VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

PROBLEMATIKA INFILTRACE VODY DO ZEMINY SLEDOVANÁ METODOU EIS

THE ISSUE OF WATER INFILTRATION INTO THE SOIL MONITORED BY THE EIS METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Dominik Bartoněk

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. JANA PAŘÍLKOVÁ, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2021

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	Dominik Bartoněk
Název	Problematika infiltrace vody do zeminy sledovaná metodou EIS
Vedoucí práce	doc. Ing. Jana Pařílková, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

BEAR, J. (1992). Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier.
BEAR, J., VERRUIJT, A. (1994). Modelling groundwater flow and pollution, Kluwer.
DUCHAN, D., ŘÍHA, J., ZACHOVAL, Z. (2014): Hydraulické aspekty infiltrace dešťových vod. Hydraulika vsakování dešťových vod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. ISBN 978-80-214-5017-2.
GRUNTORÁD, J. (1985). Principy metod užité geofyziky. Praha: SNTL, Bratislava: Alfa, 190 s.
HOKR, M., (2005). Transportní procesy. Učební text. Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Technická univerzita v Liberci.
KAMENÍČKOVÁ, I., (2006). Pedologie – modul 01. studijní opory VUT v Brně, FAST.
KUTÍLEK, M., KURÁŽ, V., CÍSLEROVÁ, M. (2010): Hydropedologie. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 8001022374.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rešerše podkladů k problematice infiltrace dešťových vod.
Rešerše metod monitorování infiltrace vody do zeminy užívaných v polních podmínkách.
Koncepce a realizace měření na lokalitách Útěchov, Kanice se zřetelem na metodu elektrické impedanční spektrometrie (EIS).
Průběh měření a jeho dokumentace; výsledky měření, jejich zpracování a vyhodnocení, závěry.
Předpokládaný rozsah práce do 80 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 problematiku infiltrace vody do zemin a seznámení se s metodami a postupy monitorování procesu infiltrace v polních podmínkách, včetně posouzení vhodnosti metody elektrické impedanční spektrometrie pro sledovanou problematiku. Infiltrační schopnosti zemin se podílejí na formování krajiny vzhledem k její odolnosti vůči extrémním hydrologickým situacím (povodně, sucho). Infiltrace je proces, při kterém se v určitém čase a určitou rychlostí vsakuje voda ze zemského povrchu do hloubky zemin. Proces infiltrace vychází z poměrů na lokalitě a je ovlivněn přírodními vlivy i lidskou činností.
Měření bylo provedeno na dvou vybraných lokalitách Školního lesního podniku, který je organizační součástí Mendelovy university v Brně, účelovým zařízením především její Lesnické a dřevařské fakulty. Koncepce a realizace měření infiltrace dešťových srážek do zeminy byla řešena v trvalém lesním porostu nacházejícím se v katastru obcí Útěchov a Kanice. Obě lokality se liší strukturou lesního porostu (druhovou, věkovou, prostorovou), a proto bylo provedeno porovnání naměřených dat. V případě metody elektrické impedanční spektrometrie a použité měřicí aparatury se jedná o pilotní práce vedoucí k získání poznatků, jací činitelé mohou mít na infiltraci vody do zeminy vliv a zda je vhodné v uvedeném prostředí metodu a měřicí aparaturu aplikovat.

KLÍČOVÁ SLOVA
Infiltrace vody, zemina, elektrická impedanční spektrometrie.

ABSTRACT
The bachelor thesis is focused on the issue of water infiltration into soils and acquaintance with methods and procedures for monitoring the infiltration process in field conditions, including the assessment of the suitability of the method of electrical impedance spectrometry for the monitored issues. Infiltration ability of soil are involved in the formation of the landscape due to its resistance to extreme hydrological situations (floods, drought). Infiltration is process in which at exact time and at the certain rate is water absorbed from the earth´s surface into depth of the soil. Infiltration process is based on locality conditions and influenced by natural influences and by human activities.
The measurement was performed at two selected localities of the School Forest Enterprise, which is an organizational part of Mendel University in Brno, in particular, of its Faculty of Forestry and Wood Technology. The conception and realization of measuring of rain water infiltration into soil was performed in permanent forest stands located in the cadastre of the municipalities of Útěchov and Kanice. Both localities differ in the structure of the forest stands (species, age, spatial), and therefore the comparison of measured data was performed. In the case of the electrical impedance spectrometry method and the used measuring apparatus, this is a pilot work leading to the acquisition of knowledge, which factors can have a significant impact on soil infiltration and whether it is appropriate to apply the method and the measuring apparatus in this environment.

KEYWORDS
Water infiltration, soil, electrical impedance spectrometry.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

BARTONĚK, Dominik. *Problematika infiltrace vody do zeminy sledovaná metodou EIS.* Brno, 2021. 63 s., 8 s. příl. 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 *Problematika infiltrace vody do zeminy sledovaná metodou EIS,* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2021

Dominik Bartoněk

autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Problematika infiltrace vody do zeminy sledovaná metodou EIS* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2021

Dominik Bartoněk

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval své vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Janě Pařílkové, CSc. za odborné vedení při zpracování práce, poskytnutí potřebných materiálů k vypracování práce, informací vztahujících se k problematice infiltrace vody do zeminy a metodě elektrické impedanční spektrometrie a manipulace s přístrojem Z-metr IV. Chtěl bych také poděkovat za její trpělivost a pomoc při zpracování práce. Dále za odbornou pomoc, poskytnuté rady, materiály, a především data z měření bych chtěl poděkovat Ing. Davidu Juřičkovi, Ph.D. z Ústavu geologie a pedologie Lesnické a dřevařské fakulty Mendelovy univerzity v Brně, jehož projektem je výzkum na lokalitě prováděn. Panu Luboši Pařílkovi bych rád poděkoval za odborné konzultace ohledně instalace měřicích trubic s elektrodami.

Svým rodičům děkuji za podporu a vytvoření stabilního zázemí po celou dobu mého studia.

OBSAH

1 ÚVOD 3

1.1 Cíl Práce 4

1.2 Metodika práce 4

2 STRUČNÝ ÚVOD DO ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY 6

2.1 Voda v zemině 6

2.2 Zemina 13
2.2.1 Základní fyzikální vlastnosti zemin 14

2.3 Infiltrace 18
2.3.1 Metody měření infiltrace 20

2.4 Elektrická impedanční spektrometrie 21
2.4.1 Elektrická impedance *Z* 21
2.4.2 Měřicí přístroje a přípravky použité pro kalibraci 22
2.4.3 Měření metodou EIS 24

3 ZÁKLADNÍ INFORMACE O MĚŘENÝCH LOKALITÁCH 27

3.1 Lokalita Útěchov 28
3.1.1 Územní informace obce Útěchov 28
3.1.2 Geologická a geomorfologická charakteristika 28
3.1.3 Hydrologické údaje 28
3.1.4 Měřená lokalita Útěchov 29

3.2 Lokalita Kanice 31
3.2.1 Územní informace obce Kanice 31
3.2.2 Geologická a geomorfologická charakteristika 31
3.2.3 Hydrologické údaje 31
3.2.4 Měřená lokalita Kanice 32

4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ 34

4.1 Závislost elektrické impedance zeminy na vertikálních atmosférických srážkách 36

4.2 Závislost elektrické impedance zeminy na vertikálních atmosférických srážkách 39

4.3 Závislost elektrické impedance zeminy na vertikální atmosférické srážce srovnatelné intenzity 45

4.4 Závislost elektrické impedance a teplot zeminy na vertikálních atmosférických srážkách a teplotách měřených ČHMÚ 49

5 ZÁVĚR 51

6 POUŽITÁ LITERATURA 53

7 POUŽITÉ INTERNETOVÉ ZDROJE 56

SEZNAM TABULEK 58

SEZNAM OBRÁZKŮ 59

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 61

SEZNAM PŘÍLOH 63

1 ÚVOD

Retence a akumulace vody v suchozemských ekosystémech a v krajině je jednou z velmi významných funkcí zeminy. Schopnost zeminy zadržovat vodu určuje celá řada faktorů prostředí, z nichž mezi nejdůležitější patří zrnitost, struktura zeminy, hloubka půdního profilu a vlastnosti podpovrchových půdních, resp. zemních horizontů [1].

Vzhledem ke stále častějším problémům s nedostatkem vody je její zadržování v krajině velmi důležité a celosvětově aktuální. Je-li zemina v dobrém stavu [I] zadrží hodně vody, a tím účinně reguluje její odtok z krajiny. Není-li zemina v dobrém stavu [28], mohou dlouho trvající srážky při regionálních deštích, a zvláště pak přívalové deště být velmi nebezpečné, neboť během povodní může dojít nejen k újmě na majetku, ale i ke ztrátám na lidských životech. Důsledkem malé infiltrační schopnosti zeminy je nadměrný povrchový odtok s jeho dopady na zrychlení eroze a zvýšené riziko povodní. Dochází například ke splachu orné půdy (Obr. 1-1 vlevo), jehož důsledkem může být ucpávání kanalizací, může docházet k sesuvům zeminy (Obr. 1-1 vpravo), jejímu odnosu koryty vodních toků za zvýšených vodních stavů a jejich zanášení při snížení kinetické energie vodního toku.

Obr. 1-1: Splach orné půdy (vlevo) [A], sesuv zeminy (vpravo) [B]

Na druhé straně při špatném složení zeminy a nedostatku atmosférických srážek může působit problémy sucho. Sucho je deficit vody v zemině, který nastává, když půdní vlhkost nestačí pokrýt požadavky půdní potenciální evapotranspirace (celkový výpar) [18].

Jednotná kritéria pro kvantitativní vymezení sucha neexistují, a to zvláště s ohledem na rozmanitá hlediska meteorologická, bioklimatologická, hydrologická, zemědělská, pedologická a celou řadu dalších faktorů. Definice sucha tedy není zdaleka jednotná. Lze ho charakterizovat dle příčin a projevů, kdy se rozeznává např. sucho klimatické, půdní a hydrologické či dopadů, kdy se jedná např. o sucho zemědělské, socioekonomické apod. [F].

Obecně je možné rozlišit tři skupiny sucha, a to stálé sucho spojené s aridními podnebími; sezónní sucho, které se vyskytuje v podobě zřetelných každoročních období suchého počasí a sucho nahodilé způsobené proměnlivostí atmosférických srážek [18] [G].
Sucho způsobuje velké škody v zemědělství (neúrodu, finanční škody zemědělcům, státu). Jeho důsledkem jsou na mnoha územích ve světě hladomory a nedostatek pitné vody. Hydrologické charakteristiky obou uvedených klimatických jevů a jejich předpovědi jsou nepostradatelnou informací i pro oblast vodního hospodářství, kde se zachycení vody v krajině podílí na její ekonomické, kulturně-sportovní i estetické funkci.
Infiltrace vody do zeminy patří k elementárním hydrologickým procesům a je součástí koloběhu vody na Zemi [2]. Základními hydrologickými faktory, které proces infiltrace vody do zeminy ovlivňují, jsou intenzita a délka trvání atmosférických srážek; z faktorů půdních se jedná především o zrnitost, obsah organické hmoty, pórovitost, strukturu a vlhkost zeminy.
Transport vody z dešťových srážek od zemského povrchu k hladině podzemní vody je velmi složitý proces. Probíhá v třísložkovém prostředí, kde pevná složka je zastoupena zrny zeminy, kapalnou složku nejčastěji reprezentuje voda a plynnou složku vzduch. Specifikace zemního prostředí je vzhledem k jeho heterogenitě velmi náročná. Měřením rychlosti umělé infiltrace vody do zeminy v polních podmínkách, které zaujímá velmi významné místo při jejím popisu, je možné stanovit např. její hydraulickou vodivost.

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem bakalářské práce s názvem „Problematika infiltrace vody do zeminy sledovaná metodou EIS“ je seznámit se s problematikou infiltrace dešťových vod do zeminy, s metodami monitorování infiltrace vody do zeminy užívanými v polních podmínkách se zaměřením na metodu elektrické impedanční spektrometrie (EIS), jejíž aplikace na sledovanou problematiku je nová.
Součástí práce je vyhodnocení dat měření infiltrace dešťových srážek do zeminy na dvou vybraných lokalitách, a to v lesních porostech u obcí Útěchov a Kanice. Data jsou sbírána aparaturou s přístrojem Z-metr IV, jenž využívá pro měření infiltrace vody do zeminy metodu EIS.

1.2 METODIKA PRÁCE

Pro dosažení cíle své bakalářské práce jsem zvolil následující činnosti:

- seznámit se s problematikou infiltrace vody do zeminy a v teoretické části práce ji stručně popsat,
- provést rešerši a stručně shrnout informace o monitorování procesu infiltrace, resp. metodách a postupech měření vsaku vody do zemin v polních podmínkách,
- seznámit se s principem měření elektrické impedance a metodou EIS,

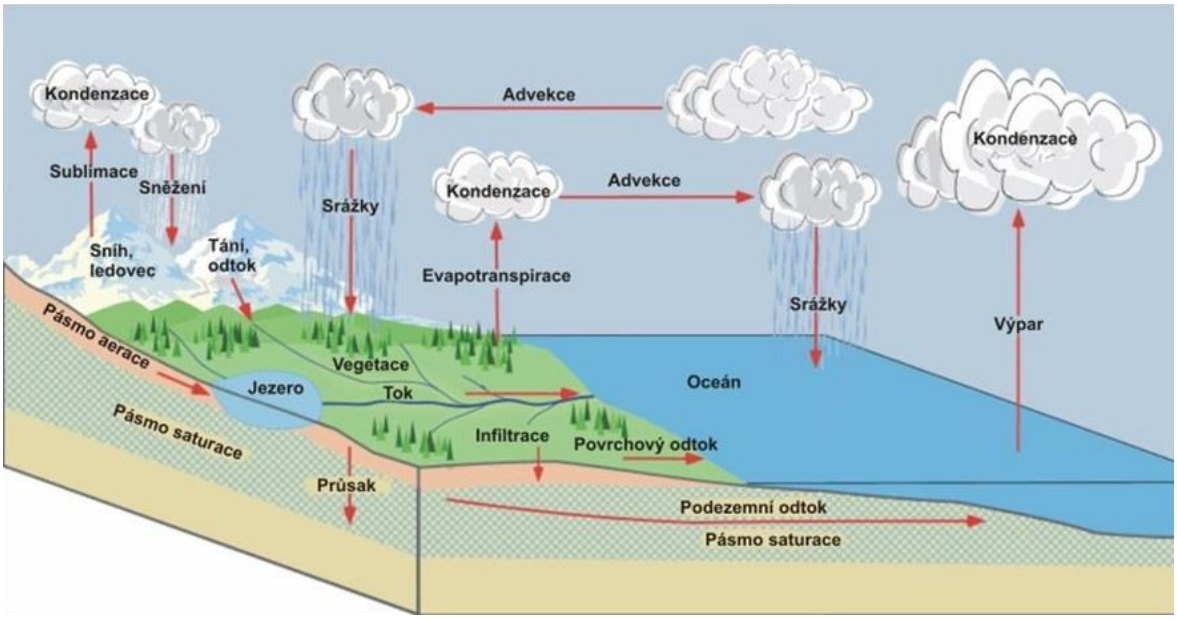
- naučit se pracovat s měřicí aparaturou s přístrojem Z-metr IV,
- provést kalibraci měřicího přístroje při frekvenci 8 kHz,
- provést měření, resp. sběr dat z automatických stanic umístěných v lokalitách Útěchov a Kanice,
- provést jejich zpracování v rozsahu vyplývajícím z možností zpracování bakalářské práce,
- posoudit odlišnost obou lokalit z hlediska infiltrace vody do zeminy.

2 STRUČNÝ ÚVOD DO ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Kapitola na základě mých dosavadních znalostí nabytých při studiu a na základě provedených rešerší ke studované problematice stručně uvádí a vymezuje základní pojmy, s nimiž jsem v bakalářské práci pracoval.

2.1 VODA V ZEMINĚ

Voda je nejrozšířenější látkou na Zemi současně považovanou za základní složku životního prostředí [3]. V oceánech a mořích je obsaženo téměř 97,25 % veškerého množství vody vyskytující se na Zemi, ledovce tvoří 2,05 %, podzemní vody obsahují 0,68 %, v jezerech je obsaženo 0,01 %, půdní vlhkost tvoří 0,005 %, atmosféra obsahuje 0,001 %, pouze 0,0001 % je obsaženo v tocích a 0,000004 % veškeré vody na zemi obsahuje biosféra [H]. Vlivem působení sluneční energie, zemské gravitace a rotace Země nastává oběh vody v přírodě (hydrologický cyklus), který je součástí klimatického systému Země. K výparu vody do atmosféry dochází z povrchů rostlin (transpirací) a evaporací ze zemského povrchu a také z vodní hladiny (oceány, moře, vodní toky a nádrže). V atmosféře je voda ve formě vodních par a drobných kapek přenášena neustále na jiná místa vlivem proudění vzdušné hmoty způsobeného nestejným zahříváním vzduchu nad pevninou a oceány a zemskou rotací. Za příznivých podmínek voda může kondenzovat do formy atmosférických srážek (déšť, sníh) na povrch Země. Srážková voda dopadající na zemský povrch částečně odtéká po povrchu (povrchový odtok) do povrchových toků a částečně vsakuje (infiltruje) do zeminy, kde se stává součástí podpovrchového proudění vody. Podpovrchové hydrologické procesy jsou velmi důležité, neboť vlastnosti podzemních materiálů ovlivňují velikost infiltrace, řídící tvorbu povrchového odtoku [4].



Obr. 2-1: Oběh vody (hydrologický cyklus) [C]

I když se voda v přírodě zdá čistá, tak je přesto znečištěna směsí plynů a organických i anorganických látek. Složení přírodních vod je ovlivněno mnoha faktory, mezi ně se řadí rozpustnost tuhých látek a plynů, výměna iontů mezi tuhou a kapalnou fází, a v neposlední řadě biochemické a oxidačně redukční procesy. Z hlediska fyzikálního mohou být ve vodě přítomny látky v roztocích jako neelektrolyty (neiontově rozpuštěné látky) nedisociující po rozpuštění a neprodukující iontové formy, tedy jsou elektricky nevodivé. A dále jako elektrolyty (iontově rozpuštěné látky) tj. elektricky vodivé. Z hlediska chemického se látky nacházející se ve vodě dělí na organické a anorganické [3].

Vzhledem k přítomnosti kationtů a aniontů, uvolňujících se v průběhu disociace solí, kyselin a zásad má voda schopnost vést elektrický proud. Konduktivita (měrná elektrická vodivost) vody je základní aditivní vlastností roztoků elektrolytů. Stanovení konduktivity bývá běžnou součástí chemického rozboru vody. Umožňuje bezprostřední odhad koncentrace iontově rozpuštěných látek a celkové mineralizace ve vodách [3].

Povrchová voda je voda z atmosférických srážek, která je odváděna z povrchu terénu, tj. ze všech vodních povrchových zdrojů (potoky, řeky, rybníky, jezera, vodní nádrže, moře, oceány) nebo staveb [23].

Povrchovou vodu lze charakterizovat podle různých hledisek. Jedním z parametrů dělení je, zda se voda pohybuje či ne. Dle tohoto hlediska se dělí na:

- vodu stojatou,
- vodu tekoucí.

Druhým parametrem je oblast, kde se voda nachází:

- voda v nádržích uměle vytvořených (kanály, nádrže, rybníky, průplavy, …),
- voda v přírodních nádržích (jezera, potoky, tůně, …).

Podle salinity se rozlišuje voda:

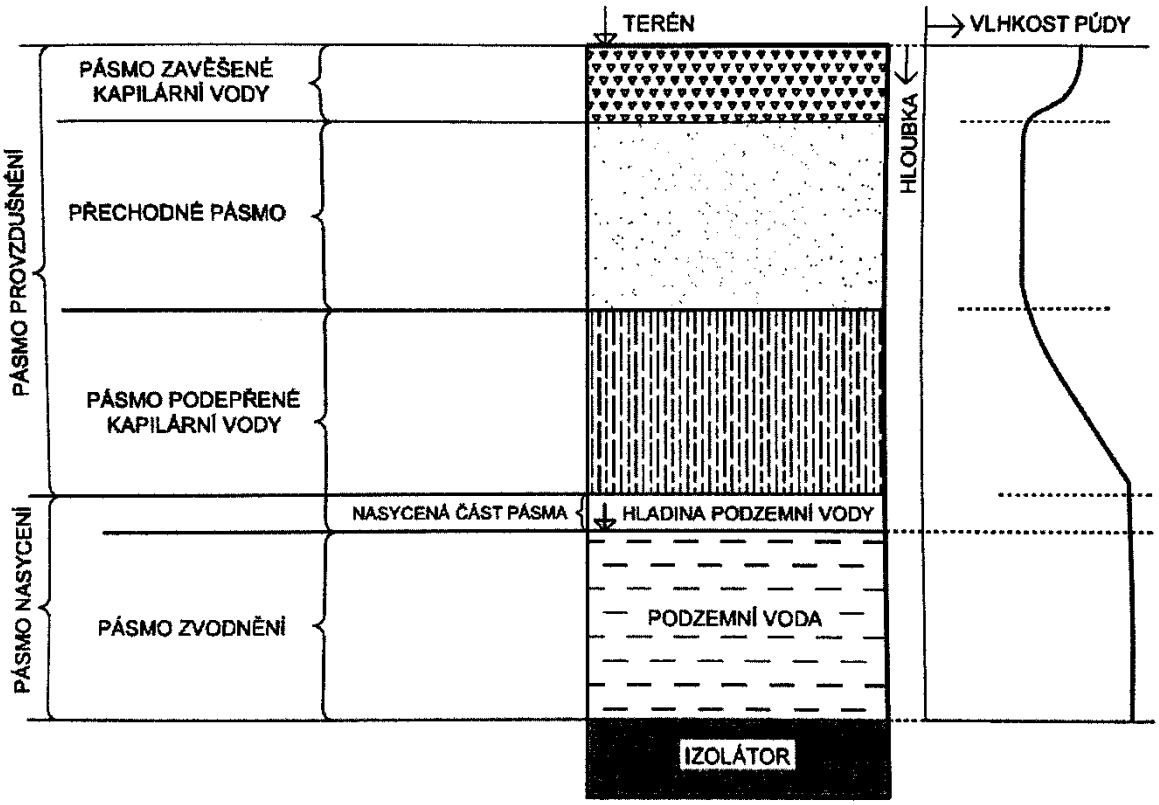
- slaná voda (moře a oceány),
- sladká voda (potoky, řeky, rybníky, nádrže),
- voda brakická.

Voda je dělena i dle požadavků na její kvalitu dle Zákona č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví [27]:

- pitná,
- užitková,
- odpadní.

Pojmem podpovrchová voda, se označuje veškerá voda nacházející se pod zemským povrchem, a to ve všech skupenstvích. Dle §2 odst. (2) Zákona 254/2001 Sb. o vodách se podzemními vodami rozumí vody přirozeně se vyskytující pod zemským povrchem v pásmu nasycení v přímém styku s horninami [15].

Podpovrchová voda tvoří významnou součást hydrologického cyklu (Obr. 2-1). Dle relativního vyplnění skulin, puklin a pórů vodou je podpovrchová voda dělena do dvou pásem (Obr. 2-2). Podle toho, zda jsou všechny póry zcela vyplněny vodou či nikoliv se rozlišuje pásmo nasycení (nasycená část a zvodnělá část) a pásmo provzdušnění (pásmo podepřené kapilární vody, přechodné pásmo a pásmo zavěšené kapilární vody). Pásmo nasycení je ohraničeno shora volnou hladinou podzemní vody, nebo nepropustnou vrstvou. Obecně ale netvoří hranici mezi nasycenou a nenasycenou zónou hladina podzemní vody. Nad hladinou podzemní vody je pásmo provzdušnění, jehož výška závisí na vlastnostech zeminy, především na velikosti zrna zeminy [15].



Obr. 2-2: Schématické rozdělení podpovrchových vod ve vertikálním řezu zeminou [23]

Voda vyskytující se v zemině [6] má rozhodující vliv nejen při navrhování základových konstrukcí staveb, ale i zemních těles.

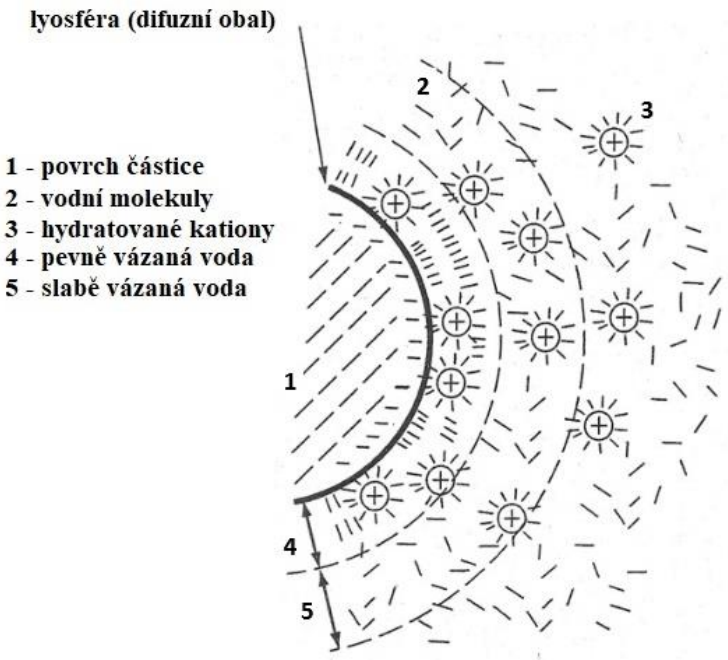
Voda se v zemině vyskytuje v různých vazbách a různém složení [21] jako:

- gravitační voda – podléhá síle zemské přitažlivosti a lze ji dělit na:
  - volnou – vyplňuje objem pórů v zeminách,

- kapilární – vlivem povrchového napětí voda vzlíná v pórech nad hladinou podzemní vody do tzv. kapilární výšky h_k. V kapilární vodě je relativní podtlak $\gamma_w h_k$. Výška výstupu kapilární vody je nepřímo úměrná velikosti pórů. Zatímco u jílovitých zemin to mohou být metry, u písčitých centimetry [6];

– vázaná voda – molekuly vody jsou poutány k povrchům zrn minerálů (Obr. 2-3) elektrochemickými a elektromolekulárními silami. Podle intenzity vazby na minerální povrch lze vodu charakterizovat jako:
  - pevně vázanou vodu (adsorbovanou) (Obr. 2-3) – voda se chová jako pevná součást minerálních zrn. Pevně vázanou vodu je možno odstranit ohřevem při teplotě 150 °C-300 °C,
  - slabě vázanou vodu (obalovou, osmotickou) – vazba vody na zrna zeminy je slabá, ze zeminy ji lze odstranit i mechanicky (stlačením);
– strukturální voda – je součástí minerálů a dělí se na:
  - chemicky vázanou – je součástí krystalické mřížky v podobě H^+ a OH^- iontů. Odstraní se při ohřevu nad 200 °C, čímž se změní chemické složení a minerál se rozpadá,
  - krystalickou – také součástí krystalické mřížky, ale zachovává si molekulární formu, při ohřevu nad 60 °C se odstraní. Minerály se změní na bezvodé formy (např. sádrovec);
– vodní pára – v pórech nenasycených zemin, pohybuje se z míst teplejších do míst chladnějších, z míst s vyšší vlhkostí do míst s nižší vlhkostí;
– led – při záporných teplotách se voda v zemině mění na led. Nejprve zamrzá voda volná, pak voda kapilární a dále voda slabě vázaná. Voda pevně vázaná v našich klimatických podmínkách nezamrzá. U nesoudržných zemin při změně vody na led dojde ke zvýšení objemu až o 9 %, zamrzají stejnoměrně. V soudržných zeminách proběhne zamrzání nestejnoměrně. Při oteplení led taje postupně od povrchu, ale voda se přes hlubší zamrzlé vrstvy nevsákne, proto zemina zvlhne a ztrácí tak pevnost a tím i únosnost. Objekty je tedy vhodné zakládat v nezámrzné hloubce [6].

Za obsah vody v zemině se dle ČSN CEN ISO/TS 17892-1 považuje množství vody, které je možné odstranit vysušováním zeminy při teplotě 105 °C ±5 °C do stálé hmotnosti. Kvantitativně lze množství vody v zeminách odvodit pomocí hmotnostní vlhkosti w, objemové vlhkosti Θ nebo stupně nasycení S_r [6].
Zdrojem vody v zeminách je průsak povrchové vody, vzlínání vody od hladiny podzemní vody, srážení vodních par na rozhraní zemina – vzduch, molekuly vody vzniklé sloučením uvolněného vodíku a kyslíku při tuhnutí žhavé hmoty uvnitř zemské kůry (juvenilní voda) a hygroskopické pohlcování vodních par.



