

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování



Bakalářská práce

Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti přírodního písku různého zrnitostního složení stanovené opakovaným měřením v laboratoři

Zpracovala: Martina Bauerová

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Jačka

2015 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Martina Bauerová

Krajinářství

Název práce

Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti přírodního písku různého zrnitostního složení stanovené opakovaným měřením v laboratoři

Název anglicky

Saturated hydraulic conductivity values of various textured natural sand measured recurrently using laboratory permeameter

Cíle práce

- 1) Provést opakovaná měření K_s na sypaných vzorcích přírodního písku a jeho směsí s různým zrnitostním složením.
- 2) Stanovit charakteristické hodnoty pro měřené materiály.
- 3) Vyhodnotit rozdíly v charakteristických hodnotách a časové proměnlivosti K_s pro tyto materiály.

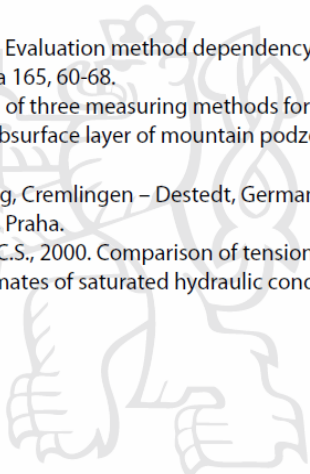
Metodika

1. Zpracovat rešerši – nasycená hydraulická vodivost, definice a problematika měření, dále rešerše faktorů, které ovlivňují hodnotu nasycené hydraulické vodivosti K_s (vliv zrnitosti, půdní struktury, obsahu organické hmoty, doby syčení a doby měření, uzavřeného vzduchu, bobtnání).
2. Provedení opakovaných měření na sypaných vzorcích přírodního písku a jeho směsí s různým zrnitostním složením. Vyhodnocení měřených hodnot K_s vhodnou metodou.
3. Stanovení charakteristické hodnoty pro měřené materiály. Vyhodnocení rozdílů v charakteristických hodnotách a časové proměnlivosti K_s pro tyto materiály.

Doporučený rozsah práce

cca 30 stran textu

Doporučené zdroje informací

- Fodor, N., Sándor, R., Orfanus, T., Lichner, L., Rajkai, K., 2011. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. *Geoderma* 165, 60-68.
- Jačka, L., Pavlásek, J., Kuráž, V., Pech, P., 2014. A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. *Geoderma* 219-220, 82-88.
- Kutílek, M., Nielsen, D.R., 1994. *Soil hydrology*. Catena Verlag, Cremlingen – Destedt, Germany.
- Kutílek, M., 1978. *Vodohospodářská pedologie*. SNTL-ALFA, Praha.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Brunke, R.R., Drury, C.F., Tan, C.S., 2000. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 478-484.
- 

Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 10. 4. 2015

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11. 4. 2015

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan

V Praze dne 13. 04. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Lukáše Jačky a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Praze dne 15.4.2015 Podpis :

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Lukášovi Jačkovi za odborné vedení, připomínky a velikou ochotu a vstřícnost při vypracování bakalářské práce. Děkuji také své rodině a přátelům za jejich podporu.

Abstrakt

Nasycená hydraulická vodivost (K_s) je jedním z klíčových parametrů pro popis proudění vody v půdním prostředí. Bakalářská práce se zabývá stanovením hodnot K_s přírodního písku různého zrnitostního složení a jeho směsí s prachem. Pro tyto odlišné materiály byly stanoveny charakteristické hodnoty K_s a také změny hodnot K_s v čase při opakovaných měřeních v laboratoři.

V období září – listopad 2014 byly naměřeny 4 série, každá série po 10 vzorcích (celkem 40 měření). Jednalo se o sypané vzorky, které byly nasypány do Kopeckého válečků (100 cm^3) a v těchto válečcích následně měřeny. První série byla čistý hrubozrnný písek PR 0,5 - 1 (frakce 0,5 – 1 mm zabírá zhruba 83%); ve druhé sérii se jednalo o čistý jemnozrnný písek PR 13 (dominantní frakce 0,06 – 0,5 mm zabírá 77%); třetí série byla směs hrubozrnného písku a prachu a ve čtvrté sérii to byla směs jemnozrnného písku a prachu pro 8 vzorků a směs jemnozrnného a hrubozrnného písku pro 2 vzorky. Ve třetí a čtvrté sérii byly směsi písku a prachu namíchány v různém poměru. Sycení 10 naplněných vzorků probíhalo v laboratorním permeometru, ve kterém byly následně měřeny. Pomocí regulátoru se při sycení postupně zvyšovala výška vodní hladiny až do nad úroveň vrchní části vzorku. Všechny vzorky byly měřeny s konstantním hydraulickým spádem o hodnotě přibližně 0,5.

Průměrné hodnoty K_s pro první časový krok byly $2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro hrubozrnný písek, $4 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro jemnozrnný písek, $8,9 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro prach, $5 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pro směs hrubozrnného a jemnozrnného písku. U směsi hrubozrnného písku a prachu docházelo při některých poměrech materiálů k nižším hodnotám K_s , než u samotného prachu. Nejnižší hodnoty K_s byly měřeny právě u poměru 60:40, kde K_s byla $5,7 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a u poměru 20:80, kde K_s měla hodnotu $8,7 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. U směsi jemnozrnného písku s prachem se K_s u poměru 80:20 naměřila $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a u poměru 60:40 měla K_s hodnotu $6,1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Klíčová slova: nasycená hydraulická vodivost, vliv zrnitosti, laboratorní měření, časová závislost

Abstract

Saturated hydraulic conductivity (K_s) is one of the key parameter of water flow in soils. This thesis deals with the determination of K_s values of different textured natural sand and its mixtures with a silt. For these materials, characteristic K_s values were determined during recurrent laboratory measurements.

In the period from September to November 2014, overall 40 samples were measured (10 samples in 4 series). Tested material was poured into the small soil samples (100 cm^3), which were used for a measurement. The first series was a clean coarse sand (fraction 0,5 - 1 mm occupies about 83%); in the second series was a clean fine-grained sand (dominant fraction from 0,06 to 0,5 mm occupies 77%); the third series was the mixture of coarse sand and the silt and in the fourth series, it was the mixture of the fine-grained sand and the silt for 8 samples and the mixture of the fine-grained and coarse sand for 2 samples. In the third and fourth series, mixtures of sand and silt were made in different ratios. Saturation of samples was made gradually in tank of laboratory permeameter. In the same place, samples were also measured. All samples were measured with a constant hydraulic gradient value approx. 0,5.

For the tested materials, mean K_s values calculated at first time measurement step were the following: coarse sand - $2 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$, fine sand - $4 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$, silt - $8,9 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$, mixture of coarse and fine sands - $5 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. The lowest K_s mean value $5,7 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ was measured for the mixture of silt : coarse sand, ratio 60:40. Similarly, low mean value $6,1 \cdot 10^{-7} \text{ m.s}^{-1}$ was measured for the mixture of silt: fine sand, ratio 60:40.

Keywords: saturated hydraulic conductivity, the influence of texture, laboratory measurements, time dependency

1.	ÚVOD	9
2.	CÍLE PRÁCE	10
3.	LITERÁRNÍ REŠERŠE	11
3.1	Nasyčená hydraulická vodivost	11
3.2	Faktory ovlivňující nasycenou hydraulickou vodivost	12
3.3	Měření nasycené hydraulické vodivosti	14
3.4	Problematika laboratorních metod	17
3.5	Darcyho zákon	18
3.6	Meze platnosti Darcyho zákona	19
3.7	Vyhodnocení nasycené hydraulické vodivosti	21
4.	METODIKA	22
4.1	Charakteristika měřeného materiálu	22
4.2	Stanovení nasycené hydraulické vodivosti sypaných vzorků	28
4.2.1	Příprava a plnění vzorků	28
4.2.2	Sycení vzorků a vlastní měření	30
5.	VÝSLEDKY A DISKUZE	33
5.1	Přehled stanovených hodnot K_s	33
5.2	Statistický popis měřených výsledků	37
5.3	Časové změny	40
6.	ZÁVĚR	41
7.	PŘEHLED LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ	42

1. Úvod

Hydraulickou charakteristikou, která vyjadřuje schopnost vést vodu nazýváme koeficient nasycené hydraulické vodivosti K_s . Nasycená hydraulická vodivost je jednou z nejdůležitějších hydrofyzikálních charakteristik. Její velikost je závislá na vlastnostech prostředí i na vlastnostech proudící kapaliny. Stanovení K_s se vyžaduje pro mnoho různých aplikací, neboť je klíčovým parametrem pro řešení úloh v hydroopedologii, hydrogeologii a v ochraně životního prostředí. Znalost K_s je klíčová zejména v ochraně půdy a podzemní vody před znečištěním, při návrhu rekultivací půd, závlah a odvodnění pro účely zemědělské i nezemědělské (např. odvodnění skládek, sportovních povrchů apod.). Parametr K_s je také jeden z hlavních datových vstupů pro simulační modelování transportu vody a roztoků půdním profilem (Bátková et al., 2013).

Nasycená hydraulická vodivost půdy úzce souvisí se zrnitostním složením půdy. Přesné vztahy mezi zrnitostí a K_s nelze často jasně definovat, protože hodnoty K_s ovlivňuje řada dalších faktorů (struktura půdy, obsah organické hmoty, chemické složení, čas). Z tohoto důvodu byly vybrány pro měření homogenní nestrukturní materiály o známém zrnitostním složení bez obsahu organické hmoty.

V teoretické části bakalářské práce (Kapitola 3) je vymezena veličina K_s , popsány způsoby stanovení K_s a vliv různých faktorů na K_s . Dále je popsán Darcyho zákon a k němu související omezení platnosti Darcyho zákona.

V další části je popsána metodika laboratorního měření K_s a jeho vyhodnocení. Metodika obsahuje charakteristiku měřeného materiálu, stanovení K_s sypaných vzorků, přípravu a plnění vzorků, sycení vzorků a vlastní měření. V kapitole číslo 5 jsou výsledky pro přehlednost sloučeny s diskuzí. Tato kapitola je rozdělena do podkapitol – přehled stanovených hodnot K_s , statistický popis měřených výsledků a časové změny.

2. Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je stanovit hodnoty nasycené hydraulické vodivosti pro přírodní písky různého zrnitostního složení a směsí písků s prachem a tyto hodnoty mezi sebou porovnat.

Dílčím cílem je odhadnout časové změny nasycené hydraulické vodivosti těchto různých materiálů.

