

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

**Fakulta životního prostředí
Katedra vodního hospodářství a environmentálního
modelování**



**ZMĚNY HODNOT NASYCENÉ HYDRAULICKÉ
VODIVOSTI V PRŮBĚHU OPAKOVANÉHO
MĚŘENÍ LABORATORNÍM PERMEAMETREM
NA VZORCÍCH RŮZNÉHO ZRNITOSTNÍHO
SLOŽENÍ**

Bakalářské práce

Milan Zedník

Praha 2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Milan Zedník

Vodní hospodářství

Název práce

Změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti v průběhu opakovaného měření laboratorním permeametrem na vzorcích různého zrnitostního složení

Název anglicky

Changes in saturated hydraulic conductivity values during the recurrent measuring procedure of various textured soil cores

Cíle práce

- 1) Provést opakovaná měření na vzorcích různého zrnitostního složení
- 2) Sledovat změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti v průběhu těchto měření.
- 3) Vyhodnotit vliv textury a doby měření na hodnoty nasycené hydraulické vodivosti.

Metodika

Rešerše metod měření nasycené hydraulické vodivosti.

Rešerše faktorů, které ovlivňují hodnotu nasycené hydraulické vodivosti (vliv zrnitosti, půdní struktury, obsahu organické hmoty, doby syčení a doby měření).

Provedení opakovaných měření na vzorcích výrazně odlišného zrnitostního složení a sledování změn hodnot hydraulické vodivosti v průběhu déle trvajících měření.

Vyhodnocení vlivu textury a doby měření na nasycenou hydraulickou vodivost.

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

nasycená hydraulická vodivost, časová proměnlivost, laboratorní permeametr, vliv půdní textury

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.
- Kuráž, V., 1996. Soil moisture models in hydrological modelling evaluation of soil physical parameters, in: Nachtnebel, P.H., Kovář, P., Kuráž, V. [Eds.], *Rainfall runoff models (Lecture Notes on the Workshop)*. Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Chapter 6, pp.1-14.
- 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.
- Reynolds, W.D., 2008a. Saturated hydraulic properties: Laboratory methods, in: Carter M.R., Gregorich, E.G. [Eds.], *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, USA, pp. 1013-1024.

Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Lukáš Jačka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2014

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 17. 2. 2014

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2015

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 13.4 2015

.....

Podpis Zedník

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lukáši Jačkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnoval.

Děkuji také svým rodičům a dalším lidem, kteří mě podporovali při vytvoření této práce.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá dlouhodobým měřením nasycené hydraulické vodivosti K_s na vzorcích syntetického a říčního písku o zrnitostním složení $73 \mu m$ respektive $0,25-2 mm$. Vzorky písku nebyly odebrány v terénu, ale připraveny v laboratoři. Pro stanovení průběhu hodnoty K_s bylo provedeno 5 sérií měření pomocí laboratorního permeometru. Doba měření jednotlivých sérií byla různá, pohybovala se od 4 do 9 dnů. Každá série obsahovala 10 vzorků. Průměrné naměřené hodnoty K_s pro vzorky syntetického písku byly vypočteny v rozmezí od $1,56 \cdot 10^{-4}$ do $3,08 \cdot 10^{-3} cm \cdot s^{-1}$. U vzorků syntetického písku docházelo k výraznému poklesu hodnoty K_s během prvních dvou dnů. Pro hrubozrný písek nebyla zjištěna významná změna průběhu hodnoty K_s v závislosti na čase. Průměrné hodnoty K_s se pohybovaly v rozsahu od $0,0598$ do $0,073 cm \cdot s^{-1}$.

Klíčová slova: nasycená hydraulická vodivost, časová proměnlivost, laboratorní permeometr, vliv půdní textury

SUMMARY

This work deals with a long-term measurement of saturated hydraulic conductivity K_s on samples of synthetic and river sand. The grain of these sands are $73 \mu m$ (synthetic) and $0,25-2 mm$ (river). These samples were prepared in laboratory. There were made five series of measurement in laboratory permeameter. The samples were measured in different time range from 4 to 9 days. Each measurement contained ten samples. The measured mean K_s values of synthetic sand varied distinctly from $1,56 \cdot 10^{-4}$ to $3,08 \cdot 10^{-3} cm \cdot s^{-1}$. For synthetic sand, large reduction of K_s values was noted during first two days. For river sand, significant change of K_s values in time was not noted. Mean K_s values for river sand varied in small range from $0,0598$ to $0,073 cm \cdot s^{-1}$.

Key words: saturated hydraulic conductivity, time variability, laboratory permeameter, influence of soil texture

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A_v	$[L^2]$	- průtočná plocha
d	$[L]$	- průměr efektivního zrna
H_i	$[L]$	- hydraulická výška
ΔH	$[L]$	- rozdíl hladin
H_i	$[L]$	- hydraulická výška
L_v	$[L]$	- délka válečku
P	$[1]$	- pórovitost
t	$[T]$	- čas
v	$[L \cdot T^{-1}]$	- rychlost proudění
V_s	$[M \cdot L^{-3}]$	- objem vody neporušeného vzorku
V_w	$[M \cdot L^{-3}]$	- objem vody
ν	$[L \cdot T^{-2}]$	- kinematická viskozita kapaliny
ρ	$[M \cdot L^{-3}]$	- hustota kapaliny
θ	$[1]$	- objemová vlhkost půdy

1. ÚVOD	1
2. LITERÁRNÍ REŠERŠE	2
2.1 Hydrodynamika půdní vody	2
2.1.1 Darcyho zákon	2
2.1.2 Meze platnosti Darcyho zákona.....	4
2.2 Nasycená hydraulická vodivost	6
2.2.1 Metody stanovení nasycené hydraulické vodivosti	6
2.3 Kolmatace	7
2.3.1 Fyzikální a mechanická kolmatace	8
2.3.2 Biologická kolmatace na sloupci písku	9
3. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	16
4. CHARAKTERISTIKA PŮDNÍCH VZORKŮ	17
4.1 Materiálová charakteristika půdních vzorků	17
5. METODIKA	20
5.1 Měřicí pracoviště	20
5.1.1 Laboratorní permeametr	20
5.1.2 Pyknometr.....	21
5.1.3 Popis měření nasycené hydraulické vodivosti	23
5.1.4 Metoda k určení nasycené hydraulické vodivosti půdních vzorků	24
5.1.5 Statistické vyhodnocení	24
6. VÝSLEDKY A DISKUZE	25
6.1 Laboratorní měření nasycené hydraulické vodivosti pro vzorky	25
syntetického písku	
6.1.1 Statistické vyhodnocení hodnot nasycené hydraulické vodivosti pro	29
vzorky syntetického písku	29
6.2 Laboratorní měření nasycené hydraulické vodivosti pro vzorky	36
hrubozrnného písku	
6.2.1 Statistické vyhodnocení hodnot nasycené hydraulické vodivosti pro	39
vzorky hrubozrnného písku	
7. ZÁVĚR	43

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	45
--------------------------------	----

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Stacionární proudění sloupcem vody o průřezové ploše A.....	3
Obr. 2 Tlakové poměry při proudění vody sloupcem homogenní půdy A.....	3
Obr. 3 Schéma Darcyho experimentálního pokusu.	4
Obr. 4 Závislost rychlosti proudění na hydraulickém gradientu.	5
Obr. 5 Nejběžnější mikrostruktury kolmatace vztažené k hladině podzemní vody.	9
Obr. 6 Průběh hydraulické vodivosti v čase během prvního experimentu.	11
Obr. 7 Detail vývoje bakterií <i>Arthrobacter</i> na pískových zrnech v hloubce 1 mm během prvního experimentu	11
Obr. 8 Průběh hydraulické vodivosti v čase během druhého experimentu.	12
Obr. 9 Detail vývoje bakterií <i>Arthrobacter</i> na pískových zrnech během druhého experimentu	12
Obr. 10 Průběh hydraulické vodivosti v čase pro různé množství glukózy během třetího experimentu.	13
Obr.11 Schéma laboratorního permeometru.....	21
Obr. 12 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky syntetického písku 1.série	28
Obr. 13 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky syntetického písku 2.série	28
Obr. 14 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky syntetického písku 3. série.	29
Obr. 15 Vzorky syntetického písku po měření K_s 1. série (vlevo) a 2. série (vpravo).	29
Obr. 16 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.	31
Obr. 17 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.	34
Obr. 18 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 3. série	36
Obr. 19 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.....	38
Obr. 20 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.....	38
Obr. 21 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.	40
Obr. 22 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.	42

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 Hodnoty hydraulické vodivosti pro různé druhy zeminy.	6
Tab. 2 Poměr hodnot K_s / $K_{počáteční}$ na konci sedmého dne měření.	14
Tab. 3 Odhad pórovitosti pro říční písek 0,25-2 mm.	18
Tab. 4 Odhad pórovitosti pro syntetický písek 73 μm	19
Tab. 5 Hustota syntetického písku o zrnitostním složení 73 μm	22
Tab. 6 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.	26
Tab. 7 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.	27
Tab. 8 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky syntetického písku 3. série.	27
Tab. 9 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.	30

Tab. 8 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky syntetického písku 3. série.	26
Tab. 9 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.	29
Tab. 10 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.	30
Tab. 11 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.	30
Tab. 12 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.	32
Tab. 13 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.	32
Tab. 14 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.	33
Tab. 15 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.	33
Tab. 16 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 3. série.	35
Tab. 17 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 3. série.	35
Tab. 18 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 3. série.	35
Tab. 19 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.	37
Tab. 20 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.	37
Tab. 21 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.	39
Tab. 22 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.	40
Tab. 23 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.	41
Tab. 24 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.	41
Tab. 25 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.	42

1. ÚVOD

V dnešní době máme mnoho provozních problémů v systémech čištění srážkové, průsakové a odpadní vody. S rozvojem výpočetní techniky, která nám zajišťuje sběr a vyhodnocení informací v reálném čase, je možné řešit tyto procesy v životním prostředí. Při vytváření matematického modelu transportních procesů v porézním prostředí, návrhu inženýrských řešení (odvodnění, průsak hrází, atd.) je nutné se zabývat hydrodynamikou půdní vody. Mezi základní vstupní parametry do fyzikálně založeného matematického modelu patří nasycená hydraulická vodivost, která charakterizuje hydraulické vlastnosti půdního prostředí. Její hodnota určuje schopnost nasyceného půdního prostředí vést vodu. Získané informace o průbězích rychlosti pohybu vody v půdním prostředí jsou využity v mnoha důležitých oborech jako je stavebnictví, vodní hospodářství a zemědělství.

Bakalářská práce řeší změny hodnot nasycené hydraulické vodivosti v průběhu opakovaného měření pro jednotlivé vzorky písku o zrnitostním složení syntetického ($73 \mu\text{m}$) a říčního ($0,25\text{-}2 \text{ mm}$). Pro zjištění hodnoty nasycené hydraulické vodivosti se používá laboratorní permeometr. Práce se dělí na dvě části. První část je rešerše, která obsahuje teorii pohybu vody v půdě vysvětlenou pomocí Darcyho zákona, metody stanovení hydraulické vodivosti a kolmataci. Další část tvoří charakteristika půdních vzorků a použitá metodika. V kapitole 6 jsou zaznamenány vypočtené hodnoty nasycené hydraulické vodivosti v závislosti na čase, diskuze a zhodnocení výsledků.

2. LITERÁRNÍ REŠERŠE

2.1 Hydrodynamika půdní vody

Půdu si je možné představit jako porézní prostředí, ve kterém dochází k proudění vody. Pohyb vody je limitován maximálním objemem pórů. Nasycené proudění je takové proudění, při němž jsou všechny póry vyplněny vodou. U nenasyčeného proudění není půda zcela nasycena vodou, vlhkost je menší než pórovitost.

U obou proudění je hnací silou spád potenciálu. Rychlost proudění se vyjadřuje lineárním tvarem transportní rovnice. Principy potenciálního proudění slouží jako základ pro matematicko-fyzikální popis.

Ve skutečných podmínkách vodní částice přecházejí plynule z nasycené do nenasyčené zóny, to samé si je nutné uvědomit při matematickém modelování proudění vody. Většina transportních procesů v přírodě se řadí mezi nestacionární, kde dochází ke změně fyzikálních veličin v čase. Tato problematika se obtížně popisuje matematickými modely. Proto je velice vhodné ji zjednodušit, za účelem získání počáteční informace o probíhajícím procesu. V této práci se zabývám pouze nasyceným stacionárním prouděním vody (*Kutílek et al., 2004*).

Nasycené proudění

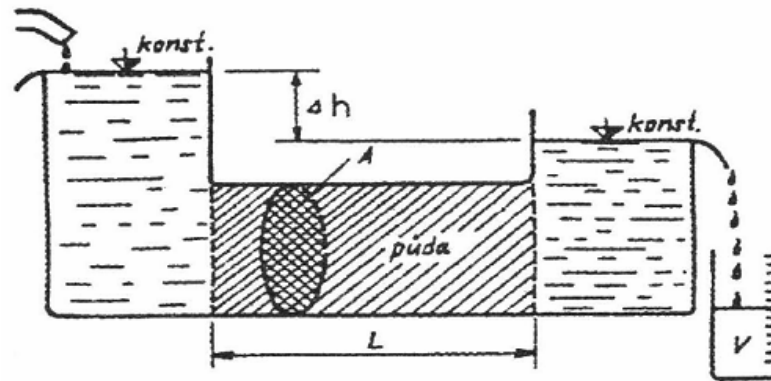
Předpokládáme, že při $h \geq 0$ voda proudí ve všech půdních pórech a uvažujeme podmínku $\theta_s = P$ a zanedbáváme působení uzavřeného vzduchu v pórech.

2.1.1 Darcyho zákon

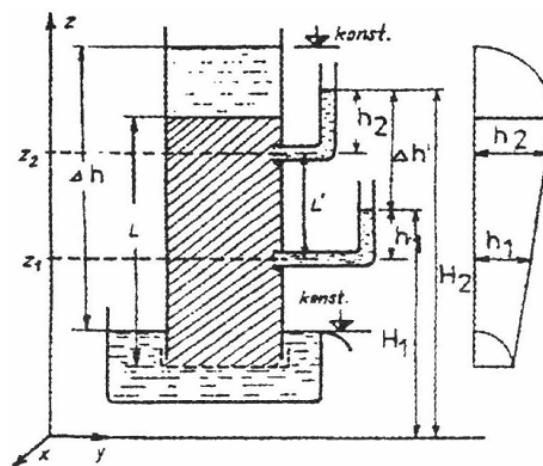
Proudění vody lze vyjádřit pomocí makroskopických veličin. Pro názorné pochopení uvedeme dva pokusy viz obr. 1 a 2. Na obr. 1 lze vidět vodorovnou trubici vyplněnou půdou o průřezové ploše A . Proudění je stacionární, úroveň horní a dolní hladiny je sledována přepadem. Objem vody V se měří pod spodním přepadem po průtoku vody půdou za jednotku času t . Rychlost proudění [$L \cdot T^{-1}$] vody lze vyjádřit dle vztahu

$$v = \frac{V}{A \cdot t}, \quad (2.1)$$

kde t je čas, za který protekl objem vody. Tato rychlost se označuje jako makroskopická, darcyovská nebo hustota toku. Oproti tomu skutečná rychlost vody v pórech se neustále mění v závislosti na morfologii pórů. Střední pórovou rychlost v_p lze vypočítat z makroskopické rychlosti v a z pórovitosti P (*Kutílek, 1978*).



Obr. 1 Stacionární proudění sloupcem vody o průřezové ploše A
(Převzato z: Kutílek et al., 2004).



Obr. 2 Tlakové poměry při proudění vody sloupcem homogenní půdy A
(Převzato z: Kutílek et al., 2004).

Darcyho zákon platí pro nasycené proudění podzemní vody a popisuje pohyb vody přes jakékoliv porézní materiály a zeminy. Proudění vody v půdě se určuje podle makroskopicky sledovaných fyzikálních veličin. Na obr. 3 lze vidět schematicky znázorněný experimentální pokus, který provedl francouzský polytechnik Henry Darcy roku 1856. Tento pokus provedl tak, že naplnil válec pískem a na jeho horní okraj přiváděl proud vody. Tím zjistil přímo úměrnou závislost protečeného objemu vody na rostoucím rozdílu hladin před vtokem a po výtoku z porézního materiálu. Odvozená rovnice se nazývá Darcyho zákon (Valentová, 2007).

$$v = -K_s \cdot \frac{H_2 - H_1}{z_2 - z_1} \quad (2.2)$$

V rovnici (2.2) je K_s nasycená hydraulická vodivost [$L \cdot T^{-1}$], $H_{1,2}$ hydraulická výška nebo také celkový potenciál vztážený na jednotku tíhy. Spád potenciálu určuje velikost proudění vody. Výraz (2.2) lze zapsat v diferenciálním tvaru

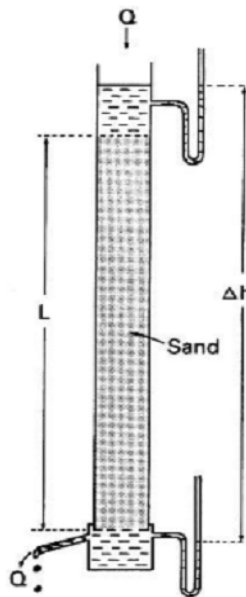
$$v = -K_s \cdot \frac{dH}{dz}, \quad (2.3)$$

kde $\frac{dH}{dz}$ odpovídá hydraulickému gradientu pro jednorozměrné proudění [1]. Rovnici

(2.3) lze zapsat pro třírozměrné proudění ve tvaru

$$v = -K_s \cdot \text{grad} H, \quad (2.4)$$

kde $\text{grad} H$ vyjadřuje vektor určující směr a velikost největší změny hydraulické výšky. Na obr. 3 je zvolen kladný směr proudění vody vzhůru a počátek v ose z . Znaménko mínus v rovnici (2.4) vyjadřuje opačný směr proudění (*Kutílek et Nielsen, 1994*).



