnozrnných zemin se vlastnosti výrazně liší v závislosti na vlhkosti, která významně ovlivňuje konzistenční stav těchto zemin. Pro skupinu sypkých zemin má vlhkost podstatně nižší vliv. Získání charakteristických hodnot parametrů zemin umožňuje stanovit mechanické chování zemin a provést návrh konstrukce, založení konstrukce, posouzení stability apod.

Základním nástrojem pro realizaci klasifikace zemin je již uvedený zrnitostní rozbor, tedy popis zeminy založený na jejím rozdělení do jednotlivých frakcí. Frakcí zeminy se rozumí zrna stejné velikosti. Frakce může být hmotnostní nebo četnostní.

Základem klasifikace zemin je klasifikace USCS (Unified Soil Classification System), kde rozlišující znak zemin je jejich zrnitostní složení. U zemin, které obsahují >15 % jemnozrnných částic se zohledňuje i plasticita, proto je nutné zařazení zeminy do určité frakce zkoumat vždy v širším kontextu.

Tabulka 1 odpovídá ČSN EN ISO 14688-1 (721003) Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřiďování zemin - Část 1 a uvádí souvislost frakce s velikostí zrn. Symbol frakce vychází z jejího anglického pojmenování.

Tabulka 1 – Velikost zrn frakcí (ČSN EN ISO 14688-1)

Skupiny zemin	Frakce	Symbol	Velikost zrn (mm)
velmi hrubozrnná zemina	velký balvan	LBo	do 630
	balvan	Bo	200-630
	valoun	Co	63-200
hrubozrnná zemina	štěrk	Gr	2,0-63
	hrubozrnný	CGr	20-63
	střednězrnný	MGr	6,3-20
	jemnozrnný	FGr	2,0-6,3
	písek	Sa	0,063-2,0
	hrubozrnný	CSa	0,63-2,0
	střednězrnný	MSa	0,2-0,63
	jemnozrnný	FSa	0,063-0,2
jemnozrnná zemina	prach	Si	0,002-0,063
	hrubozrnný	CSi	0,02-0,063
	střednězrnný	MSi	0,0063-0,02
	jemnozrnný	FSi	0,002-0,0063
	jíl	Cl	≤ 0,002

3 METODY ZRNITOSTNÍHO ROZBORU

Výběr metody pro analýzu zrnitosti [1] zemin se ve stavebnictví řídí normou ČSN EN ISO 17892-4 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin.). Volba zkušební metody musí být provedena následovně:

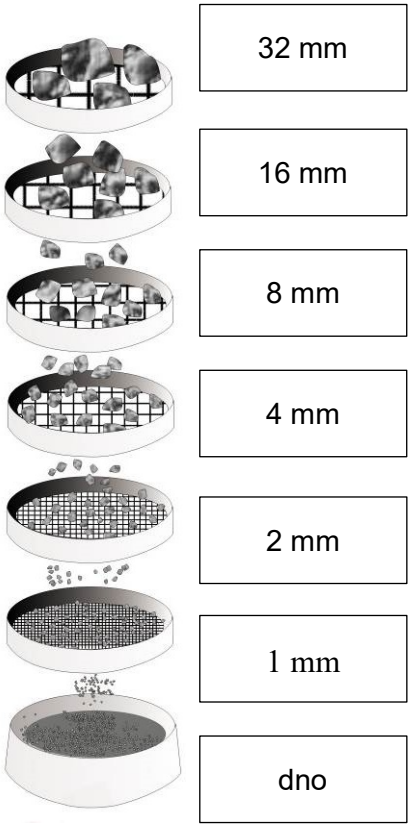
- Pro smíšené zeminy musí být prováděno odděleně prosévání a sedimentace.
- Jestliže 90 % nebo více zrn zeminy je většího průměru než 0,063 mm, pak musí být provedeno prosévání.
- Jestliže více než 10 % zrn zeminy je menšího průměru než 0,063 mm, pak musí být provedena sedimentace.
- Jestliže je požadováno vytvoření kompletní křivky zrnitosti, pak musí být provedena jak zkouška prosévací tak sedimentační.

Metody se v praxi většinou kombinují z důvodu širokého zastoupení zrn v zemině.

3.1 SÍTOVÝ ROZBOR

Zemina je prosévána přes sadu normových sít s definovanou velikostí otvorů. Nejmenší síto má otvory o průměru 0,063 mm. Používá se ke stanovení především zrnitostního složení pro nesoudržné zeminy.

Základní řadu normových sít pro jíl a prach, písek a štěrk tvoří velikosti ok 0,063 mm, 0,125 mm, 0,25 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 32 mm, 63 mm, 80 mm, 90 mm a 125 mm (ČSN CEN ISO/TS 17892-4) a (ČSN EN 933-1).



Obrázek 2 – Sada sít, zdroj [23]

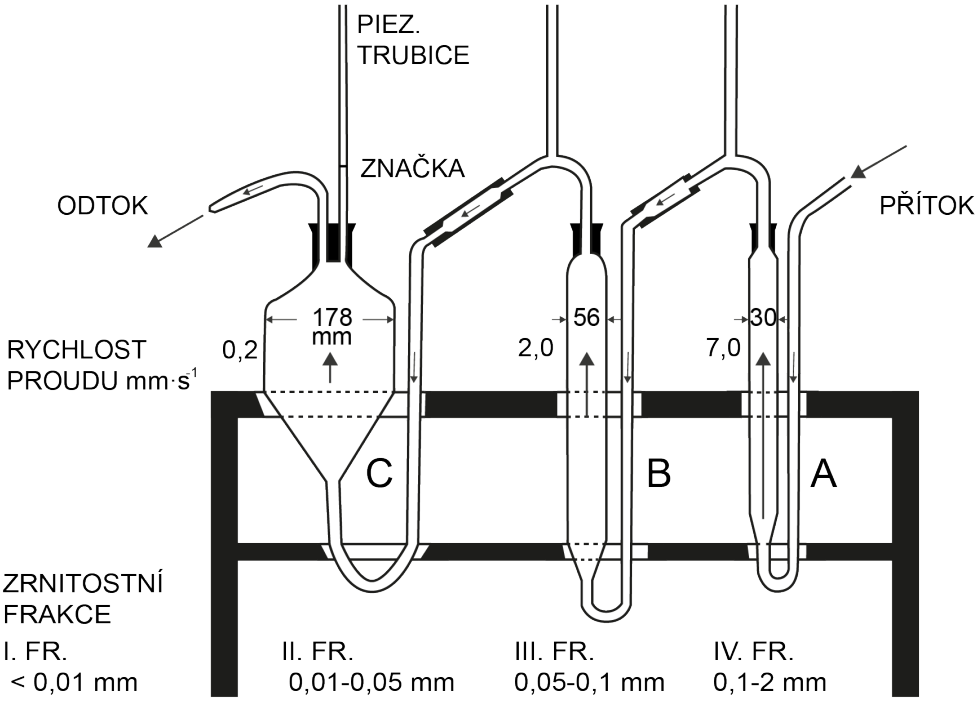
Vzorek zeminy, o daném množství navážky (dle typu zeminy – např. pro písky se volí 0,1 kg – 0,5 kg, pro štěrky 1 kg – 20 kg), je předem proplaven a v peci se vysuší při teplotě (105 ± 5) °C. Zemina se vsype na připravená síta, která se uzavřou víkem a vloží přibližně na 10 minut do vibračního přístroje. Zbytky na jednotlivých sítech i propad přes nejjemnější síto 0,063 mm se pečlivě zváží a jejich podíl na příslušném sítě se vyjádří v procentech původní navážky.

Pokud sítem s nejmenšími otvory (0,063 mm) propadne více než 10 % z celkové hmotnosti vzorku, musí být proveden další zrnitostní rozbor, zpravidla analýza na základě rychlosti usazování ve vodě, který doplní zrnitostní křivku.

3.2 ELUTRIAČNÍ METODY

Elutriační metody jsou založeny na separaci zrn zeminy na základě jejich velikosti, tvaru a hustoty proudem tekutiny (nejčastěji vzduch nebo voda), působícím proti směru jejich sedimentace.

Příkladem elutriační metody je Kopeckého vyplavovací metoda, za použití Kopeckého plavicího přístroje, kdy se k roztřídění zrn zeminy do frakcí využívá různých rychlostí vzestupného proudu vody ve válcích. Zrna, která mají menší sedimentační rychlost než je rychlost vodního proudu, jsou odplavena a ta s větší sedimentační rychlostí, klesají ke dnu [13]. Přístroj rozděluje zrna do čtyř kategorií podle Kopeckého. Do nejužšího válce je přiváděna voda, ta následně protéká širšími válci. 4. kategorie jemnozemě zůstane v nejužším válci, 3. kategorie v prostředním válci a 2. kategorie v posledním, nejširším válci. 1. kategorie jemnozemě je vyplavována z přístroje ven. [5] Tato metoda je dnes málo používaná [13].



Obrázek 3 – Kopeckého plavicí přístroj [24]

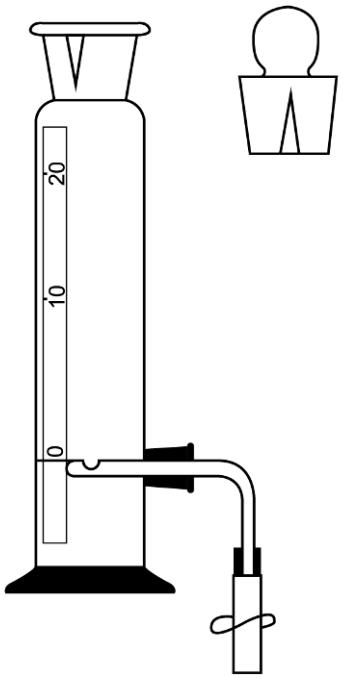
3.3 SEDIMENTAČNÍ METODY

Sedimentační metody jsou založeny na procesu usazování zrn v kapalině. Jejich teoretickým podkladem je Stokesův vztah, který platí pro kulové částice v oblasti laminárního proudění.

- S přerušovanou sedimentací – dekantační metoda,
- s nepřerušovanou sedimentací – pipetovací metoda, hustoměrná metoda.

3.3.1 Dekantační metoda

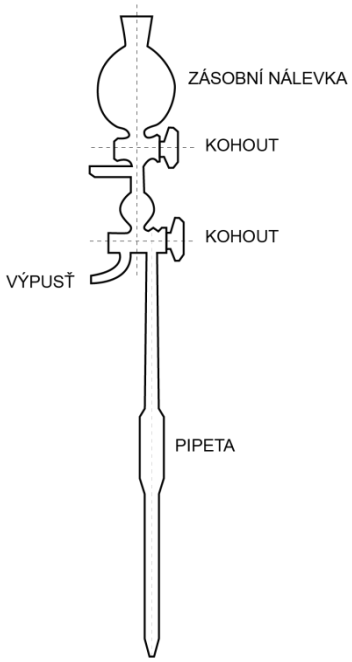
Při dekantační metodě se suspenze nechá po předepsaný čas, který odpovídá sedimentační rychlosti určité velikosti zrn, usazovat. Následně se vypustí vypouštěcím zařízením vrchní sloupec suspenze až po hloubku *h,* tak se odstraní zrna o sedimentační rychlosti menší než $v = h/t$. Suspenze se poté doplní vodou až po původní hladinu a protřepe. Tento postup se provádí až do vyčištění kapaliny (čirá kapalina) v usazovacím sloupci. Odebraný vzorek se po vysušení váží a odečtením od původní hmotnosti vzorku se zjistí hmotnost frakce částeček o průměru menší, než je rozměr, který odpovídá uvažované sedimentační rychlosti *v.*



Obrázek 4 – Dekantační válec s postranním tubusem [25]

3.3.2 Pipetovací metoda

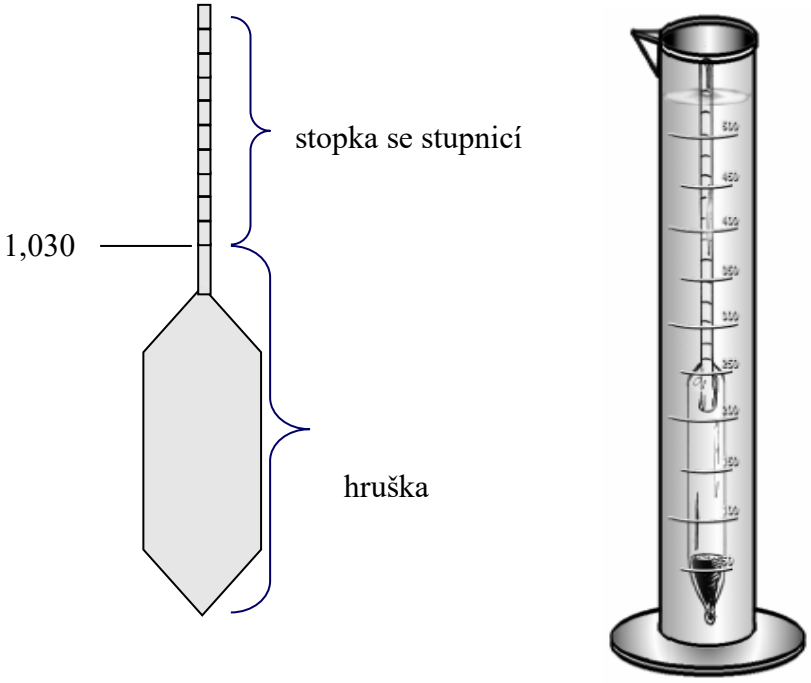
Pipetovací metoda je založena na skutečnosti, že se v určitých časových intervalech odebírají z dané hloubky malá množství suspenze, která se vysuší, zváží a vypočte se procentuální podíl. Vypočtený procentuální podíl odpovídá danému průměru zrna, vypočteného z usazovací rychlosti za daný interval. Tato metoda je považována za nejpřesnější pro stanovení zrn < než 0,05 mm [13].



Obrázek 5 – Pipetovací metoda [25]

3.3.3 Hustoměrná metoda podle Casagrande

Při hustoměrné metodě (podle A. Casagrande) se měří hustota suspenze speciálním hustoměrem v určitých intervalech času. Postupem času dochází v suspenzi k usazování částic podle velikosti a k poklesu hustoty, která se stanovuje hustoměrem. Z hustoty a známého časového intervalu od začátku sedimentace se stanoví procentuální podíl jednotlivých částic [13].



Obrázek 6 – Hustoměrná zkouška [25]

3.4 DALŠÍ METODY ZRNITOSTNÍ ANALÝZY

Existuje řada technik, které umožňují měření velikosti zrn a jejich případnou distribuci dle účelu využití. Zrnitostní analýzy a aplikované měřicí techniky neslouží pouze pro stavební praxi, a proto je nutné podotknout, že výsledky měření se mohou podle použité metody lišit, neboť různé technologie měří různé veličiny s různou přesností.

S rozvojem technologií, moderních měřicích technik v elektrotechnickém průmyslu, a tím i měřicích přístrojů dochází ke změnám i ve standardech měření velikosti zrn zemin.

Některé z metod jsou určeny pouze k laboratornímu využití a často se využívají jako referenční, jiné umožňují kvalifikovaný odhad velikosti částic, protože např. analyzují malé hmotnostní množství zkoumané zeminy, další vyžadují zkušenosti měřiče, neboť vycházejí z jeho subjektivního odhadu nebo pro distribuci zrn využívají různé matematické modely. Mezi nejpoužívanější techniky patří optická mikroskopie, rozptyl laserového záření, elektrické metody – Coulterův čítač či automatické stanice měřicí sedimentační rychlosti apod.

Nutno podotknout, že žádná z níže uvedených metod není uvedena v normě ČSN EN ISO 17892-4 (721007) Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4.

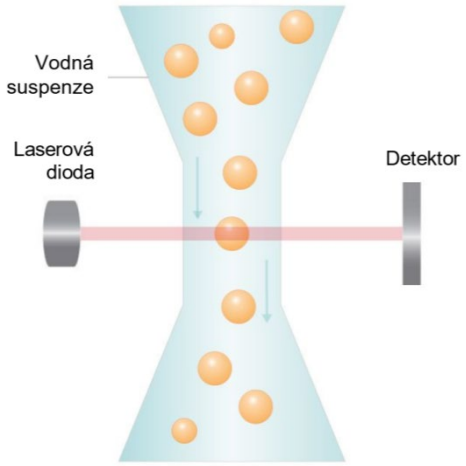
Mezi metody umožňující odhad velikosti zrn matrice zeminy a zrn případných příměsí náleží i zkoumaná metoda elektrické impedanční spektrometrie.

3.4.1 Optická a elektronová mikroskopie

Do skupiny metod optické a elektronové mikroskopie pro určení velikosti, tvaru, krystalové struktury, povrchu a dalších geometrických charakteristik zrn lze zahrnout například fotoanalytické metody nebo metody optického počítání spolu s obrazovou analýzou.

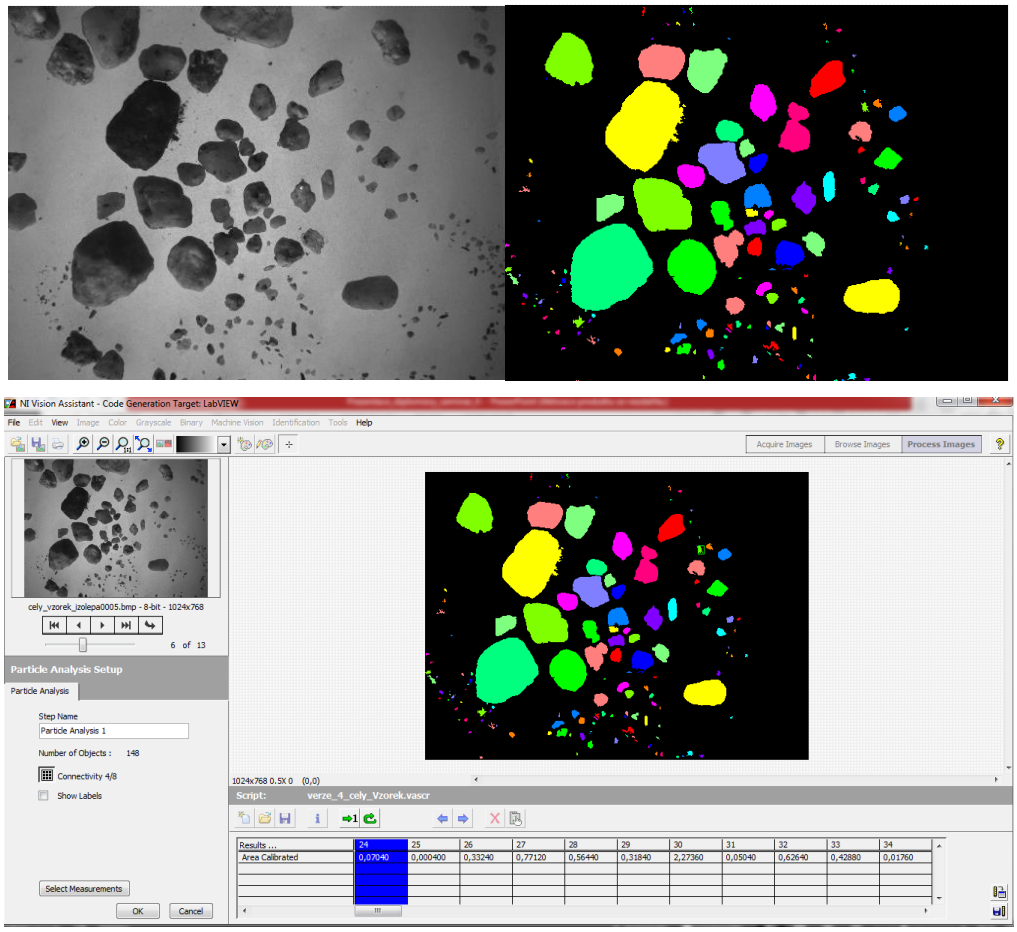
Velikost zrn může být měřena přímo (metody se používají jako referenční), avšak mikroskopická měření mají některá omezení. Jedná se o subjektivní metodu zatíženou chybami pozorovatele. Z uvedeného důvodu je nutno náhodně měřit větší počty zrn, což je časově náročné. Problém však částečně řeší automatická obrazová analýza. Pomocí mikroskopie lze měřit vždy dva rozměry v ploše, což je problém v případě anizometrických zrn. Další omezení mikroskopie představují technické parametry mikroskopu např. optickou mikroskopií lze měřit částice od 1 μm [25].

Zrnitost lze stanovit metodou optického počítání měřením distribuce velikosti jednotlivých zrn využitím analyzátoru velikosti zrn vybaveným laserovým paprskem pro stanovení jejich velikosti a automatickým skenovacím elektronovým mikroskopem pro provedení analýzy. Před provedením analýzy musí být vzorek cca 1 minutu ošetřen ultrazvukem a následně je vytvořena např. vodná suspenze z asi 2 g vzorku zeminy, která je podrobena analýze. Je tedy měřena velikost jednotlivých zrn a z jejich dvourozměrného zobrazení se provede odhad velikosti zrna vzorku. Pro statisticky validní analýzu je třeba změřit velké množství zrn, aby byly výsledky dostatečně reprezentativní. Tato metoda je vhodná pro vzorky mezi 0,2 μm až 100 μm [7] [14].



Obrázek 7 – Schéma metody optického počítání [11]

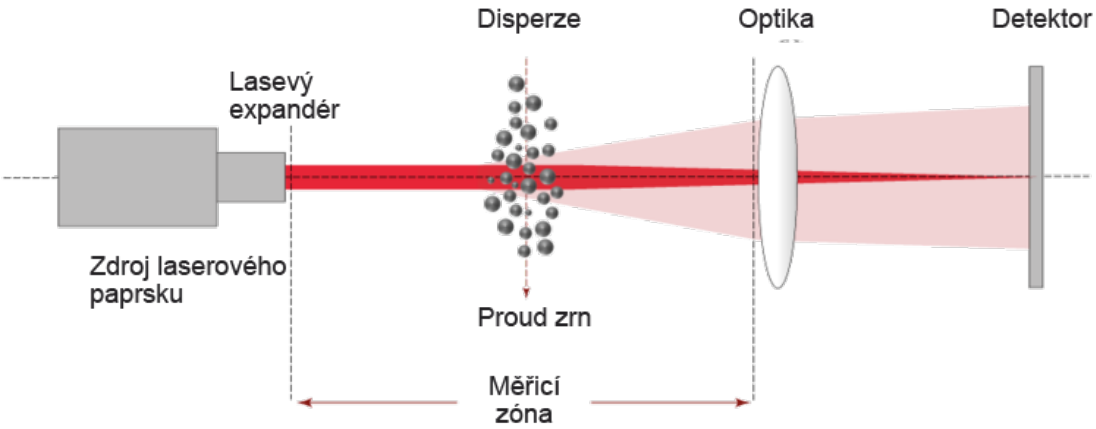
Princip metody fotoanalýzy spočívá v tom, že se daný vzorek zeminy vyfotografuje a zrnitost je stanovena softwarem určeným k analýze fotografie. Uvedený postup je oproti sítové metodě výrazně rychlejší [7] [9], může vést i k dostatečně přesným výsledkům a jeho nespornou výhodou je, že není třeba se vzorkem jakkoli manipulovat. Zařízení a software pro fotoanalýzu se v současnosti ve světě používají například v těžebním, lesním průmyslu a v zemědělství.



Obrázek 8 – Ukázka principu metody fotoanalýzy: a) původní obraz pořízený v mikroskopu; b) verze upraveného algoritmem, připravená pro analýzu v programu; c) prostředí programu vytvořeného pro obrazovou analýzu Laserovou difrakční metodou [9]

3.4.2 Laserová difrakční metoda

Jedná se o techniku hromadného měření velikosti zrn zemin, která generuje výsledek pro celý vzorek. Princip spočívá v kontinuálním průtoku částic měřicí celou, kde se rozptyluje laserové záření. Informace o velikosti a tvaru částic jsou obsaženy v difrakčním obraze a odtud pomocí Fourierovy transformace převedeny na distribuční křivku. Před měřením je třeba nejdříve vyvinout a validovat metodu pro konkrétní vzorek. To znamená stanovit fixní a hledané parametry měření, které souvisí s vlastnostmi měřené zeminy. Laserová difrakce je rychlá, reprodukovatelná metoda a je možno měřit zrna v rozmezí od 0,02 mm po několik milimetrů [9].

