

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

**KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A
EVIROMETÁLNÍHO MODELOVÁNÍ**



Hydropedologické charakteristiky štěrku

Gravel hydropedological characteristics

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D.

Konzultant: Ing. Ondřej Hušek

Diplomant: Bc. Kateřina Oncirková

2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního modelování

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Kateřina Oncirková

Krajinné a pozemkové úpravy

Název práce

Hydropedologické charakteristiky štěrku

Název anglicky

Gravel hydro pedological characteristics

Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je stanovení hydropedologických charakteristik štěrku a jejich změn vlivem rostoucího kořenového rákosu.

Dílčí cíle:

- 1) Založení pokusů umělých kořenových čistíren s možností monitoringu hydraulických parametrů
- 2) Provedení pokusů u vzorků bez porostu rákosu
- 3) Pravidelný monitoring hydropedologických charakteristik na vzorcích se vzrůstajícím porostem
- 4) Vyhodnocení časových změn sledovaných parametrů

Metodika

Pro simulaci vývoje prostředí kořenových čistíren budou založeny experimenty na štěrkovém podloží. Pro účely práce bude založeno pět pokusů pro monitoring nasycené hydraulické vodivosti a pět pokusů pro měření parametrů retenčních čar. Z každé skupiny bude jeden vzorek bez porostu rákosu, který bude sloužit jako referenční.

S postupným vývojem porostu rákosu budou stanoveny hodnoty nasycené hydraulické vodivosti na základě principu Darcyho zákona a parametry retenčních čar a drenážní pórovitosti na principu podtlakového aparátu. Měřené charakteristiky budou porovnávány s měřením na vzorcích bez porostu. Následně bude posouzen vliv kořenového systému rákosu na změnu sledovaných parametrů.

Doporučený rozsah práce

40 – 50

Klíčová slova

nasycená hydraulická vodivost, retenční křivka, drenážní pórovitost

Doporučené zdroje informací

- HLAVÍNEK P., MIČÍN J., et PRAX P., 2003: Stokování a čištění odpadních vod.
- HUSÁK Š., et RYDLO J., 1985: Materiály k vodní a mokřadní vegetaci středního Polabí a Kokořínska
- CHUDOBA J., 1991: Odpadní vody a jejich čištění
- KUTÍLEK M., 1978: Vodohospodářská pedologie
- REJMÁNKOVÁ E., 1982: The role of duckweed (Lemnaceae) in small wetland water bodies of Czechoslovakia
- Reynolds, W., Topp, G. 2007: Soil sampling and methods of analysis second edition, Soil water desorption and inhibition: Long column
- TUČEK J., CHUDOBA Z., et KONÍČEK Z., 1988: Základní procesy a výpočty technologií vody
- VYMAZAL J., BRIX H., COOPER P., GREEN M., et HABERL R., 1998: Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe
- VYMAZAL J., 2001a: Types of constructed wetlands for wastewater treatment: their potential for nutrient removal
- WANKOA A., TAPIA G., MOSÉ R., et GREGORIE C., 2011: A new empirical law to accurately predict solute retention capacity within horizontal flow constructed wetlands

Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 4. 3. 2015

prof. Ing. Pavel Pech, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 3. 2015

prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci, na Téma Hydropedologické charakteristiky šterku, vypracovala samotně pod vedením Ing. Jiří Pavlásek, Ph.D. a že jsem zde uvedla všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpala.

V Praze dne

.....

Poděkování

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Pavláskovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Ondřeji Huškovi za trpělivost, ochotu a podporu při psaní této diplomové práce. Poděkování také patří mé rodině a blízkým přátelům, kteří mě podporují při studiu.

Abstrakt

Cílem diplomové práce je zjistit změnu hydropedologických charakteristik štěrku, vlivem rostoucího kořenového systému rákosu obecného (*Phragmites australis*) v čase. Důvodem je zjištění změn v retenčních charakteristikách filtračního lože v čase.

Metodika v provedeném pokusu spočívala v založení dvou modelů. Na každém modelu bylo provedeno několik měření, které spočívali v zjištění vlastnosti samotného štěrku. Poté do těchto modelů byl zasazen rákos a sledovalo se, zda kořenový systém ovlivňuje vlastnosti štěrku.

Zjištění po měsíčním měření je, že rákos obecný v počátcích svého zakořenění nepůsobí na retenční vlastnosti štěrku ani na objem vyteklé vody.

Klíčová slova:

Kořenová čistírna odpadních vod (KČOV), Nasycená zóna, Porézní prostředí, Rákos obecný

Abstract

The aim of the thesis is to determine the change Hydropedological characteristics due to the development of the root system of *Phragmites australis* in time. This is to determine changes in the retention characteristics of the filter bed over time.

The methodology of the experiment consisted in the establishment of two models. Each model was performed several measurements, which consisted in finding characteristic of the gravel. Then, these models were planted *Phragmites australis* and monitor the impact of the root system to the properties of gravel.

Findings for monthly measurements is that common reed in his early rooting does not affect the retention properties of gravel or on the volume spilled water.

Key words:

Wastewater treatment plants root, Saturated zone, Porous environment, *Phragmites australis*

Seznam zkratk

KČOV	-	kořenová čistírna odpadních vod
ČOV	-	čistírna odpadních vod
SV	-	splašková voda
OD	-	odpadní voda
BSK	-	biologická spotřeba kyslíku
CHSK	-	chemická spotřeba kyslíku
KVHEM	-	katedra vodního a hospodářství a environmentálního modelování

Obsah

1	ÚVOD	11
	I. LITERÁRNÍ REŠERŽE.....	13
2	KČOV	12
2.1	Principy čištění	12
2.1.1	Mechanické předčištění.....	12
2.1.2	Biologické čištění.....	14
2.1.3	Chemické čištění	15
3	TYPY KČOV POUŽÍVANÝ V ČR	16
3.1	Systém s podpovrchovým horizontálním průtokem.....	16
3.2	Vegetace	17
3.2.1	Rákos obecný (<i>Phragmites australis</i>)	20
3.2.2	Chrastice rákosovitá (<i>Phalaris arundinacea</i>)	21
3.2.3	Orobinec úzkolistý (<i>Typha angustifolia</i>)	22
4	TECHNICKÉ PARAMETRY	23
4.1	Filtrační lože.....	23
4.2	Přívádění vody.....	24
4.3	Údržba a provoz	24
5	ÚČINNOST ČIŠTĚNÍ	26
5.1	Organické látky	26
5.2	Nerozpuštěné látky	26
5.3	Dusík	27
5.4	Fosfor.....	27
5.5	Těžké kovy	28
5.6	Bakteriální znečištění	28
6	PORÉZNÍ PROSTŘEDÍ	Chyba! Záložka není definována.
	Efektivní pórovitost.....	29
	Objemová vlhkost	30
	Propustnost.....	30
7	NASYCENÉ PORÉZNÍ PROSTŘEDÍ.....	31
7.1.1	Darcyho zákon	31
7.1.2	Darcyho pokus	32
7.1.3	Nasyčená hydraulická vodivost	33
8	NENASYCENÉ PORÉZNÍ PROSTŘEDÍ	35
8.1.1	Nenasycená hydraulická vodivost.....	35
8.1.2	Darcy-Buckinghamuv zákon.....	36

8.1.3	Richardsova rovnicemi.....	36
9	RETENČNÍ KŘIVKA	38
9.1	Stanovení retenční čáry	39
9.2	Rovnice retenční čáry van Genuchten 1980.....	41
9.3	Rovnice retenční čáry Brooks a Corey 1964.....	42
	II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	43
10	ZÁMĚR PROJEKTU.....	44
10.1	Řešení problematiky v současné době.....	44
10.2	Údaje o projektu.....	44
10.2.1	Metodika	45
11	VÝSLEDKY	48
11.1	Hydraulická vodivost.....	48
11.1.1	Hmotnost modelů.....	48
11.2	Retenční vlastnosti.....	48
11.3	Úbytek vody při poklesu hladiny.....	54
11.4	Rozptyl naměřených hodnot.....	58
12	DISKUZE.....	61
13	ZÁVĚR	63
14	PŘEHLED LITERATURY.....	64
15	PŘÍLOHA	68
15.1	Fotodokumentace.....	68
15.2	Grafy retenčních vlastností štěrku	70
15.2.1	Měření bez rákosu	71
15.2.2	Měření s rákosem	74
15.2.3	Drenážní pórovitost.....	87
15.3	Hydraulická vodivost.....	89
15.4	Naměřená data, bez rákosu	92
15.5	Naměřená data, s rákosem	92

1 ÚVOD

Práce vznikla za účelem zjistit, do jaké míry kořenový systém ovlivňuje či nikoli retenční vlastnosti štěrku. S tím související i objem vyteklé vody, která protéká přes štěrkový filtr.

Hydropedologické charakteristiky štěrku v současné době nejsou zcela probádané. V souvislosti s kořenovými čistírnami, kde štěrk tvoří základní prostředí pro růst rostlin. Naším pokusem bychom chtěli zjistit charakteristiky štěrku, a jak je ovlivňován kořenovým systémem mokřadních rostlin.

V literární rešerši je popsána kořenová čistírna odpadních vod. Princip fungování, nejčastější typy, účinnosti čištění, technické parametry a vegetace, která je nedílnou součástí čistírny odpadních vod. V druhé části je popsáno půdní prostředí, tedy hydrologické vlastnosti půdy a děje probíhající v půdě.

I. LITERÁRNÍ REŠERŠE

2 KČOV

Kořenová čistírna odpadních vod je uměle vytvořený mokřad, ve kterém probíhají přirozené procesy – biologické, fyzikální a chemické. Na konci těchto procesů dochází k vyčištění odpadní vody, která se stává nezávadná a je vypouštěna do recipientu (Křeňák et Šperling 2010).

V současné době se zvýšil zájem o optimalizaci těchto přirozených procesů jako alternativu čištění odpadních vod. Kořenové čistírny jsou navrhovány a konstruovány, tak aby využívali přírodní procesy zahrnující substrát, mokřadní vegetaci a mikroorganismy (Wanko et al. 2011). Vyšší zájem obyvatel jak v České republice, tak i v zahraničí je díky nulové spotřebě energie (až na výjimky) a nenáročnosti provozu. KČOV lze použít pro různé typy odpadních vod, tj. kanalizace z domácností, obcí, nemocnic, skládek, dešťových vod (Křeňák et Šperling 2010).

2.1 Principy čištění

2.1.1 Mechanické předčištění

Mechanické předčištění je velice důležité pro správné fungování KČOV a musí být vždy zařazeno před samotnou kořenovou čistírnou. Slouží k odstraňování hrubých nečistot vyskytující se ve splaškové vodě a díky němuž nedochází k ucpání filtračního lože (Vymazal 2004).

2.1.1.1 Dešťové odlehčení

Tyto tzv. odlehčovací komory se budují na jednotlivých kanalizačních sítích. Slouží k zajištění velkých průtoků vody, které mohou vznikat například při povodních nebo přívalových deštích, kdy přebytečná voda přetéká do usazovacích nádrží. V usazovacích nádržích se usazují těžké částice a voda dále přetéká do recipientu (Hánková 2003). Kvalita odváděné vody z kanalizačních sítí do recipientu nebo nádrže, by neměla být kvalitnější než průměrná kvalita vody dešťového odtoku (Hánková 2003).

2.1.1.2 Česla

Česla jsou v principu rošty ze železné konstrukce, které slouží k zachycení velkých předmětů unášených odpadní vodou. Pro představu to mohou být větve, různé materiály z PVC či kuchyňský odpad. Odstraňování tohoto materiálu se provádí dle uvážení a míry zanesení, nejméně však dvakrát do roka. Máme dvě velikosti česel a to hrubé a jemné (Richter 2002).

2.1.1.3 Lapače

Odpadní voda je zbavena hrubých nečistot. Dále pokračuje do tzv. usazovacích nádrží, kde dochází ke zpomalení rychlosti průtoku vody. Po ustálení splaškové vody dochází k usazování jemných částic vyskytujících se ve vodě. Lapače písku mají za úkol odstranit písek ze splaškové vody v usazovacích nádržích, nikoliv organické nerozpuštěné látky (Chudoba 1991).

Lapače můžeme rozdělit dle způsobu přivádění vody: na lapače písku s horizontálním průtokem a lapače písku s vertikálním průtokem.

2.1.1.4 Lapáky tuků a olejů

Tuky a oleje odstraňujeme z důvodu nemísitelnosti s odpadní vodou a zabraňující procesů difúze kyslíku, nacházející se na hladině odpadní vody (Cammarota et al. 2006).