Obr. 3 Schéma Darcyho experimentálního pokusu (Převzato z: Syrová, 2014).

2.1.2 Meze platnosti Darcyho zákona

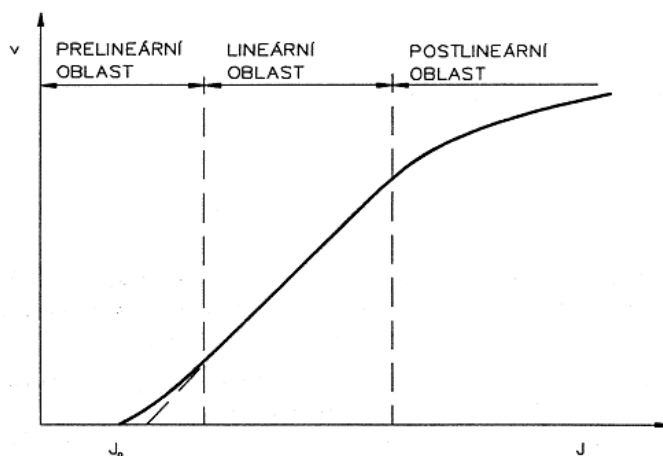
Darcyho zákon charakterizuje lineární závislost mezi rychlostí proudění a hydraulickým gradientem. Tato lineární závislost se neuplatní v celém rozsahu hodnot gradientu hydraulické výšky v rozmezí nula a nekonečno, jelikož je omezena horní i dolní hodnotou gradientu. Limitní hodnoty platnosti Darcyho zákona jsou zobrazeny na obr. 4.

Při průsaku vody jemnozrnným materiálem nastává významné zpomalení až zastavení proudění vody (prelineární režim). Darcyho zákon v prelineárním režimu neplatí, z důvodu nelineární závislosti mezi rychlostí proudění a hydraulickým gradientem. Vazba molekul vody je velice silná v tomto prostředí. Po překročení limitní hodnoty hydraulického gradientu dochází k pohybu vody. Limitní hodnota hydraulického potenciálu pro prachovité a hlinité zeminy je menší než 0,5, u jílovitých zemín dosahuje hodnoty od 0,5-1. Druhé limitující

omezení vzniká při průsaku velmi hrubozrnným materiálem. Tento režim lze popsat převahou setrvačných sil nad viskózními silami. Změna rychlosti proudění v závislosti na hydraulickém gradientu klesá. Tento režim proudění je označován jako postlineární. Horní mez platnosti Darcyho zákona lze překročit v případech proudění v krasových vápencích, dolomitech a ve vulkanických horninách s kavernami. Darcyho zákon lze uplatnit pouze, pokud se jedná o lineární oblast proudění, což většinou platí pro proudění podzemních vod. Pro stanovení lineárního a postlineárního proudění se využívá *Reynoldsovo číslo* Re [1], které je pro ustálené proudění v nasycené zóně vyjádřeno dle vztahu

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu}, \quad (2.5)$$

kde v_s je rychlost proudění [$L \cdot T^{-1}$], ν kinematická viskozita kapaliny [$L^2 \cdot T^{-1}$], d průměr efektivního zrna [L] (Kutilek, 1978, Valentová, 2007).



Obr. 4 Závislost rychlosti proudění na hydraulickém gradientu
(Převzato z: Valentová, (2007).

Reynoldsovo číslo udává poměr mezi setrvačnými a viskózními silami působícími na kapalinu. Jeho kritická hodnota stanovuje horní mez platnosti Darcyho zákona a dá se těžko určit pro půdní prostředí. Také stanovit hodnotu rozměru porézního prostředí není snadné. Podle *Richardsona* kritická hodnota Reynoldsova čísla pro půdní prostředí odpovídá hodnotě 1, ale jiného názoru jsou *Lindquist* (1-4) a *Pavlovskij* (7-9). Výsledné kritické hodnoty Reynoldsova čísla se liší z více možných příčin jako např. různé provedení metodiky experimentů. Nelze přesně definovat hranici mezi lineárním a postlineárním prouděním, jelikož přechod z jednoho režimu proudění do druhého je kontinuální (Kazda, 1997).

2.2 Nasycená hydraulická vodivost

Nasycenou hydraulickou vodivost K_s lze vyjádřit jako hydraulickou vlastnost půdy, která je přímo závislá na její pórovitosti.

Velikost hodnoty K_s závisí na vlastnostech porézního prostředí i na vlastnostech kapaliny jako jsou hustota kapaliny a její viskozita. Z charakteristik porézního prostředí jsou významné především vlivy zrnitostního složení, tvar zrn a pórů, pórovitost a měrný povrch. Nasycenou hydraulickou vodivost lze vyjádřit vztahem

$$K_s = \frac{K_p \cdot \rho \cdot g}{\mu}, \quad (2.6)$$

kde K_p je propustnost půd [L^2], ρ hustota kapaliny [$M \cdot L^{-3}$], μ dynamická viskozita kapaliny [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$], g gravitační zrychlení [$L \cdot T^{-2}$] (Valentová, 2007 a Císlarová et Vogel, 1998).

Orientační hodnoty hydraulické vodivosti pro různé druhy zeminy jsou shrnuty v tab. 1.

Tab. 1 Hodnoty hydraulické vodivosti pro různé druhy zeminy (Převzato z: Valentová, 2007).

Druh zeminy	Hydraulická vodivost K_s ($m \cdot s^{-1}$)
jíl	$< 1 \cdot 10^{-8}$
písčítá 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	$(1-5) \cdot 10^{-5}$
hrubozrný písek	$(1-5) \cdot 10^{-4}$
štěrkopísek	$(2-10) \cdot 10^{-4}$
štěrk	$(1-5) \cdot 10^{-3}$

2.2.1 Metody stanovení nasycené hydraulické vodivosti

Pro stanovení hydraulické vodivosti K_s se využívají dvě metody:

1) Přímé metody lze rozdělit na *laboratorní* a *terénní*.

a) *Laboratorní metoda* pro určení K_s používá zařízení s konstantním a proměnným spádem. Měření se provádí na neporušených vzorcích půdy odebraných v terénu, méně často na uměle hutněných vzorcích. Vzorky se odebírají pomocí pedologických válečků (Reynolds, 2008).

- b) *Terénní metoda nad hladinou podzemní vody* pro zjištění K_s využívá infiltračního pokusu nebo guelphského permeometru, který je založen na principu Marriotovy láhve. Toto zařízení je složeno ze zásobníku vody a výtokové trubice s perforací ve spodní části. Úroveň hladiny vrtu se nastavuje pomocí zavzdušňovací trubičky, která spojuje obě části permeometru (Reynolds, 2008).
- c) *Terénní metoda pod hladinou podzemní vody* je založena na principu čerpání vody ze studny, při které se měří její množství a zaznamenává pokles hladiny vody ve sledovaných sondách. Tato metoda je časově a ekonomicky náročná, proto se v praxi příliš nepoužívá.
- d) *Jednosondová metoda* zjednodušuje a zkracuje dobu čerpání. Jakmile dochází k ustálení hladiny vody v sondě, změří se její hloubka. Poté se odstraní voda z vrtu, tím dochází ke snížení hladiny podzemní vody a sleduje se rychlost stoupaní hladiny vody v sondě (Kutílek et Nielsen, 1994).
- 2) Nepřímá metoda měření využívá pro stanovení K_s jiné půdní vlastnosti jako např. texturu a objemovou hmotnost. Z těchto zjištěných parametrů je odhadnuta hodnota nasycené hydraulické vodivosti. Tato metoda není tak přesná jako přímé metody. Nevýhodou nepřímých metod je časté zanedbání vlivu závislosti K_s na půdní struktuře, obsahu organické hmoty a proto se dá použít dostatečně přesně prakticky pouze u písčitých půd (Kuráž, 1996).

2.3 Kolmatace

Kolmatace je proces, při kterém dochází ke snižování pórovitosti a propustnosti systému (Siriwardene et. al, 2007). Je to souhrn fyzikálních, chemických a biologických procesů spojených s hromaděním různých pevných látek (Winter a Goetz, 2003). K těmto procesům dochází s různou intenzitou a způsobují výrazné snížení hydraulické vodivosti, pórovitosti zrnitého materiálu a mají vliv na přenos kyslíku ze vzduchu do vody (Pedescoll et. al, 2009).

Výrazný pokles hodnoty K_s půdy je pravidelně zaznamenáván během delší doby proudění vody v laboratorních i terénních podmínkách. Ve většině případů toto snížení má nežádoucí následky. Tento proces zřetelně snižuje účinnost důležitých procesů jako je výtok málo znečištěné odpadní vody ze septiku trativodem do půdy, infiltraci vody do půdy, čerpání vody z vrtů, účinnost drenážního systému v mokřích zemědělských oblastech. Za určitých okolností může být žádoucí snížení hodnoty K_s půdy jako např. utěsnění dna rybníků, jezer,

sekundární těžbě ropy a zakládání rýžových plantáží, atd. Změna hodnoty K_s v závislosti na čase je ovlivněna faktory, mezi které řadíme fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půd. Mezi fyzikální mechanismy se zahrnuje uvolnění zachycených vzduchových bublin, filtrace pevných částic suspendovaných prosakující kapalinou a postupný rozklad půdní struktury. Chemické jevy, jež způsobují změnu hodnoty K_s , jsou bobtnání zemin a disperze koloidních částic (*Vandevivere et Baveye, 1992*).

Hydraulická vodivost zemin je ovlivněna množstvím využitelného objemu pórů filtrační náplně. Příčiny způsobující snižování objemu pórů a infiltrační rychlosti jsou shrnuty do následujících bodů

- nahromadění suspendovaných částic na povrchu filtrační náplně a v pórech,
- vytvoření biofilmu, který snižuje prostor porézního prostředí, produkovaného bakteriemi,
- chemické srážení a ukládání v pórech.

Metody omezení a odstranění kolmatace jsou

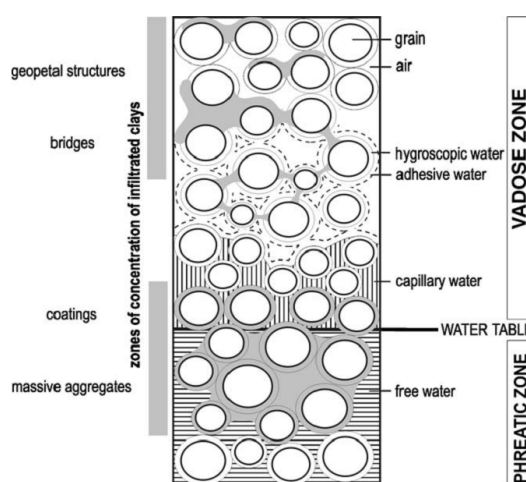
- mechanické předčištění u umělých mokřadů,
- finančně náročná výměna filtrační vody,
- *in situ* nová metoda k odstranění nerozpuštěných látek pomocí různých roztoků chemikálií (účinná a finančně dostupná).

2.3.1 Fyzikální a mechanická kolmatace

Výskyt jílu v písčítých usazeninách je *allogenní* (geologický materiál s nepůvodním výskytem, který je přepravován a hromadí se jinde) nebo *autigenní* (minerály vzniklé v metamorfitech bez přínosu látek zvenčí). Existují dva typy alogenních částic. První druh částic se vyskytuje ve stejné době jako usazenina (bahno, biogenní pelety, atd.) a mezi druhý typ se řadí částice přinesené zvířaty nebo vzniklé výsledkem mechanické infiltrace jílu. Jemné částice z infiltrované suspenze jsou zachyceny usazenými zrny v důsledku mechanického prosévání nebo fyzikálně chemickými reakcemi mezi povrchem zrna a infiltrací vody. Tyto procesy jsou řízeny hlavně infiltrační rychlostí, viskozitou suspenze, tvarem a velikostí usazených částic. Sběr částic se rozděluje do dvou etap. V první etapě dochází k transportu, který přináší částice přiléhající k povrchu zrn, způsobeného působením gravitačních sil. Druhá etapa zahrnuje upevnění částic k povrchu zrn, které jsou způsobeny elektrostatickými silami. Charakteristika prostředí, ve kterém probíhá sběr částic, je určena pH hodnotou, silou a druhem iontů v roztoku. Na základě popisu složení a vlastností půdy jsou popsány tři

nejběžnější mikrostruktury kolmatace viz obr. 10, které jsou shrnuty do následujících bodů (Skolasińska K., 2006)

- *povlaková tloušťka* je proměnná, jílové částice ve tvaru destiček jsou orientovány tangenciálně nebo rovnoběžně s povrchem zrna,
- *meniskovitě tvarované můstky* spojující sousedící zrna, ve kterých jsou jílové destičky kolmé k povrchu zrn,
- geopetální struktura, jíly nahromaděné na dně velkých pórů nebo na horním povrchu zrn.



Obr. 5 Nejběžnější mikrostruktury kolmatace vztahované k hladině podzemní vody (Převzato z: Skolasińska K., 2006).

2.3.2 Biologická kolmatace na sloupci písku

Biologická činnost může snížit nasycenou hydraulickou vodivost ucpáním půdních pórů mikrobiálními buňkami a jejich sloučeninami. Tento jev je označován jako biologická kolmatace půdních pórů a je významným problémem *in situ bioremediace* (využití přirozených nebo uměle přiváděných mikroorganismů ke zneškodnění nebo zablokování pohybu kontaminantu). Způsobuje problémy při výrobě pitné vody. K tomuto procesu může dojít prostřednictvím mnoha faktorů, mezi které patří akumulace bakteriálních buněk, tvorba bakteriálních extracelulárních polymerů a zachycení plynných produktů mikroorganismy (Seki K., 2013).

Problémy spojené s měřením nasycené hydraulické vodivosti K_s , mezi které patří ucpání neznámé saturační hloubky, různé půdní vlastnosti, vedlo mnoha vědců k myšlence namodelovat pohyb mikroorganismů v laboratorních podmínkách. Na základě zjištěných dat

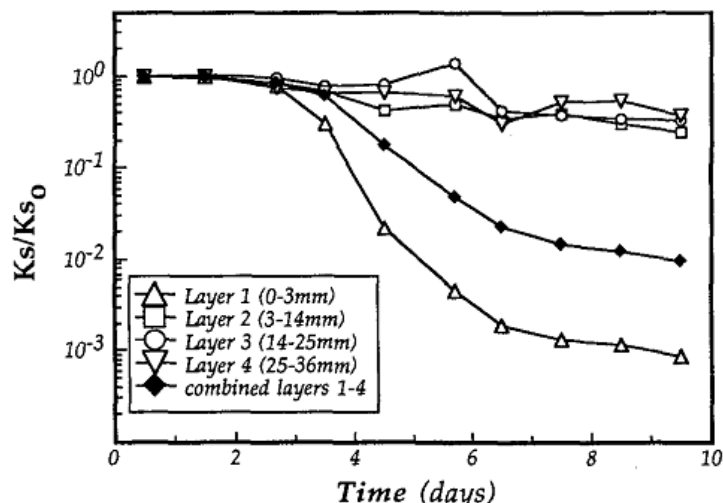
z pokusů je možné přibližně odhadnout rozsah snížení hydraulické vodivosti, respektující narůstající biomasu (Seki K., 2013).

Mezi bakteriální snížení hodnoty K_s se řadí tvorba slizu a následná akumulace této substance za anaerobních podmínek. Další biologické mechanismy jsou ukládání vytvořených sraženin hydroxidů železa, oxidů hořčíku bakteriemi nebo ucpání pórů od bakteriálních buněk. Prudké snížení hodnoty K_s je doprovázeno vytvořením anaerobního prostředí v porézním nosiči. Rozdílné chování se prokázalo u vzorku písku, kde dochází k vyššímu zanášení aerobních než anaerobních jader písku (*Vandevivere et Baveye, 1992*).

V devadesátých letech minulého století se provedly dva pokusy vytvořit matematický model biologického snížení hodnoty K_s v přirozeném porézním prostředí. Oba experimenty byly založeny na nepotvrzené hypotéze, že bakterie žijící ve stěnách pórů produkují exopolymery, které drží bioorganickou vrstvu pohromadě. Předpokládá se, že většina bakterií v přirozeném vodním prostředí má tendenci zaujmout v bioorganických vrstvách povrch pevných látek (*Vandevivere et Baveye, 1992*).