Obr. 2-3: Difuzní obal minerálních povrchů [6]

Výskyt podzemní vody je vázán na zeminy (štěrkopísky, štěrky, pískovce, slepence, aj.), které mají schopnost vodu nejen pojmout, ale i dále předávat. Aby toho byly schopny, musí obsahovat póry a pukliny větší než kapilární. V zeminách s malými póry jako jsou např. jíly, se nachází kapilární voda a půdní vláha.

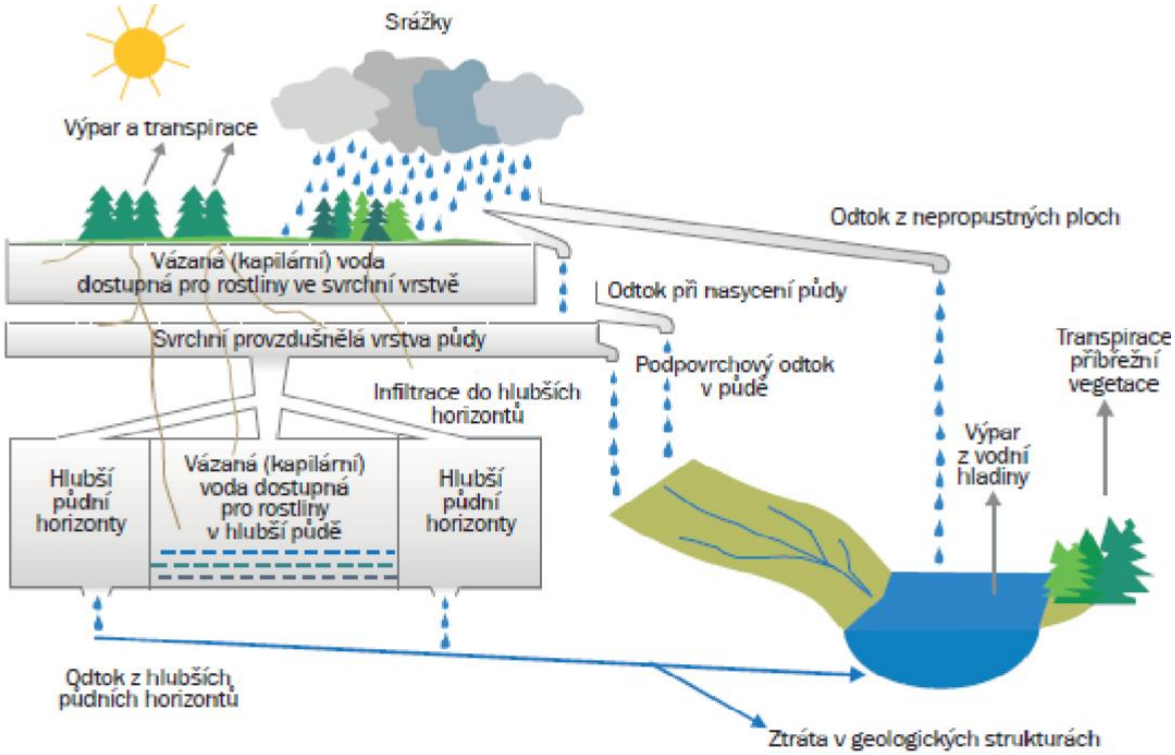
Porézní prostředí zeminy umožňuje proudění vody v ní [2]. Prostor, v němž se voda může pohybovat, je omezený a maximálně odpovídá objemu pórů. Tvar a rozložení pórů, včetně jejich případného propojení, má v zemině náhodný charakter. Pro stanovení propustnosti zeminy z makroskopického hlediska jsou důležité některé její charakteristiky, které ovlivňují proudění vody póry. Vzhledem k tomu, že póry v zemině tvoří velmi složitou soustavu navzájem spojených dutinek proměnlivé velikosti (délka, průměr, křivolakost atd.), musí být tyto charakteristiky definovány statisticky, tj. tak, aby odpovídaly většímu objemu zeminy [22]. Znalost rychlosti proudění vody v zemině má význam nejen ve stavebnictví, ale i pro zemědělství či ochranu životního prostředí. Snižování propustnosti zemin, a především půdy pro vodu vede ke zvyšování povrchového odtoku srážkové vody a erozním jevům, kdy např. smyv půdy vodou může způsobovat degradaci půdy na svažitých pozemcích.

Proudění vody v zemině lze studovat z mikroskopického či z makroskopického hlediska (stavebnictví a vodní hospodářství). Uvažuje-li se v zemině určitý průtočný průřez, bude se v jeho bodech podle rozložení pórů a v závislosti na jejich velikosti měnit nejen rychlost proudění vody, ale i směr.

Proudění vody v zemině je způsobeno rozdílem potenciální energie a děje se z míst s vyšší potenciální energií do míst s nižší potenciální energií. Potenciální energie vody v zemině je označována jako celkový potenciál, jehož hlavní složky jsou tlakový (složený

z vlhkostního, pneumatického a zátěžového potenciálu), gravitační a osmotický potenciál. Gravitační a tlakový potenciál jsou rozhodující pro proudění vody ve všech zeminách [24] [R]. Osmotický potenciál se uplatňuje zejména v jílovitých zeminách, což je dáno menší velikostí jejich pórů [25].

Transport vody z dešťových srážek od povrchu zeminy k hladině podzemní vody je velmi složitý proces, který je vedle kvality transportované vody ovlivněn geologií prostředí, do něhož se voda vsakuje a kterým proudí (Obr. 2-4).



Obr. 2-4: Schéma srážkoodtokového procesu v modelu SACRAMENTO (ČHMÚ, 2012)

Základní vlastností zeminy, která ovlivňuje prosakující množství vody je její propustnost [6]. Propustnost je v nasycené zóně specifikována dvěma veličinami:

- součinitelem propustnosti k_p, vyjadřujícím schopnost pórovitého prostředí propouštět kapaliny a plyny bez ohledu na jejich fyzikální vlastnosti. Součinitel propustnosti je funkcí pórovitosti, křivolakosti, měrného povrchu a tvaru zrn.
- součinitelem hydraulické vodivosti k, vyjadřující schopnost zeminy propouštět vodu, který je součinitelem úměrnosti v Darcyho rovnici

$$q = k \cdot J \; [m^3 \cdot s^{-1}], \qquad (2.1.1)$$

kde q je specifický průtok, J je sklon čáry piezometrické výšky a k je hydraulická vodivost.

Hodnota hydraulické vodivosti (Tab. 2-1) závisí na vlastnostech porézního prostředí i na vlastnostech proudící kapaliny. Stanovení hodnoty hydraulické vodivosti je jedním

z nejdůležitějších a nejobtížnějších úkolů při řešení úloh filtračního proudění. Mezi součinitelem propustnosti a hydraulickou vodivostí platí vztah

$$k_p = \frac{\upsilon \cdot k}{g}\ [m^2], \qquad (2.1.2)$$

kde k_p je propustnost, υ je kinematická viskozita, k je součinitel hydraulické vodivosti a g je tíhové zrychlení.

Tab. 2-1: Orientační hodnoty hydraulické vodivosti [6]

Druh zeminy	***k* [m·s^{-1}]**
Jíl	$< 1 \cdot 10^{-8}$
Písčitá hlína	$< 1 \cdot 10^{-6}$
Hlinitý písek ulehlý	$(1\text{-}5) \cdot 10^{-6}$
Písek s příměsí jílu	$(1\text{-}2) \cdot 10^{-6}$
Hlinitý a jemný písek	$(1\text{-}5) \cdot 10^{-5}$
Hrubozrnný písek	$(1\text{-}2) \cdot 10^{-4}$
Štěrkopísek	$(2\text{-}10) \cdot 10^{-4}$
Štěrk	$(1\text{-}5) \cdot 10^{-3}$

Pro popis proudění v prostředí nenasycené zeminy se vychází z analogických vztahů, které platí v zemině nasycené. Odlišnost vyplývá ze skutečnosti, že část objemu pórů je vyplněna vzduchem. Při proudění vody je pórovité prostředí dosycováno vodou, odvodňováno nebo vysušováno. Zavádí se celkový potenciál pórové vody Φ, který je definován jako součet všech složek energie vztažený k tíze kapaliny. Potom platí:

$$q = -k_N \cdot grad\Phi\ [m \cdot s^{-1}], \qquad (2.1.3)$$

kde q je specifický průtok, k_N je hydraulická vodivost nenasyceného prostředí a Φ celkový potenciál pórové vody.

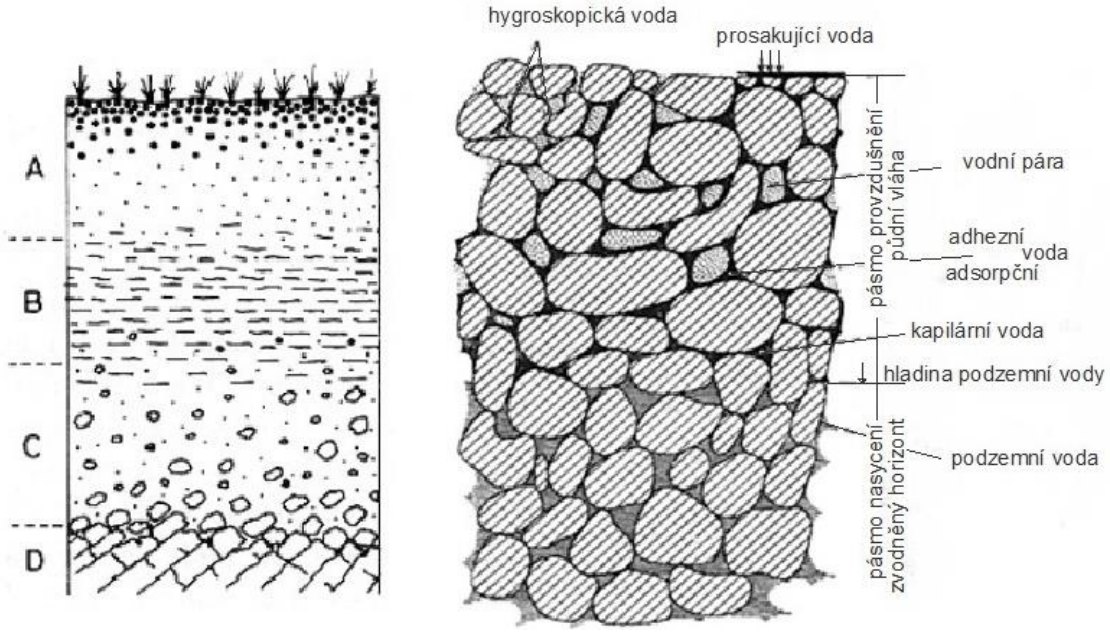
Hydraulická vodivost v nenasyceném prostředí je funkcí tlakové výšky H. Jestliže se část pórů odvodní, zmenšuje se objem pórů, kterými voda proudí. Místo pórovitosti n pak bude součinitel propustnosti funkcí objemové vlhkosti Θ [4], [15].

Měření hydraulické vodivosti nenasycené zeminy jsou složitá, provádějí se laboratorním měřením na odebraných vzorcích zemin nebo v terénu. Terénnímu měření se v současné době dává přednost, provádí se na větší ploše, je proto méně ovlivňováno heterogenitou půd a dosahuje vyšší přesnosti.

2.2 ZEMINA

Zemina je akumulace sypkého materiálu vzniklého na zemském povrchu mechanickým i chemickým zvětráváním hornin (i přemístěných) a obsahující různě velkou příměs organických látek [16]. Jedná se o složitý heterogenní systém dělící se na živou a neživou složku. Složka neživá je dělena na část minerální tvořenou třemi fázemi, a to pevnou fází (hlínou, jílem, pískem), kapalnou fází (půdní vodou a půdními roztoky) a plynnou fází (půdní vzduch) a částí organickou tvořenou půdním humusem (zbytky rostlinného a živočišného původu) [5]. Složku živou tvoří půdní mikroedafon (baktérie, plísně, řasy), mezoedafon (měkkýši, červi, členovci apod.), mikroedafon (například obratlovci) a živé rostliny [5].

Zeminy je možno charakterizovat jako neskalní a skalní. Neskalní zeminy mohou být soudržné nebo nesoudržné [6]. U nesoudržných zemin je smyková pevnost dána pouze třením mezi zrny. Uvedené zeminy jsou, až na stejnozrnné, nakypřené písky, málo stlačitelné. Mechanické vlastnosti zemin závisí především na ulehlosti, na granulometrickém složení a tvaru zrn, pod hladinou podzemní vody na směru a rychlosti proudění vody. Jsou propustné a konsolidují rychle. Smyková pevnost u soudržných zemin je způsobena pouze částečně třením mezi zrny. Hlavním parametrem je soudržnost (koheze), která závisí na obsahu jílovitých zrn a na druhu vazeb mezi zrny, které ovlivňuje voda obsažená v zemině. Čím větší množství vody, tím jsou vazby volnější a pevnost je menší a stlačitelnost zeminy větší. Mechanické vlastnosti soudržných zemin tedy závisí na vlhkosti zeminy. Soudržné zeminy jsou málo propustné a konsolidují dlouhodobě [6]. Na vertikálním řezu zeminou (Obr. 2-5) lze obecně rozlišit následující horizonty (shora dolů).



Obr. 2-5: Schéma vertikálního řezu zeminou [16] (vlevo) s návazností rozdělení podpovrchové vody (vpravo)

A-horizont (eluviální horizont), kde nastává intenzivní vyluhování neboli eluviace. Proces přemísťování koloidů a rozpustné zemní složky směrem dolů, působením prosakující vody. Svrchní část horizontu obsahuje množství organických látek (nedostatečně rozložené organické zbytky až humus) a je silně vyluhována prosakující vodou; spodní část horizontu obsahuje již méně organických látek, je však postižena nejsilnějším vyluhováním, jehož výsledkem je rozklad minerálních látek a odnos Ca, Fe, Al, Si aj. [16]. Horizont se proto dále dělí na další dílčí horizonty (např. A0, A1, A2 atd.).
B-horizont (iluviální horizont) je horizont složený hlavně z jílových částic, v němž se hromadí látky vyluhované z A-horizontu (CaCO3 a různé sloučeniny Fe, Al, Si, často koloidní povahy). Iluviací (vylučováním látek z A-horizontu) dochází k obohacováním půdního profilu různými koloidy a solemi vedoucí k zhutnění horizontu.
C-horizont je rozrušená, a zvětrávající, avšak málo pozměněná matečná hornina.
D-horizont je nedotčená matečná hornina [16].

2.2.1 Základní fyzikální vlastnosti zemin

K pochopení mechanického chování zeminy, které je složitým odrazem její struktury [17], [29] a pro poznání procesu přetváření a porušení, doprovázeném změnou struktury, je důležitá znalost toho, co změnu způsobuje.
Srovnání mechanického chování různých látek se stejnou pevnou fází o přibližně stejném geometrickém uspořádání svědčí o dominantním vlivu vazeb mezi pevnými částicemi. Malá smyková pevnost a velká stlačitelnost typických zemin je důsledkem relativně slabých vazeb mezi pevnými částicemi, a některé z nich, se již při nízkém napětí vzájemně posouvají. Roste tím stlačitelnost zemin a snižuje se jejich deformační modul. Tři skupiny faktorů vymezují strukturu zemin:

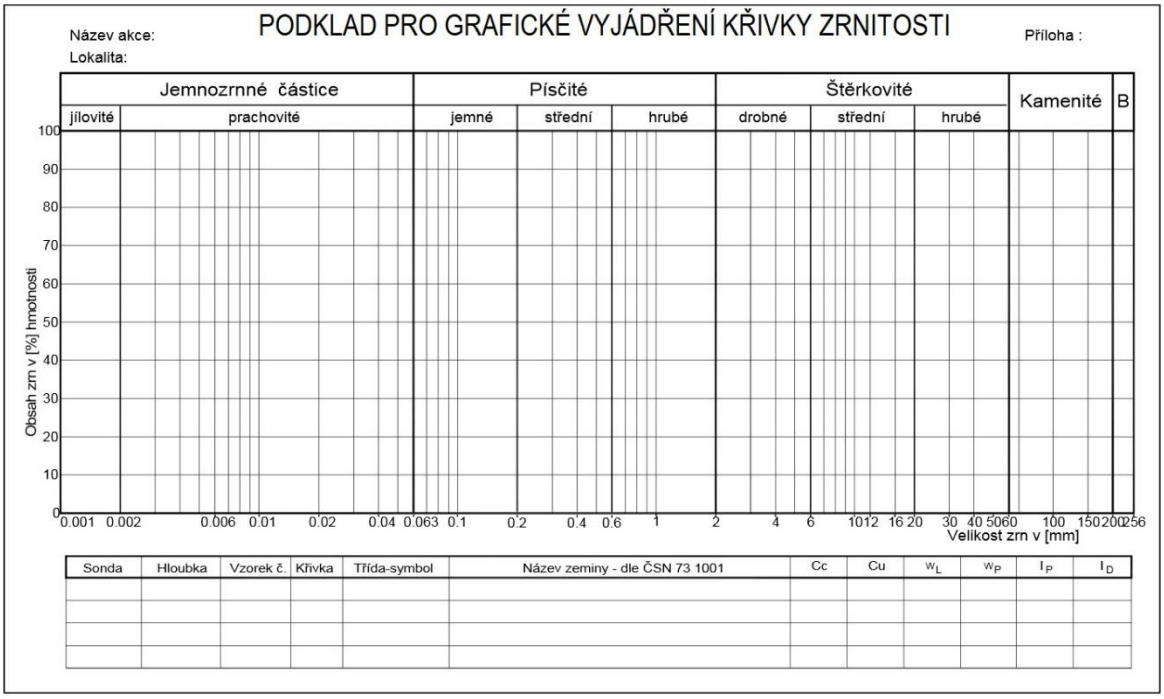
- charakter pevných částic,
- geometrické uspořádání částic,
- povaha vazeb mezi jednotlivými částicemi [17].

Do první skupiny patří pevnost, složení a stavba pevných částic, jejich velikost, tvar, drsnost a případně i povrchová aktivita. Nejpoužívanější charakteristikou skupiny je křivka zrnitosti [17], [L]. Tou je znázorněno granulometrické složení neboli zrnitost zeminy, udávající podíl určitých velikostí skupin zrn se stejnými fyzikálními vlastnostmi v celkovém složení zeminy. Zrnitostní křivka se vynáší do souřadnicového systému (Obr. 2-6), kde se na vodorovnou osu v logaritmické stupnici vynáší průměr zrn a na osu svislou v lineární stupnici procentuální podíly vysušené zeminy. Pro zjišťování granulometrického složení se obecně využívají dvě laboratorní metody [6]:

- zrnitostní (sítový) rozbor pro nesoudržné zeminy,

– hustoměrná (areometrická) zkouška pro soudržné zeminy vychází ze Stokesova usazovacího zákona, kde se předpokládá, že s postupně sedimentujícími pevnými částicemi (voda a zemina), klesá i její hustota, která se měří v pravidelných intervalech Casagrandeho hustoměrem [6].

Mezi nejrozšířenější metody klasifikace zemin patří metoda dle Kopeckého, metoda dle Nováka a nejčastěji je používána zrnitostní klasifikace dle Taxonomického klasifikačního systému půd v ČR, za jejímž účelem byla převzata zrnitostní frakce dle Ministerstva zemědělství USA [7], [26].



Obr. 2-6: Podklad pro grafické vyjádření křivky zrnitosti dle ČSN 731001

Druhá skupina faktorů definuje geometrické uspořádání pevné fáze, a to nejčastěji průměrnou objemovou tíhou nebo pórovitostí zeminy [17]. V půdně-mechanických výpočtech se často využívá objemová tíha zeminy γ vázaná s objemovou hmotností ρ počítána dle vztahu

$$\gamma = g \cdot \rho \; [N \cdot m^{-3}], \tag{2.2.1}$$

kde g je tíhové zrychlení a jeho uvažovaná hodnota je zpravidla 9,81 $m \cdot s^{-2}$.

Objemová hmotnost zeminy ρ vyjadřuje hmotnost m neporušeného jednotkového objemu V vysušené zeminy v přirozeném stavu včetně objemu pórů. Její hodnota se stanovuje přímým měřením objemu a vážením [5] dle vztahu

$$\rho = \frac{m}{V} \; [kg \cdot m^{-3}]. \tag{2.2.2}$$

Pórovitost zeminy *n* vyjadřuje objem volných prostor nezaplněných tuhou fází. Je to poměr objemu pórů V_P vyjádřených v % k celkovému objemu zeminy V_S v přirozeném stavu, v praxi počítána dle vztahu

$$n = \frac{V_P}{V_S} = \frac{\rho_Z - \rho_d}{\rho_Z} \cdot 100\ [\%], \tag{2.2.3}$$

kde ρ_Z je měrná objemová hmotnost zeminy a ρ_d objemová hmotnost suché zeminy [5].

Vlhkost zeminy *w* definuje poměr hmotnosti vody v pórech zeminy ke hmotnosti pevných částic zeminy vysušené. Má velký vliv na chování zeminy při jejím zatížení a je jednou ze základních fyzikálních vlastností zeminy. Vlhkostí zeminy se rozumí množství vody obsažené v zemině, jež se dá odstranit sušením při 110 °C do stálé hmotnosti [6].

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100\ [\%], \tag{2.2.4}$$

kde m_w je hmotnost vody ve vzorku zeminy a m_d je hmotnost vzorku zeminy po vysušení.

Stupeň nasycení S_r je mírou vyplnění pórů zeminy vodou. Stupeň nasycení je poměr objemu vody k objemu pórů. Pro výpočet používá následující vztahy:

$$S_r = \frac{\rho_S\,(\rho - \rho_d)}{\rho_w\,(\rho_S - \rho_d)}\ [-], \tag{2.2.5}$$

$$S_r = \frac{w}{\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{\rho_w}{\rho_S}}\ [-], \tag{2.2.6}$$

kde ρ_S je hustota pevných částic a ρ_w hustota kapalné části zeminy, ρ_d objemová hmotnost suché zeminy a ρ_Z měrná objemová hmotnost zeminy.

Třetí skupinou strukturních charakteristik jsou kontaktní vazby mezi pevnými částicemi. U partikulárních látek lze v podstatě rozlišit dva typy kontaktních vazeb:

a) vazby vlivem vnějšího zatížení, pro něž se užívá názvu třecí vazby,
b) vazby, vyvolávané vnitřním napětím [17].

Schopnost zeminy zadržovat vodu je významnou měrou ovlivněna nejen faktory popsanými výše, ale také obsahem organické hmoty a schopností organismů žijících v zeminách transformovat vstupující rostlinnou biomasu na organickou hmotu, což člověk může svou činností ovlivnit v poměrně krátkém časovém úseku (Tab. 2-2) a může to být účinný prostředek pro obnovení funkce krajiny. Zlepšování kvality zemin například

v agrotechnice prostřednictvím zvyšování obsahu a kvality organické hmoty a zvyšování diverzity i početnosti edafonu by měly mít prioritu při ochraně a tvorbě krajiny.
Zemina se v lesním porostu oproti klasickým zemědělským plochám liší svrchní vrstvou A horizontu (rostlinné opady v různém stupni rozkladu). Pod opadem se nachází vrstva humusu. Obě vrstvy mají mnohem vyšší infiltrační schopnost než u zemědělské plochy. Je to dáno především velkou pórovitostí zemin, která představuje ideální cestu pro proudění vody.

Tab. 2-2: Faktory ovlivňující infiltraci a retenci vody v zemině

Faktory ovlivňující infiltraci a retenci vody v zemině	
Nesnadno ovlivnitelné činností člověka	**Snadno ovlivnitelné činností člověka**
Textura	Obsah organické hmoty a početnost edafonu
Chemismus jílových minerálů	Struktura
Mineralogie zeminy	Architektura pórů a pórovitost
Podpovrchové horizonty zeminy	Objemová hmotnost, vlhkost a zrnitost
Hloubka profilu zeminy	Tvorba povrchových krust a vegetační pokryv

V současnosti je jednou z příčin rychlého odtoku vody z krajiny ochuzení zemin o organickou hmotu [1], nevhodná druhová skladba a kácení lesních porostů, byť v současné době především na plochách postižených kůrovcovou kalamitou [J]. V roce 2018 došlo vlivem napadení stromů kůrovcem k těžbě zhruba 12 milionů m^3 lesního porostu a v roce letošním se očekávají těžby v rozsahu 15 až 20 milionů m^3. K řešení jsou i otázky obnovy lesa a výsadba vhodných druhů lesního porostu a údržba a péče o stepi, louky a pastviny [K] a další.
Na infiltraci vody do zeminy mají velký vliv nejen její mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti a chování vody při pohybu v zemině, ale důležitým faktorem jsou i atmosférické srážky a jejich forma. Při dešťových srážkách především doba trvání a intenzita.

2.3 INFILTRACE

Infiltrace neboli vsakování je elementární hydrologický proces, který je v širším pojetí chápán jako pronikání srážkové vody, nebo uměle dodané vody (závlah) ze zemského povrchu do hlubších vrstev. Jedná se o případ nestacionárního nenasyceného proudění vody zeminou. Na kapky vody působí gravitace, která je také společně s nasávacím tlakem zeminy hlavní silou zodpovědnou za pohyb infiltrované vody. Do značné míry infiltrace ovlivňuje vodní režim zeminy, vodní bilanci, intenzitu povrchového odtoku a v neposlední řadě zásoby podzemní vody. [8], [30], [31].

Hydrologicky infiltrace rozděluje dešťové srážky na dvě části. První část srážek je zeminou dodávána kořenům rostlin a doplňuje zásoby podzemní vody. Druhá část, neprocházející zeminou, je zodpovědná za povrchový odtok [19]. Zjednodušeně se jedná o převádění vody povrchové do vody podzemní. Proces přerozdělení vody v zemině lze zapsat rovnicí.

$$\Delta SMC = f + c - d - ET + v + TFLOin - TFLOout, \qquad (2.3.1)$$

kde ΔSMC je změna vlhkosti zeminy, f je rychlost infiltrace, c je rychlost, která je vodě přidána vlivem kapilárních sil ze spodních zvodní, d je rychlost odvodnění zeminy, ET je evapotranspirační ztráta, v je změna ve velikosti výparu, $TFLOin$ je povrchový odtok vstupní a $TFLOout$ je povrchový odtok výstupní.

Při přirozené infiltraci se vsakuje voda z povrchových vod, nebo ze srážek dešťových a sněhových. Za umělou infiltraci se považuje vsakování vody vyvolané umělým zaplavením povrchu země, například pro účely závlah a zvýšení množství vodních zdrojů podzemních vod [11].

V případě umělé infiltrace je voda přiváděná na místo infiltrace kontrolovatelná z hlediska množství a jakosti [12]. Infiltrace je tedy variabilní prostorový proces ovlivněný místními a časovými podmínkami.

Množství vody, vsakující se do zeminy za jednotku času se nazývá intenzita vsaku nebo také rychlost infiltrace. Velikostí infiltrace je celkové množství vody vsáknuté do zeminy za jednotku času [9] vyjádřené v [mm, $l \cdot ha^{-1}$].

Proces infiltrace vody do zeminy ovlivňuje vodní režim zeminy, vodní bilanci, intenzitu povrchového odtoku a zásoby podzemní vody. Intenzita infiltrace je proměnlivá a závislá na fyzikálně-vodních vlastnostech a stavu zeminy (počáteční vlhkost, obsah vzduchu uzavřený do zeminy, stabilizace zemních agregátů, množství pseudoagregátů, zrnitostní složení, hutnost, pórovitost, objem volných pórů, nekapilární vodivost apod.), trváním a intenzitě srážek [8], vegetačním krytu zemního povrchu, drsnosti, krustě na povrchu zeminy, sklonitosti, chemických látkách přidaných do zeminy, agrotechnice atd. Infiltraci

ovlivňuje i mocnost, forma, kompaktnost a neporušenost nadložního humusu spolu s druhem a typem zeminy, mocnost zemního horizontu a jeho hydropedologické charakteristiky [10].

Infiltraci lze dělit podle různých hledisek. Při zohlednění stability okrajových podmínek lze dle Kutílka [8] infiltrace dělit na stacionární a nestacionární. Při stacionární infiltraci je rychlost infiltrace v konstantní a na spodním okraji je hladina podzemní vody udržována na konstantní úrovni. Nestacionární infiltrace nastává, když se v čase $t = 0$ s změní na horním okraji (na povrchu) okrajová podmínka [2]. Podle tlakových poměrů na povrchu zeminy se dělí na tlakovou (intenzita srážky je větší než intenzita vsaku) a beztlakovou (na povrch zeminy je přiváděno pouze tolik srážek, kolik se jich stačí vsáknout).

Při dostatečné infiltrační schopnosti zeminy je zemina v optimálním stavu, což znamená, že je schopna rostlinám poskytnout dostatečnou podporu růstu. Při malé infiltrační schopnosti zeminy dochází k nadměrnému povrchovému odtoku, vodní erozi nebo smyvu, a naopak při velké infiltrační schopnosti zeminy dochází ke zpomalení oběhu vody v zemině a většímu využití srážkových vod k doplnění zásob podpovrchové vody [35].