3. Literární řešerše

3.1 Nasycená hydraulická vodivost

Veličina K_s v Darcyho rovnici se nazývá nasycená hydraulická vodivost. V základních jednotkách SI má rozměr $m \cdot s^{-1}$. Charakterizuje, jak porézní prostředí umožňuje proudění kapaliny. Její velikost je závislá na vlastnostech prostředí i na vlastnostech proudění kapaliny. V izotropním prostředí ji lze definovat jako hustotu toku při jednotkovém hydraulickém gradientu. Znalost hodnoty K_s je klíčová pro modelování pohybu vody a transportních procesů rozpuštěných látek v půdě. Parametr K_s je také důležitým podkladem při návrhu závlah, odvodnění, sypaných hrází vodních děl a mnoha dalších inženýrských aplikací (Pavlásek et Jačka, 2014).

Hydraulická vodivost je funkcí jak vlastností pórového prostředí, tak i vlastností proudící kapaliny. Je tedy jiná pro vodu, pro ropu atd. (Šráček et Kuchovský, 2003).

Nasycená hydraulická vodivost vyjádřená podle Valentové (2007):

$$K_s = \frac{K^* \rho^* g}{\mu} \quad (1)$$

kde K_s představuje nasycenou hydraulickou vodivost, K je propustnost porézního prostředí, ρ je hustota kapaliny, g je tíhové zrychlení a μ představuje dynamickou viskozitu.

Veličiny ovlivňující hodnotu hydraulické vodivosti jsou tedy hustota kapaliny ρ [$kg \cdot m^{-3}$] a její viskozita μ [$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$], z charakteristik porézního prostředí mají význam zejména zrnitostní složení, tvar zrn a pórů, tortuozita (zakřivenost pórů), pórovitost a měrný povrch. Charakteristiky porézního prostředí jsou shrnuty v propustnosti K ve vzorci (1).

Předpokládá se, že orientační hodnoty K_s odhadnuté dle zrnitosti podle Valentové (2007) (tab. č. 1) nejsou vždy spolehlivé a použitelné jsou jen částečně pro písčité zeminy. Spolehlivost těchto hodnot závisí na řadě dalších faktorů (obsah organické hmoty, struktura půdy, obsah vody, pórovitost, chemické složení atd.).

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

Tab. č. 1 Orientační hodnoty nasycené hydraulické vodivosti podle Valentové (2007) odhadnuté na základě zrnitosti

3.2 Faktory ovlivňující nasycenou hydraulickou vodivost

Jak už bylo výše uvedeno, podle Valentové (2007) mají některé charakteristiky porézního prostředí vliv na hodnotu hydraulické vodivosti. Mezi tyto charakteristiky patří například zrnitostní složení, struktura půdy, vegetační pokryv, obsah organické hmoty, hodnota objemové hmotnosti a další.

Existuje souvislost mezi zrnitostí vzorku sedimentu a jeho hydraulickou vodivostí. Obecně platí, že čím větší je velikost zrn a čím menší je její rozptyl, tím vyšší je hodnota hydraulické vodivosti (Šráček et Kuchovský, 2003).

Protože propustnost pórovité horniny závisí na poměrném obsahu zrn různé velikosti, z nichž se hornina skládá, projevuje se tedy zrnitost horniny i v hodnotě hydraulické vodivosti. Proto byly odvozeny různé způsoby jejího stanovení z křivek zrnitosti hornin nebo z charakteristických znaků zrnitosti. Těchto způsobů se používá pro nezpevněné sedimentární horniny, a to především pro sypké sedimenty (Šilar et al., 1983). Zrnitostní složení je jedním z důležitých faktorů pro tvar a velikost pórů (Císlerová et Vogel, 1998).

Je potřeba si uvědomit, že ve skutečnosti se voda při průchodu zeminou pohybuje systémem pórů a nevyplňuje celou plochu průřezu vzorku. Skutečná rychlost vody v pórech je velmi proměnná v závislosti na geometrických tvarech

pórů, jako je zúžení, rozšíření pórů, existence slepých dutin, zakřivenost, atd. (Pavlásek et Jačka, 2014). Hodnota K_s tedy závisí na textuře, struktuře půdy a na fyzikálně chemických poměrech v půdním roztoku. Podle Kutílka et al. (2004) bývá u písčitých půd $K_s > 10$ cm/den, u jílu $K_s > 0,1$ cm/den, kdy horní hranice závisí na struktuře a na zhutnění půdy.

Nasyčená hydraulická vodivost má značnou prostorovou a časovou variabilitu (Lichner et al., 2006). Vysoká variabilita nasycené hydraulické vodivosti byla měřena u orné půdy i u lesních půd (Halabuk, 2006; Jačka et al., 2014; Deb et Shukla, 2012). Dle těchto autorů se koeficient variace může pohybovat v řádech stovek procent.

Zejména kořeny rostlin mohou mít vliv na nasycenou hydraulickou vodivost, a to buď přímo - ve vrchní vrstvě půdy, kde vyvolávají preferenční tok přes makropóry (Lichner et al., 1994) či nepřímo, kdy ovlivňují strukturu půdy (Oades, 1993; Kutílek, 1978). To, že kořenový systém rostlin ovlivňuje vlastnosti půdy (struktura, pórovitost, hydraulická vodivost, obsah vody v půdě) a půdní vlastnosti ovlivňují výskyt určitých druhů rostlin, potvrzují i Stothoff et al. (1999); Solon et al. (2007) a Li et al. (2008). Gao et al. (1996) například předpokládá, že vegetace ovlivňuje hydraulickou vodivost půdy, zejména prostřednictvím činnosti podzemní biomasy. Mencuccini (2003) také poznamenal, že hydraulická vodivost je do značné míry závislá na jemných kořenech biomasy. Halabuk (2006) tento vliv dokumentoval ve vrchní vrstvě orné půdy, kde byla identifikována významná korelace mezi kořeny biomasy a nasycenou hydraulickou vodivostí. Jačka et al. (2012) ve své studii uvádí, že kořenové systémy rostlin v horní vrstvě půdy mají vliv na hodnoty K_s . Výrazně větší hodnoty geometrických průměrů K_s byly vypočteny u kapradiny *Athyrium distentifolium* (Papratka horská) – $5,92 \cdot 10^{-5}$ m.s⁻¹, oproti tomu nejnižší hodnoty geometrického průměru vycházely u *Avenella flexuosa* (Metlička křivolaká) – $0,46 \cdot 10^{-5}$ m.s⁻¹ a *Calamagrostis villosa* (Třtina chloupkatá) – $0,49 \cdot 10^{-5}$ m.s⁻¹.

Terénní studie ve Velké Británii (Morgan et al., 1995) ukázaly, že různé typy kořenů způsobují různé účinky na nasycenou hydraulickou vodivost půdy. U *Trifolium pratense* (Jetel luční), který má tlusté kohoutkové kořeny, se nasycená hydraulická vodivost zvýšila se zvyšující se hustotou kořenů, zejména u jílovitých půd. Naproti tomu, *Lolium perenne* (Jílek vytrvalý) a *Agrostis capillaris* (Psineček obecný) tvoří v menších hloubkách půdy vláknité kořeny a půdy s tímto pokryvem mají nízkou hydraulickou vodivost.

Halabuk (2006) při zkoumání mokřadní vegetace (rákosiny) zjistil, že kořeny biomasy, ani objemová hmotnost vzorků ornice odebraných z těchto míst,

významně nesouvisely s K_s . To může znamenat, že K_s u mokřadní vegetace může být ovlivněna jinými faktory než kořeny biomasy a objemovou hmotností půdy. Například vysokým obsahem organických látek a výskytem velkých makropórů, vytvořených po rozkladu odumřelých kořenů.

Řadou studií byl hlášen vliv organické hmoty (statková hnojiva) na půdní strukturu a hydraulické vlastnosti (Mathers et Stewart, 1984; Campbel et al., 1986; Anderson et al., 1990; Seashore, 1982). Některé z těchto studií zjistily, že aplikace organické hmoty (hnojiva) zvyšuje nasycenou hydraulickou vodivost a rychlost infiltrace (Khaleel et al., 1981; Wu, 1994; Benbi et al., 1998).

Organická hmota zvyšuje podíl větších pórů (Brady, 1974). Tyto makropóry jsou dominantní cestou proudění vody v půdním prostředí z povrchové infiltrace (Luxmoore, 1981). To znamená, že přidavek organické hmoty zvyšuje pohyb půdní vody a zvyšuje hodnoty K_s . Zvýšení počtu makropórů a mezopórů zvyšuje průměrný poloměr pórů na jednotku plochy (Eusufzai et Fujii, 2012).

Přídavek organické hmoty také ukazuje na snížení objemové hmotnosti (Khaleel et al., 1981; Aggelides et Londra, 2000; Pengcheng et al., 2007; Price et Voroney, 2007; Evanylo et al., 2008; Ozenc et Ozenc, 2008; Curtis et Claassen, 2009). Pokles objemové hmotnosti může být způsoben například smícháním organické hmoty s hustší minerální frakcí půdy. Změna objemové hmotnosti se zdá být výraznější v hrubých půdách než u jemnozemí. S přidáním organických látek má tendenci se zvyšovat i maximální vodní kapacita. Tento nárůst byl přičítán zvýšené agregaci, což zvyšuje celkovou pórovitost a snižuje objemovou hmotnost, která mění distribuci velikosti pórů (Six et al., 2004). McConnell et al. (1993) také potvrzuje snížení objemové hmotnosti s aplikací organických látek (kompost).

3.3 Měření nasycené hydraulické vodivosti

Metody stanovení nasycené hydraulické vodivosti můžeme rozdělit na metody přímé – laboratorní a terénní, dále na metody nepřímé – kdy na základě snáže stanovitelných půdních vlastností, jako je textura, struktura, objemová hmotnost, obsah humusu, apod. odvozujeme hodnotu K_s . Nepřímé metody, známé jako “pedotransferové funkce” slouží jako přibližný odhad. Nepřímá metoda určení nasycené hydraulické vodivosti přímo závisí na textuře půdy. Obecně je tedy možné říci, že lepší výsledky jsou dosahovány spíše u texturálně lehkých půd. U půd

středně těžkých a těžkých, zvláště v našich podmínkách (zvrstvené, heterogenní půdní profily), nejsou tyto metody většinou použitelné (Kutílek et al., 2004).

Terénní metody se dělí nad hladinou podzemní vody a pod hladinou podzemní vody.

Základní metodou stanovení K_s pod hladinou podzemní vody je čerpací pokus. Podstatou čerpacích zkoušek je měření úrovně hladiny podzemní vody v pozorovacích vrtech a ve studni, ze které se voda buď odebírá, nebo se do ní vhání (Valentová, 2007). Tato metoda se používá výhradně při měření mocných zvodnělých hrubozrnných vrstev v hydrogeologii (Kutílek et al., 2004). V hydroopedologii je tato metoda prakticky nepoužitelná a při měření pod hladinou podzemní vody je používána například jednosondová metoda.