Princip těchto lapáků je opačný než u výše zmíněných sedimentačních nádrží. Odpadní voda se přivede ke dnu nádrže, kde po zmenšení rychlosti a vlivem následné gravitace dojde k odloučení olejů a tuků od vody. Tuk tudíž zůstává na hladině odkud je následně odebírán (Cammarota et al. 2006).

2.1.1.5 Štěrbínová nádrž

Voda, která protéká štěrbínovou nádrží má velice nízkou průtoční rychlost. Ve štěrbínové nádrži sedimentují nejmenší organické nečistoty, které se usazují v nejnižší části kalové komory. Organické nečistoty nadále anaerobně vyhnívají a tím zmenšují svůj objem. Štěrbina v nádrži je uzavřena, jinak by bubliny plynu

z vyhnívání pronikaly do sedimentačního prostoru a rozrušovaly by sedimentaci. (Kučerová et al. 2010).

2.1.2 Biologické čištění

Švehla et al. (2007) uvádí, že správná činnost mikroorganismů je důležitá pro biologické čištění odpadních vod. Biologickým čištěním jsou především odstraňovány biologicky rozložitelné látky a do určité míry dusík a fosfor.

Biologické čištění můžeme dle Pošty (2005) dělit na rozklad organického znečištění bez přítomnosti kyslíku – anaerobní proces či za přítomnosti kyslíku – aerobní proces. V kořenových čistírnách odpadních vod převládá proces anaerobní. A to z důvodu zaplavení filtračního lože vodou, tedy izolování od atmosférického kyslíku.

2.1.2.1 Anaerobní podmínky

Anaerobní rozklad je složitý proces, kde finálními produkty je metan a oxid uhličitý. V hydrolýze (1. fáze rozkladu) jsou nejprve rozloženy makromolekulární organické látky např. lipidy, proteiny, na látky nízkomolekulární. V 2. fázi, acidogeneze, jsou tyto nízkomolekulární látky dále rozloženy na jednodušší např. alkoholy, organické kyseliny. Ve 3. fázi, acedogeneze, se tyto látky oxidují na kyselinu octovou, CO₂ a H₂. V poslední 4. fázi rozkladu, metanogeneze, jsou přítomny methanogenní mikroorganismy, které rozkládají specifické látky. Tyto látky používají jako potravu např. metan, kyselinu mravenčí a CO₂ (Hlavínek 2003).

2.1.2.2 Aerobní podmínky

Při biologickém čištění odpadních vod v aerobních podmínkách je důležitá přítomnost aerobních organismů. Těmito organismy jsou bakterie, houby a plísňe. Dle Kollera et al. (1998) za přístupu molekulárního kyslíku aerobní organismy rozkládají organické látky přítomné ve vodě, za pomoci oxidačních reakcí, kde výsledkem je NH₃, CO₂ a H₂O.

Podmínka, která musí být v tomto procesu splněna je dostatečný přísun kyslíku, který je získáván v bodě styku s vodní hladinou, nebo ve vegetačním období je přítomen díky řasám při fotosyntéze (Hostětín 2001).

2.1.3 Chemické čištění

Látky, které jsou přítomné ve vodách, mohou chemicky reagovat se sloučeninami v odpadní vodě, a tím dochází k přeměně určité části na neškodné sloučeniny, které neovlivňují kvalitu vody. Příkladem jsou fosforečnany a sírany, které zejména s těžkými kovy tvoří rozpustné až nerozpustné sloučeniny. Vznikají tím dobře sedimentující sraženiny (Richter 2002).

3 TYPY KČOV POUŽÍVANÝ V ČR

3.1 Systém s podpovrchovým horizontálním průtokem

Tento systém (obr. 1) zařazujeme do umělých mokřadů s emerzní vegetací. U nás je tento pojem znám spíše pod obecným názvem kořenové čistírny odpadních vod. Poprvé v roce 1974 byl v Německu do provozu zapojen první systém tohoto druhu. Dnes je zapojeno přibližně přes 10 000 kořenových čistíren a toto číslo stále roste.

Hlavním principem fungování čištění odpadní vody spočívá v průtoku odpadní vody porézním filtračním ložem, které je osázeno především mokřadní vegetací. Jako filtrační materiál, který plní velice důležitou funkci je používáno drcené kamenivo, praný štěrk o velikosti 4-8 nebo 8-16 mm. Hrubé kamenivo se používá na výplně rozvodných a sběrných zón.

Rostliny se podílejí na čištění splaškové vody, přímým odběrem živin, ale pouze v malém množství. Jejich hlavní role tkví ve vytvoření systému, který napomáhá optimalizovat procesy, které se dále podílejí na odstraňování znečištění (Čížková et Husák 1992).

Podloží by mělo být odděleno od vegetačních polí nepropustnou bariérou nejlépe plastovou fólií z PVC popřípadě vrstvou z jílu (50 – 70 cm). Nicméně jíl se používá pouze v případě jeho výskytu na místě stavby kořenové čistírny odpadních vod.

Ve filtračním loži probíhá nitrifikace, jejíž podmínkou je dostatek kyslíku. Vzhledem k malému množství kyslíku ve filtračním loži je odstraňování amoniaku velice nízké. I přes tuto skutečnost se v KČOV odstraní okolo 40-45 % z celkového množství fosforu a dusíku ze splaškových vod z domácností. Což je srovnatelné s klasickými čistírnami (Vymazal et Dušek 2013). Kořenové čistírny vyžadují mechanické předčištění zabraňující ucpávání filtračního lože, které by vedlo k poklesu účinnosti čištění a následně k nefunkčnosti celé čistírny.

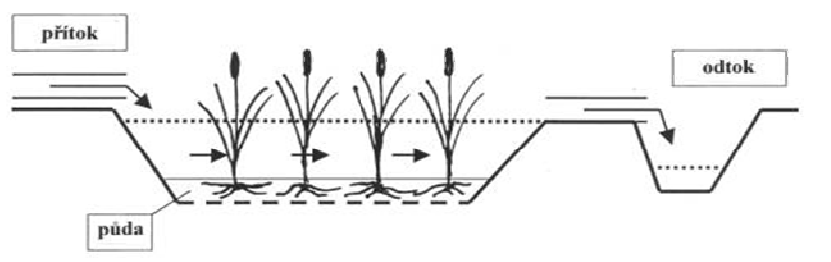
Dimenzovaná plocha KČOV se získává podle vzorce: (Vymazal et Dušek 2013).

$$A \text{ (m}^2\text{)} = [Q_d (\ln C_o - \ln C_t) / K_{BSK}$$

Kde:

- Q_d = průtok odpadní vody ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
- C_o a C_t = koncentrace BSK₅ na přítoku ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)
- K_{BSK} = rychlostní konstanta ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)

Hodnota K_{BSK} je většinou zvolena 0,1 v případě, že jsou kořenové čistírny dimenzovány pro odstranění především nerozpuštěných a organických látek. V těchto případech je vegetační plocha polí cca 5 m² na připojeného obyvatele. V případě eliminace dusíku a fosforu je potřeba zvolit nižší hodnoty $K_{(N,P)}$, čímž se ale následně zvětšuje plocha polí (Vymazal et Dušek 2013).



Obr. 1 Umělý mokřad s emergentní vegetací a povrchovým tokem (Vymazal 2001a)

3.2 Vegetace

Nejvíce využívané mokřadní rostliny v KČOV jsou rákos obecný (*Phragmites australis*), chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinaceae*), zblochan vodní (*Glyceria maxima*) a v neposlední řadě různé druhy orobinců (*Typha spp.*) (Vymazal et Dušek 2013).

Kořenové čistírny se nejčastěji osazují rákosem obecným (*Phragmites australis*), který snáší větší míru znečištění. Velmi často je vysazován společně s chrasticí rákosovitou (*Phalaris arundinaceae*), která je schopna růst rychleji než samotný rákos a už během prvního vegetačního období zajistí kompaktní porost

kořenových polí. Pro osázení domovních čistíren lze použít na kořenové pole i orobinec (*Typha spp.*) či kosatce (*Iris spp.*) plní funkci čistící a zároveň estetickou.

Rostliny se přímo vysazují do štěrkového lože a to přibližně v hustotě 4 – 8 rostlin na 1 m². Vodní hladina v kořenových polích by se měla po vysázení rostlin udržovat při povrchu lože popřípadě těsně nad povrchem do doby, než rostliny pevně zakoření (Vymazal 2004).

Mokřadní rostliny mají důležité funkce, některé jsou nepřímého charakteru.

Rostliny z oblasti mírného pásu akumulují živiny do nadzemní části biomasy z odpadní vody, které tvoří pouze 5 – 10 % z celkového odstranění množství živin a to v závislosti na druhu použité vegetace a míry znečištění odpadní vody. Dle Duška (1997) jde výjimečně zaznamenat i vyšší množství akumulovaných živin rostlinami.

Živiny akumulované rostlinami se odstraňují kosením. Maximální množství živin, které můžeme odstranit kosením je v období nejvyšší biomasy. V tomto období je kosení velice problematické. Důvodem je možné oslabení rostlin a tím omezení tvorby zásobních látek a následného vyčerpání rostlin nebo také může dojít k mechanickým poškozením. Proto se doporučuje biomasa rákosu či jiných mokřadních rostlin kosit hlavně v době vegetačního klidu jednou za 2 až 3 roky (Dušek et Květ 2001). V tomto období je koncentrace živin nižší než v období vegetace a tudíž i množství skutečně odstraněných živin podstatně menší. Naopak studie Vymazala et Dušek (2013) uvádí například u chrastice rákosovité (*Phalaris arundinacea*), že kosení v období vegetace má pozitivní účinek. A to z důvodu rychlého obrůstání, kde nové výhonky rychle zaplňují volné porosty ve vegetačních polích.

V našich klimatických podmínkách je jedna z nejdůležitějších funkcí vegetace zateplování povrchu filtračního pole během zimního období. Doporučuje se posečenou biomasu zanechat na vegetačním poli do konce zimy, kvůli zateplení filtračního pole. Počátkem jara je dobré biomasu odebrat z důvodu možné nadměrné akumulace organické hmoty. Samozřejmě je možnost zateplit kořenové pole zvednutím hladiny vodního sloupce, kde při minusových teplotách vzniká led sloužící jako tepelná izolace (Rozkošný et Prokešová 2004).

Oproti mírnému pásu se v tropických a subtropických oblastech doporučuje pravidelné sklízení biomasy. Neboť zde rostliny rostou po celý rok (Okurut 2001).

Další důležitou funkcí vegetace je také poskytování podkladu (kořeny a oddenky) pro přisedlé mikroorganismy, které se ve volné půdě nevyskytují. Tyto

organismy využívají kyslík přiváděný kořeny rostlin a podílejí se na aerobních procesech.

Rostliny jsou fyziologicky a morfologicky přizpůsobeny právě k transportu kyslíku z atmosféry do podzemní části, aby mohly dýchat (respirovat). Vymazal (2004) uvádí, že kyslík, který není rostlinami zcela spotřebován, difunduje do okolí kořenů a vytváří tak vhodné podmínky pro aerobní procesy.

Hlavní funkce vegetace podle Vymazala et Duška (2013).

- Zateplování vegetačních polí v zimních období
- Vytvoření vhodných podmínek k životaschopnost mikroorganismů (houby, prvoci, bakterie), které mají zásluhu na čistícím procesu v kořenových zónách
- Stálý přísun kyslíku v kořenové zóně a vytvoření aerobních podmínek v blízkosti kořenů
- Ochrana vegetačního pole před erozí
- Estetická funkce

3.2.1 Rákos obecný (*Phragmites australis*)

Jednoděložná bylina trávovitého vzhledu, dorůstající výšky 2 - 4 m, vytvářející plazivé nadzemní výběžky a květy jsou seskupené do složitých květenství (rozkladitá lata). Doba květu je srpen – říjen. Opylení větrné. Pevné a silné stonky jsou schopny odolávat i silným nárazům větru (Chytrý 2011).

Rákos obecný (obr 2.) se přirozeně vyskytuje v mělkých stojatých či mírně tekoucích vodách. Roste ve vodě o hloubce 1 m a při poklesu hladiny může dlouhodoběji přetrvat i v terestrických podmínkách. Pokles vodní hladiny je významný v hromadném klíčení semen na mělce zaplavovaném substrátu, díky čemuž dochází ke generativnímu obnovování porostů (Chytrý 2011)



Obr.2 Rákos obecný (*Phragmites australis*), foto Ondřej Zícha (2013)

3.2.2 Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*)

Chrastice rákosovitá (obr. 3) je vytrvalá, tmavozelená mohutná rostlina dorůstající 0,5 – 2 m. Květenství jsou načervenalá v latách. Doba květu je květen - srpen (Dostál et al. 1989).