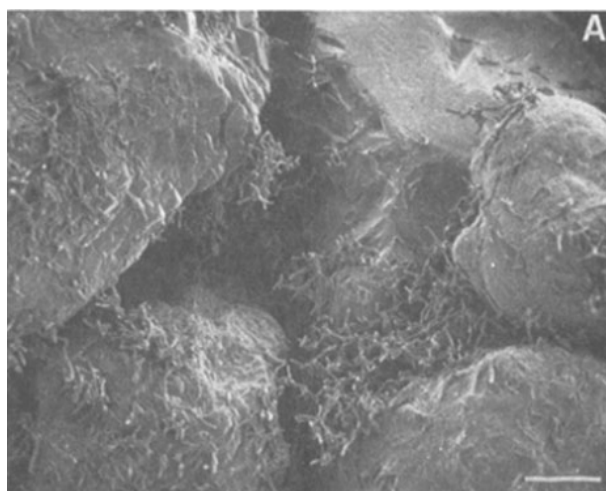
Stručný popis experimentu, který provedli Vandevivere et Baveye (1992). Použili vzorek písku o zrnitostním složení 63 až 125 μm a pórovitosti 0,39. Sloupec písku umístěný v plastovém válci byl čtyřicet milimetrů vysoký o průměru 26 milimetrů. Bylo použito tři piezometrů, které monitorují výšku hladiny. Bakteriální kmen izolovaný ze vzorku písku byl zařazen do třídy *Arthrobacter*. Písek byl nejprve chemicky upraven z důvodu zbavení organických látek. Poté byly provedeny tři rozdílné sady experimentů (*Vandevivere et Baveye, 1992*).

V prvním pokusu se injektovalo množství bakteriálních buněk o hodnotě $4 \cdot 10^6 \text{ ml}^{-1}$ několik centimetrů před horním rozhraním vody a vzorku písku. Vstupní tlak vodního sloupce byl udržován pomocí Mariottovy láhve. Na vzorcích písku docházelo k zanášení pórů během měření na laboratorním permeamtru a to vedlo k poklesu rychlosti proudění. Jakmile byla tato hodnota příliš malá, vstupní hladina se zvýšila. Na obr. 5 je vidět výrazná změna hydraulické vodivosti ve vrstvě o tloušťce 0 až 3 mm po dosažení třetího dne. V horní vrstvě nastává snížení hodnoty K_s o dva řády po 5 dnech a tři řády po 9 dnech za stálého proudění vody.



Obr. 6 Průběh hydraulické vodivosti v čase během prvního experimentu (Převzato z: Vandevivere et Baveye, 1992).

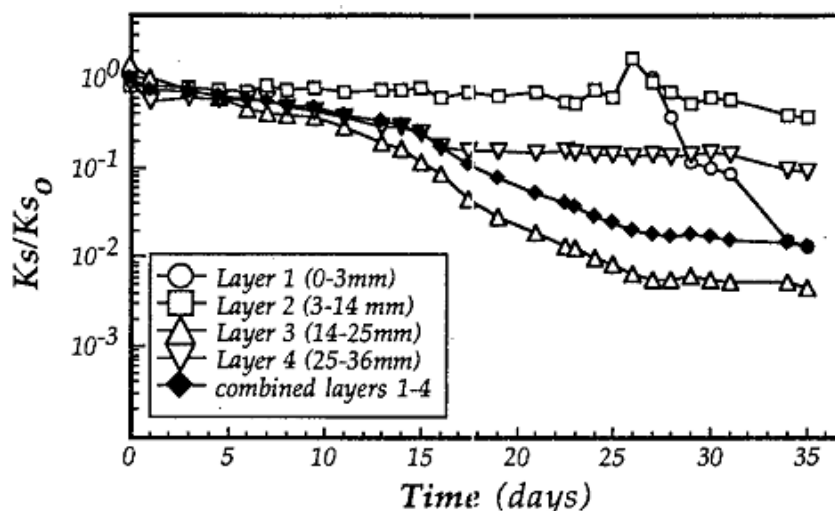
Na obr. 6 je znázorněn detail vyvíjejících se aerobních bakterií *Arthrobacter* na pískových zrnech. Není zde vidět žádná významná akumulace extracelulárního materiálu v pórových mezerách. Bakterie vytváří volně oddělené trojrozměrné celky rozšiřující se uvnitř pórů a na povrchu pevných látek, místo toho aby vytvořily souvislou vrstvu slizu.



Obr. 7 Detail vývoje bakterií *Arthrobacter* na pískových zrnech v hloubce 1 mm během prvního experimentu (Převzato z: Vandevivere et Baveye, 1992).

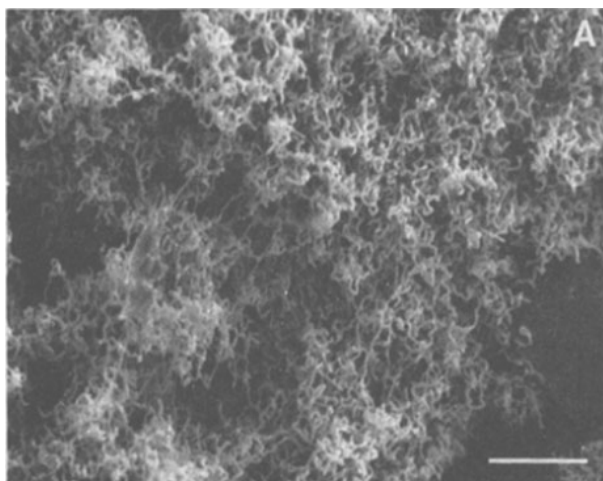
V druhém experimentu se změnilo injektované množství bakteriálních buněk na hodnotu $2 \cdot 10^6 \text{ ml}^{-1}$ umístěného přímo do sloupce písku o výšce 20 mm od horní vrstvy a udržoval se konstantní průtok pomocí vodního čerpadla. Pro vzorky písku se provedly dvě úpravy. V prvním případě bylo zvýšení glukózy limitováno množstvím C. V druhém případě bylo zvýšení glukózy omezeno množstvím N. Po jednom dni měření se koncentrace KNO_3 snížila na hodnotu $1,5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Hmotnostní poměr C/N vycházel 39. Po 23. dnu měření došlo

ke snížení koncentrace KNO_3 na hodnotu $0,75 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Hmotnostní poměr C/N se téměř zdvojnásobil. Na obr. 7 je zaznamenán menší pokles hodnoty K_s , než u prvního pokusu. Ve vrstvě o tloušťce 14 až 25 mm se hodnota K_s snížila o dva řády za 22 dní. Ve vrstvě o tloušťce 0 až 3 mm docházelo k podobnému snížení hodnoty K_s od 27 do 34 dne (Vandevivere et Baveye, 1992).



Obr. 8 Průběh hydraulické vodivosti v čase během druhého experimentu (Převzato z: Vandevivere et Baveye, 1992).

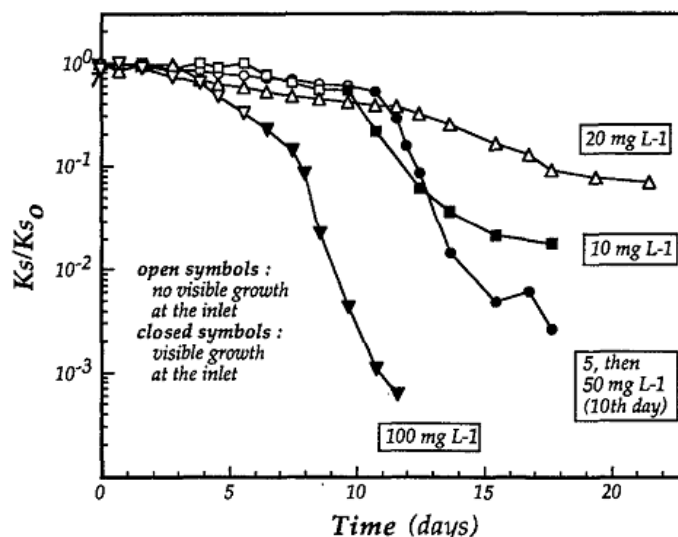
Na obr. 8 lze vidět hustší pórovitou buněčnou síť, stále bez extracelulárního materiálu.



Obr. 9 Detail vývoje bakterií *Arthrobacter* na pískových zrnech během druhého experimentu (Převzato z: Vandevivere et Baveye, 1992).

Ve třetím experimentu se měnilo dodávané množství glukózy o koncentraci 5, 10, 20, 50 a $100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Míra poklesu hodnoty K_s pro vzorky písku závisela na množství glukózy. Z grafu na obr. 9 vyplývá nejvýraznější snížení hodnoty K_s pro množství glukózy o koncentraci $100 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Malé množství glukózy způsobí pokles hodnoty K_s o několik řádů. Tento pokles se objevuje v pokusech s protékající vodovodní vodou, kde nebyl přidán zdroj

C(Gupta et Swartzendruber, 1962). V grafu na obr. 9 plné symboly označují krajní vrstvy sloupce písku a prázdné symboly vnitřek písku. Snížení hodnoty K_s způsobuje mechanické zanesení nebo vyšší míra akumulace bakteriálních buněk na krajních vrstvách písku (Vandevivere et Baveye, 1992).



Obr. 10 Průběh hydraulické vodivosti v čase pro různé množství glukózy během třetího experimentu (Převzato z: Vandevivere et Baveye, 1992).

Předpokladem snížení hodnoty K_s v přirozeném porézním prostředí je neoddělitelně spojen s vývojem anaerobních podmínek. Tento experiment prokázal, že tento pokles může být způsoben přítomností aerobních bakterií a koncentrací glukózy. Také se nepotvrdil vznik bioorganické vrstvy na vzorku písku, pravděpodobněji se vytváří lokální shluky bakterií, které způsobují změnu proudění vody (Vandevivere et Baveye, 1992).

Seki (2013) provedl experiment, který je shrnut v následujících odstavcích. K měření využil homogenní písek Toyoura (původ z Japonska) o zrnitostním složení 0,2 mm, který by neměl měnit mechanické parametry v čase. Písek je vhodný pro laboratorní měření. Sloupec písku umístěný v plastovém válci byl deset centimetrů vysoký o průměru dvou centimetrů. Voda protékala nepřetržitě skrz sloupec písku po dobu sedmi dnů. Bylo použito tři piezometrů, které monitorují výšku hladiny. Konstantní výška hladiny vodního sloupce byla udržována pomocí Mariottovy láhve. Objemová hustota a pórovitost homogenního písku byla $1,64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ a 0,376. Bylo provedeno 7 pokusů, na vzorku 1 až 3 se použila chemikálie azid sodný rozpuštěný ve vodě, která způsobuje redukci mikroorganismů. Na vzorky 4 až 7 se aplikoval roztok glukózy o koncentraci $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ pro zvýšení mikrobiální aktivity v písku. Měření se provádělo na sloupci písku v horní (0-3 cm), střední (3-7 cm) a spodní (7-10 cm) vrstvě.

V pokusech 1 až 3, kde byl aplikován azid sodný, nedošlo ke snížení hodnoty nasycené hydraulické vodivosti více jak o 10 procent. V pokusech 4 až 7 se projevilo výrazné snížení hodnoty K_s . Tato změna se připisovala aktivitě mikroorganismů. V tab. 2 jsou zaznamenány hodnoty K_s vztažené k jejím počátečním hodnotám na konci sedmého dne měření (Seki K., 2013).

Tab. 2 Poměr hodnot $K_s / K_{\text{počáteční}}$ na konci sedmého dne měření (Převzato z: Seki K., 2013).

Flow medium	Run	Layer (depth from surface)		
		0 - 3 cm	3 - 7 cm	7 - 10 cm
Germicide	1	1.16	0.98	1.03
	2	0.91	1.02	0.93
	3	1.06	1.06	1.70
Glucose	4	0.49	0.80	0.60
	5	0.52	0.21	0.061
	6	0.51	0.39	0.36
	7	0.22	0.84	0.58

Z tab. 2 vyplývá, že docházelo k značnému poklesu hodnoty K_s v horní vrstvě o tloušťce 0 až 3 cm pro vzorky 4 a 7 a ve spodní vrstvě o tloušťce 7 až 10 cm pro vzorky 5 a 6. Tyto výsledky potvrzují nárůst biologické hmoty, závisující na počátečním umístění mikroorganismů. Rozsah biologické kolmatace je určen růstem mikroorganismů a jejich růst je ovlivněn třemi faktory, které jsou (Seki K., 2013):

- koncentrace glukózy,
- obsah kyslíku,
- počáteční množství mikroorganismů.

3. CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Cílem této práce je

1. určit hodnoty nasycené hydraulické vodivosti v průběhu opakovaného měření pro jednotlivé vzorky písku o zrnitostním složení syntetického ($73 \mu m$) a říčního ($0,25-2 mm$).
2. sledovat průběh změn hodnot nasycené hydraulické vodivosti během opakovaného měření pomocí laboratorního permeometru.
3. vyhodnotit vliv textury a doby měření na hodnoty nasycené hydraulické vodivosti.

4. CHARAKTERISTIKA PŮDNÍCH VZORKŮ

4.1 Materiálová charakteristika půdních vzorků

V této práci byly použity vzorky písku o zrnitostním složení syntetického ($73 \mu\text{m}$) a říčního ($0,25\text{-}2 \text{ mm}$).

Syntetický písek se od přírodního písku liší především homogenní strukturou, proto je velice vhodný pro laboratorní měření. Tento písek se připravuje smísením písku o specifikované zrnitosti bez obsahu jílu s určitým typem jílového pojiva a dalších aditiv. V dnešní době se častěji syntetické písky využívají jako slévárenské písky z důvodu dobrých fyzikálních vlastností.

Po laboratorním měření hydraulické vodivosti půdních vzorků, která je popsána v kap. 5.1.4, se vzorky umístily na laboratorní sklička a zvážily. Následovalo jejich vložení do laboratorní sušičky, kde se nastavil program sušení na 60°C po dobu 72 hodin. Poté se vysušené vzorky zvážily, aby bylo možné dopočítat objem vody, vlhkost, hmotnost pevných částic vzorku a objemovou hmotnost. Tyto parametry vzorků jsou shrnuty v tab. 3 a tab. 4.

Objem vody V_w lze vyjádřit jako rozdíl hmotnosti vzorku po vytáhnutí z permeometru a laboratorní sušičky za předpokladu, že hustota vody je rovna jedné.

Čistá hmotnost pevných částic vzorku m_M se získá odečtením hmotnosti válečku se sklíčkem od hmotnosti vysušeného vzorku.

Objemová vlhkost půdy θ je poměr objemu vody k objemu neporušeného vzorku vyjádřena dle vzorce

$$\theta = \frac{V_w}{V_s}. \quad (4.1)$$

Objemovou hmotnost lze ρ_s zapsat ve tvaru

$$\rho_s = \frac{m_M}{100}, \quad (4.2)$$

kde konstanta 100 označuje hodnotu objemu půdy v Kopeckého válečku.

Hodnota objemové hmotnosti pevných částic ρ_M říčního písku se odhaduje na $2,65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Tento předpoklad vychází ze složení říčního písku, kde hlavní složkou je křemen.

Pro určení ρ_M syntetického písku bylo nutné provést měření pyknometrem, které je blíže popsáno v kap. 5.1.2. Vypočtená hodnota objemové hmotnosti syntetického písku byla $3,973 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Celková pórovitost vzorků se vypočítá dle vzorce

$$P = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_M} \quad (4.3)$$

Vypočtené střední hodnoty pórovitosti jsou pro říční a syntetický písek $\bar{P} = 0,358$ a $\bar{P} = 0,564$

Tab. 3 Odhad pórovitosti pro říční písek 0,25-2 mm.

Číslo držáku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úprava povrchu válečku	Se silikonem	Bez silikonu	Se silikonem	Bez silikonu	Se silikonem	Bez silikonu	Se silikonem	Bez silikonu	Bez silikonu	Se silikonem
Číslo vzorku	35	122	40	124	127	121	128	123	125	126
Suchý písek (váleček+víčka) [g]	295,550	295,300	296,200	297,500	301,300	301,000	297,850	302,400	297,450	295,450
Hmotnost 2 víček [g]	15,650	15,800	15,750	15,800	15,850	15,800	15,850	15,800	15,800	15,800
Hmotnost nasyceného vzorku se sklíčkem a válečkem [g]	333,700	335,150	35,900	337,200	341,500	341,800	336,800	341,450	338,050	334,400
Objem vody = hmotnost vody [g]	33,600	35,650	-265,700	34,250	35,900	35,400	33,650	33,650	36,450	34,750
Hmotnost sklíčka [g]	20,200	20,000	21,150	21,250	20,150	21,200	21,150	21,200	19,950	20,000
Hmotnost válečku [g]	111,800	111,100	111,550	112,300	115,200	111,900	111,900	112,000	112,550	111,350
Čistá hmotnost zeminy [g]	168,100	168,400	168,900	169,400	170,250	173,300	170,100	174,600	169,100	168,300
Objemová hmotnost [g.cm ⁻³]	1,681	1,684	1,689	1,694	1,703	1,733	1,701	1,746	1,691	1,683
Objemová vlhkost - blízko nasycení [%]	39,700	42,900	43,500	43,400	45,900	43,300	42,900	42,600	43,200	42,700
Odhad - pórovitosti	0,366	0,365	0,363	0,361	0,358	0,346	0,358	0,341	0,362	0,365

$\bar{P} = 0,358$

Tab. 4 Odhad pórovitosti pro syntetický písek 73 μm .