Obvykle používaná zařízení pro měření nasycené hydraulické vodivosti v terénu nad hladinou podzemní vody jsou Guelphský permeometr; infiltrační válce s kladnou tlakovou výškou na povrchu půdy a tenzní infiltrometr, který měří s nízkou zápornou tlakovou výškou na povrchu půdy (Pavlásek et Jačka, 2014; Jačka et al., 2014).

Reynolds et al. (2000) ve své studii porovnává málo testované metody tenzního infiltrometru, tlakového infiltrometru a odběr neporušených vzorků pro měření K_s a zjišťuje, zda metody přináší reprezentativní výsledky K_s . Nedostatek dat mezi těmito metodami by mohl souviset s velikostí vzorku, geometrií proudění nebo narušením půdy. Metoda tlakového infiltrometru a odběru neporušených vzorků proniká mnohem menší půdní plochou než tenzní infiltrometr, a proto může být vzorek více ovlivněn makropóry a dalšími půdními heterogenitami. U metody tenzního infiltrometru je navíc pohyb vody trojrozměrný, na rozdíl od jednorozměrného (převážně jednorozměrný) pohybu vody u metod tlakového infiltrometru a odběru neporušených vzorků. Jednorozměrný pohyb může mít vliv na výsledky K_s , pokud např. makropóry vyvolaly značnou vertikální - horizontální anizotropii.

Nasycenou hydraulickou vodivost můžeme laboratorně stanovovat na neporušených půdních vzorcích odebraných v kovových válečkách. Často se používají malé válečky o objemu 100 až 500 cm³. Malé vzorkovací objemy mohou způsobovat nízkou reprezentativnost výsledků měření K_s u heterogenních půd (Kutílek et al., 2004).

V laboratoři se váleček (po nasycení) upevní do příslušného aparátu – používáme permeametry (obr. č. 1) různé konstrukce (Kutílek et al., 2004). Váleček

je potřeba sytit velmi pomalu, aby nedošlo k uzavření vzduchu. Proces syčení by měl nastat co nejdříve po odběru vzorků. Vhodný postup je například postupné syčení vzorků přímo v permeamtru tak, aby mohly být ihned po nasycení měřeny. Syčení mimo permeametr může vést ke ztrátě vody a následnému uzavření vzduchu při vložení pod úroveň hladiny v kontejneru permeamtru (Pavlásek et Jačka, 2014).



Obr. č. 1 Laboratorní permeametr

Rozlišují se měření s konstantním spádem a měření s proměnlivým spádem (Šráček et Kuchovský, 2003).

V permeamtru se měří pokles horní hladiny a dolní hladina je na konstantní úrovni. Principiálně se jedná vždy o poměrně jednoduchá zařízení, která musí umožňovat co nejpřesnější měření a indikaci hladin vody, u metody s konstantním sklonem je navíc nutné co nejpřesněji měřit průtok vzorkem – buď pomocí kalibrovaných nádob pro propustnější vzorky, nebo kalibrovanými kapilárami, pro málo propustné vzorky (Kutílek et al., 2004).

3.4 Problematika laboratorních metod

Laboratorní metody měření hydraulické vodivosti používáme pouze v případě, není-li možné stanovit hodnotu přímo v terénu. Výsledky měření v laboratoři mohou být také zatíženy celou řadou chyb.

Hlavní nevýhodou laboratorních metod je, že jsou měřeny výrazně menší objemy v porovnání s polními metodami. Tento objem nemusí být dostatečný pro získání reprezentativních hodnot (Pavlásek et Jačka, 2014). Lepší výsledky nejsou dosahovány ani při zvyšování objemu vzorků – při odběru a transportu vzorků může dojít buď k jejich zhutnění nebo naopak, podél stěn válečků nebo podél kořínků se objeví preferenční cesty, apod. (Kutílek et al., 2004). Nežádoucí proudění podél stěn vzorku můžeme eliminovat natřením vnitřní strany válečku silikonem. Šimek et al. (1990) ale tvrdí, že výsledky laboratorních zkoušek můžeme považovat za reprezentativní, přezkoušíme-li ze zájmového území větší počet vzorků.

Dalším těžko identifikovatelným zdrojem chyb může být, zvláště u nestrukturních půd, vyplavování nejjemnější půdní frakce. Pokud zabráníme vyplavování těchto zrn z půdního vzorku, potom dojde k zakolmatování spodní části vzorku a při opakovaném měření dostaneme nižší hodnoty K_s . V opačném případě, pokud vyplavování jemné frakce nezabráníme, naměřené hodnoty budou mít při opakovaném měření vzrůstající trend (Kutílek et al., 2004).

Wessolek et al. (1994) se ve své studii zmiňuje, že hodnoty odvozené z laboratorních výsledků přinesly slabší výsledky, v porovnání s hodnotami odvozenými z měření v terénu. Rozdíly byly však poměrně malé.

Naproti tomu Jačka et al. (2014) ve své studii tvrdí, že průměrné hodnoty získané použitím metod - Guelphský permeametr, infiltrační válec a laboratorní permeametr, nebyly od sebe statisticky odlišné. Laboratorní permeametr přinesl mírně vyšší hodnoty než terénní metody. Z inženýrského hlediska však všechny vyzkoušené metody poskytly podobné průměrné hodnoty.

Hlavní výhodou laboratorních metod jsou – nasycená hydraulická vodivost je určována dle základní rovnice (Darcyho zákona); je umožněno přesné stanovení a kontrola okrajových podmínek pokusu (hydraulický spád, jedno-dimenzionální proudění, teplota); vliv uzavřeného vzduchu v pórech je eliminován postupným sycením. Z těchto důvodů mohou sloužit laboratorní metody jako referenční a odhalit nedostatky jiných metod (Pavlásek et Jačka, 2014; Jačka et al., 2014).

3.5 Darcyho zákon

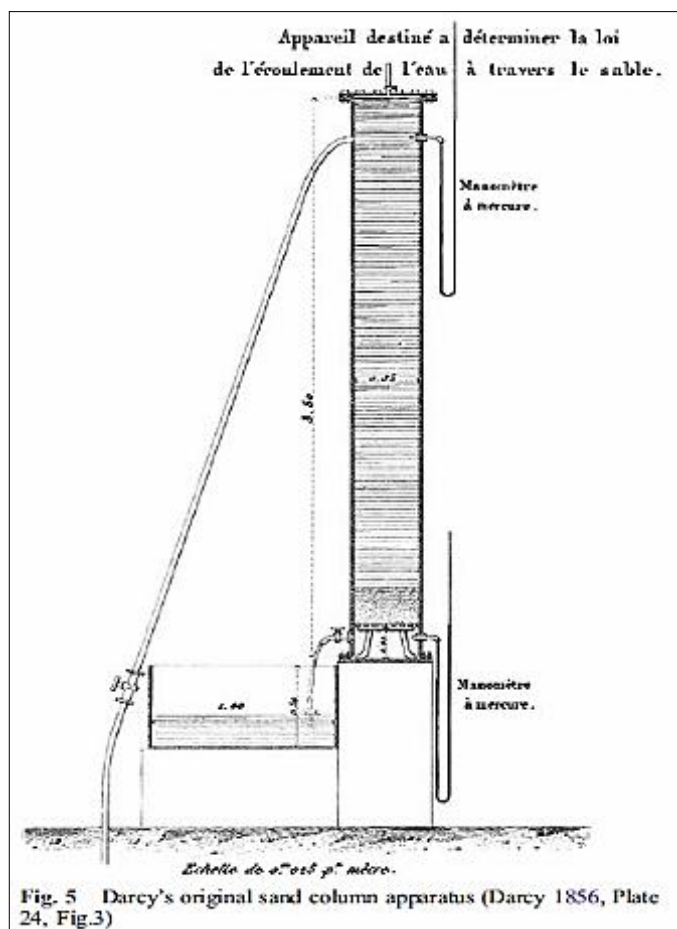
V 19. století prováděl francouzský inženýr Henry Darcy pokusy s filtrací vody, která měla zásobovat město Dijon. Darcy zjistil, že objemový průtok Q vody přes pórové prostředí v koloně přímo závisí na rozdílu v hydraulických výškách na vstupu a výstupu kolony ($h_A - h_B$), nepřímo závisí na délce L dráhy filtrace a také přímo závisí na konstantě úměrnosti K_s , zvané hydraulická vodivost, která charakterizuje vlastnosti pórového prostředí a v něm proudící kapaliny (Šráček et Kuchovský, 2003).

Darcy v roce 1856 provedl mnoho experimentů s průtokem vody válcem naplněným pískem (obr. č. 2), a tím prokázal lineární závislost mezi rychlostí a hydraulickým sklonem. Jím odvozená rovnice se nazývá Darcyho zákon (Darcy, 1856).

Darcyho zákon lze vyjádřit následovně:

$$Q = K_s * S * \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

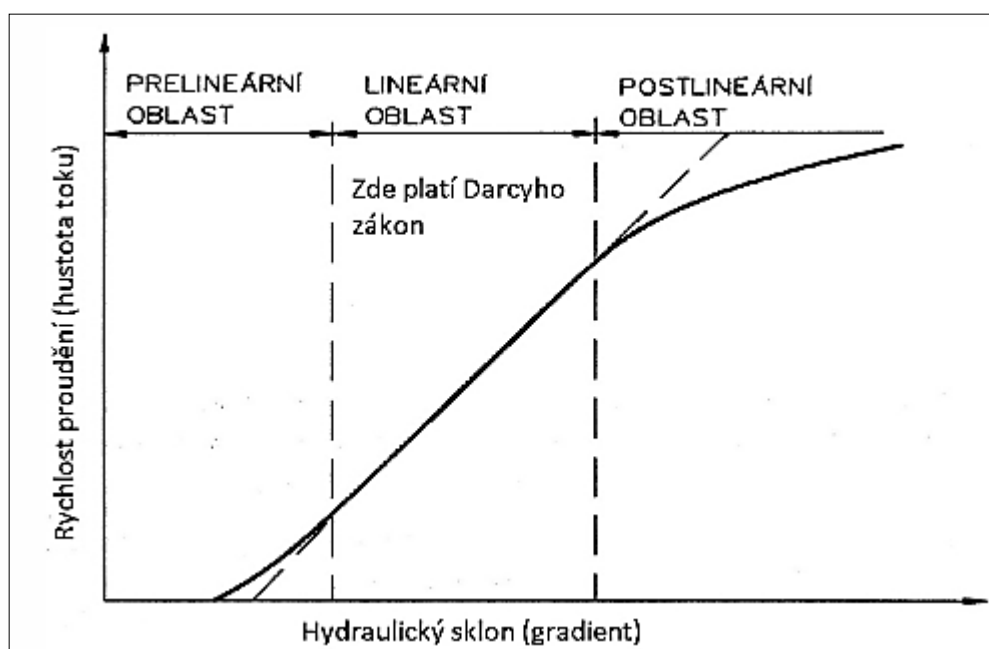
kde Q [$L^3 \cdot T^{-1}$] je objemový průtok vody, K_s [$L \cdot T^{-1}$] představuje hydraulickou vodivost, ΔH [L] je rozdíl v hydraulických výškách, L [L] znázorňuje výšku sloupce zeminy, poměr $\Delta H/L$ se v hydraulice nazývá též hydraulický sklon a S [L^2] je průřezová plocha vzorku (Pavlásek et Jačka, 2014).