Růst chrastice je velice rychlý a má schopnost rychle obrůst a tím patří k nejvýnosnějším travinám. Má mohutný kořenový systém a šíří se také vegetativně pomocí plazivých oddenků (Weber 2003)



Obr. 3 Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*), foto Zbyněk Sovík (2013)

3.2.3 Orobinec úzkolistý (*Typha angustifolia*)

Chytrý (2011) uvádí, že orobinec úzkolistý (obr.4) je štíhlý, tmavozelený 2 - 3,5 m vysoký. Květenství je tvořeno z jednopohlavních květů, které jsou uspořádaná do dvou válcovitých palic. V horní části jsou samčí květy a v dolní části se nacházejí samičí květy. Doba květu červenec – srpen. Přirozeně se vyskytuje na pobřeží rybníků, mrtvých říčních ramenech a říčních tišinách v hloubce vody v rozmezí 0,2 – 0,6 m.



Obr. 4 Orobinec úzkolistý (*Typha angustifolia*), foto Zbyněk Sovík (2013)

4 TECHNICKÉ PARAMETRY

4.1 Filtrační lože

Filtrační lože by mělo být hluboké přibližně od 0,6 až 0,8 m. Substrát by měl být dostatečně propustný, aby nedošlo k ucpání. Hloubka filtračního lože by měla být přizpůsobena ke konkrétním rostlinám, které se budou vysazovat na KČOV, tak aby bylo umožněno prokořenění rostlin celým filtračním ložem, aby kyslík z podzemní části rostlin zajistil aerobní prostředí v celém loži. Doporučená hloubka filtračního lože je 0,6 m a je to kvůli nejpoužívanější rostlině, rákosu obecném (*Phragmites australis*), ale tolerance je až do 1m hloubky. Povrch filtračního lože se doporučuje 0,5 m pod úroveň okolního terénu a to z důvodu z přírůstkem vrstvy zelené biomasy o výšce 2,7 cm za rok (Vymazal 1995).

V kořenových čistírnách odpadní vod, které byly postaveny v letech 70. až 80. 20. století se používaly těžké jílovité zeminy, které měly dobrý filtrační a čistící účinek. Při použití těchto zemin docházelo k rychlému ucpání a k podpovrchovému odtoku. Vliv na funkci čištění splaškových vod tento defekt neměl, ale měl velké následky ohledně hygieny, například nepříjemný zápach a také špatné udržování v zimních měsících (Vymazal 2004).

V dnešní době je velmi oblíben praný štěrk o zrnitosti 4-8 nebo 8-16 mm anebo se využívá drcené kamenivo (Vymazal 2004). Pro výstavbu filtračního lože je vhodné použít jednu frakci. V případě namíchání frakcí může dojít ke špatnému promísení vedoucí k vytváření zkratových proudů ve filtračním loži.

Další důležitým úkonem je použitý materiál zbavit nečistot tj. prachu a zeminy. Sběrné a rozvodné zóny by měly být vyplněny nejlépe hrubým kamenivem (5 – 20 cm) kvůli dobrému rozlité odpadní vody po celém profilu nátokové hrany (Kouřil 2006).

Filtrační lože musí být bezprostředně odděleno od podloží nerozpustnou vrstvou. Velice často se používá plastová fólie (PVC,PE), aby nedocházelo k průsaku do podloží a tím nedocházelo k znehodnocování podzemní vody. Zároveň se plastová fólie chrání před protržením pomocí geotextílie. V případě podloží, které je málo propustné tj. jíly s hydraulickou vodivostí $< 10^{-8}$ m/s, není zcela nutné používat další izolaci (Vymazal 2004, Kouřil 2006).

4.2 Přivádění vody

Vymazal (2004) uvádí, že přibližně od poloviny 80. let je mechanicky předčištěná SV přiváděna přímo do rozvodné zóny, která je vyplněna hrubším kamením. Pro rozvod vody se používaly trubky s velkými otvory z PVC, tyto otvory sloužily jako ochrana proti ucpání. Rozvodné trubky můžeme uložit na 2 způsoby:

- nad úrovní povrchu filtračního pole, kde jsou rozvodné trubky převrstveny hrubým kamenivem
- pod úrovní povrchu filtračního pole, ale povrch rozvodné zóny zůstává ve stejné úrovni jako povrch filtračního pole

Sběrné potrubí musí být uloženo na dně filtračního lože a spojeno s výpustným mechanismem v odtokové šachtě. Tímto výpustným mechanismem se dá nastavovat výška vodního sloupce ve filtračním loži. V minulosti se používala tzv. železná otočná kolena, jejichž nevýhoda byla v rychlé korozi, čímž se manipulace s nimi stávala velice obtížná. Postupem času byla tato železná kolena nahrazena za plastová, nicméně ani ta se neosvědčila. V dnešní době se používají hadice zavěšené na řetězech. S nimi je manipulace velice jednoduchá a snadno docílíme přesného nastavení výšky vodní hladiny. V běžném provozu se udržuje vodní hladina ve výšce mezi 5 až 10 cm pod povrchem filtračního lože (Vymazal 2004, Kouřil 2006).

4.3 Údržba a provoz

Pelikán (2013) upozorňuje na to, že navrhnout a postavit dobře fungující kořenovou čistírnu odpadních vod, není složité, ale je zapotřebí řada schopných projektantů i stavebních firem, jejichž stavby se osvědčily v provozu, již několik desítek let. Nicméně největším problémem KČOV je provoz.

KČOV nevyžaduje žádný přísun elektrické energie a neobsahuje ani žádné součásti, které se časem opotřebovávají. Fungují převážně na principech gravitace (Šperling et Kršňák 2010).

Tato skutečnost svádí k domněnce, že KČOV je bezobslužná, ale to v žádném případě není pravda. Pravidelnou kontrolu vlastního kořenové pole tak i šterbinové nádrže popřípadě septiku.

Zanášení kořenového filtru je přirozený jev, ke kterému dochází během provozu KČOV. Orientačním výpočtem se prokázalo, že k zakolmatování (ucpání) celého kořenového filtru dochází v rozmezí až po 30 – 40 letech. V některých případech k tomu dochází i dříve. Při výměně kořenového filtru lze kamenivo z kořenových polí přeprat a dále použít nebo použít zcela nové kamenivo. Použité kamenivo lze uložit do běžného zásypu nejedná se o nebezpečný opad. Toto bylo prokázáno u 8 měření prováděných u náhodně vybraných starých kořenových filtrů. Zanášení je přirozený jev a tudíž z toho vyplývá, že filtr funguje, jak má.. Doba kolmatace se odvíjí od zatížení KČOV a správného navržení a funkčnosti mechanického předčištění (Šperling et Kršňák 2010).

Podle stupně zanesení čistíme česla a lapáky písku. V neposlední řadě nesmíme opomenout kontrolu výšky vodní hladiny, kterou korigujeme hadicemi připevněnými na řetězech, ve vlastních kořenových ložích. Pokud je údržba vedena pravidelně a systematicky je časově nenáročná (Vymazal 2004, Vymazal 2008, Kouřil 2006).

5 ÚČINNOST ČIŠTĚNÍ

5.1 Organické látky

Organické látky jsou v kořenových čistírnách odstraňovány převážně pomocí mikrobiálního rozkladu.

Mikrobiální rozklad organických látek probíhá jak za aerobních procesů, tak za anaerobních procesů. Původně se předpokládalo, že převažují aerobní procesy. A to za předpokladu, že difundující kyslík z oddenků a kořenů rostlin provzdušňuje celé filtrační lože. Nicméně bylo prokázáno, že difundující kyslík se zdržuje v těsné blízkosti podzemních orgánů rostlin. Z toho plyne, že zbytek filtračního lože zůstává anaerobní nebo anoxický a tedy že aerobní procesy ve filtračním loži převažují.

Vymazal (2004) uvádí, že jsou organické látky odstraňovány velmi efektivně. Stanovení množství odstraněných organických látek se provádí tzv. biologickou spotřebou kyslíku za 5 dní (BSK_5), anebo chemickou spotřebou kyslíku prováděnou dichromanovou metodou ($CHSK_5$).

Zimní období nemá vliv na účinnost KČOV v odstraňování organických látek. Průměrné povrchové zatížení filtračních polí kořenových čistíren v České Republice je přibližně $41,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1} BSK_5$ a $99 \text{ kg CHSK}_{Cr} \text{ ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Vymazal2009).

5.2 Nerozpuštěné látky

V kořenových polích dochází k odstraňování nerozpuštěných látek (NL) velice efektivně a to za pomoci filtrace a sedimentace.

Velké množství nerozpuštěných látek je zadrženo v prvních metrech kořenového filtru. To může vést k ucpání lože a následného povrchového odtoku a to především při nedokonalém předčištění. Provozní zkušenosti prokazují, že pokud dojde k ucpání lože a odtoku, jedná se většinou o úzký pruh, který lze snadno a finančně nenáročně vyměnit. Průměrné zatížení NL filtračních polí v kořenových čistírnách odpadních vod v ČR je $40,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Vymazal et Kröpfelová 2009)

5.3 Dusík

Kořenové čistírny odpadních vod nejsou zcela efektivní při odstraňování dusíku jako výše zmiňované látky. Důvodem je nedostatečné množství kyslíku ve filtračním loži, což je přirozený jev u všech mokřadů (Králová 2010). Menší množství kyslíku limituje oxidaci amoniaku (nitrifikace), který je hlavní formou dusíku v odpadních vodách. K tomu organicky vázaný dusík je přeměňován na amoniak (amonifikace) za podmínek anaerobních i aerobních a tím se zvyšuje koncentrace amoniaku v systému.

Proces nitrifikace amoniaku probíhá v úzké blízkosti kořenů, ze kterých difunduje kyslík a vzniklé dusičnany jsou efektivně přeměňovány v anoxických a anaerobních částech filtračního lože na plynné formy dusíku (denitrifikace), které následně unikají do atmosféry. Množství oxidovaného amoniaku na dusičnany, dostupného pro denitrifikaci pomocí bakterií, je velice málo. V případech, kdy je dán požadavek na větší eliminaci amoniaku, se kombinují čistírny s předraženými umělými mokřady s vertikálním průtokem, u kterých dochází k větší nitrifikaci (Vymazal 2004, Vymazal 2009).

- **Nitrifikace**

Proces probíhající ve 2. fázích. V 1. fázi se amoniakální dusík oxiduje na dusitany (NH_4^+ a NO_2^-) za pomoci bakterií z rodu *Nitrosococcus*, *Nitrospira* → nitritace. Ve 2. fázi jsou tyto dusitany oxidovány na dusičnany (NO_3^-) mikroorganismy z rodu *Nitrocistis* → nitratice (Tuček et al. 1988).

- **Denitrifikace**

Je proces opačný nitrifikaci, zde jde o reakci dusičnanů a dusitanů na plynný dusík popřípadě oxid dusný. Takto redukováný dusík využívají mikroorganismy (Vítěž et Groba 2008).

5.4 Fosfor

V KČOV je fosfor odstraňován především adsorpcí a srážením ve filtračním loži, popřípadě absorpcí. Proto je důležité odklízet nadzemní části biomasy. Běžně používané materiály využívané pro filtraci v kořenových polích, jsou kačírek, drcené

kamenivo a štěrk. Tyto materiály mají velmi malou sorpční kapacitu a tudíž odstraňování fosforu je velice nízké. Pro vyšší schopnost odstraňovat fosfor v KČOV se dá použít materiál s vyšším sorpčním indexem jako je například kalcit.

Vymazal (2004) uvádí, že nejvíce fosforu (90 %) je zadrženo v sedimentu a v podzemní části rostlin. V nadzemní části rostlin je minimální množství fosforu (10%), přičemž v listech a ve stoncích je jen mírné zvýšení fosforu oproti vegetaci na přirozených lokalitách.

Nepostradatelnou složkou, která ovlivňuje zadržení fosforu v KČOV je přítomnost nerozpuštěného kyslíku ve filtračním loži, koncentrace organických látek dusičnanů, železe a manganu (Vymazal 2004).

5.5 Těžké kovy

Dle Vymazala (2004), těžké kovy nejsou výrazným problémem v odpadních vodách z malých sídel. Z údajů, vyplývá, že těžké kovy (TK) jsou v KČOV eliminovány z 80%. Míra eliminace silně kolísá mezi jednotlivými těžkými kovy.

5.6 Bakteriální znečištění

Ve většině KČOV je odstraňování koliformních a termotolerantních koliformních bakterií větší > 99% při čištění městských a domovních splaškových vod, a redukce fekálních streptokoků je > 95%. Tyto druhy bakterií představují mikrobiální znečištění.