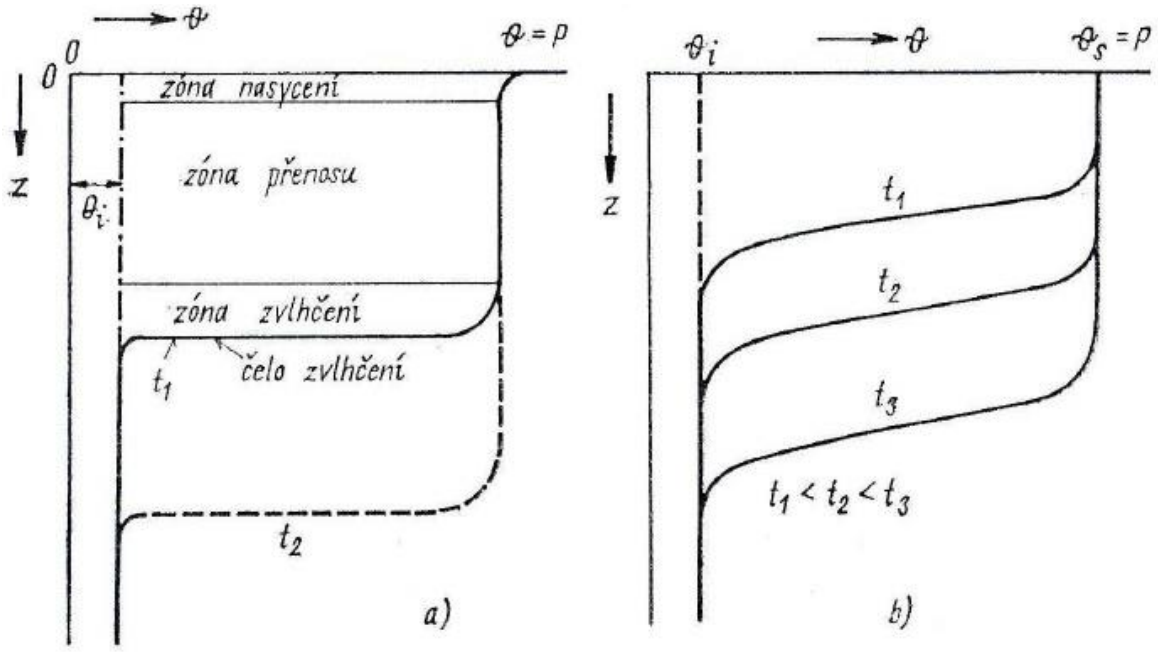
Sledování procesu infiltrace vody do zeminy a její redistribuce má velký význam např. v zemědělství (realizace a optimalizace závlah), v silniční dopravě (problematika infiltrace splachu vody do zeminy), ve vodním hospodářství (protierozní a protipovodňová ochrana). Znalost procesu infiltrace vody do zemin je velmi důležitá, neboť umožňuje zjistit celkový stav profilu zemin a jejich hydrologický režim [36].

Lesní zeminy charakterizuje výrazná stratifikace zemního profilu, akumulace organické hmoty v povrchových vrstvách a obecně vyšší diverzita edafonu. Také kvůli ní a kvalitě organické hmoty je infiltrace vody do zeminy a vododržnost mnohem příznivější pro zeminy lesů smíšených a listnatých v porovnání s kyselými zeminami monokultur jehličnanů. [1]. Při studiu vodního režimu v lesním porostu je třeba sledovat následující složky vodní bilance – intercepci (rozdíl srážek volné plochy a porostních srážek), pod korunové srážky (zpravidla se měří žlabovými srážkoměry), stok po kmeni (spirálovými manžetami se voda svádí do záchytných sudů), srážky volné plochy. Dále se sleduje evapotranspirace kontinuálním měřením vlhkosti zemin, evaporace z povrchu zemin (např. sadou Popovových výparoměrů), posuzuje se odtok srážkových vod (povrchový, hypodermický, laterální), vertikální průsak vody (např. lyzimetrickou metodou) a povětrnostní podmínky [O].

Po dodání vody na povrch zeminy v závislosti na její kondici (krusta, rozpukání, kořeny, fauna) je těsně u jejího povrchu zahájen proces infiltrace vody do zeminy a s postupující dobou (zvláště při pokračování dodávky vody na povrch) probíhá i v jejích hlubších vrstvách. Dle analýzy průběhu infiltrace dle Bodmana a Colemana (Obr. 2-7) zrevidované Philipem [41] existují v zemním profilu tyto zóny:

- zóna nasycení – mocnost zóny je omezená, ale dochází k plnému nasycení vodou,

- zóna přenosu – dochází k velmi pomalé změně vlhkosti v čase i do jejich hlubších vrstev. Vlhkost nedosahuje hodnoty plné vodní kapacity. V závislosti na délce trvání infiltrace se zvětšuje mocnost této zóny.
- zóna zvlhčení – se zvyšující se hloubkou a časem zde dochází k poměrně prudké změně vlhkosti.
- čelo zvlhčení – existence velmi strmého vlhkostního gradientu přechodu do původní vlhkosti. Představuje viditelnou mez postupu infiltrující vody [41].



Obr. 2-7: Vlhkostní zóny v zemním profilu při infiltraci vody do homogenní zeminy dle Bodmana 1944 a), a ve skutečných poměrech b) – čelo zvlhčení je klínovitě ukloněno [41]

2.3.1 Metody měření infiltrace

Měření infiltrace probíhá nejčastěji v polních podmínkách. K měření rychlosti infiltrace vody do zemin a propustných hornin se v polních podmínkách používají infiltrometry např. výtopové jednoválcové a dvouválcové, kompaktní přetlakové, jednoduché tlakové, kruhový Mini Disk, tenzní nebo Hood [13], [20], [32], [33] a [34].

Přesnější, ale časově náročnější a pracnější metodou je stanovení rychlosti infiltrace vody do zeminy zadešťováním měřicího stanoviště pomocí simulátoru deště [E], nebo užití Guelpského permeametru. Měření a hodnocení procesu infiltrace vody do zeminy včetně volby měřicí techniky je časově náročné a vyžaduje komplexní přístup, neboť se jedná o vyhodnocování charakteristik, které jsou časově proměnné.

Metodou vybranou pro měření infiltrace vody do zeminy pro lokality Kanice a Útěchov je metoda EIS.

2.4 ELEKTRICKÁ IMPEDANČNÍ SPEKTROMETRIE

Principem aplikované metody EIS je měření obou složek elektrické impedance **Z**, sledované zeminy, tedy reálné složky ohmického odporu *R* a složky imaginární *X* zejména kapacitního odporu [40] při zavedení střídavého harmonického signálu.

2.4.1 Elektrická impedance *Z*

Podobně jako elektrický odpor *R* charakterizuje vlastnost obvodu pro stejnosměrný proud, tak elektrická impedance **Z**, je jednou ze základních veličin charakterizujících obvody se střídavým proudem. Hodnota elektrické impedance je vždy větší, nebo rovna reálné hodnotě el odporu *R* v obvodu a v ideálním případě je frekvenčně nezávislá. Indukčnost X_L a kapacitní reaktance X_C, představují frekvenčně závislé části elektrické impedance *X* [40].

Elektrická impedance může být použitím Ohmova vztahu pro obvody se střídavým proudem vyjádřena vztahem:

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{U}}{\mathbf{I}}\,[\Omega], \tag{2.4.1}$$

kde **U** je fázor elektrického napětí [V] a **I** je fázor elektrického proudu [A].

Frekvenční charakteristika el. impedance **Z** může být vyjádřena jako funkce komplexní proměnné v algebraické formě

$$Z = R + jX\,[\Omega], \tag{2.4.2}$$

resp.

$$Z(\omega) = R + j\omega X, \tag{2.4.3}$$

kde ω [s^{-1}] je úhlová frekvence a platí $\omega = 2\pi f$; kde *f* je frekvence [Hz].

Pro modul elektrické impedance **Z**, tj. absolutní hodnotu fázoru elektrické impedance **Z**, platí vztah [40]:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}\,[\Omega] \tag{2.4.4}$$

a pro fázový posun [40]:

$$\varphi = arctg\,\frac{X}{R}\,[-]. \tag{2.4.5}$$

2.4.2 Měřicí přístroje a přípravky použité pro kalibraci

Pro měření elektrické impedance **Z** zemin byl vyvinut přístroj Z-metr, který v průběhu řešení výzkumných úkolů prošel několika inovacemi. V současné době se nejvíce používá vývojová řada Z-metr IV. Každý přístroj Z-metr IV verze MEA-ZMT43-000 (Obr. 2-8) použitý na měření hodnot složek elektrické impedance je před použitím kalibrován.

Obr. 2-8: Z-metr IV (MEA-ZMT43-000) [Foto: D. Bartoněk]

Ke kalibraci Z-metru byl jako referenční přístroj pro měření elektrické impedance použit RLC můstek HAMEG HM 8118 (Obr. 2-9). Jedná se o precizní laboratorní přístroj, schopný měřit celý rozsah parametrů v obvodu střídavého proudu na frekvenčním rozsahu od 20 Hz do 200 kHz, s přesností dle technické specifikace [Technical Data - Hameg HM8118 User Manual [Page 36] | ManualsLib].

Obr. 2-9: HAMEG HM8118 [14]

Pro měření odporu stejnosměrného proudu, tedy reálné části elektrické impedance, posloužil multimetr FLUKE 8846A (Obr. 2-10).

Obr. 2-10: Multimetr FLUKE 8846A [14]

Multimetr přeměřil celý rozsah stejnosměrného a střídavého proudu. Pro Z-metr je důležité pouze měření hodnoty elektrického odporu stejnosměrného proudu. Přesnost měření je opět dána technickou specifikací přístroje [8845A/8846A Users Manual (flukecal.com)]. Objektem pro měření je kalibrátor „Z-meter IV Calibrator“ dále uveden jako „PID (Proportional – integral – derivate controller) Calibrator“ (Obr. 2-11).

Obr. 2-11: Z-metr IV Calibrator [14]

PID kalibrátor je částí napájení Z-metru IV a je používán pro jeho kalibraci. PID kalibrátor se skládá z precizních SMD rezistorů s následujícími hodnotami: 10 Ω, 100 Ω, 1000 Ω, 10 000 Ω, 100 000 Ω a 1 000 000 Ω. Jednotlivé odpory jsou přepínačem připojeny do čísla „0“ měřicího kanálu Z-metru IV.

Pro kalibraci byla použita srovnávací metoda. PID kalibrátor je jako první proměřen RLC můstkem HAMEG HM8118 a také multimetrem FLUKE 8846A. Následně je PID

kalibrátor proměřen Z-metrem IV. RLC můstek umožňuje měření 5-vodičovou metodou připojení. Výhoda uvedené metody spočívá v možnosti měření elektrické impedance v širokém rozsahu hodnot od 10 mΩ do 10 MΩ s odpovídající přesností.

Z-metr IV umožňuje měření tří nebo dvouvodičovou metodou připojení. Kalibrace Z-metru byla provedena jednoduchou dvouvodičovou metodou připojení, která se využívá v převážné většině aplikací včetně zapojení na sledovaných lokalitách.

Výsledky měření PID kalibrátoru multimetrem FLUKE 8846A jsou uvedeny v Tab. 2-3.

Tab. 2-3: Výsledky měření PID kalibrátoru multimetrem FLUKE

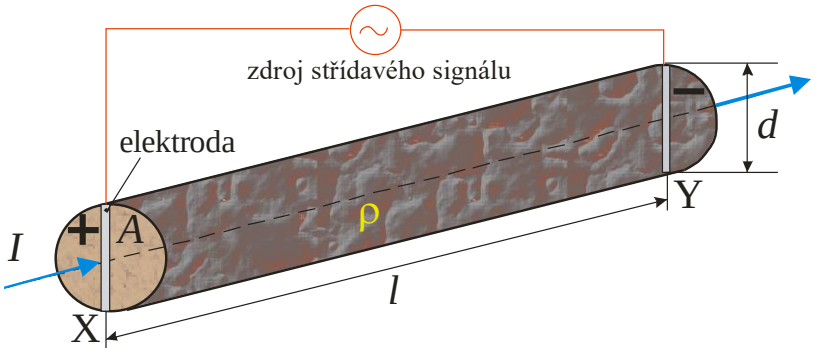
Nominální hodnota [Ω]	10	100	1000	10 000	100 000	1 000000
Měřená hodnota [Ω]	9,954	99,888	996,420	10 031	99 850	997 350
Odchylka [%]	0,45	0,11	0,36	0,31	0,15	0,27

Pro konstrukci PID kalibrátoru byly použity velmi přesné a stabilní SMD rezistory, proto je odlišnost mezi nominální a měřenou hodnotou elektrického odporu velmi malá.

2.4.3 Měření metodou EIS

Na obou lokalitách v lesním porostu byl pro měření elektrických charakteristik zeminy použit jednotný systém měření i sběru dat.

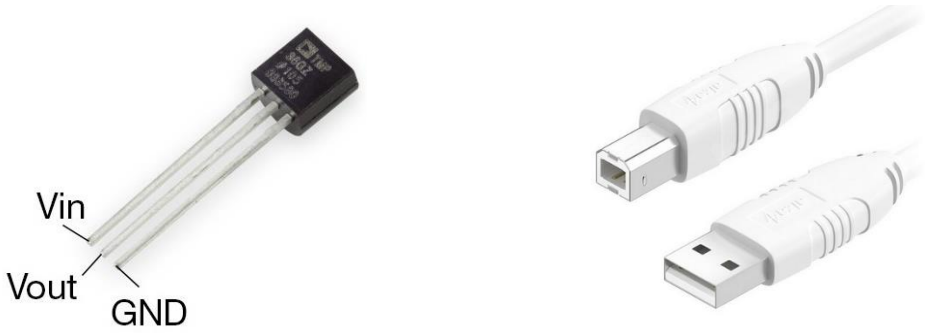
Do zeminy byly instalovány trubice s elektrodami metody EIS v celkové délce 1,5 m paralelně ve vzdálenosti 2,0 m. Měřicí eletrody jsou trubicové konstrukce o vnějším průměru 0,026 m, elektrody jsou realizovány z nerezavějící oceli v délce 0,05 m a izolační a zároveň distanční části jsou trubice z polyamidového materiálu v délce 0,10 m. Elektrody umístěné v jedné úrovni na protilehlých trubicích tvoří snímač. V každé lokalitě je instalováno celkem 10 snímačů (Obr. 2-12), tj. je měřeno celkem 10 horizontů zeminy, přičemž snímač s označením „0“ je umístěn v zemině nejhlouběji. Jestliže je srovnávací rovinou zemský povrch, jsou s krokem 0,15 m měřeny horizonty -0,12 m až -1,47 m.



Obr. 2-12: Detail zapojení jednoho snímače trubic s elektrodami EIS

Měřicí aparatura umožňuje měření ve frekvenčním pásmu [37] nebo na jedné zvolené frekvenci. Vzhledem k charakteru zeminy – jíl, ve spodních vrstvách jíl s příměsí písku, a ke zkušenostem při užití aparatury k odhadu velikosti efektivního zrna zeminy [38] bylo měření realizováno v autonomním režimu na měřicí frekvenci 8 kHz, s dobou přepínání 100 ms při počtu cyklického opakování 5.

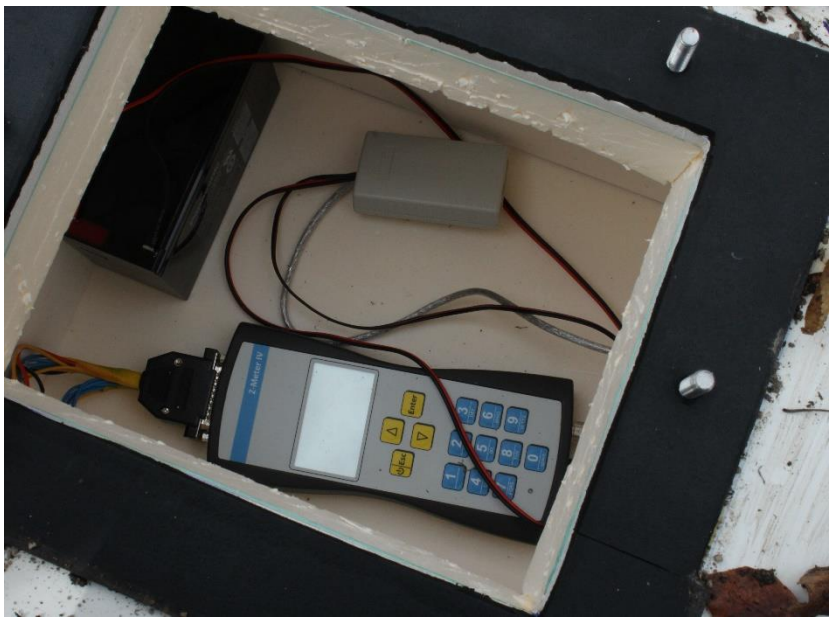
K získání komplexnější informace o sledované zemině jsou v trubicích s elektrodami EIS integrována teplotní čidla délky 0,005 m a průměru 0,005 m (Obr. 2-13 a), (Obr. 2-13 b). Každé z čidel je identifikovatelné speciálním číselným kódem – adresou danou výrobcem. Podle uvedeného kódu je přiřazen měřený teplotní horizont v zemině. Teplotní čidla jsou osazena vždy na jedné trubici s elektrodami EIS v celkovém počtu 5. Srovnávací rovinou při měření teplotních horizontů je opět zemský povrch, v zemině jsou měřeny úrovně -0,05 m; -0,34 m; -0,64 m; -0,94 m a -1,24 m, kdy kanál „0“ je v nejnižší úrovni zeminy. Teplotní rozsah čidel je -55 °C až +125 °C, přesnost 0,5 °C. Teplotní čidla jsou kalibrována přímo na odečet teploty ve °C.



Obr. 2-13: Analogové teplotní čidlo TMP36 a) [M], datový kabel USB typ A-B b) [N]

Sběr dat byl realizován s krokem 6 h, tj. v reálném čase 01:00 h, 07:00 h, 13:00 h a 19:00 h. Nastavení sběru dat je volitelné, uvedený krok vychází z požadavku návaznosti na čtení povětrnostních dat ČHMÚ v 07:00 h.

Na lokalitách jsou přístroje umístěny v tepelně a vlhkostně izolovaných boxech zakopaných v zemině (Obr. 2-14 a) tak, aby byla minimalizována možnost jejich mechanického poškození lidmi, lesní zvěří či těžbou v lesních porostech, anebo manipulací s dřevní hmotou či pojezdem lesních strojů, případně rovněž možnost jejich zcizení.



a)

b)

Obr. 2-14: Temperovaný úložný box s přístrojem, kabeláží, záložní Pb baterií a jednotkou USB a), detail měřicích trubic s elektrodami EIS s teploměry b)

Jelikož jsou měřené lokality v zapojeném lesním porostu, v němž nebylo možné realizovat přenos měřených dat např. prostřednictvím sítě WiFi stejně jako zabezpečit jiné než bateriové nabíjení měřicí aparatury, bylo nutné instalovat k přístroji Z-metr IV do boxu nabíjecí Pb akumulátorovou baterii (Obr. 2-14 a) a přibližně jedenkrát za 2 měsíce realizovat manuální sběr měřených dat.

Sběr dat probíhá velmi snadno. Jako první se oddělá plechový kryt celého boxu, spolu se zeminou a okolním organickým materiálem, jenž celý box dobře maskuje. Poté stačí povolit a oddělat pomocí klíče matice šroubů víka boxu a víko oddělat. Data z přístroje Z-metr IV se načítají do notebooku prostřednictvím datového kabelu USB typ A-B (Obr. 2-13 b). Po připojení USB kabelu z notebooku do Z-metru IV se přístroj uvede samovolně do funkčního režimu a může proběhnout kontrola stavu baterie na displeji kvůli případné výměně. Na notebooku se Z-metr zobrazí jako USB paměť, ze které se data (soubor *.csv) přenesou na disk notebooku. Přenos dat je tedy jednoduchý a trvá pouze několik minut. Poté je kabel odpojen, box se uzavře pomocí jeho víka a zajistí maticemi. Jako poslední se celý box přiklopí plechovým víkem a zamaskuje okolní zeminou, listím a větvemi tak, aby co nejlépe splynul s okolním terénem.

3 ZÁKLADNÍ INFORMACE O MĚŘENÝCH LOKALITÁCH

Koncepce a realizace měření infiltrace dešťových srážek do zeminy byla řešena v trvalém lesním porostu nacházejícím se v katastru obcí Útěchov a Kanice. Obě lokality se nacházejí v okrese Brno-venkov v Jihomoravském kraji a patří do Školního lesního podniku (ŠLP) Masarykův les Křtiny, který je účelovým zařízením Mendelovy univerzity v Brně. Celková rozloha ŠLP je 10 492 ha, z toho lesní pozemky zaujímají 10 265 ha a nachází se mezi městy, resp. obcemi Brno (Soběšice, Ořešín) na jihu, Vranov (na západě), Blansko a Jedovnice (na severu), Bukovinka a Ochoz u Brna (na východě). Kromě praktické výuky Lesnické a dřevařské fakulty v oborech lesnictví, krajinářství a dřevařství a vědeckovýzkumné činnosti slouží ŠLP Křtiny i široké veřejnosti rozvíjením estetické a rekreační funkce lesa, údržbou odpočívadel, studánek a průhledů do krajiny, budováním zpevněných cest a naučných tras i vydáváním četných naučných publikací [P].

Lesní pozemky ŠLP se nacházejí v nadmořské výšce 210 m až 574 m; nejvyšším vrcholem je Proklest v Konické vrchovině, nejníže koryto Svitavy u Brna [Q]. Orograficky ŠLP spadá do celku Drahanské vrchoviny, tvořené na západě Adamovskou vrchovinou, ve střední části Moravským krasem a na východě Konickou vrchovinou; podloží je tvořeno amfibolickými granodiority a diority, kulmskými drobami a v krasovém území devonskými a karbonskými vápenci.

Z pedologického hlediska [L] jsou zeminy na území ŠLP převážně kambizemě a rankery. Pro údolní nivy vodních toků je příznačná naplavená půda (fluvizemě), na vápencích krasového území jsou vysoce zastoupeny rendziny.

Po hydrografické stránce náleží ŠLP do povodí toku Dyje. Odvodňován je toky Svitava a Křtinský potok, Ponávka, Rakovec, Svratka a Zlatý potok (Říčky).

Podle Atlasu podnebí ČSR [39] je klimatická oblast mírně teplá, na jižních okrajích (Hádecká plošina, Řečkovicko) s přesahy do teplé. Průměrná roční teplota je 7,5 °C a průměrné roční srážky 610 mm. V důsledku velmi členitého terénu se však jednotlivé lokality mohou od sebe velmi lišit, a to i při malých vzdálenostech mezi nimi. Terén se vyznačuje hlubokými údolími, žleby, svahy a náhorními rovinkami. Proto jsou časté teplotní inverze v údolích a velké teplotní rozdíly mezi různě exponovanými stanovišti.

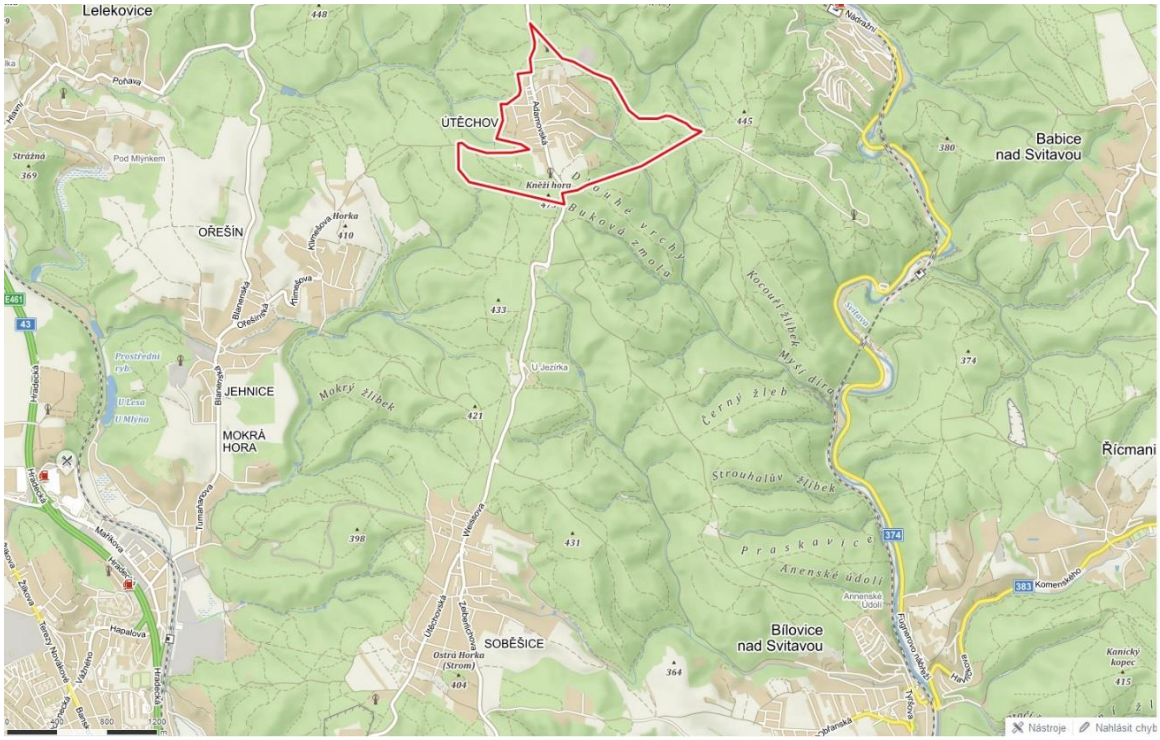
Z hlediska biogeografického [Z] lesní komplex ŠLP spadá převážně do středoevropské provincie listnatých lesů. Na lesních pozemcích ŠLP převládají smíšené porosty s 36 % dřevin jehličnatých a 64 % dřevin listnatých. Nejdůležitějšími dřevinami jsou smrk, borovice, modřín (adamovská populace), z listnatých dřevin pak buk a dub.

3.1 LOKALITA ÚTĚCHOV

Útěchov byl původně samostatnou obcí, která byla k Brnu připojena v roce 1980 jako dosud poslední obec.

3.1.1 Územní informace obce Útěchov

Obec Útěchov je městská část na severním okraji statutárního města Brna, její katastrální území má rozlohu 1,18 km² a leží v nadmořské výšce (425-475) m n. m. Žije zde přibližně 800 obyvatel. Útěchov je obklopen lesy Drahanské vrchoviny, v níž se dle základního geomorfologického členění ČR nachází.



Obr. 3-1: Lokalita obce Útěchov [D]

3.1.2 Geologická a geomorfologická charakteristika

Obec Útěchov se nachází v českém masivu na podloží z kyselých rul a granitů [L], kde je převládajícím půdním typem kambizem, ta zahrnuje převážně půdy na pevných horninách. Pro kambizem jsou typické zeminy pahorkatin, nižších a středních poloh vrchovin.

3.1.3 Hydrologické údaje

Hydrologicky se Útěchov nachází v povodí řeky Dyje. V jihovýchodní části obce pramení Útěchovský potok, který se vlévá po 3,5 kilometrech jihovýchodně od obce do řeky Svitavy. Severně nad obcí pramení Babidolský potok, tekoucí na západ a vlévající se po 3 kilometrech do řeky Ponávky. Ponávku napájí také potok Rakovec, pramenící jihozápadně

od obce a vlévající se do ní u Mokré Hory po 5 kilometrech jihozápadním směrem ku městu Brnu. Dle ČHMÚ je v této oblasti HPV na velmi nízké úrovni [T].

3.1.4 Měřená lokalita Útěchov

Měřená lokalita v Útěchově se nachází 500 m jihovýchodně od okraje obce (Obr. 3-2) v nadmořské výšce 425 m n. m.

Obr. 3-2: Měřená lokalita – Útěchov [D]

Měřené místo je ve smrkovém porostu, jehož skladbu tvoří stromy stáří 11 až 14 let [U] (Obr. 3-3). Jelikož je skladba porostu tvořena právě smrky, je předpokládáno, že infiltrace do zeminy bude velmi malá. Uvedená skutečnost je způsobena třemi vlastnostmi smrku, na jejichž základě smrk prakticky nepropouští atmosférické srážky do zeminy. První negativní vlastnost smrku z hlediska infiltrace vody do zeminy je, že velkou část srážky dokáže zadržet na svých jehlicích v koruně stromu, druhou je schopnost vody stékat po kůře stromu. Vzhledem k tomu, že smrk disponuje velmi hrubou strukturou kůry, většinu tekoucí vody ze srážky zadrží a nepropustí až k zemině. Třetí je pak smrkový opad (Obr. 3-4), který vytváří nad zeminou velmi silnou vrstvu, tvořící surový humus, který prakticky nepropustí vodu do hlubších vrstev zeminy.