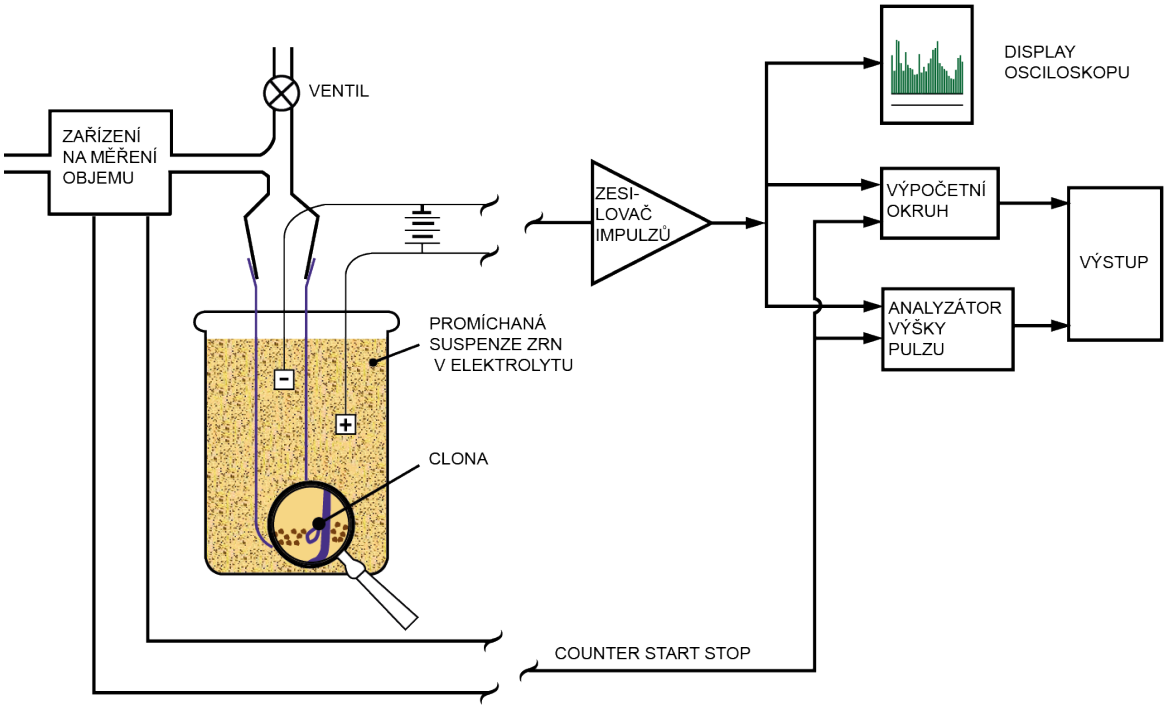


Obrázek 9 – Schéma metody laserové difrakce [27]

Obrázek 10 – ANALYSETTE 22 NanoTec – laserový měřič velikosti částic v rozsahu 0,01 µm až 2100 µm firmy Fritsch, vlastník zařízení Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre (foto Pařílková)

3.4.3 Elektrorezistivní metody

Mezi nejznámější elektrorezistivní metody patří Coulterův čítač. Princip metody spočívá v měření změn elektrického odporu při průchodu nevodivých zrn rozptýlených v elektrolytu mezi dvěma elektrodami. Počet změn elektrického odporu tj. počet měřených impulsů je roven počtu měřených zrn a každý puls je úměrný objemu snímaného zrna.



Obrázek 11 – Schéma principu Coulterova čítače [28]

Pokud je zrno o určitém průměru suspendováno v elektrolytu a prochází otvorem mezi elektrodami o určitém průměru, lze ze změny elektrického odporu ΔR vypočítat velikost zrna podle vztahu:

$$\Delta R = 53 d^3/D^4 , \qquad (3.1)$$

kde:

d je průměr zrna,

D průměr otvoru mezi elektrodami.

Zkoumaná zrna by měla mít malou distribuci velikostí, protože při měření velkých zrn může dojít k ucpání prostoru mezi elektrodami. Protože vzorek musí být rozptýlen v kapalném médiu, některá zrna se v něm mohou (částečně nebo úplně) rozpustit a změnit tak distribuci velikostí ve vzorku. Výsledky se vztahují pouze k promítnuté ploše průřezu, kterou se zrno posune při průchodu otvorem. Jedná se o fyzický průměr, který ve skutečnosti nesouvisí s matematickými popisy zrn (např. koncová usazovací rychlost). Pokud se tvar zrn výrazně odlišuje od koule, poskytují zkreslené výsledky měření. Zkreslené výsledky jsou také pozorovány při měření porézních částic. Metodu je třeba kalibrovat, kdy se porovnává výška nebo plocha píku impulsu se standardy, například latexovými zrny. Výhodou je, že lze uvedenou metodou zkoumat velmi malé podíly vzorků. V závislosti na přístrojovém uspořádání lze zpravidla měřit velikosti zrn v rozmezí velikostí 0,4 µm až 1200 µm [25].

Obrázek 12 – Multisizer™ 4e COULTER® Counter – čítač částic velikosti v rozsahu 0,2 µm až 1600 µm firmy BeckmanCoulter využívající Coulterovu impedanční metodu [29]

3.4.4 Akustická spektroskopie

Akustická spektroskopie, nebo též ultrazvuková atenuační spektroskopie, je založena na sledování tlumení resp. zeslabování elektromagnetického nebo akustického vlnění při průchodu určitým prostředím. Místo světla se tedy ke shromažďování informací o zrnech rozptýlených v tekutině používá ultrazvuk, který dispergovaná zrna absorbují a rozptylují. Měří se přenášená energie a frekvence, výsledná ultrazvuková útlumová frekvenční spektra jsou hrubá data pro výpočet distribuce velikosti částic.

Za výhodu metody lze považovat možnost měřit v jakémkoli kapalinovém systému bez ředění nebo jiné přípravy vzorku.

Výpočet distribuce velikosti zrn je založen na teoretických modelech, které jsou ověřeny až pro 50 % zastoupení zrn o velikosti mikro- až nanometrů dispergovaných v objemu tekutiny. Jak se zvyšuje koncentrace zrn, a jejich velikost se blíží řádu nanometrů, konvenční modelování selhává a je nutné zohlednit efekty šumu od falešných odrazů, aby modely představovaly skutečné útlumové spektrum prostředí.

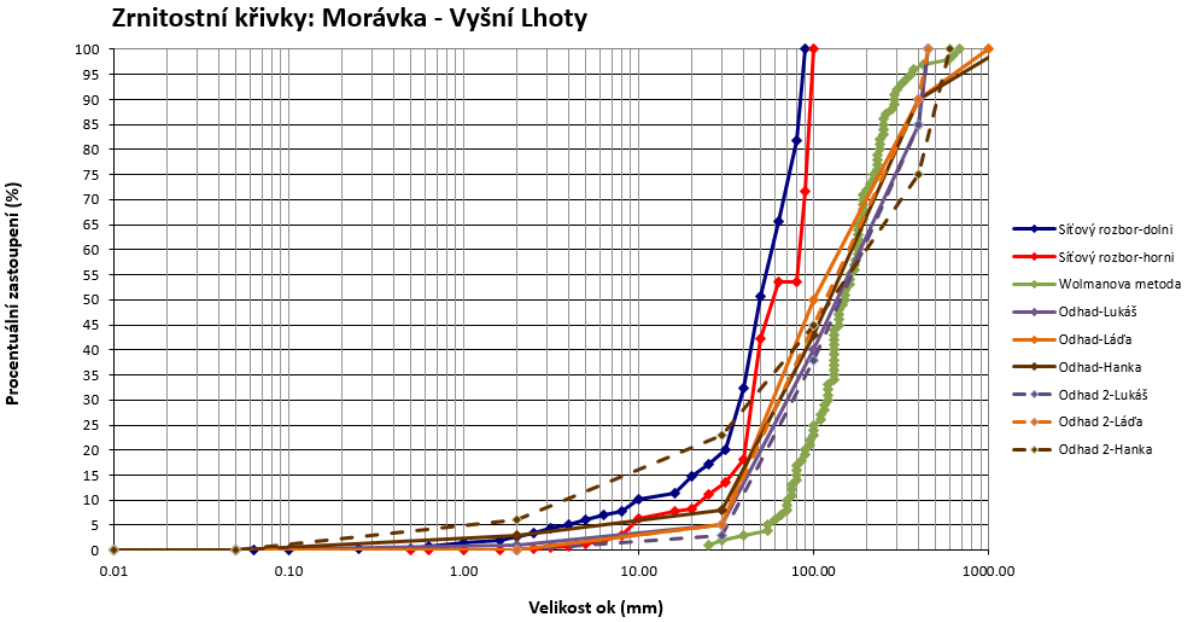
3.4.5 Wolmanova metoda

Wolmanova metoda je určena pro měření velikosti náhodně zvoleného zrna přímo ve vodním toku. Je vhodná pro frakce štěrku (2 mm) a větší, jedná se o náhodný odběr v korytě řeky při hloubce vody do 0,6 m. Doporučené množství odebraných zrn je 100 [3], [21].

Obrázek 13 – Ukázka provádění Wolmanovy metody [12]

3.4.6 Subjektivní odhad

Při metodě subjektivního odhadu se odhaduje procentuální zastoupení středního rozměru zrna, tj. odhaduje se plošné procentuální zastoupení frakcí na rozdíl od křivky zrnitosti, kdy se zjišťuje hmotnostní podíl frakcí. Měření probíhá přímo ve vodním toku, kdy se vizuálně (v čisté vodě) nebo hmatem specifikuje velikost zrna. Nevýhodou je výrazné potlačení malých frakcí a procentuální navýšení frakcí velkých [3].



	jíl / bahno	písek	štěrk	kameny	valouny	balvany		
Orientační rozměr (mm)	< 0,05	0,05 až 2,00	2,0 až 20,0	20 až 100	100 až 400	> 400	max (mm)	suma %
Orientační slovní popis	zrna nelze rozlišit	zrna lze rozlišit	do velikosti nehtu prstu	vejde se do jedné ruky	držet ve dvou rukách	nelze zvednout		
odhad % Morávka	0	2	8	20	40	30	70	100

Obrázek 14 – Příklad výstupu subjektivní metody [12]

Obrázek 15 – Příklad přirozené zrnitosti dna vodního toku Bečva (foto Pařílková)

4 METODA ELEKTRICKÉ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

Elektrická impedanční spektrometrie (EIS) je nedestruktivní měřicí metoda, která využívá frekvenční závislost impedanční charakteristiky zeminy k její analýze a analýze jejích vlastností [19].

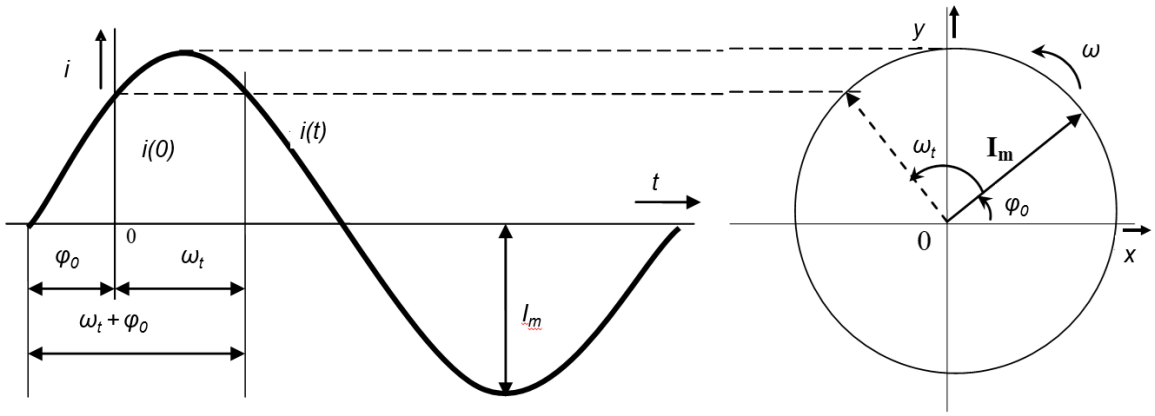
4.1 PRINCIP METODY

Elektrický odpor je vlastnost konkrétní zeminy vést elektrický proud. Elektrická impedance je odpor kladený průchodu střídavého elektrického proudu [17]. Dá se tedy konstatovat, že elektrický odpor charakterizuje vlastnosti zeminy pro stejnosměrný proud, elektrická impedance charakterizuje vlastnosti zeminy pro střídavý proud.

Základním principem metody je měření rezistance R a reaktance X zeminy v závislosti na frekvenci napájecího signálu f. Z veličin R a X lze vyjádřit elektrickou impedanci **Z**, měrný elektrický odpor (rezistivitu) ρ zeminy a další odvozené elektrické veličiny.

Elektrická impedance

Elektrická impedance **Z** je komplexní veličina, která popisuje odpor pórovitého prostředí, a také fázový posuv elektrického napětí oproti elektrickému proudu, při průchodu harmonického střídavého elektrického proudu dané frekvence [16]. Má velikost a fázi [18].



Obrázek 16 – Grafické znázornění průběhu harmonického proudu [18]

Frekvenční charakteristiku elektrické impedance **Z** lze vyjádřit jako funkci komplexní proměnné v algebraickém tvaru:

$$Z(\omega) = \mathrm{R} + \mathrm{j}\omega\mathrm{X} \qquad [\Omega] \tag{3.1}$$

kde:

R je rezistance (elektrický odpor), tvořící reálnou složku elektrické impedance,

X je reaktance, imaginární složka elektrické impedance,

j je imaginární jednotka.

Elektrický odpor *R*

Elektrický odpor, rezistance R popisuje odpor sledovaného prostředí k průchodu elektrického proudu. Hodnota rezistance není závislá na frekvenci. Je to reálná

složka elektrické impedance a její číselná hodnota se mění s obsahem vody, s teplotou nebo s počtem volných iontů solí ve sledovaném prostředí [19].

Elektrická reaktance *X*

Elektrická reaktance *X* popisuje odpor sledovaného prostředí k průchodu elektrického proudu z pohledu vlastností elektrického obvodu, ve studovaném případě z pohledu vlastností zeminy. Hodnota reaktance je závislá na frekvenci. Její hodnota se mění například s velikostí zrn zeminy, strukturou nebo ulehlostí sledovaného prostředí [19].

Její hodnota závisí na zdánlivých odporech induktanci X_L a kapacitanci X_C, které popisují kapacitní a indukční účinky prostředí.

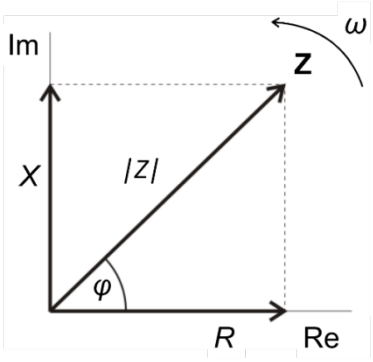
Modul vektoru elektrické impedance $|Z|$ lze vyjádřit užitím Pythagorovy věty [18], a to ve tvaru

$$|\mathrm{Z}| = \sqrt{\mathrm{R}^2 + \mathrm{X}^2} \qquad [\Omega] \tag{3.2}$$

a fázový posuv φ je vyjádřen vztahem:

$$\varphi = \arctan \frac{\mathrm{X}}{\mathrm{R}} . \tag{3.3}$$

Výše popsaná frekvenční charakteristika je znázorněná diagramem na obrázku 17.



Obrázek 17 – Diagram elektrické impedance s reálnou a kladnou imaginární složkou [18]

Elektrický náboj se přenáší elektrony, anebo ionty [20]. Předpokladem pro elektrickou vodivost je existence elektrických nábojů přenášených právě elektrony nebo ionty. Přenos elektrického náboje, tedy jeho pohyblivost, je pro různé zeminy různá. Každá zemina je charakteristická svým elektrickým odporem *R*, resp. jeho převrácenou hodnotou elektrickou vodivostí *G*.

$$\mathrm{G} = \mathrm{R}^{-1} \qquad [\mathrm{S}]. \tag{3.4}$$

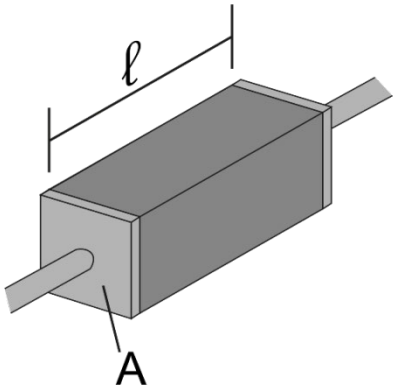
Ve vodním hospodářství je často sledovanou veličinou, popisující vlastnost zeminy, vody či dalších stavebních materiálů, konduktivita *σ*.

$$\sigma = G \cdot \frac{\mathrm{l}}{\mathrm{A}} \qquad [\mathrm{S/m}], \tag{3.5}$$

resp. její inverzní hodnota rezistivita *ρ*

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = R \cdot \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{l}} \qquad [\Omega\cdot\mathrm{m}], \tag{3.6}$$

kde *A* [m^2] je kolmý průřez vodiče reprezentovaného zkoumanou zeminou a *l* [m] je jeho délka.



Obrázek 18 – Označená délka vodiče *l* a *A* obsah kolmého průřezu vodiče [19]

4.2 MĚŘICÍ APARATURA

Pro měření elektrické impedance zemin byl použit přístroj Z-metr IV (obrázek 19), který byl navržen a realizován v rámci programu EUREKA. Veškerá nastavení a naměřená data se ukládají na integrované mikro SD kartě. Parametry měření se zadávají přímo do přístroje, nastavení lze měnit pomocí klávesnice. Přístroj je možné připojit k osobnímu počítači (PC) pomocí rozhraní USB (Universal Serial Bus), kdy se v prostředí PC zobrazí jako obecný USB disk, ze kterého lze data snadno importovat. Při měření přístroj zobrazuje na LC (Liquid Crystal) displeji měřené hodnoty reálné a imaginární složky. Přístroj je vybaven dvěma integrovanými bateriemi Li-Ion, kapacity baterií jsou dostatečné pro měření bez nutnosti připojeni napájecího adaptéru. Další technické parametry přístroje Z-metr IV jsou uvedeny v tabulce 2.

Obrázek 19 – Z-metr IV [19]

Tabulka 2 – Základní technické parametry přístroje Z-metr IV

specifikace elektrické měřicí části	
měřicí rozsah impedance	10 Ω – 1 MΩ
měřicí frekvence	100 Hz – 200 kHz
přesnost modulu Z	±2% z rozsahu
přesnost fáze	±2°
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 vody)	

napájení	
napájení	bateriové s dobíjecími články
doba kontinuálního provozu [h]	16
napájecí napětí [V]	3,7
maximální napájecí napětí [V]	5

Hodnoty změřené Z-metrem IV jsou zaznamenávány ve formě textového souboru csv. (comma-separated values), což je jednoduchý souborový formát určený pro výměnu tabulkových dat sestávající z řádků, v nichž jsou jednotlivé položky odděleny znakem, jako je čárka, uvozovky, středník apod. (tabulka 3). Vzhledem k jednoduchosti, nenáročnosti na paměťové medium a čitelnosti i bez specializovaného softwaru se formát používá pro výměnu informací mezi různými systémy.

Tabulka 3 – Záznam měření přístrojem Z-metr IV

#Start at 31.7.2019 9:10:49

No	f [Hz]	date [dd.mm.yyyy]	time [hh:mm:ss]	ch	range	Rx [ohm]	Xx [ohm]	temp L [°C]	temp R [°C]
1	100	31.07.2019	9:10:49	0	2	3536,2	-6,7	-99,99	-99,99
1	110	31.07.2019	9:10:52	0	2	4825,8	-33,3	-99,99	-99,99
1	120	31.07.2019	9:10:52	0	2	8064,1	-170,5	-99,99	-99,99
1	130	31.07.2019	9:10:52	0	0	8,4	0	-99,99	-99,99
1	140	31.07.2019	9:10:53	0	0	8,4	0	-99,99	-99,99
1	150	31.07.2019	9:10:53	0	0	8,4	0	-99,99	-99,99

5 PRŮBĚH A VÝSLEDKY MĚŘENÍ VELIKOSTI EFEKTIVNÍHO ZRNA ZEMINY APARATUROU EIS

V rámci vyhodnocení měření byly převzaty výsledky z měření, která probíhala v roce 2014 – 2019. Změřeno bylo celkem 40 vzorků zemin s rozdílnou velikostí efektivního zrna, z nichž 11 bylo změřeno v rámci předložené bakalářské práce v roce 2019 – 2020.

Pro laboratorní experimenty byly testovány vzorky zemin dostupné v Laboratoři vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb.

Práce předpokládá využití metody EIS a měřicího zařízení při stanovení odhadu efektivní velikosti zrna zemin.

Zkoumaná zemina byla definována křivkou zrnitosti, bylo-li třeba, byla stanovena v laboratoři. Některé vzorky zemin byly homogenní, a tak byly popsány velikostí zrna měřením jeho nejdelší osy posuvným měřidlem. Následně byly zkoumané vzorky podrobeny frekvenční analýze při měření obou složek elektrické impedance. V prostředí softwaru Excel byly změřené hodnoty zpracovány. Z křivek zrnitosti byla stanovena velikost efektivního zrna vzorku zeminy a odpovídající vhodná měřicí frekvence f_M, při níž měřené složky elektrické impedance vykazují největší změny. Uvedeným postupem je průběžně doplňována závislost $f_M = f(d_{ef})$.

5.1 STANOVENÍ VELIKOSTI EFEKTIVNÍHO ZRNA ZEMIN

Na základě předchozí specifikace, a v souladu se zadáním bakalářské práce bylo třeba stanovit velikost efektivního zrna testovaných vzorků zemin na základě zrnitostních rozborů a dále je podrobit frekvenční analýze při využití aparatury s přístrojem Z-metr IV. Dle ČSN 72 0101 byl pro stanovení velikosti efektivního zrna zemin použit sítový rozbor a hustoměrná zkouška.

5.1.1 Sítový rozbor

Sítový rozbor byl proveden normovou sadou sít se čtvercovými otvory. Sada byla seřazena podle velikosti ok, dole je síto s nejmenšími oky, velikost ok se zvyšuje a nahoře je umístěno síto s oky největšími. Jedná o sadu sít s velikostí ok (0,063; 0,1; 0,25; 0,5; 0,63; 1; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4, 5) mm.