Vymazal ve svých publikacích (2004,2009) uvádí, že v kořenových čistírnách odpadních vod je mikrobiální znečištění velmi dobře zadržováno pomocí fyzikálních, biologických a chemických procesů. Podíl jednotlivých procesů nelze zcela přesně určit, ale předpokládá se, že největší podíl má přirozený úhyn (vzhledem k době zdržení několika dní), poté oxidace (enterické bakterie jsou většinou striktně anaerobní), působení antibakteriálních látek, které vylučují kořeny mokřadních rostlin a sedimentace.

6 PORÉZNÍ PROSTŘEDÍ

Porézní prostředí je soustava poskládaných a navzájem propojených malých otvorů a propustí (pórů) různých velikostí v pevné fázi. Póry bývají většinou otevřené pro volný pohyb kapaliny nebo plyny. Důležité je, aby jejich rozměry nepřesahovaly takovou velikost, u které by už přestala působit kapilární síla. Kapilární síly působící na kapalinu ovlivňují proudění právě tímto prostředím a do jisté míry určují její prostorové rozložení. Vzhledem ke složitosti porézního prostředí nelze přesně určit, kde se vyskytují přímo konkrétní póry a jakou mají velikost. Tudíž se každé zkoumané prostředí považuje za jeden celek, ve kterém je určité zastoupení míst nevyplněných pevnou fází a ve kterém je určité rozdělení pórů různé velikosti Císlerová et Vogel (1998).

Při určení poměru plynu a kapaliny ku pevné fázi se zavádí pórovitost n

$$n = \frac{V_p}{V_n} \quad (1)$$

kde:

V_p - objem pórů

V_n - celkový objem.

Bear (1972) uvádí, že při proudění podzemní vody se neúčastní všechny póry. Například voda, která je v prostředí zcela uzavřena. Některé póry svým tvarem pohyb vody nedovolují (tzv. slepé póry). Proto využíváme tzv. efektivní pórovitost (níže popsána).

Císlerová et Vogel (1998) ještě doplňují, že k popisu porézního prostředí vzhledem k proudění vody je zapotřebí definovat hydrogeologické charakteristiky, například zrnitostní složení, pórovitost, permeabilita a hydraulická vodivost.

Efektivní pórovitost

Efektivní pórovitost vyjadřuje zastoupení pórů vzájemně propojených a účastnících se při proudění. (Bear 1972).

$$V_e + V_{ne} = V_p \quad (2)$$

Kde V_e je objem efektivních pórů, V_{ne} je objem pórů, které se neúčastí proudění

Se stoupající velikostí zrna většinou pórovitost klesá, ale naopak efektivní pórovitost roste (Tourková 1996).

Aktivní pórovitost

Aktivní pórovitost je oblast pórovitosti, z které vytéká nebo do které vtéká voda při kolísání hladiny podzemní vody.

$$n_a = \frac{V_{pa}}{V} \quad (3)$$

V_{pa} - objem vody, která vyteče z pórů pouze za pomoci gravitačních sil (Pruška 2015).

Objemová vlhkost

Množství vody vyskytující se ve vzorku k objemu porézního prostředí

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (4)$$

kde:

θ - objemová vlhkost

V_w - objem vody

V_t - objem neporušeného vzorku porézního prostředí

Hmotnostní vlhkost

Poměr hmotnosti vody ve vzorku k hmotnosti pevné fáze (hmotnost už vysušeného vzorku) se nazývá hmotnostní vlhkost (Císlerová 1989).

$$W = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100\% = m - \frac{m_d}{m_d} \cdot 100\% \quad (5)$$

kde:

m - celková hmotnost vzorku

m_d - je hmotnost vysušeného vzorku

m_w - je hmotnost vody ve vzorku

Propustnost

Propustnost charakterizuje schopnost porézního prostředí propouštět kapalinu bez jakéhokoliv ohledu na vlastnosti kapalin (Císlerová 1989). Z propustnosti vychází hydraulická vodivost (viz kapitola 7.1.3)

7 NASYCENÉ PORÉZNÍ PROSTŘEDÍ

Pokud se póry zcela zaplnění vodou stává se prostředí nasyceným. Pak objemovou vlhkost můžeme definovat vztahem (Valentová 2001).

V nasyceném porézním prostředí je $V_w = V_p$, kde objemová hmotnost má stejnou hodnotu jako pórovitost. Císlerová et Vogel (1998) tvrdí, že tato hodnota se nemění ani v čase ani v prostoru, tudíž je konstantní, ale pouze v případě ze prostředí homogenní.

7.1.1 Darcyho zákon

Za pomoci makroskopických fyzikálních veličin je často pozorováno proudění vody v půdě.

Henry Darcy při svých pokusech zjistil, že hodnoty hydraulické výšky měřené piezometrem na začátku vzorku a pak na konci se liší, respektive jsou na konci nižší. Proto zavedl veličinu, dnes již obecně nazývanou, nasycenou hydraulickou vodivost, kterou budeme níže podrobně popisovat, která vyjadřovala vliv prostředí na hydraulickou výšku. Odvodil od ní lineární závislost mezi hydraulickou výškou a průtokem. Tento zákon je vztah popisující průtok kapaliny v nasyceném porézním prostředí (Jeřábek 2012).

Darcyho vzorec pro průtok:

$$Q = K_s S \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (6)$$

kde:

Q objemový průtok

K_s značí nasycenou hydraulickou vodivost, která je základním ukazatelem vést vodu v porézním prostředí.

L vzdálenost profilu

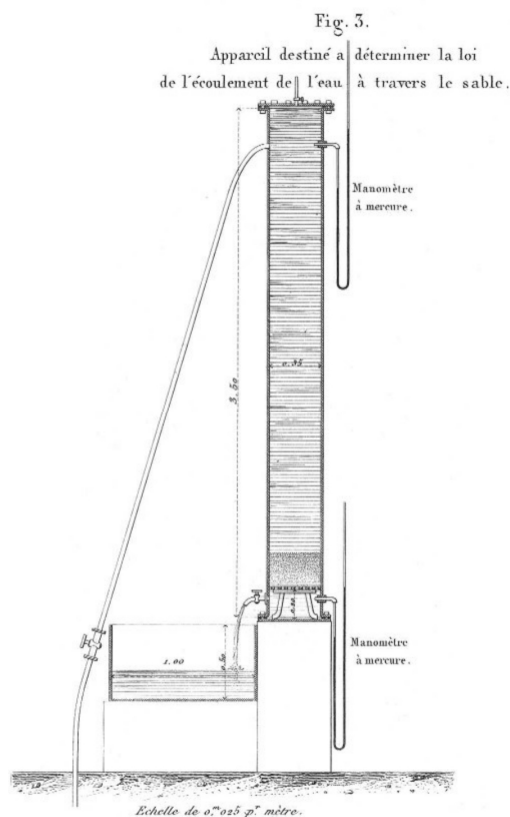
S plocha průtočného průřezu

ΔH hydraulická výška

7.1.2 Darcyho pokus

Pokus spočíval ve vytvoření aparatury (obr.5), kde byl použit válec o výšce 2,5 m s připevněnou sítí ve spodní části, která sloužila proti propadnutí písku. Ve vrchní části byl zaveden přívod vody, který umožňoval manipulaci s průtokem. Na začátku a na konci válce byl umístěn manometr, který sloužil pro odečítání hydraulické výšky. Válec byl nejprve zaplněn vodou a až poté byl do něj vkládán prosetý křemičitý písek a to z důvodu, aby se v písku nevyskytovaly vzduchové kapsy (Kutflek et al. 2004).

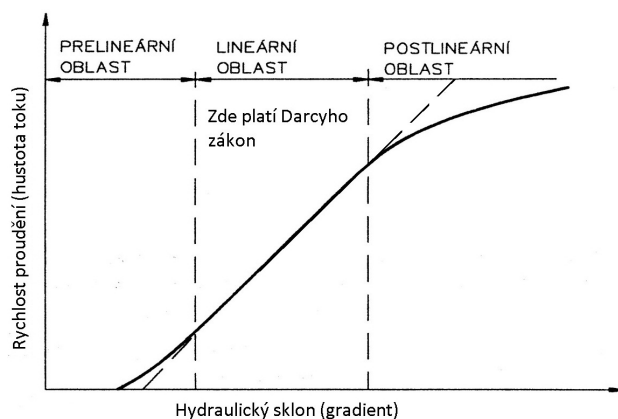
Pokus probíhal tak, že Darcy korigoval protékající vodu válcem a zapisoval hodnoty na manometru. Výsledkem bylo zjištění, že při malém objemovém toku jsou rozdíly tlakových výšek menší než při velkém. Poté, že změna toku je přímo úměrná změně hydraulických výšek. Pokusy opakoval v několika sériích po sobě a to s různými velikosti písku. Vypozoroval, že pro různé druhy písku se daný poměr mění při zachování stejného průtoku. Z toho vyvodil závěr, že pro písky stejných vlastností je objemový tok přímo úměrný tlakové výšce a zároveň nepřímo úměrný výšce vrstvy písku (Jeřábek 2012).



Obr 5. Darcyho válec pro měření objemových toků a hydraulické výšky (Darcy, 1856)

Platnost Darcyho zákona

Darcyho zákon vyjadřuje lineární závislost mezi rychlostí proudění a hydraulickým gradientem. Tato lineární závislost, ale neplatí pro všechny hodnoty hydraulického gradientu v rozmezí nuly a nekonečnem. Na níže uvedeném obrázku jsou znázorněny meze Darcyho zákona (Pavlásek et Jačka 2014).



Obr 6. Meze Darcyho zákona

Při průsaku kapaliny jemnozrnným materiálem, při nízkém hydraulickém gradientu dochází ke zpomalení někdy až k zastavení pohybu vody (nelineární oblast). Vztah mezi hydraulickým gradientem a hustotou toku není lineární a tudíž můžeme říci, že Darcyho zákon zde neplatí. Kapalina je zde vázána silnými molekulárními silami (Pavlásek et Jačka 2014).

Darcyho zákon neplatí při proudění kapaliny hrubozrnným materiálem, kde převažují síly setrvačné nad viskózními a přírůstek rychlosti proudění v závislosti na hydraulickém gradientu se oproti předpokladům zákona snižuje (poslineární oblast). Pro rozlišení mezi lineárním a poslineárním prouděním se používá Reynoldsovo číslo (Mls 1984).

Kazda (1983) uvádí, že oblast postlineární je $Re = 1$ až 20 , kde tato hodnota je mylně považovaná za rozhraní laminárního a turbulentního proudění vody v půdě. Laminární proudění se může zachovat i při daleko vyšší rychlosti, než linearita Darcyho zákona (Hálek et Švec 1973).

7.1.3 Nasycená hydraulická vodivost

V Darcyho rovnici jak již bylo uvedeno výše je K_s koeficient nazývaný nasycená hydraulická vodivost. Její hodnoty jsou závislé na vlastnostech prostředí a

na proudící kapalině. Valentová (2001) uvádí, že v izotropním prostředí ji můžeme definovat jako hustotu toku při jednotkovém hydraulickém gradientu.

Rozměr nasycené hydraulické vodivosti závisí na rozměru potenciálu, který můžeme vyjádřit několika způsoby. Jeden způsob jak vyjádřit potenciál se používá nejčastěji energie na jednotku tíhy s rozměrem L . Tudíž nasycená hydraulická vodivost má pak rozměr $L \cdot T^{-1}$ (Kutílek 1978).

Hodnoty nasycené hydraulické vodivosti ovlivňují také fyzikální vlastnosti kapalin jako je například hustota kapalin ρ ($kg \cdot m^{-3}$) a dynamická viskozita μ ($kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$). Vlastnosti půdy, které charakterizují schopnost půdního prostředí propouštět vodu, jsou velikost a tvar pórů, zrnitostní složení, pórovitost a měrný povrch (Pavlásek et Jačka 2014).

Nasycená hydraulická vodivost lze vyjádřit jako:

$$K_s = \frac{K_p \rho g}{\mu} \text{ nebo jako } K_s \frac{K_p g}{v} \quad (7)$$

kde:

g - gravitační konstanta zrychlení

v - kinetická viskozita

ρ - hustota kapaliny

μ - dynamická viskozita

K - propustnost

Propustnost závisí jen na charakteristikách porézního prostředí. Pavlásek et Jačka (2014) uvádí, že rozměr propustnosti si můžeme představit jako plochu ekvivalentního póru při proudění vody. Může se použít jednotka 1 Darcy, který představuje $1 m^2$ (Pavlásek et Jačka 2014)

$$K_p = cd^2 \quad (8)$$

kde:

c - empirický koeficient

d - představuje efektivní průměr zrna

8 NENASYCENÉ PORÉZNÍ PROSTŘEDÍ

Nenasycené proudění se v půdním prostředí vyskytuje častěji než proudění nasycené. Nenasycená půdní zóna je článkem, který propojuje nasycenou zónu podzemní vody s povrchem půdy, která je ve styku s atmosférou. Plní funkce jako je zadržení a přenos vody či živin, který je nezbytně důležitý pro existenci biosféry (Lal et Shukla 2004).