Obr. 3-3: Lesní porost – Útěchov [Foto: D. Bartoněk]

Umístění měřicího přístroje Z-metr IV a trubic s elektrodami EIS v zemině je znázorněno schematicky na Obr. 3-4. V lesním porostu je jejich poloha pro lidské oko velmi špatně viditelná a měřicí soustava nijak nezasahuje do vzhledu okolní krajiny.

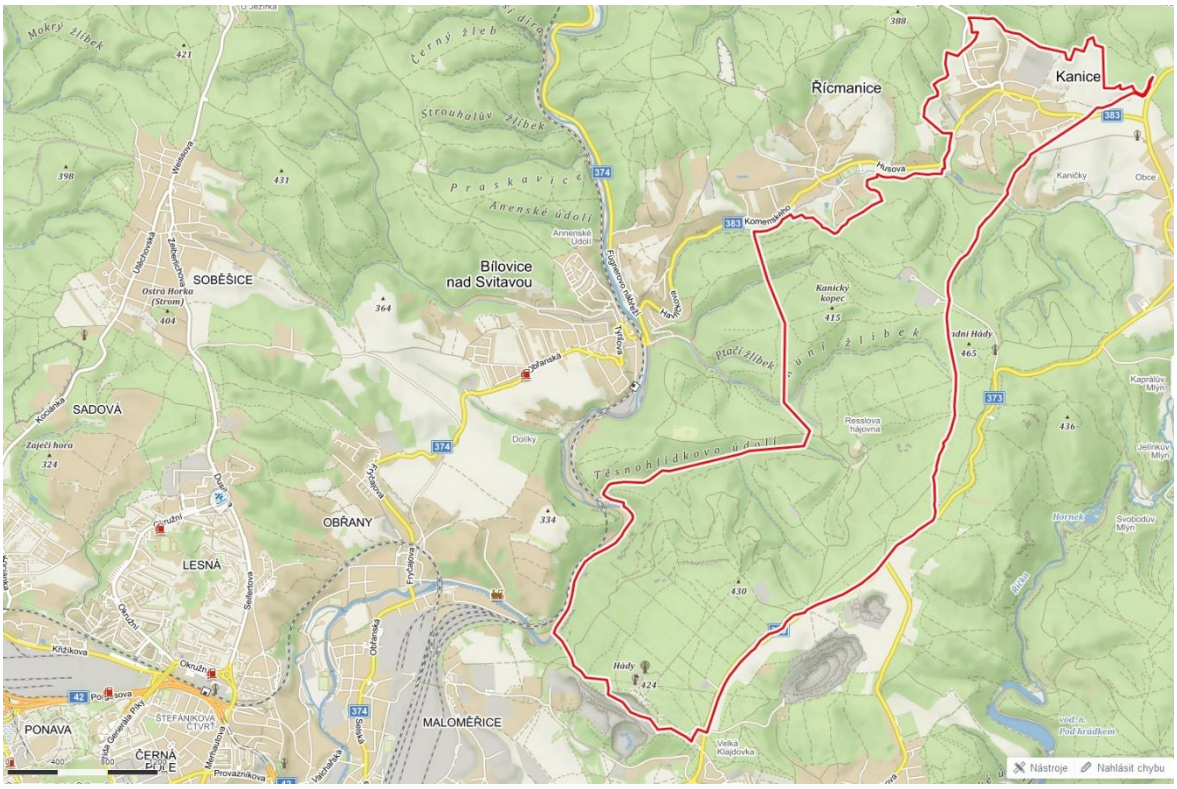
Obr. 3-4: Umístění měřicího zařízení – Útěchov [Foto: D. Bartoněk]

3.2 LOKALITA KANICE

Obec Kanice se nachází 10 km severovýchodně od Brna. Katastr Kanic má velmi nepravidelný tvar (Obr. 3-5). Téměř celé území je zalesněné.

3.2.1 Územní informace obce Kanice

Obec Kanice leží v Drahanské vrchovině, mezi zalesněnými kopci na jižní hranici CHKO Moravský kras. Nadmořská výška obce je (300–340) m n. m. Její katastrální výměra je 8,21 km^2. Samotná obec leží v jeho severovýchodním cípu a jihozápadně od ní je její katastr protažen dlouhým výběžkem do území města Brna mezi čtvrtě Obřany a Líšeň [D]. Obec je součástí mikroregionu „Časnýř“, který se skládá z obcí podél stejnojmenného potoka a Babic nad Svitavou. V obci žije 955 obyvatel.



Obr. 3-5: Lokalita obce Kanice [D]

3.2.2 Geologická a geomorfologická charakteristika

Obec Kanice, stejně jako obec Útěchov, se nachází v českém masivu na podloží z kyselých rul a granitů, kde je převládajícím zemním typem kambizem.

3.2.3 Hydrologické údaje

Hydrologicky obec Kanice spadá do povodí řeky Dyje. Jihovýchodně od měřené lokality pramení na místě nazvaném „Prosba Lesa“ Žilůvecký potok, tekoucí severozápadním směrem napájený po 1 kilometru pravým přítokem potoku Pramenný a vlévající se po 1,75

kilometrech do řeky Svitavy u koupaliště v Babicích nad Svitavou. Dle ČHMÚ je v této oblasti HPV na velmi nízké úrovni stejně jako na v Útěchově [T].

3.2.4 Měřená lokalita Kanice

Měřená lokalita v Kanicích se nachází 2620 m vzdušnou čarou severozápadně od obce Kanice (měřeno od Obecního Úřadu Kanice) v nadmořské výšce 352 m n. m. (Obr. 3-6).

Obr. 3-6: Měřená lokalita – Kanice [D]

Skladba měřeného místa je tvořena bukovými stromy stáří 11-14 let [U] (Obr. 3-7). Buk má pro infiltraci vody do zeminy na rozdíl od smrku v mnoha ohledech velmi příznivé vlastnosti. Svým na živiny bohatým opadem (O) tvoří A horizont (hrabanku) v různém stupni rozkladu (Obr. 3-8), který směrem dolů vytváří vrstvu humusu (H). Z důvodu velké pórovitosti mají obě vrstvy velmi vysokou infiltrační schopnost. Bukový porost při atmosférické srážce její velkou část převede k povrchu zeminy stokem po listu a po kmeni z důvodu velmi jemné a hladké struktury kůry.

Obr. 3-7: Lesní porost – Kanice [Foto: D. Bartoněk]

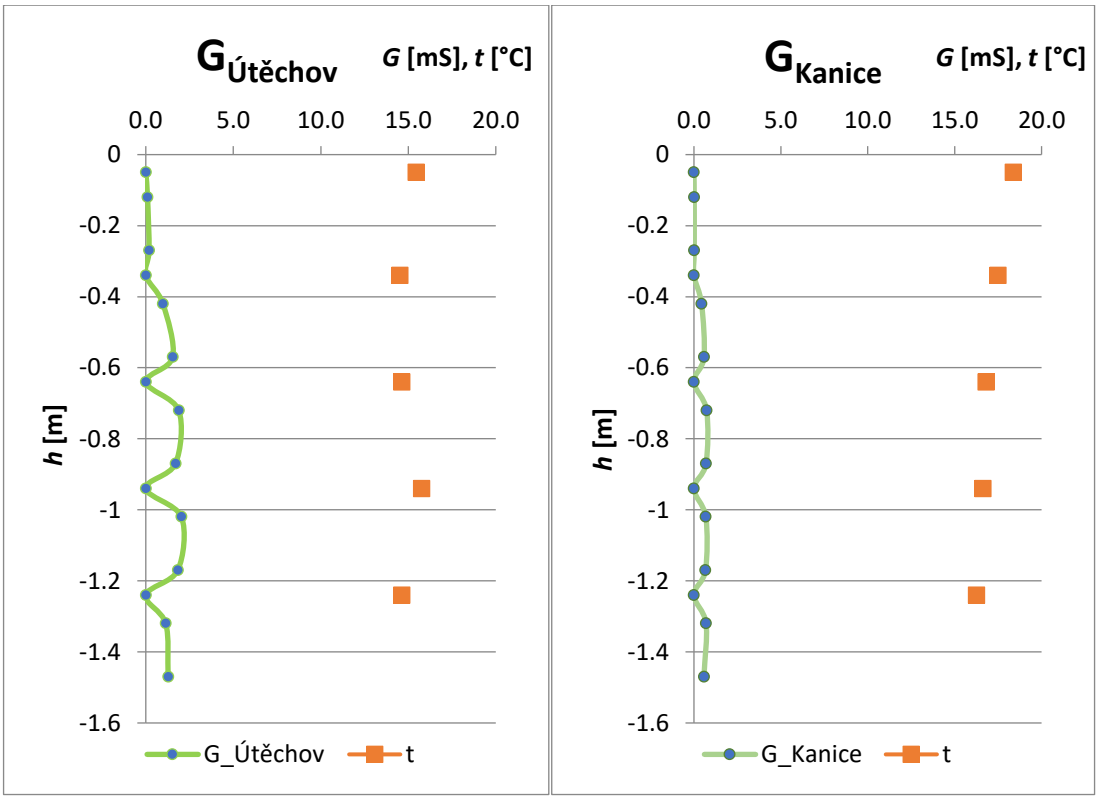
Měřicí zařízení se v terénu na lokalitě Kanice nachází v prostoru trojúhelníka, jehož vrcholy vymezují stromy označené červeným pruhem (Obr. 3-7). Umístění přístroje Z-metr IV a trubic s elektrodami EIS v zemině je schematicky znázorněno na (Obr. 3-8).

Obr. 3-8: Umístění měřicího zařízení – Kanice [Foto: D. Bartoněk]

4 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Měření metodou EIS bylo na obou lokalitách zahájeno v červenci 2018, a to řešením projektu QK1810415 [X] a interního projektu IGA LDF_P_2019014 [Y] Lesnické a dřevařské fakulty a ŠLP Masarykův les Křtiny Mendelovy university v Brně. Projekt byl z hlediska aplikace metody EIS a měřicí aparatury pilotní. Nebyly dostupné žádné geologické a ani klimatologické informace. Z hlediska instalace měřicích trubic s elektrodami EIS na lokalitách nebyly dostupné žádné podklady, informace či praktické zkušenosti. Proto nebyl v době zahájení monitorování vznesen žádný požadavek na korelaci měřených dat s některou ze standardních měřicích metod infiltrace vody do zeminy. Zjištěné elektrické charakteristiky byly korelovány pouze vzájemně s cílem dokumentovat metodou EIS rozdílnost infiltrace srážkové vody v lesním porostu přibližně stejného stáří, vzrůstu a zapojení, avšak odlišných druhů. Na lokalitě Útěchov se jedná o smrkový a na lokalitě Kanice o bukový lesní porost.

Ihned po instalaci trubic s elektrodami EIS byla na základě prvního provedeného měření ověřena volba lokalit z hlediska horizontů zemin. Srovnání bylo provedeno na základě vyhodnocení elektrické vodivosti *G* zeminy měřené v různých hloubkách, kdy srovnávací rovinou byl zemský povrch (Obr. 4-1). Zpracování naměřených dat z obou lokalit, výpočet *G* pro grafické zpracování a výpočet dalších veličin je uvedeno v příloze č. 3.



Obr. 4-1: Posouzení geologických horizontů zeminy obou lokalit na základě měřené elektrické charakteristiky

V lokalitě Útěchov se podařilo měřicí aparaturu instalovat 03.07.2018 a v lokalitě Kanice později 19.07.2018.

Povětrnostní podmínky pro Brno [S] jsou uvedeny v příloze č. 1 a je zřejmé, že se mírně lišily. V obou dnech však byla maximální teplota vzduchu okolo 27 °C (03.07.2018 jí bylo dosaženo až kolem 18:00 h, zatímco 19.07.2018 již kolem 15:00 h), v obou dnech byly nulové srážky, odlišný však byl průběh vlhkosti vzduchu (kdy 03.07.2018 byla maximální vlhkost okolo 40 %, zatímco 19.07.2018 byla maximální vlhkost 78 % a vlhkost se držela nad 40 % po celý den). Hodnoty proudění větru se také lišily. Lze se domnívat, že uvedené rozdíly potvrzují i kvantitativně odlišné průběhy charakteristik elektrické vodivosti *G*. Na základě jejich kvalitativního průběhu však lze konstatovat analogické zemní horizonty (zlomy v průběhu charakteristik jsou pozorovány ve stejných hloubkách) a lze tedy potvrdit správnost volby lokalit z geologického hlediska.

Bylo proto doporučeno, a následně i realizováno, provést hodnocení obou lokalit i vzhledem k povětrnostním datům. Za tímto účelem byla využita měsíční statistika dat ČHMÚ z meteostanice Brno dostupná z webových stránek [S].

Aby byl časově korelovatelný záznam s daty ČHMÚ (měření probíhá vždy v 7:00 h), jsou data elektrických charakteristik a teploty zeminy snímána v šestihodinových intervalech. Vzhledem ke skutečnosti, že v podmínkách lesního porostu nebylo možné z lokalit realizovat automatický online přenos dat, byla data v podobě textových souborů snímána manuálně do přenosného zařízení vždy po 2 měsících měření (interval byl zvolen s ohledem na životnost napájecího zdroje přístroje). Jednorázově se potom jednalo o zpracování poměrně objemné dávky dat.

Surová data jsou systematicky uložená a dostupná v textovém souboru „.csv“ ze stránek http://zmeter-utechov.dioda.cz/ a http://zmeter-kanice.dioda.cz/. Jedná se o matice o 242 řádcích a 10 sloupcích, z nichž jsou čteny požadované údaje. Surová data z lokality Útěchov ze dne 15.03.2019 13:00 hod jsou k nahlédnutí v příloze č. 2. Z důvodu další práce s daty byl vyvinut zpracovatelský software, jehož úkolem je pro jednotlivé časové řady ze surových dat aritmetickým průměrem vyhodnotit jednotlivé měřené parametry za vyloučení hodnot, které vykazují větší odchylku než ±2 %. Uvedená hodnota vychází z přesnosti měření přístrojem Z-metr IV. Zpracovaná data jsou dostupná pro Útěchov na adrese http://zera.artschool.cz/eis.utechov.php a http://zera.artschool.cz/eis.kanice.php pro Kanice. V odkazu „stáhnout“ je možno s nimi dle potřeby dále nakládat viz příloha č. 3 a počítat z dat elektrickou vodivost *G* vyjádřenou na Obr. 4-1, nebo další elektrické veličiny.

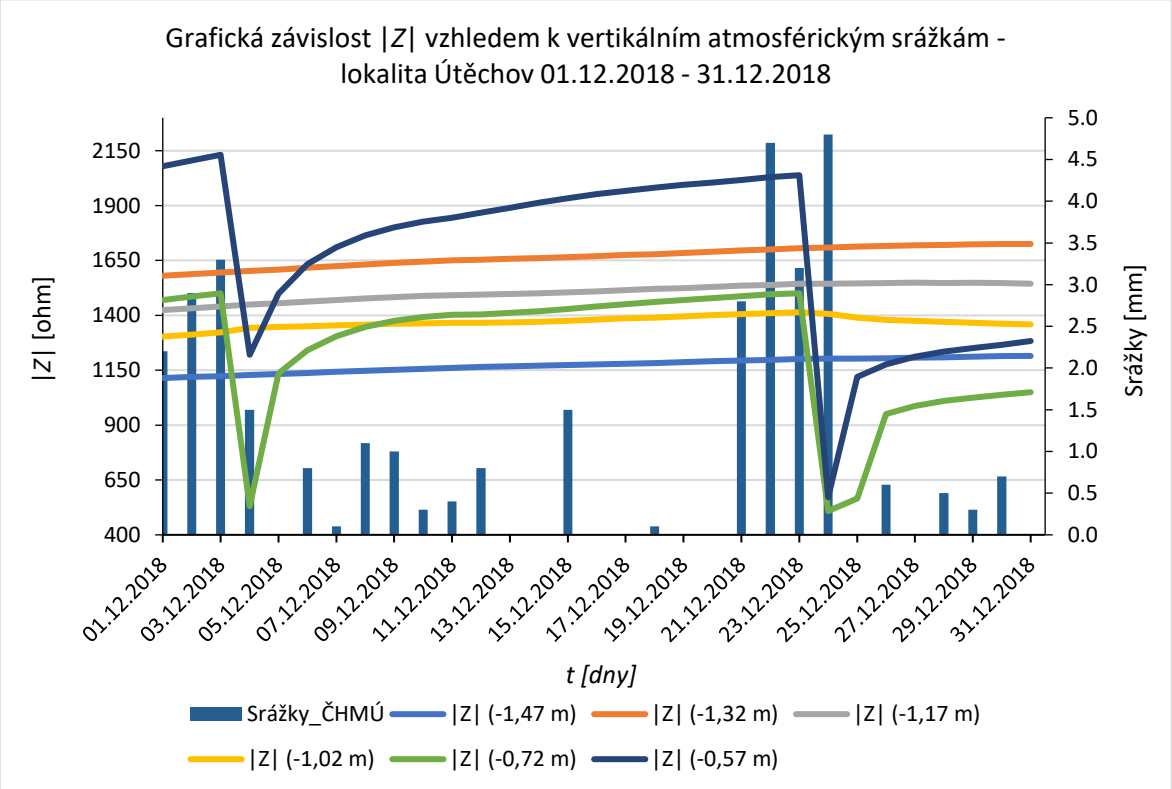
S uvedeným způsobem zpracovaných dat jsou konstruovány grafické závislosti jednotlivých měřených veličin, viz příloha č. 4 charakterizujících zeminu, resp. infiltraci vody do zeminy v odpovídajících úrovních měření v dané lokalitě s charakteristickým lesním porostem. Grafické zpracování je interaktivní a prostým škrtnutím položky

v legendě v záhlaví grafu umožňuje sledovat závislost vybrané měřené veličiny charakterizující zeminu v dané úrovni na zvolené veličině charakterizující povětrnost. Je možné rovněž volit začátek a konec zobrazení všech měřených veličin – údaj na počátku stránky, nebo stejným způsobem filtrovat pouze data zvolené veličiny – uvedeno vždy pod sledovaným grafickým průběhem. Tím je umožněno podrobnější prohlížení dopadu změn atmosférických vlivů na charakteristiky zeminy. Pro zobrazované hodnoty platí, že čím nižší je měřená hodnota elektrického odporu zeminy (obou složek), tím vyšší je obsah vody v ní. Grafy jsou doplněny daty ze stanice ČHMÚ charakterizujícími povětrnostní podmínky pro Brno, která jsou veřejně dostupná na webových stránkách https://www.in-pocasi.cz/archiv/brno/.

V níže uvedených kapitolách jsou popsány závislosti měřených veličin metodou EIS prokazující teoretické předpoklady k chování zeminy a měřeného elektrického odporu vůči povětrnostním změnám v charakteristických lesních prostředích.

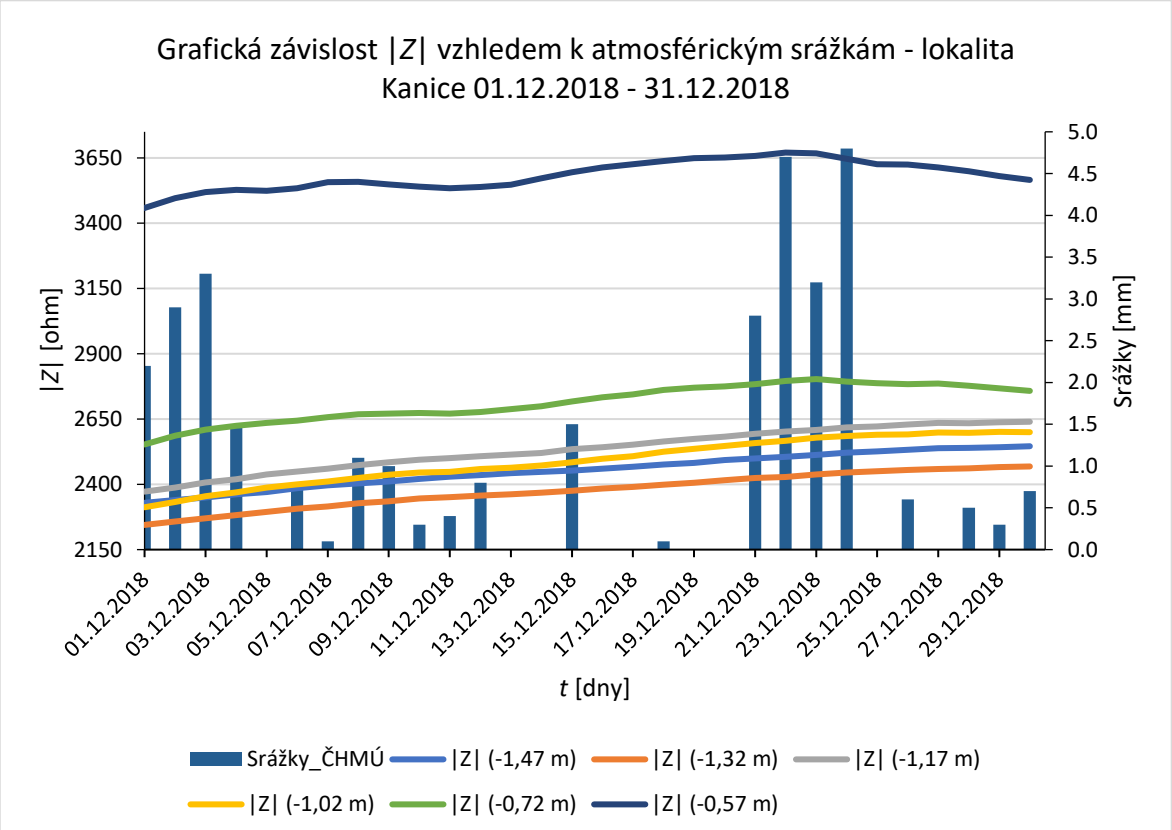
4.1 ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ IMPEDANCE ZEMINY NA VERTIKÁLNÍCH ATMOSFÉRICKÝCH SRÁŽKÁCH

Graf pro lokalitu Útěchov (Obr. 4-2) zobrazuje závislost elektrické impedance |Z| zeminy a měsíčních srážek v období od 01.12.2018 do 31.12.2018, kdy nejvyšší hodnota srážkového úhrnu činila 4,8 mm.



Obr. 4-2: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – lokalita Útěchov

V případě lokality Útěchov (smrkový lesní porost) lze za vyšší četnosti srážek ve dnech po sobě následujících pozorovat v závislosti $|Z| = f(t)$ poměrně prudké změny hodnot elektrické impedance v profilech -0,57 m a -0,72 m pod zemským povrchem. V ostatních profilech ke změně na začátku měsíce při srážkách 3,0 mm nedochází. K malé změně v profilu -1,02 m dochází až při srážce 4,7 mm ve druhé polovině měsíce. Z průběhu grafu je patrné, že okamžitě po skončení dodávání vody do zemního profilu vrchní vrstvy zeminy opět vysychají, tj. hodnota elektrické impedance se rovnoměrně zvyšuje, což dokumentuje snižování obsahu vody v zemině v uvedených profilech.
Lze usuzovat, že profil -1,02 m bude pravděpodobně obsahovat vyšší procento zastoupení jílovitých částic v zemině. Reakce na dodávku vody do zeminy, stejně jako její odeznívání jsou velmi pozvolné.
V profilech -1,02 m, -1,17 m, -1,32 m a -1,47 m je zřejmý trend průběžného zvyšování hodnot elektrické impedance, tj. snižování vlhkosti zeminy, v průběhu téměř celého měsíce. Zvýšení hodnot elektrické impedance pro tyto profily ve sledovaném období je průměrně o 10,21 % oproti impedanci na začátku období.
Měřené hodnoty elektrické impedance zeminy v lokalitě Útěchov se v hodnoceném období pohybovaly pro všechny zemní profily od 500 Ω do 2150 Ω.



Obr. 4-3: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – lokalita Kanice

V případě bukového lesního porostu na lokalitě Kanice (Obr. 4-3) lze ve stejném hodnoceném období, tj. za předpokladu stejného vlivu povětrnostních činitelů, pozorovat oproti předchozímu případu průběhy hodnot elektrické impedance mírně odlišné.
Ve svrchních profilech -0,57 m a -0,72 m pod zemským povrchem jsou zřejmé pouze malé změny hodnot elektrické impedance, které po první srážce na začátku měsíce stabilizují obsah vody v zemině v uvedených profilech až přibližně do konce první poloviny měsíce. Dále se obnovuje proces vysychání zeminy a po další vydatnější srážce koncem měsíce dochází ve sledovaných profilech k výraznější infiltraci vody do zeminy dokumentovaný poklesem měřených hodnot elektrické impedance. Změny nejsou tak razantní jako v případě smrkového lesa jak zvyšováním vlhkosti, tak následným vysycháním.
Oproti lokalitě smrkového lesního porostu sice zůstává ve zde uvedených profilech nižší obsah vody na konci hodnoceného období než na začátku. Ale za to lze v profilech -1,02 m a -1,17 mm po čtyřech po sobě jdoucích dnech srážek ve druhé polovině měsíce dedukovat stabilizaci obsahu vody v zemině (téměř konstantní průběh hodnot elektrické impedance do konce hodnoceného období). Atmosférická srážka sice nemá za následek snižování hodnot elektrické impedance, a tedy zvýšení vlhkosti v zemním profilu, ale v tomto případě pouze nepokračující vysychání profilů.
Z průběhu hodnot elektrické impedance v profilech -1,32 m a -1,47 m je zřejmý trend jejich zvyšování a tím ke snižování vlhkosti téměř v průběhu celého měsíce. Uvedená změna představuje přibližně 9,58 %, což je hodnota srovnatelná s lokalitou smrkového lesního porostu. Koncem měsíce lze však i v těchto profilech pozorovat určitý trend konstantních hodnot měřené elektrické impedance, tedy stabilizace obsahu vody v zemině.
Hodnota elektrické impedance zeminy se v případě bukového lesního porostu pohybuje ve sledovaném období od 2250 Ω do 3650 Ω, což jsou hodnoty vyšší než v případě smrkového lesního porostu v Útěchově. Na uvedené odlišnosti se pravděpodobně, vedle charakteristiky zeminy, budou podílet i biologické vlivy dané podstatou lesního porostu jako je proces tlení listí apod.
Při posouzení průběhu změn charakteristik elektrické impedance zeminy v reakci na atmosférické srážky na obou lokalitách se může pro infiltraci vody do zeminy jako vhodnější lesní porost jevit ten smrkový.
Ale při hodnocení měsíčního trendu celkového vývoje vlhkosti zeminy v celém měřeném půdním profilu vykazuje smrkový lesní porost rozdíl 12,66 % a bukový lesní porost 8,04 % v hodnotách měřené elektrické impedance. Rozdíl je stanoven aritmetickým průměrem v jednotlivých profilech měřených na počátku a na konci sledovaného období. Přestože hodnocené období lze charakterizovat jako období, které nebylo bohaté na atmosférické srážky a de facto tedy docházelo ke snižování vlhkosti zeminy, je možné mezi distribucí vody z atmosférické srážky v obou lokalitách pozorovat přibližně 4,5 % rozdíly. Ačkoli by se na první pohled zdálo, že smrkový lesní porost zachytil více vody z atmosférických

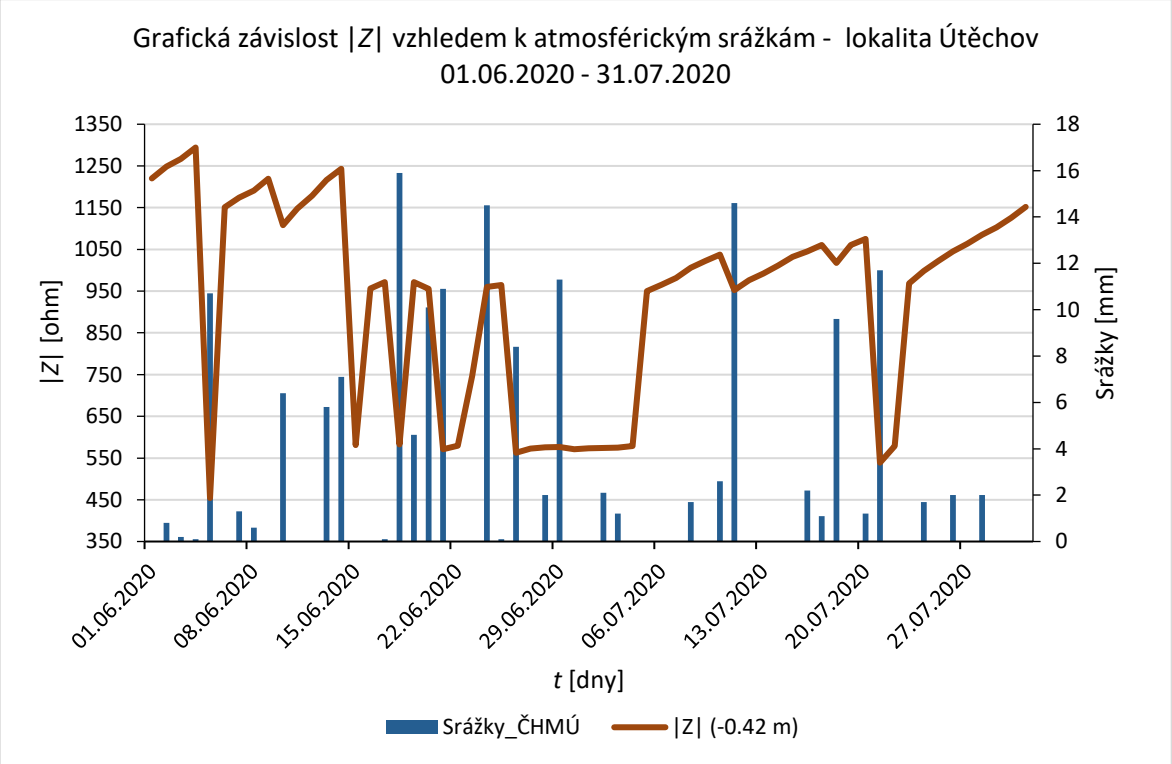
srážek, z hlediska měsíčního vyhodnocení bukový lesní porost jednoznačně ukazuje svou stabilitu v udržování vlhkosti v zemině a také v příjmu a transportu srážky do hlubších vrstev profilu.