Zemina byla nejdříve vysušena v laboratorní sušárně (teplotní skříni ECOCELL ECO707 – obrázek 20a) při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin. Vysušená zemina byla zvážena a případně rozmělněna. Následně byla umístěna na síta, která jsou sestavena do sloupce. Horní síto je opatřeno víkem a pod dolním sítem je dno. Víko je pečlivě upevněno k prosévacímu přístroji (obrázek 20b). Prosévací přístroj, síty mechanicky otřásal po dobu 20 minut. Postupně byla odebrána jednotlivá síta, nejdříve síto s největšími otvory. Zůstatek na každém sítě byl zvážen a hodnota zaznamenána do protokolu. Konstrukce zrnitostní křivky a výpočty efektivního zrna se poté provedly v programu Excel.

a) sušárna teplotní skříň ECOCELL ECO 707

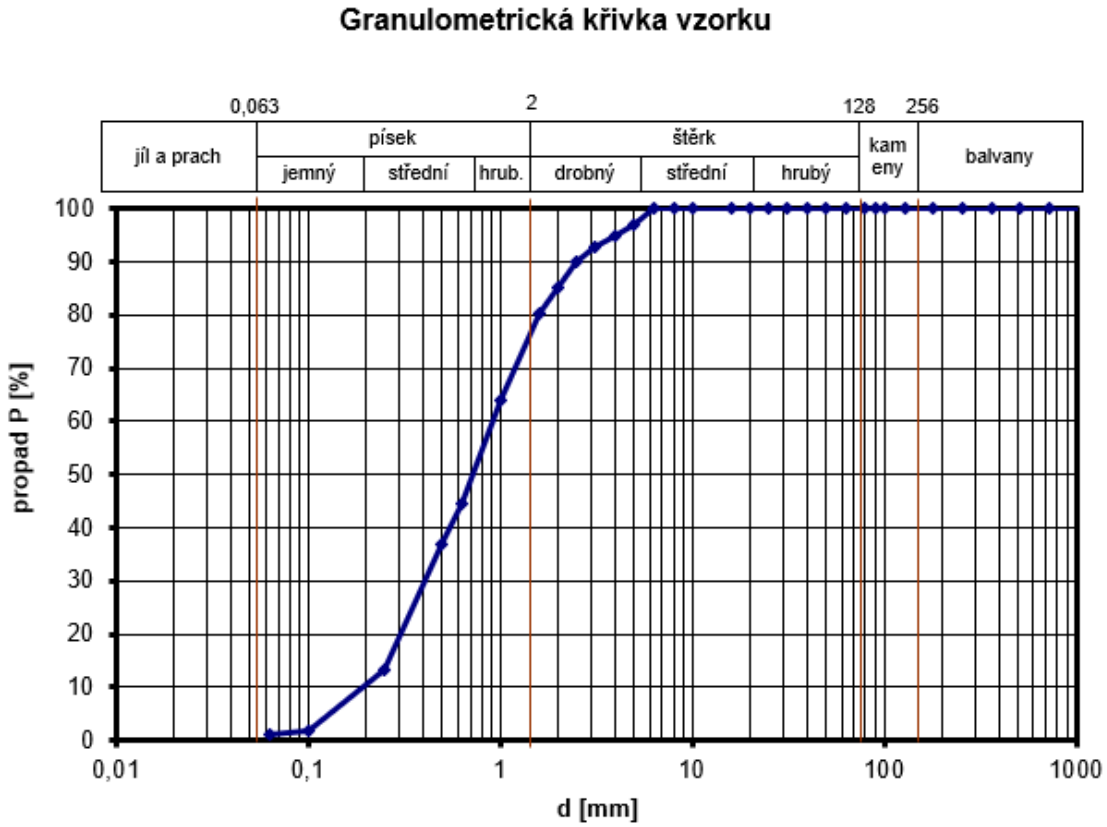
b) prosévací přístroj, sada normových sít se čtvercovými oky pro sítový rozbor

c) váhy Sartorius pro vážení zbytku vzorku zeminy na sítě

Obrázek 20 – Souprava pro sítový rozbor (LVV ÚVST)

Zpracování dat ze sítového rozboru

Výstupem sítového rozboru je grafické znázornění křivky zrnitosti a popis vzorku dle kapitoly 2.4 včetně uvedení velikosti efektivního zrna.



Graf 1 – Granulometrická křivka vzorku VZ9

Procentuální zastoupení složek zeminy ve vzorku

jíl a prach	písek			štěrk			kameny	balvany
	jemný	střední	hrubý	drobný	střední	hrubý		
0.9 %	84.1 %			15 %			0 %	0 %
	12.3 %	50.7 %	21.1 %	15 %	0 %	0 %		

Procentuální zastoupení frakcí zeminy menších než d

<d [mm]	0,063	0,25	1	2	8	32	128	256
P [%]	0,9	13,2	63,9	85,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Průměr efektivního zrna

d_{ef}	1,1	[mm]
Pd_{ef}	67,7	[%]

Charakteristická čísla

C_U	4,4	[-]
C_C	0,9	[-]

Charakteristické hodnoty zrn vzorku

d_{10}	0,2	[mm]
d_{15}	0,3	[mm]
d_{30}	0,4	[mm]
d_{50}	0,7	[mm]
d_{60}	0,9	[mm]
d_{85}	2,0	[mm]
d_{90}	2,5	[mm]

Vzorek je: písčitý stejnozrnný špatně zrněný

Pro homogenní vzorky zeminy byla velikost zrna ověřena opakovaným měřením nejdelší osy zrna digitálním posuvným měřidlem. Realizované rozbory jsou uvedeny v příloze 1.

5.1.2 Hustoměrná zkouška

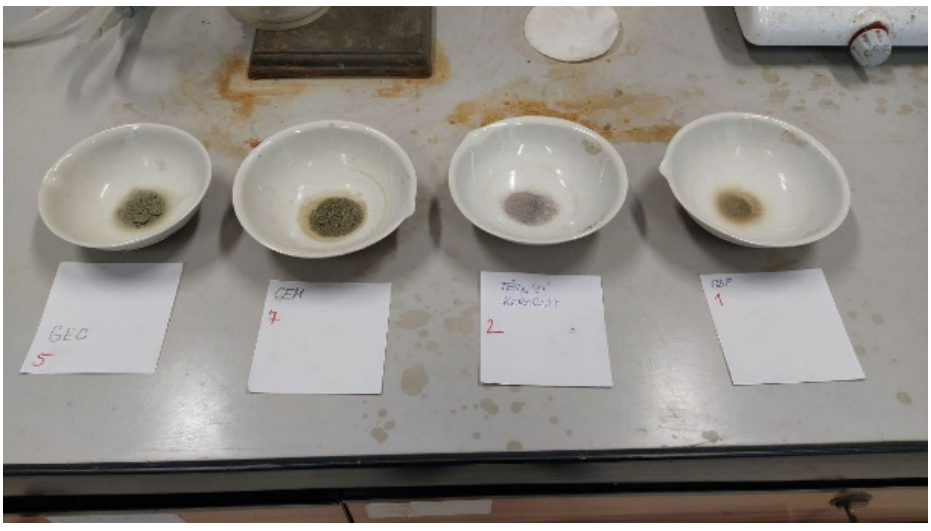
Hustoměrná zkouška byla provedena u vzorků zemin, které měly zastoupení zrn menších než 0,063 mm více jak 10% z celkového množství.

Zemina byla nejdříve vysušena již uvedeným způsobem. Poté se navážil 20 g vzorek zeminy, s přesností 0,01 g, který byl umístěn na síto o velikosti ok 0,063 mm. Vzorek byl na sítu proplaven vodou do předem připravené nádoby. Na sítu zůstala zrna vzorku s průměrem větším než 0,063 mm. Zbytek zrn na sítu se umístil do misky a nechal se vyschnout na vzduchu a následně se zvážil (obrázek 21). Suspenze vody se zrny menšími než 0,063 mm proplavená přes síto zůstala v nádobě pod sítem. Suspenze byla následně přelita do lahví, dále bylo přidáno vodní sklo a gumové kuličky pro řádné promíchání suspenze a láhev se vodotěsně uzavřela. Suspenze se umístila na třepačku a nechala se třepat po dobu 24 hodin.

Protřepaná suspenze byla přelita do odměrných válců, každý vzorek byl doplněn destilovanou vodou do určitého objemu, stejného pro všechny vzorky. Následně byly odměrné válce umístěny do nádoby naplněné vodou (obrázek 22). Vzorek se nejdříve důkladně promíchal v odměrném válci a ihned poté se do něj ponořil hustoměr. Hustota a teplota byla měřena po dobu 24 hodin v časech uvedených v tabulce.

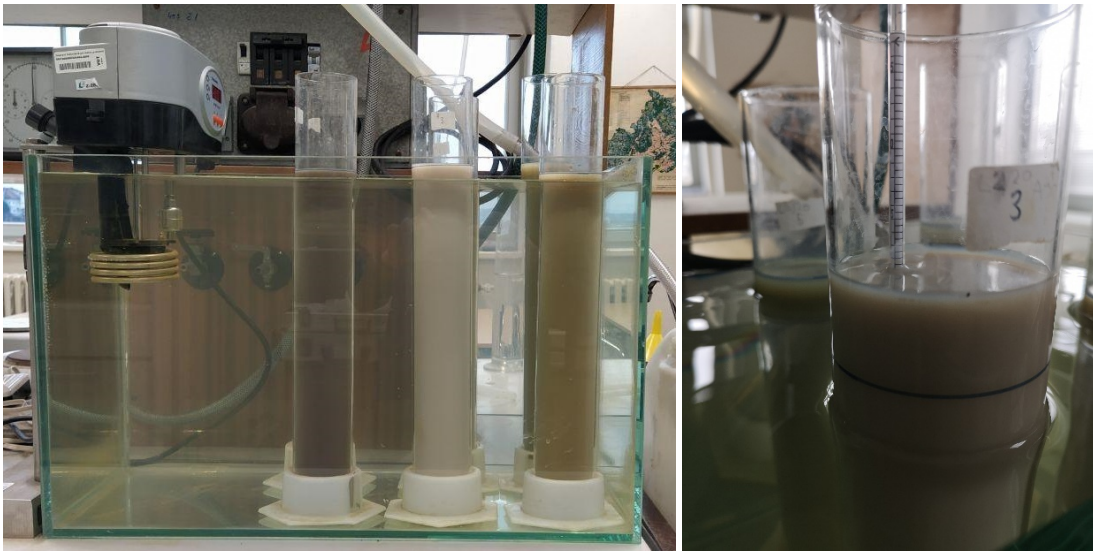
Tabulka 4 – Časy, ve kterých byla měřena hustota suspenze

t	***R***
[min]	[g/l]
0,83	9
2	8,9
5	8,6
15	7,6
120	5
300	4,5
1440	3,4
2880	2,5



Obrázek 21 – Vysušení zrn větších než 0,063 mm

a) Promíchávání suspenze; b) přelití suspenze do odměrných válců



b) Odměrné válce umístěné ve vodě; c) měření hustoměry

Obrázek 22 – Měření hustoměrnou metodou

Zpracování dat z měření hustoměrnou metodou

Data z měření hustoměrnou metodou byla v programu Excel popsána pomocí zrnitostní křivky a následně byla spočtena hodnota efektivního zrna. Realizované soubory jsou uvedeny v příloze 2.

5.2 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ IMPEDANCE ZEMIN

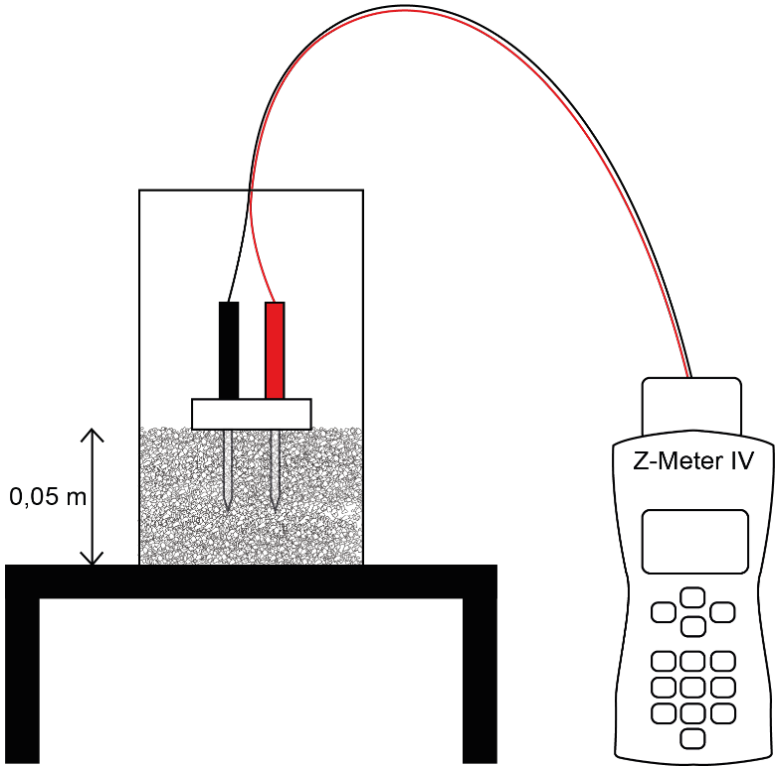
Hodnota elektrické impedance byla změřena ve zvoleném frekvenčním spektru u každého vzorku zeminy měřené v rámci předložené bakalářské práce.

Laboratorní měření elektrické impedance bylo provedeno dvěma plnými tyčovými elektrodami z nerezavějící oceli o průměru 0,004 m a délky 0,032 m, jejich osová vzdálenost byla 0,023 m.

Měření bylo provedeno v místnosti s konstantní teplotou vzduchu t_{vz} = (25,0± 0,2) °C a konstantní relativní vlhkostí vzduchu (60,0 ± 0,5) %. Uvedené okrajové podmínky měření byly dodrženy u všech vzorků měřených v rámci předložené bakalářské práce.

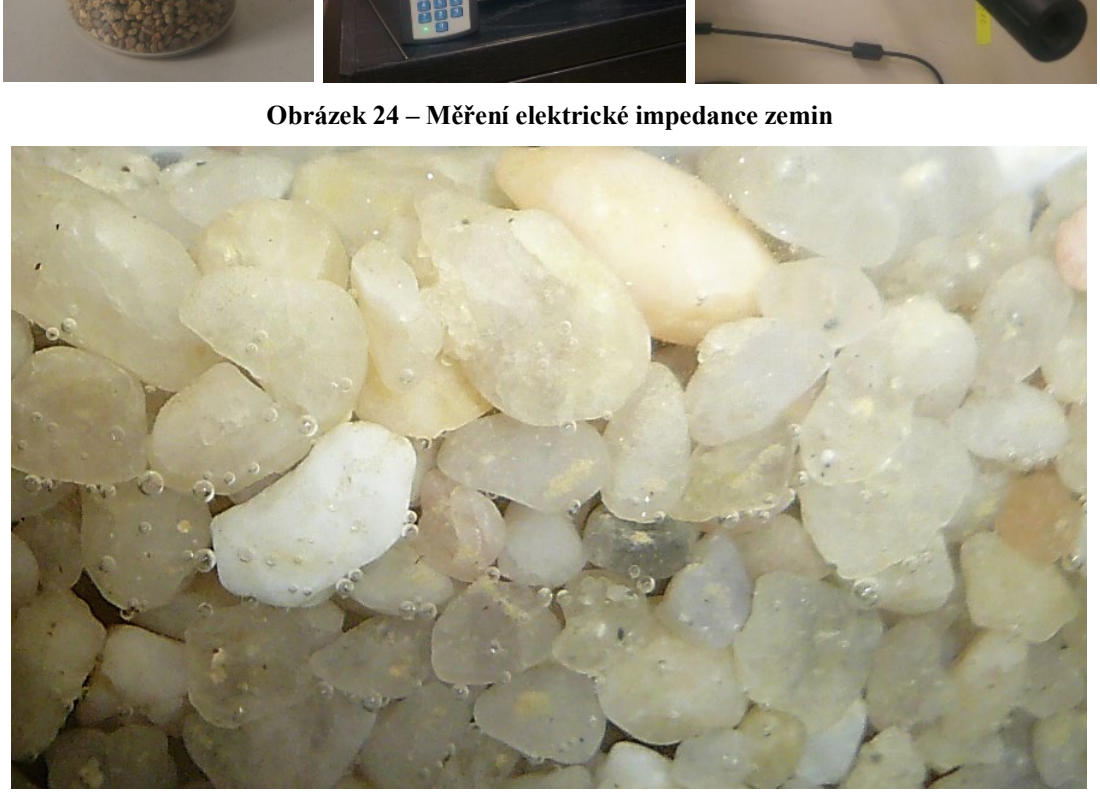
Nastavení přístroje Z-metr IV bylo stejné pro všechny měřené vzorky zeminy. Počet opakování měření na jedné frekvenci n = 1, krok změny měřicí frekvence byl 10 Hz, s počáteční nastavenou hodnotou měřicí frekvence f = 100 Hz a konečnou hodnotou měřicí frekvence f = 20 000 Hz, doba přepínání mezi měřeními byla 100 ms a amplituda měřicího napětí byla 1 V.

Do skleněné kádinky byla umístěna zemina do výšky 0,05 m. Rozměry a materiálem kádinky a dále výškou vzorku zeminy bylo zajištěno, že měřené hodnoty elektrické impedance zkoumané zeminy nebyly ovlivněny blízkostí stěn či dna kádinky ani parazitními odpory souvisejícími s materiálem použité měřicí nádoby, neboť sklo je z elektrického hlediska izolantem. Při měření jednotlivých vzorků lze vyloučit i parazitní jevy na měřicích kontaktech (elektroda-vzorek zeminy, propojení kabel-Z-metr IV), protože po celou dobu měření všech vzorků zeminy zůstávalo uložení ve stejné pozici. Byla změřena hmotnost, teplota a vlhkost zeminy a následně byla zemina v kádince zhutněna manuální vibrací, dusáním a propícháním. Tyčové elektrody byly umístěny do středu vzorku zeminy ve skleněné kádince tak, aby hodnoty měřené Z-metrem IV nebyly ovlivněny vlastnostmi nádoby a prostředí (obrázek 23). Měření frekvenční charakteristiky každého vzorku zeminy bylo provedeno ve dvou odlišných stavech, a to v zemině vzduchosuché a pseudosaturované vodou (pojmenováno jako saturovaný vzorek), kdy byl vzorek zeminy zatížen destilovanou vodou o teplotě odpovídající teplotě zeminy a současně teplotě vzduchu v místnosti. Nelze hovořit o saturovaných vzorcích zemin, neboť se v nich vždy objevily vzduchové bubliny (obrázek 25). Zatížení vzorků zeminy destilovanou vodou požadované teploty omezilo zkreslení měřených charakteristik vlivem možných změn elektrické vodivosti zatěžovací vody a současně i vlivem teploty.



Obrázek 23 – Schéma uložení tyčových elektrod v měřeném vzorku

Obrázek 24 – Měření elektrické impedance zemin



Obrázek 25 – Vzduchové bubliny při měření vzorku zeminy zatíženého destilovanou vodou

Zpracování dat z měření elektrické impedance

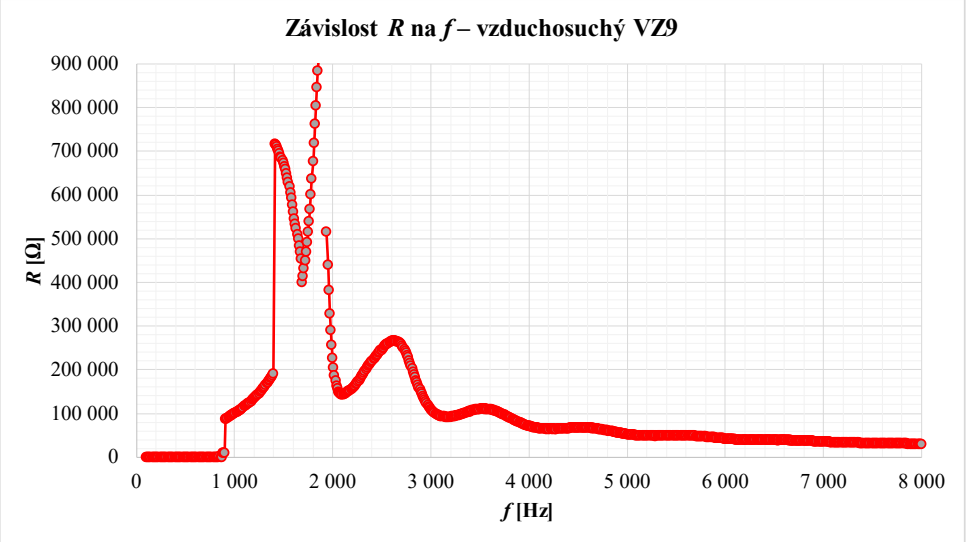
Hodnoty získané měřením byly zpracovány v programu Excel. Vztahy uvedené v kapitole 4 byly použity na výpočet modulu elektrické impedance $|Z|$, fázového posuvu φ, rezistivity ρ, konduktivity σ, elektrické vodivosti G a admitance Y (tab. 5).

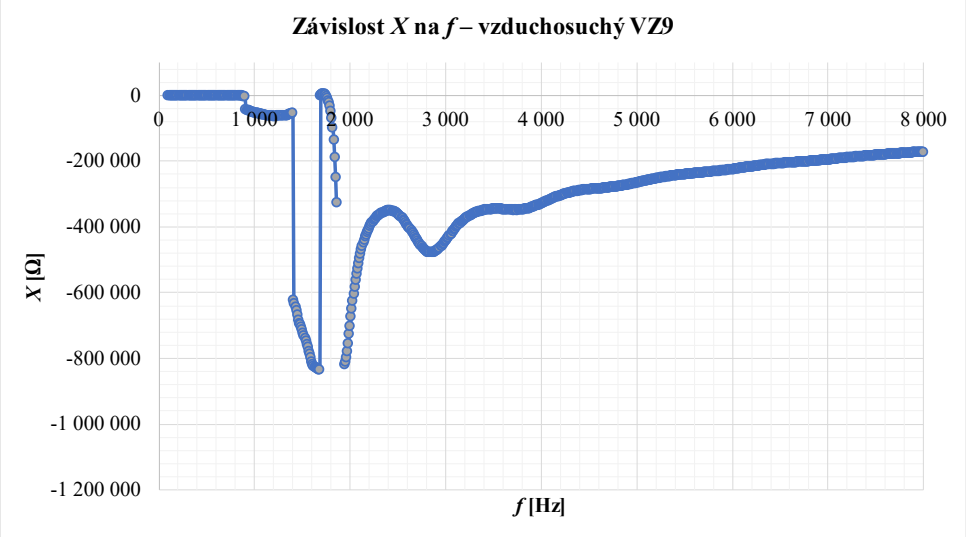
Tabulka 5 – Měřené a vypočtené elektrické veličiny charakterizující zeminu VZ9

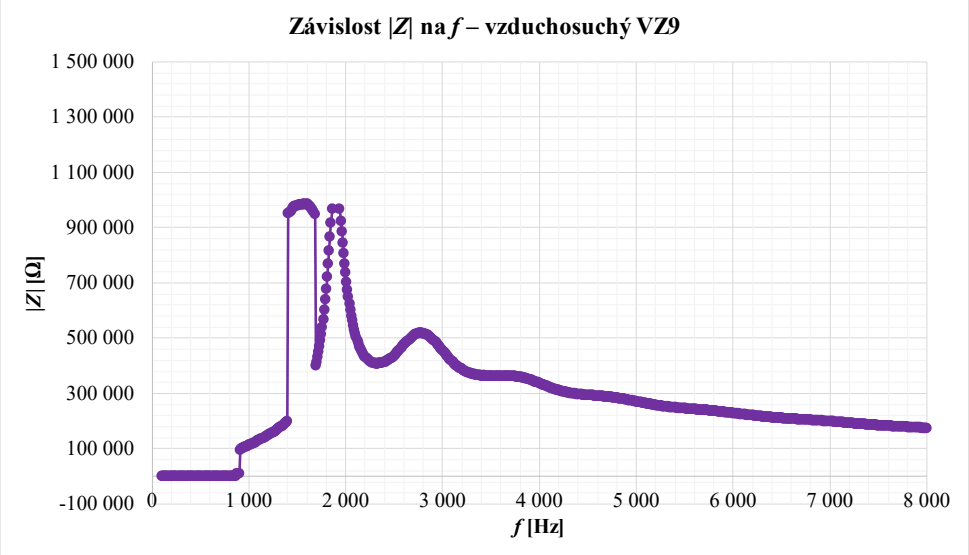
VZDUCHOSUCHÝ							
A =	4.24E-04	m^2	l =	0.03184	m		
			d =	0.02324	m		
f	R_x	X_x	$\|Z\|$	φ	ρ	Y	σ
[Hz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]	[Ω·m]	[S]	[$S \cdot m^{-1}$]
100	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
110	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
120	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
130	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
140	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
150	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
160	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
170	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
180	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
190	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
200	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043