V nenasyceném porézním prostředí je objemová vlhkost nižší než hodnota pórovitosti. Z toho vyplývá fakt, že póry budou jen částečně nebo nebudou vůbec naplněny kapalinou. Hodnoty vlhkosti budou vyšší než reziduální vlhkost, tedy vlhkost, při níž v pórech neproudí žádná voda (Císlerová et Vogel 1998).

8.1.1 Nenasycená hydraulická vodivost

Nenasycená hydraulická vodivost K , je stejně závislá na propustnosti K_p půdního prostředí, tak i hustotě, viskozitě proudící kapaliny jako nasycená hydraulická vodivost K_s (Pavlásek et Jačka 2014).

Nenasycená hydraulická vodivost je závislá ještě na jedné veličině a to na vlhkosti půdy θ , popřípadě na vlhkostním potenciálu (Císlerová et Vogel 1998).

Fyzikální význam K lze vyjádřit (Kutílek et Nielsen 1994):

$$\frac{K}{K_s} = \alpha \left(\frac{\theta}{P} \right)^3 \quad (9)$$

kde:

α - empirický součinitel upravující modelový vztah na realitu půdy

θ - objemová vlhkost půdy

P - pórovitost

Tento vztah nám vyjadřuje úvahu, že při odvodnění části pórů se nám zmenšuje objem pórů, jimiž proudí voda (Pavlásek et Jačka 2014).

8.1.2 Darcy-Buckinghamuv zákon

V roce 1907 Edgar Buckingham publikoval studii, v nichž se věnuje proudění vody v půdě na základě jejího potenciálu. Nadále definuje vztahy mezi nenasycenou hydraulickou vodivostí K a vlhkostí θ . Buckingham byl fyzik, který se také zabýval termodynamikou, a proto se pokoušel nahlížet na pohyb tekutin v porézním prostředí jako na pohyb tepla (Jeřábek 2012).

Jeho pokusy spočívaly v pozorování vypařující se vody z válců naplněných půdou. Zjistil, že nejintenzivněji probíhá vypařování za předpokladu, že hladina je blízko povrchu. Při klesání hladiny podzemní vody se velice rychle snižuje rychlost vypařování (Larišová 2012).

Jeřábek (2012) uvádí, že Buckingham při svých pokusech, jednoduše implementoval lineární diferenciální rovnici Fourierova zákona o vedení tepla na proudění kapalin půdou. Tudíž poté mohl upravit Darcyho zákon tak, aby ukazoval proudění vody jak v nasyceném tak v nenasyceném prostředí. V níže vyjádřeném vzorci je místo kapilární vodivosti použita nenasycená hydraulická vodivost. Můžeme to chápat, tak že kapilární vodivost je v podstatě nenasycená hydraulická vodivost určena pouze pro proudění ve vertikálním směru. Tato diferenciální rovnice byla pojmenována podle obou vědců a to jako Darcy- Buckinghamův zákon (Valentová 2007).

$$v = - K \nabla H \quad (10)$$

kde:

v - vektor makroskopické rychlosti

∇H - gradient celkového potenciálu vyjádřeného v jednotce délky

K - nenasycená hydraulická vodivost prostředí

8.1.3 Richardsova rovnicemi

Císlerová et Vogel (1998) uvádí, že Richardsova rovnice je použitelná za zjednodušujících předpokladů. Geometrie pórovitého prostředí může být ztvárněna kapilárním modelem nehybných a nedeformovatelných pórů, tlak vzduchu v pórech by měl být neměnný a atmosférický. Proudění vzduchu zde nemá žádný vliv na proudění vody a proudící voda je nestlačitelná.

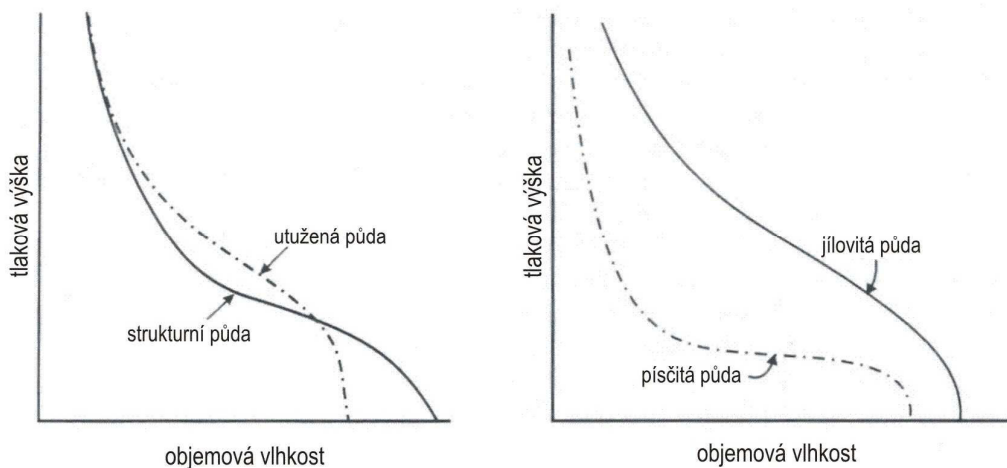
Tato rovnice je pro řešení nestacionárního proudění, která formuluje základní vztah mezi objemovou vlhkostí θ , průtokem v čase a prostoru spojením Darcy-Buckinghamova nebo Darcyho zákona a také rovnice kontinuity (Kutítek et al. 2004).

$$\nabla \cdot (K(\theta)(\nabla h + \nabla z)) = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (11)$$

9 RETENČNÍ KŘIVKA

K základním charakteristikám půdy, které popisují hydraulické vlastnosti půdního prostředí, bezpochybně patří průběh retenční čáry, která vyjadřuje závislost vlhkosti $\theta(h)$ na vlhkosním potenciálu (Trpková et Mls 2008). Retenční čára půdní vlhkosti znázorňuje množství vody, které půda zadržuje v rovnovážném stavu, tudíž pro každou půdu je specifická. Na jejich správném určení a vhodném použití závisí například výsledky modelování pohybu vody v půdním profilu (Čermák 2012).

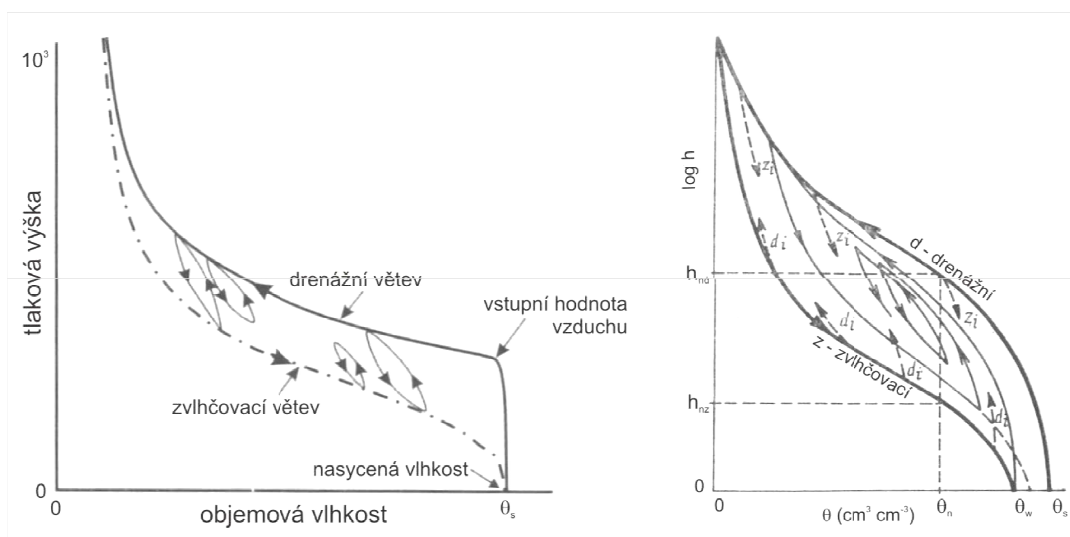
Retenční čára půdní vlhkosti nám určuje schopnost půdy zadržovat vodu při určité hodnotě vlhkosního potenciálu. Tato schopnost je závislá na několika faktorech. První důležitou složkou je poměrem jemných kapilárních pórů, poté závisí na struktuře, vlhkosti, množství humusu, zrnitostním a mineralogickém složení. Pro každý půdní vzorek by se měla stanovit vlastní retenční čára, která je unikátní pro jednotlivou půdu. Nejčastěji se zobrazuje v semilogaritmickém měřítku jako pF -křivka (Kutílek 1978).



Obr 7. Závislost retenčních čar na struktuře půdy (vlevo) a na textuře půdy (vpravo) (Hillel, 1998)

Kutílek (1978) tvrdí, že retenční křivky půdní vlhkosti jsou silně hysterezní. Průběh odvodňování plně nasycené půdy se bude lišit od průběhu postupného zvlhčování suchého vzorku. Tyto dvě krajní křivky se nazývají jako hlavní drenážní větev a hlavní zvlhčovací větev retenční křivky. Mimo jiné, kdekoli mezi nimi

mohou probíhat tzv. přechodové větve, které jsou viditelné na obr. 8, kde záleží na výchozí vlhkosti vzorku a také na směru procesu změn vlhkosti. Může nastat situace, že při opětovném zvlhčení suchého vzorku se vzorek nenasytí až do původní nasycené vlhkosti, ale bude nižší (obr 8).



Obr.8 Hystereze retenční čáry, přechodové větve mezi hlavní drenážní a hlavní zvlhčovací větví křivky. Dle Hillela (1998) vlevo a dle Kutílk (1978) vpravo.

Hystereze je způsobena především bublinky vzduchu uzavíraného ve slepých pórech, proměnlivostí pórových průřezů a rozdílným smáčecím úhlem při postupu vody na suchém povrchu půdních částic a také při ústupu vody z vlhkého povrchu (Kutílek 1978).

Šír (1990) upozorňuje, že vliv hystereze bývá velice často všeobecně opomenut.

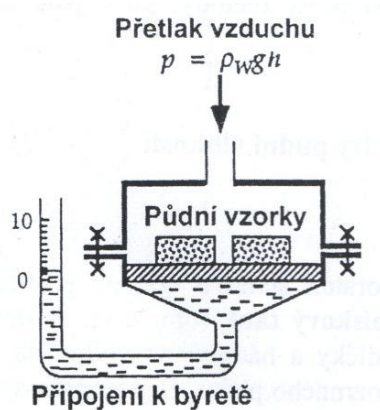
9.1 Stanovení retenční čáry

Pro stanovení pohybu vody je důležité znát hydraulické charakteristiky půdy, v našem případě šterku, kterými se budeme podrobněji zabývat v metodické části diplomové práce, tj. retenční čára půdní vlhkosti a hydraulická vodivost. Pro stanovení retenční čáry bylo vyvinuto několik terénních a laboratorních metod, při

kterých rozlišujeme odvodňovací nebo zvlhčovací větev či větev přechodovou (Kodešová 2005). Některé z těchto metod si zde podrobněji popíšeme.

Přetlakový aparát

Tento aparát se skládá z tlakové nádoby, kompresoru, polopropustné keramické membrány, regulátoru tlaku, manometru, a byrety. Kompresor vytváří přetlak vzduchu, který působí na vzorek shora, kde požadovaný přetlak nastavíme regulátorem vzduchu. Ve spodní části přístroje, který je spojený s byretou je celý zaplněný vodou až po plně nasycenou keramickou membránu. Při změnách tlaku vzduchu jsou neporušené půdní vzorky drénovány. Při každé změně tlaku zjišťujeme hodnotu objemové vlhkosti a za pomoci příslušných hodnot vynášíme body retenční čáry (Kodešová 2005).



Obr.9 Přetlakový aparát

Pískový tank

Mezi podtlakové přístroje se řadí pískový tank, který se především používá pro lehké až středně těžké půdy. Z vrstvy písku je tvořena polopropustná membrána, přičemž vodivost tohoto písku by měla být co největší (Stoklášková 2012).