Číslo držáku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Úprava povrchu válečku	Bez silikonu	Bez silikonu	Se silikonem	Bez silikonu	Se silikonem	Bez silikonu	Se silikonem	Se silikonem	Bez silikonu	Se silikonem
Číslo vzorku	44	60	27	69	34	62	30	39	46	36
Suchý písek (váleček+vička) [g]	301,850	299,000	302,150	302,900	299,250	299,200	300,950	299,350	299,450	299,900
Hmotnost 2 víček [g]	15,800	15,900	15,650	15,750	15,850	15,900	15,700	15,800	15,750	16,000
Hmotnost nasyceného vzorku se sklíčkem a válečkem [g]	359,500	355,800	359,200	361,900	356,850	358,000	358,700	356,300	355,000	356,950
Objem vody = hmotnost vody [g]	52,825	52,700	51,550	53,500	53,300	53,500	52,300	51,550	51,350	53,050
Hmotnost sklíčka [g]	20,625	20,000	21,150	21,250	20,150	21,200	21,150	21,200	19,950	20,000
Hmotnost válečku [g]	110,600	110,600	112,550	110,750	111,400	109,850	112,600	111,100	111,350	114,200
Čistá hmotnost zeminy [g]	175,450	172,500	173,950	176,400	172,000	173,450	172,650	172,450	172,350	169,700
Objemová hmotnost [g.cm ⁻³]	1,755	1,725	1,740	1,764	1,720	1,735	1,727	1,725	1,724	1,697
Objemová vlhkost - blízko nasycení [%]	52,825	52,700	51,550	53,500	53,300	53,500	52,300	51,550	51,350	53,050
Odhad - pórovitosti	0,558	0,566	0,562	0,556	0,567	0,563	0,565	0,566	0,566	0,573

$$\bar{P} = 0,564$$

5. METODIKA

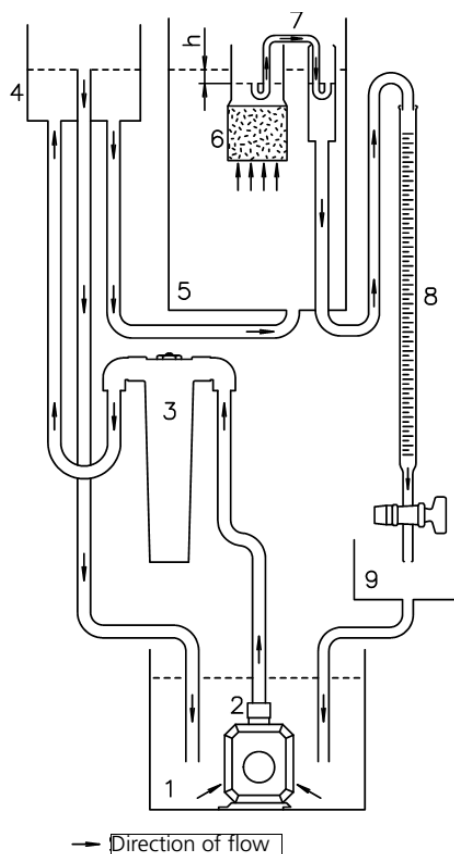
5.1 Měřicí pracoviště

Pro měření nasycené hydraulické vodivosti bylo použito laboratorního permeometru od firmy Eijkelkamp. V této práci se použila metoda s konstantním spádem, která je blíže popsána v následující kapitole. Pro zjištění materiálové charakteristiky půdních vzorků se využilo pyknometru. Měřicí prostory a zařízení poskytla Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování na Fakultě životního prostředí.

5.1.1 Laboratorní permeometr

Laboratorní permeometr viz obr. 11 je založen na principu rozdílného tlaku na obou koncích nasyceného vzorku půdy. Z měřeného proudění vody lze vypočítat propustnost vzorků půdy.

V uzavřeném systému dochází k čerpání vody ze spodní zásobní nádržky pomocí čerpadla přes filtr do posuvného výškového regulátoru. Regulátor je připojen k plastovému kontejneru s uzavíratelným víkem a pomocí gumové hadice přivádí přebytečnou vodu zpět do zásobní nádržky. Kryt kontejneru snižuje vypařování vody v průběhu měření. Půdní vzorky se uchytí do držáků, které jsou umístěny v plastovém kontejneru. Plastová násoska umožňuje pomalé vytékání vody ze vzorků do byrety, které jsou zakončeny uzavíratelným kohoutkem. Průtočná nádoba odvádí vodu z byrety zpět do spodní zásobní nádržky. Násoska způsobuje vytvoření rozdílné hladiny vody uvnitř a vně držáku na vzorky. Tato změna vyvolává rovnoměrné proudění vody skrz vzorek. K přesnému měření vodní hladiny se využívá mechanického měřicího zařízení se signalizací, jakmile se ostrý hrot dotkne hladiny, dochází k okamžitému rozsvícení červené kontrolky.



Obr.11 Schéma laboratorního permeamtru (Převzato z: manuálu Eijkelkamp, leden 2015).

Na obr. 11 značí číslo 1 - zásobní nádrž s vodou, 2 - vodní čerpadlo, 3 - filtr, 4 - posuvný výškový regulátor, 5 - plastový kontejner s uzavíratelným víkem, 6 - úplně nasycený neporušený vzorek umístěný v držáku, 7 - plastová násoska (používá se při měření s konstantním spádem), 8 - byreta sloužící pro měření objemu proteklé vody vzorkem, 9 - nádrž pro vodu vypuštěnou z byrety, šipky určují směr proudění vody.

5.1.2 Pyknometr

Pyknometr je nádobka určená ke stanovování hustoty kapalin, případně malých tuhých nenasákavých tělísek.

Metoda je určena pro stanovení hustoty drobných tělísek nepravidelného tvaru. Princip této metody je srovnávací, založen na trojím vážení. Postup měření je shrnut do následujících bodů: (STACH.V,1988)

- Pyknometr se propláchnul, poté byl naplněn destilovanou vodou do poloviny hrdla nádoby a uzavřen zátkou. Kapilára v zátce slouží k vytečení přebytečné vody.

- Pyknometr byl držen za hrdlo, aby se neohříval, a otřen filtračním papírem. Uvnitř pyknometru se nesmí vyskytovat vzduchové bubliny, kapilára musí být naplněna vodou.
- Pyknometr s vodou se zvážil tj. Z_1 .
- Poté se do něj nasypal odvážený syntetický písek o hmotnosti Z , uzavřel se zátkou a osušil filtračním papírem.
- Tělíška vytlačila z pyknometru vodu o hmotnosti $Z + Z_1 - Z_2$, přičemž její objem se rovnal objemu nasypaného syntetického písku do pyknometru.
- Pyknometr byl opět zvážen tj. Z_2 .
- Změřila se teplota vody v pyknometru a byla provedena korelace hustoty vody.
- Objem vytlačené vody, který se rovná objemu tělíšek do pyknometru nasypaných, se určil dle vztahu

$$V = \frac{(Z + Z_1 - Z_2)}{\rho} \quad (5.1)$$

- Pro hustotu drobných tělíšek ρ_1 pak platilo

$$\rho_2 = \frac{m \cdot \rho_1}{m + m_1 - m_2} \quad (5.2)$$

Tato metoda byla použita k zjištění hustoty syntetického písku o zrnitostním složení $73 \mu\text{m}$. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tab. 5. Vypočtená střední hodnota hustoty syntetického písku je $3,973 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

Tab. 5 Hustota syntetického písku o zrnitostním složení $73 \mu\text{m}$.

Vzorek	N (počet pokusů)	Z (g)	Z_1 (g)	Z_2 (g)	t (°C)	ρ_{voda} ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Syntetický písek o zrnitostním složení $73 \mu\text{m}$	1	10,000	159,977	167,464	18,000	998,620	3,974
	2	10,000	159,977	167,462	17,900	998,636	3,971
	3	10,001	159,977	167,466	17,500	998,629	3,976
	4	7,025	159,977	165,235	17,500	998,629	3,970
	5	12,917	159,977	169,648	17,500	998,629	3,974

$$\bar{\rho} = 3,973 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

5.1.3 Popis měření nasycené hydraulické vodivosti

Nasycená hydraulická vodivost K_s se opakovaně měřila pro jednotlivé vzorky písku o zrnitostním složení syntetického ($73 \mu\text{m}$) a říčního ($0,25\text{-}2 \text{ mm}$). Celkem bylo provedeno 5 sérií měření po 10 vzorcích. Z toho 3 série se měřily pro vzorky syntetického a 2 série pro vzorky říčního písku. Doba měření jednotlivých sérií byla různá, pohybovala se od 4 do 9 dnů. Pro zachycení časových změn bylo měřeno v 10 až 17 časových krocích v intervalu mezi kroky 0,1 dne až 4,5 dne. Pro všechny vzorky při měření nasycené hydraulické vodivosti K_s se aplikovala metoda s konstantním spádem. Naší hypotézou bylo změřit konstantní hodnotu nasycené hydraulické vodivosti pro vzorky syntetického a říčního písku, protože se použil homogenní materiál bez organické hmoty.

Postup měření K_s lze shrnout do několika bodů:

- Před samotným měřením bylo nutné změřit hmotnost jednotlivých nerezových pedologických válečků o objemu 100 cm^3 a jejich plastových víček.
- Na vnitřní stěnu pěti pedologických válečků se aplikoval silikonový gel z důvodu zamezení možnosti vytvoření preferovaných cest kolem stěn.
- Vysušené vzorky nebyly odebrány v terénu, nýbrž byly uměle hutněny do válečků v laboratoři a následovně se změřila jejich hmotnost.
- Víčko na spodní (tupé) straně válečku se sundalo a pomocí gumičky se připevnila tkanina.
- Na váleček s tkaninou se nasadilo sítko a upevnilo se vše do držáku na vzorky a zajistilo pomocí přitlačné vzpěry, aby nedošlo k porušení vzorků samovolným pohybem.
- Držáky se vzorky se umisťovaly do laboratorního permeometru o kapacitě deseti vzorků, kde docházelo k postupnému sycení vodou v časovém horizontu nejméně jednoho dne, aby se minimalizoval vliv přípravy vzorků a tím pádem nedocházelo k prudkým změnám v hodnotě K_s .
- Následovalo zvýšení hladiny vody nad vzorky a vložení plastových násosků do každého vzorku, které se plnilo vodou bez přítomnosti vzduchových bublin.
- Otevřením kohoutku byřety se nechala voda protékat skrz vzorek, až došlo k ustálení. Samotné měření K_s se rozdělilo do dvou fází.

- První fáze měření hydraulické vodivosti probíhala odečtem teploty vody, změřením hladiny vody vně a uvnitř držáků na vzorky.
- V druhé fázi měření bylo nutné zjistit, za jakou dobu proteče voda o definovaném množství vzorky. K tomuto měření se využily stopky a byreta s uzavíratelným kohoutkem.
- Zjištěné vstupní parametry se dosazovaly do rovnice (5.3) a byla vypočtena hodnota K_s pro jednotlivé série měření.

5.1.4 Metoda k určení nasycené hydraulické vodivosti půdních vzorků

Použitá metoda k určení K_s půdních vzorků se nazývá *měření s konstantním spádem*. Tato metoda se využívá pro většinu typů půd, kromě špatně propustných jako jsou jíly a rašelina. Princip této metody je v udržování konstantního rozdílu tlakových výšek uvnitř a vně držáku na půdní vzorky a v určení času proteklého množství vody vzorkem. Výpočet hodnoty K_s při měření s konstantním spádem vychází z úpravy Darcyho zákona

$$K_s = \frac{V_p \cdot L_v}{A_v \cdot t \cdot \Delta H}, \quad (5.3)$$

kde V_p je objem vody, L_v délka válečku, A_v průtočná plocha, t čas, ΔH rozdíl hladin uvnitř a vně držáku na půdní vzorky.

5.1.5 Statistické vyhodnocení

Statistické vyhodnocení souborů dat bylo řešeno pomocí programu R-Studio. Popisná statistika hodnot K_s pro jednotlivé série měření je shrnuta do tab. 9-18 a tab. 21-25. Na základě Shapiro-Wilkova testu normality lze vypočtené datové soubory hodnot K_s dobře aproximovat normálním rozdělením. Výsledky tohoto testu jsou součástí tab. 9-18 a tab. 21-25. Na veškeré soubory dat byla pro jednotlivé série s měřenými časovými kroky provedena jednofaktorová analýza *ANOVA*. Cílem této analýzy je stanovit, zda rozdíly v průměrech souboru dat jsou způsobeny vnitřní variabilitou naměřených dat vyplývající z jejich náhodného výběru z rozdělení nebo zda rozdíly indikují skutečné rozdíly v průměrech způsobených změnami K_s v časových krocích. Nulová hypotéza ANOVA je definována následovně: Mezi průměrnými hodnotami K_s jednotlivých časových kroků není žádný rozdíl (neboli skutečný rozdíl v průměrech je nulový a je způsoben vzorkovací variabilitou).

6. VÝSLEDKY A DISKUZE

Uvedené vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s vzorků syntetického a říčního písku jsou zpracovány do tab. 6-8 a tab. 19-20. V těchto tabulkách označujeme písmeny *BS* (*bez silikonového gelu*) a *S* (*se silikonovým gelem*) povrchovou úpravu stěn pedologických válečků. Z těchto dat jsou vytvořeny grafy, které popisují změnu hydraulické vodivosti v závislosti na čase.

Jedním z cílů bylo zjistit vliv použitého silikonového gelu na úpravu povrchu stěn pedologického válečku v průběhu měření laboratorním permeametrem. Toto aditivum bylo aplikováno z důvodu zamezení možnosti vytváření preferovaných cest kolem stěn válečku. Z vypočtených hodnot K_s vyplývá, že se zde neprojevil žádný vliv použitého silikonového gelu.

6.1 Laboratorní měření nasycené hydraulické vodivosti pro vzorky syntetického písku

Vypočtené hodnoty K_s pro vzorky syntetického písku jsou shrnuty do tab. 6-8. Při první sérii měření došlo k výraznému poklesu hodnoty K_s během prvních dvou dnů od začátku měření viz obr. 12. Hypotéza o statisticky nevýznamných změnách průměrů K_s viz kap. 5.1.5 byla zamítnuta při zjištění výrazného poklesu hodnoty K_s . Průběh hodnot K_s při dosažení minima se nepodařilo zcela zachytit. Za další čtyři dny se hodnota K_s zvýšila přibližně na třetinovou počáteční hodnotu, která byla $2,77 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

Během druhé série v grafu na obr. 13, byl zaznamenán také pokles (i když menší) hodnot K_s , z tohoto důvodu lze vyhodnotit průběh hodnoty K_s jako konstantní. Počáteční průměrná hodnota K_s byla $3,02 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ Provedlo se přezkoumání možných příčin tohoto problému. Laboratorní permeametr byl znovu zkontrolován, mechanicky vyčištěn. Poté se v něm vyměnila pitná voda i filtr a experiment se zopakoval.

Z grafu na obr. 14 v třetí sérii měření lze vidět opět prudký pokles hodnoty K_s jako v první sérii. Průběh poklesu na minimální hodnotu K_s se povedlo lépe zachytit v této sérii, jak je vidět na obr. 14. Za dalších pět dnů se hodnota K_s zvýšila přibližně na čtvrtinovou z počáteční hodnoty $3,09 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ Z daného postupu vyplývá, že změna hodnoty K_s souvisí s výměnou pitné vody, jelikož měření první a třetí série probíhalo s novou pitnou vodou. Tento pokles byl s největší pravděpodobností způsoben kolmatací na sloupci písku viz kapitola 2.3.

Použitím syntetického písku, který se vyznačuje svojí homogenní strukturou, byly vytvořeny ideální podmínky pro laboratorní měření. Tato struktura písku snižuje výskyt mikroorganismů a zabraňuje mechanickým změnám vlastností. Obecně lze říci, že písek plní funkci filtru. Ve sloupci syntetického písku vznikaly sorbční procesy minerálů s největší pravděpodobností z pitné vody. Tyto reakce mohly mít také za následek tvorbu mikroorganismů na sloupci písku. Tato problematika byla detailněji rozebrána v kapitole 2.3.1. V první sérii měření na obr. 15 bylo vidět na povrchu vzorků syntetického písku ztvrdlou krustičku, jemně zbarvenou do žluto-zelena. Oproti tomu v druhé sérii měření jsme nepozorovali významnou tvorbu krustičky a viditelného zbarvení. Po tomto přechodném ději se hodnota K_s ustálila přibližně na třetinové a čtvrtinové počáteční průměrné hodnotě pro první a třetí sérii.

Tab. 6 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.