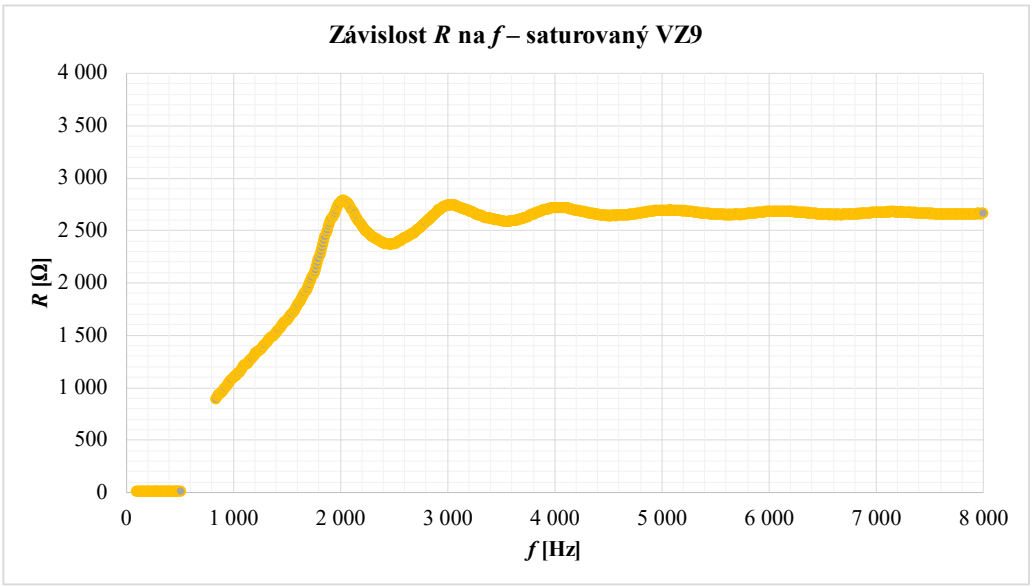
SATUROVANÝ							
f	R_x	X_x	$\|Z\|$	φ	ρ	Y	σ
[Hz]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[-]	[Ω·m]	[S]	[$S \cdot m^{-1}$]
100	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
110	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
120	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
130	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
140	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
150	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
160	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
170	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
180	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
190	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
200	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043

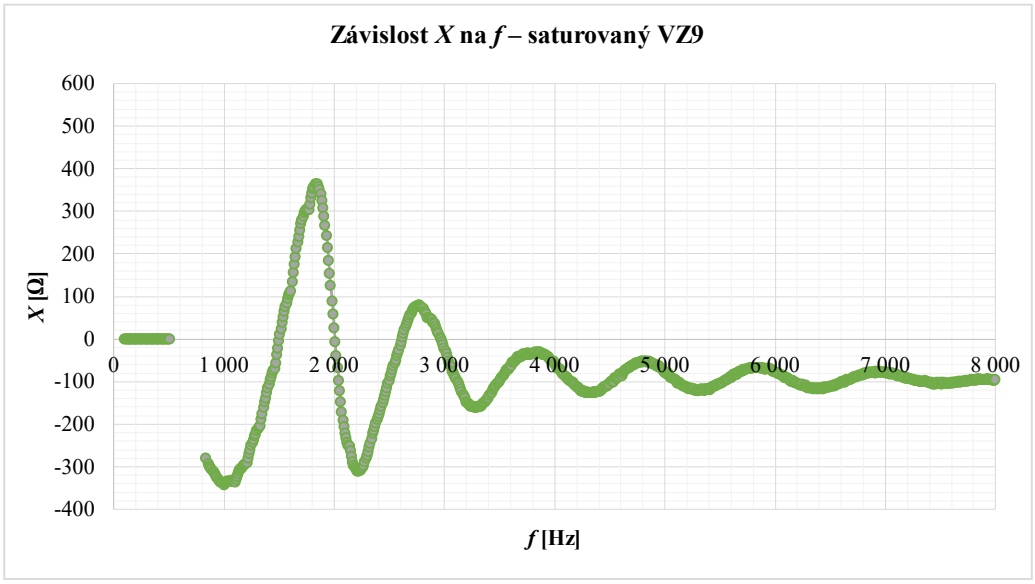
Pro účel zpracování předložené práce však byly využity pouze měřené veličiny, které byly zpracovány graficky (obrázek 26). Byla vynesena závislost měřené frekvence f na hodnotě rezistance R (reálná složka elektrické impedance) f = f(R) a reaktance X (imaginární složka elektrické impedance) f = f(X). Grafy byly sestrojeny u každého vzorku pro stav vzduchosuchý a pro stav, kdy byla zemina zatížena destilovanou vodou (v grafech uvedeno jako saturovaný vzorek). Z grafů byla zjištěna frekvence f_M, která odpovídá hodnotě modulu elektrické impedance $|Z|$ zkoumaného vzorku zeminy, při níž je hodnota rezistance R nejvyšší a zároveň hodnota reaktance X nejnižší. Vhodná měřicí frekvence f_M pro daný vzorek zeminy byla ověřena sestrojením tzv. Nyquistovy frekvenční charakteristiky (obrázek 27) v komplexní rovině -Im (Z)= f (Re (Z)) představujících závislost negativní (zemina je kapacitního charakteru) imaginární versus reálné složky měřené elektrické impedance, jejímž bodům jsou přiřazeny hodnoty úhlové frekvence ω [$rad \cdot s^{-1}$]. Vzdálenost vybraného bodu křivky (bod odpovídá určité frekvenci ω) od počátku určuje modul přenosu a úhel mezi reálnou osou a spojnicí vybraného bodu křivky s počátkem určuje fázi přenosu signálu zeminou. Frekvenční analýza všech zkoumaných vzorků zemin zpracovávající surová data je uvedena v příloze 3. Při posuzování charakteristik byla shledána tzv. chybná měření, kdy pro jednotlivé frekvence či frekvenční sekvence byly změřeny hodnoty vybočující z trendu charakteristiky. Uvedené údaje se ve větším počtu objevovaly u vzorků vzduchosuchých a byly pro posuzování vyloučeny, jak je uvedeno na obrázcích 26 a 27.

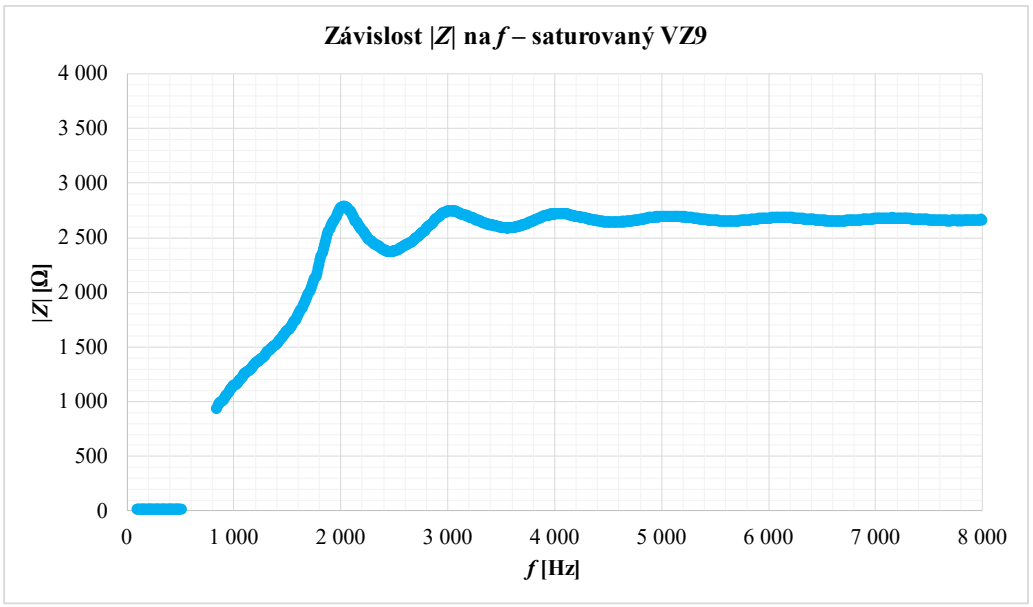

Závislost R na f – vzduchosuchý VZ9
900 000
800 000
700 000
600 000
500 000
400 000
300 000
200 000
100 000
0
R [Ω]
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]


Závislost X na f – vzduchosuchý VZ9
0
-200 000
-400 000
-600 000
-800 000
-1 000 000
-1 200 000
X [Ω]
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]

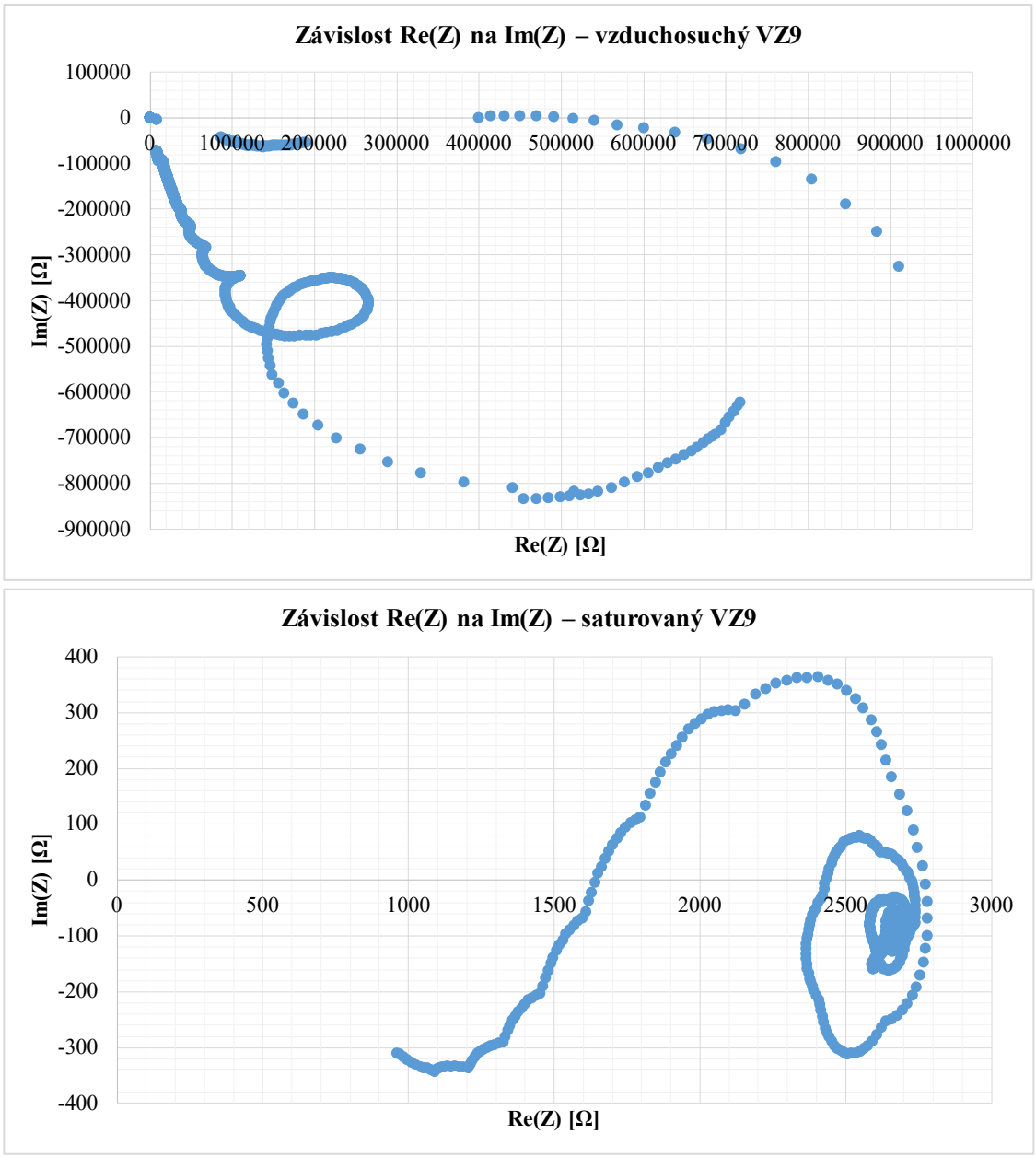

Závislost |Z| na f – vzduchosuchý VZ9
1 500 000
1 300 000
1 100 000
900 000
700 000
500 000
300 000
100 000
-100 000
|Z| [Ω]
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]







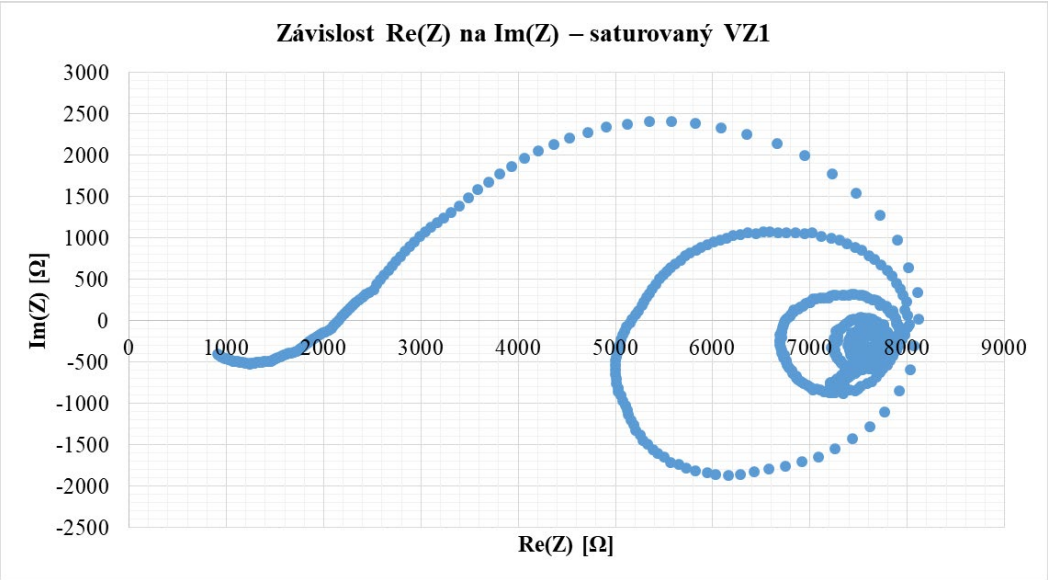
Obrázek 26 – Frekvenční charakteristiky vzorku VZ9



Obrázek 27 – Nyquistova frekvenční charakteristika vzorku VZ9

Především na základě průběhu Nyquistovy frekvenční charakteristiky vzorku zeminy s označením saturovaný VZ9 je možné usuzovat, že vzorek není z hlediska velikosti zrn homogenní, ale je charakterizován zrnitostní křivkou. Průběh křivky není plynulý, ale je charakterizován „oblouky“, kdy důvod jejich vzniku je možné pravděpodobně hledat v průchodu elektrického signálu buzeného pole kolem zrn zeminy různé velikosti.

Pro potvrzení uvedené domněnky a srovnání průběhů Nyquistovy frekvenční charakteristiky uvádím její průběh homogenního vzorku zeminy testované pod označením saturovaný VZ1 (obrázek 28), kdy se jedná o homogenní vzorek hrubozrnného bratčického písku s velikostí zaobleného zrna 2,5 mm.



Obrázek 28 – Nyquistova frekvenční charakteristika saturovaného vzorku VZ1

Pro každý vzorek v rámci bakalářské práce byla vytvořena tabulka, která shrnuje měřená data. Příklad tabelárního záznamu měřených dat diskutovaných vzorků zeminy VZ9 a VZ1 je uveden v tabulce 6.

Tabulka 6 – Příklad tabulky pro záznam dat vzorku zeminy VZ9 a VZ1

VZ9	nehomogenní písek		
	d_{ef}	1,10	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,7265	kg
	teplota vzorek	25,9	°C
	vlhkost vzorek	13,90	%
saturovaný	hmotnost	0,6381	kg
	teplota vzorek	25,3	°C
	vlhkost vzorek	47,8	%
EIS měření	f_{sat}	2100	Hz
	f_{su}	1500	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2090	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1660	Ω

VZ1	homogenní hrubozrný písek		
	d_{ef}	2,50	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,3406	kg
	teplota vzorek	11,30	°C
	vlhkost vzorek	11,4	%
saturovaný	hmotnost	0,4942	kg
	teplota vzorek	25,6	°C
	vlhkost vzorek	45	%
EIS měření	f_{sat}	2080	Hz
	f_{su}	2600	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2070	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1640	Ω

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

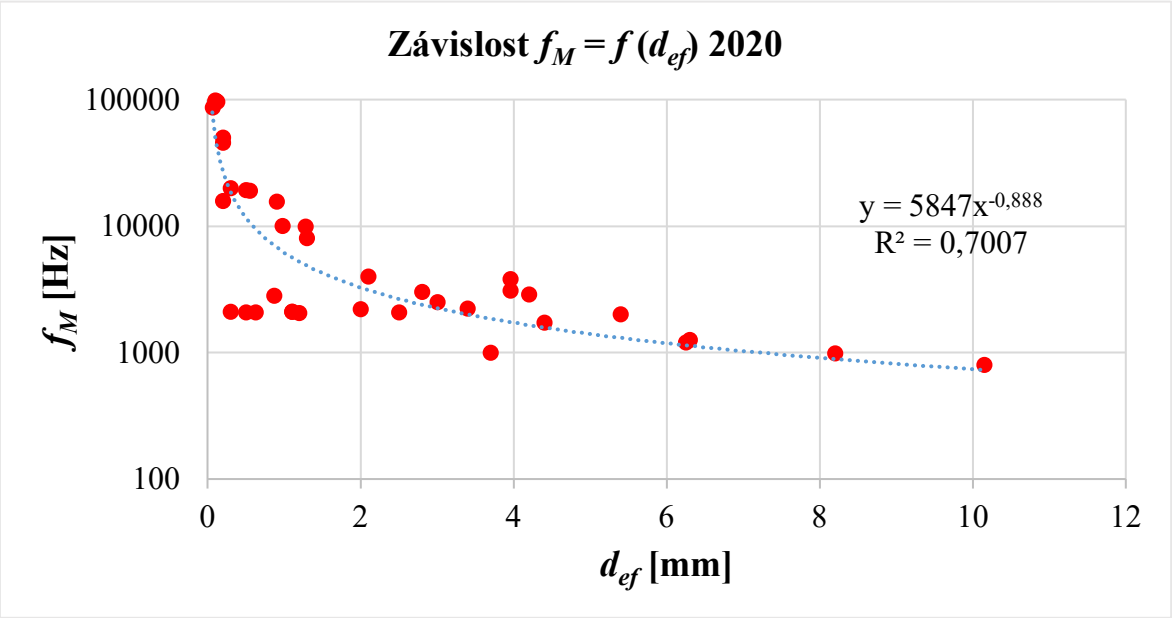
Hodnoty stanovené v rámci předložené bakalářské práce byly zkombinovány s hodnotami z laboratorních experimentů provedených mezi lety 2014 – 2019. Pro vyhodnocení je využito celkem 41 vzorků zeminy. Veškeré naměřené hodnoty vzorků zemin byly vloženy do jedné tabulky a data byla barevně roztřízena podle let, kdy probíhalo měření (tabulka 7), přičemž hodnoty z této bakalářské práce jsou v tabulce označeny modrou barvou (Měření 2019-2020).

Tabulka 7 – Statistická data z měření 2014 – 2020

Legenda
Měření 2015
Měření 2016
Měření 2019-2020

Zemina	d_{ef}	f_M
	[mm]	[Hz]
písek Westerschelde	0,063	86000
skleněné kuličky	0,100	98500
mořský písek Granada	0,125	96000
mořský písek Oostende	0,110	96800
písek Mol	0,100	96000
skleněné kuličky	0,200	15800
písek Schelde	0,2	50000
písek Schelde	0,200	45600
VZ6	0,3	2150
písek Oostende	0,300	20000
VZ3	0,300	2100
písek Bzenec	0,550	19000
VZ4	0,500	2070
skleněné kuličky	0,500	19200
VZ8	0,630	2070
písek Kunštát	0,870	2800
modifikovaný písek kora	0,900	15600
zahradní zemina	0,980	10000
VZ9	1,100	2110
VZ10	1,100	2100
VZ2	1,200	2060
zahradní zemina	1,280	9850
písek Bratčice	1,300	8000
skleněné kuličky	2,100	4000
skleněné kuličky	2,000	2200
VZ1	2,500	2070
plná křivka křemičitého písku	2,800	3000
kamenná drť	3,000	2500
písčitá hlína	3,400	2220
modifikovaný křemičitý písek	3,700	1000
skleněné kuličky	3,960	3800
písek Bratčice	3,960	3100
hlinitá půda	4,200	2880
VZ7	4,4	1730
písek Bratčice	5,400	2000
skleněné kuličky	6,250	1200
písek Bratčice	6,300	1250
písek Bratčice	8,200	980
skleněné kuličky	10,150	800

Z uvedených dat byla zpracována semilogaritmická závislost f_M = f (d_{ef}) (graf 2). Hodnoty velikosti efektivního zrna zemin byly vyneseny v lineárním měřítku a hodnoty frekvence byly vyneseny v logaritmickém měřítku.



Graf 2 – Závislost f_M = f (d_{ef}) 2020

Vyhodnocenými daty byla proložena mocninná funkce:

$$f_M = 5847 \cdot {d_{ef}}^{-0,888}, \tag{5.1}$$

s hodnotou spolehlivosti

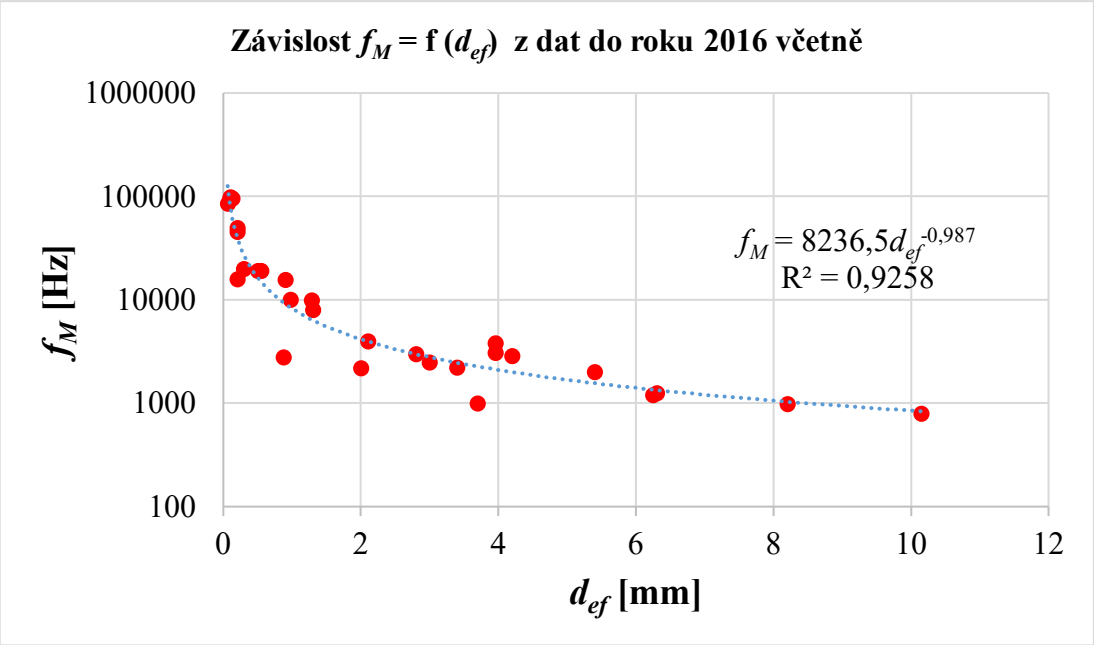
$$R^2 = 0,7007. \tag{5.2}$$

Poněvadž se jedná o odhad velikosti efektivního zrna zeminy, je možné, i na základě statisticky nevyhovujícího počtu zpracovaných dat, považovat závislost za dostatečně přesnou a pro praktické použití převést vztah (5.1) na

$$f_M = \frac{5847}{d_{ef}}. \tag{5.3}$$

Uvedeným postupem byla provedena analýza vzorků zeminy a sestavena funkční závislost vhodné měřicí frekvence na velikosti efektivního zrna zeminy.

Z měření mezi lety 2014-2016 bylo zjištěno, že větší hodnoty měřicí frekvence odpovídají nižším hodnotám velikosti efektivního zrna. Tudíž pro zeminy, u kterých se předpokládá menší velikost efektivního zrna, je vhodné pro měření volit větší hodnoty měřicí frekvence (graf 3).