Tento aparát se skládá z kontejneru, který má ve dně odvodňovací systém s vrstvou písku, který za pomoci zásobní láhve s destilovanou vodou, nasatí přibližně od 3 do 5 cm nad povrch. Před zahájením měření se hladina vody v pískovém tanku sníží pomocí přepouštěcího ventilu. Poté se jezdcem nastaví stupnice na 0,00cm tak aby hladina byla shodná s těžištěm zkoumaného vzorku. Neporušené nasycené vzorky se umístí do připraveného tanku na vrstvu písku. Vzorky by měly být v co nejlepším kontaktu s náplní v pískovém tanku. Samotné měření pak probíhá při tlaku vodního sloupce od 10 do 100 cm dle stupnice. Jezdec se poté nastaví na první požadovanou

hladinu, např. 15cm, přebytečná voda se odsává do rovnovážného stavu. Vzorky se vyjmou, zvaží a poté se pokračuje v měření při vyšším tlaku. Čím tlak bude větší, tím se bude zvyšovat čas pro dosažení rovnovážného stavu (Stoklásková 2012).



Obr.10 Pítkový tank (<http://www.kvhem.cz/vyzkum/hydropedologicka-laborator/>)

9.2 Rovnice retenční čary van Genuchten 1980

Nejčastěji používaná rovnice, která poskytuje nejlepší proložení experimentálních dat je rovnice odvozená van Genuchtenem.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} \quad (12)$$

kde:

h - absolutní hodnota tlakové výšky [cm]

θ - objemová vlhkost závislá na tlakové výšce [$cm^3 cm^{-3}$]

θ_s - nasycená vlhkost [$cm^3 cm^{-3}$]

θ_r - reziuální vlhkost [$cm^3 cm^{-3}$]

α - převrácená hodnota vstupní hodnoty vzduchu [cm^{-1}]

n, m - empirické tvarové koeficient, vztah parametrů m a n je $m=1-\frac{1}{n}$

Grafem této funkce bude křivka v esovitém tvaru. Proložení získaných bodů v závislosti vlhkosti na tlakové výšce θ dostaneme nezávislé proměnné θ_s , θ_r , α a n , kde nasycená vlhkost θ_s bude z těchto čtyř parametrů nejčastěji k dispozici (Stoklásková 2012).

9.3 Rovnice retenční čáry Brooks a Corey 1964

$$\theta(h) = \theta_s \quad \text{pro } h \geq h_v \quad (13)$$

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{h_v}{h}\right)^\lambda \quad \text{pro } h < h_v \quad (14)$$

kde:

θ - objemová vlhkost závislá na tlakové výšce (cm³cm⁻³)

θ_s - nasycená vlhkost

θ_r - reziduální vlhkost

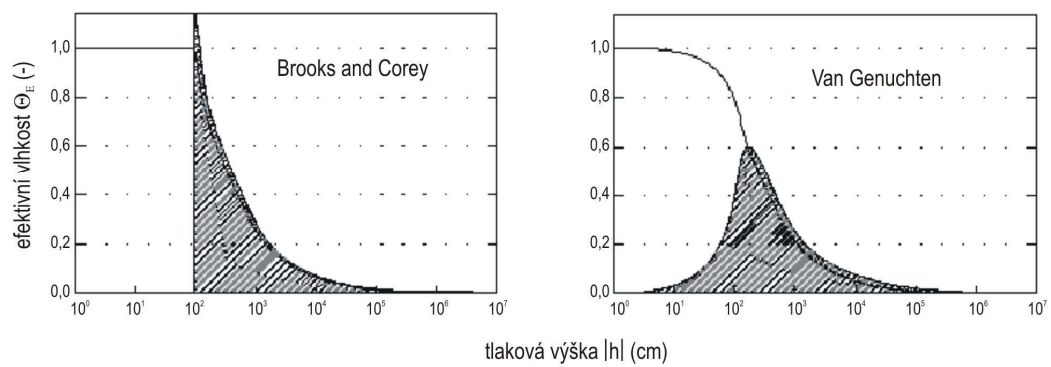
h_v - vstupní hodnota vzduchu (cm)

h - tlaková výška (cm)

λ - index rozdělení velikosti pórů

Cornelis et al. (2005) tvrdí, že diskontinuální charakter rovnice je obecně považován za nevýhodu při použití v modelech, ale nicméně je přesto tento vztah historicky jeden z nejrozšířenějších. Na rozdíl od rovnice, van Genuchtena, popisuje důležitou fyzikální charakteristiku – vstupní hodnotu vzduchu. Rozdíl mezi rovnicemi van Genuchtena a Brookse a Coryeho je viditelný na obr. 10.

Vstupní hodnota vzduchu je potenciál, při kterém se plně nasycený porézní systém začne odvodňovat a poté je voda v pórech nahrazena vzduchem. Parametr h_v se bude vztahovat k nejvyšší možné velikosti pórů, které formulují souvislou síť tokových kanálků v půdě (Kutílek et Nielson 1994).



Obr.10 Rozdíl v grafu retenčních čar dle Brookce a Coryeho a dle van Genuchtena. (Kutflek et Nielson 1994)

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

10 ZÁMĚR PROJEKTU

Projekt byl zaměřen na analýzu komplexu laboratorních zkoušek, které byly zaměřeny na vliv kořenového systému rákosu obecného na štěrku. Byly stanoveny retenční křivky pomocí modifikovaného pískového válce a na zjištění hydraulické vodivosti. Heterogenity v kořenových čistírnách odpadních vod, které jsou podmíněny nehomogenitou kořenového systému v horizontálním a to i ve vertikálním směru, zásadně ovlivňují transformační procesy spojené s čistícím efektem.

10.1 Řešení problematiky v současné době

Při projektování a provozu KČOV se zpravidla vychází z použití jednoduchých řešení pro výpočet doby zdržení vody v KČOV a také z empirických vztahů. Postupně přibývá počet prací, které se snaží spojit klasické migrační zkoušky s využitím vybraných stopovacích látek a částečně i metod matematického modelování. Jako příklady si můžeme uvést práci Yuan-Chun et al. (2011), kde byl použit stopovač nanoželeza pro studium transportních procesů. Hydraulickou vodivostí se také zabývali Yu-Chen et al. (2003), která jako stopovač použila bromid a rhodamit. Tyto uvedené práce se zabývaly pouze hydraulikou KČOV, mezi poslední práce si můžeme uvést pokus, kde byl využit fyzikální model ke srovnání matematického modelu za pomoci programu Hydrus. Kalibrované matematické modely lze následně využít pro konstrukci kořenové čistírny odpadních vod s vyšší účinností. Dle Maloszewskiho (2006) se musí u tohoto modelu vzít v úvahu především skutečné parametry, které se vyskytují v průběhu doby provozu čistírny, kdy je odpadní voda v objektu.

10.2 Údaje o projektu

Předpokládané financování této diplomové práce mělo být z interního grantu FŽP: Vývoje hydraulických a migračních charakteristik KČOV, který ale nebyl podpořen.

Náklady na tento projekt byly vysoké. Přislíbení finančních prostředků poskytnula katedra KVHEM, která umožnila za malý finanční obnos nakoupit

nejnutnější komponenty. Z důvodu finanční tísně bylo nutné omezit plánovaný rozsah pokusných válců.

Skutečný harmonogram:

<i>zahájení</i>	<i>Název etapy</i>
<i>Leden 2015</i>	Vybudování modelů
<i>Únor – Duben 2015</i>	Intenzivní měření
<i>Únor 2015</i>	Měření bez rostlin
<i>Březen – Duben 2015</i>	Měření s rostlinami
<i>Duben 2015</i>	Zpracování výsledků

10.2.1 Metodika

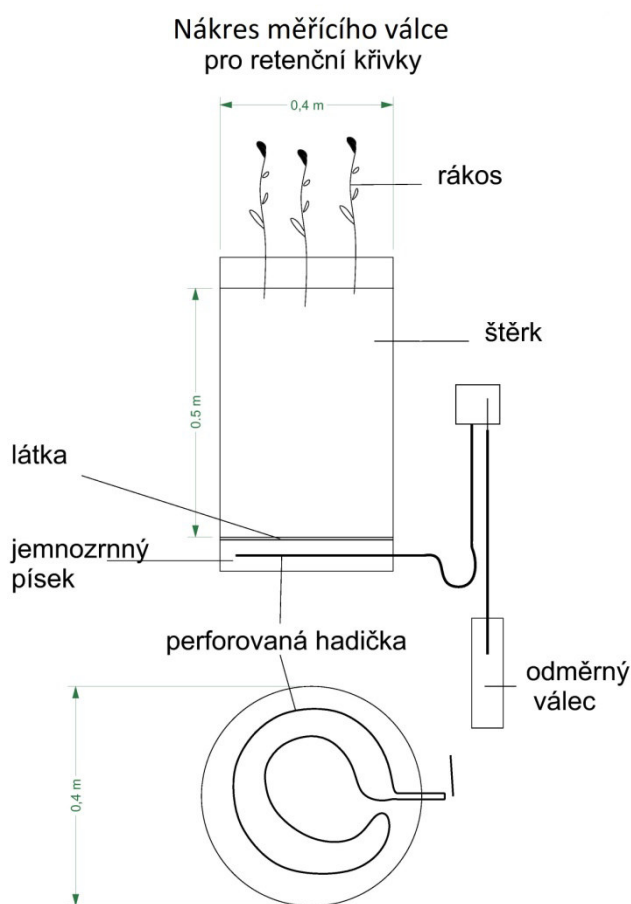
Pro simulaci vývoje prostředí v kořenových čistírnách odpadních vod byly založeny dva pokusy na štěrkovém podloží, kde byla sledována nasycená hydraulická vodivost a retenční čáry. S následujícím stářím rákosu byly stanoveny hodnoty nasycené hydraulické vodivosti na základě Darcyho zákona a parametry retenčních čar a na drenážní pórovitosti, který fungoval na principu podtlakového aparátu.

Měřicí válce:

Na pokusy se zkonstruovaly dva válce (obr.11) . Použili se běžné odpadní potrubí se záslepkou, které jsou 46 cm vysoké a jejich průměr je 29 cm. Ve výšce 2 cm ode dna se vyvrtaly 2 otvory, které posloužily jako pro vývod hadice. Tato hadice byla přibližně 2,5 m dlouhá o vnitřním průměru 1cm a po 1cm (obr.12) byla provrtávaná z dvou stran, tím vznikla perforovaná hadice, která odvádí vodu z válců. Tato perforovaná hadice byla omotána látkou (obr.13), aby nedošlo k proniknutí jemnozrnného písku do hadice a tím k jejímu ucpání. Hadice se vložila na dno válce a postupně se zasypávala pískem o velikosti zrna 0-0,5 mm (obr.14). Konce hadic se vyvedly z už připravených otvorů. Mocnost písku v modelových válcích je 5cm. Navrch písku se vložil l. látkové plátno, které posloužilo k oddělení písku od štěrku (obr.15). Poté se na tuto vrstvu štěrku nasypalo 38 kg štěrku o velikosti zrna od 1,2 – 3cm.

Na těchto dvou modelech se nejprve provádělo několik měření, kde se zjišťovala hydraulickou vodivost a retenční čáry. Poté se zasadil do těchto dvou

modelů rákos obecný. V každém modelu je jedna a půl sazenice již zmiňovaného rákosu obecného (obr.16), kde se sleduje vliv kořenového systému na zmiňovaných parametrech.



Obr. 11 nákres původního měřicího válce (Hušek 2014)

Sledované parametry:

Hydraulická vodivost se stanovila pomocí Darcyho experimentu. Měření probíhalo na obou válcích a to tak, že se stopoval čas, za který proteče námi stanovený objem vody (16 l), kde byla po celou dobu měření zachována výška vodního sloupce. Dle získaných hodnot z měření se výsledná hydraulická vodivost vypočítala dle vzorce.

$$Q = \frac{S \cdot (h_1 - h_3)}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}} \quad (15)$$

Retenční vlastnosti štěrku se stanovily za pomoci vytvořených měřících válců. Ve spodní části válce se umístila porézní hadici, která byla zasypána porézním médiem s malými póry a tudíž vysokou vstupní hodnotou vzduchu, systém byl plně nasycen vodou (z vodovodního řádu) a byl připojen na zdroj podtlaku. Ten se vytvářel pomocí gravitačně spojených nádob. Tento zdroj podtlaku je stabilní a regulovatelný. Po usazení štěrku v měřících válcích se vzorek začal odvodňovat. Poté vážením zjišťujeme objemovou vlhkost a určujeme tlakovou výšku. Tyto údaje určují jeden bod na retenční čáře, proto se na válci vytvořilo 6bodů. Body jsou od sebe vzdálené po 5cm. Opakováním postupu pro sérii různých tlakových výšek získáváme retenční čáru, přičemž tato hodnota se mění v čase a objemu vody, který proteče, v důsledku vlivu kořenového systému rákosu obecného. Výsledkem tudíž je jedna retenční čára za jedno měření (Hušek 2014).