Obr. č. 2 Schéma Darcyho experimentu (Upraveno z: Darcy (1856))

3.6 Meze platnosti Darcyho zákona

Darcyho zákon vyjadřuje lineární závislost mezi rychlostí proudění a hydraulickým gradientem. Tato lineární závislost neplatí pro všechny hodnoty hydraulického gradientu mezi nulou a nekonečnem. Darcyho zákon je platný pouze v lineární oblasti. Meze platnosti Darcyho zákona jsou znázorněny na obr. č. 3 (Pavlásek et Jačka, 2014).



Obr. č. 3 Meze platnosti Darcyho zákona

Je laboratorně prokázáno, že při průsaku velmi jemnozrnným materiálem s nízkou propustností existuje limitní hodnota hydraulického gradientu, při které ustává pohyb kapaliny. Druhé omezení použitelnosti Darcyho zákona je při průsaku velmi hrubozrnným materiálem, při kterém dochází k turbulentnímu proudění.

V mechanice kapalin se jako kritérium pro rozlišení mezi laminárním a turbulentním prouděním používá Reynoldsovo číslo Re . Je to bezrozměrné číslo, vyjadřující poměr mezi inerciálními a viskózními silami působícími na proudící kapalinu. Kritická hodnota Reynoldsova čísla při proudění vody v potrubí je zhruba 2000 (Valentová, 2007). Pro proudění porézním prostředím je Reynoldsovo číslo definováno jako:

$$Re = \frac{d v \rho}{\mu} \quad (3)$$

kde v [$L \cdot T^{-1}$] je rychlost proudění kapaliny, ρ hustota kapaliny, d [L] je efektivní průměr póru nebo efektivní průměr zrna a μ [$L^2 \cdot T^{-1}$] je dynamická viskozita (Pavlašek et Jačka, 2014).

Darcyho zákon je platný, pokud Reynoldsovo číslo nestoupne nad jistou hodnotu mezi 1 a 10. V této oblasti je proudění laminární s převažujícími viskózními silami. Kritická hodnota Reynoldsova čísla, která shora omezuje platnost Darcyho zákona, je závislá na konkrétním materiálu (Valentová, 2007). Mezi hodnotami 1 až 10 je přechodná oblast a při hodnotách nad 10 je už proudění turbulentní (Šráček et Kuchovský, 2003).

Oblast postlineární může být charakterizována Re větším než kritické, avšak neznamená, že tyto odchylky od lineárního zákona by byly způsobeny turbulencí (Kutílek, 1984).

Ve velmi jemnozrnných materiálech – jílovitých a prachovitých je voda vázána velice silnými molekulárními silami. Proudění vody v těchto prostředích nastává až při překročení určité minimální hodnoty hydraulického gradientu. Hodnota limitního gradientu je pro každý materiál jiná; pro prachovité a hlinité zeminy je menší než 0,5; pro jílovité zeminy se pohybuje v rozmezí 0,5 až 1 (Valentová, 2007).

Proudění podzemní vody se děje většinou při takových hodnotách Reynoldsova čísla, při kterých je Darcyho zákon aplikovatelný. Kritická hodnota Reynoldsova čísla není téměř nikdy překročena při proudění v nezpevněných horninách a zrnitých materiálech (Valentová, 2007).

3.7 Vyhodnocení nasycené hydraulické vodivosti

Vyhodnocení nasycené hydraulické vodivosti vychází z Darcyho zákona. Hodnota K_s se při měření s konstantním spádem vypočítává přímo z úpravy Darcyho zákona, a proto se také předpokládá jeho platnost.

V této práci bylo měřeno pouze s konstantním spádem, který se podle Pavláskova et Jačka (2014) používá hlavně u vysoce a středně propustných vzorků. U měření s konstantním spádem se hydraulický gradient napříč vzorkem během měření nemění a měří se objem vody V , který za čas t proteče vzorkem prostřednictvím byrety (Šráček et Kuchovský, 2003).

Pro výpočet K_s z měření s konstantním spádem platí:

$$K_s = \frac{V_p * L_v}{A_v * t * \Delta H} \quad (4)$$

kde V_p je objem vody proteklé vzorkem, A_v je plocha příčného řezu vzorkem, K_s znázorňuje hodnotu nasycené hydraulické vodivosti, ΔH je rozdíl hydraulických výšek, L_v označuje délku měřeného vzorku a t je čas, za který natekl objem vody V prostřednictvím byrety.

Princip měření s proměnným spádem je podobný měření s konstantním spádem. Neměří se ale objem vody nateklý v byretě, ale změna hydraulického sklonu v čase. Vzhledem k tomu, že doba měření s proměnným spádem může být i několik dní z důvodu nízké propustnosti vzorků, doporučuje se použít korekci pro výpar.

Hodnota K_s při měření s proměnným spádem se opět vypočítává z úpravy Darcyho zákona následujícím vztahem:

$$K_s = \frac{A_d * L_v}{A_v * (t_2 - t_1)} * \ln\left(\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}\right) \quad (5)$$

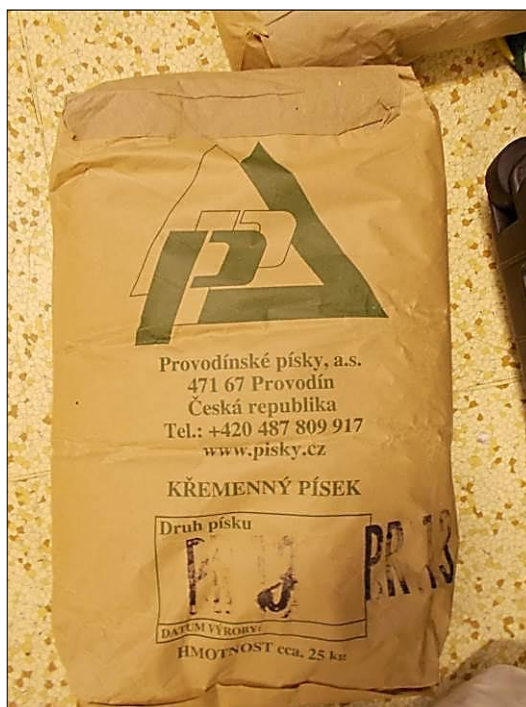
kde ΔH_1 je rozdíl hladin na počátku měření v čase t_1 , ΔH_2 je rozdíl hladin měření v čase t_2 a A_d je průřezová plocha trubice držáku vzorků, ve které stoupá hladina a měří se její změna (Pavlásek et Jačka, 2014).

4. Metodika

4.1 Charakteristika měřeného materiálu

Pro tuto práci byl za materiál vybrán písek ze společnosti "Provodínské písky a.s." se sídlem v Provodíně. Provodínské křemenné písky se těží již od roku 1913. Ložisko sklářských písků Provodín (jižně od České Lípy) vzniklo před asi 100 miliony let (horní křída) sedimentací jemných až středně hrubých písků na pobřeží mělkého moře v tzv. Severočeské křídové pánvi. Vzhledem k pevnosti pískovce se musí při těžbě provádět trhací práce pro jeho rozpojení. Vysoce kvalitní sklářské písky, které se vyrábí v této společnosti, se tradičně používají ve sklárnách, slévárnách, stavebních firmách a mnoha průmyslových odvětvích. Rekultivace, které společnost provádějí ve vytěžených ložiscích za pomoci kompetentních odborníků, je šetrná k životnímu prostředí a uznávána v celé České republice.

Jak už je výše uvedeno, byly vybrány provodínské písky, a to písky s označením PR 0,5 – 1 a PR 13. Písek PR 0,5 – 1 patří mezi provodínské filtrační písky, zatímco písek PR 13 (obr. č. 4) se řadí mezi provodínské sklářské písky. Tyto písky jsou tříděním upravené, ve svých chemických a fyzikálních směrných číslech standardizované výrobky. Vyznačují se vysokou chemickou čistotou. Jejich obsah SiO_2 se pohybuje nad 98 %. Provodínské filtrační písky se dále vyznačují precizním zrnitostním rozdělením.



Obr. č. 4 Provodínský písek PR13

S tímto materiálem se uvažuje do projektu "Udržitelné využívání zásob podzemních vod v ČR" řešeného na Katedře vodního hospodářství a environmentálního modelování.

Výběr tohoto materiálu je z důvodu testování časových změn a vlivu různého zrnitostního složení homogenního písku. Tyto písky jsou běžně dostupným materiálem, se kterým se obvykle uvažuje. Homogenní materiály písků byly vybrány pro testování vlivu zrnitosti z důvodů vyloučení dalších faktorů ovlivňujících K_s (například obsah organické hmoty, struktura a další). Při laboratorním stanovení meze tekutosti zemin vycházejí oba zmiňované písky jako materiál neplastický.

Pro měření byl dále použit křemenný prach, který vzniká při zpracování hrubozrnného písku. Tento materiál byl použit z důvodů jeho výrazně nízkých

hodnot K_s . Prach byl použit i do těchto směsí – směs hrubozrnného písku a prachu a směs jemnozrnného písku a prachu. Vzorky namíchané v různém poměru písku a prachu jsou zobrazeny na obr. č. 5, obr. č. 6, obr. č. 7, obr. č. 8 a obr. č. 9.

Z výsledných hodnot, dosažených při hustoměrné metodě, byla vynesena zrnitostní křivka (graf č. 1). Ze zrnitostní křivky vynesené na grafu č. 1 můžeme zjistit, že dominantní část zaujímá frakce 0,002 – 0,05 mm, což odpovídá frakci prachu. Na grafu č. 2 a grafu č. 3 jsou znázorněny křivky zrnitosti pro hrubozrnný a jemnozrnný písek. Křivky zrnitosti z grafů č. 2 a č. 3 byly převzaty z laboratoře GEMATEST s.r.o.