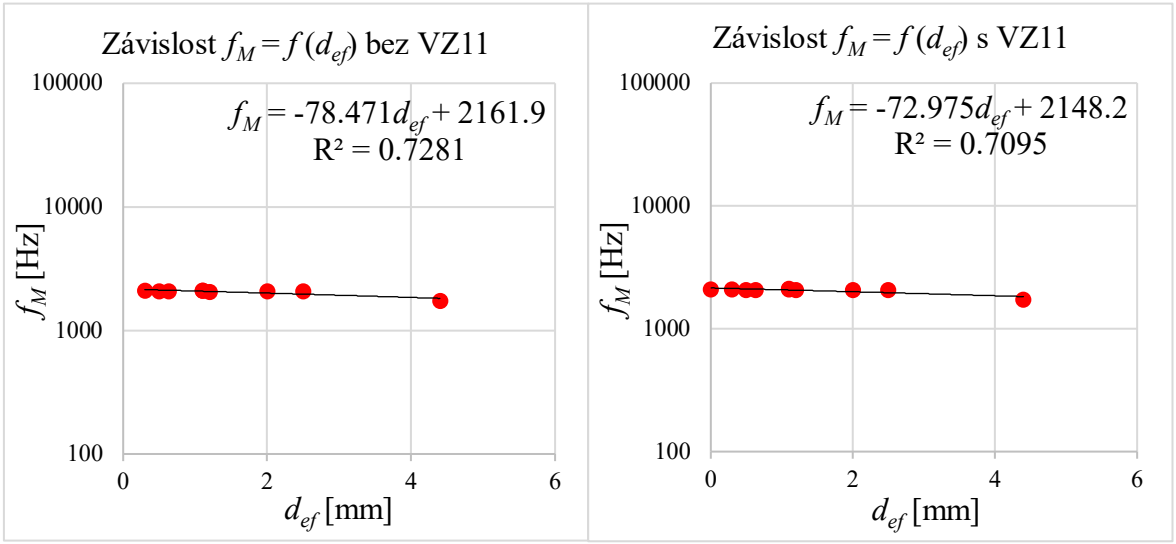


Graf 3 – Závislost f_M = f (d_{ef}) 2016

Proložená mocninná funkce

$$f_M = 8236{,}5 \cdot d_{ef}^{\,-0{,}987} \tag{5.4}$$

má hodnotu spolehlivosti $R^2 = 0{,}9285$. Uvedený výsledek z roku 2016 je tedy výrazně příznivější a hodnoty naměřené v uvedené bakalářské práci z let 2019 – 2020 předchozí závěry nepotvrzují. Pokud se budu zabývat zpracováním pouze svého měření (Graf 4), je jistě zajímavým i zjištění lineární závislosti mezi sledovanými veličinami, s hodnotou spolehlivosti cca 0,72. Změnu hodnoty spolehlivosti výrazně ovlivňuje ne/zařazení vzorku VZ11 do hodnocení. VZ11 sestává z 80 % jílu s označením GEM a 20 % homogenního bratčického písku s velikostí efektivního zrna 0,63 mm. Nejedná se tedy o typický vzorek zeminy a pro měření si pravděpodobně zasluhuje větší pozornost.



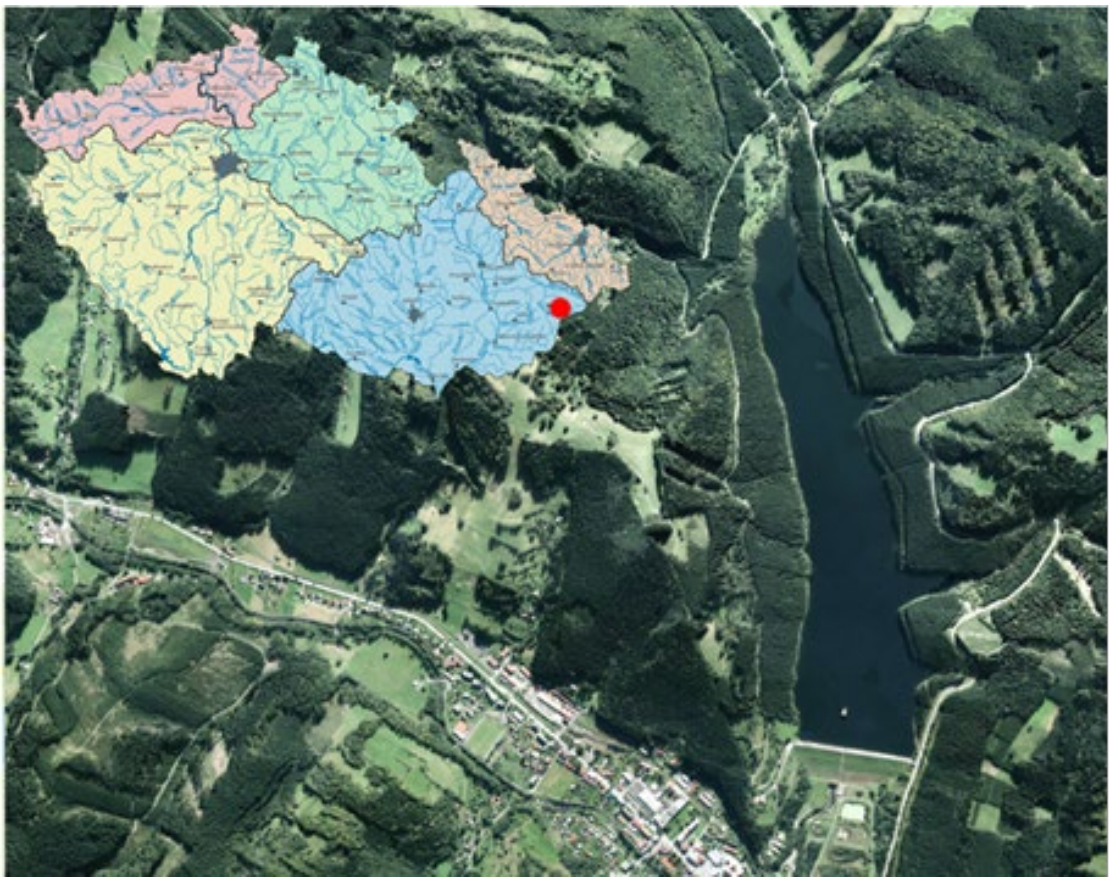
Graf 4 – Závislost f_M = f (d_{ef}) 2020 (Chládová)

Skutečnost, že zkoumané vzorky zemin v uvedené bakalářské práci rovnici z roku 2016 nespřesňují, může být dána řadou faktorů. Je nutno podotknout, že měření probíhala:

- za různých vnějších (teplota a vlhkost vzduchu) i vnitřních (koncepce měření – pitnou vodou protékaný vzorek zemina, měření vzorku vzduchosuchého, rostlé zeminy či pseudosaturovaný vzorek) podmínek, v širokém rozmezí let a realizovala se pomocí čtyř vývojových řad přístrojů Z-metr (I. až IV);
- na různorodých zeminách dle jejich klasifikace, kdy v letech 2014 – 2015 bylo testováno 13 vzorků písčitých zemin s proloženou mocninnou funkcí $f_M = 8716{,}5 d_{ef}^{-0{,}994}$ a hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0{,}9446$. Lze tedy usuzovat na vliv složení zeminy či měřeného materiálu jako byly např. skleněné kuličky různých průměrů, neboť každé rozšíření škály měřených materiálů znamenalo změnu materiálové konstanty, jednalo se o snížení její absolutní hodnoty, v čitateli zlomku v rovnici (5.3) a snížení hodnoty spolehlivosti uvedeného vztahu.
- Dále se může jednat o určení nevhodného rozsahu měřicí frekvence. Vzorky zemin měřené v roce 2019 – 2020 byly převážně jíly (velikost zrna < 0,063) a měření probíhala v rozsahu frekvencí 100 Hz – 20 000 Hz. Přesto je možné v grafu 2 pozorovat největší kumulaci bodů odpovídajících jednotlivým vzorkům zemin ve frekvenčním pásu od 1000 Hz do 20 000 Hz. Lze tedy předpokládat, že uvedený rozsah je vhodný frekvenční rozsah pro měření zemin.
- Při zpracování výsledků měření v roce 2019 – 2020 byla nově využita i Nyquistova frekvenční charakteristika, s jejíhož průběhu je pravděpodobně možné usuzovat i na homogenitu zkoumaných zemin.
- Ačkoli byly vzorky zeminy před experimenty vždy hutněny manuální vibrací, dusáním a propichováním po vrstvách, vždy se jednalo o vzorky volně sypané. I z tohoto důvodu lze efektivní velikost zrna zemin pouze odhadovat.
- Domnívám se, že aby bylo možné považovat výsledky práce za reprezentativní, je nutno v experimentech dále pokračovat a rozšířit počet hodnocených vzorků zemin. Předpokládám, že ideální počet naměřených vzorků je alespoň 100 vzorků zemin od každé skupiny jejich základní klasifikace. Doporučuji tedy v experimentech pokračovat a křivku průběžně doplňovat při respektování zavedeného postupu měření a zpracování zjištěných dat.

V rámci řešení bakalářské práce byl plán realizovat větší počet laboratorních měření a také měření v terénu v reálných podmínkách. Nicméně skutečnost existence pandemie koronavirem COVID-19 a nařízení domácí karantény vládou uvedený záměr neumožnila.

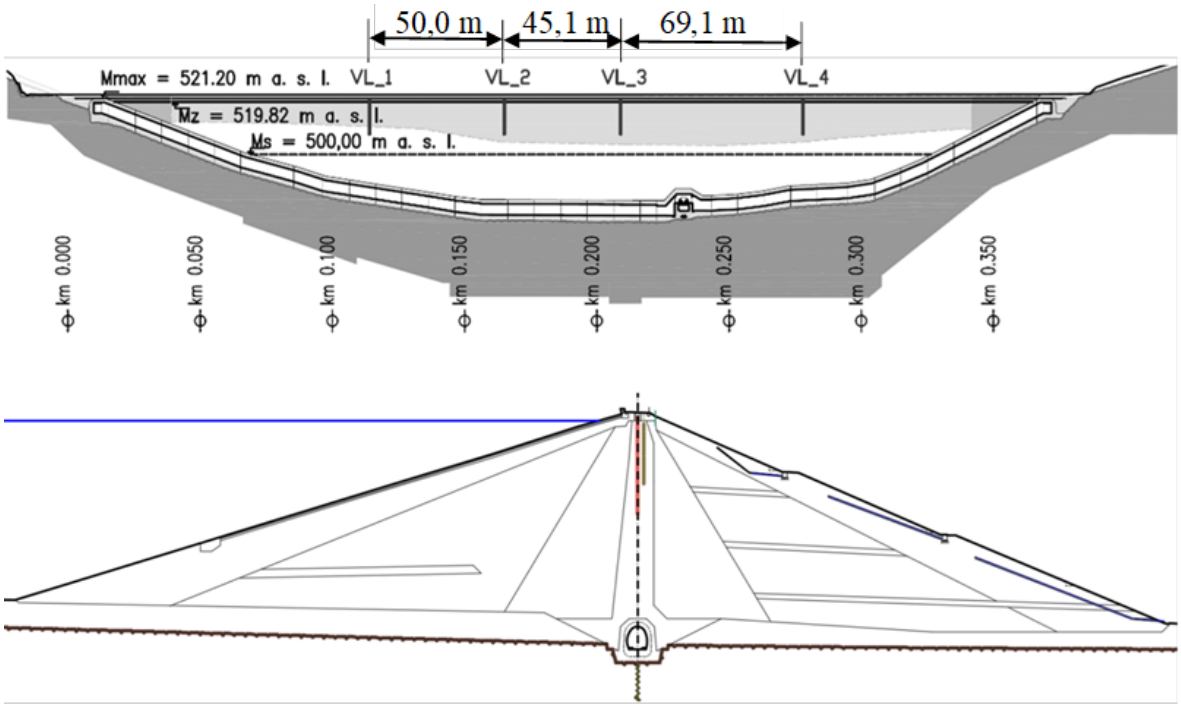
Vzhledem k tomu, že nebylo možné měřit v terénu, aplikovala jsem v práci uvedený postup při zpracování dat z terénních měření, která mi poskytla moje vedoucí práce a její doktorandka. Jedná se o monitorování zemní hráze vodního díla (VD) Karolinka (obrázek 28 a 29), které je situováno na toku Stanovice v ř. km 0,75 nad městem Karolinka v okrese Vsetín. Hlavním účelem VD je vodárenské využití pro skupinový vodovod Vsetín – Vlára, dále ochrana před povodněmi, zachování minimálního průtoku v toku pod nádrží a energetické využití. Výstavba VD probíhala v letech 1977 až 1985.



Obrázek 29 – Vodní dílo Karolinka (www.pmo.cz)

Obrázek 30 – Zemní hrází VD Karolinka (Zedníček, foceno z výšky 130 m 23. 05. 2014)

Vzhledem k zjištěným průsakům byly v letech 2004 a 2010 provedeny inženýrsko-geologické průzkumy (IGP), kdy byla potvrzena široká škála zrnitosti zemin (od jemnozrnných – CH, CS, CG po štěrkovité – GM, G-F) a rozdílná skladba směsných zemin (i mezi polohově blízkými vrty nebyla shledána podobnost), což zapříčiňovalo propustnost těsnicího jádra a vzdušných stabilizačních částí v horizontálním i vertikálním směru. Byly stanoveny polohy štěrkovitých zemin v oblasti těsnicího jádra dosahující hloubky okolo 10 m – 12 m (510,00 m n. m.) resp. 17 m – 18 m (cca 505 m n. m.). Prokázalo se, že rozhraní kvalitnějších zemin těsnicího jádra se nachází v hloubce cca 12 m – 13 m pod jeho korunou (509,00 m n. m. – 510,00 m n. m.). Stejně tak bylo průzkumem 2010 znovu prověřeno, že koruna těsnicího jádra je ve skutečnosti cca o 0,8 m níže než předepisovala projektová dokumentace (úroveň koruny těsnicího jádra místně kolísá a nachází se cca 1,5 m pod korunou hráze, tedy v úrovni maximální hladiny vody v nádrži [30]. Proto byla v roce 2013 provedena rekonstrukce VD, a to včetně dotěsnění těsnicího jádra hráze, které je řešeno kopanou podzemní těsnicí stěnou z cemento-bentonitové samotvrdnoucí suspenze. Údaje je možné zjistit na www.pmo.cz. Rovněž byl vznesen požadavek monitorovat vývoj vlhkosti zeminy hráze v jednotlivých vrstvách a na různých místech před a po instalaci těsnicí stěny, a proto byly do hráze v březnu 2011 instalovány i sondy metody EIS, každá o celkové délce 13 m s 20 měřenými úrovněmi (obrázek 31), které jsou číslovány sestupně, kdy 2 m pod korunou hráze je osazen snímač číslo „19“ a ve 13 m snímač číslo „0“. Dělení snímačů na sondě není rovnoměrné, neboť byl požadavek sledovat vývoj v úrovních předpokládaných a IGP potvrzených anomáliích zeminy hráze. Srovnávací rovinou pro celý monitorovací systém je koruna hráze.



Obrázek 31 – Řez zemní hrází VD Karolinka – situace umístění sond EIS a instalované těsnicí stěny

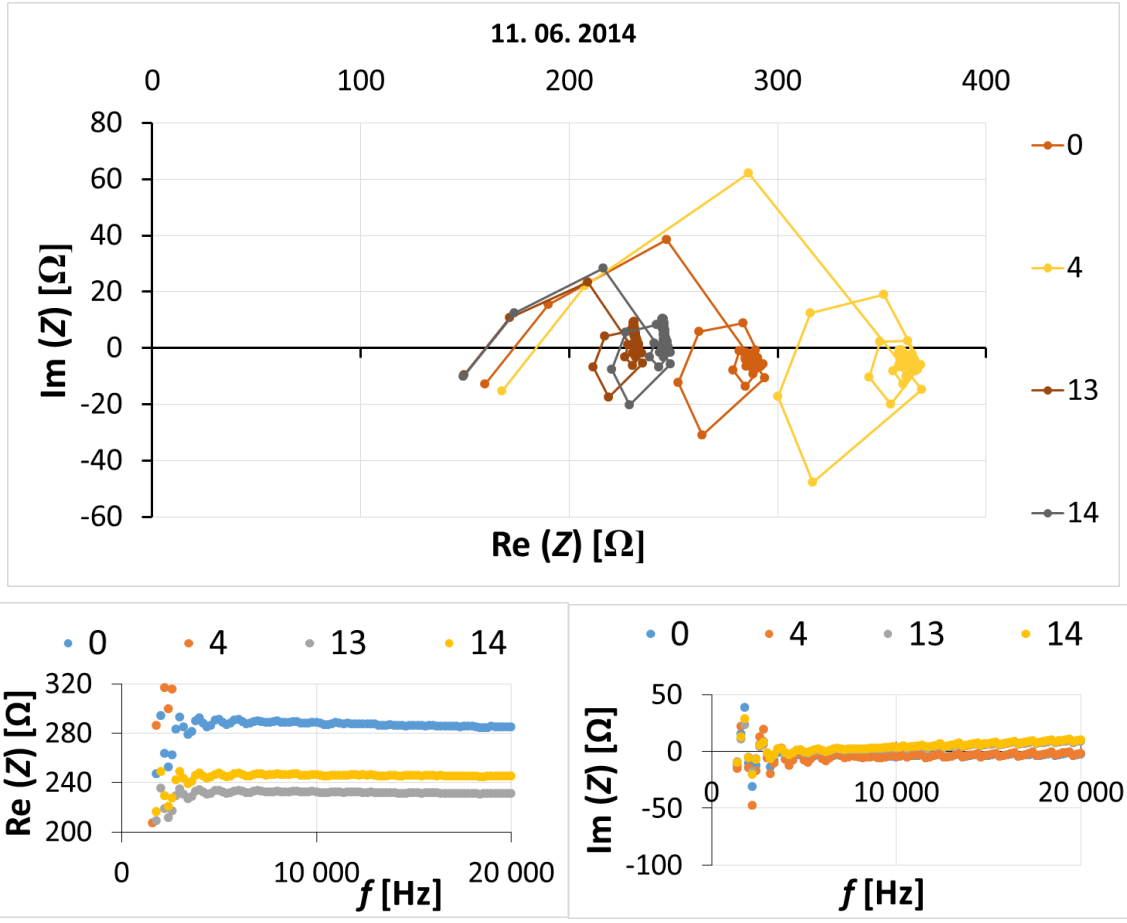
Největších vlhkostí dosahuje zemina v oblasti sond VL_1 a VL_2, což bylo doloženo i měřením dalšími metodami. Bohužel nebyla věnována dostatečná pozornost dalším aplikačním možnostem přístroje Z-metr a nebyla provedena frekvenční analýza zeminy hráze. K uvedenému měření bylo přistoupeno v roce 2014, 2016, 2019 a 2020, tedy až po instalaci těsnicí stěny. Přesto bylo potvrzeno, že zeminu hráze lze na základě frekvenční analýzy rozdělit do 5 větších celků (tab. 8), v nichž Nyquistova frekvenční

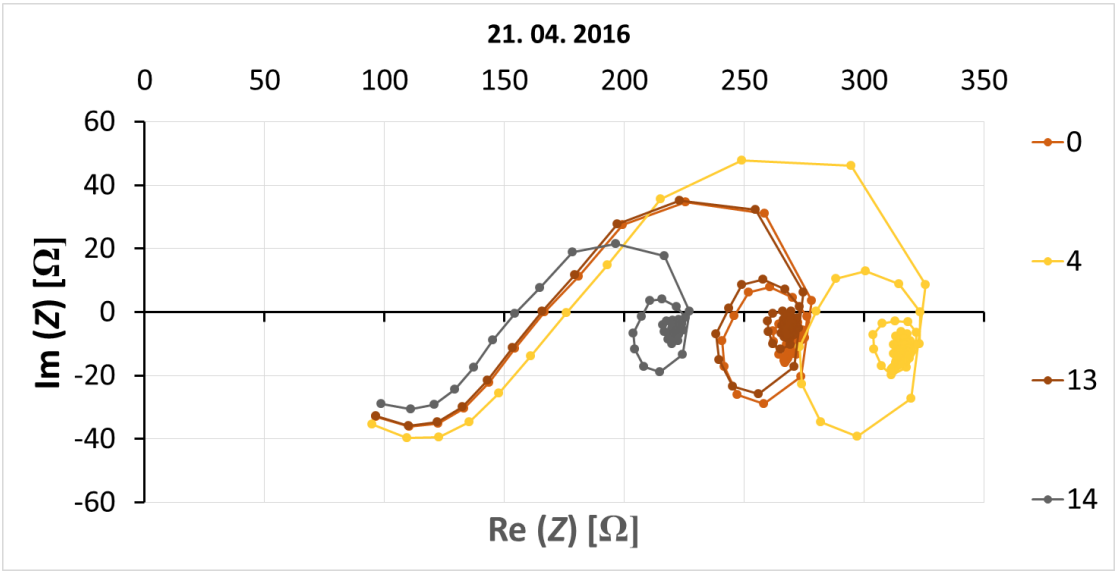
charakteristika vykazuje určitou podobnost, přičemž rozdíly v jednotlivých letech lze zanedbat.

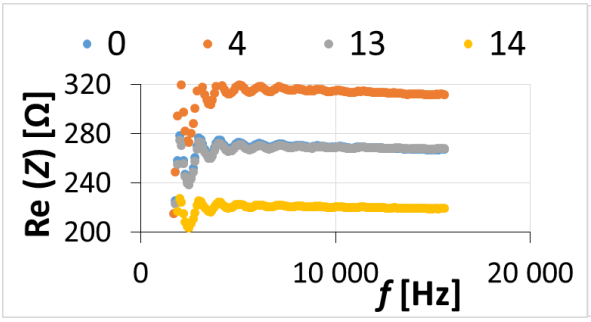
Tabulka 8 – Rozlišení zeminy hráze dle Nyquistovy frekvenční charakteristiky

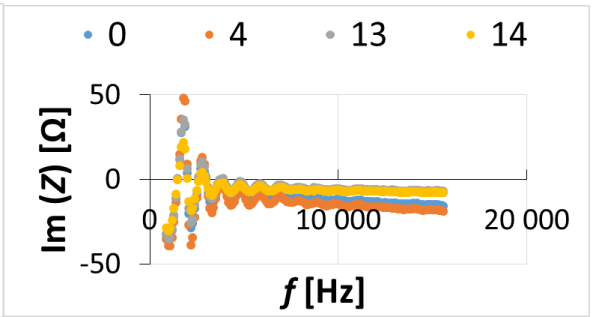
úroveň	hloubka [m]	úroveň	hloubka [m]
15	-3.175	1	-12.675
16	-3.075	2	-12.575
17	-2.125	3	-11.625
11	-4.725	5	-9.525
12	-4.175	0	-12.925
18	-2.025	4	-10.575
19	-1.925	13	-3.625
6	-8.475	14	-3.275
7	-7.925		
8	-7.375		
9	-6.825		
10	-5.775		

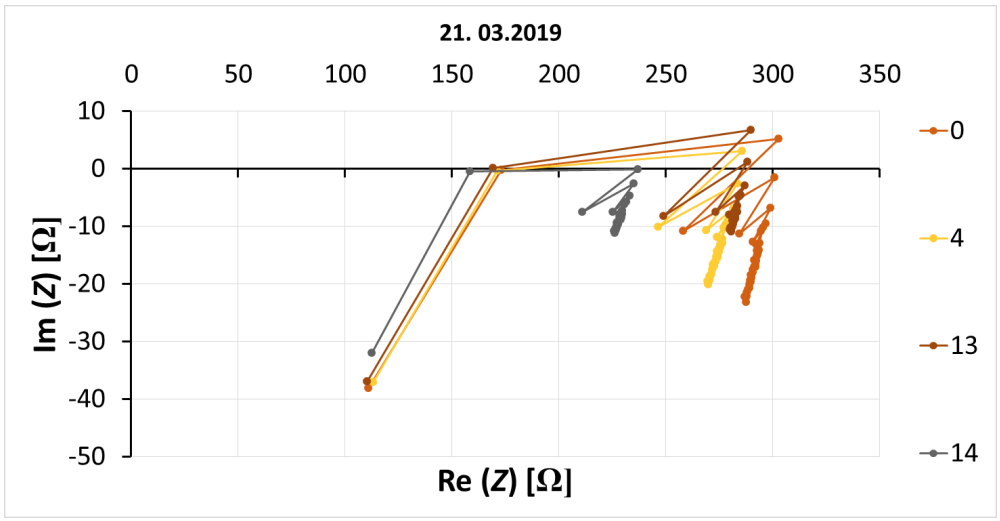
Z důvodu obsáhlosti zpracování v dalším uvádím frekvenční charakteristiky z úrovní 0, 4, 13 a 14 měřené sondou VL_1 (obrázek 32).