Uvedený závěr je formulován pouze na základě výsledků měření elektrické impedance zemin vzhledem k vertikální atmosférické srážce. Je samozřejmě možné, že např. podrobná strukturní kontrola reliéfu, tedy úroveň shody mezi tvary zemského povrchu a geologickou strukturou podložního horninového tělesa, či jiné aspekty by mohly uvedené závěry přehodnotit např. ve smyslu vlivu horizontální srážky apod.

4.2 ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ IMPEDANCE ZEMINY NA VERTIKÁLNÍCH ATMOSFÉRICKÝCH SRÁŽKÁCH

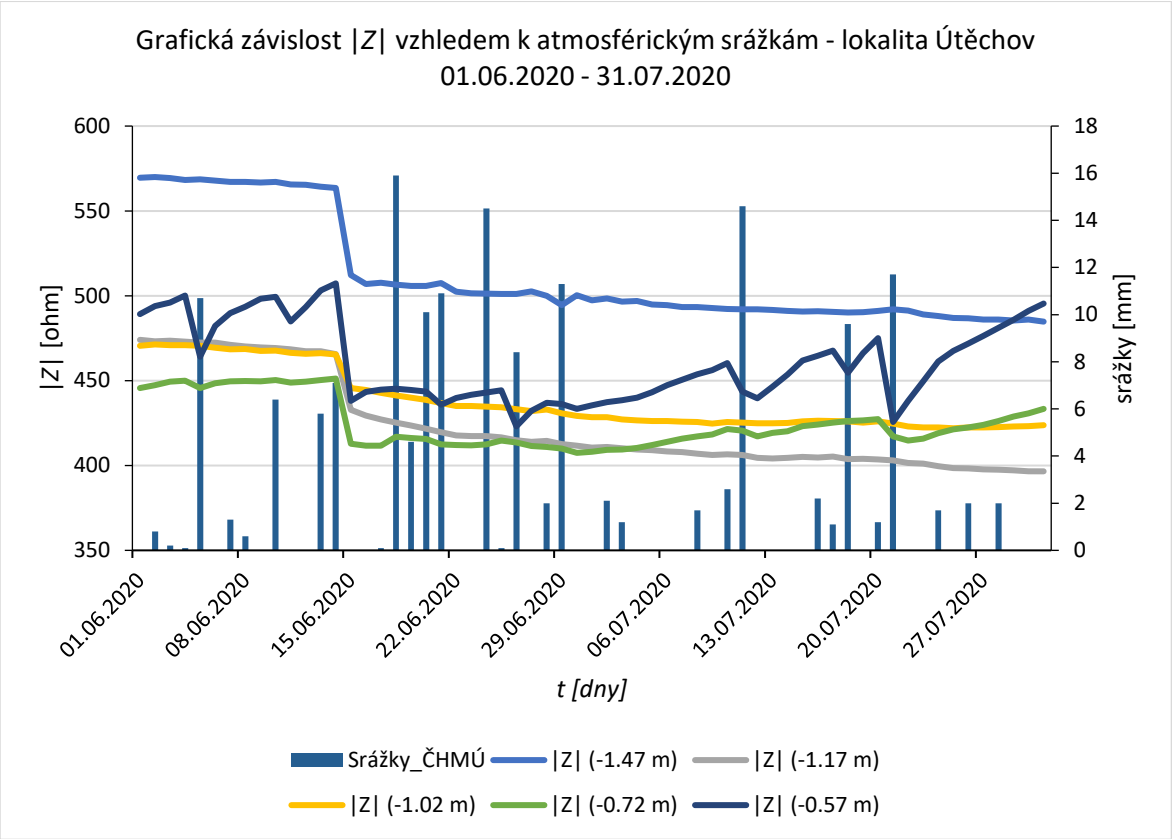
Zpracovány jsou grafy (Obr. 4-4, Obr. 4-5 a Obr. 4-6) zobrazující závislost elektrické impedance |*Z*| zeminy a srážkových úhrnů pro hodnocené období od 01.06.2020 až 31.07.2020 tedy 61 dnů, ve kterých byly dle dostupných meteorologických údajů z ČHMÚ zaznamenány četné vertikální srážkové úhrny celkem ve 32 dnech, kdy jejich nejvyšší hodnota činila 15,9 mm. Jejich dopad na průběh měřených hodnot elektrické impedance je analyzován stejným postupem jako v předchozí kapitole 4.1.

V případě lokality Útěchov se smrkovým lesním porostem je ze závislosti |*Z*| = f(*t*) opět zřejmá poměrně výrazná změna charakteristiky v důsledku vertikální srážky ve svrchním profilu tedy -0,42 m viditelná v grafu (Obr. 4-4).



Obr. 4-4: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Útěchov

Méně výrazná, ale přesto identifikovatelná je odezva v profilech -0,57 m, -0,72 m (Obr. 4-5), kde je změna průběhu |*Z*| patrná ve dnech s vydatnějším srážkovým úhrnem. V profilech -1,02 m, -1,17 m a -1,47 m pod zemským povrchem jsou změny průběhu charakteristiky |*Z*| identifikovatelné pouze při vertikální srážce na začátku měsíce a poté i při větších úhrnech je již pozvolná.



Obr. 4-5: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Útěchov

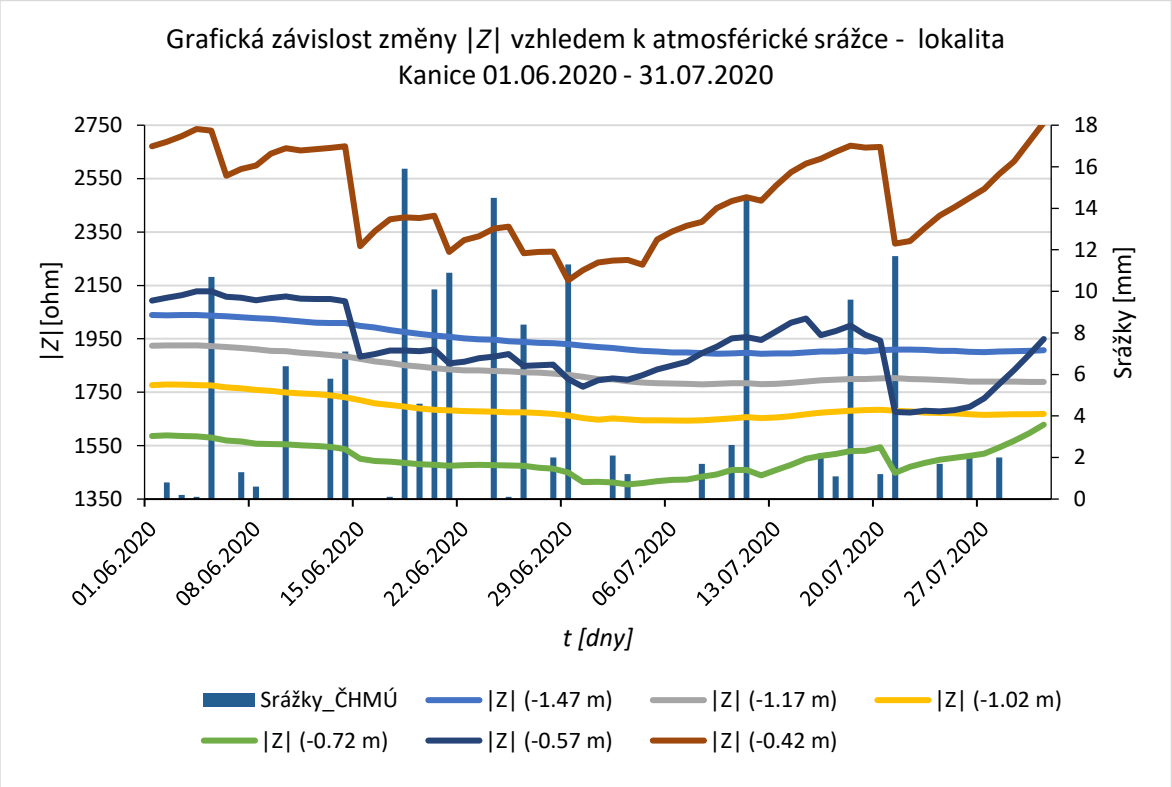
Elektrická impedance se ve sledovaném období pro svrchní profil -0,42 m velice rychle mění v důsledku dynamiky sycení pórů zeminy dešťovou vodou z vertikální srážky. K reakci v hodnotách |*Z*| dochází poměrně rychle, a to ihned po skončení dodávky vody do zeminy, avšak výsledný rozdíl elektrické impedance na začátku a na konci celého měřeného období představuje řádově pouze 3,96 %. Je tedy zřejmé, že se volná voda ze svrchnějších profilů rychle ztrácí a zemina ji neudrží.

Oproti tomu v profilech hlubších je trend snižování hodnot elektrické impedance v celém sledovaném období jen velmi pozvolný, zato rozdíly na začátku a konci období jsou vyšší, například u profilu -1,02 m je to 9,81 % a u profilu -1,47 m dokonce 14,91 %.

Ze závislosti je tedy patrné, že při výraznějších atmosférických srážkách dochází ke změně obsahu vody v pórech zeminy, respektive vlhkosti i v hlubších zemních profilech, ale zatímco ve svrchnějších vrstvách dochází k velmi rychlému vysychání ihned po ukončení

dodávky vody, tak v profilech hlubších lze pozorovat pozvolné zvyšování obsahu vody v zemině až do konce sledovaného období.

Hodnoty elektrické impedance |*Z*| zeminy pro lokalitu Útěchov se v průměru celého měsíce ve všech zde uvedených měřených profilech pohybují od 400 Ω do 1310 Ω.



Obr. 4-6: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Kanice

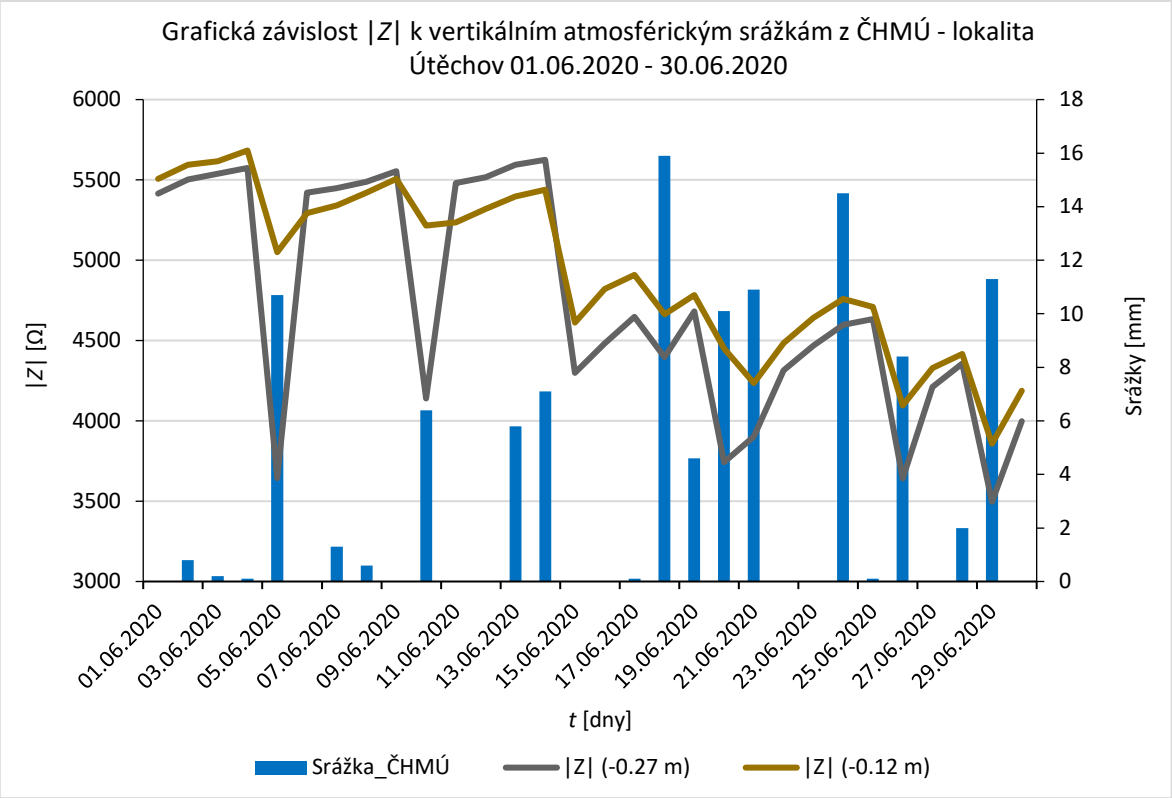
V případě bukového lesního porostu (Obr. 4-6) lze pozorovat podobné průběhy změn elektrické impedance v čase jako u smrkového lesního porostu. Hodnoty elektrické impedance |*Z*| jsou ovšem pro bukový lesní porost vyšší, a tedy obsah vody v zemině nižší. V celém sledovaném období se hodnoty pohybují od 1400 Ω do 2800 Ω.

Ve svrchním zemním profilu -0,42 m až do profilu -0,72 m je viditelné, že změna impedance je stejně dynamická, jako tomu bylo u smrkového lesního porostu. Rozdíl průběhu hodnot |*Z*| mezi jednotlivými srážkovými epizodami však vykazuje menší rozsah a po odeznění srážky je jejich nárůst pozvolný. Uvedené lze vysvětlit tím, že se voda z pórů zeminy distribuuje jiným mechanismem než v případě smrkového lesního porostu. Rozdíl v elektrické impedanci na začátku a konci sledovaného období je v případě bukového lesa dokonce horší než pro les smrkový, jelikož na konci sledovaného období je o 5,14% vyšší než na začátku. U zemního profilu -0,52 m jsou změny impedance ve sledovaném období výraznější než u smrkového porostu, ale celkové snížení hodnot elektrické impedance oproti začátku období je 4,94 %. U stejného sledovaného profilu ve smrkovém lese byla impedance vyšší o 2,25 % oproti začátku sledovaného období.

V profilech hlubších je trend snižování hodnot elektrické impedance v celém sledovaném období plynulý a velmi pozvolný. Rozdíl velikosti hodnot elektrické impedance na začátku a konci sledovaného období je u profilu -1,02 m 5,91 %, u profilu -1,17m je dokonce 6,92 % a u profilu -1,47 m 6,38 %. Procentuální změny jsou opět oproti druhé sledované lokalitě nižší.
Zajímavé je, že opačný trend nastává u profilů -0,57 m, kdy v Kanicích je hodnota $|Z|$ na konci o něco nižší, zatímco v Útěchově dokonce vyšší. Tento jev způsobuje zřejmě některý z faktorů (větší obsah jílovitých částic, větší rozrušenost profilu živočichy atd.), který je ve výše zmíněných zemních profilech pro srovnávané lokality odlišný.
Reakce zeminy na vydatné a četné atmosférické srážky v období 01.06.2020 – 31.07.2020 při níž se hodnoty elektrické impedance na obou lokalitách ve svrchnějších vrstvách -0,42 m, -0,57 m i -0,72 m výrazně mění, tedy dochází k vyplnění zemního profilu vodou a následnému vysychání je v případě obou lokalit identifikovatelná.

V případě bukového lesního porostu je také patrné, že při vyšší a četnější vertikální atmosférické srážce reaguje na srážku identicky polovina zemního profilu, tedy od -0,42 m až po -0,72 m. Odlišně ovšem druhá polovina profilů -1,02 m a -1,17 m a -1,47 m, kde je změna pozvolná a nepatrná. Dalo by se tedy konstatovat, že zemina při lepším vyplnění pórů vodou lépe infiltruje nově dodané atmosférické srážky. U zeminy v porostu smrkovém reagují obdobně profily od -0,42 m, -0,57 m, -0,72 m a dokonce i -1,47 m. V profilech -1,02 m a -1,17 m je změna nepatrná a pozvolná. Uvedené lze vysvětlit úvahou, že zemina v případě smrkového porostu vysychá v bezdeštném období více a rychleji než v případě bukového porostu, a proto větší část objemu srážky vyplní svrchnější profily a do hlubších se dostane jen nepatrná část srážky. V případě profilu -1,47 m smrkového porostu se na změnách průběhu charakteristiky elektrické impedance podílí kromě srážek i jiné faktory (větší obsah jílovitých částic, větší rozrušenost profilu živočichy atd.).

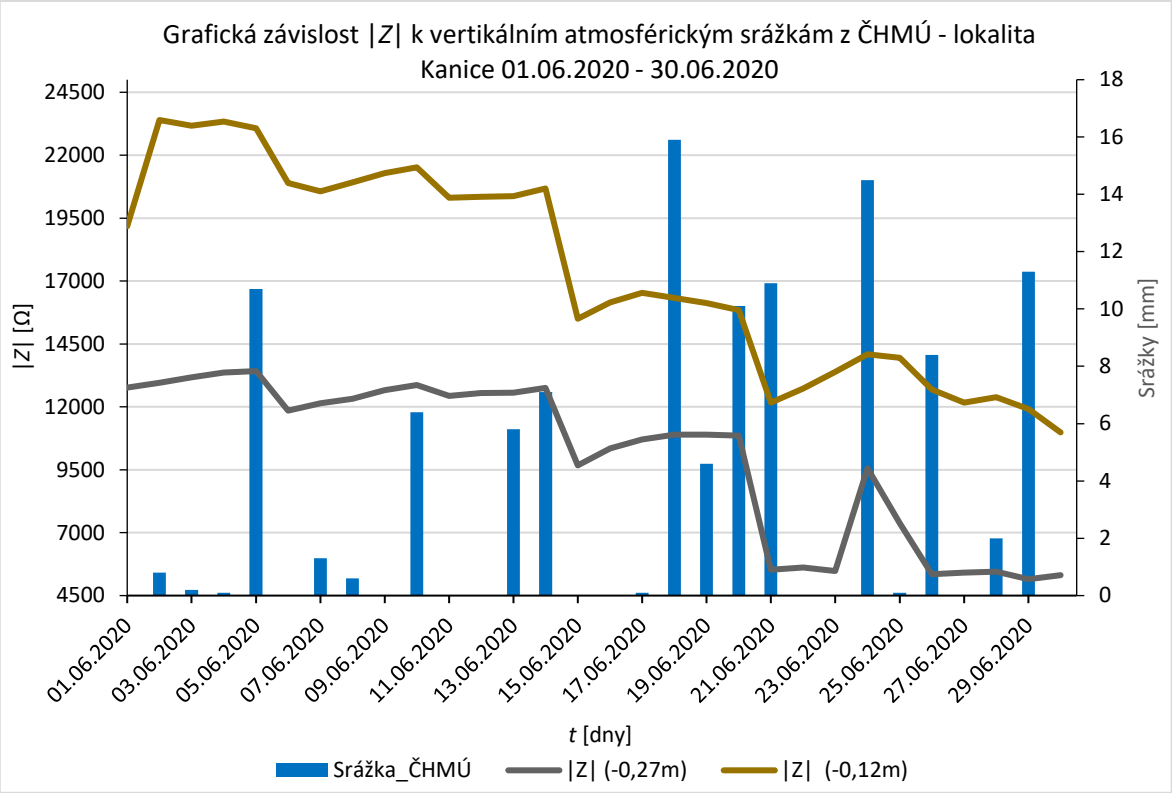
Z grafických závislostí na Obr. 4-7 a Obr. 4-8 zachycujících změny elektrické impedance zeminy v souvislosti s atmosférickou srážkou ve dvou svrchních vrstvách je zřejmé, že při vydatnějších vertikálních atmosférických srážkách reagují na infiltraci vody do zeminy svrchní profily zeminy v bukovém lesním porostu v Kanicích i ve smrkovém lesním porostu v Útěchově podobným způsobem.



Obr. 4-7: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Útěchov

Zatímco v profilu -0,12 m se u smrkového lesního porostu snížila hodnota elektrické impedance za celé sledované období o 23,46 % a u profilu -0,27 m o 23,16 %, tak u bukového lesního porostu to za celé sledované období v profilu -0,12 m bylo o 43,16 % a u profilu -0,27 m dokonce o 57,6 %. Z uvedeného hlediska jsou rozdíly pro obě lokality značné a z hlediska zadržení a distribuce infiltrované vody do zeminy vychází lépe pro lesní porost bukový.

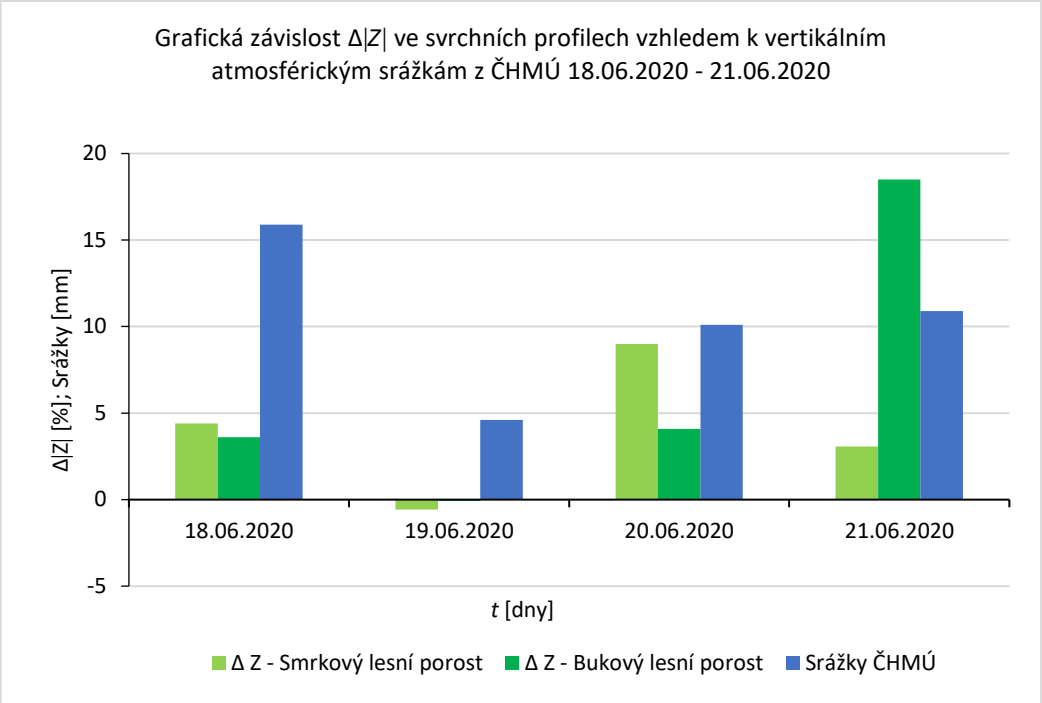
Ze srovnání obou grafů je rovněž zřejmé, že pro bukový les není vysychání v měřeném profilu pro sledované období tak vysoké. Opět to tedy potvrzuje předpoklad, že bukový lesní porost umí s atmosférickými srážkami při procesu infiltrace do zeminy lépe pracovat.



Obr. 4-8: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Kanice

Je vhodné věnovat pozornost i dynamice změn elektrické impedance zeminy. Při hodnocení změn elektrické impedance zeminy ve dnech 19.06.2020 až 21.06.2020 (Obr. 4-9), kdy ve čtyřech dnech po sobě jdoucích byly zaznamenány srážkové úhrny 15,9 mm, 4,6 mm, 10,1 mm a 10,9 mm lze konstatovat následující:

- V případě nejsvrchnější vrstvy zemního profilu v lokalitě Útěchov je patrné poměrně rychlé opětovné vysychání (Obr. 4-7), v reakci na denní úhrny srážek se změny hodnot elektrické impedance zeminy projevují velmi dynamicky a po první srážce 15,9 mm dosahují průměrně 4,4 %, po srážce 4,6 mm není reakce prakticky žádná -0,6 %, odezva na srážku 10,1 mm je necelých 9 %, v posledním dnu byla reakce na poslední vertikální atmosférickou srážku průměrně 3 %.
- V lokalitě Kanice (Obr. 4-8) je změna pozvolná s tendencí dlouhodobějšího udržení zvýšeného obsahu vody v zemině, resp. vlhkosti zeminy ve svrchním profilu, v reakci na denní úhrny srážek změny hodnot elektrické impedance zeminy po první srážce dosahují přibližně 3,6 %, po druhé srážce není reakce prakticky žádná jen 0,1 %, po třetí 4,1 % a reakce na poslední vertikální atmosférickou srážku byla 18,5 %.



Obr. 4-9: Graf závislosti změny |Z| ve svrchních profilech vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám

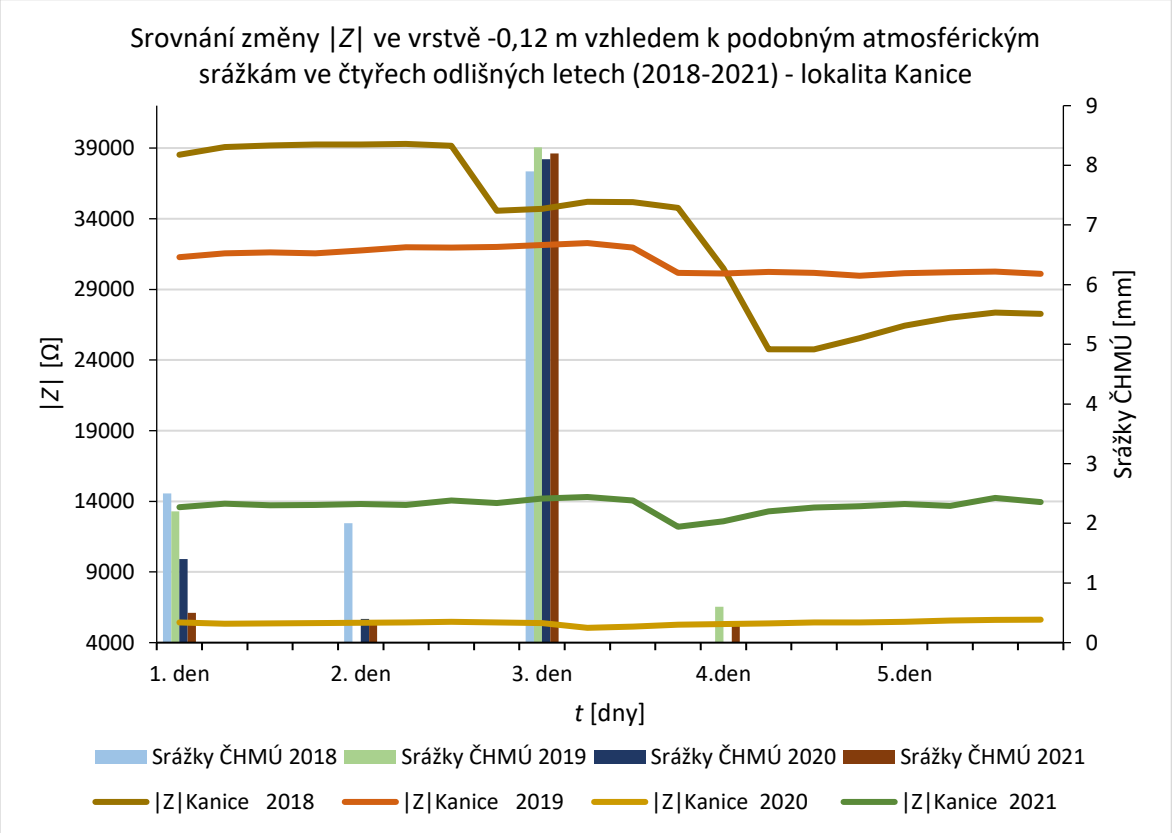
Uvedené zpracování dokumentuje již dříve uvedenou úvahu, že bukový lesní porost na rozdíl od smrkového lesního porostu dokáže s vertikální atmosférickou srážkou „lépe hospodařit“ z hlediska zadržení vody v měřeném zemním profilu.