Průměrné hodnoty objemové hmotnosti a pórovitosti pro jednotlivé materiály jsou zobrazeny v tab. č. 2. Objemová hmotnost a pórovitost byly stanoveny podle standardních postupů, které uvádí Pavlásek et Jačka (2014).



Obr. č. 5 Vzorek se samotným prachem



Obr. č. 6 Vzorek s poměrem 20% PR 0,5 - 1 a 80% prachu



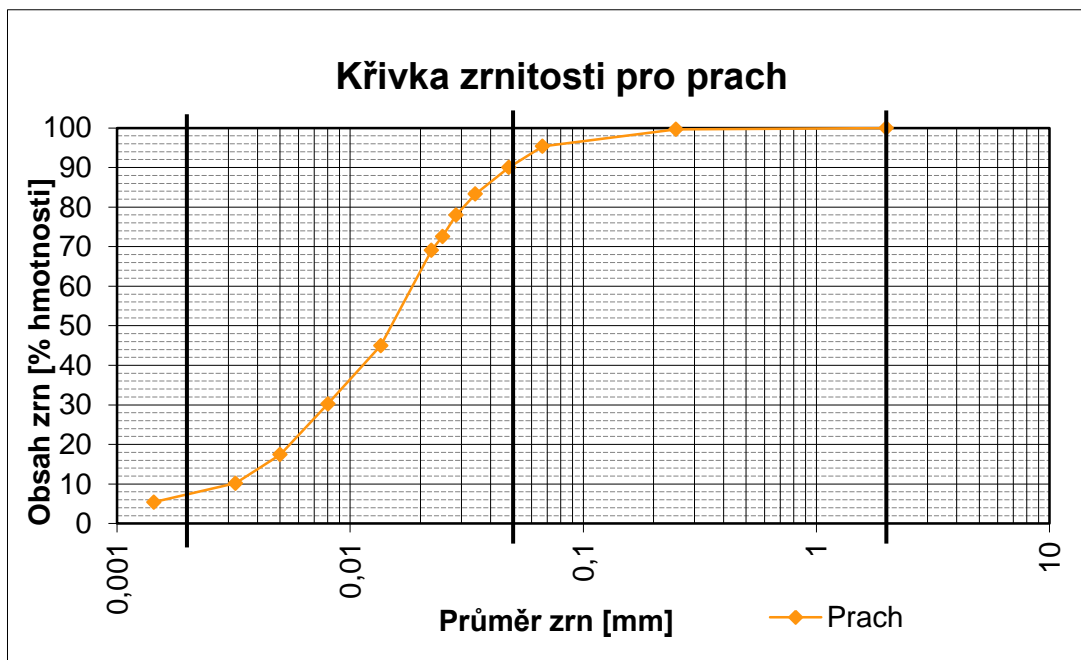
Obr. č. 7 Vzorek s poměrem 40% PR 0,5 - 1 a 60% prachu



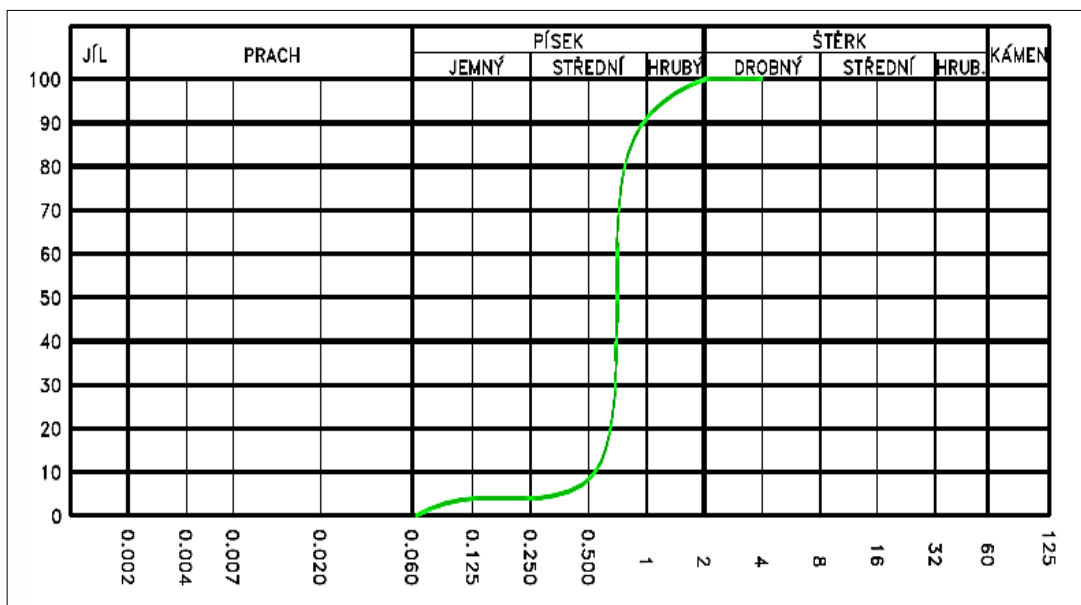
Obr. č. 8 Vzorek s poměrem 60% PR 0,5 - 1 a 40% prachu



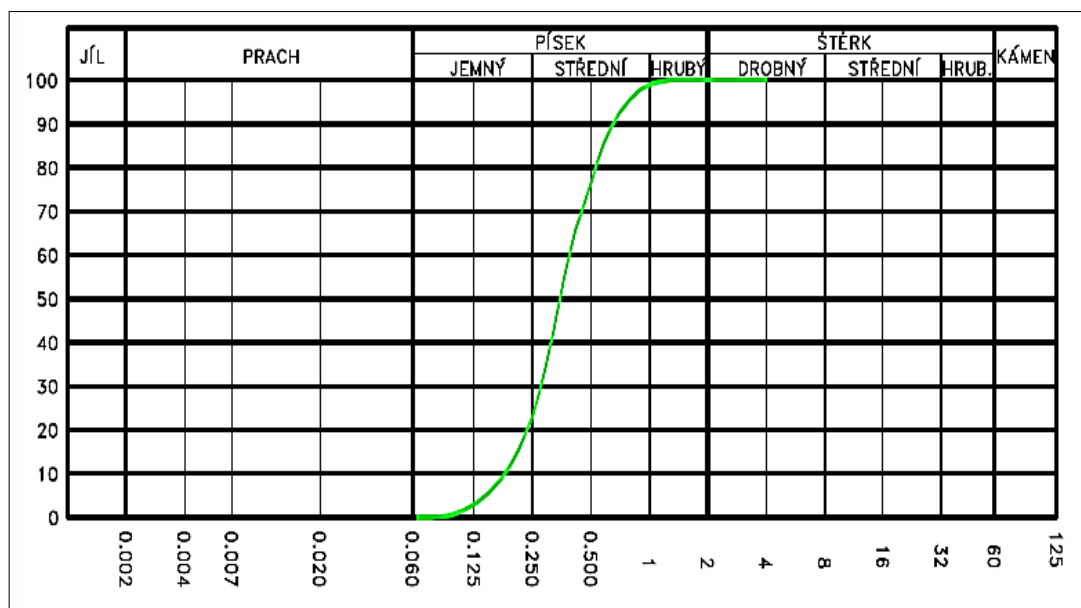
Obr. č. 9 Vzorek s poměrem 80% PR 0,5 - 1 a 20% prachu



Graf č. 1 Křivka zrnitosti pro prach



Graf č. 2 Křivka zrnitosti pro hrubozrnný písek



Graf č. 3 Křivka zrnitosti pro jemnozrnný písek

Materiál	Poměr	Objemová hmotnost [g.cm-3]	Pórovitost [-]
PR 0,5 - 1		1,655	0,375
PR 13		1,550	0,415
Směs PR 0,5 - 1 a prachu	80:20	1,810	0,317
	60:40	1,705	0,357
	40:60	1,500	0,434
	20:80	1,318	0,503
Prach		1,305	0,508
Směs PR 13 a prachu	80:20	1,798	0,322
	60:40	1,739	0,344
Směs PR 13 a PR 0,5 - 1	60:40	1,637	0,382

Tab. č. 2 Průměrné hodnoty pro jednotlivé materiály

4.2 Stanovení nasycené hydraulické vodivosti sypaných vzorků

4.2.1 Příprava a plnění vzorků

Plnění vzorků probíhalo v laboratoři Katedry vodního hospodářství a environmentálního modelování, která se nachází na Fakultě životního prostředí České zemědělské univerzity v Suchdole v Praze.

Půdní vzorky byly odebrány do tzv. Kopeckého fyzikálních válečků. Jsou to 4,1 cm vysoké nerezové ocelové válečky s ostřím na jejich vnější spodní hraně, jejichž objem je standardně 100 cm³. Na stěnách těchto válečků jsou vyražená čísla pro snadné rozeznání jednotlivých vzorků.

Než se začaly válečky plnit materiály popsány v předchozí kapitole, byly všechny tyto válečky pečlivě očištěny a samostatně zváženy na vahách s přesností na desetinu gramu. Zváženy byly i jednotlivé dvojice plastových víček, kdy každému válečku náležela jedna dvojice. Před samotným plněním vzorků se vnitřní stěny u všech Kopeckého válečků potřely silikonem (obr. č. 10), který zde slouží jako hydrofobní materiál pro zamezení proudění podél stěn (Fodor et al., 2011). Samotné vzorky byly plněny tak, že nejprve se na neseříznutou stranu válečku nasadilo plastové víčko a pomocí lžice byl váleček naplněn příslušným materiálem. Po naplnění válečku až po jeho okraj se na něj nasadilo druhé plastové víčko. Dlaní nebo tupou stranou nože se zhruba desetkrát poklepalo na stěnu válečku, aby došlo k usednutí písku. Následně se sundalo horní víčko a váleček byl opět doplněn pískem až po jeho okraj.

Všech deset vzorků bylo po naplnění za sucha zváženo i s oběma víčky (obr. č. 11) a jejich váha zaokrouhlena na jednu desetinu. Dále se připravily hydrofilní gázy, gumičky, sítko a držáky vzorků. Horní hrana každého držáku byla v místě, kde se dotýká s horní hranou válečku, vymazána silikonem. Je důležité dbát na to, aby byl držák vzorků před vymazáním silikonem čistý a nebyly v něm jakékoli nečistoty. Čistota držáku je důležitá hlavně z důvodu dobrého těsnění, aby nedocházelo k proudění stěnami. Dále se ze všech zavíčkovaných válečků, postupně odstranilo to víčko, které je na tupé straně válečku. Na tuto tupou stranu válečku se položila gáza, přes gázu se navlékla gumička a nakonec se nasadilo sítko (obr. č. 12). Váleček se opatrně obrátil sítkem dolů a sejmul se i druhé víčko. Váleček se zkosenou stranou nahoře byl následně umístěn do držáku a pečlivě utažen, aby váleček s materiálem z držáku nevypadl (obr. č. 13).