11 VÝSLEDKY

11.1 Hydraulická vodivost

Hydraulická vodivost se měřila na obou modelech, kde nebyl zasazen rákos obecný. Na výpočet hydraulické vodivosti se použil vzorec (15) podle ústního sdělení J. Pavláška (2015).

Výsledek hydraulické vodivosti šterku je $2,08 \cdot 10^{-4}$ [m.s⁻¹]. Odvození celého vzorce a hodnoty příslušných veličin, lze vyhledat v příloze 15.3.

11.1.1 Hmotnost modelů

Následující tabulka (Tab. 1) uvádí naměřené hodnoty vah jednotlivých modelů. Při prvním měření se z modelu vypustila voda a následující den se tyto modely zvážily a jejich váha se zaznamenala k datu měření 18.3. 2015. V tento den byl zasazen rákos obecný do obou modelů.

	<i>model 1</i>	<i>model 2</i>
<i>datum měření</i>	<i>váha [kg]</i>	<i>váha [kg]</i>
17.3.2015	49,9	48,6
18.3.2015	49,5	48,2
23.3.2015	49,6	48,8
3.4.2015	49,6	49,9
8.4.2015	49,7	49,8

Tab.1 naměřené hmotnosti modelů

11.2 Retenční vlastnosti

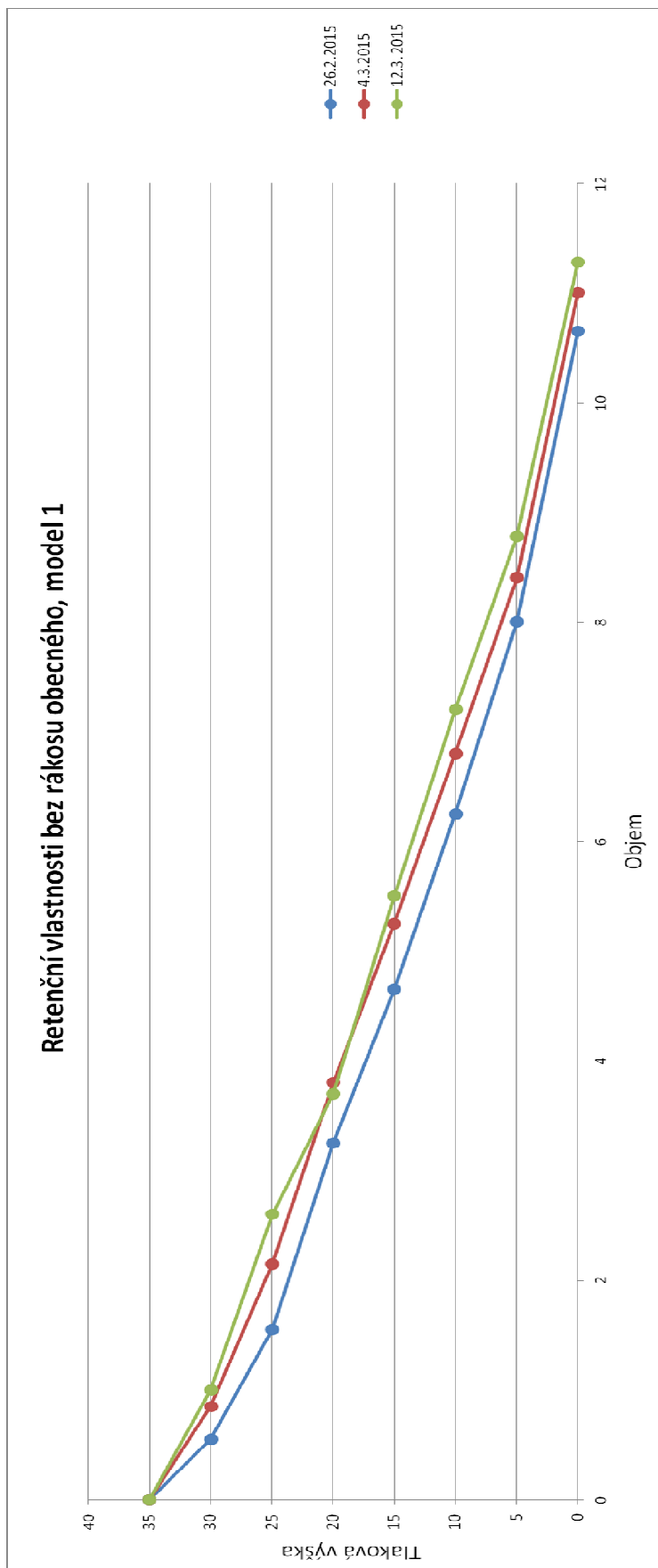
Zde se zjišťovali retenční vlastnosti šterku. Nejprve se provedly 3 měření na každém sudu bez zasazeného rákosu obecného a poté 14 měření již se zasazeným rákosem. Zaznamenávali se tlakové výšky, které se snižovaly postupně po 5 cm, a na každou jednotlivou tlakovou výšku se zaznamenal objem (l) vyteklé vody.

Grafy (3-8) pro jednotlivé měření bez osázení rákosem obecným, najdeme v příloze v kapitole 15.2.1. a grafy (9-32) z měření s rákosem nalezneme v kapitole 15.2.2.

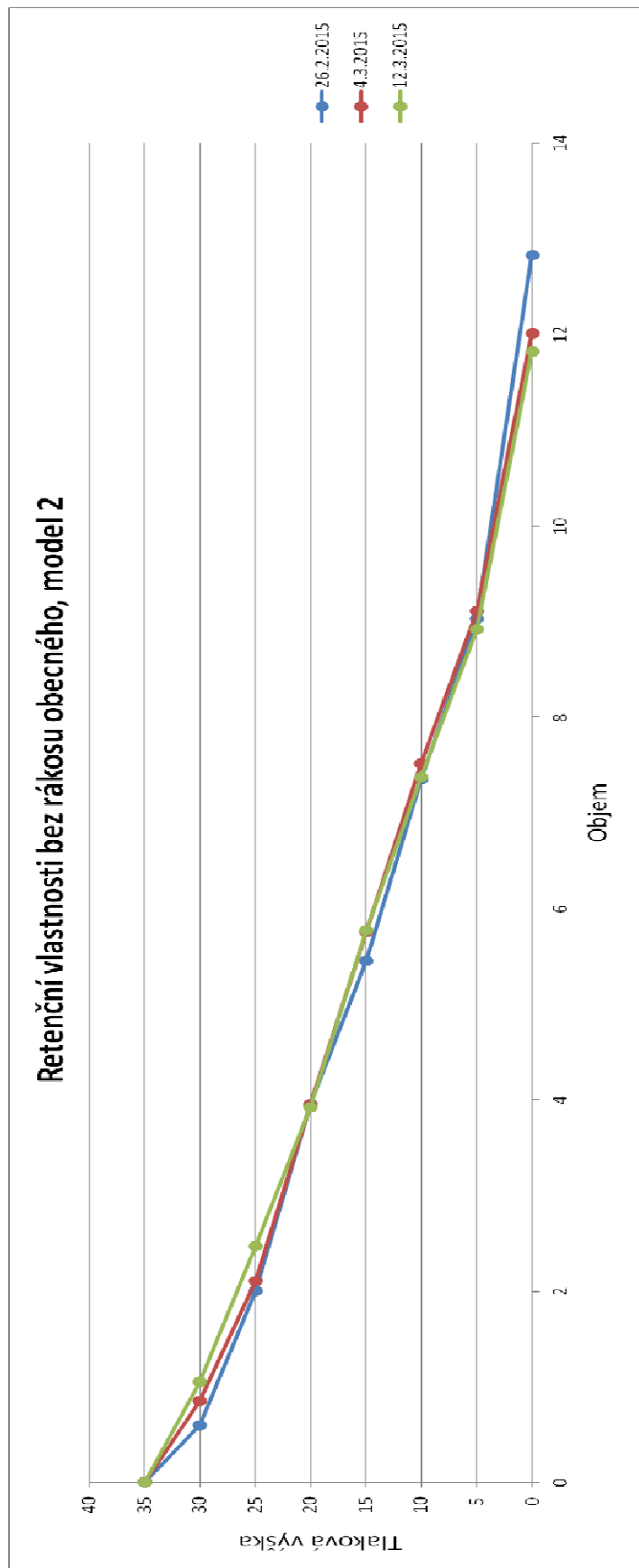
v příloze. Zde na grafu 1 jsou znázorněny všechny 3 měření, které byly zaznamenány na sudu 1 a na grafu 2 jsou měření ze sudu 2.

Z grafu 1 i 2 lze vyčíst úbytek vody na jednotlivé tlakové výšky. U obou grafů vidíme nepatrné rozdíly vzhledem k datu měření, kde větší variabilita se projevila u grafu 1.

Grafy 33 a 34 znázorňují vliv kořenového systému na vlastnosti štěrku ve vybraném období tj. po týdenním opakování. Z obou grafů, je viditelné, že vliv kořenového systému na štěrk v prvním měsíci růstu rákosu obecného, je nepatrný.

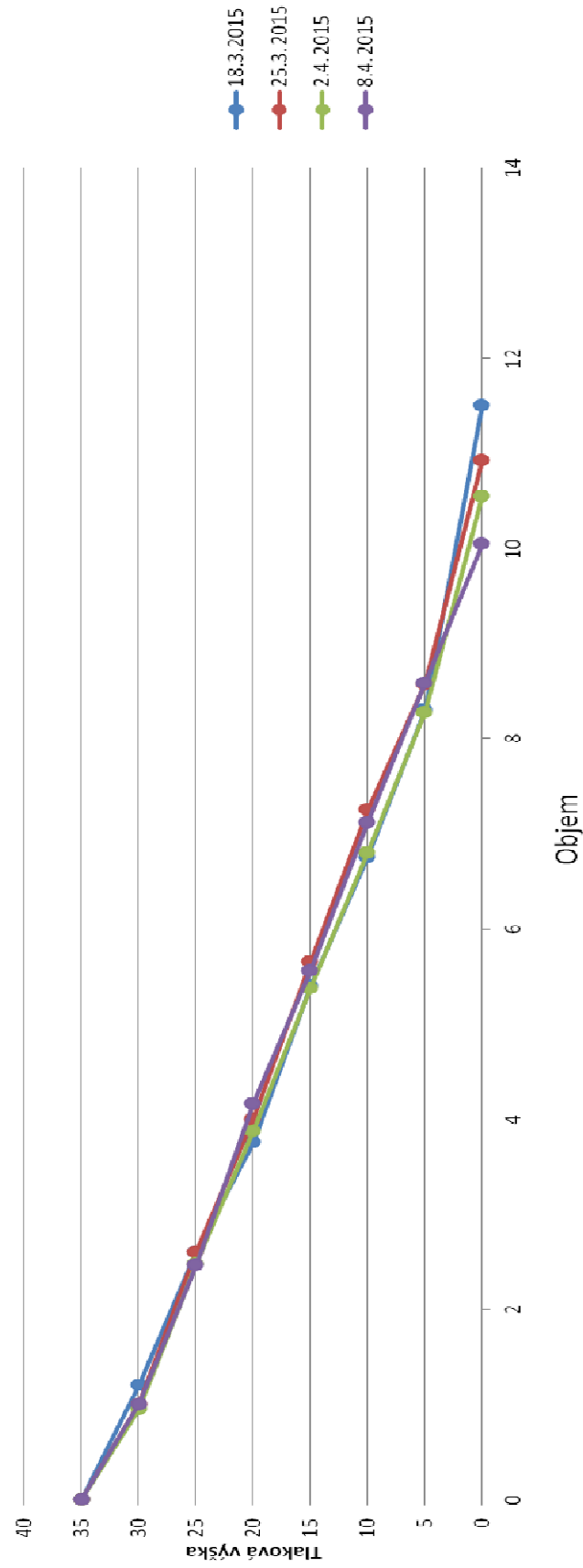


Graf 1: Retenční vlastnosti štěrku bez rákosu obecného, viditelný úbytek vody na jednotlivé tlakové výšky