4.3 ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ IMPEDANCE ZEMINY NA VERTIKÁLNÍ ATMOSFÉRICKÉ SRÁŽCE SROVNATELNÉ INTENZITY

Ve zpracovaných grafech (Obr. 4-10 a Obr. 4-11) je zobrazena závislost elektrické impedance |Z| zeminy v profilu -0,12 m a srážkových úhrnů v pěti po sobě jdoucích dnech ze čtyř odlišných let. Data jsou z prosince 2018, listopadu 2019, listopadu 2020 a ledna 2021. Z grafu je viditelná podobnost srážkových úhrnů dle dostupných meteorologických údajů z ČHMÚ. Vliv na průběh měřených hodnot elektrické impedance, je analyzován stejným postupem jako v předchozích kapitolách 4.1 a 4.2.

Z průběhů měřených na lokalitě Kanice (Obr. 4-10) je zřejmé, že počáteční hodnota elektrické impedance v roce 2018 byla 38500 Ω a po atmosférické srážce 3. den prudce klesla na hodnotu 24750 Ω, tj. o 35,7 %. V letech 2019 a 2021 byl pokles hodnot elektrické impedance po atmosférické srážce zaznamenán rovněž 3. den, avšak pravděpodobně z důvodu, že počáteční hodnota elektrické impedance byla v letech 2019, 2020 a 2021 výrazně nižší, tedy lze předpokládat, že obsah vody v zemině byl proti roku 2018 vyšší, a to postupně o 18,8 %, 85,9 % a 64,7 %. Rozdíly lze pozorovat i mezi dalšími

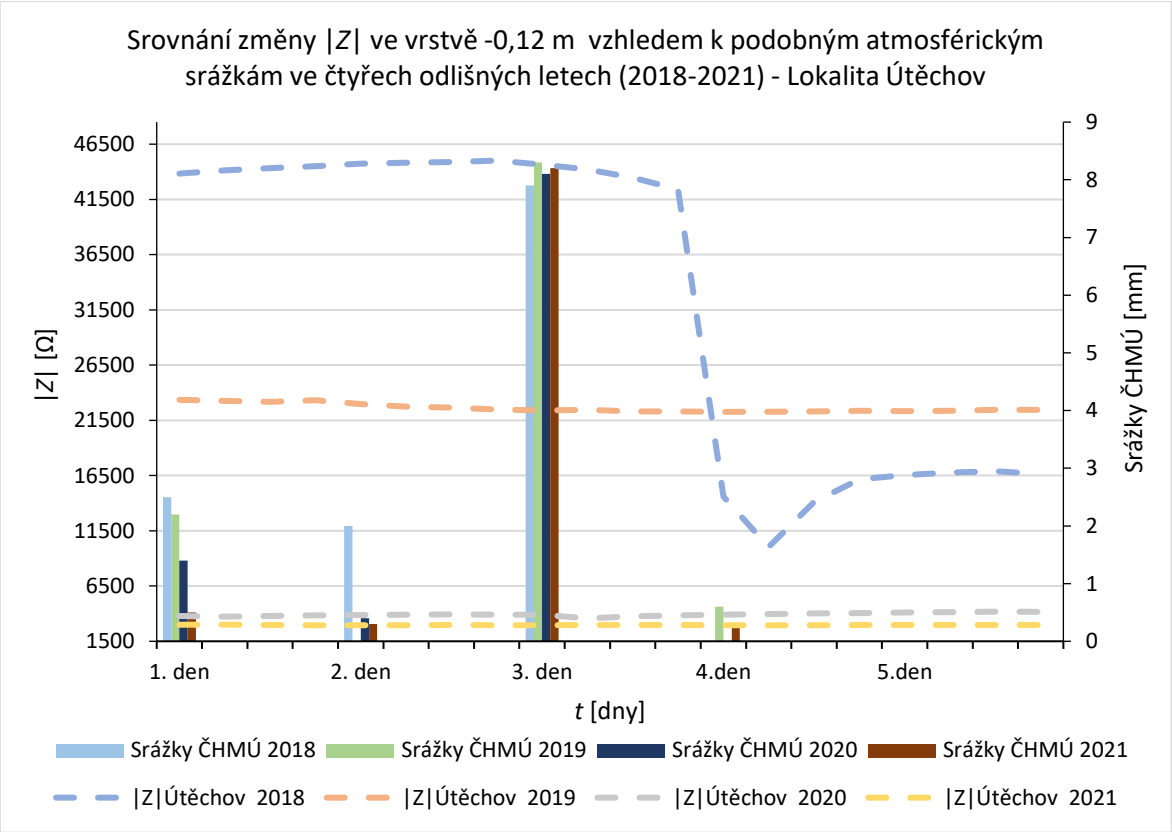
roky, např. v roce 2021 byla počáteční hodnota elektrické impedance nižší o 43,6 % oproti hodnotě z roku 2019. Lze tedy předpokládat, že z uvedeného důvodu jsou změny hodnot v důsledku atmosférické srážky obdobné intenzity v těchto letech méně výrazné. V roce 2019 je pokles hodnot elektrické impedance o 5,6 %, v roce 2020 o 6,9 % a v roce 2021 o 14,7 %. Obecně tedy lze říci, že čím vyšší je hodnota elektrické impedance před atmosférickou srážkou, tím méně jsou zaplněny póry zeminy vodou a tím dochází k většímu rozdílu v impedanci v zemině po atmosférické srážce po jejich zaplnění vodou. Z grafu je dobře viditelné i to, že zemina neudrží vodu v pórech zeminy moc dlouho, ale i dva dny po atmosférické srážce je hodnota elektrické impedance nižší než před ní, nedochází tedy k vysychání.



Obr. 4-10: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve čtyřech odlišných letech (2018-2021) – lokalita Kanice

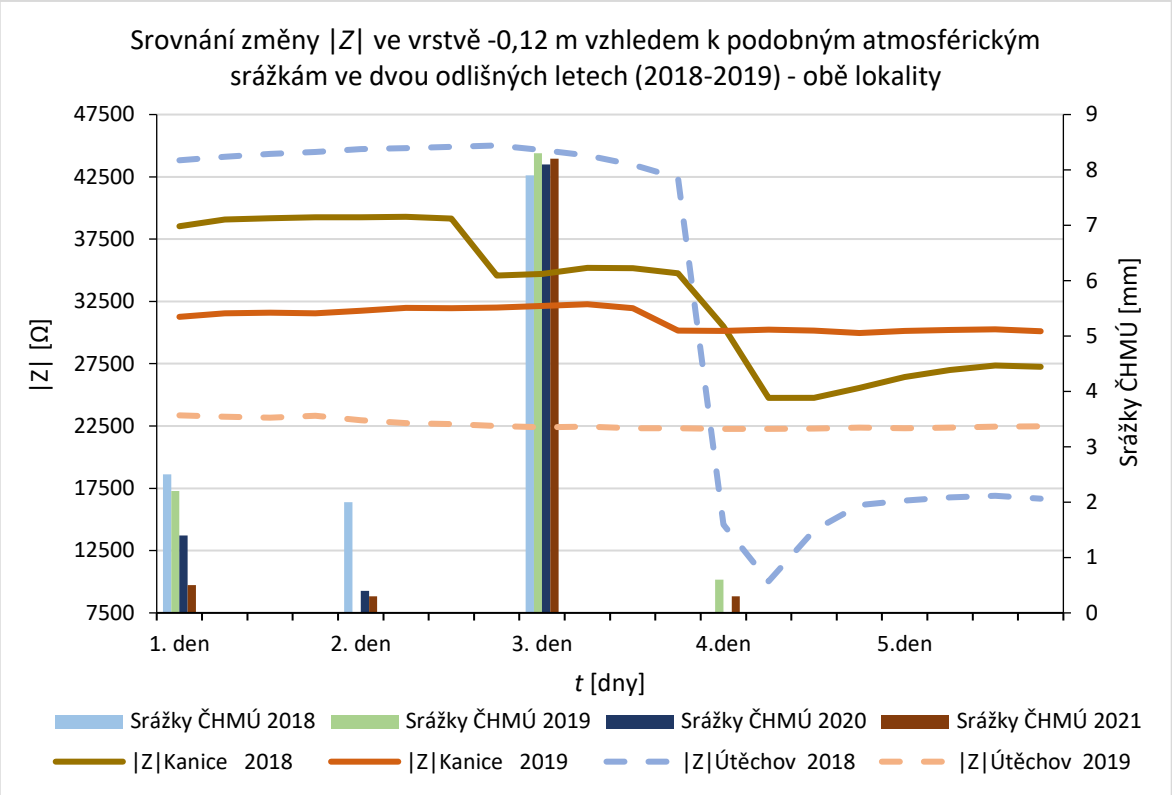
V případě lokality Útěchov (Obr. 4-11) se zemina v roce 2018 při vysoké počáteční hodnotě elektrické impedance chová obdobně jako v Kanicích. Ihned po dodání vody do zemního profilu dochází k naplnění pórů vodou a snížení hodnot elektrické impedance až o 77,7 %. Ovšem při srovnání profilů z let 2019-2021 je změna v hodnotách elektrické impedance po atmosférické srážce nepatrná a v žádném z případů se neblíží ani 10 %. Pro rok 2019 je změna 4,4 %, v roce 2020 je to 8,5 % a v roce 2021 dokonce pouze 1 %.

Z těchto zjištění se dá konstatovat, že při vyšší míře nasycení pórů zeminy vodou je pro Smrkový lesní porost srážka této intenzity pro změnu hodnot elektrické impedance nevýznamná, avšak je třeba respektovat pravděpodobně vyšší obsah vody v zemině v uvedeném profilu -0,12 m proti zjištění z roku 2018, a to především v letech 2020 a 2021.

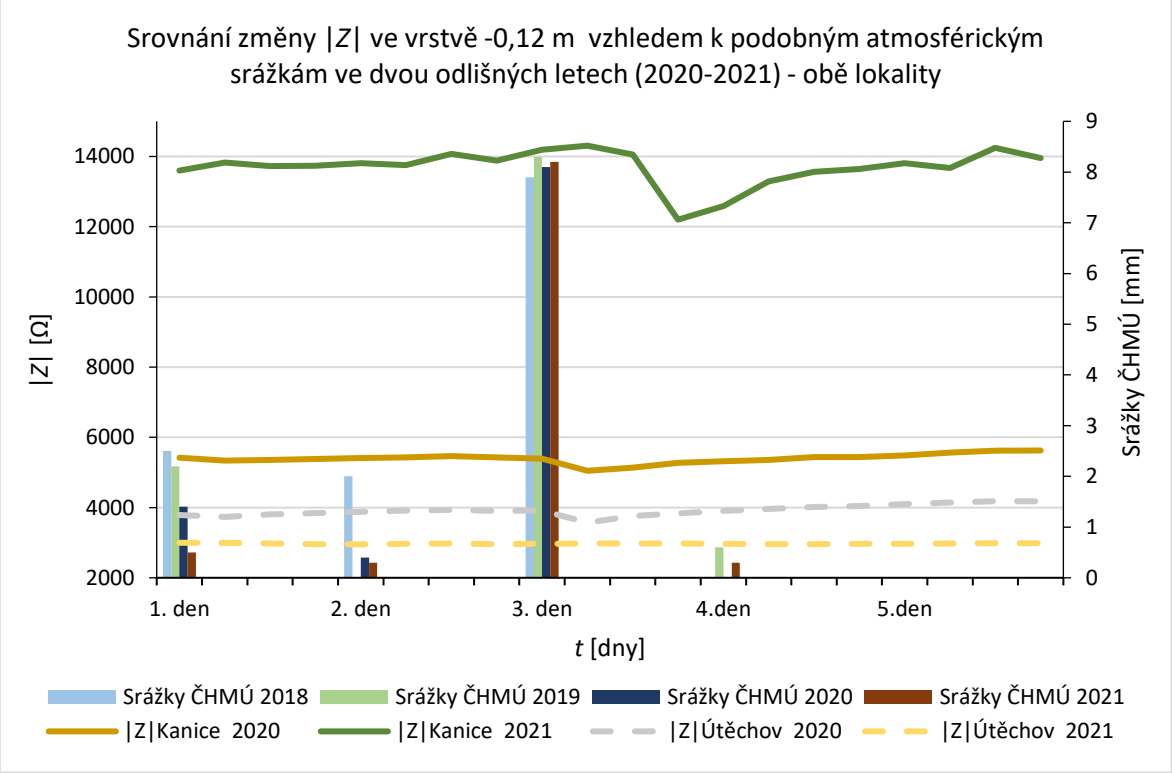


Obr. 4-11: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve čtyřech odlišných letech (2018-2021) – lokalita Útěchov

V grafu pro srovnání dat obou lokalit zároveň ve dvou letech 2018 a 2019 (Obr. 4-12) a letech 2020 a 2021 (Obr. 4-13) je patrná vyšší reakce hodnot elektrické impedance zeminy na atmosférickou srážku při nízkém nasycení pórů vodou pro smrkový lesní porost, ale za to skoro nulová reakce při vyšším nasycení pórů. U bukového lesního prostu je viditelná reakce v obou srovnávaných letech při různé míře obsahu vody v pórech zeminy. Z toho se dá opět vyvodit již několikrát zmíněný předpoklad, že bukový lesní porost dokáže do pórů zeminy lépe distribuovat a udržet vodu z vertikální atmosférické srážky, tedy by se dalo říct, že dokáže s vodou lépe hospodařit.



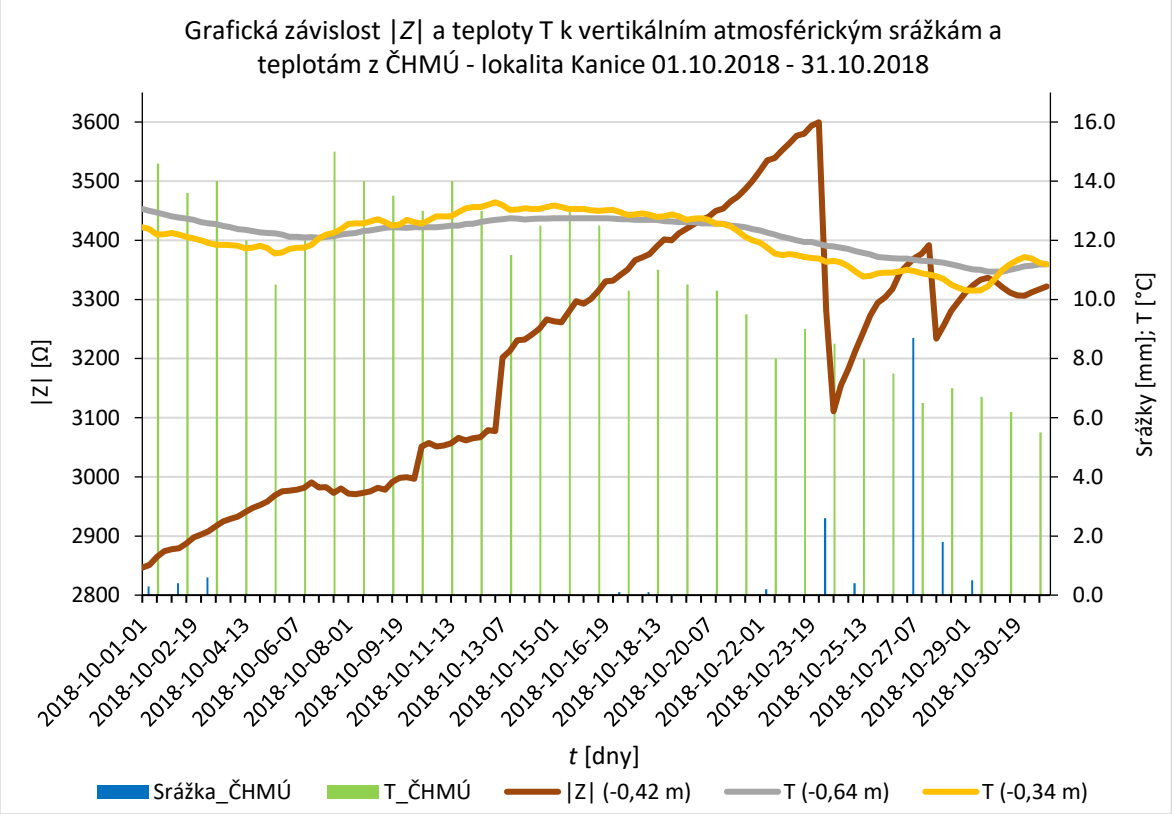
Obr. 4-12: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve dvou odlišných letech (2018-2019) – obě lokality



Obr. 4-13: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve dvou odlišných letech (2020-2021) – obě lokality

4.4 ZÁVISLOST ELEKTRICKÉ IMPEDANCE A TEPLOT ZEMINY NA VERTIKÁLNÍCH ATMOSFÉRICKÝCH SRÁŽKÁCH A TEPLOTÁCH MĚŘENÝCH ČHMÚ

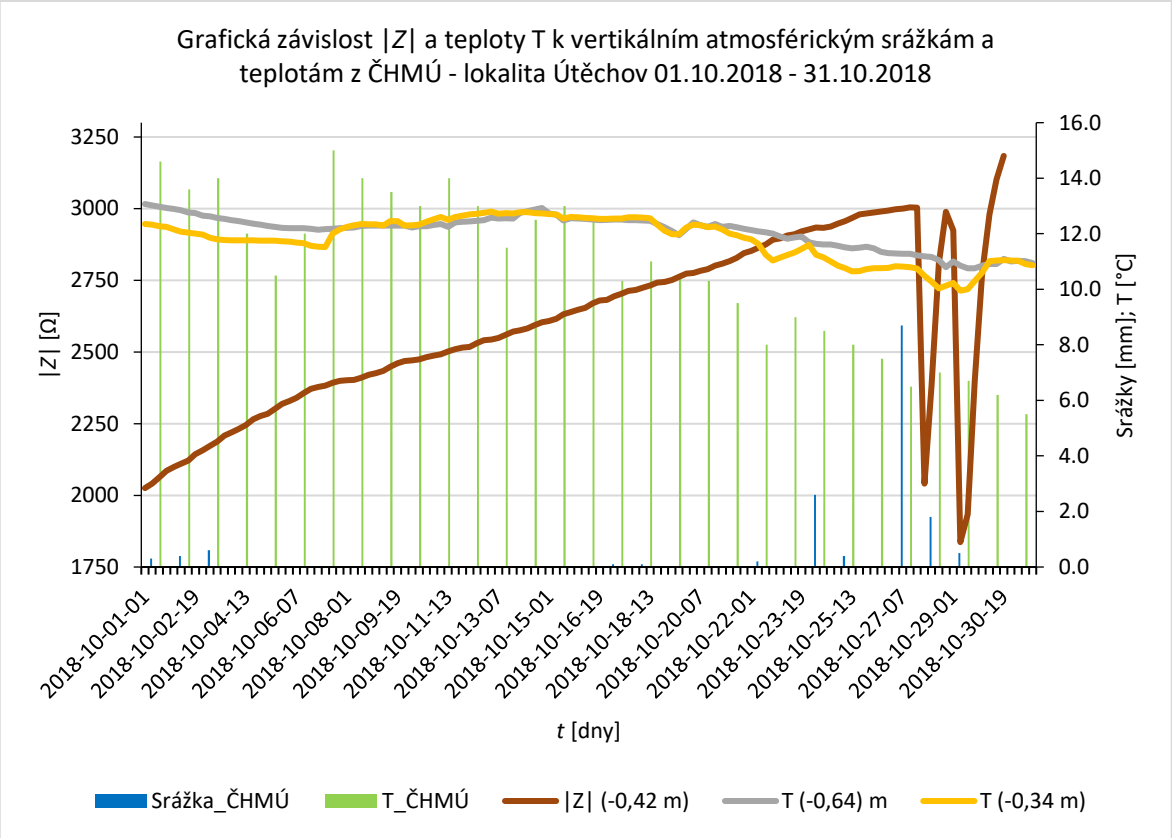
Grafická závislost pro lokalitu Kanice na (Obr. 4-14) ukazuje změny $|Z|$ a změny teplot zeminy vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám a vzhledem ke změně teploty vzduchu ve sledovaném období 01.10.2018 – 31.10.2018.



Obr. 4-14: Graf závislosti |Z| a teploty zeminy vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám a změnám teploty z ČHMÚ – Kanice

Z průběhů změn teplot zeminy v profilech -0,64 m a -0,34 m v grafu je vidět, že změny jsou závislé jak na teplotě vzduchu, tak i na vertikálních atmosférických srážkách (data z ČHMÚ). Kvalitativně jsou trendy průběhu teploty zeminy vzduchu přímo úměrné. Dále je zřejmé, že po dodání vody z větší atmosférické srážky se v zemině zvyšuje obsah volné vody v pórech, hodnota elektrické impedance se snižuje, a i teplota v zemině má klesající trend, tedy snižuje se s vnikající vodou do zemního profilu.

V grafu se ve dnech 07.10 – 10.10 a 11.10 – 13.10 objevuje pozastavení vysychání profilu, přitom teplota v zemině se stále zvyšuje a žádné atmosférické srážky zaznamenány nejsou. Tato deviace od normálního trendu změny elektrické impedance může být způsobená snižování okolní teploty a možná také ubývání slunečního svitu v okolí měřené lokality. Stejná situace se objevuje taktéž na konci sledovaného období.



Obr. 4-15: Graf závislosti |Z| a teploty zeminy vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám a změnám teploty z ČHMÚ – Útěchov

Grafická závislost na (Obr. 4-15) ukazuje, že smrkový les se chová, co se týká změn teploty v zemním profilu velmi podobně jako les bukový. Teplota měřená analogovými snímači na měřicí trubici s elektrodami EIS kopíruje trend změny teploty vzduchu odečítaných na stanici ČHMÚ. Z křivek pro teploty zemních profilů je viditelné, že po každé atmosférické srážce, stejně jako u lesa bukového dochází ke snížení teplot v zemině vlivem vnikající vody.

Ze dvou sledovaných závislostí v kapitole 4.3 lze konstatovat, že změny teplot v zemním profilu reagují snížením teploty na atmosférickou srážku a změny teplot v zemině kopírují na obou lokalitách okolní teploty. Vzhledem ke zjištěné deviaci v grafu pro lokalitu Kanice by se dalo říct, že snížení teploty pravděpodobně v důsledku snížení slunečního svitu může i při bezesrážkovém období zastavit vysychání zemního profilu a podpořit pronikání vody z pórů zeminy z vyšších hlubších profilů.

5 ZÁVĚR

V souladu s cílem své bakalářské práce jsem se zabýval vyhodnocením infiltrace vody z vertikálních atmosférických srážek do zeminy na dvou lokalitách s druhově odlišnou skladbou lesního porostu metodou elektrické impedanční spektrometrie. Práce v sobě sdružuje několik vědních oborů, z nichž za hlavní považuji geologii, hydrogeologii, hydrauliku podzemních vod, meteorologii, měřicí techniku a metrologii, jejichž aspekty nemohou být plně akceptovány a ani je nemohu na základě svých znalostí dostatečně respektovat.

Přesto jsem si dovolil na základě výsledků dosavadních měření formulovat určité odlišnosti z hlediska infiltrace vody z dešťové srážky v lesním porostu smrkovém a bukovém.

Volba měřených lokalit byla provedena ve spolupráci s odborníky z Mendelovy univerzity v Brně, a to z Ústavu geologie a pedologie panem Ing. Davidem Juřičkou, Ph.D. a ze Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny panem Ing. Lumírem Dobrovolným, Ph.D. Z hlediska geologického, pedologického a lesnického (stáří, zapojení a účelové činnosti) jsem tedy považoval lokality za srovnatelné a pozornost jsem soustředil na rozdílnou druhovou skladbu lesního porostu – smrk (lokalita Útěchov), buk (lokalita Kanice) bez toho, že bych rozlišoval, jak se vertikální atmosférická srážka k zemině dostane, tj. jestli například steče po kůře stromů, nebo přímo dopadne na zemský povrch apod. Vzhledem k tomu, že je zemina trvale kryta vzrostlým lesním porostem, v němž nedochází k zásadním pojezdům lesnické techniky, není důvod ani pro výrazné změny jejích hydrofyzikálních charakteristik během vegetačního období. Na základě provedených měření jsem data koreloval vzhledem k meteorologickým datům stanice ČHMÚ pro Brno a posuzoval jsem lokality navzájem.

Na základě uvedených předpokladů si dovolím vyvodit závěr, že pro infiltraci vody do zeminy v lesním porostu má mimo jiných hledisek, jako je např. heterogenita zemního profilu, vzduch uzavřený v pórech zeminy, nerovnoměrné rozdělení vlhkosti ve sledovaném profilu na počátku procesu infiltrace, preferenční cesty apod., zásadní vliv kořenový systém stromů. U smrku ztepilého [V] je kořenový systém rozložen do plochy v horních profilech zeminy a nemá hlavní kůlový kořen. Kořenový systém buku [W] je naopak srdcovitého tvaru, kdy z kořenového uzlu vyrůstají silné kořeny do všech stran. Na základě vyhodnocení výsledků měření se domnívám, že kořenový systém buku dokáže vodou zásobovat i hlubší profily zeminy, a tedy lépe stabilizuje odtokové poměry a snižuje erozi zeminy při extrémních srážkách. Vedlejším důsledkem je i vyšší koncentrace vlhkomilných živočichů žijících v zemině, jako jsou např. žížaly, kteří ji prokypřují a tím rovněž napomáhají infiltraci vody do zeminy. Koruny buků sice omezují četnost kapek deště přímo dopadajících na zemský povrch, avšak současně snižují jejich rychlost a tím

brání i nepřiměřenému rozrušování zemského povrchu a v součinnosti s popadaným listím i tvorbě škraloupu, po němž voda snadno odtéká povrchovým odtokem.

Vzhledem k metodě elektrické impedanční spektrometrie (EIS) a aplikované měřicí aparatuře postavené na přístroji Z-metr čtvrté vývojové řady s možností měření teplot zeminy v definovaných zemních profilech si dovolím je v plném rozsahu pro daný účel doporučit. Přestože instalace trubic s elektrodami do zeminy v daných podmínkách nebyla jednoduchá vzhledem k obsahu jílovitých částic, kamínkům a kořenovému systému stromů, ve svém principu jednoduchou je. Trubice s elektrodami jsou pasivní, tedy s nulovým nárokem na energii. Konstruované jsou jako ztracené, tj. zůstávají v zemině, dělené, tj. hloubka měření pod zemským povrchem je známá a je dle potřeby volitelná. Princip měření je kontaktní, tj. měří se přímo elektrická impedance zeminy obepínající snímač. Počet snímačů na trubici s elektrodami je v základní jednotce až 16 a s externím přepínačem až 256. V tomto případě již ale z konstrukčního hlediska může být problémem vzdálenost snímačů od dataloggeru z hlediska utlumení a zašumění měronosného signálu (v uvedeném případě je potom nutno trubici s elektrodami konstruovat jako aktivní). Z hlediska životnosti je zkušenost s trubicemi s elektrodami umístěnými v zemině 12 let [42] (bez měření teploty) včetně ověření kompatibility vývojových řad přístrojů Z-metr. Ovládání přístroje Z-metr považuji za jednoduché, sběr dat rychlý, efektivní a také intuitivní. Ve volném prostranství je možné využít pro přenos dat mobilní sítě. V zavázaném lesním porostu s výskytem spárkaté a černé lesní zvěře však bylo nutno vyhledat jiná řešení. Přístroj Z-metr včetně napájecího zdroje a jednotky USB umožňující připojení zařízení pro sběr a uložení dat (notebook, tablet, chytrý telefon apod.) je uložen v teplotně a vlhkostně izolovaném boxu, který je zakopán v zemině mimo měřený profil a data jsou sbírána po maximálně 3 měsících (dáno kapacitou záložního napájecího bateriového zdroje).

Pro větší reprezentativnost výsledků a vyvozených závěrů bych doporučoval realizovat komplexní studii dané problematiky, která by se opírala o rozbory fyzikálně-chemických analýz zemin, meteorologická data měřená přímo na lokalitách, separovala by vodu z vertikální atmosférické srážky, vodu stékající po kmenech, rosu, mlhu, zohlednila by členitost terénu a případné další vlivy.

V Brně, 27. května 2021 Dominik Bartoněk

6 POUŽITÁ LITERATURA

[1] ŠANTRŮČKOVÁ, Hana, Stanislav MALÝ a Emil CIENCIALA. Povodně a sucho – krajina jako základ řešení 2. Organická hmota a vodní retenční kapacita půd. *Živa*. 2015, **2015**(2), 69-72.