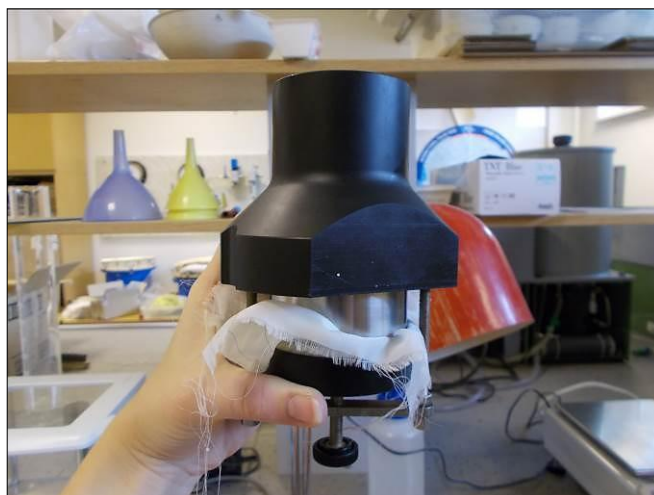
Obr. č. 10 Silikon – Dow corning DC4



Obr. č. 11 Vážení půdního vzorku



Obr. č. 12 Půdní vzorek s hydrofilní gázou, gumičku a sítkem



Obr. č. 13 Vzorek umístěný v držáku

4.2.2 Sycení vzorků a vlastní měření

Měření probíhalo v laboratorním permeamtru firmy Eijkelkamp metodou s konstantním spádem. Metody sycení, měření a vyhodnocení použité v této práci jsou popsány také v operačním manuálu k tomuto přístroji (Eijkelkamp, 2008).

Držáky se vzorky byly umístěny do laboratorního permeamtru, kde se postupně sytily přibližně jeden týden. Laboratorní permeametr umožňuje umístění a měření celkem deseti vzorků s uzavřenou cirkulací vody (obr. č. 14).

Před samotným měřením byl kontejner permeamtru částečně naplněn vodou pod dolní okraj vzorku. Následně byly vzorky postupně syceny zvyšováním hladiny přibližně 0,6 cm za den. Pro měření byla zvolena metoda s konstantním spádem, protože se po úplném nasycení vzorků v permeamtru objevila uvnitř držáků nad vrchním okrajem všech vzorků voda. V případě, že by se druhý den nad vzorky voda neobjevila, jednalo by se o málo propustné vzorky a zvolila by se metoda s proměnným spádem.

Časový krok u celého měření vzorků byl zhruba 2 - 3 dny. Časovým krokem se rozumí časový rozestup mezi jednotlivými měřeními v každé sérii.



Obr. č. 14 Umístění všech deseti vzorků v permeamtru

Aby se mohlo začít měřit, musely být do držáků se vzorky umístěny plastové násosky. Tyto násosky se před umístěním do držáků ponořily do hrnce s vodou, aby se celé naplnily vodou. Je velmi důležité, aby ve vodou zaplněných násoskách nebyla vzduchová bublina. Násoska je umístěná v držáku jedním svým koncem (obr. č. 15) a vede vodu prosakující nad vzorkem do příslušné byrety. Tyto plastové násosky se používají pouze při měření s konstantním spádem. Každá byreta je opatřena uzavírajícím kohoutem, který se při měření uzavře, a tím dochází k jejímu plnění vodou (obr. č. 16). Před každým měřením se změřila teplota vody a hladina vody uvnitř držáku a v kontejneru. Tato hladina vody se měřila pomocí mikrometru se světelnou signalizací, která se po dosažení úrovně hladiny rozsvítila (obr. č. 17). Každý půdní vzorek se pro stanovení jedné průměrné hodnoty měřil ihned opakovaně třikrát až pětkrát, následně vzorkem protékala určitou dobu voda a poté byl opět měřen pro získání průměrné hodnoty pro další časový krok. Takto byl měřen časový vývoj hodnot K_s jednotlivých vzorků.

Pro výpočet nasycené hydraulické vodivosti byl použit program Microsoft Excel a vzorec (4), který vychází z úpravy Darcyho zákona. Výsledné hodnoty K_s pro všechny materiály jsou uvedeny v podkapitole 5.1.



Obr. č. 15 Správné umístění násosky do držáků



Obr. č. 16 Měření vzorku číslo 3 (zleva) – kohout je uzavřen a byreta se plní vodou



Obr. č. 17 Rozsvícení světelné signalizace po dosažení úrovně hladiny

5. Výsledky a diskuze

Celkem bylo v období září až listopad 2014 provedeno opakované měření nasycené hydraulické vodivosti (K_s) celkem čtyřiceti vzorků. Dále byly u těchto vzorků provedeny měření objemové hmotnosti a pórovitosti a u prachu také zrnitostní rozbor hustoměrnou metodou.

5.1 Přehled stanovených hodnot K_s

Je důležité zmínit, že i přes veškerou opatrnost při samotných měření, mohou být některé vzorky zatíženy chybou. Vzorek s číslem 70 v první sérii vzorků měl v porovnání s ostatními vzorky ve stejné sérii téměř čtyřnásobně vyšší hodnoty K_s (graf č. 4). Důvodem k vysvětlení takto vysokých hodnot může být například vznik preferenční cesty, špatné umístění vzorku do držáku nebo přítomnost nečistot v místě přilnutí válečku ke stěně držáku.

Ve druhé sérii u vzorku číslo 54 vycházejí lehce zvýšené hodnoty K_s (graf č. 5), což s největší pravděpodobností připisují vzniku preferenční cesty.

Jelikož jsou z celého měření zatíženy chybou pouze dva vzorky, byly vyřazeny ze všech výpočtů, aby nedošlo k znehodnocení ostatních výpočtů.

Naměřené hodnoty K_s pro všechny materiály jsou uvedeny v tab. č. 3, tab. č. 4, tab. č. 5 a tab. č. 6a,b.

		Hrubozrnný písek PR 0,5 - 1		
Datum měření		18.9.2014	22.9.2014	26.9.2014
Průměrná K_s ($m \cdot s^{-1}$)	Vzorek 69	0,0018733	0,0027083	0,0022561
	Vzorek 49	0,0022175	0,0023705	0,0024749
	Vzorek 67	0,0021836	0,0024521	0,0025103
	Vzorek 64	0,0023190	0,0022330	0,0027407
	Vzorek 57	0,0021249	0,0022574	0,0023200
	Vzorek 54	0,0023251	0,0024304	0,0020273
	Vzorek 62	0,0021179	0,0023399	0,0024777
	Vzorek 72	0,0021334	0,0025083	0,0023472
	Vzorek 60	0,0019658	0,0024992	0,0025774

Tab. č. 3 Hodnoty K_s pro hrubozrnný písek

		Jemnozrnný písek PR 13		
Datum měření		3.10.2014	6.10.2014	8.10.2014
Průměrná K_s ($m \cdot s^{-1}$)	Vzorek 69	0,0004072	0,0005476	0,0005704
	Vzorek 49	0,0003930	0,0005409	0,0005368
	Vzorek 67	0,0004339	0,0005558	0,0005600
	Vzorek 64	0,0004211	0,0005543	0,0005473
	Vzorek 57	0,0003768	0,0005412	0,0005525
	Vzorek 70	0,0004591	0,0006247	0,0006023
	Vzorek 62	0,0004036	0,0005564	0,0005418
	Vzorek 72	0,0003631	0,0005463	0,0005682
	Vzorek 60	0,0004097	0,0005466	0,0005198

Tab. č. 4 Hodnoty K_s pro jemnozrnný písek

Hrubozrný písek PR 0,5-1 a prach			
Datum měření		13.10.2014	16.10.2014
Průměrná K_s (m.s⁻¹)	Vzorek 69	1,04243E-06	1,30436E-06
	Vzorek 49	7,60435E-07	8,59167E-07
	Vzorek 67	1,20775E-06	9,43684E-07
	Vzorek 64	6,99826E-07	1,25834E-06
	Vzorek 57	9,10343E-06	1,35782E-05
	Vzorek 70	7,13126E-06	8,59792E-06
	Vzorek 54	6,50865E-07	7,39725E-07
	Vzorek 62	4,94815E-07	7,5132E-07
	Vzorek 72	1,03525E-06	1,3538E-06
	Vzorek 60	8,31123E-07	6,68134E-07

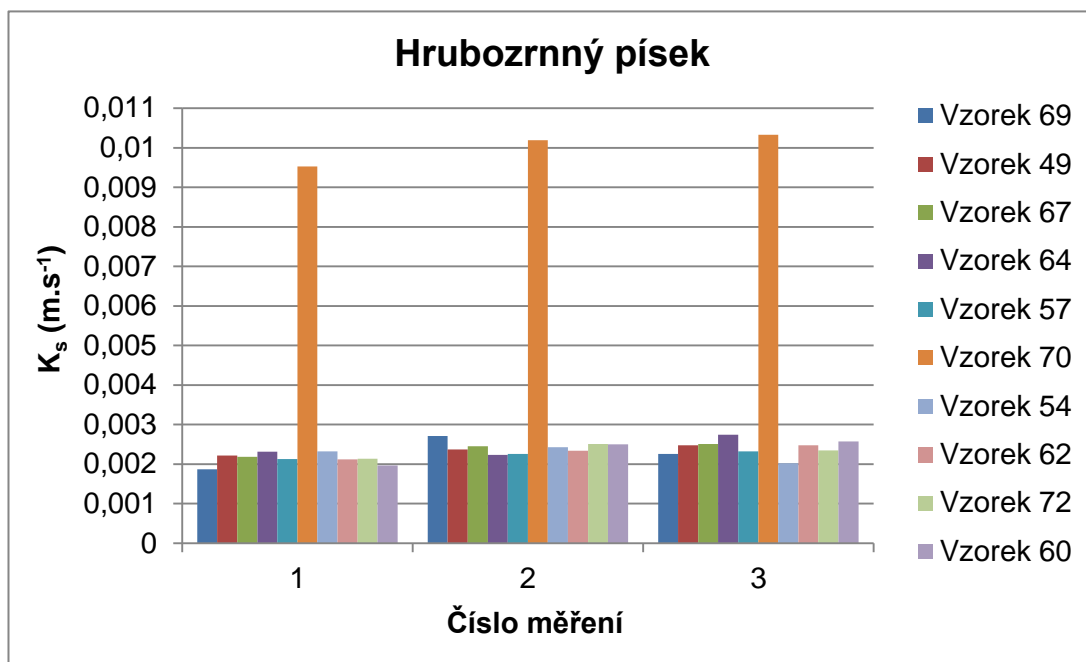
Tab. č. 5 Hodnoty K_s pro směs hrubozrného písku a prachu