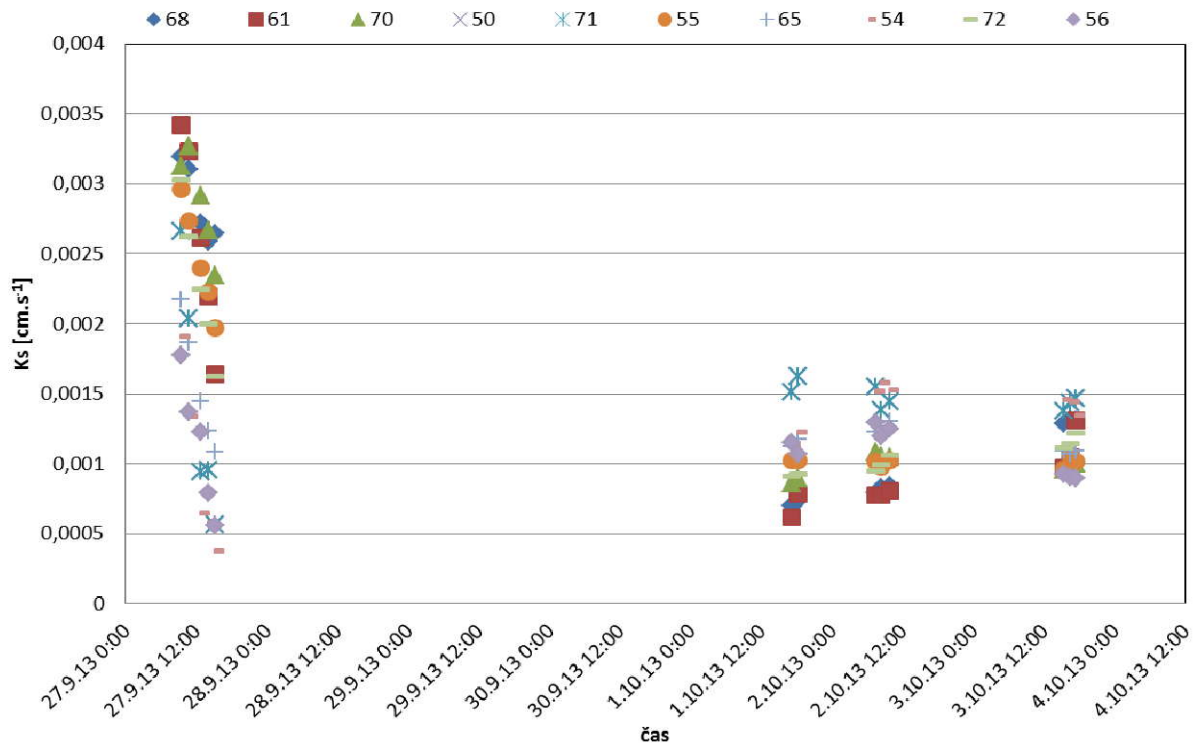
Číslo měření	K_s [cm.s ⁻¹]									
	Číslo vzorku									
	68	61	70	50	71	55	65	54	72	56
	Úprava povrchu stěn pedologického válečku									
	S	BS	S	BS	BS	S	S	S	BS	BS
1	0,00319	0,00342	0,00313	0,00266	0,00344	0,00296	0,00218	0,00191	0,00303	0,00178
2	0,00310	0,00323	0,00327	0,00204	0,00317	0,00273	0,00187	0,00134	0,00263	0,00137
3	0,00272	0,00261	0,00292	0,00094	0,00298	0,00240	0,00145	0,00065	0,00225	0,00122
4	0,00258	0,00219	0,00267	0,00096	0,00252	0,00223	0,00124	0,00058	0,00200	0,00079
5	0,00264	0,00164	0,00235	0,00057	0,00207	0,00197	0,00108	0,00038	0,00162	0,00056
6	0,00070	0,00062	0,00086	0,00151	0,00068	0,00102	0,00112	0,00113	0,00091	0,00115
7	0,00073	0,00078	0,00090	0,00162	0,00069	0,00103	0,00118	0,00123	0,00093	0,00107
8	0,00079	0,00077	0,00109	0,00155	0,00090	0,00102	0,00122	0,00152	0,00095	0,00129
9	0,00083	0,00078	0,00105	0,00139	0,00085	0,00098	0,00127	0,00158	0,00099	0,00120
10	0,00085	0,00080	0,00105	0,00145	0,00082	0,00102	0,00130	0,00153	0,00106	0,00125
11	0,00128	0,00097	0,00096	0,00138	0,00083	0,00097	0,00109	0,00146	0,00111	0,00093
12	0,00132	0,00104	0,00098	0,00144	0,00081	0,00106	0,00107	0,00144	0,00114	0,00090
13	0,00131	0,00131	0,00100	0,00147	0,00087	0,00102	0,00109	0,00135	0,00122	0,00090

Tab. 7 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.

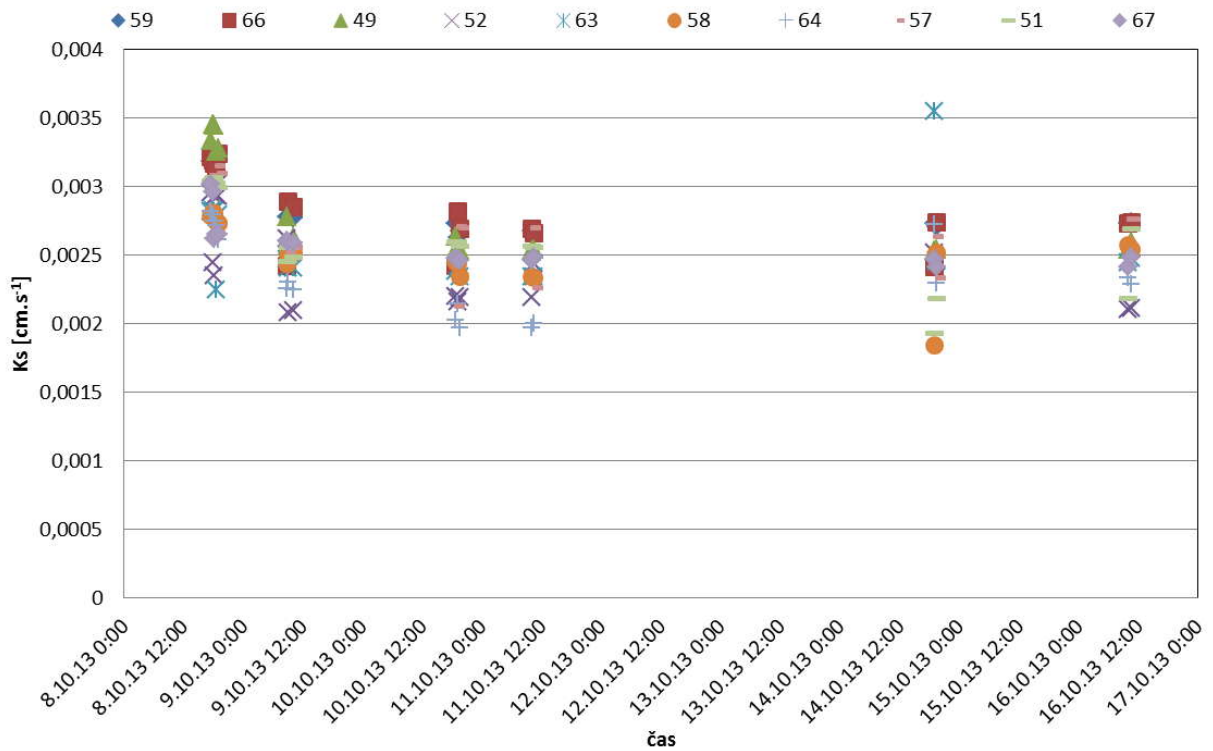
Číslo měření	K_s [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$]									
	Číslo vzorku									
	59	66	49	52	63	58	64	57	51	67
	Úprava povrchu stěn pedologického válečku									
	S	BS	S	BS	BS	S	S	S	BS	BS
1	0,00318	0,00321	0,00334	0,00295	0,00281	0,00278	0,00282	0,00308	0,00304	0,00301
2	0,00319	0,00319	0,00345	0,00245	0,00283	0,00281	0,00279	0,00307	0,00306	0,00296
3	0,00322	0,00316	0,00344	0,00235	0,00281	0,00280	0,00275	0,00302	0,00307	0,00262
4	0,00314	0,00313	0,00325	0,00293	0,00224	0,00275	0,00271	0,00315	0,00303	0,00265
5	0,00308	0,00324	0,00328	0,00293	0,00279	0,00273	0,00261	0,00310	0,00299	0,00265
6	0,00278	0,00242	0,00277	0,00262	0,00247	0,00244	0,00226	0,00252	0,00245	0,00260
7	0,00278	0,00289	0,00257	0,00208	0,00240	0,00250	0,00230	0,00256	0,00256	0,00260
8	0,00277	0,00285	0,00263	0,00210	0,00241	0,00251	0,00225	0,00255	0,00248	0,00259
9	0,00273	0,00242	0,00264	0,00219	0,00238	0,00245	0,00202	0,00213	0,00259	0,00248
10	0,00263	0,00281	0,00256	0,00216	0,00241	0,00244	0,00214	0,00270	0,00260	0,00246
11	0,00267	0,00269	0,00253	0,00219	0,00234	0,00234	0,00197	0,00270	0,00256	0,00246
12	0,00267	0,00269	0,00253	0,00219	0,00234	0,00234	0,00197	0,00270	0,00256	0,00246
13	0,00267	0,00266	0,00254	0,00243	0,00234	0,00233	0,00200	0,00226	0,00255	0,00248
14	0,00273	0,00242	0,00253	0,00251	0,00355	0,00184	0,00272	0,00263	0,00193	0,00247
15	0,00271	0,00274	0,00254	0,00246	0,00246	0,00252	0,00229	0,00233	0,00219	0,00242
16	0,00273	0,00273	0,00254	0,00210	0,00245	0,00257	0,00233	0,00276	0,00218	0,00241
17	0,00274	0,00273	0,00259	0,00211	0,00248	0,00254	0,00228	0,00276	0,00269	0,00249

Tab. 8 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky syntetického písku 3. série.

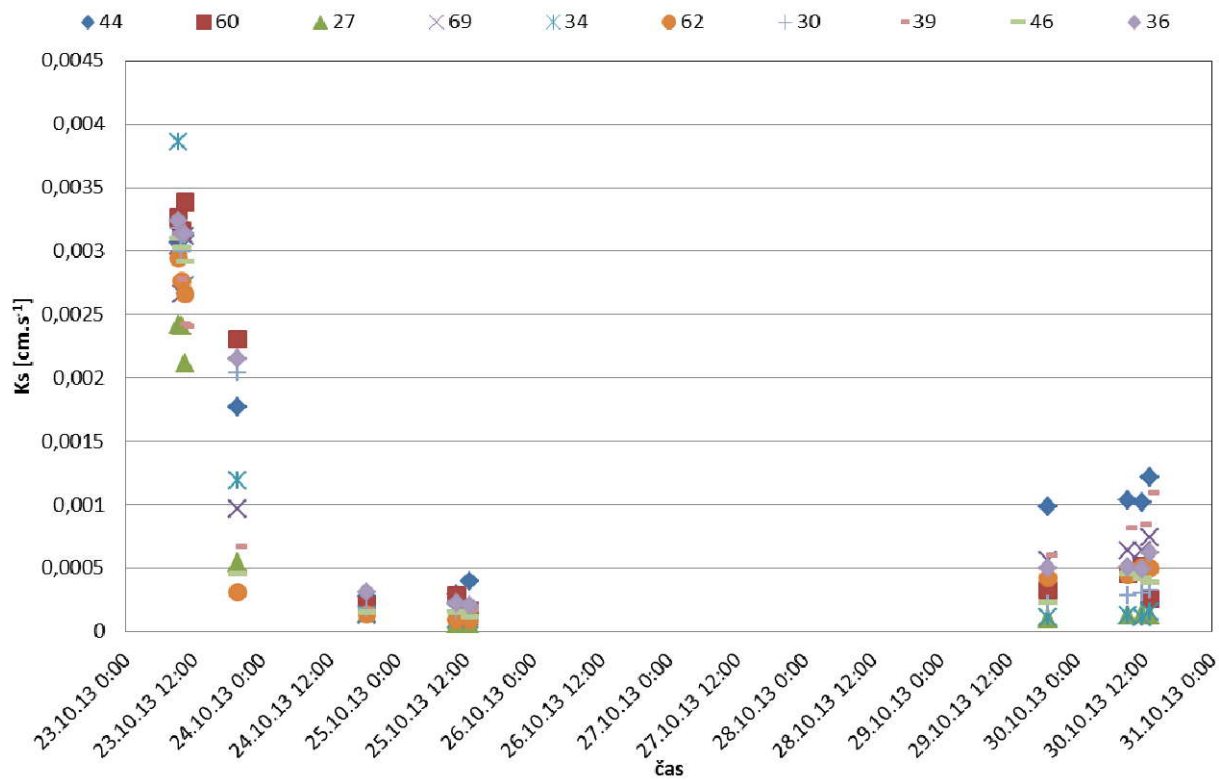
Číslo měření	K_s [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$]									
	Číslo vzorku									
	44	60	27	69	34	62	30	39	46	36
	Úprava povrchu stěn pedologického válečku									
	BS	BS	S	BS	S	BS	S	S	BS	S
1	0,00306	0,00327	0,00242	0,00304	0,00386	0,00295	0,00318	0,00278	0,00310	0,00323
2	0,00317	0,00316	0,00241	0,00266	0,00305	0,00277	0,00300	0,00242	0,00303	0,00313
3	0,00312	0,00338	0,00211	0,00311	0,00273	0,00266	0,00313	0,00241	0,00292	0,00313
4	0,00177	0,00230	0,00054	0,00097	0,00119	0,00031	0,00203	0,00067	0,00045	0,00215
5	0,00027	0,00021	0,00015	0,00013	0,00014	0,00014	0,00018	0,00017	0,00015	0,00031
6	0,00029	0,00028	0,00005	0,00015	0,00009	0,00009	0,00016	0,00016	0,00015	0,00023
7	0,00040	0,00016	0,00005	0,00011	0,00009	0,00009	0,00015	0,00018	0,00012	0,00021
8	0,00098	0,00033	0,00010	0,00056	0,00011	0,00042	0,00022	0,00060	0,00023	0,00050
9	0,00103	0,00046	0,00013	0,00064	0,00013	0,00045	0,00028	0,00082	0,00046	0,00050
10	0,00102	0,00051	0,00014	0,00064	0,00011	0,00051	0,00030	0,00085	0,00042	0,00049
11	0,00121	0,00025	0,00013	0,00074	0,00015	0,00050	0,00032	0,00110	0,00039	0,00062



Obr. 12 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky syntetického písku 1. série.



Obr. 13 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky syntetického písku 2. série.



Obr. 14 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky syntetického písku 3. série.



Obr. 15 Vzorky syntetického písku po měření K_s 1. série (vlevo) a 2. série (vpravo).

6.1.1 Statistické vyhodnocení hodnot nasycené hydraulické vodivosti pro vzorky syntetického písku

První série souboru dat K_s syntetického písku

V grafu na obr. 12 lze vidět významný pokles hodnoty K_s v závislosti na čase. V první sérii došlo k nejvýraznějšímu snížení hodnoty K_s o jeden řád během jednoho dne. Z grafu na

obr. 16 lze předpokládat, že hodnota K_s dosáhla svého minima ($6,15 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$) během dvou dnů od počátku měření. Výsledky ANOVA ($F = 9,041$, $\text{num } df = 12$, $\text{denom } df = 45,33$, $p\text{-value} = 1,655 \cdot 10^{-8}$) vedly k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,05. Rozdíly způsobené v průměrech nejsou pravděpodobně způsobeny vzorkovací variabilitou dat. Box-ploty vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku pro 1. sérii jsou zaznamenány na obr. 16. Nejnižší hodnota K_s mediánu, geometrického průměru, minima, prvního a třetího kvartilu byla zaznamenána v šestém pokusu. Nejvyšší hodnota K_s mediánu, geometrického průměru, minima, maxima, prvního a třetího kvartilu byla vypočtena v prvním pokusu.

Tab. 9 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.