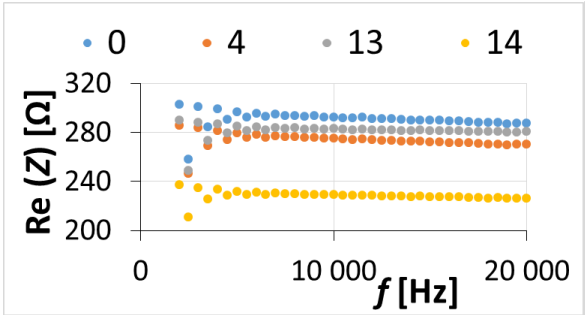


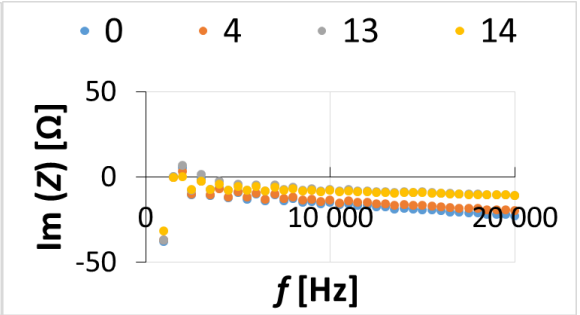

21. 04. 2016
0
50
100
150
200
250
300
350
60
40
20
0
-20
-40
-60
Im (Z) [Ω]
Re (Z) [Ω]
0
4
13
14

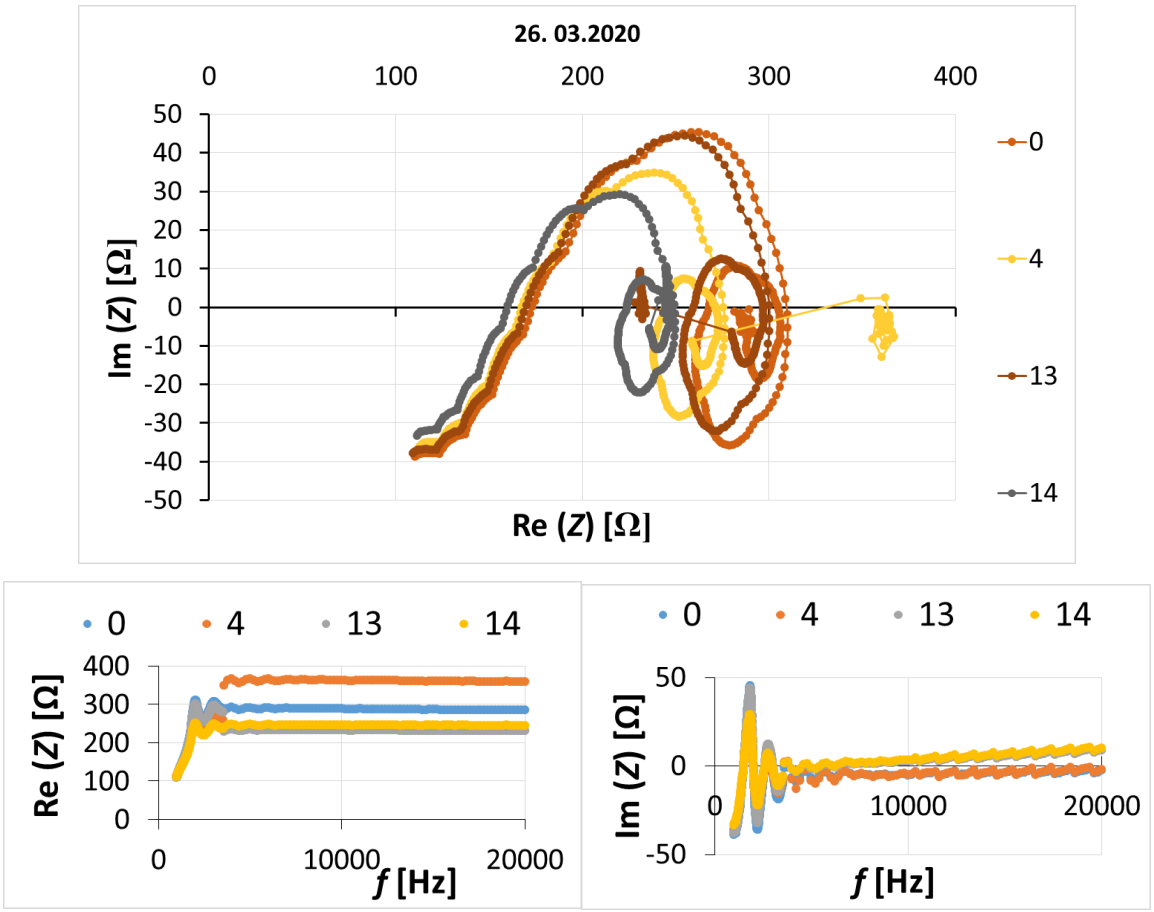

0
4
13
14
320
280
240
200
Re (Z) [Ω]
0
10 000
20 000
f [Hz]


0
4
13
14
50
0
-50
Im (Z) [Ω]
0
10 000
20 000
f [Hz]


21. 03.2019
0
50
100
150
200
250
300
350
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
Im (Z) [Ω]
Re (Z) [Ω]
0
4
13
14


0
4
13
14
320
280
240
200
Re (Z) [Ω]
0
10 000
20 000
f [Hz]


0
4
13
14
50
0
-50
Im (Z) [Ω]
0
10 000
20 000
f [Hz]



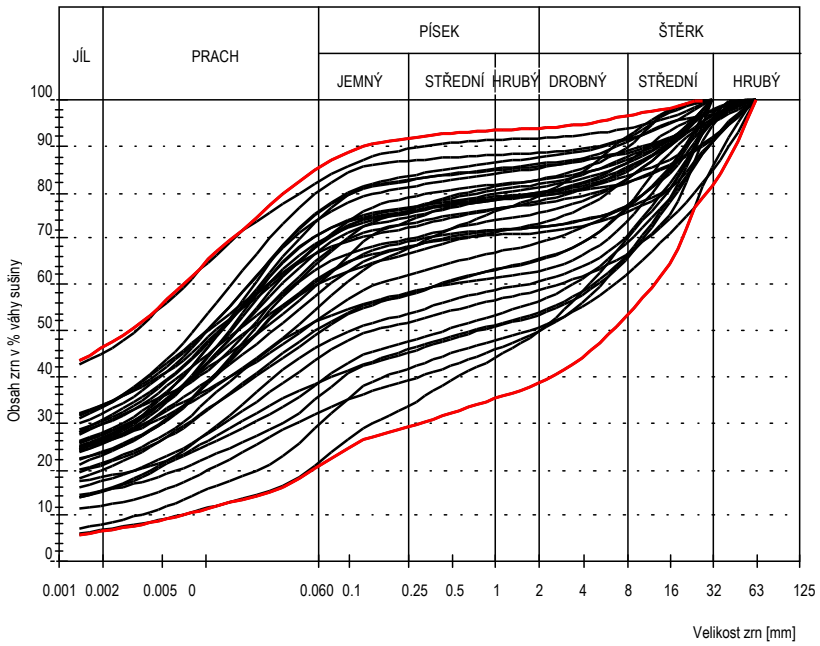
Obrázek 32 – Frekvenční charakteristiky zeminy hráze ze čtyř úrovní VD Karolinka

Z Nyquistovy frekvenční charakteristiky byly odečteny vhodné měřicí frekvence f_M a dle vztahu (5.3) byly vyjádřeny odhady velikosti efektivního zrna zeminy hráze v okolí snímačů EIS s číslem 0, 4, 13 a 14 sondy VL_1 v úrovních dle tabulky 8, do které je zařazena fotodokumentace odebraných vzorků z diskutovaných úrovní dle [31]. Uvedená zjištění byla porovnána s dostupnou studií IGP z roku 2004 [31] realizovanou společností GEO*test*, a. s.

Tabulka 9 – Výsledky frekvenční analýzy zeminy v diskutovaných úrovních

úroveň	hloubka [m]	f_M [Hz]	d_{ef} [mm]	fotodokumentace vzorků z diskutovaných úrovní [31]
0	-12,925	1860	3,3	
4	-10,575	2500	2,5	
13	-3,625	2060	3,0	
14	-3,275	1840	3,4	

Ve zprávě [31] je konstatováno, že těleso hráze v místě provedených vrtaných sond je tvořeno směsnými materiály v podobě hnědých a žlutohnědých štěrkovitých jílů a jílů s obsahem štěrku, které se vzájemně střídají v nepravidelných decimetrových až metrových polohách, jak ve vertikálním, tak i v horizontálním směru. Štěrkové polohy představují nepravidelně a nerovnoměrně obsaženou součást komplexu jílů štěrkovitých a jílů se štěrkem. Častý je i výskyt zrn velikosti (5 – 10 – 12 – 15) cm. Široké rozmezí zastoupení jemnozrnné, písčité a štěrkovité frakce dokumentují i obalové křivky laboratorně analyzovaných vzorků zemin stanovené na základě 8 provedených vrtů (obrázek 33).



Obrázek 33 – Obalová křivka zeminy hráze VD Karolinka [31]

Vzhledem k tomu, že vrty nebyly provedeny přímo v místě sondy VL_1, nelze jednoznačným rozborem velikost zrna potvrdit, ale současně nelze provedený odhad ani vyloučit.

Ze závislostí Re(Z) = f (f) lze sledovat změny obsahu vody v zemině v jednotlivých úrovních a závislostí Im(Z) = f (f) lze dedukovat případné změny struktury zeminy, a to vše v průběhu času. Pro úplnost informace by bylo vhodné doplnit i úroveň hladiny vody v nádrži v den měření, její teplotu, srážky a případně další parametry. Uvedené by však bylo nad rámec rozsahu předložené bakalářské práce.

Obrázek 34 – Realizace IGP – vrt na VD Karolinka firmou GEOtest v roce 1999 [32]

7 ZÁVĚR

Na základě provedených měření efektivní velikosti zrna a frekvenčních analýz zkoumaných vzorků zemin byla doplněna závislost f_M = f (d_{ef}) z roku 2014 – 2019. Pro vytvoření této závislosti bylo využito celkem 40 vzorků zemin.

Cílem mojí práce bylo po doplnění o nové rozbory zemin uvedenou závislost diskutovat vzhledem k použití metody EIS a měřicí aparatury pro odhad velikosti efektivního zrna zeminy. Výstupy z měření jsou upraveny v programu Excel v podobě tabulek a grafů. Funkční závislost vhodné měřicí frekvence na velikosti efektivního zrna zeminy byla převedena na matematický vztah.

Uvedený vztah a jeho hodnota spolehlivosti z roku 2016 je výrazně příznivější než nově vytvořená závislost z roku 2020 doplněná o moje měření. Nový vztah a jeho hodnota spolehlivosti z dat naměřených v uvedené bakalářské práci předchozí hypotézu, o možnosti odhadu velikosti efektivního zrna na základě uvedeného matematického vztahu, přímo nepotvrzují, ale ani nevyvrací. Na základě doplněné křivky v roce 2020 lze konstatovat zahuštění pásu v rozsahu měřicích frekvencí 1000 Hz až 10000 Hz. Je nutné podotknout, že výsledky měření mohly být ovlivněny různými podmínkami měření v širokém rozmezí let. Pokud jsem zvoleným postupem vyhodnotila mnou změřené vzorky zemin, dosáhla jsem hodnoty spolehlivosti 72,8 % s lineárním vztahem mezi měřenými veličinami resp. 71 % včetně VZ11. Pokud jsem je vložila do již existující závislosti, poklesla hodnota spolehlivosti výsledné křivky z hodnoty 92,6 % z roku 2016 na hodnotu 70,1 % resp. na hodnotu 42,4 % při zahrnutí vzorku VZ11 s hodnotou efektivního zrna 0,0043 mm. V dosud vytvořené škále zemin se však jedná o první vzorek s tak malou hodnotou efektivního zrna, a je proto zatím obtížné diskutovat jeho význam. Dále bych ráda upozornila na skutečnost, že pro všechna měření byly využity čtyři různé vývojové řady Z-metru. To sice potvrzuje adaptabilitu měřicího systému a kontinuitu měřených dat, ale rovněž nevylučuje možnost vzniku disproporce měřených hodnot. Dále se mohla vyskytnout odlišnost při určení vhodné měřicí frekvence, neboť experimenty neprováděla jedna osoba a rovněž nebyl definován měřicí postup. Především při prvních měřeních, kdy byl systém pro uvedenou úlohu pouze testován, mohly vzniknout rozdíly už při přípravě vzorku zeminy např. vlivem jeho hutnění. Rovněž jsem poprvé při hodnocení zkoumaných vzorků využila pro uvedenou úlohu i Nyquistovu frekvenční charakteristiku, která mi pomohla i v lepším popisu vzorku. Právě na jejím základě se např. domnívám, že VZ11 – 80 % jíl GEM a 20 % homogenní bratčický písek nebyl pro měření vhodný.

Doporučuji v experimentech pokračovat a křivku průběžně doplňovat při respektování zavedeného postupu měření a zpracování zjištěných dat, aby bylo možné považovat výsledky práce za reprezentativní. Domnívám se, že pro statistické účely vyhodnocení reprezentativnosti postupu hodnocení metodou EIS by testovaných vzorků zemin mělo být podstatně více, alespoň 100, a měla by být zastoupena každá skupina jejich základní klasifikace. Vzhledem k tomu, že nebylo možné měřit v terénu, doporučuji uvedený postup měření ověřit při měřeních v terénu. Na základě poskytnutých dat z měření na hrázi vodního díla Karolinka se domnívám, že lze předpokládat jejich jistou korelovatelnost.

Protože se jedná o odhad velikosti efektivního zrna zeminy, je možné konstatovat, že dosud stanovenou závislost je možné považovat za dostatečně přesnou a užitý měřicí systém lze považovat za vhodný pro odhad efektivního velikosti zrna zeminy.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] ČSN EN ISO 17892-4 (721007). *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti.* Praha: SG Geotechnika, 2017.

[2] ŠLEZINGR, Miloslav. Hydrotechnické stavby: Modul 1: Návrh říčního koryta. Brno, 2005. Studijní opora. Vysoké učení technické v Brně.

[3] MATTAS, Daniel. *Výpočet průtoku v otevřených korytech.* Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2014. ISBN 978-80-87402-27-6.

[5] *Půdoznalství – laboratorní cvičení.* Kiwi.mendelu.cz [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2020 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=5493&typ=html

[6] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin.* Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN isbn80-7204-507-5.

[7] *Particle-size distribution.* In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Particle-size_distribution

[8] *Is the Laser Diffraction Method Reliable for Soil Particle Size Distribution Analysis?* Soil Science Society of America Journal. 2019, 2(3), 12.

[9] KADLČÁK, Jiří. *Vizuální analýza zrnitosti pro potřeby inženýrské geologie.* Brno, 2016. Diplomová práce. Masarykova univerzita.

[10] ISO 20998-1:2006. *Measurement and characterization of particles by acoustic methods — Part 1: Concepts and procedures in ultrasonic attenuation spectroscopy.* –: ISO/TC 24/SC 4 Particle characterization, 2006.

[11] Particle Size Distribution. *Particle Technology Labs* [online]. Downers Grove: Particle Technology Labs, c2019 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: https://www.particletechlabs.com/analytical-testing/particle-size-distribution-analyses

[12] UHMANNOVÁ, Hana. Přednáška z předmětu BR052 – *Hydraulika otevřených koryt: Pohyb splavenin*. Brno, 2019.

[13] KAMENÍČKOVÁ, Ivana. *Vodní hospodářství krajiny: Modul 01 – Část I – Pedologie*. Brno, 2005. Studijní opora. Vysoké učení technické v Brně.

[14] *Particle Size Analysis.* Sciencedirect.com [online]. –: Eleviser, 2016 [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/particle-size-analysis

[15] LAMBOJ, Ladislav; ŠTĚPÁNEK, Zdeněk. *Mechanika zemin a zakládání staveb*. 2005. vyd. [s.l.]: Vydavatelství ČVUT 214 s. ISBN 8001030946

[16] FAJFAROVÁ, Marie. *Možnosti detekce obsahu vody v pórovitém prostředí metodou elektrické impedanční spektrometrie*. Brno, 2014. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.

[17] *Elektrická impedance*. In: WikiSkripta: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Elektrick%C3%A1_impedance

[18] PAŘÍLKOVÁ, Jana. *Fyzikální podstata metody elektrické impedanční spektrometrie (EIS)*. Brno, 2016.

[19] PAŘÍLKOVÁ, Jana a Karel Radkovský. *Z-metr IV – uživatelský manuál*. LVV ÚVST, FAST, VUT v Brně, 24 str., 2016.

[20] GAJDOŠ, Vojtěch, *Elektromagnetické vlastnosti hornín*. Bratislava: Univerzita Komenského, 2013.

[21] WOLMAN, M. G. (1954). *A method of sampling coarse river-bed material*. Transaction, American Geophysical union. 1954.

[22] *Klasifikace zemin: Mechanika hornin a zemin - cvičení 02*. Brno, 2014.

[23] *Sieve Analysis*. In: Civilengineerspk.com [online]. Civil Engineers PK, 2013 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: https://civilengineerspk.files.wordpress.com/2013/05/3-1.jpg

[24] JANDÁK, Jiří. *Cvičení z půdoznalství*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Agronomická fakulta, 2003. ISBN 80-7157-733-2.

[24] *Zrnitost půdy.* In: Pedologie.cz [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita, – [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: http://www.pedologie.cz/postupy/rozbory/zrnitost.pdf

[25] *10. Analýza částic Velikost částic*. In: *Fchi.vscht.cz* [online]. Praha: Fakulta chemicko-inženýrská - VŠCHT, 2013 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: http://fchi-oppa.vscht.cz/uploads/AK07-Spec%20metody/10_Analyza_castic.pdf

[26] LAMBOJ, Ladislav; ŠTÉPÁNEK, Zdeněk. *Mechanika zemin a zakládání staveb*. 2005. vyd. [s.l.]: Vydavatelství ČVUT 214 s. ISBN 8001030946

[27] *PARTICLE MEASUREMENT* – Laser Difraction. In: *Sympatec.com* [online]. Search Results Web results Clausthal-Zellerfeld: Sympatec, 2017-20 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/sensors/laser-diffraction/

[28] *COULTER COUNTER.* In: *Thermopedia.com* [online]. United Kingdom: Thermopedia, 2011 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: http://thermopedia.com/content/670/

[29] *Multisizer™ 4e COULTER® Counter* [online]. In: . [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: http://www.beckmancoulter.cz/life-sciences/analyzatory-bunek/multisizer-4e-coulter-counter/

[30] ZAPLETALOVÁ, M. *Monitorování průsakového režimu hráze VD Karolinka.* Závěrečná seminární práce. PMO, s.p. 2016. pp. 1-39.

[31] STACH, J., RECH, S., RUPP, D. *VD Karolinka – těsnicí clona, gt průzkum*. Závěrečná zpráva o geotechnickém průzkumu hráze Vodního díla Karolinka. GEOtest Brno, a. s., Brno 2004, 20 str.

[32] KREJČÍ, V., HOLOMEK, S. *VD Karolinka – program TBD pro trvalý provoz*. Zpráva 10 str. a fotodokumentace o geotechnickém průzkumu hráze Vodního díla Karolinka. GEOtest Brno, a. s., Brno 1999.

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Velikost zrn frakcí (ČSN EN ISO 14688-1) 14
Tabulka 2 – Základní technické parametry přístroje Z-metr IV 28
Tabulka 3 – Záznam měření přístrojem Z-metr IV 28
Tabulka 4 – Časy, ve kterých byla měřena hustota suspenze 32
Tabulka 5 – Měřené a vypočtené elektrické veličiny charakterizující zeminu VZ9 36
Tabulka 6 – Příklad tabulky pro záznam dat vzorku zeminy VZ9 a VZ1 40
Tabulka 7 – Statistická data z měření 2014 – 2020 41
Tabulka 8 – Rozlišení zeminy hráze dle Nyquistovy frekvenční charakteristiky 47
Tabulka 9 – Výsledky frekvenční analýzy zeminy v diskutovaných úrovních 49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Křivka zrnitosti zeminy [22] 12
Obrázek 2 – Sada sít, zdroj [23] 15
Obrázek 3 – Kopeckého plavicí přístroj [24] 16
Obrázek 4 – Dekantační válec s postranním tubusem [25] 17
Obrázek 5 – Pipetovací metoda [25] 18
Obrázek 6 – Hustoměrná zkouška [25] 18
Obrázek 7 – Schéma metody optického počítání [11] 20
Obrázek 8 – Ukázka principu metody fotoanalýzy: a) původní obraz pořízený v mikroskopu; b) verze upraveného algoritmem, připravená pro analýzu v programu; c) prostředí programu vytvořeného pro obrazovou analýzu Laserovou difrakční metodou [9] 20
Obrázek 9 – Schéma metody laserové difrakce [27] 21
Obrázek 10 – ANALYSETTE 22 NanoTec – laserový měřič velikosti částic v rozsahu 0,01 µm až 2100 µm firmy Fritsch, vlastník zařízení Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre (foto Pařílková) 21
Obrázek 11 – Schéma principu Coulterova čítače [28] 22
Obrázek 12 – Multisizer™ 4e COULTER® Counter – čítač částic velikosti v rozsahu 0,2 µm až 1600 µm firmy BeckmanCoulter využívající Coulterovu impedanční metodu [29] 23
Obrázek 13 – Ukázka provádění Wolmanovy metody [12] 23
Obrázek 14 – Příklad výstupu subjektivní metody [12] 24
Obrázek 15 – Příklad přirozené zrnitosti dna vodního toku Bečva (foto Pařílková) 24
Obrázek 16 – Grafické znázornění průběhu harmonického proudu [18] 25
Obrázek 17 – Diagram elektrické impedance s reálnou a kladnou imaginární složkou [18] 26
Obrázek 18 – Označená délka vodiče *l* a *A* obsah kolmého průřezu vodiče [19] 27
Obrázek 19 – Z-metr IV [19] 27
Obrázek 20 – Souprava pro sítový rozbor (LVV ÚVST) 30
Obrázek 21 – Vysušení zrn větších než 0,063 mm 32
Obrázek 22 – Měření hustoměrnou metodou 33
Obrázek 23 – Schéma uložení tyčových elektrod v měřeném vzorku 34
Obrázek 24 – Měření elektrické impedance zemin 35
Obrázek 25 – Vzduchové bubliny při měření vzorku zeminy zatíženého destilovanou vodou 35
Obrázek 26 – Frekvenční charakteristiky vzorku VZ9 38
Obrázek 27 – Nyquistova frekvenční charakteristika vzorku VZ9 39
Obrázek 28 – Nyquistova frekvenční charakteristika saturovaného vzorku VZ1 40

Obrázek 29 – Vodní dílo Karolinka (www.pmo.cz).....45

Obrázek 30 – Zemní hrází VD Karolinka (Zedníček, foceno z výšky 130 m 23. 05. 2014) 45

Obrázek 31 – Řez zemní hrází VD Karolinka – situace umístění sond EIS a instalované těsnicí stěny 46

Obrázek 32 – Frekvenční charakteristiky zeminy hráze ze čtyř úrovní VD Karolinka.....49

Obrázek 33 – Obalová křivka zeminy hráze VD Karolinka [31].....50

Obrázek 34 – Realizace IGP – vrt na VD Karolinka firmou GEOtest v roce 1999 [32]....51

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Granulometrická křivka vzorku VZ9 31
Graf 2 – Závislost f_M = f (d_{ef}) 2020 42
Graf 3 – Závislost f_M = f (d_{ef}) 2016 43
Graf 4 – Závislost f_M = f (d_{ef}) 2020 (Chládová) 43

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

EIS … elektrická impedanční spektrometrie

IGP … inženýrsko geologický průzkum

LVV ÚVST … Laboratoř vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb

USCS … Unified Soil Classification System

VD … vodní dílo

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Název	Jednotka
A	obsah kolmého průřezu vodiče	m^2
C_c	číslo křivosti	–
C_u	číslo nestejnozrnnosti	–
d	průměr zrna	mm
D	průměr otvoru mezi elektrodami	mm
d_{ef}	efektivní zrno zeminy	mm
d_i	aritmetický průměr mezních velikostí jedné frakce	mm
d_s	střední průměr zrna	mm
d_{10}	velikost zrn při 10 % propadu	mm
d_{30}	velikost zrn při 30 % propadu	mm
d_{60}	velikost zrn při 60 % propadu	mm
f	frekvence	Hz
f_M	měřicí frekvence	Hz
G	elektrická vodivost	S
l	délka vodiče	m
n	opakování měření na jedné frekvenci	–
p_i	procentuální obsah frakce	%
R	elektrický odpor	Ω
ΔR	změna elektrického odporu	Ω
t_{vz}	teplota vzduchu	°C
$\|Z\|$	modul vektoru elektrické impedance	Ω
φ	fázový posuv	–
σ	konduktivita	S/m

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Zpracování dat ze sítového rozboru

Příloha 2 – Zpracovaná data z měření hustoměrnou metodou

Příloha 3 – Zpracovaná data z měření elektrické impedance

PŘÍLOHA 1 – PŘÍKLAD ZPRACOVÁNÍ DAT ZE SÍTOVÉHO ROZBORU

Zápis hodnot naměřených vážením zbytků zeminy na jednotlivých normových sítech ze sítového rozboru. Výpočet probíhal prostřednictvím softwaru Excel, kde byla na základě uvedených dat sestrojena křivka zrnitosti a provedeny další výpočty, zejména výpočet hodnoty efektivního zrna zeminy.