[2] KUTÍLEK, M., V. KURÁŽ a M. CÍSLEROVÁ. *Hydropedologie*. 2004. Praha, 2004. ISBN 80-01-02237-7.

[3] HLAVÍNEK, Petr a Jaromír ŘÍHA. Jakost vody v povodí. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2815-5.

[4] VALENTOVÁ, Jana. Hydraulika podzemní vody. Vyd. 3. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03625-9.

[5] ŠÁLEK, Jan. Vodní hospodářství krajiny I. Brno: PC-DIR, 1997. ISBN 80-214-0949-5.

[6] WEIGLOVÁ, Kamila. Mechanika zemin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 80-720-4507-5.

[7] KAMENÍČKOVÁ, Ivana. Návody do cvičení (VHK) Hydropedologie. 2013. Brno: CERM, 2013.

[8] KUTÍLEK, M. Vodohospodářská pedologie. 1966. Praha: SNTL, 1966.

[9] RIEDL, Otakar a Dušan ZACHAR. Lesotechnické meliorace. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1973.

[10] HERYNEK, Jaroslav. Vodohospodářské a lesotechnické meliorace a jejich vliv na průběh povodní. 1997. Brno: ICID, 1997.

[11] ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, Jana. Aplikovaná a technická hydrobiologie: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Vyd. 2. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2003. ISBN 978-80-7080-521-3.

[12] SIMONFFY Z. 2003. From Chapter 5 of "Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage." NCC-IAH Publication. No. 4.

[13] ŠINDELÁŘ, R., P. KOVAŘÍČEK, M. VLÁŠKOVÁ, J. HŮLA a M KROULÍK. Měření infiltrace vody do půdy pomocí kruhového infiltrometru mini disk: Measurement of water infiltration into soil using round infiltrometer mini disk. Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i. Praha, 1-5.

[14] PAŘÍLKOVÁ, Jana. EUREKA 2015: 3rd conference and working session within the frame of the international program Eureka, Project No.: E! 7614. Brno: VUTIUM, 2015. ISBN 978-80-214-5149-0.

[15] ŘÍHA, Jaromír. Hydraulika podzemní vody: Modul 01, str. 12-15. Brno, 2005.

[16] PETRÁNEK, Jan, Jiří BŘEZINA, Eva BŘÍZOVÁ, Jan CHÁB, Jan LOUN a Přemysl ZELENKA. Encyklopedie geologie. Praha: Česká geologická služba, 2016. ISBN 978-80-7075-901-1.

[17] WEIGLOVÁ, K.: Mechanika zemin: MODUL BF02-M01: Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005. Učební texty vysokých škol.

[18] CRITCHFIELD, Howard J. General climatology. 4th ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, c1983. ISBN 01-334-9217-6.

[19] KUTÍLEK, M.: Vlhkost pórovitých materiálů, Praha, SNTL, 1992

[20] MATULA S.: Předpovědní půdně – agrohydrologické modely retence vody v půdě v ČR a jejich integrace do databází zemí EU, závěrečná zpráva výzkumného projektu, Ministerstvo zemědělství ČR, 2010.

[21] ŠIMEK, J., J. JESENÁK, J. EICHLER a I. VANÍČEK. Mechanika zemin. Praha: SNTL, 1990. ISBN ISBN 80-03-00428-4.

[22] KRATOCHVÍL, Jiří. Hydraulika. 1. vyd. Brno: VUT, 1991, 148 s. ISBN 80-214-0269-5.

[23] DUCHAN, D., ŘÍHA, J., ZACHOVAL, Z. Hydraulické aspekty infiltrace dešťových vod – Hydraulika vsakování dešťových vod. LITERA 2014, ISBN 978-80-214-5017-2, 160 s.

[24] KUTÍLEK, Miroslav a Donald R. NIELSEN. Soil hydrology. Cremlingen-Destedt: Catena, c1994. GeoEcology textbook. ISBN 39-233-8126-3.

[25] MIYAZAKI, Tsuyoshi. Water flow in soils. 2nd ed. Boca Raton, 2006. ISBN 08-247-5325-9.

[26] Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Second Edition. USA: United States Department of Agriculture; Natural Resources Conservation Service, 1999.

[27] Zákon č. 258/2000 Sb. o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů

[28] HOLMAN, I. P. a kol. (2003): The contribution of soil structural degradation to catchment flooding: a preliminary investigation of the 2000 floods in England and Wales. Hydrology and earth system sciences. Sv. 7, (5), str. 754-765.

[29] GREEN, W. H. a AMPT, G. A. (1911): Studies on soil physics. The Journal of Agricultural Science, Sv. 4, (1), str. 1-24.

[30] CHU, S. T. (1978): Infiltration during an unsteady rain. Water resources research. June, 1978, Sv. 14, (3), str. 461-466.

[31] HORTON, R. E. (1933): The role of infiltration in the hydrologic cycle. Transactions, American Geophysical Union, Sv. 14, (1), str. 446-460.

[32] MATULA, S a KOZÁKOVÁ, H. (1997). A simple pressure infiltrometer for determination of soil hydraulic properties by in situ infiltration measurements. Rostlinná výroba. 43, (4), str. 405-413. ISSN: 0370-663X

[33] MEIN, R. G. a LARSON, C. L. (1973). Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research., Sv. 9, (2), str. 384-394.

[34] KULHAVÝ, Z., a další. (2007): Přetlakový infiltrometr pro terénní stanovení vsakovací schopnosti půd, v M. Soukup, a kol. Zemědělské odvodnění drenáží - Racionalizace využívání, údržby a oprav. VÚMOP, Pardubice.

[35] RAWLS, W. J. 2002: Infiltration Properties. Encyclopedia of Soil Science, s. 689 – 692.

[36] MŰNSTEROVÁ, Z., PAŘÍLKOVÁ, J. Infiltrace vody do zeminy měřená metodou elektrické impedanční spektrometrie. JUNIORSTAV 2019

[37] PAŘÍLKOVÁ a RADKOVSKÝ, 2016. Manuál k přístroji Z-metr IV. Výstup projektu E!7614, Brno

[38] MŰNSTEROVÁ, Z.; PAŘÍLKOVÁ, J.; GOMBOŠ, M.; PAVELKOVÁ, D. Odhad velikosti efektivního zrna zemin metodou EIS v polních podmínkách. ACTA HYDROLOGICA SLOVACA, 2017, roč. 18, č. 2, s. 244-252. ISSN: 1335-6291.

[39] QUITT Evžen (1971). Klimatické oblasti ČSR - Studia Geografica č. 16, s. 1–73.

[40] KŘÍŽ, Michal. Příručka pro zkoušky elektrotechniků - požadavky na základní odbornou způsobilost. 8., aktualiz. vyd. Praha: IN-EL, 2010. Elektro (IN-EL). ISBN 978-80-86230-50-4.

[41] KUTÍLEK, M.: Vodohospodářská pedologie, 2. vyd. Praha: SNTL/ALFA 1978. 261s.

[42] PAŘÍLKOVÁ, J., MŰNSTEROVÁ, Z., MIKULKA, J., DUŠEK, J., NOVOTNÁ, J., JUŘIČKA, D., GJUNSBURGS, B., NEDEV, M., YANEV, Y., GOMBOŠ, M., PAVELKOVÁ, D., Z ZYDROŃ, T., GRUCHOT, A. (2018). Utilization of earth electric impedance mapping in water engineering. Acta Hydrologica Slovaca, Vol. 19, No. 2, 2018, p. 287 – 295 Scientific Paper, English.

7 POUŽITÉ INTERNETOVÉ ZDROJE

[A] https://aa.ecn.cz/img_upload/5c056690afe4c19cfc7c7c1869565537/_stanislav-hejduk-ekosystemove-funkce-tp.pdf, Ekosystémové funkce a služby travních porostů: Splach orné půdy, Stanislav Hejduk [online]. [cit. 2021-02-17]

[B] NOSEK, Viktor. VIDEO: Na řeku Lučinu se valí sesuv půdy, přehrazený tok by zatopil okolí Zdroj: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/video-na-reku-lucinu-se-vali-sesuv-pudy-prehrazeny-tok-by-zatopil-okoli.A100521_084007_domaci_nos IDNES.cz [online]. Praha: iDNES.cz, 2010, 21.05.2010, 8:40 [cit. 2021-2-17]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/video-na-reku-lucinu-se-vali-sesuv-pudy-prehrazeny-tok-by-zatopil-okoli.A100521_084007_domaci_nos

[C] https://slideplayer.cz/slide/5635834/2/images/3/Ob%C4%9Bh+vody+na+Zemi+Transport+atmosf%C3%A9rou.jpg, Koloběh vody na zemi [online]. [cit. 2021-02-12]

[D] https://mapy.cz/zakladni?x=16.6000004&y=49.2667007&z=11, Mapy.cz [online]. [cit. 2021-03-20]

[E] http://svt.pi.gin.cz/vuztweb/doc/rocenka2006/mer_infiltrace.pdf?menuid=531), Metoda měření infiltrace vody do půdy zadešťovacím zařízením [online zdroj]. [cit. 2021-01-01]

[F] http://stavsucha.cz/about-drought/, Monitoring sucha a jeho dopadů – O suchu [online]. [cit. 2021-03-20]

[G] http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/katastrofy/26zasedani/Roznovsky_sucho_230412.pdf, ČHMÚ Brno – Sucho na území ČR a jeho dopady [online]. [cit. 2021-03-20]

[H] https://cs.wikipedia.org/wiki/Voda, Wikipedia.org – Voda [online]. [cit. 2021-02-01]

[I] http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=5054&typ=html, Web Mendelu - Principy hodnocení vybraných ukazatelů kvality půdy [online]. [cit. 2021-03-19]

[J] https://lesycr.cz/tiskova-zprava/ministerstvo-zemedelstvi-radi-jak-spravne-obnovit-les-po-kurovcove-kalamite/, Lesy ČR – Domů – Tiskové zprávy [online] [cit. 2021-04-04]

[K] https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/pece-o-stepi-louky-a-pastviny-stoji-rocne-miliardy-korun-velci-kopytnici-se-o-ne-postaraji-lepe-a-levneji-tvrdi-vedci1, ekolist.cz – zpravodajství – zprávy [online]. [cit. 2021-04-04]

[L] http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?zrnitost, On-line Geologická encyklopedie – zrnitost [online]. [cit. 2021-03-19]

[M] http://rpishop.cz/soucastky/128-analog-devices-tmp36-temperature-sensor.html, RPishop – součástky – analogový teplotní senzor TMP36 [online]. [cit. 2021-03-19]

[N] AlzaPower LinkCore USB A-B. Alza.cz [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: https://www.alza.cz//alzapower-linkcore-usb-a-

b?dq=5871658&kampan=adw4_prislusenstvi-pro-mt_pla_all_obecna-css_kabely-redukce-a-radice_c_9062815___APWCB020c_456135983220_~106264923253~&gclid=Cj0KCQjws-OEBhCkARIsAPhOkIZqoOAPEQmgrSom936En0y240XqRWevV3-Ly0Hu_vkz3c2U_rznnz8aAuFoEALw_wcB

[O] https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/EOPORY/Pesteni_lesu_II/el9_O%20lese%20a%20vode.pdf, akela.mendelu.cz – Voda a les [online]. [cit. 2021-03-19]

[P] http://www.slpkrtiny.cz/, ŠLP Křtiny - o nás [online]. [cit. 2021-04-28].

[Q] https://theses.cz/id/lzrxib/zaverecna_prace.pdf, [ZOUHAR, Martin. Analýza stavu a vývoje obnovy lesa na ŠLP Masarykův les Křtiny (diplomová práce) [online]. Brno: Mendelova univerzita, 2016 [cit. 2021-04-28].

[R] http://www.kvhem.cz/wp-content/uploads/2009/10/DP_Jacka_Lukas.pdf, Stanovení vybraných hydropedologických charakteristik na povodí Modrava 2: Diplomová práce. JAČKA, Lukáš. [online]. Praha, 2009 [cit. 2021-03-19].

[S] https://www.in-pocasi.cz/archiv/brno/?&typ=srazky&historie_bar_mesic=4&historie_bar_rok=2020#monthly_graph, In-Počasí – Úvodní stránka – Archiv – Brno-Tuřany [online]. [cit. 2021-05-01].

[T] http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/hydrologicka-situace/stav-podzemnich-vod, ČHMÚ - Aktuální situace - Hydrologická situace - Stav podzemních vod [online]. [cit. 2021-05-05].

[U] http://mapserver-slp.mendelu.cz/map.phtml?config=slp, p.mapper - MapServer TFE Krtiny (Masaryk Forest) – Forest maps – Forest stand map [online]. [cit. 2021-05-05].

[V] https://ldf.mendelu.cz/uzpl/pestovani_v_heslech/vychodiska/dreviny/drev_bk.html, Mendelova univerzita v Brně – ÚZPL – Pěstování lesa – východiska – dřeviny – Buk lesní (Fagus sylvatica L.) [online]. [cit. 2021-05-12].

[W] https://ldf.mendelu.cz/uzpl/pestovani_v_heslech/vychodiska/dreviny/drev_sm.html, Mendelova univerzita v Brně – ÚZPL – Pěstování lesa – východiska – dřeviny – Smrk ztepilý (Picea abies (L.) Karsten) [online]. [cit. 2021-05-12].

[X] https://starfos.tacr.cz/cs/project/QK1810415#project-participants, QK1810415 – Vliv dřevinné skladby a struktury lesních porostů na mikroklima a hydrologické poměry v krajině.

[Y] https://www.ldf.mendelu.cz/30449-interni-grantova-agentura-iga, LDF_TP_2019014 – Hodnocení vlivu chronické akumulace vysoce mineralizovaných podzemních vod na chemismus ekosystému a charakter bylinné vegetace lužního lesa

[Z] https://cs.wikipedia.org/wiki/Provincie_st%C5%99edoevropsk%C3%BDch_listnat%C3%BDch_les%C5%AF, Provincie středoevropských listnatých lesů

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1: Orientační hodnoty hydraulické vodivosti [6] 12
Tab. 2-2: Faktory ovlivňující infiltraci a retenci vody v zemině 17
Tab. 2-3: Výsledky měření PID kalibrátoru multimetrem FLUKE 24

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1: Splach orné půdy (vlevo) [A], sesuv zeminy (vpravo) [B] 3
Obr. 2-1: Oběh vody (hydrologický cyklus) [C] 6
Obr. 2-2: Schématické rozdělení podpovrchových vod ve vertikálním řezu zeminou [23] .. 8
Obr. 2-3: Difuzní obal minerálních povrchů [6] 10
Obr. 2-4: Schéma srážkoodtokového procesu v modelu SACRAMENTO (ČHMÚ, 2012) 11
Obr. 2-5: Schéma vertikálního řezu zeminou [16] (vlevo) s návazností rozdělení podpovrchové vody (vpravo) 13
Obr. 2-6: Podklad pro grafické vyjádření křivky zrnitosti dle ČSN 731001 15
Obr. 2-7: Vlhkostní zóny v zemním profilu při infiltraci vody do homogenní zeminy dle Bodmana 1944 a), a ve skutečných poměrech b) – čelo zvlhčení je klínovitě ukloněno [41] 20
Obr. 2-8: Z-metr IV (MEA-ZMT43-000) [Foto: D. Bartoněk] 22
Obr. 2-9: HAMEG HM8118 [14] 22
Obr. 2-10: Multimetr FLUKE 8846A [14] 23
Obr. 2-11: Z-metr IV Calibrator [14] 23
Obr. 2-12: Detail zapojení jednoho snímače trubic s elektrodami EIS 25
Obr. 2-13: Analogové teplotní čidlo TMP36 a) [M], datový kabel USB typ A-B b) [N] ... 25
Obr. 2-14: Temperovaný úložný box s přístrojem, kabeláží, záložní Pb baterií a jednotkou USB a), detail měřicích trubic s elektrodami EIS s teploměry b) 26
Obr. 3-1: Lokalita obce Útěchov [D] 28
Obr. 3-2: Měřená lokalita – Útěchov [D] 29
Obr. 3-3: Lesní porost – Útěchov [Foto: D. Bartoněk] 30
Obr. 3-4: Umístění měřicího zařízení – Útěchov [Foto: D. Bartoněk] 30
Obr. 3-5: Lokalita obce Kanice [D] 31
Obr. 3-6: Měřená lokalita – Kanice [D] 32
Obr. 3-7: Lesní porost – Kanice [Foto: D. Bartoněk] 33
Obr. 3-8: Umístění měřicího zařízení – Kanice [Foto: D. Bartoněk] 33
Obr. 4-1: Posouzení geologických horizontů zeminy obou lokalit na základě měřené elektrické charakteristiky 34
Obr. 4-2: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – lokalita Útěchov 36
Obr. 4-3: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – lokalita Kanice 37
Obr. 4-4: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Útěchov . 39
Obr. 4-5: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Útěchov . 40
Obr. 4-6: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Kanice 41
Obr. 4-7: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Útěchov . 43

Obr. 4-8: Graf závislosti |Z| vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám – Kanice....44
Obr. 4-9: Graf závislosti změny |Z| ve svrchních profilech vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám 45
Obr. 4-10: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve čtyřech odlišných letech (2018-2021) – lokalita Kanice 46
Obr. 4-11: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve čtyřech odlišných letech (2018-2021) – lokalita Útěchov 47
Obr. 4-12: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve dvou odlišných letech (2018-2019) – obě lokality 48
Obr. 4-13: Graf závislosti změny |Z| v zemním profilu -0,12 m vzhledem k podobným vertikálním atmosférickým srážkám ve dvou odlišných letech (2020-2021) – obě lokality 48
Obr. 4-14: Graf závislosti |Z| a teploty zeminy vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám a změnám teploty z ČHMÚ – Kanice....49
Obr. 4-15: Graf závislosti |Z| a teploty zeminy vzhledem k vertikálním atmosférickým srážkám a změnám teploty z ČHMÚ – Útěchov 50

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam symbolů

veličina	název	jednotka
Φ …	celkový potenciál pórové vody	[-]
Z …	fázor elektrické impedance	[Ω]
$\|Z\|$ …	modul elektrické impedance	[Ω]
G …	elektrická vodivost	[S]
ET …	evapotranspirační ztráta	[-]
U …	fázor elektrického napětí	[V]
A …	fázor elektrického proudu	[A]
φ …	fázový posun	[-]
w …	hmotnostní vlhkost	[-]
m_w …	hmotnost vody ve vzorku	[kg]
m_d …	hmotnost vzorku zeminy po vysušení	[kg]
ρ_w …	hustota kapaliny	[kg·m^{-3}]
ρ_w …	hustota kapalné části zeminy	[kg·m^{-3}]
ρ_S …	hustota pevných částic	[kg·m^{-3}]
k_N …	hydraulická vodivost nenasyceného prostředí	[m·s^{-1}]
X …	imaginární složka elektrické impedance (reaktance)	[Ω]
X_L …	indukčnost	[Ω]
X_C …	kapacitní reaktance	[Ω]
h_k …	kapilární výška	[m]
ρ_Z …	měrná objemová hmotnost zeminy	[kg·m^{-3}]
V …	objem	[m^3]
ρ_d …	objemová hmotnost suché zeminy	[kg·m^{-3}]
γ …	objemová tíha zeminy	[kg·m^{-3}]
Θ …	objemová vlhkost	[-]
R …	ohmický odpor	[Ω]
V_P …	objemu pórů	[m^3]
V_S …	objem zeminy (celkový)	[m^3]
$TFLO_{in}$ …	povrchový odtok vstupní	[-]
$TFLO_{out}$ …	povrchový odtok výstupní	[-]
n …	pórovitost zeminy	[-]
$\gamma_w h_k$ …	relativní podtlak	[Pa]
f …	rychlost infiltrace	[l/s/ha]
d …	rychlost odvodnění zeminy	[-]

v …	rychlost proudění	[m·s^{-1}]
c …	rychlost vlivem kapilárních sil ze spodních zvodní	[-]
J …	sklon čáry piezometrické výšky (hydraulický gradient)	[-]
k …	součinitel hydraulické vodivosti	[m·s^{-1}]
k_p …	součinitel propustnosti porézního prostředí	[m^2]
q …	specifický průtok	[m·s^{-1}]
S_r …	stupeň nasycení pórů vodou	[-]
g …	tíhové zrychlení	[m·s^{-2}]
H …	tlaková výška	[m]
ω …	úhlová frekvence	[Hz]
μ …	viskozita kapaliny	[kg/(m·s)]
ΔSMC …	změna vlhkosti zeminy	[-]
v …	změna ve velikosti výparu	[-]

Seznam zkratek

ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
ČR	Česká republika
EIS	Elektrická impedanční spektrometrie
PID	Proporcionální integrální derivační regulátor (Proportional – integral – derivate controller)
HPV	Hladina podzemní vody
CHKO	Chráněná krajinná oblast
m n. m.	metrů nad mořem
RLC	Můstek pro měření Reaktance, Impedance, Kapacity (Reactance Impedance Capacitance Bridge)
SMD	Součástka pro povrchovou montáž (Surface Mount Device)
ŠLP	Školní lesní podnik
USA	Spojené státy americké (United States of America)
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
WiFi	Bezdrátové připojení k síti (Wireless Fidelity)

SEZNAM PŘÍLOH

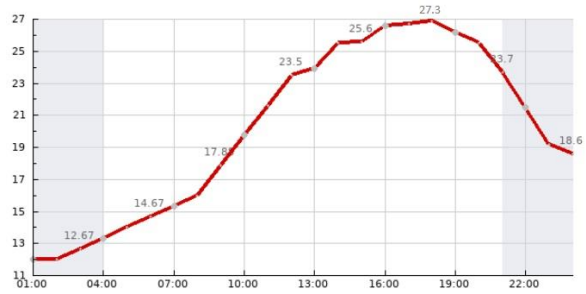
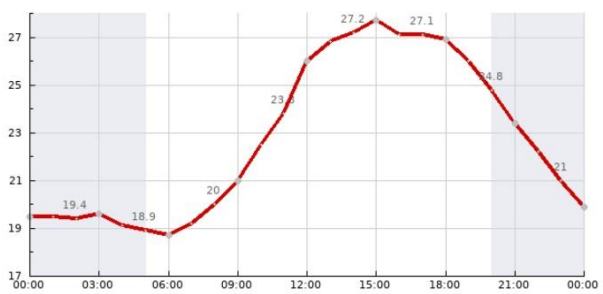
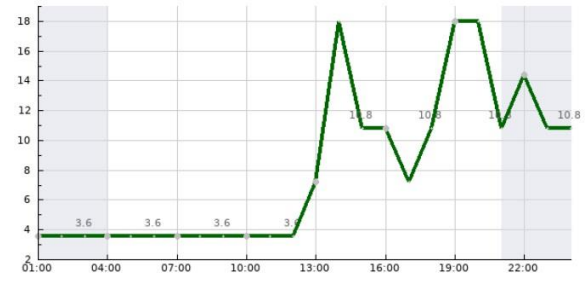
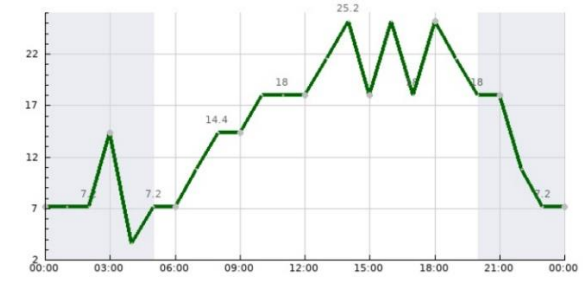
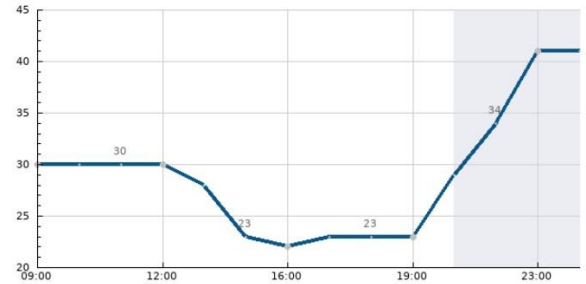
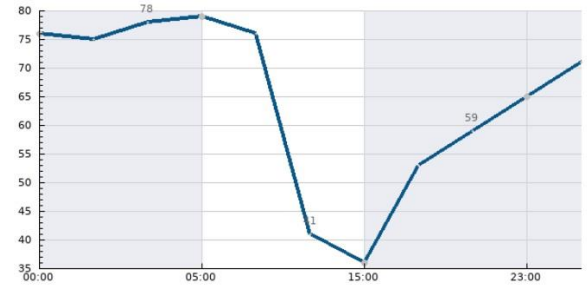
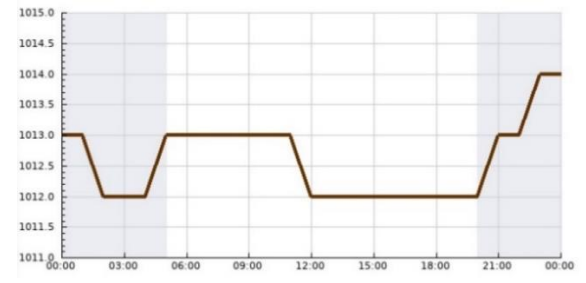
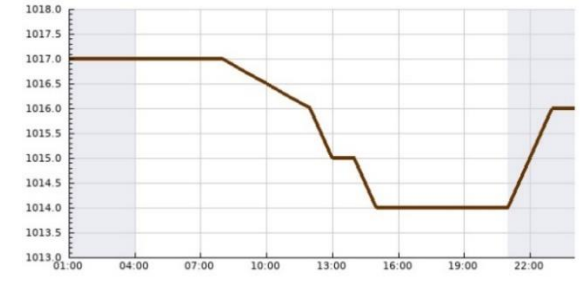
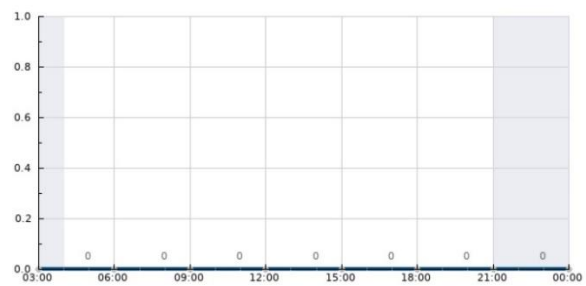
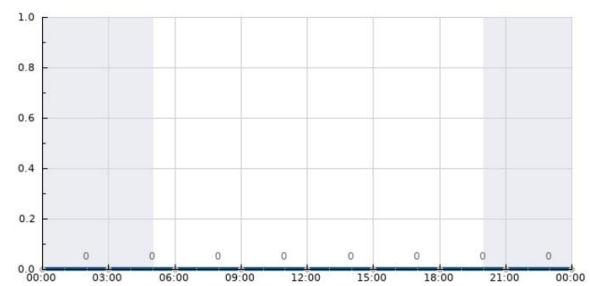
Příloha č. 1 - Srovnávací tabulka povětrnostních podmínek z ČHMÚ při instalaci trubic s elektrodami EIS na obou lokalitách

Příloha č. 2 - Surová naměřená data pro lokalitu Útěchov

Příloha č. 3 - Zpracování měřených dat z obou lokalit

Příloha č. 4 - Grafické závislosti jednotlivých měřených veličin

Příloha č. 1 - Srovnávací tabulka povětrnostních podmínek z ČHMÚ při instalaci trubic s elektrodami EIS na obou lokalitách

03.07.2018 – Lokalita Útěchov	19.07.2018 – Lokalita Kanice
Teplota [°C]	
	
Vítr [km/h]	
	
Vlhkost [%]	
	
Tlak [hPa]	
	
Srážky [mm]	
	

Příloha č. 2 - Surová naměřená data pro lokalitu Útěchov

Surová data uvedena v tabulce níže jsou uložena v souboru .csv na stránkách http://zmeter-utechov.dioda.cz/ pro lokalitu Útěchov a pro lokalitu Kanice na http://zmeter-kanice.dioda.cz/. Jedná se o matice o 242 řádcích a 10 sloupcích, z nichž jsou čteny požadované údaje.