Jemnozrný písek PR 13 a prach			
Datum měření		20.10.2014	22.10.2014
Průměrná K_s (m.s⁻¹)	Vzorek 91	7,14823E-07	7,77941E-07
	Vzorek 73	6,85299E-07	7,53697E-07
	Vzorek 80	1,75925E-06	1,77084E-06
	Vzorek 75	4,23465E-07	6,35972E-07
	Vzorek 95	6,00063E-07	7,42993E-07
	Vzorek 82	1,41151E-06	1,45486E-06
	Vzorek 78	2,341E-06	2,58363E-06
	Vzorek 84	2,42517E-06	4,26244E-06

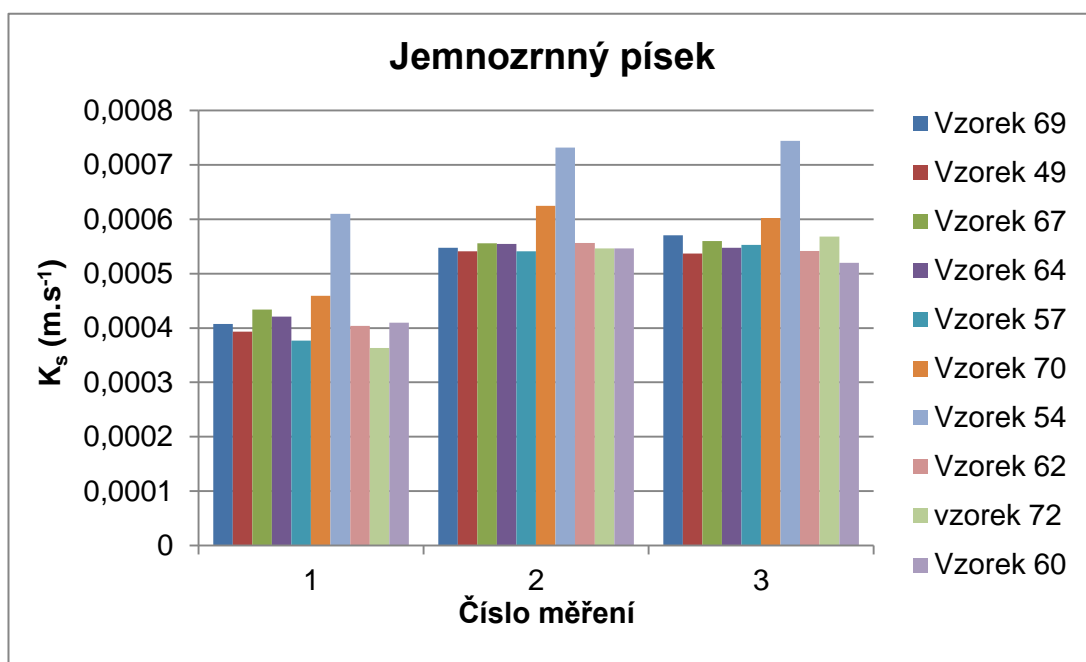
Tab. č. 6a Hodnoty K_s pro směs jemnozrného písku a prachu

Hrubozrný a jemnozrný písek		
Vzorek 76	0,0005672	0,0006334
Vzorek 79	0,0004795	0,0005645

Tab. č. 6b Hodnoty K_s pro směs hrubozrného a jemnozrného písku



Graf č. 4 Výsledné hodnoty hydraulické nasycené vodivosti pro první sérii



Graf č. 5 Výsledné hodnoty hydraulické nasycené vodivosti pro druhou sérii

5.2 Statistický popis měřených výsledků

Pro jednotlivé vzorky byly vypočteny aritmetické průměry, minimální hodnoty a maximální hodnoty. U vzorků, kde bylo provedeno více měření, byly spočteny i směrodatné odchylky a koeficienty variace.

Statistický popis výsledků pro hrubozrnný písek je ukázán v tab. č. 7 a pro jemnozrnný písek je statistický popis výsledků znázorněn v tab. č. 8.

Statistický popis hrubozrnného písku					
Parametry	Jednotky	Datum měření - 18.9.2014	Datum měření - 22.9.2014	Datum měření - 26.9.2014	Celkový počet měření
Průměr	[m.s ⁻¹]	0,00214	0,00242	0,00241	27
Min	[m.s ⁻¹]	0,00187	0,00223	0,00203	
Max	[m.s ⁻¹]	0,00233	0,00271	0,00274	
Směrodatná odchylka	[m.s ⁻¹]	0,00015	0,00015	0,00021	
Koeficient variace	[%]	0,06939	0,05993	0,08516	

Tab. č. 7 Statistický popis hrubozrnného písku

Statistický popis jemnozrnného písku					
Parametry	Jednotky	Datum měření - 3.10.2014	Datum měření - 6.10.2014	Datum měření - 8.10.2014	Celkový počet měření
Průměr	[m.s ⁻¹]	0,00041	0,00056	0,00056	27
Min	[m.s ⁻¹]	0,00036	0,00054	0,00052	
Max	[m.s ⁻¹]	0,00046	0,00062	0,00060	
Směrodatná odchylka	[m.s ⁻¹]	0,00003	0,00003	0,00002	
Koeficient variace	[%]	0,07099	0,04667	0,04264	

Tab. č. 8 Statistický popis jemnozrnného písku

U hrubozrnného a jemnozrnného písku došlo mezi prvním a druhým časovým krokem k lehkému navýšení hodnot, zatímco mezi druhým a třetím časovým krokem nenastala prakticky žádná změna. Průměrné hodnoty hrubozrnného písku se pohybovaly od $2,1 \cdot 10^{-3}$ – $2,4 \cdot 10^{-3}$ m.s⁻¹. Průměrné hodnoty jemnozrnného písku se

pohybovaly od $4,1 \cdot 10^{-4}$ do $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Jemnozrnný písek má skutečně výrazně nižší hodnoty K_s než hrubozrnný písek. Jelikož jsou tyto písky homogenní materiál, koeficienty variace jsou zde velmi nízké.

Statistický popis výsledků pro směsi písků s prachem jsou znázorněny v tab. č. 9, tab. č. 10 a tab. č. 11.

Statistický popis směsi hrubozrnného písku a prachu						
Materiál	Poměr	Celkový počet měření	Parametry	Jednotky	Datum měření - 13.10.2014	Datum měření - 16.10.2014
PR 0,5-1:Prach	80:20	4	Průměr	[m.s ⁻¹]	8,12E-06	1,11E-05
			Min	[m.s ⁻¹]	7,131E-06	8,598E-06
			Max	[m.s ⁻¹]	9,103E-06	1,358E-05
	60:40	4	Průměr	[m.s ⁻¹]	5,728E-07	7,455E-07
			Min	[m.s ⁻¹]	4,948E-07	7,397E-07
			Max	[m.s ⁻¹]	6,509E-07	7,513E-07
	40:60	4	Průměr	[m.s ⁻¹]	1,019E-06	8,059E-07
			Min	[m.s ⁻¹]	8,311E-07	6,681E-07
			Max	[m.s ⁻¹]	1,208E-06	9,437E-07
	20:80	4	Průměr	[m.s ⁻¹]	8,711E-07	1,281E-06
			Min	[m.s ⁻¹]	6,998E-07	1,258E-06
			Max	[m.s ⁻¹]	1,042E-06	1,304E-06
0:100	4	Průměr	[m.s ⁻¹]	8,978E-07	1,106E-06	
		Min	[m.s ⁻¹]	7,604E-07	8,592E-07	
		Max	[m.s ⁻¹]	1,035E-06	1,354E-06	

Tab. č. 9 Statistický popis směsi hrubozrnného písku a prachu

Předpokládalo se, že u vzorků s čistým prachem budou vycházet nejnižší hodnoty K_s . Je tedy zajímavé, že u směsi hrubozrnného písku a prachu, mají vzorky s podílem hrubozrnného písku nižší hodnoty K_s , než vzorky s čistým prachem.

Statistický popis směsi jemnozrného písku a prachu						
Materiál	Poměr	Celkový počet měření	Parametry	Jednotky	Datum měření - 20.10.2014	Datum měření - 22.10.2014
PR 13:Prach	80:20	8	Průměr	[m.s ⁻¹]	1,984E-06	2,518E-06
			Min	[m.s ⁻¹]	1,412E-06	1,455E-06
			Max	[m.s ⁻¹]	2,425E-06	4,262E-06
			Směrodatná odchylka	[m.s ⁻¹]	4,832E-07	1,256E-06
			Koeficient variace	[%]	0,2435005	0,4989942
	60:40	8	Průměr	[m.s ⁻¹]	6,059E-07	7,277E-07
			Min	[m.s ⁻¹]	4,235E-07	6,36E-07
			Max	[m.s ⁻¹]	7,148E-07	7,779E-07
			Směrodatná odchylka	[m.s ⁻¹]	1,31E-07	6,284E-08
			Koeficient variace	[%]	0,2162067	0,0863646

Tab. č. 10 Statistický popis směsi jemnozrného písku a prachu

Statistický popis směsi jemnozrného a hrubozrného písku						
Materiál	Poměr	Celkový počet měření	Parametry	Jednotky	Datum měření - 20.10.2014	Datum měření - 22.10.2014
PR 13:PR 0,5-1	60:40	4	Průměr	[m.s ⁻¹]	0,0005234	0,000599
			Min	[m.s ⁻¹]	0,0004795	0,0005645
			Max	[m.s ⁻¹]	0,0005672	0,0006334

Tab. č. 11 Statistický popis směsi jemnozrného a hrubozrného písku

Průměrné hodnoty K_s u prachu, hrubozrného a jemnozrného písku byly porovnány s průměrnými hodnotami K_s vypočtenými v laboratoři GEMATEST s.r.o., která je součástí firmy "Provodínské písky a.s.". Porovnání hodnot je zobrazeno v tab. č. 12.

Materiál	Laboratoř GEMATEST	Naměřené hodnoty
PR 0,5 - 1	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
PR 13	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
Prach	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$

Tab. č. 12 Porovnání průměrných hodnot K_s

Rozdíl u hodnot prachu je způsoben nejspíše nestabilitou materiálu, kdy během měření se z prachu stává "kaše". Změny u hodnot PR 0,5 - 1 a PR 13 mohly být způsobeny rozdílnou metodou měření. Pro testované vzorky je vhodné použít konstantní spád, který byl použit v této práci. V referenční laboratoři byl použit proměnný spád, což mohlo vést k mírným nepřesnostem a drobným odchylkám mezi laboratořemi.