Tabulka: Příklad tabulky pro záznam dat vzorku zeminy VZ4

Granulometrický rozbor

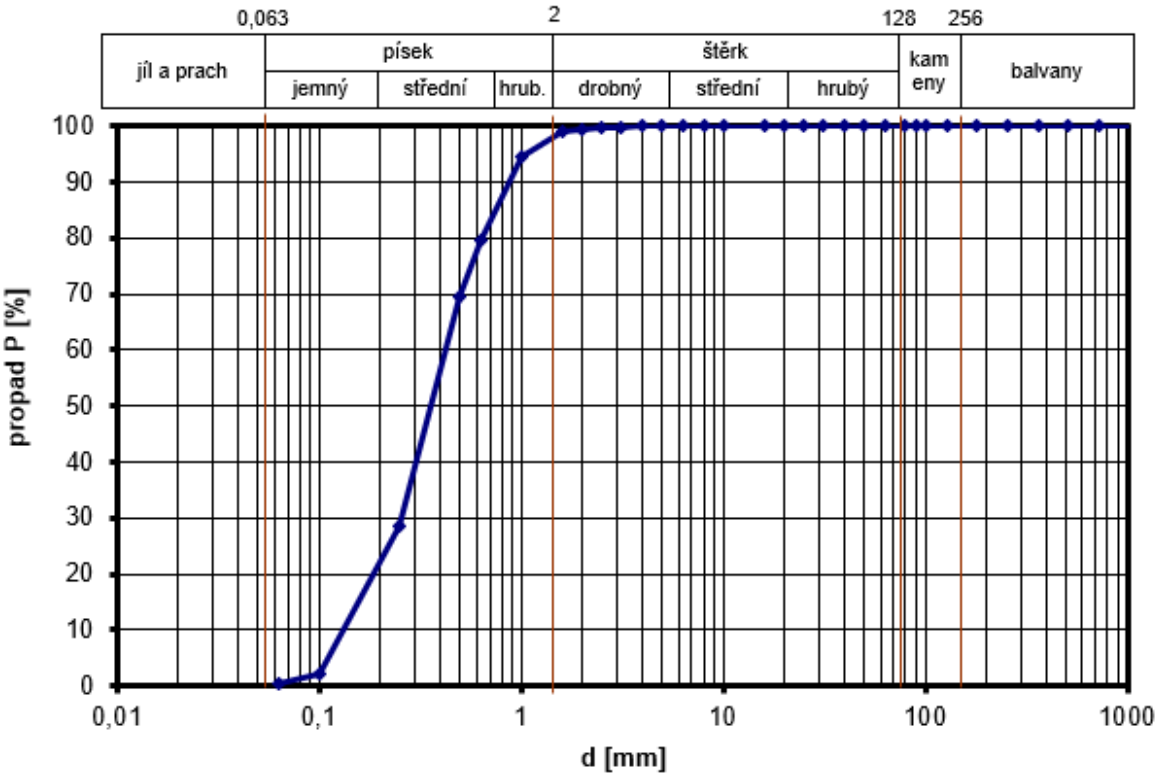
Identifikační data vzorku:
Označení vzorku: VZ4

Hmotnost vysušeného vzorku:	m	503,5	[g]

Stanovení zrnitosti vzorku

	frakce [mm]	m_{frakce} [g]	$m_{složky}$ [g]
jíl a prach	0	2,5	2,5
písek	0,063	8,3	498,4
	0,1	132	
	0,25	208	
	0,5	50,1	
	0,63	75,7	
	1	21,5	
	1,6	2,8	
štěrk	2	1,5	2,6
	2,5	0,2	
	3,15	0,9	
	4	0	
	5	0	
	6,3	0	
	8	0	
	10	0	
	16	0	
	20	0	
	25	0	
	31,5	0	
	40	0	
	50	0	
	63	0	
	80	0	
	90	0	
	100	0	
kameny	128	0	0
	181	0	
balvany	256	0	0
	362	0	
	512	0	
	724	0	
	1024	0	

Tabulka: Příklad výpočtu hodnoty efektivního zrna a konstrukce křivky zrnitosti



Procentuální zastoupení složek zeminy ve vzorku

jíl a prach	písek			štěrk			kameny	balvany
	jemný	střední	hrubý	drobný	střední	hrubý		
0.5 %	99 %			0.5 %			0 %	0 %
	27.9 %	66.3 %	4.8 %	0.5 %	0 %	0 %		

Procentuální zastoupení frakcí zeminy menších než d

<d [mm]	0,063	0,25	1	2	8	32	128	256
P [%]	0,5	28,4	94,7	99,5	100,0	100,0	100,0	100,0

Průměr efektivního zrna

d_{ef}	0,5	[mm]
Pd_{ef}	63,2	[%]

Charakteristická čísla

C_U	3,0	[-]
C_C	1,1	[-]

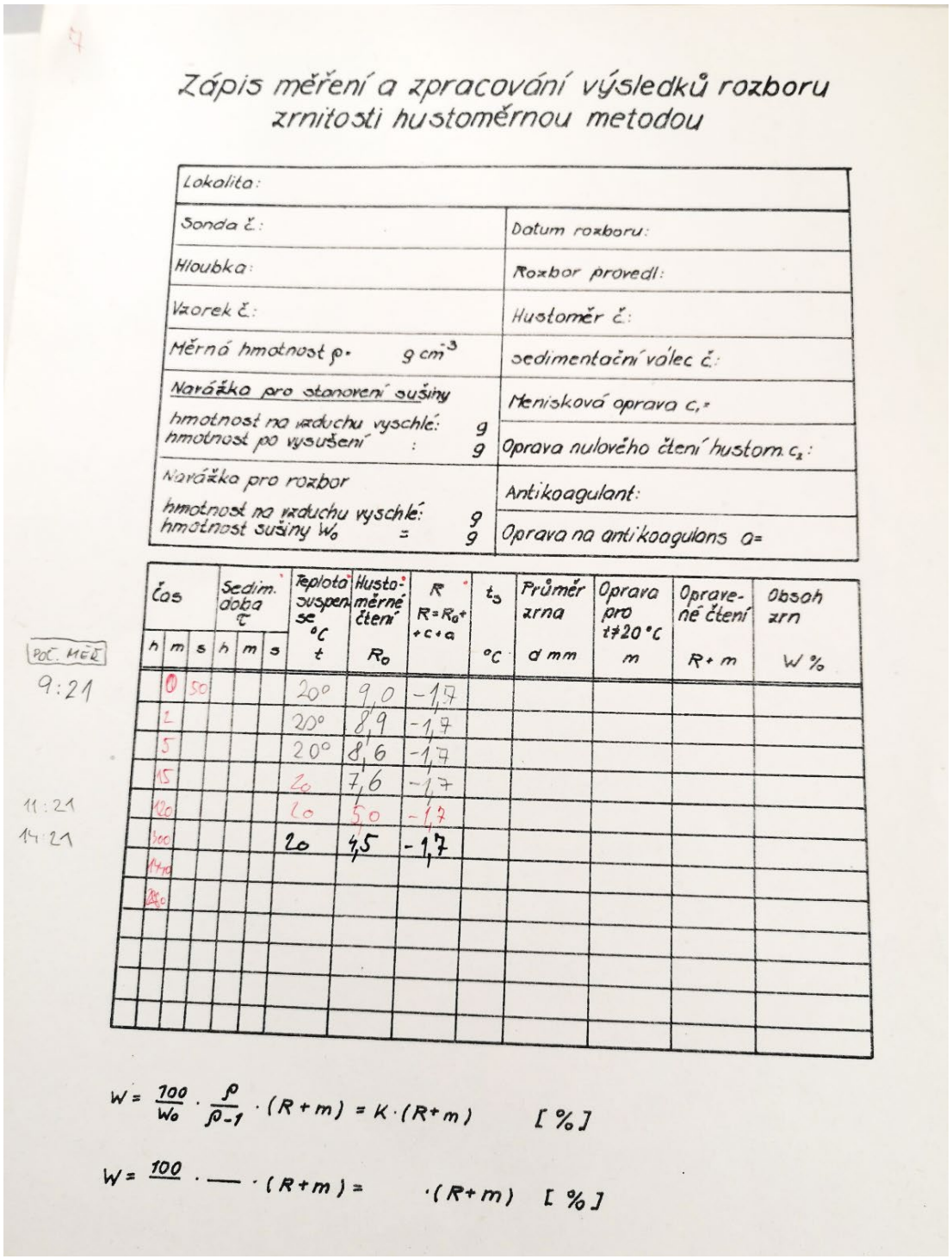
Charakteristické hodnoty zrn vzorku

d_{10}	0,1	[mm]
d_{15}	0,2	[mm]
d_{30}	0,3	[mm]
d_{50}	0,4	[mm]
d_{60}	0,4	[mm]
d_{85}	0,8	[mm]
d_{90}	0,9	[mm]

Vzorek je: písčitý stejnozrnný špatně zrněný

PŘÍLOHA 2 – PŘÍKLAD ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘENÍ HUSTOMĚRNOU METODOU

Zápis hodnot přečtených na hustoměru byl zaznamenán do tabulky. Výpočet probíhal prostřednictvím softwaru Excel, kde byla na základě uvedených dat sestrojena křivka zrnitosti a provedeny další výpočty, zejména výpočet hodnoty efektivního zrna zeminy.



Zápis měření a zpracování výsledků rozboru zrnitosti hustoměrnou metodou

Lokalita:	
Sonda č.:	Datum rozboru:
Hloubka:	Rozbor provedl:
Vzorek č.:	Hustoměr č.:
Měrná hmotnost ρ= g cm⁻³	sedimentační válec č.:
Navážka pro stanovení sušiny	Menisková oprava c_1=
hmotnost na vzduchu vyschlé: g hmotnost po vysušení : g	Oprava nulového čtení hustom. c_2:
Navážka pro rozbor	Antikoagulant:
hmotnost na vzduchu vyschlé: g hmotnost sušiny W_0 = g	Oprava na antikoagulans a=

Čas h	m	s	Sedim. doba τ h	m	s	Teplota suspenze °C t	Hustoměrné čtení R_0	R $R=R_0+c+a$	t_3 °C	Průměr zrna d mm	Oprava pro t≠20 °C m	Opravené čtení R+m	Obsah zrn W %
POČ. MĚŘ 9:21													
0	30					20°	9,0	-1,7					
1						20°	8,9	-1,7					
5						20°	8,6	-1,7					
15						20	7,6	-1,7					
11:21 120						20	5,0	-1,7					
14:21 300						20	4,5	-1,7					
1440													
2880													

$$W = \frac{100}{W_0} \cdot \frac{\rho}{\rho - 1} \cdot (R+m) = K \cdot (R+m) \quad [\%]$$

$$W = \frac{100}{\quad} \cdot \frac{\quad}{\quad} \cdot (R+m) = \quad \cdot (R+m) \quad [\%]$$

Obrázek: Záznam dat z měření hustoměrnou zkouškou pro vzorek VZ11

Tabulka: Příklad tabulky pro záznam dat vzorku zeminy VZ11

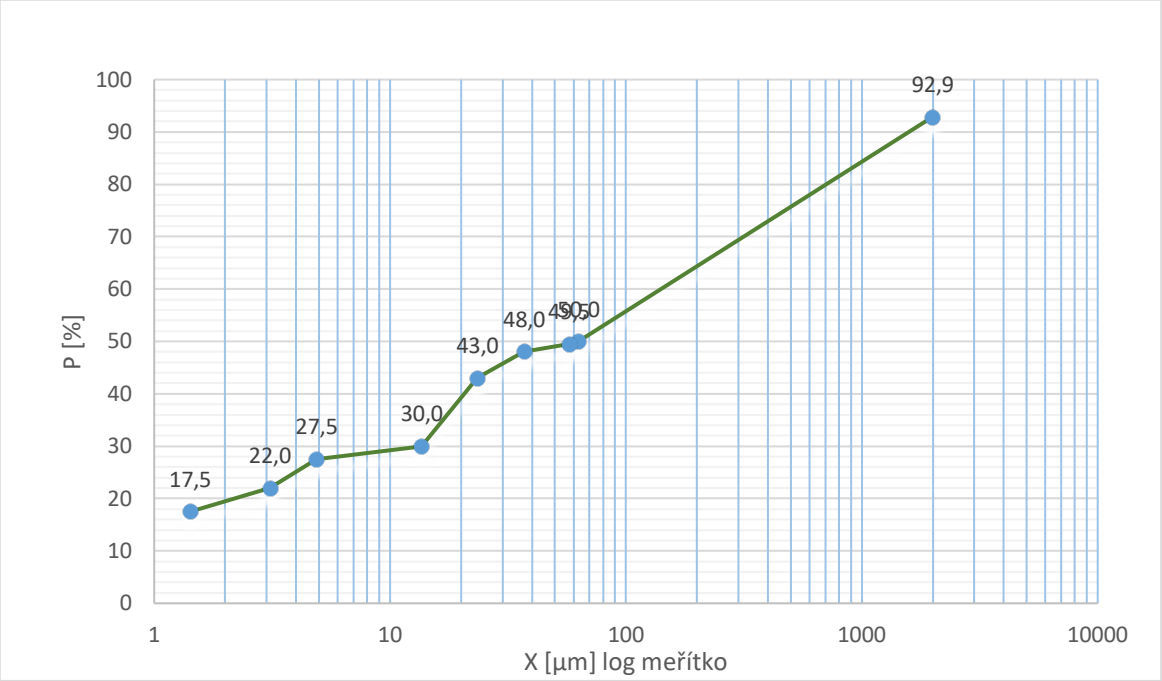
EIJKELKAMP HYDROMETRIC SET

HUSTOMĚRNÁ METODA

R	neopravené čtení v g/l
R bl	čtení "blank" válce v g/l
T	teplota vody v "blank" válci ve °C
C	koncentrace půdy v suspenzi
C 50 sec	koncentrace půdy v suspenzi po 50 sekundách (celk. váha jílu a prachu)
P	procentuální (váhový) obsah částic vznášejících se v suspenzi v daném čase
X	střední průměr částic v suspenzi v daném čase
B	faktor B jako funkce teploty (dohledat v tabulce)

N	1,42	g	celková váha frakce písku
Co	20	g	celková váha vzorku
def	0,0043	mm	Velikost efektivního zrna

t	R	R bl	T	C	P	h´	B	X
[min]	[g/l]	[g/l]	[°C]	[g/l]	-		-	[µm]
0,83	9	-1	20	10	50,0	14,82	0,00019	57,5
2	8,9	-1	20	9,9	49,5	14,84	0,00019	37,1
5	8,6	-1	20	9,6	48,0	14,89	0,00019	23,5
15	7,6	-1	20	8,6	43,0	15,05	0,00019	13,6
120	5	-1	20	6	30,0	15,48	0,00019	4,9
300	4,5	-1	20	5,5	27,5	15,56	0,00019	3,1
1440	3,4	-1	20	4,4	22,0	15,74	0,00019	1,4
2880	2,5	-1	20	3,5	17,5	15,89	0,00019	1,0



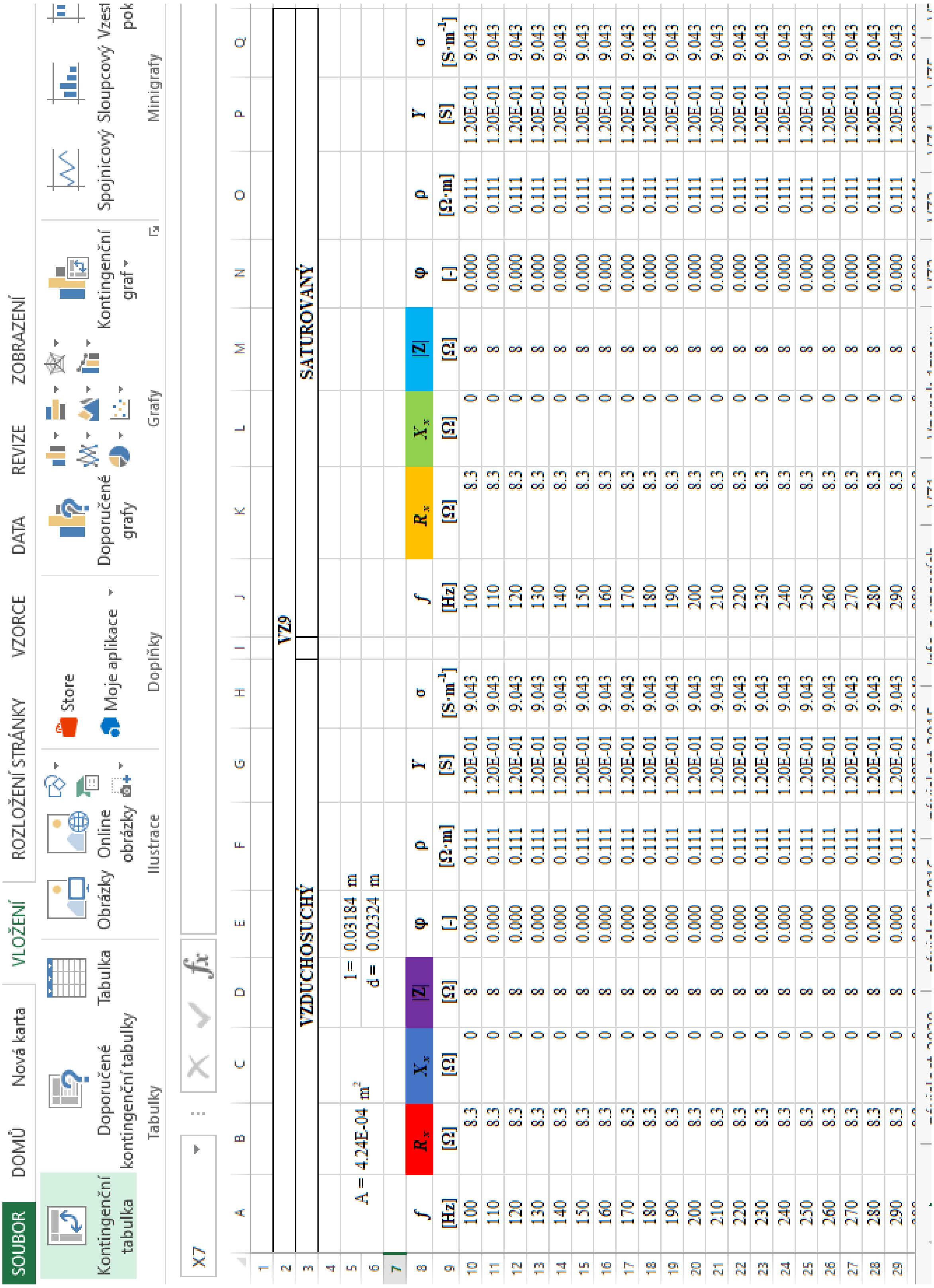
PŘÍLOHA 3 – PŘÍKLAD ZPRACOVÁNÍ DAT Z MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ IMPEDANCE

Prvotní data z měření elektrické impedance zemin jsou v souboru csv. V tabelárním vyjádření jsou zde obsaženy hodnoty: pořadové číslo měření – No, měřicí frekvenci – f [Hz], datum měření – date [dd.mm.yyyy], hodina měření – time [hh:mm:ss], měřicí kanál – ch, měřicí rozsah – range, měřená rezistance – *Rx* [Ω], měřená reaktance – *Xx* [Ω]. Pro případného zájemce mohou být poskytnuta veškerá data z měření elektrické impedance, která nebyla vzhledem ke své velikosti umístěna do předložené bakalářské práce.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	#Start at 31.7.2019 12:37:11									
2	No	f [Hz]	date [dd.mm	time [hh:r	ch	range	Rx [ohm]	Xx [ohm]	temp L [C]	temp R [C]
93	1	1000	31.07.2019	12:37:47	0	4	99862.7	-52823.4	-99.99	-99.99
94	1	1010	31.07.2019	12:37:48	0	4	100860.6	-53279.1	-99.99	-99.99
95	1	1020	31.07.2019	12:37:48	0	4	102132.6	-53702.5	-99.99	-99.99
96	1	1030	31.07.2019	12:37:48	0	4	103445.9	-54252.7	-99.99	-99.99
97	1	1040	31.07.2019	12:37:49	0	4	104796.8	-54907	-99.99	-99.99
98	1	1050	31.07.2019	12:37:49	0	4	106299.1	-55628.7	-99.99	-99.99
99	1	1060	31.07.2019	12:37:50	0	4	107934.3	-56439.2	-99.99	-99.99
100	1	1070	31.07.2019	12:37:50	0	4	109621.3	-57288.1	-99.99	-99.99
101	1	1080	31.07.2019	12:37:51	0	4	111685.5	-58126.5	-99.99	-99.99
102	1	1090	31.07.2019	12:37:51	0	4	113738.7	-59181.9	-99.99	-99.99
103	1	1100	31.07.2019	12:37:51	0	4	115971.8	-60141.9	-99.99	-99.99
104	1	1110	31.07.2019	12:37:51	0	4	117365.9	-60078.5	-99.99	-99.99
105	1	1120	31.07.2019	12:37:52	0	4	118796.7	-60236.3	-99.99	-99.99
106	1	1130	31.07.2019	12:37:52	0	4	120497.2	-60253.9	-99.99	-99.99
107	1	1140	31.07.2019	12:37:53	0	4	122153.7	-60459	-99.99	-99.99
108	1	1150	31.07.2019	12:37:53	0	4	123922.1	-60662.8	-99.99	-99.99
109	1	1160	31.07.2019	12:37:54	0	4	125861.6	-61088.1	-99.99	-99.99
110	1	1170	31.07.2019	12:37:54	0	4	127865.6	-61526.1	-99.99	-99.99
111	1	1180	31.07.2019	12:37:54	0	4	130157.3	-61854.4	-99.99	-99.99
112	1	1190	31.07.2019	12:37:55	0	4	132450.4	-62517.1	-99.99	-99.99
113	1	1200	31.07.2019	12:37:55	0	4	134910.3	-63166.9	-99.99	-99.99

Tato data byla následně graficky upravena do podoby viditelné na dalším obrázku. Dále byly na základě vztahů uvedených v kapitole 4 vypočteny další hodnoty – Modul elektrické impedance $|Z|$ [Ω], fázový posuv φ [–], rezistivita ρ [Ω·m], admitance Y [S], konduktivita σ [S·m^{-1}]. Dále byla uvedena hodnota plochy kolmého průřezu vodiče A [m^2] a délka vodiče l [m].

Na obrázku jsou zobrazena data až od hodnoty měření při frekvenci 100 Hz.