Tabulka obsahuje následující:

- V prvním řádku tabulky je údaj, kdy začalo měření.
- V druhém řádku máme legendu s následujícími sloupci:
  - Sloupec **No** určuje pořadové číslo měření (1-5).
  - Sloupec **f** udává měřicí frekvenci 2khz.
  - Ve sloupci **date** je datum měření [dd.mm.yyyy].
  - Ve sloupci **time** je uveden čas měření [hh:mm:ss].
  - Ve sloupci **ch** je uvedeno číslo měřícího kanálu (0-47).
  - Sloupec **range** je měřicí rozsah Z-metru, přepíná se automaticky.
  - Ve sloupci **Rx** je uvedena naměřená hodnota elektrického odporu v **Ω**.
    Pozn.: Důležitých je vždy pouze prvních 10 řádků každého měření, řádky (0-9), hodnoty pro ostatní řádky nejsou na obou lokalitách reálně měřeny a dále se s nimi nepracuje.
  - Ve sloupci **Xx** je uvedena naměřená hodnota reaktance v **Ω**.
    Pozn.: Platí stejné pravidlo jako pro sloupec **Rx**.
  - Ve sloupci **temp L** je zobrazena naměřená teplota na termistorech levé trubice s elektrodami.
    Pozn.: Občas se vyobrazí naměřená hodnota špatně: příklad 1. řádek – hodnota III.94.
  - Ve sloupci **temp R** má být zobrazena naměřená teplota na termistorech pravé trubice s elektrodami, ta ale žádné termistory instalovány nemá. Vyobrazená hodnota je proto -99.99.

Tabulka níže není uvedena celá, jelikož se surovými daty v práci dále nepracuji.

#Start at 17.2.2019 7:00:02									
No	f [Hz]	date [dd.mm.yyyy]	time [hh:mm:ss]	ch	range	Rx [ohm]	Xx [ohm]	temp L [C]	temp R [C]
1	2000	17.02.2019	7:00:05	0	2	1232.7	-29.6	III.94	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:07	1	2	1824.0	111.7	3.00	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:09	2	2	1576.1	41.8	II.25	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:11	3	2	1349.3	-5.7	I.94	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:12	4	4	215074.4	785545.6	I.62	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:14	5	1	446.1	323.5	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:15	6	2	982.2	-53.0	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:16	7	2	1751.3	86.5	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:17	8	3	9543.2	-743.0	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:18	9	3	11725.2	-581.0	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:19	10	5	3480641.5	8228462.3	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:20	11	5	3600566.9	8194182.5	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:21	12	5	3590794.4	8249498.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:22	13	5	3590794.4	8249498.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:23	14	5	3524701.1	8294554.7	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:24	15	5	3524701.1	8294554.7	-99.99	-99.99

1	2000	17.02.2019	7:00:25	16	5	3491406.0	8174123.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:25	17	5	3384182.3	8152135.2	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:26	18	5	3535470.7	8239228.8	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:27	19	5	3491406.0	8174123.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:28	20	5	3545745.5	8184400.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:29	21	5	3491406.0	8174123.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:30	22	5	3568144.4	8216827.4	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:31	23	5	3568144.4	8216827.4	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:32	24	5	3491406.0	8174123.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:33	25	5	3555538.5	8130066.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:34	26	5	3535470.7	8239228.8	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:35	27	5	3587237.0	8107683.6	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:36	28	5	3600566.9	8194182.5	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:36	29	5	3469737.1	8141934.8	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:37	30	5	3533395.1	8098361.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:38	31	5	3545745.5	8184400.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:39	32	5	3458976.9	8195790.2	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:40	33	5	3426309.4	8217211.4	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:41	34	5	3513315.9	8206553.6	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:42	35	5	3555538.5	8130066.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:43	36	5	3523594.0	8152213.8	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:43	37	5	3458976.9	8195790.2	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:44	38	5	3568144.4	8216827.4	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:45	39	5	3405129.7	8184549.8	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:46	40	5	3523594.0	8152213.8	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:47	41	5	3351776.3	8172845.0	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:48	42	5	3426309.4	8217211.4	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:49	43	5	3372476.4	8205488.8	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:50	44	5	3395399.5	8099239.0	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:50	45	5	3351776.3	8172845.0	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:51	46	5	3545745.5	8184400.1	-99.99	-99.99
1	2000	17.02.2019	7:00:52	47	5	3426309.4	8217211.4	-99.99	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:00:53	0	2	1234.1	-28.8	III.94	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:00:55	1	2	1822.8	116.4	3.00	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:00:57	2	2	1579.5	43.7	II.19	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:00:59	3	2	1352.2	-7.2	I.94	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:01	4	4	216358.6	788549.2	I.62	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:03	5	1	445.8	322.1	-99.99	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:04	6	2	982.7	-54.9	-99.99	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:05	7	2	1752.4	88.3	-99.99	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:06	8	3	9543.5	-734.1	-99.99	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:06	9	3	11731.8	-574.0	-99.99	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:07	10	5	3426309.4	8217211.4	-99.99	-99.99
2	2000	17.02.2019	7:01:08	11	5	3580529.9	8305323.9	-99.99	-99.99
.	….	……..…	…..…	..	.	……	……	……	……
5	2000	17.02.2019	7:03:18	0	2	1232.7	-29.6	III.94	-99.99
5	2000	17.02.2019	7:03:20	1	2	1822.8	116.4	3.00	-99.99
5	2000	17.02.2019	7:03:22	2	2	1577.1	43.2	II.19	-99.99

Příloha č. 3 - Zpracování měřených dat z obou lokalit

Lokalita ÚTĚCHOV:

Vzdálenost trubic s elektrodami L = 2 m

t:	naměřeno	[°C]	teplota
h:	známá hodnota	[m]	hloubka v zemním profilu
R:	naměřeno	[Ω]	elektrický odpor
X:	naměřeno	[Ω]	reaktance
A:	0,001963495	[m²]	průřez vodiče – měřící trubice
Z =	$\sqrt{R^2 + Z^2}$	[Ω]	elektrická impedance
G_{UT-1} =	1000/*Z*	[mS]	elektrická vodivost
Y =	1/*Z*	[S]	admitance
ρ =	*R*· (A/L)	[Ω/m]	měrný elektrický odpor
σ =	1000/ρ	[mS/m]	konduktivita
φ =	arctg(*R*/*X*)	[-]	fázový posun

Měřící Kanál	h [m]	t [°C]
4	-0,05	15,44
3	-0,34	14,5
2	-0,64	14,62
1	-0,94	15,75
0	-1,24	14,62

Měřící Kanál	h [m]	*R* [Ω]	*X* [Ω]	*Z* [Ω]	G_{UT-1} [mS]	*Y* [S]	ρ [Ω/m]	σ [mS/m]	φ [-]
9	-0,12	9990	-88,24	9990,39	0,10	0,0001	9,8077	101,9611	-0,0088
8	-0,27	5380	-438,16	5397,81	0,19	0,0002	5,2818	189,3293	-0,0813
7	-0,42	1020	-27,22	1020,36	0,98	0,0010	1,0014	998,6193	-0,0267
6	-0,57	649,75	-10,83	649,84	1,54	0,0015	0,6379	1567,6670	-0,0167
5	-0,72	530,43	-7,69	530,49	1,89	0,0019	0,5207	1920,3130	-0,0145
4	-0,87	589,2	-9,07	589,27	1,70	0,0017	0,5784	1728,7706	-0,0154
3	-1,02	490,7	-8,37	490,77	2,04	0,0020	0,4817	2075,7930	-0,0171
2	-1,17	546,54	-8,71	546,61	1,83	0,0018	0,5366	1863,7092	-0,0159
1	-1,32	875,67	-12,78	875,76	1,14	0,0011	0,8597	1163,2140	-0,0146
0	-1,47	783,32	-13,24	783,43	1,28	0,0013	0,7690	1300,3519	-0,0169
				2087,47	1,27	1,27	mS		

h [m]	*R* [Ω]	*X* [Ω]	t [°C]	*Z* [Ω]	G_{UT-1} [mS]	*Y* [S]	ρ [Ω/m]	σ [mS/m]	φ [-]
-0,05			15,44	0			0,0000		
-0,12	9990	-88,24		9990,39	0,10	0,0001	9,8077	101,9611	-0,0088
-0,27	5380	-438,16		5397,813	0,19	0,0002	5,2818	189,3293	-0,0813
-0,34			14,5	0			0,0000		
-0,42	1020	-27,22		1020,363	0,98	0,0010	1,0014	998,6193	-0,0267
-0,57	649,75	-10,83		649,8403	1,54	0,0015	0,6379	1567,6670	-0,0167
-0,64			14,62	0			0,0000		
-0,72	530,43	-7,69		530,4857	1,89	0,0019	0,5207	1920,3130	-0,0145
-0,87	589,2	-9,07		589,2698	1,70	0,0017	0,5784	1728,7706	-0,0154
-0,94			15,75	0			0,0000		
-1,02	490,7	-8,37		490,7714	2,04	0,0020	0,4817	2075,7930	-0,0171
-1,17	546,54	-8,71		546,6094	1,83	0,0018	0,5366	1863,7092	-0,0159
-1,24			14,62	0			0,0000		
-1,32	875,67	-12,78		875,7633	1,14	0,0011	0,8597	1163,2140	-0,0146
-1,47	783,32	-13,24		783,4319	1,28	0,0013	0,7690	1300,3519	-0,0169

Lokalita KANICE:

Vzdálenost trubic s elektrodami L = 2 m

t:	naměřeno	[°C]	teplota
h:	známá hodnota	[m]	hloubka v zemním profilu
R:	naměřeno	[Ω]	elektrický odpor
X:	naměřeno	[Ω]	reaktance
A:	0,001963495	[m^2]	průřez vodiče – měřicí trubice
Z =	$\sqrt{R^2 + Z^2}$	[Ω]	elektrická impedance
G_{UT-1} =	1000/Z	[mS]	elektrická vodivost
Y =	1/Z	[S]	admitance
ρ =	R· (A/L)	[Ω/m]	měrný elektrický odpor
σ =	1000/ρ	[mS/m]	konduktivita
φ =	arctg(R/X)	[-]	fázový posun

Měřicí Kanál	*h*	*t*
	[m]	[°C]
4	-0,05	18,38
3	-0,34	17,5
2	-0,64	16,81
1	-0,94	16,62
0	-1,24	16,25

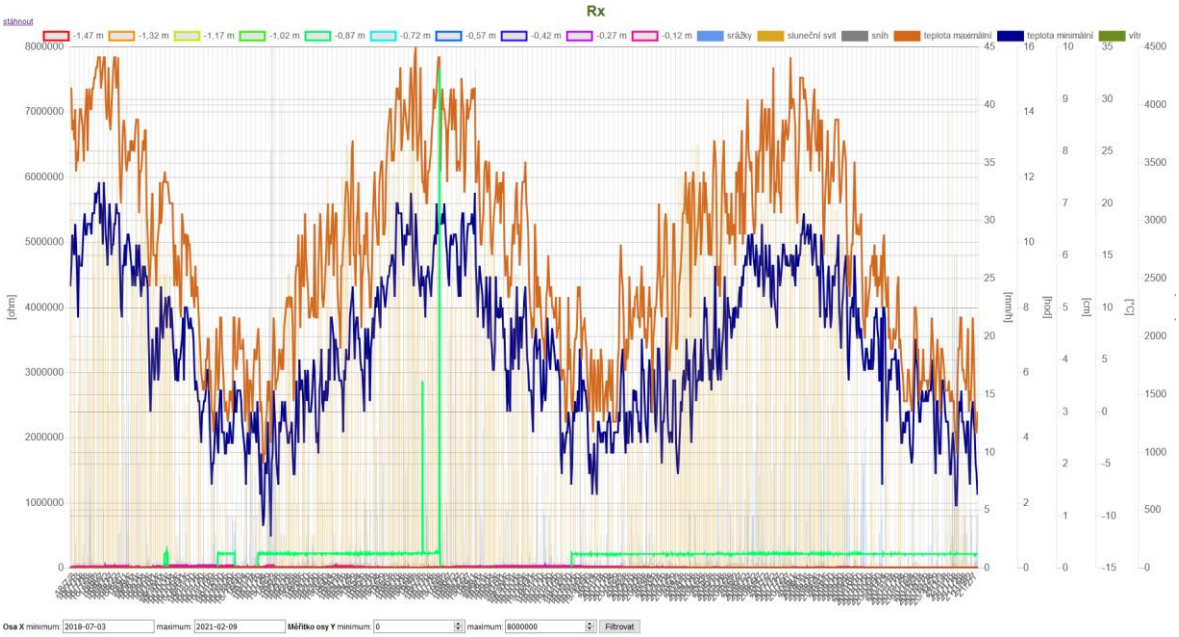
Měřicí Kanál	h	*R*	*X*	*Z*	G_{UT-1}	*Y*	ρ	σ	φ
	[m]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[mS]	[S]	[Ω/m]	[mS/m]	[-]
9	-0,12	59900	-154540	165742,64	0,02	0,00001	58,8067	17,0049	-1,2010
8	-0,27	58230	-139400	151073,14	0,02	0,00001	57,1672	17,4926	-1,1751
7	-0,42	2280	-85010	85040,57	0,44	0,00001	2,2384	446,7507	-1,5440
6	-0,57	1730	-57430	57456,05	0,58	0,00002	1,6984	588,7813	-1,5407
5	-0,72	1370	-38600	38624,30	0,73	0,00003	1,3450	743,4975	-1,5353
4	-0,87	1440	-44930	44953,07	0,69	0,00002	1,4137	707,3553	-1,5388
3	-1,02	1460	-35440	35470,06	0,68	0,00003	1,4334	697,6655	-1,5296
2	-1,17	1500	-36790	36820,57	0,67	0,00003	1,4726	679,0611	-1,5300
1	-1,32	1430	-32790	32821,17	0,70	0,00003	1,4039	712,3018	-1,5272
0	-1,47	1740	-43780	43814,56	0,57	0,00002	1,7082	585,3975	-1,5311
				69181,61	0,51	0,02	mS		

h	*R*	*X*	t	*Z*	G_{UT-1}	*Y*	ρ	σ	φ
[m]	[Ω]	[Ω]	[°C]	[Ω]	[mS]	[S]	[Ω/m]	[mS/m]	[-]
-0,05			18,38	0			0,0000		
-0,12	59900	-154540		165742,6	0,02	0,0000	58,8067	17,0049	-1,2010
-0,27	58230	-139400		151073,1	0,02	0,0000	57,1672	17,4926	-1,1751
-0,34			17,5	0			0,0000		
-0,42	2280	-85010		85040,57	0,44	0,0000	2,2384	446,7507	-1,5440
-0,57	1730	-57430		57456,05	0,58	0,0000	1,6984	588,7813	-1,5407
-0,64			16,81	0			0,0000		
-0,72	1370	-38600		38624,3	0,73	0,0000	1,3450	743,4975	-1,5353
-0,87	1440	-44930		44953,07	0,69	0,0000	1,4137	707,3553	-1,5388
-0,94			16,62	0			0,0000		
-1,02	1460	-35440		35470,06	0,68	0,0000	1,4334	697,6655	-1,5296
-1,17	1500	-36790		36820,57	0,67	0,0000	1,4726	679,0611	-1,5300
-1,24			16,25	0			0,0000		
-1,32	1430	-32790		32821,17	0,70	0,0000	1,4039	712,3018	-1,5272
-1,47	1740	-43780		43814,56	0,57	0,0000	1,7082	585,3975	-1,5311

Příloha č. 4 - Grafické závislosti jednotlivých měřených veličin

Grafické závislosti byly zpracovány následujícím způsobem:

- Stažení surových dat z lokalit Kanice a Útěchov (jejich příklad je na Obr. 7-1).



Obr. 7-1: Závislost reálné složky elektrického odporu Rx na povětrnostních podmínkách měřená EIS

- Vybrání ideálního období (období s četnými atmosférickými srážkami pro kapitoly 4.1 a 4.2, pro grafy kapitoly 4.3 vybrání stejných srážkových úhrnů pro 4 roky atd.).

- Zpracovaní vybraných dat tabulkovým procesorem Microsoft Excel – překopírování vybraných surových dat Rx, Xx a teplot T_EIS a vytvoření dat teploty T a srážek z ČHMÚ (Obr. 7-2).

- Výpočet $|Z|$, vytvoření grafické závislosti $|Z|$ na čase t vzhledem k atmosférickým srážkám, teplotě T atd. a porovnávání obou měřených lokalit.

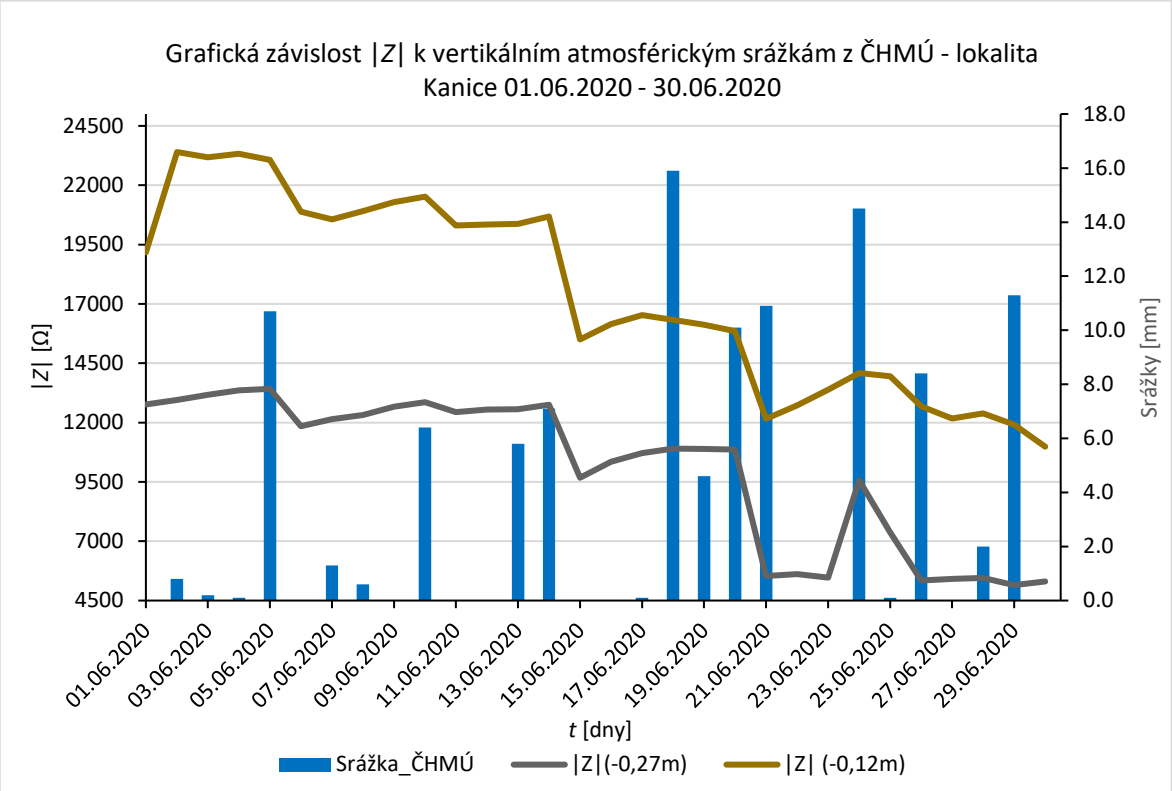
B2 =ODMOCNINA(Rx!B2*Rx!B2+Xx!B2*Xx!B2)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	datum	|Z|(-1,47m)	|Z|(-1,32m)	|Z|(-1,17m)	|Z|(-1,02m)	|Z|(-0,87m)	|Z|(-0,72m)	Z|(-0,57m)	|Z|(-0,42m)	Z|(-0,27m)	|Z| (-0,12m)
2	2020-06-01-01	2040.02	1752.27	1923.88	1776.83	1648.71	1582.11	2085.12	2662.56	12590.39	19386.95
3	2020-06-01-07	2038.30	1753.64	1925.55	1776.68	1648.76	1582.73	2086.70	2661.48	12680.47	19364.48
4	2020-06-01-13	2039.24	1751.83	1924.47	1777.09	1650.61	1586.68	2093.75	2671.45	12763.97	19175.52
5	2020-06-01-19	2040.83	1752.42	1923.61	1777.70	1653.55	1589.52	2104.26	2687.58	12754.59	19099.49
6	2020-06-02-01	2039.63	1752.51	1926.66	1777.76	1653.91	1588.54	2103.03	2677.58	12748.70	19211.31
7	2020-06-02-07	2038.16	1750.79	1924.82	1778.60	1652.67	1587.40	2097.94	2674.45	12820.79	23617.88
8	2020-06-02-13	2038.63	1752.81	1925.38	1778.54	1652.43	1588.06	2104.12	2688.03	12958.75	23397.80
9	2020-06-02-19	2039.91	1753.27	1926.02	1777.85	1655.15	1589.73	2115.96	2709.08	13022.54	23343.44
10	2020-06-03-01	2039.52	1753.79	1926.41	1779.28	1652.60	1587.59	2113.12	2703.88	13025.30	23278.64
11	2020-06-03-07	2038.37	1752.75	1926.81	1778.19	1650.09	1585.06	2109.53	2698.59	13100.81	23308.14
12	2020-06-03-13	2039.21	1752.62	1925.33	1778.63	1650.13	1585.68	2113.21	2709.13	13175.03	23176.19
13	2020-06-03-19	2038.55	1751.79	1926.98	1777.74	1653.51	1588.50	2126.31	2729.82	13208.04	23028.26
14	2020-06-04-01	2041.56	1751.72	1928.01	1779.64	1652.06	1588.08	2124.71	2721.24	13196.85	23222.80
15	2020-06-04-07	2039.12	1750.94	1926.37	1778.15	1649.60	1584.39	2121.73	2719.46	13247.31	23305.74
16	2020-06-04-13	2038.94	1751.12	1925.55	1776.79	1651.44	1585.27	2127.82	2735.84	13361.78	23330.58
17	2020-06-04-19	2038.57	1749.03	1925.24	1775.79	1652.09	1586.43	2136.13	2752.01	13375.43	23084.70
18	2020-06-05-01	2037.21	1750.62	1924.97	1775.51	1650.31	1584.99	2134.57	2748.01	13351.88	23118.53
19	2020-06-05-07	2037.67	1750.03	1924.96	1775.71	1648.26	1582.66	2129.66	2739.36	13373.89	23236.63
20	2020-06-05-13	2037.38	1749.80	1923.05	1775.07	1645.54	1579.58	2127.96	2729.40	13419.93	23073.89
21	2020-06-05-19	2036.78	1748.50	1923.96	1772.45	1641.57	1575.69	2115.89	2520.51	10737.85	20313.47
22	2020-06-06-01	2034.41	1747.84	1921.91	1771.50	1637.22	1572.92	2111.90	2532.05	11217.52	20588.98
23	2020-06-06-07	2034.70	1748.06	1922.85	1771.00	1634.25	1568.50	2105.95	2543.73	11562.63	20897.63
24	2020-06-06-13	2034.27	1746.78	1919.77	1768.60	1633.17	1568.91	2108.13	2561.11	11851.81	20889.44
25	2020-06-06-19	2034.92	1746.18	1919.10	1767.77	1633.57	1571.22	2114.28	2579.98	12001.31	20792.24
26	2020-06-07-01	2032.86	1744.68	1919.08	1765.82	1632.09	1569.26	2110.61	2582.35	12030.70	20684.16
27	2020-06-07-07	2032.05	1745.37	1917.53	1765.63	1629.33	1566.39	2105.13	2576.31	12074.28	20735.07
28	2020-06-07-13	2030.43	1744.33	1915.41	1764.22	1628.10	1565.15	2103.53	2585.30	12142.22	20561.26
29	2020-06-07-19	2031.31	1741.93	1914.15	1764.11	1630.49	1566.96	2110.44	2604.61	12179.94	20467.16
30	2020-06-08-01	2030.73	1741.25	1914.20	1762.05	1625.20	1562.96	2103.30	2597.77	12141.63	20514.39
31	2020-06-08-07	2027.77	1740.83	1912.40	1760.95	1621.91	1560.15	2096.55	2594.98	12202.42	20813.39
32	2020-06-08-13	2027.77	1739.36	1911.36	1758.91	1619.11	1557.78	2094.05	2598.46	12318.99	20913.13
33	2020-06-08-19	2028.09	1738.38	1911.56	1758.56	1617.69	1557.09	2095.68	2611.17	12427.44	20962.61
34	2020-06-09-01	2026.07	1737.78	1908.84	1756.27	1615.30	1554.47	2096.47	2615.47	12497.05	21049.45
35	2020-06-09-07	2023.26	1736.38	1907.22	1756.39	1610.97	1553.37	2095.49	2616.77	12571.67	21284.35
36	2020-06-09-13	2024.34	1734.67	1905.40	1754.75	1613.27	1555.68	2102.99	2643.32	12667.81	21285.64
37	2020-06-09-19	2023.99	1733.98	1905.62	1752.44	1615.11	1558.87	2112.38	2666.71	12720.98	21278.08
38	2020-06-10-01	2021.96	1732.22	1903.82	1751.43	1612.41	1558.30	2111.19	2662.43	12742.97	21305.29
39	2020-06-10-07	2021.29	1732.07	1902.83	1751.24	1610.95	1555.95	2109.32	2660.34	12803.83	21457.55
40	2020-06-10-13	2020.32	1730.03	1903.45	1749.13	1609.83	1554.49	2108.38	2663.65	12864.91	21511.71
41	2020-06-10-19	2020.93	1729.75	1903.48	1749.31	1607.60	1553.70	2106.70	2658.08	12186.50	20301.64
42	2020-06-11-01	2016.46	1727.54	1898.61	1747.59	1605.80	1552.25	2101.77	2656.44	12283.79	20341.35

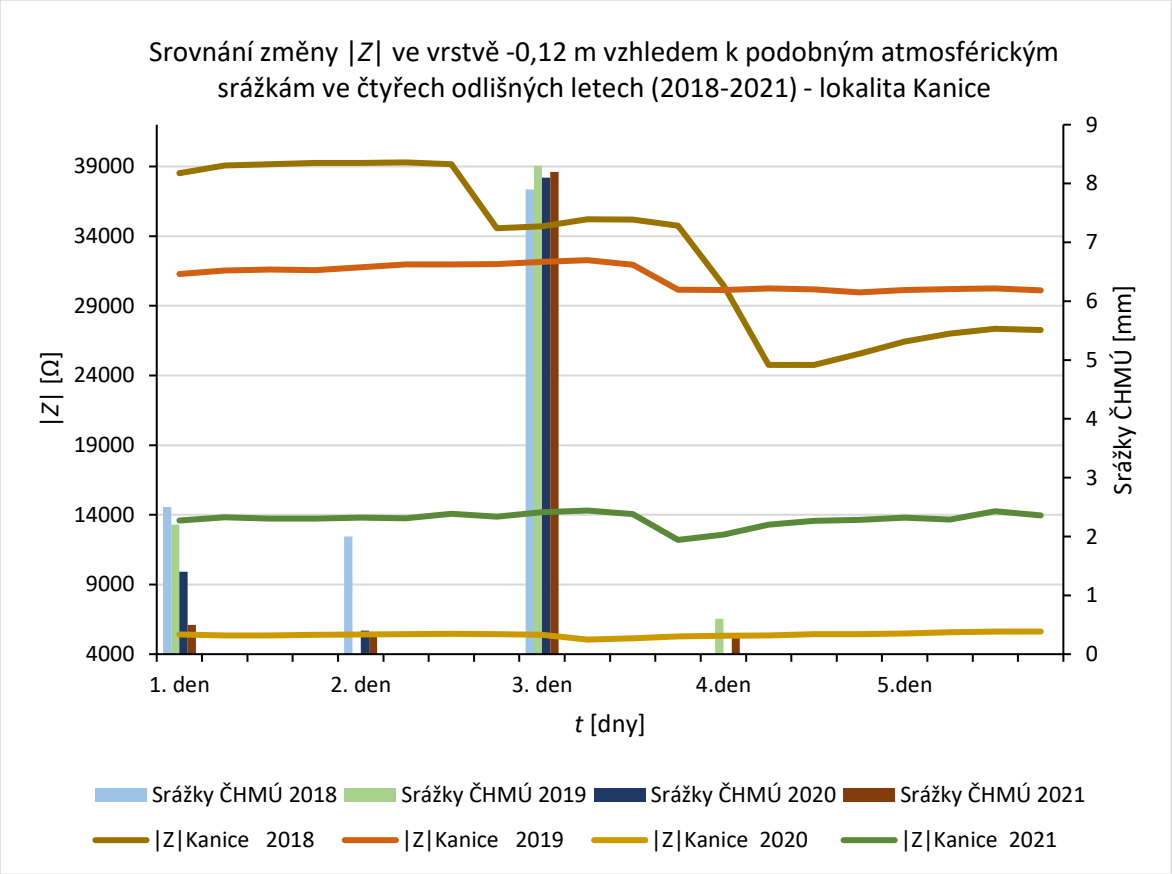
Rx | Xx | Z | T_EIS | T + srážky_ČHMÚ | Grafy

Obr.7-2: Příklad zpracování dat tabulkovým procesorem Microsoft Excel

– Výstupy z grafického zpracování dat vložené do BP (Obr. 7-3 a Obr. 7-4).



Obr.7-3: Příklad výstupu grafického zpracování dat tabulkovým procesorem Microsoft Excel



Obr. 7-4: Příklad výstupu grafického zpracování dat tabulkovým procesorem Microsoft Excel