5.3 Časové změny

U všech sérií vzorků byl zaznamenán mírný nárůst hodnot K_s . Výjimkou je třetí série, kde u poměru 40:60 nastal mírný pokles hodnot K_s . Z inženýrského hlediska jsou tyto změny nepodstatné.

6. Závěr

Bakalářská práce se zabývá stanovením hodnot nasycené hydraulické vodivosti (K_s) přírodních písků a směsí těchto písků s prachem za použití laboratorního permeamtru. Bylo provedeno detailní stanovení K_s a jejího časového vývoje. Byly také provedeny doplňující stanovení pórovitosti a objemové hmotnosti u všech testovaných vzorků. Pro prach byl také proveden zrnitostní rozbor hustoměrnou metodou.

Jednotlivé průměry K_s se výrazně lišily podle materiálu. Pro hrubozrnný písek byla průměrná hodnota K_s $2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, u jemnozrnného písku vycházela průměrná hodnota K_s nižší, a to $4 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. U směsi hrubozrnného písku s prachem byly průměrné hodnoty K_s pro jednotlivé poměry následující – pro poměr 80:20 - $8,1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; pro poměr 60:40 - $5,7 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; pro poměr 40:60 - $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a u poměru 20:80 - $8,7 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro samotný prach se průměrná K_s počítala $8,9 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výrazná závislost hodnot K_s na zrnitostním složení byla tedy u těchto materiálů prokázána.

Pro směs jemnozrnného písku a prachu vycházely průměrné K_s takto – u poměru 80:20 byla K_s $1,9 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a u poměru 60:40 byla K_s $6,1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. U směsi hrubozrnného a jemnozrnného písku u poměru 60:40 vycházela průměrná K_s $5,2 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Všechny hodnoty K_s jsou uvedeny jako průměr za první měření. Koeficient variace pro první sérii vzorků měl průměrnou hodnotu 0,07% a pro druhou sérii vzorků byla průměrná hodnota koeficientu variace 0,05%. Tyto hodnoty jsou opravdu velice nízké.

Překvapivé bylo, že nejnižší průměrné hodnoty K_s nevyšly u vzorků se samotným prachem, jak se očekávalo, ale u třetí série vzorků pro poměry 60:40 a 20:80.

K menším časovým změnám docházelo u všech testovaných materiálů. Z inženýrského pohledu nebyly časové změny v hodnotách K_s vyhodnoceny jako významné.

7. Přehled literatury a použitých zdrojů

Aggelides, S.M., Londra P.A., 2000: Effects of compost produced from town wastes and sewage sludge on the physical properties of loamy and a clay soil. *Bioresour.Technol.*, 71: 253-259.

Anderson, S. H., Gantzer, C. J., Brown, J. R., 1990: Soil Physical Properties after 100 Years of Continuous Cultivation. *Soil and Water Conservation*, Vol. 45, pp. 117-121.

Bát'ková, K., Matula, S., Miháliková, M., 2013: Multimediální učebnice hydroopedologických terénních měření. 2. doplněné vydání [on-line]. Česká verze. Česká zemědělská univerzita v Praze. Dostupné z: <http://hydropedologie.agrobiologie.cz>.

Benbi, D. K., Biswas, C. R., Bawa, S. S., Kumer, K., 1998: Influence of Farmyard Manure, Inorganic Fertilizers and Weed Control Practices on Some Physical Properties in a Long-Term Experiment. *Soil Use and Management*, Vol. 14, No. 1, pp. 52-54.

Brady, N. C., 1974: *The Nature and Properties of Soils*. Mac-Millan Publishers Corporation, New York, pp. 20- 33.

Císlerová, M., Vogel, T., 1998: *Transportní procesy*. Skripta ČVUT, Praha.

Campbel, C. A., Schnitzer, M., Stewart, J. W. B., Biederbeck, V. O., Selles, F., 1986: Effect of Manure and P Fertilizer on Properties of a Black Chernozem in Southern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, Vol. 66, pp. 601-614.

Curtis, M.J., Claassen, V.P., 2009: Regenerating Topsoil Functionality in Four Drastically Disturbed Soil Types by compost Incorporation. *Restoration Ecology*, 17: 24-32.

Darcy, H., 1856: *Les fontaines publique de la ville de Dijon*. Dalmont, Paris.

Deb, S.K., Shukla, M.K., 2012: Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *Am. J. Environ. Sci.*, 8: 489-502.

Eijkelkamp, 2008: Operating instructions - 09.02 laboratory permeameters. online: <http://www.eijkelkamp.com/Portals/2/Eijkelkamp/Files/Manuals/M1-0902e%20Laboratory%20permeameters.pdf>.

Eusufzai, M.K., Fujii, K., 2012: Effect of Organic Matter Amendment on Hydraulic and Pore Characteristics of a Clay Loam Soil. *Open Journal of Soil Science*, 2, 372-381.

Evanylo, G., Sherony, C., Spargo, J., Starner, D., Brosius, M., Haering, K., 2008: Soil and water environmental effects of fertilizer-, manure-, and compost-based fertility practices in an organic vegetable cropping system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127: 50-58.

Fodor, N., Sándor, R., Orfanus, T., Lichner, L., Rajkai, K., 2011: Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. *Geoderma* 165, 60-68.

Gao, Q., Yang, X., Yun, R., Li, C., 1996: MAGE, a dynamic model of alkaline grassland ecosystems with variable soil characteristics. *Ecol. Model.* 93: 19–32.

Halabuk, A., 2006: Influence of different vegetation types on saturated hydraulic conductivity in alluvial topsoils. *Biologia, Bratislava,* 61: 266-269.

Jačka, L., Pavlásek, J., Jindrová, M., Bašta, P., Černý, M., Balvín, A., Pech, P., 2012: Steady infiltration rates estimated for a mountain forest catchment based on the distribution of plant species. *Journal of Forest Science,* roč. 58, č. 12, s. 536-544.

Jačka, L., Pavlásek, J., Kuráž, V., Pech, P., 2014: A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. *Geoderma* 219 – 220, 82 – 88.

Khaleel, R., Reddy, K. R., Overcash, M. R., 1981: Changes in Soil Physical Properties Due to Organic Waste Additions: A Review. *Journal of Environmental Quality,* Vol. 10, pp. 133-141.

Kutílek, M., 1978: Soil science for water management. Alfa, Praha, 296 pp. (In Czech)

Kutílek, M., 1984: Vlhkost pórovitých materiálů. 1. vyd. Praha: SNTL, 211 s.

Kutílek, M., Kuráž, V., Císlarová, M., 2004: *Hydropedologie 10.* Skriptum ČVUT, Praha, 176 s.

Li, X.Y., Contreras, S., Solé-Benet, A., 2008: Unsaturated hydraulic conductivity in limestone dolines: Influence of vegetation and rock fragments. *Geoderma,* 145: 288-294.

Lichner, L., Majerčák, J., Slaboň, S., Štekauerová, V., 1994: Solute transport in soil. Veda, Bratislava, 120 pp. (In Slovak).

Lichner, L., Dlapa, P., Sir, M., Cipakova, A., Houskova, B., Fasko, P., Nagy, V., 2006: The fate of cadmium in field soils of the Danubian lowland. *Soil Till. Res.* 85: 154–165.

Luxmoore, R. J., 1981: Micro-, Meso-, and Macroporosity of Soil. *Soil Science Society of America Journal,* Vol. 45, No. 3, pp. 671-672.

Mathers, A.C., Stewart, B. A., 1984: Manure Effects on Crop Yields and Soil Properties. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineers,* Vol. 27, pp. 1022- 1026.

McConnell, D.B., Shiralipour, A., Smith, W.H., 1993: Compost application improves soil properties. *Biocycle,* 61-63.

Mencuccini, M., 2003: The ecological significance of longdistance water transport: Short-term regulation, long-term acclimation and the hydraulic costs of stature across plant life forms. *Plant Cell Environ.* 26: 163–182.

- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Edwards, J.,** 1995: 3.05 Vegetation strategies for combating desertification. MEDALUS II Project 3 Managing Desertification. Contract EV5V-CT92-0165. Final Report covering the period 1 January 1991 to 30 September 1995.
- Oades, J.M.,** 1993: The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377–400.
- Ozenc, D., Ozenc, N.,** 2008: Short-term effects of hazelnut husk compost and organic amendment application a clay loam soil. *Compost Science and Utilization*, 16(3): 192-199.
- Pavlásek, J., Jačka, L.,** 2014: *Hydropedologie*. ČŽU, Praha.
- Pengcheng, G., Xinbao, T., Yanan, T., Yingxu C.,** 2007: Application of sewage sludge compost on highway embankments. *Waste Management*, 28(9): 1630-1636.
- Price, G.W., Voroney, R.P.,** 2007: Papermill biosolids effect on soil physical and chemical properties. *Journal of Environmental Quality*, 116: 61-76.
- Reynolds, W.D., Bowman, B.T., Brunke, R.R., Drury, C.F., Tan, C.S.,** 2000: Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 478 – 484.
- Seashore, M. R.,** 1982: *Clinical, Biochemical and Nutritional Aspects of Trace Elements*. Alan R. Liss, Inc., New York, pp. 5-15.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K.,** 2004: A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota and soil organic matter dynamics. *Soil Till. Res.*, 79: 7-31.
- Solon, J., Degórski, M., Roo-Zielínska, E.,** 2007: Vegetation response to a topographical-soil gradient. *Catena* 71: 309-320.
- Stothoff, S.A., Orb, D., Groeneveld, D.P., Jones, S.B.,** 1999: The effect of vegetation on infiltration in shallow soils underlain by fissured bedrock. *Journal of Hydrology* 218: 169–190.
- Šilar, J., Pačes, T., Dovolil, M., Sarga, K.,** 1983: *Všeobecná hydrogeologie*. SPN Praha.
- Šimek, J., Jesenák, J., Eichler, J., Vaníček, I.,** 1990: *Mechanika zemin*. SNTL, Praha.
- Šráček, O., Kuchovský, T.,** 2003: *Základy hydrogeologie*. 1. vyd. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy Univerzity, 177 s.
- Valentová, J.,** 2007. *Hydraulika podzemní vody*. ČVUT, Praha.
- Wessolek, G., Plagge, R., Leij, F.J., van Genuchten, M.T.,** 1994: Analysing problems in describing field and laboratory measured soil hydraulic properties. *Geoderma* 64: 93-110.

Wu, J. K., 1994: Two Problems of Computer Mechanics Program System. Proceedings of Finite Element Analysis and CAD, Peking University Press, Beijing, pp. 9-15.