VZ9

VZDUCHOSUCHÝ

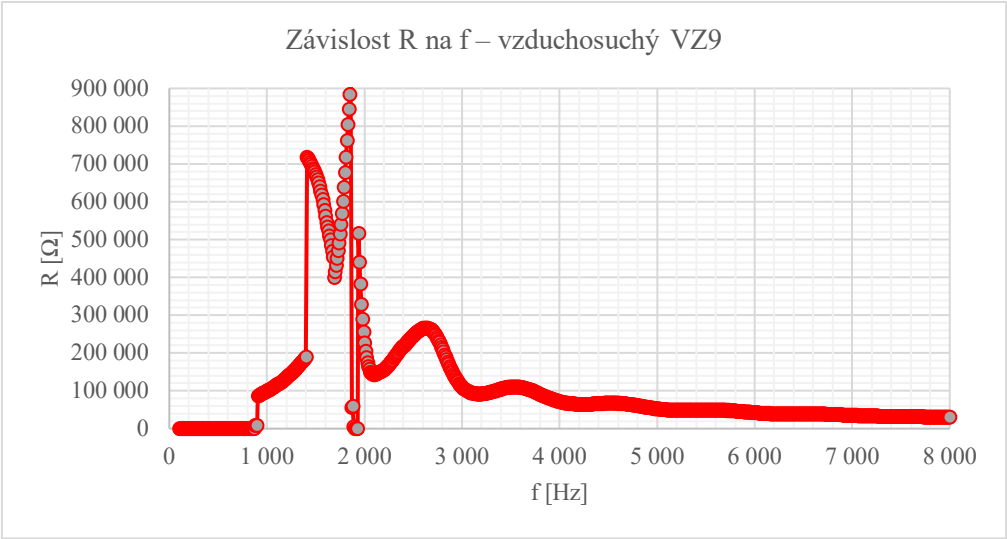
A = 4.24E-04 m²
l = 0.03184 m
d = 0.02324 m

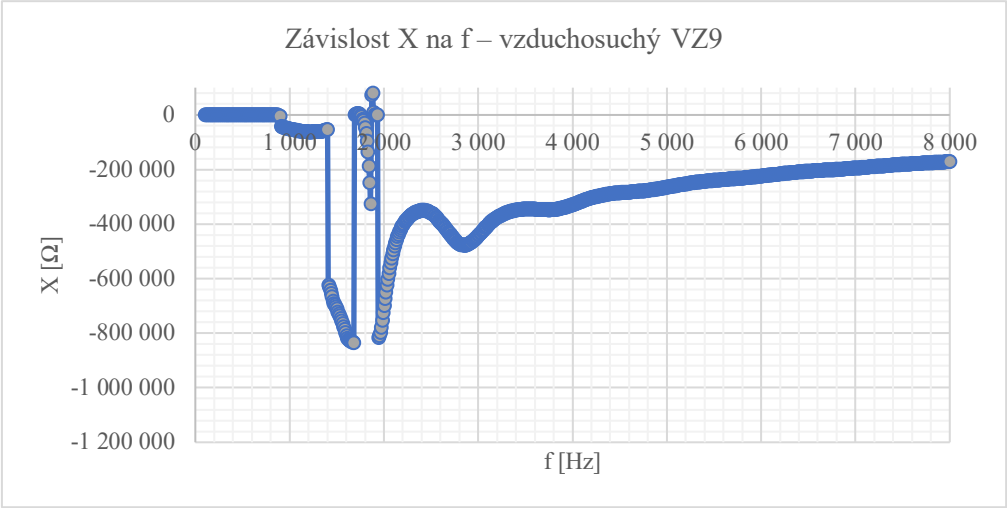
f [Hz]	R_x [Ω]	X_x [Ω]	|Z| [Ω]	φ [-]	ρ [Ω·m]	Y [S]	σ [S·m⁻¹]
100	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
110	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
120	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
130	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
140	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
150	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
160	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
170	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
180	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
190	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
200	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
210	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
220	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
230	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
240	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
250	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
260	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
270	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
280	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
290	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043

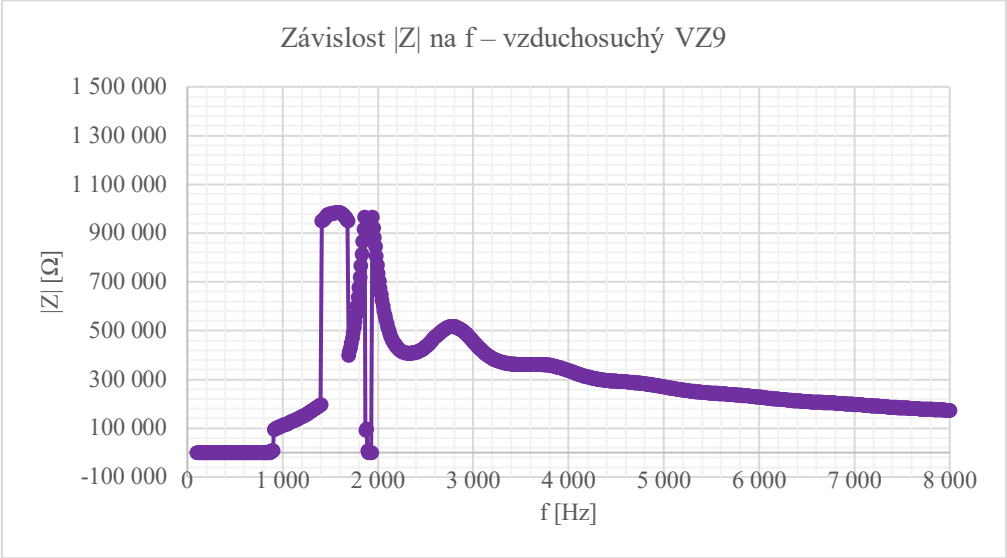
SATUROVANÝ

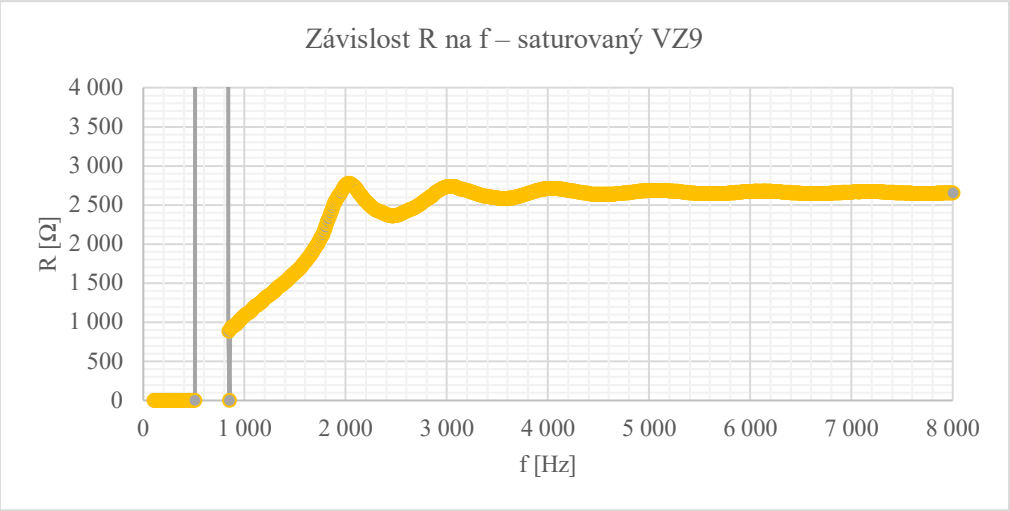
f [Hz]	R_x [Ω]	X_x [Ω]	|Z| [Ω]	φ [-]	ρ [Ω·m]	Y [S]	σ [S·m⁻¹]
100	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
110	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
120	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
130	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
140	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
150	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
160	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
170	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
180	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
190	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
200	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
210	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
220	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
230	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
240	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
250	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
260	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
270	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
280	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043
290	8.3	0	8	0.000	0.111	1.20E-01	9.043

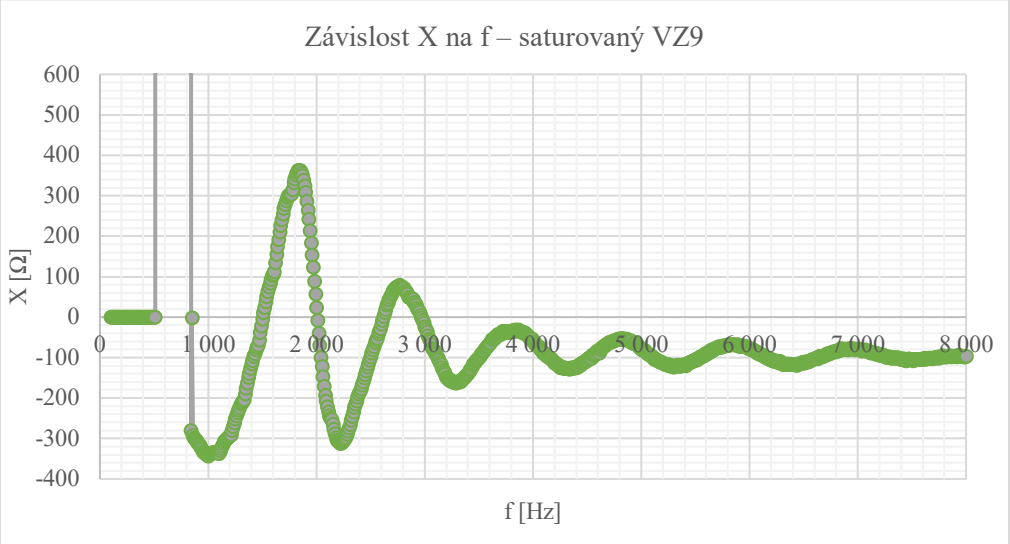
Byla vynesena závislost f = f(R) měřené frekvence f na rezistanci R, a na reaktanci X f = f(X). Tyto grafy byly sestrojeny pro data z měření označená jako vzuchosuchý a pro stav označený jako starurovaný vzorek. Z grafů byla následně zjištěna frekvence f_M, která odpovídá hodnotě elektrické impedance **Z,** při níž je hodnota rezistance R nejvyšší a zároveň hodnota reaktance X nejnižší.

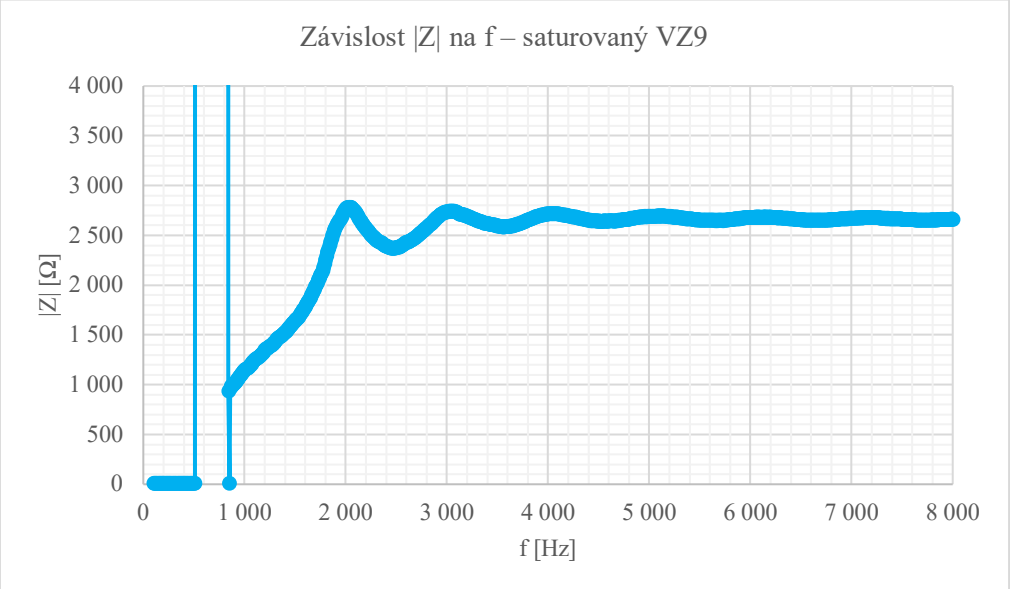

Závislost R na f – vzduchosuchý VZ9
R [Ω]
900 000
800 000
700 000
600 000
500 000
400 000
300 000
200 000
100 000
0
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]


Závislost X na f – vzduchosuchý VZ9
X [Ω]
0
-200 000
-400 000
-600 000
-800 000
-1 000 000
-1 200 000
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]

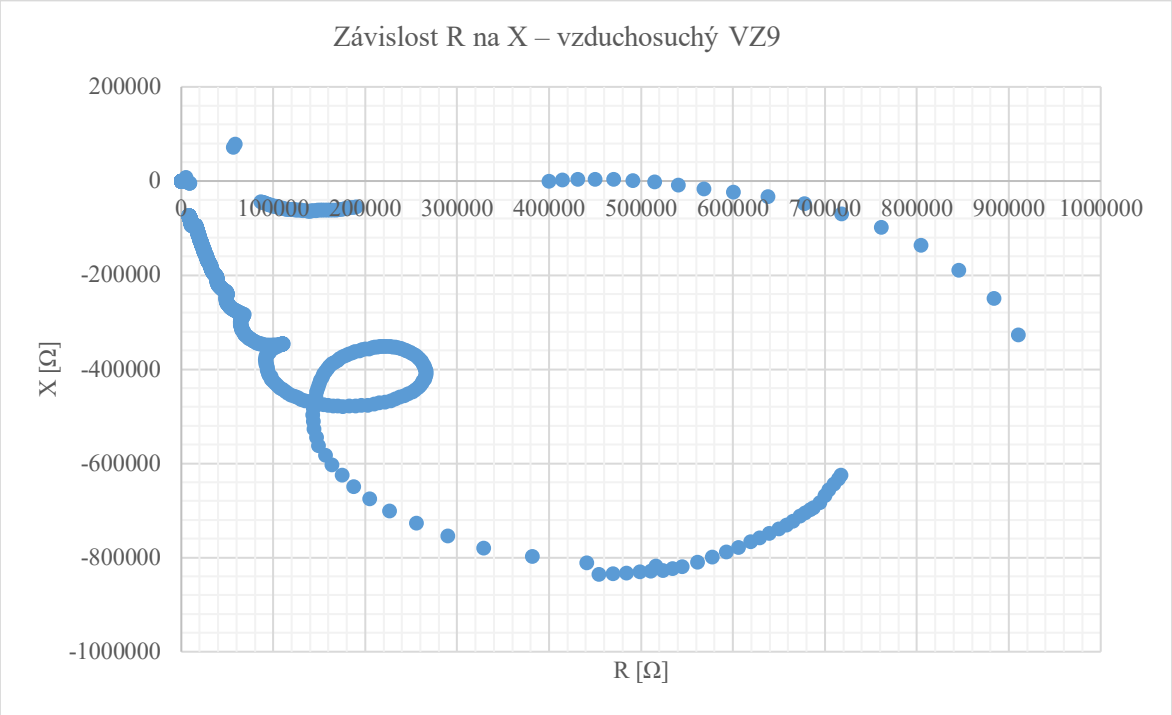

Závislost |Z| na f – vzduchosuchý VZ9
|Z| [Ω]
1 500 000
1 300 000
1 100 000
900 000
700 000
500 000
300 000
100 000
-100 000
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]

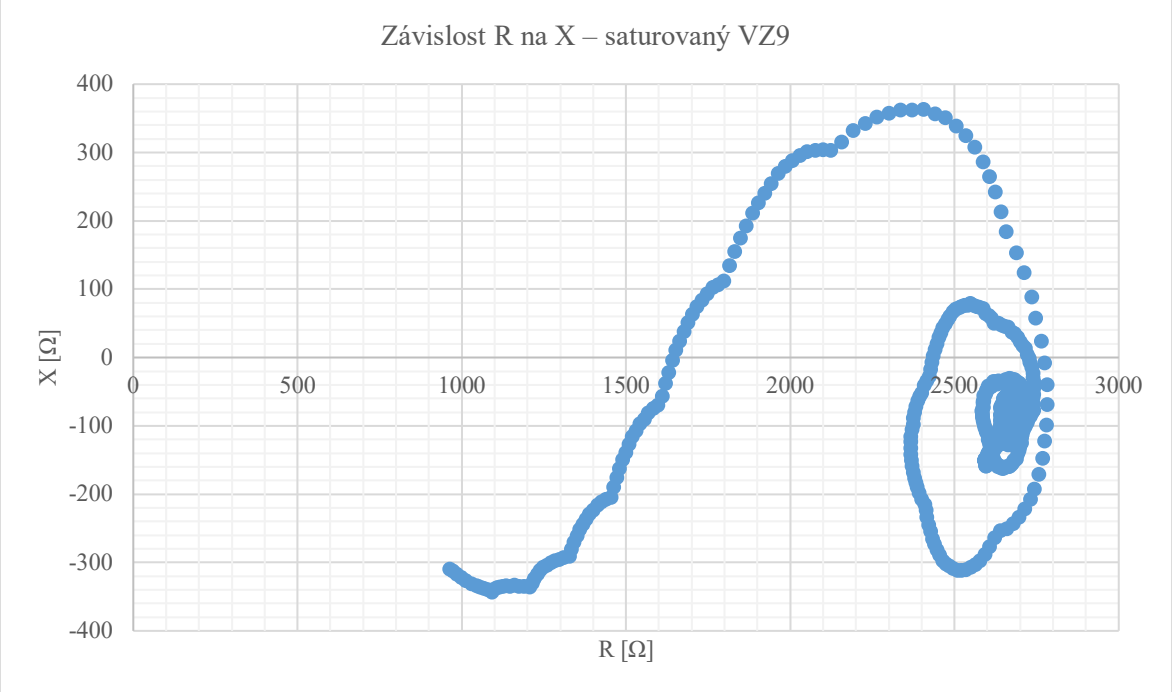

Závislost R na f – saturovaný VZ9
R [Ω]
4 000
3 500
3 000
2 500
2 000
1 500
1 000
500
0
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]


Závislost X na f – saturovaný VZ9
X [Ω]
600
500
400
300
200
100
0
-100
-200
-300
-400
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]


Závislost |Z| na f – saturovaný VZ9
|Z| [Ω]
4 000
3 500
3 000
2 500
2 000
1 500
1 000
500
0
0
1 000
2 000
3 000
4 000
5 000
6 000
7 000
8 000
f [Hz]

Vhodná měřicí frekvence f_M pro daný vzorek zeminy byla ověřena sestrojením tzv. Nyquistových grafů -Im (Z)= f (Re (Z)) představujících negativní (zemina je kapacitního charakteru) imaginární versus reálné složky měřené elektrické impedance.





Tabulka: Měřené charakteristiky všech měřených vzorků

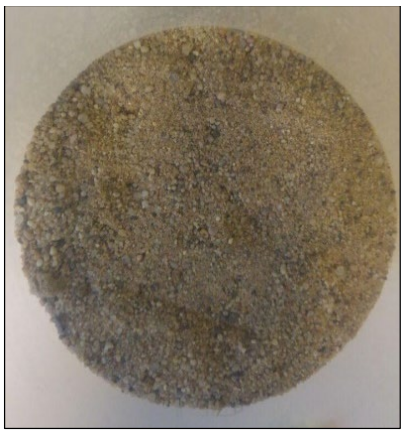
VZ1	homogenní hrubozrný písek		
	d_{ef}	2,50	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,3406	kg
	teplota vzorek	11,30	°C
	vlhkost vzorek	11,4	%
saturovaný	hmotnost	0,4942	kg
	teplota vzorek	25,6	°C
	vlhkost vzorek	45	%
EIS měření	f_{sat}	2080	Hz
	f_{su}	2600	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2070	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1640	Ω

Vzorek 1znew	homogenní hrubozrný písek		
	d_{ef}	2,00	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,6915	kg
	teplota vzorek	25,8	°C
	vlhkost vzorek	11,4	%
saturovaný	hmotnost	0,8094	kg
	teplota vzorek	25,6	°C
	vlhkost vzorek	44	%
EIS měření	f_{sat}	2080	Hz
	f_{su}	1400	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2210	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1680	Ω

VZ2	homogenní vzorek		
	d_{ef}	1,20	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,5760	kg
	teplota vzorek	25,5	°C
	vlhkost vzorek	12,50	%
saturovaný	hmotnost	0,6900	kg
	teplota vzorek	26	°C
	vlhkost vzorek	47	%
EIS měření	f_{sat}	2060	Hz
	f_{su}	1400	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2120	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1670	Ω

VZ3	jemný písek z Belgie		
	d_{ef}	0,30	**mm**
	teplota vzduch	25,7	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,6387	kg
	teplota vzorek	25,2	°C
	vlhkost vzorek	14,40	%
saturovaný	hmotnost	0,7559	kg
	teplota vzorek	25,3	°C
	vlhkost vzorek	64,3	%
EIS měření	f_{sat}	2100	Hz
	f_{su}	2700	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2070	Ω
	$\|Z\|_{su}$	2830	Ω

VZ4	nehomogenní vzorek		
	d_{ef}	0,50	**mm**
	teplota vzduch	25,7	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,7750	kg
	teplota vzorek	25,2	°C
	vlhkost vzorek	16,40	%
saturovaný	hmotnost	0,8884	kg
	teplota vzorek	25,4	°C
	vlhkost vzorek	48,1	%
EIS měření	f_{sat}	2100	Hz
	f_{su}	1900	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2060	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1910	Ω



VZ6	homogenní vzorek		
	d_{ef}	0,30	**mm**
	teplota vzduch	25,7	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,7082	kg
	teplota vzorek	25,8	°C
	vlhkost vzorek	13,90	%
saturovaný	hmotnost	0,8160	kg
	teplota vzorek	25,7	°C
	vlhkost vzorek	50,4	%
EIS měření	f_{sat}	2150	Hz
	f_{su}	1400	Hz
	$\|Z\|_{M}$	2210	Ω
	$\|Z\|_{S}$	1660	Ω

VZ7	homogenní vzorek		
	d_{ef}	4,40	**mm**
	teplota vzduch	25,7	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,7272	kg
	teplota vzorek	25,7	°C
	vlhkost vzorek	11,4	%
saturovaný	hmotnost	0,8717	kg
	teplota vzorek	25,6	°C
	vlhkost vzorek	41	%
EIS měření	f_{sat}	2100	Hz
	f_{su}	1400	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2130	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1660	Ω

VZ8	homogenní vzorek		
	d_{ef}	0,63	**mm**
	teplota vzduch	25,7	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,7292	kg
	teplota vzorek	25,8	°C
	vlhkost vzorek	12,20	%
saturovaný	hmotnost	0,8662	kg
	teplota vzorek	25,7	°C
	vlhkost vzorek	44,9	%
EIS měření	f_M	2000	Hz
	f_S	1400	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2050	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1670	Ω

VZ9	nehomogenní písek		
	d_{ef}	1,10	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,7265	kg
	teplota vzorek	25,9	°C
	vlhkost vzorek	13,90	%
saturovaný	hmotnost	0,6381	kg
	teplota vzorek	25,3	°C
	vlhkost vzorek	47,8	%
EIS měření	f_{sat}	2100	Hz
	f_{su}	1500	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2090	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1660	Ω

VZ10	písčitý stejnozrnný, špatně zrněný		
	d_{ef}	1,10	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,6748	kg
	teplota vzorek	26	°C
	vlhkost vzorek	11,90	%
saturovaný	hmotnost	0,8222	kg
	teplota vzorek	25,8	°C
	vlhkost vzorek	53,2	%
EIS měření	f_{sat}	2100	Hz
	f_{su}	2700	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2070	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1630	Ω

VZ11	GEM 80/20		
	d_{ef}	0,0043	**mm**
	teplota vzduch	25,8	°C
vzduchosuchý	hmotnost	0,5623	kg
	teplota vzorek	25,9	°C
	vlhkost vzorek	16,80	%
saturovaný	hmotnost	0,6291	kg
	teplota vzorek	25,8	°C
	vlhkost vzorek	54,5	%
EIS měření	f_{sat}	2100	Hz
	f_{su}	1900	Hz
	$\|Z\|_{sat}$	2070	Ω
	$\|Z\|_{su}$	1600	Ω