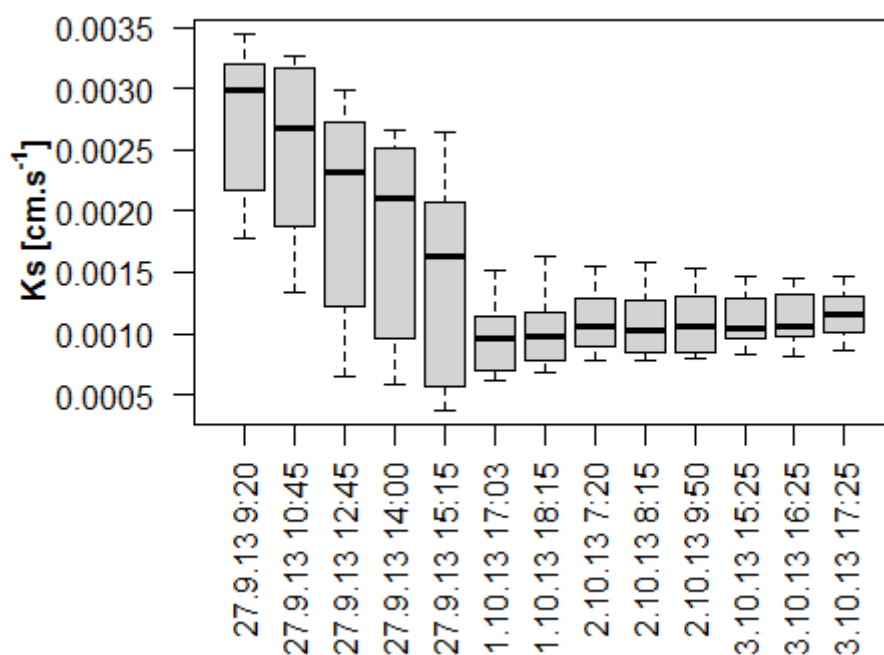
číslo měření	1	2	3	4	5
minimum	1.777050e-03	1.338277e-03	6.501095e-04	5.787117e-04	3.772666e-04
maximum	3.437300e-03	3.267406e-03	2.983622e-03	2.665138e-03	2.642651e-03
rozsah	1.660250e-03	1.929130e-03	2.333513e-03	2.086426e-03	2.265384e-03
suma	2.768780e-02	2.474203e-02	2.013899e-02	1.775237e-02	1.487497e-02
medián	2.991654e-03	2.679376e-03	2.322369e-03	2.097416e-03	1.631852e-03
průměr	2.768780e-03	2.474203e-03	2.013899e-03	1.775237e-03	1.487497e-03
st.chyb.prům.	1.934185e-04	2.416609e-04	2.741850e-04	2.533513e-04	2.538020e-04
int.spo.0.95	4.375431e-04	5.466749e-04	6.202496e-04	5.731206e-04	5.741401e-04
rozptyl	3.741072e-07	5.839998e-07	7.517743e-07	6.418690e-07	6.441547e-07
směr.odchyl.	6.116430e-04	7.641988e-04	8.670492e-04	8.011673e-04	8.025925e-04
koef.var.	2.209071e-01	3.088667e-01	4.305327e-01	4.513016e-01	5.395589e-01
šikmost	-4.796522e-01	-3.557696e-01	-3.315470e-01	-3.009039e-01	-1.021263e-01
špičatost	-1.521526e+00	-1.689264e+00	-1.723002e+00	-1.801826e+00	-1.671853e+00
Shap-wilk.	8.862457e-01	8.679730e-01	8.927455e-01	8.754768e-01	9.287383e-01
p-hod.s.w	1.537845e-01	9.466547e-02	1.820501e-01	1.157320e-01	4.355975e-01

Tab. 10 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.

číslo měření	6	7	8	9	10
minimum	6.154192e-04	6.886590e-04	7.725993e-04	7.789089e-04	8.022054e-04
maximum	1.512601e-03	1.624846e-03	1.550639e-03	1.575960e-03	1.527113e-03
rozsah	8.971820e-04	9.361871e-04	7.780402e-04	7.970511e-04	7.249076e-04
suma	9.714758e-03	1.014743e-02	1.110361e-02	1.090788e-02	1.112082e-02
medián	9.674001e-04	9.770393e-04	1.051930e-03	1.021273e-03	1.056020e-03
průměr	9.714758e-04	1.014743e-03	1.110361e-03	1.090788e-03	1.112082e-03
st.chyb.prům.	8.644653e-05	8.875547e-05	8.861559e-05	8.249216e-05	8.208448e-05
int.spo.0.95	1.955556e-04	2.007788e-04	2.004624e-04	1.866102e-04	1.856880e-04
rozptyl	7.473003e-08	7.877534e-08	7.852723e-08	6.804956e-08	6.737861e-08
směr.odchyl.	2.733679e-04	2.806695e-04	2.802271e-04	2.608631e-04	2.595739e-04
koef.var.	2.813945e-01	2.765915e-01	2.523747e-01	2.391510e-01	2.334126e-01
šikmost	4.012221e-01	7.597853e-01	3.506486e-01	4.618228e-01	2.406075e-01
špičatost	-9.192724e-01	-3.853219e-01	-1.473297e+00	-1.233221e+00	-1.554046e+00
Shap-wilk.	9.422935e-01	9.247703e-01	9.244021e-01	9.402705e-01	9.244117e-01
p-hod.s.w	5.788051e-01	3.984629e-01	3.951364e-01	5.560269e-01	3.952228e-01

Tab. 11 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.

číslo měření	11	12	13
minimum	8.295464e-04	8.099616e-04	8.686596e-04
maximum	1.457906e-03	1.442513e-03	1.468064e-03
rozsah	6.283594e-04	6.325517e-04	5.994044e-04
suma	1.097867e-02	1.119985e-02	1.153187e-02
medián	1.034015e-03	1.062381e-03	1.155610e-03
průměr	1.097867e-03	1.119985e-03	1.153187e-03
st.chyb.prům.	6.652849e-05	6.818926e-05	6.496723e-05
int.spo.0.95	1.504979e-04	1.542548e-04	1.469661e-04
rozptyl	4.426040e-08	4.649775e-08	4.220741e-08
směr.odchyl.	2.103816e-04	2.156334e-04	2.054444e-04
koef.var.	1.916276e-01	1.925324e-01	1.781536e-01
šikmost	4.729134e-01	2.873561e-01	7.037984e-03
špičatost	-1.401959e+00	-1.418970e+00	-1.645909e+00
Shap-wilk.	9.121928e-01	9.282970e-01	9.421685e-01
p-hod.s.w	2.963955e-01	4.313519e-01	5.773862e-01



Obr. 16 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 1. série.

Druhá série souboru dat K_s syntetického písku

V grafu na obr. 13 není zaznamenán velký pokles hodnoty K_s v závislosti na čase. Toto snížení odpovídá přibližně hodnotě $0,005 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Výsledky ANOVA ($F = 7,979$, $\text{num } df = 16$, $\text{denom } df = 57,34$, $p\text{-value} = 1,683 \cdot 10^{-9}$) vedly k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,05. Rozdíly způsobené v průměrech nejsou pravděpodobně způsobeny vzorkovací variabilitou dat. Box-ploty vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku pro 2. sérii jsou zaznamenány na obr. 17. Nejnižší hodnota K_s mediánu, geometrického průměru a prvního kvartilu byla zaznamenána v devátém pokusu. Minimum hodnoty K_s bylo dosaženo ve čtrnáctém pokusu. Nejvyšší hodnota K_s mediánu, geometrického průměru, minima, prvního kvartilu byla vypočtena v prvním pokusu. Koeficienty variace, které charakterizují rozkolísanost dat pro hodnoty K_s , byly nejnižší v 2. sérii.

Tab. 12 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.

číslo měření	1	2	3	4	5
minimum	2.782864e-03	2.445614e-03	2.346735e-03	2.242031e-03	2.611782e-03
maximum	3.336536e-03	3.453010e-03	3.443581e-03	3.249864e-03	3.279727e-03
rozsah	5.536720e-04	1.007396e-03	1.096846e-03	1.007833e-03	6.679450e-04
suma	3.022554e-02	2.979789e-02	2.924730e-02	2.898463e-02	2.939356e-02
medián	3.025821e-03	3.008409e-03	2.918438e-03	2.979985e-03	2.959398e-03
průměr	3.022554e-03	2.979789e-03	2.924730e-03	2.898463e-03	2.939356e-03
st.chyb.prům.	5.878328e-05	8.810895e-05	1.015353e-04	9.843994e-05	7.494881e-05
int.spo.0.95	1.329770e-04	1.993163e-04	2.296889e-04	2.226866e-04	1.695460e-04
rozptyl	3.455474e-08	7.763187e-08	1.030943e-07	9.690421e-08	5.617324e-08
směr.odchyl.	1.858891e-04	2.786250e-04	3.210830e-04	3.112944e-04	2.370090e-04
koef.var.	6.150065e-02	9.350491e-02	1.097821e-01	1.073998e-01	8.063295e-02
šikmost	1.577453e-01	-1.920422e-01	-1.409143e-01	-7.268986e-01	6.846339e-03
špičatost	-1.443510e+00	-7.081550e-01	-1.069749e+00	-6.824732e-01	-1.643666e+00
Shap-wilk.	9.488828e-01	9.706591e-01	9.850694e-01	9.042443e-01	9.456022e-01
p-hod.s.w	6.553003e-01	8.968877e-01	9.864945e-01	2.437465e-01	6.168506e-01

Tab. 13 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.

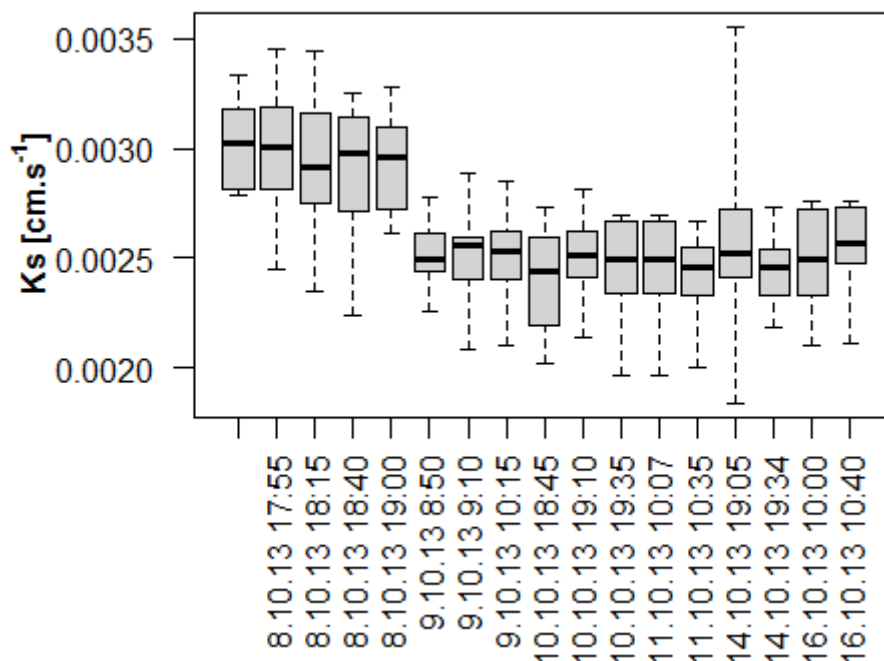
číslo měření	6	7	8	9	10
minimum	2.256774e-03	2.082064e-03	2.098475e-03	2.024420e-03	2.141421e-03
maximum	2.776267e-03	2.885783e-03	2.847414e-03	2.731629e-03	2.813392e-03
rozsah	5.194928e-04	8.037192e-04	7.489386e-04	7.072089e-04	6.719707e-04
suma	2.532838e-02	2.523187e-02	2.513554e-02	2.403829e-02	2.492340e-02
medián	2.492541e-03	2.561014e-03	2.532846e-03	2.436112e-03	2.514131e-03
průměr	2.532838e-03	2.523187e-03	2.513554e-03	2.403829e-03	2.492340e-03
st.chyb.prům.	5.143204e-05	7.201052e-05	7.110765e-05	7.206833e-05	6.862188e-05
int.spo.0.95	1.163474e-04	1.628991e-04	1.608567e-04	1.630299e-04	1.552335e-04
rozptyl	2.645255e-08	5.185516e-08	5.056298e-08	5.193844e-08	4.708962e-08
směr.odchyl.	1.626424e-04	2.277173e-04	2.248621e-04	2.279001e-04	2.170014e-04
koef.var.	6.421351e-02	9.024986e-02	8.945985e-02	9.480711e-02	8.706733e-02
šikmost	1.276914e-01	-2.880034e-01	-3.097242e-01	-2.484041e-01	-3.280481e-01
špičatost	-1.129409e+00	-6.902583e-01	-9.632944e-01	-1.370887e+00	-1.186757e+00
Shap-wilk.	9.382816e-01	9.598443e-01	9.718119e-01	9.603724e-01	9.445717e-01
p-hod.s.w	5.340561e-01	7.840952e-01	9.071175e-01	7.901101e-01	6.049087e-01

Tab. 14 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.

číslo měření	11	12	13	14	15
minimum	1.970270e-03	1.970270e-03	2.001784e-03	1.841667e-03	2.186076e-03
maximum	2.696064e-03	2.696064e-03	2.670414e-03	3.550509e-03	2.736950e-03
rozsah	7.257936e-04	7.257936e-04	6.686306e-04	1.708842e-03	5.508749e-04
suma	2.446142e-02	2.446142e-02	2.427011e-02	2.533782e-02	2.463867e-02
medián	2.496603e-03	2.496603e-03	2.458627e-03	2.522162e-03	2.455865e-03
průměr	2.446142e-03	2.446142e-03	2.427011e-03	2.533782e-03	2.463867e-03
st.chyb.prům.	7.528221e-05	7.528221e-05	6.402905e-05	1.483151e-04	5.458823e-05
int.spo.0.95	1.703002e-04	1.703002e-04	1.448438e-04	3.355120e-04	1.234871e-04
rozptyl	5.667412e-08	5.667412e-08	4.099719e-08	2.199736e-07	2.979875e-08
směr.odchyl.	2.380633e-04	2.380633e-04	2.024776e-04	4.690134e-04	1.726231e-04
koef.var.	9.732193e-02	9.732193e-02	8.342673e-02	1.851041e-01	7.006187e-02
šikmost	-6.113217e-01	-6.113217e-01	-6.401507e-01	4.971531e-01	1.252094e-01
špičatost	-9.347873e-01	-9.347873e-01	-6.005851e-01	-3.656870e-02	-1.178058e+00
Shap-wilk.	9.149587e-01	9.149587e-01	9.371079e-01	8.935462e-01	9.653776e-01
p-hod.s.w	3.168171e-01	3.168171e-01	5.213042e-01	1.858418e-01	8.449967e-01

Tab. 15 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.

číslo měření	16	17
minimum	2.102518e-03	2.111241e-03
maximum	2.760865e-03	2.763078e-03
rozsah	6.583468e-04	6.518371e-04
suma	2.480347e-02	2.540899e-02
medián	2.494265e-03	2.564824e-03
průměr	2.480347e-03	2.540899e-03
st.chyb.prům.	7.252723e-05	6.734262e-05
int.spo.0.95	1.640680e-04	1.523396e-04
rozptyl	5.260199e-08	4.535029e-08
směr.odchyl.	2.293512e-04	2.129561e-04
koef.var.	9.246740e-02	8.381129e-02
šikmost	-2.560001e-01	-7.025873e-01
špičatost	-1.458092e+00	-8.429802e-01
Shap-wilk.	9.365728e-01	8.992956e-01
p-hod.s.w	5.155449e-01	2.152252e-01



Obr. 17 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 2. série.

Třetí série souboru dat K_s syntetického písku

V grafu na obr. 14 lze vidět významný pokles hodnoty K_s v závislosti na čase. V této sérii došlo k nejvýraznějšímu snížení hodnoty K_s o jeden řád během prvních dvou dnů, kdy dosáhla svého minima ($5,36 \cdot 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Výsledky ANOVA ($F = 162,913$, $\text{num } df = 10$, $\text{denom } df = 38,72$, $p\text{-value} = 2,2 \cdot 10^{-16}$) vedly k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,05. Rozdíly způsobené v průměrech nejsou pravděpodobně způsobeny vzorkovací variabilitou dat. Box-ploty vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku pro 3. sérii jsou zaznamenány na obr. 18. Nejnižší hodnota K_s mediánu, geometrického průměru, prvního a třetího kvartilu byla zjištěna v sedmém pokusu. Nejvyšší hodnota K_s mediánu, geometrického průměru, minima, maxima, prvního a třetího kvartilu byla vypočtena v prvním pokusu.

Tab. 16 Popisná statistika hodnot Ks pro vzorky syntetického písku 3. série.

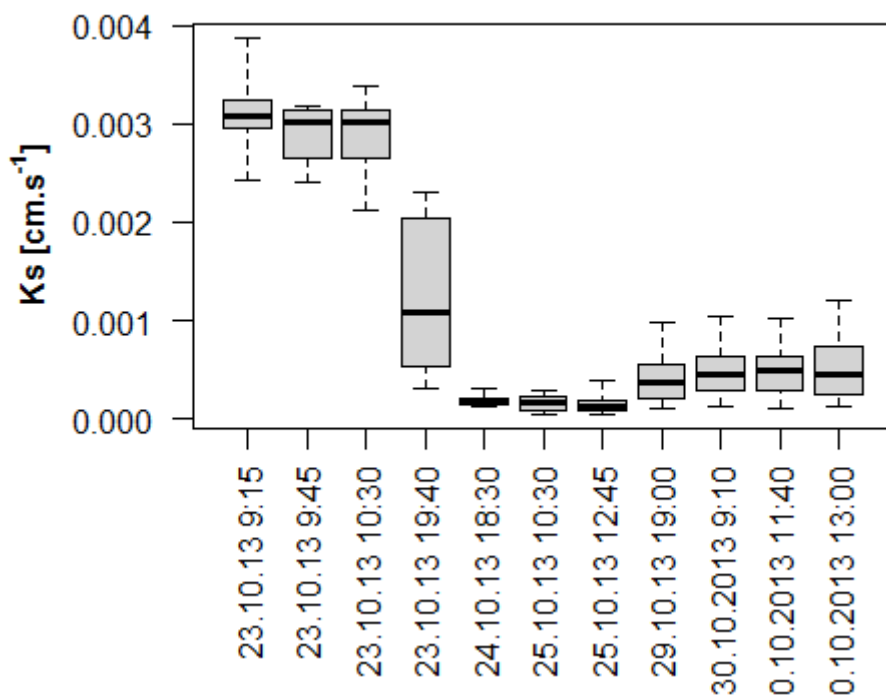
číslo měření	1	2	3	4	5
minimum	2.416512e-03	2.411502e-03	2.114946e-03	3.092036e-04	1.260704e-04
maximum	3.860720e-03	3.168981e-03	3.384736e-03	2.302239e-03	3.081934e-04
rozsah	1.444208e-03	7.574790e-04	1.269791e-03	1.993036e-03	1.821230e-04
suma	3.088260e-02	2.880505e-02	2.870798e-02	1.237405e-02	1.841898e-03
medián	3.083461e-03	3.015513e-03	3.016604e-03	1.076263e-03	1.624337e-04
průměr	3.088260e-03	2.880505e-03	2.870798e-03	1.237405e-03	1.841898e-04
st.chyb.prům.	1.168650e-04	9.338602e-05	1.233949e-04	2.413034e-04	1.934151e-05
int.spo.0.95	2.643670e-04	2.112538e-04	2.791387e-04	5.458663e-04	4.375355e-05
rozptyl	1.365743e-07	8.720948e-08	1.522631e-07	5.822735e-07	3.740942e-09
směr.odchyl.	3.695596e-04	2.953125e-04	3.902090e-04	7.630685e-04	6.116324e-05
koef.var.	1.196660e-01	1.025211e-01	1.359235e-01	6.166685e-01	3.320664e-01
šikmost	2.656046e-01	-5.393684e-01	-5.746492e-01	1.770938e-01	9.317002e-01
špičatost	6.136273e-02	-1.506148e+00	-1.017219e+00	-1.844408e+00	-7.096985e-01
Shap-wilk.	9.311937e-01	8.482929e-01	9.201311e-01	8.941565e-01	8.391113e-01
p-hod.s.w	4.597355e-01	5.543302e-02	3.580498e-01	1.887800e-01	4.305543e-02

Tab. 17 Popisná statistika hodnot Ks pro vzorky syntetického písku 3. série.

číslo měření	6	7	8	9	10
minimum	5.358789e-05	5.378808e-05	9.696102e-05	1.262888e-04	1.069620e-04
maximum	2.875742e-04	3.970793e-04	9.837146e-04	1.034527e-03	1.020477e-03
rozsah	2.339864e-04	3.432912e-04	8.867536e-04	9.082381e-04	9.135147e-04
suma	1.664073e-03	1.561677e-03	4.041626e-03	4.891455e-03	4.980984e-03
medián	1.575862e-04	1.355763e-04	3.731635e-04	4.559034e-04	4.990076e-04
průměr	1.664073e-04	1.561677e-04	4.041626e-04	4.891455e-04	4.980984e-04
st.chyb.prům.	2.510521e-05	3.059684e-05	8.585208e-05	9.063835e-05	9.089055e-05
int.spo.0.95	5.679192e-05	6.921487e-05	1.942109e-04	2.050382e-04	2.056087e-04
rozptyl	6.302714e-09	9.361668e-09	7.370580e-08	8.215310e-08	8.261092e-08
směr.odchyl.	7.938963e-05	9.675571e-05	2.714881e-04	2.866236e-04	2.874212e-04
koef.var.	4.770801e-01	6.195629e-01	6.717299e-01	5.859681e-01	5.770370e-01
šikmost	2.569935e-01	1.359917e+00	6.987786e-01	4.167107e-01	3.034707e-01
špičatost	-1.367376e+00	1.031219e+00	-5.354388e-01	-9.671044e-01	-1.069422e+00
Shap-wilk.	9.237052e-01	8.225216e-01	9.227294e-01	9.377806e-01	9.534657e-01
p-hod.s.w	3.888962e-01	2.718445e-02	3.802829e-01	5.285922e-01	7.095659e-01

Tab. 18 Popisná statistika hodnot Ks pro vzorky syntetického písku 3. série.

číslo měření	11
minimum	1.265071e-04
maximum	1.211416e-03
rozsah	1.084909e-03
suma	5.407047e-03
medián	4.437245e-04
průměr	5.407047e-04
st.chyb.prům.	1.195467e-04
int.spo.0.95	2.704333e-04
rozptyl	1.429140e-07
směr.odchyl.	3.780397e-04
koef.var.	6.991612e-01
šikmost	5.820452e-01
špičatost	-1.224984e+00
Shap-wilk.	9.062825e-01
p-hod.s.w	2.564189e-01



Obr. 18 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky syntetického písku 3. série.

6.2 Laboratorní měření nasycené hydraulické vodivosti pro vzorky hrubozrnného písku

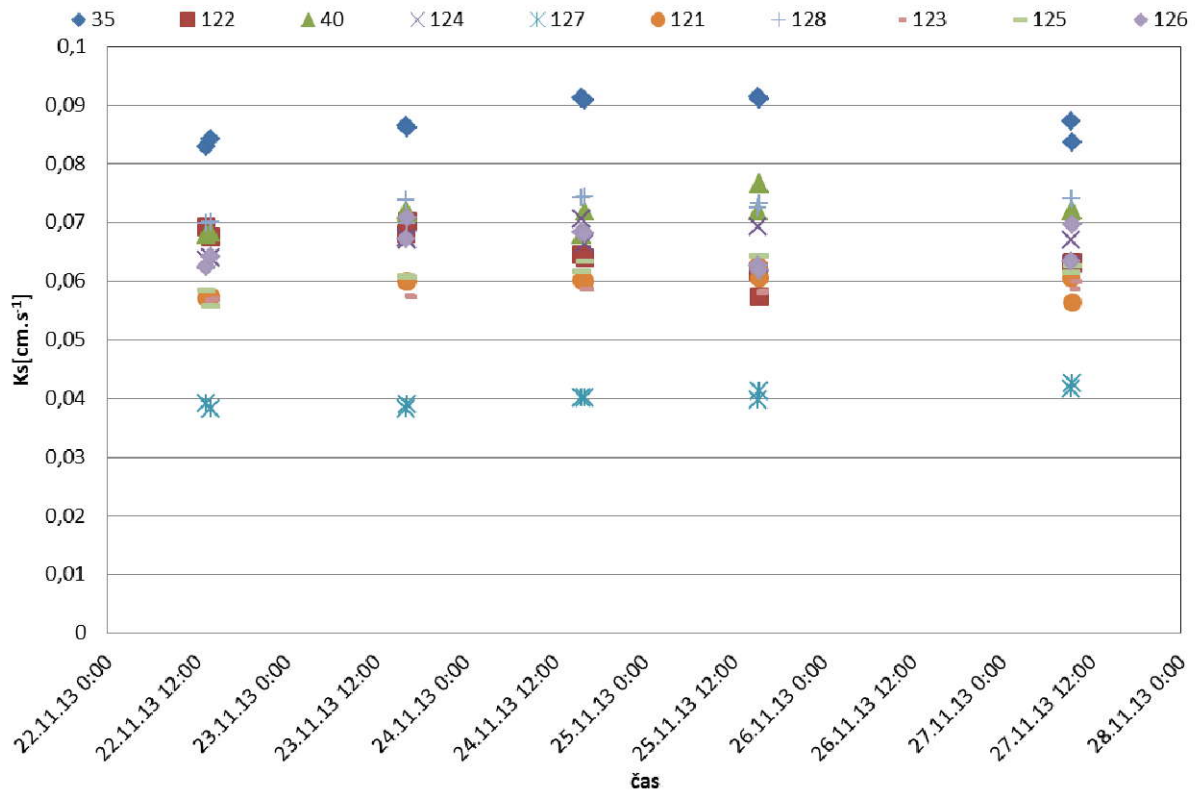
Vypočtené hodnoty K_s pro vzorky hrubozrnného písku jsou shrnuty do tab. 19-20. Při čtvrté i páté sérii měření nebyla prokázána výrazná změna hodnoty K_s v závislosti na čase viz obr. 19-20. Ve čtvrté sérii měření se vyskytuje větší rozsah hodnot K_s pro jednotlivé vzorky hrubozrnného písku než v páté. U vzorku číslo 135 došlo k výraznému zvýšení hodnoty K_s při pátém pokusu. Toto zvýšení bylo nejpravděpodobněji způsobeno chybou měření. Pro obě série lze předpokládat hodnoty K_s jako konstanty.

Tab. 19 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.

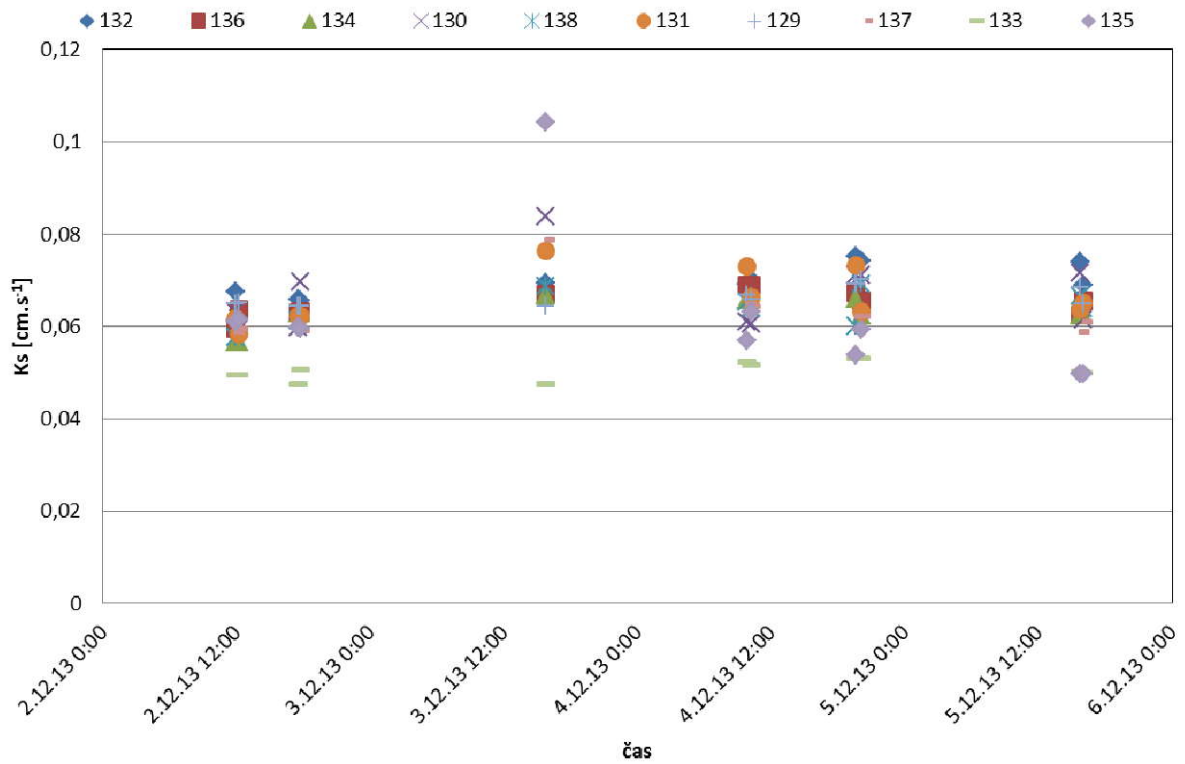
Číslo měření	K_s [cm.s ⁻¹]									
	Číslo vzorku									
	35	122	40	124	127	121	128	123	125	126
	Úprava povrchu stěn pedologického válečku									
	S	BS	S	BS	S	BS	S	BS	BS	S
1	0,08293	0,06931	0,06789	0,06369	0,03916	0,05718	0,06989	0,05673	0,05858	0,06255
2	0,08420	0,06758	0,06831	0,06396	0,03826	0,05730	0,07004	0,05705	0,05579	0,06419
3	0,08657	0,06809	0,07215	0,06745	0,03829	0,06002	0,07377	0,05761	0,06092	0,06716
4	0,08611	0,07028	0,07174	0,06706	0,03909	0,05995	0,06994	0,05742	0,06082	0,07086
5	0,09127	0,06455	0,06793	0,07053	0,04015	0,06012	0,07429	0,05860	0,06179	0,06835
6	0,09086	0,06394	0,07192	0,06641	0,04009	0,06004	0,07446	0,05865	0,06346	0,06819
7	0,09135	0,06174	0,07190	0,06920	0,03977	0,06262	0,07243	0,05808	0,06433	0,06257
8	0,09101	0,05733	0,07670	0,06311	0,04133	0,06053	0,07331	0,05832	0,06431	0,06183
9	0,08724	0,06305	0,07196	0,06706	0,04160	0,06067	0,07408	0,05876	0,06149	0,06344
10	0,08368	0,06315	0,07203	0,06276	0,04259	0,05634	0,07405	0,06005	0,06260	0,06967

Tab. 20 Vypočtené hodnoty hydraulické vodivosti K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.

Číslo měření	K_s [cm.s ⁻¹]									
	Číslo vzorku									
	132	136	134	130	138	131	129	137	133	135
	Úprava povrchu stěn pedologického válečku									
	BS	S	BS	S	BS	S	S	BS	S	BS
1	0,06757	0,05956	0,05676	0,06323	0,05762	0,06169	0,06480	0,05894	0,04944	0,06098
2	0,06334	0,06365	0,05679	0,05931	0,06018	0,05846	0,06508	0,05961	0,04960	0,06162
3	0,06579	0,06301	0,06301	0,05990	0,06119	0,06232	0,06447	0,05926	0,04767	0,05993
4	0,06569	0,06323	0,06305	0,06981	0,06112	0,06213	0,06430	0,05916	0,05065	0,05960
5	0,06955	0,06695	0,06676	0,08377	0,06876	0,07647	0,06430	0,07889	0,04749	0,10431
6	0,06929	0,06908	0,06586	0,06099	0,06531	0,07305	0,06670	0,06489	0,05241	0,05706
7	0,07025	0,06908	0,06625	0,06066	0,06381	0,06626	0,06591	0,06447	0,05174	0,06327
8	0,07509	0,06736	0,06606	0,07106	0,06020	0,07322	0,06923	0,06219	0,05313	0,05382
9	0,07424	0,06566	0,06251	0,07104	0,06923	0,06322	0,07026	0,06233	0,05307	0,05925
10	0,07406	0,06253	0,06253	0,07155	0,06665	0,06375	0,06854	0,05876	0,05035	0,04968
11	0,06902	0,06563	0,06256	0,06143	0,06382	0,06511	0,06493	0,06107	0,05007	0,04969



Obr. 19 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.



Obr. 20 Závislost hodnoty hydraulické vodivosti K_s na čase pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.

6.2.1 Statistické vyhodnocení hodnot nasycené hydraulické vodivosti pro vzorky hrubozrnného písku

Čtvrtá série souboru dat K_s hrubozrnného písku

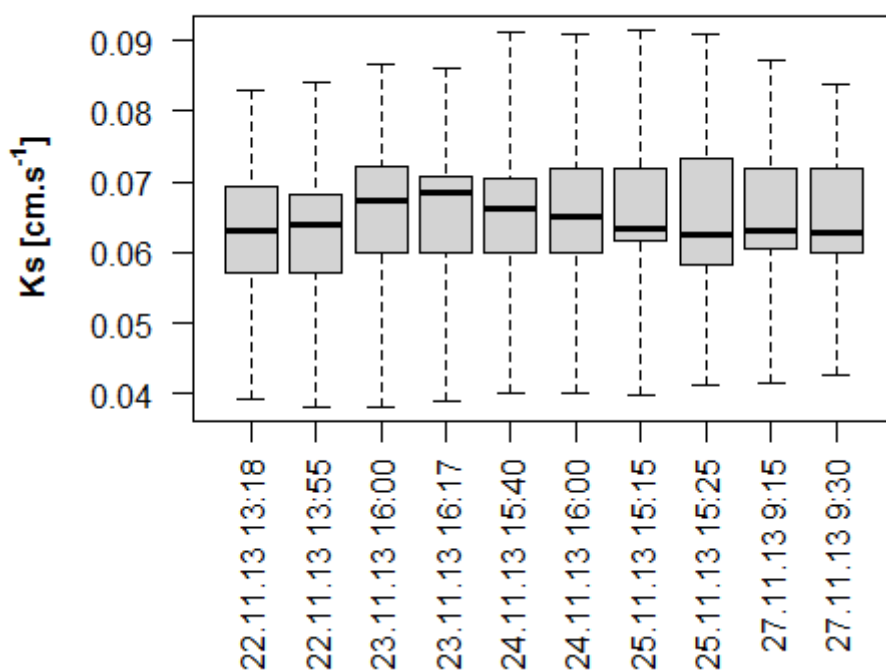
Z grafu na obr. 19 není patrný pokles hodnoty K_s v závislosti na čase. Výsledky ANOVA ($F = 0,076$, $num\ df = 9$, $denom\ df = 36,66$, $p\text{-value} = 0,1$) nevedly k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,05. Rozdíly způsobené v průměrech jsou pravděpodobně způsobeny vzorkovací variabilitou dat. Box-ploty vypočtených hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku pro 4. sérii jsou zaznamenány na obr. 21. Hodnoty mediánu K_s se pohybovali v rozmezí od 0,0625 do 0,0685 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Hodnoty mezi jednotlivými boxploty se překrývají. Koeficienty variace, které charakterizují rozkolísanost dat, pro hodnoty K_s byly nízké. Pro praxi lze vyhodnotit tuto sérii tím, že byly naměřeny konstantní hodnoty pro jednotlivé vzorky s minimálním rozsahem hodnot K_s .

Tab. 21 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.

číslo měření	1	2	3	4	5
minimum	0.0391626032	0.038262085	0.0382888380	0.0390914401	0.0401519797
maximum	0.0829260845	0.084196910	0.0865731159	0.0861073424	0.0912685524
rozsah	0.0437634812	0.045934825	0.0482842779	0.0470159024	0.0511165726
suma	0.6279007046	0.626681074	0.6520400509	0.6532735923	0.6575737697
medián	0.0631184233	0.064072533	0.0673075537	0.0684975874	0.0662377614
průměr	0.0627900705	0.062668107	0.0652040051	0.0653273592	0.0657573770
st. chyb. prům.	0.0036046170	0.003773063	0.0039760008	0.0038762809	0.0041012019
int. spo. 0.95	0.0081542103	0.008535261	0.0089943388	0.0087687565	0.0092775632
rozptyl	0.0001299326	0.000142360	0.0001580858	0.0001502555	0.0001681986
směr. odchyl.	0.0113988000	0.011931473	0.0125732186	0.0122578764	0.0129691391
koef. var.	0.1815382572	0.190391462	0.1928289313	0.1876377145	0.1972271362
šikmost	-0.3194990821	-0.265598992	-0.4723532795	-0.4978096098	-0.0017189493
špičatost	-0.1347702077	-0.146726484	-0.0168919461	-0.0363816776	0.0511916779
Shap-wilk.	0.9440092207	0.941319857	0.9368311568	0.9213668049	0.9370271691
p-hod. S.W	0.5984231620	0.567791308	0.5183211234	0.3684958337	0.5204326060

Tab. 22 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.

číslo měření	6	7	8	9	10
minimum	0.0400905158	3.976606e-02	0.0413254665	0.041596575	0.0425936925
maximum	0.0908642856	9.135412e-02	0.0910128086	0.087239931	0.0836801293
rozsah	0.0507737698	5.158806e-02	0.0496873421	0.045643356	0.0410864368
suma	0.6580121959	6.539800e-01	0.6477860903	0.649347325	0.6469278884
medián	0.0651743111	6.347572e-02	0.0624711677	0.063246092	0.0629571777
průměr	0.0658012196	6.539800e-02	0.0647786090	0.064934733	0.0646927888
st. chyb. prům.	0.0040837451	4.110598e-03	0.0041901737	0.003732345	0.0035226797
int. spo. 0.95	0.0092380732	9.298818e-03	0.0094788313	0.008443151	0.0079688551
rozptyl	0.0001667697	1.689701e-04	0.0001755756	0.000139304	0.0001240927
směr. odchyl.	0.0129139359	1.299885e-02	0.0132504925	0.011802711	0.0111396913
koef. var.	0.1962567862	1.987653e-01	0.2045504333	0.181762687	0.1721937092
šikmost	-0.0435419866	3.810958e-02	0.2871975314	-0.052106440	-0.2396078152
špičatost	0.0287742833	1.282968e-01	-0.3822536904	-0.136914009	-0.4996905765
Shap-wilk.	0.9397314296	9.187681e-01	0.9433124285	0.940998776	0.9661788090
p-hod. s.w	0.5500287930	3.467948e-01	0.5904249318	0.564179774	0.8533338177

Obr. 21 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 4. série.

Pátá série souboru dat K_s hrubozrnného písku

V grafu na obr. 20 není vidět významné snížení hodnoty K_s v závislosti na čase. Výsledky ANOVA ($F = 1,524$, num $df = 10$, denom $df = 39,519$, p -value = $0,167$) nevedly k zamítnutí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,05. Box-ploty vypočtených hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku pro 5. sérii jsou zaznamenány na obr. 22. Hodnoty mediánu K_s se

pohybovali v rozmezí od 0,0599 do 0,0692 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$. U vzorku číslo 135 došlo k výraznému zvýšení hodnoty K_s při pátém pokusu. Toto zvýšení bylo nejpravděpodobněji způsobeno chybou měření. Za předpokladu, že tato hodnota K_s by byla nižší, jednotlivé boxploty by se překrývaly. Koeficienty variace byly nízké. Pro praxi lze vyhodnotit tuto sérii, tím že byly naměřeny téměř konstantní hodnoty pro jednotlivé vzorky s menším rozsahem K_s než ve 4. sérii.

Tab. 23 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.

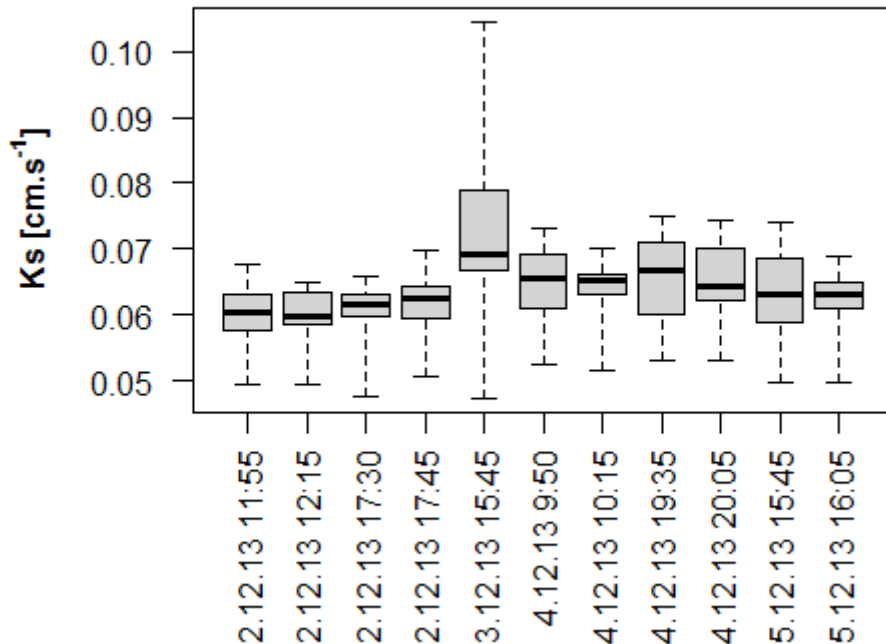
číslo měření	1	2	3	4	5
minimum	0.0494445108	4.959848e-02	4.767152e-02	5.065138e-02	0.0474856668
maximum	0.0675673664	6.507907e-02	6.578659e-02	6.980573e-02	0.1043064039
rozsah	0.0181228556	1.548059e-02	1.811507e-02	1.915435e-02	0.0568207371
suma	0.6005926518	5.976437e-01	6.065464e-01	6.187437e-01	0.7272331246
medián	0.0602700699	5.989732e-02	6.175462e-02	6.259159e-02	0.0691537949
průměr	0.0600592652	5.976437e-02	6.065464e-02	6.187437e-02	0.0727233125
st.chyb.prům.	0.0015756933	1.390096e-03	1.586881e-03	1.583410e-03	0.0046832927
int.spo.0.95	0.0035644660	3.144616e-03	3.589775e-03	3.581922e-03	0.0105943442
rozptyl	0.0000248281	1.932367e-05	2.518193e-05	2.507187e-05	0.0002193323
směr.odchyl.	0.0049827799	4.395870e-03	5.018160e-03	5.007181e-03	0.0148098720
koef.var.	0.0829643825	7.355335e-02	8.273332e-02	8.092497e-02	0.2036468287
šikmost	-0.5504564860	-9.631413e-01	-1.559243e+00	-6.953055e-01	0.4915265055
špičatost	-0.2998454960	2.040048e-01	1.635058e+00	2.061793e-01	-0.0379325718
Shap-wilk.	0.9592804238	8.973681e-01	7.684094e-01	9.238037e-01	0.9280795618
p-hod.s.w	0.7776368985	2.049414e-01	5.980888e-03	3.897735e-01	0.4292706883

Tab. 24 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.

číslo měření	6	7	8	9	10
minimum	5.240606e-02	5.174005e-02	5.313009e-02	5.307349e-02	4.968458e-02
maximum	7.304553e-02	7.024644e-02	7.509021e-02	7.423546e-02	7.405997e-02
rozsah	2.063947e-02	1.850639e-02	2.196012e-02	2.116197e-02	2.437539e-02
suma	6.446335e-01	6.416771e-01	6.513612e-01	6.508203e-01	6.284138e-01
medián	6.558717e-02	6.518656e-02	6.671153e-02	6.443931e-02	6.314245e-02
průměr	6.446335e-02	6.416771e-02	6.513612e-02	6.508203e-02	6.284138e-02
st.chyb.prům	1.939080e-03	1.635010e-03	2.420242e-03	1.998684e-03	2.572145e-03
int.spo.0.95	4.386503e-03	3.698650e-03	5.474968e-03	4.521336e-03	5.818596e-03
rozptyl	3.760029e-05	2.673259e-05	5.857572e-05	3.994736e-05	6.615929e-05
směr.odchyl.	6.131908e-03	5.170357e-03	7.653478e-03	6.320392e-03	8.133836e-03
koef.var.	9.512239e-02	8.057567e-02	1.174998e-01	9.711425e-02	1.294344e-01
šikmost	-5.825738e-01	-1.155529e+00	-3.395433e-01	-3.107697e-01	-3.678349e-01
špičatost	-8.259828e-01	6.382574e-01	-1.442544e+00	-1.034737e+00	-1.230967e+00
Shap-wilk.	9.408724e-01	8.601927e-01	9.367704e-01	9.666795e-01	9.361148e-01
p-hod.s.w	5.627613e-01	7.670908e-02	5.176675e-01	8.584680e-01	5.106455e-01

Tab. 25 Popisná statistika hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.

číslo měření	11
minimum	4.969240e-02
maximum	6.902042e-02
rozsah	1.932801e-02
suma	6.133224e-01
medián	6.318587e-02
průměr	6.133224e-02
st.chyb.prům.	2.040594e-03
int.spo.0.95	4.616145e-03
rozptyl	4.164026e-05
směr.odchyl.	6.452926e-03
koef.var.	1.052126e-01
šikmost	-8.758812e-01
špičatost	-7.694091e-01
Shap-wilk.	8.220103e-01
p-hod.s.w	2.680047e-02

Obr. 22 Box-ploty (minimum, první kvartil, medián, třetí kvartil, maximum) vypočtených hodnot K_s pro vzorky hrubozrnného písku 5. série.

7. ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá změnami hodnot nasycené hydraulické vodivosti v průběhu opakovaného měření pro jednotlivé vzorky písku o zrnitostním složení syntetického ($73 \mu\text{m}$) a říčního ($0,25\text{-}2 \text{ mm}$). Celkem bylo provedeno 5 sérií měření po 10 vzorcích.

Průměrné naměřené hodnoty K_s pro vzorky syntetického písku vyšly v rozmezí od $9,71 \cdot 10^{-4}$ do $2,77 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ v první sérii. V této sérii měření došlo k výraznému poklesu hodnoty K_s během prvních dvou dnů přibližně o hodnotu $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Koeficienty variace pro hodnoty K_s byly vypočteny v rozmezí od 0,18 do 0,54.

Průměrné naměřené hodnoty K_s pro vzorky syntetického písku se pohybovaly v rozmezí od $2,53 \cdot 10^{-3}$ do $3,02 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ v druhé sérii. Změna hodnoty K_s byla nízká. Toto snížení odpovídalo přibližně hodnotě $6,2 \cdot 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Koeficienty variace pro hodnoty K_s vycházely v rozmezí od 0,0615 do 0,185.

Výsledný průběh hodnot K_s u třetí série měření se podobal hodnotám K_s v první sérii. Průměrné naměřené hodnoty K_s pro vzorky syntetického písku se u třetí série pohybovaly v rozmezí od $1,56 \cdot 10^{-4}$ do $3,08 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. V této sérii měření se vyskytl pokles hodnoty K_s během prvních dvou dnů přibližně o hodnotu $2,92 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Koeficienty variace pro hodnoty K_s byly vypočteny v rozmezí od 0,10 do 0,70.

Poklesy hodnot K_s v závislosti na čase byly pravděpodobně způsobeny sorbčními procesy minerálů z pitné vody při její výměně. Tyto reakce mohly mít také za následek tvorbu mikroorganismů na sloupci písku, protože se na vzorcích z první a třetí série po vysušení objevila ztvrdlá krustička, jemně zbarvená do žluto-zelena.

Průměrné naměřené hodnoty K_s pro vzorky hrubozrnného písku vycházely v rozmezí od $6,30 \cdot 10^{-2}$ do $6,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ve čtvrté a od $5,98 \cdot 10^{-2}$ do $7,30 \cdot 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ v páté sérii. U těchto sérií měření vzorků hrubozrnného písku se nevyskytla statisticky významná změna (dle ANOVA) průběhu hodnoty K_s v závislosti na čase viz obr. 19-20. K poklesu hodnot u tohoto materiálu v čase oproti počátečním hodnotám nedocházelo, spíše byl měřen mírný vzestup u některých časových kroků. Koeficienty variace pro hodnoty K_s se pohybovaly v rozmezí od 0,17 do 0,21.

Z vypočtených hodnot K_s vyplývá, že se při měření neprojevil žádný vliv použitého silikonového gelu. Toto aditivum bylo aplikováno z důvodu zamezení možnosti vytváření preferenčních cest proudění podél stěn válečku.

Pro rozšíření výsledků této práce by bylo vhodné porovnat výsledky měření z laboratorního permeamtru, ve kterém protéká destilovaná voda a voda chemicky upravena pro řízení tvorby mikroorganismů. Pro zaznamenání jejich výskytu by bylo vhodné využít elektronového mikroskopu.

Hodnoty K_s jsou klíčové při tvorbě hydrologických modelů, ale jejich časová změna je často zanedbána. Výsledky této práce prokazují změny hodnoty K_s v závislosti na čase, proto by měly být zahrnuty při modelování proudění vody.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

CÍSLEROVÁ M. et Vogel T., 1998: Transportní procesy. *ČVUT, Praha*.

EIJKELKAMP, 2008: Operating instructions - 09.02 laboratory permeameters.
online: <http://www.eijkelkamp.com/Portals/2/Eijkelkamp/Files/Manuals/M1-0902e%20Laboratory%20permeameters.pdf>, staženo: 8.1.2015.

GUPTA R. et SWARTZENDRUBER D., 1962: Flow-associated reduction in the hydraulic conductivity of quartz sand. *Soil Science Society of America Proceedings, number 26, 9-12.*

KAZDA I., 1997: Podzemní hydraulika v ekologických a inženýrských aplikacích. *Academia, Praha*.

KURÁŽ, V., 1996. Soil moisture models in hydrological modelling evaluation of soil physical parameters, in: Nachtnebel, P.H., Kovář, P., Kuráž, V. [Eds.], Rainfall runoff models (Lecture Notes on the Workshop). *Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Chapter 6, pp.1-14.*

KUTÍLEK M. et NIELSEN D. R., 1994: Soil hydrology, *Catena Verlag, Cremlingen - Destedt, Germany*.

KUTÍLEK M., 1978: Vodohospodářská pedologie. *SNTL-ALFA, Praha*.

KUTÍLEK M., 2004: Hydropedologie 10. *ČVUT, Praha*.

MLEJNSKÁ E., 2013: Kolmatace – Významné omezení funkčnosti umělých mokřadů. *VTEI, Praha*.

PEDESCOLL A., et coll., 2009: Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering, Vol. 35, Issue 5.*

REYNOLDS, W.D., 2008. Saturated hydraulic properties: Laboratory methods, in: Carter M.R., Gregorich, E.G. [Eds.], *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis, Boca Raton, USA, pp. 1013-1024.

SEKI K., 2013: Biological Clogging of Sand Columns. *Open Journal of Soil Science*, Vol. 3, 148-152.

SIRIWARDENE N., DELETIC A., FLETCHER T., 2007: Clogging of stormwater gravel infiltration systems and filters: Insights from a laboratory study. *Water Research*, Vol. 41, Issue 7.

SKOLASIŇSKA K., 2006: Clogging microstructures in the vadose zone – laboratory and field studies. *Hydrogeology Journal*, Vol. 14, 1005-1017.

STACH, V., 1988: Fyzikální praktikum I. *PF JU, České Budějovice*.

SYROVÁ M., 2014: Vliv přípravy půdních vzorků na odhad nasycené hydraulické vodivosti: Bakalářská práce. *Praha: ČZU-FŽP*.

ŠTIBINGER J. et KULHAVÝ Z., 2010: Úpravy vodního režimu půd odvodněním. *ČZU, Praha*.

VALENTOVÁ J., 2007: *Hydraulika podzemní vody. ČVUT, Praha*.

VANDEVIVERE P. et BAVEYE P., 1992: Saturated Hydraulic Conductivity Reduction Caused by Aerobic Bacteria in Sand Columns. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 56, 1-13.

WINTER K. et GOETZ D., 2003: The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Water Science and Technology*, Vol 48, Issue 5.