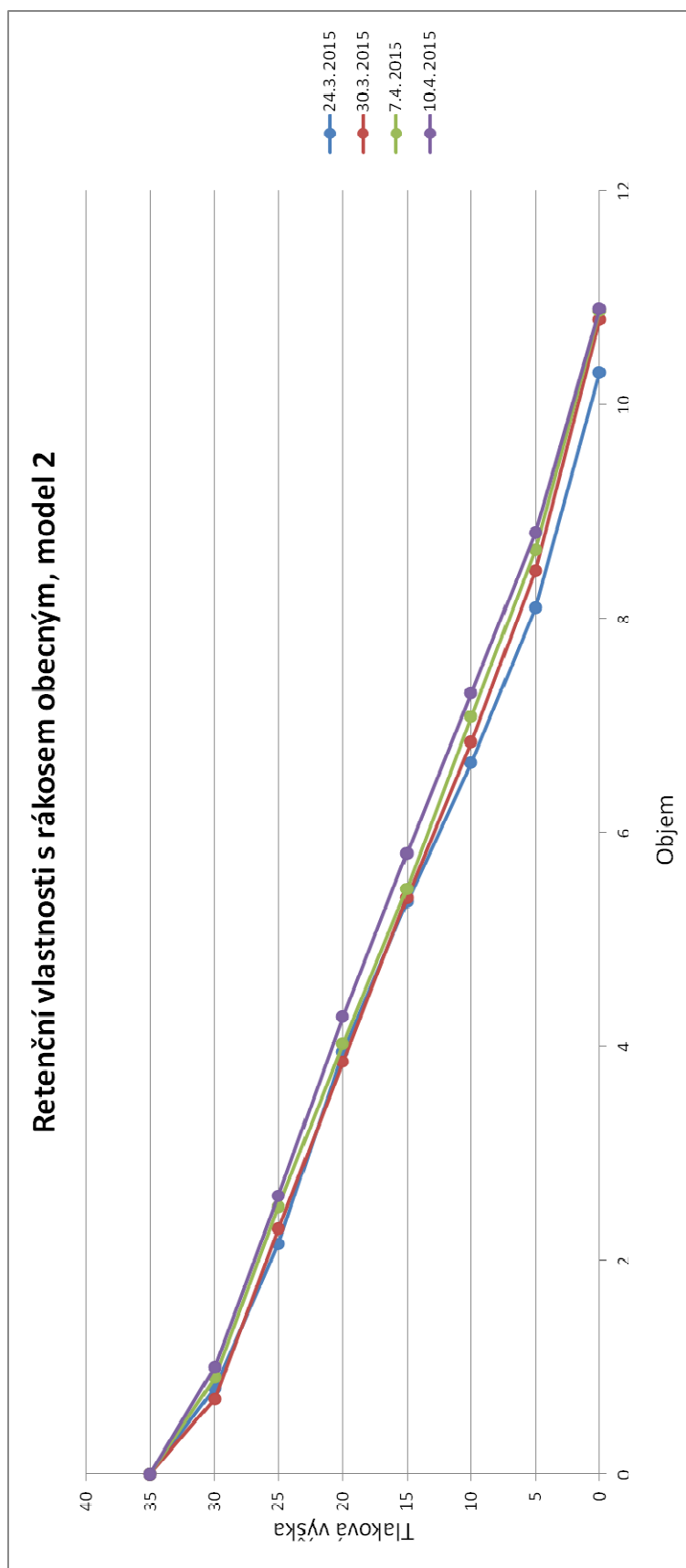


Graf 2: Retenční vlastnosti štěrku bez rákosu obecného, viditelný úbytek vody na jednotlivé tlakové výšky

Retenční vlastnosti s rákosem obecným, model 1



Graf 33: Retenční vlastnosti šěrku s rákosem obecným, viditelný úbytek vody na jednotlivé tlakové výšky

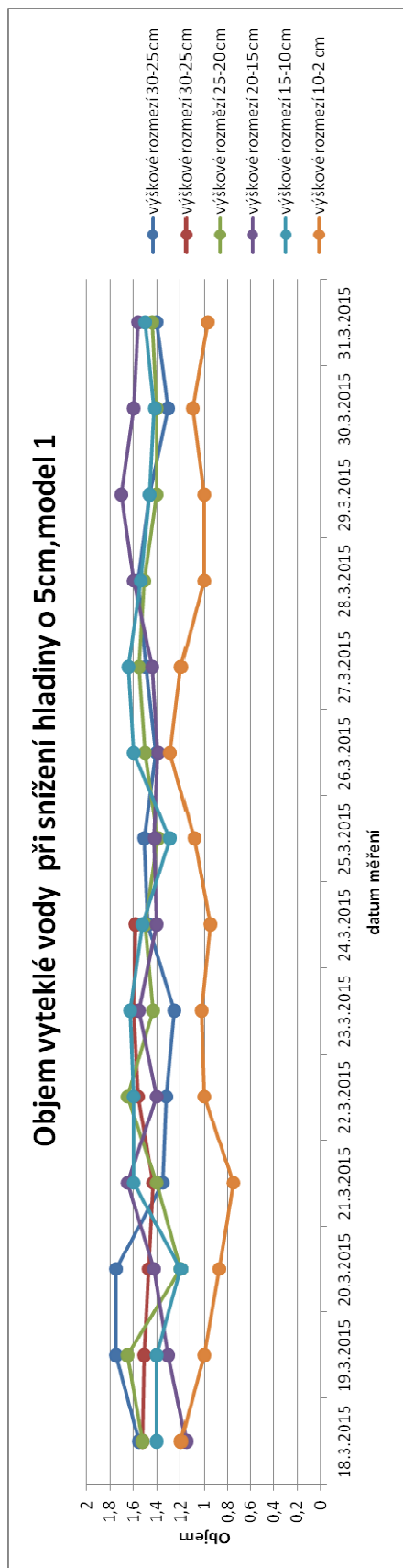


Gráf 34: Retenční vlastnosti štěrku s rákosem obecným, viditelný úbytek vody na jednotlivé tlakové výšky

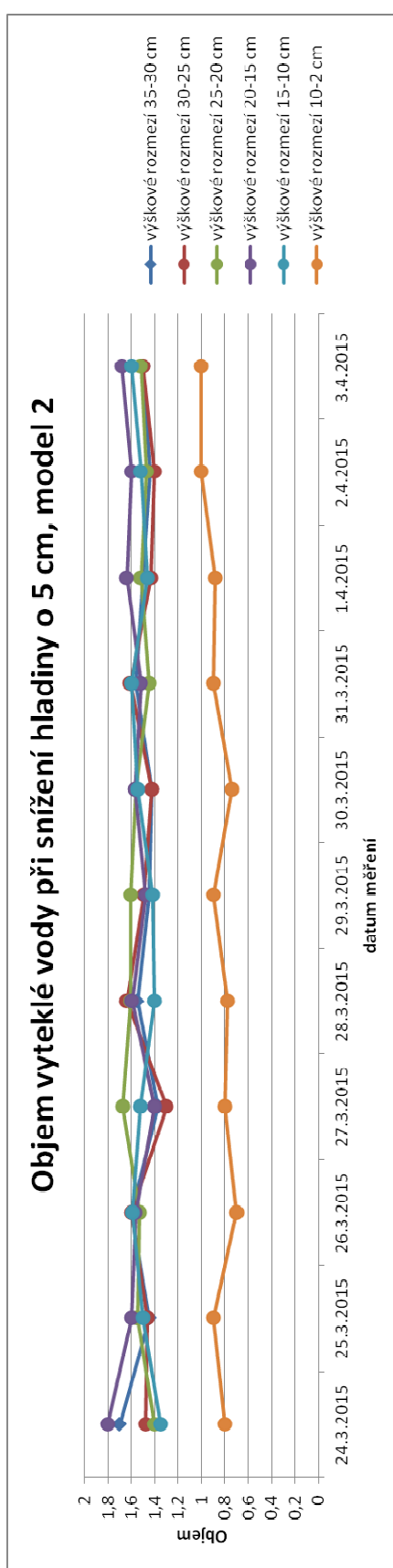
11.3 Úbytek vody při poklesu hladiny

Souhrnný přehled drenážní pórovitosti všech výškových úrovní je zobrazen na grafu 53 a 54. Jednotlivou drenážní pórovitost můžeme vidět na grafech 35 a 36 měřená na sudu 1 se zasazeným rákosem a na grafech 37 a 38 na sudu 2. Ostatní grafy výškových rozhraní najdeme v příloze v kapitole 15.2.3

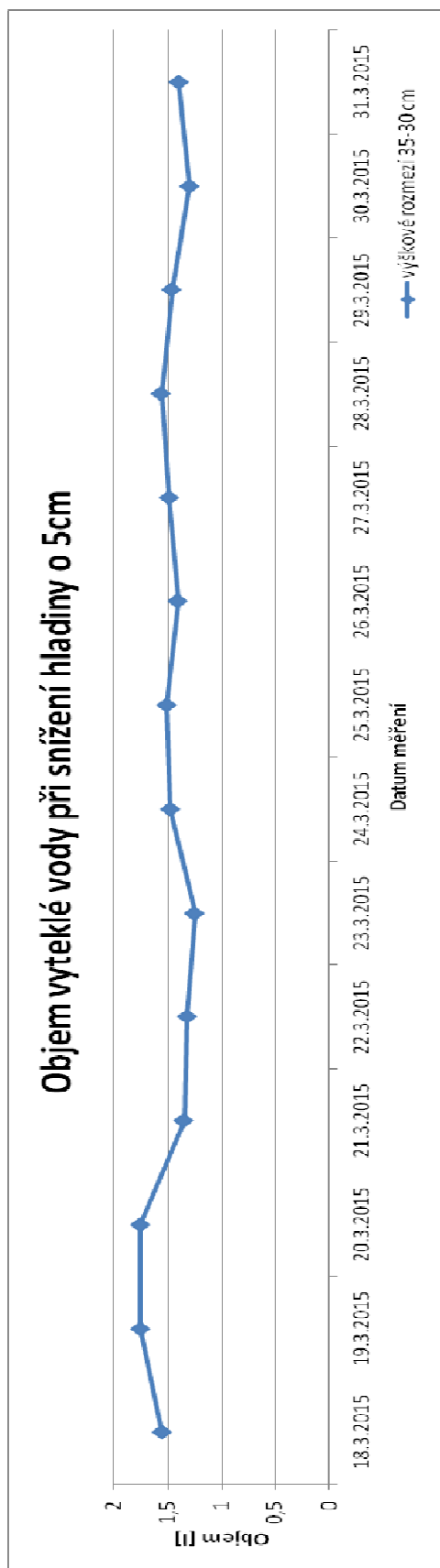
V grafu pozorujeme horní části nepatrný pokles. Hodnoty, které se nám zde vyobrazují, mají stále velikou variabilitu, a tudíž nejde prokázat, zda rostliny v prvním měsíci zakořenění ovlivňují drenážní pórovitost.



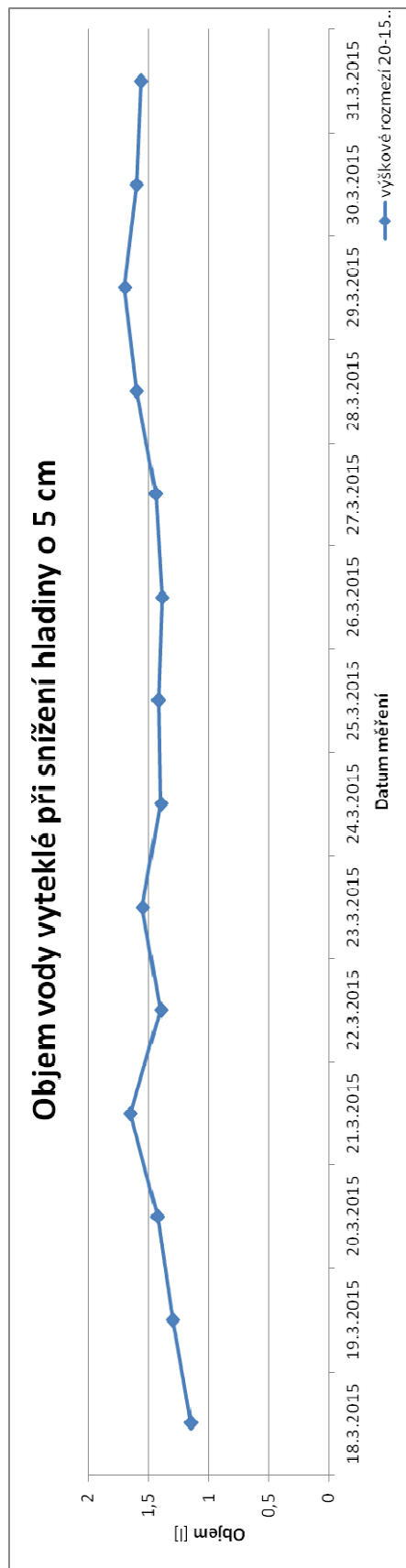
Graf 52. Objem vyteklé vody zobrazen ve všech výškách



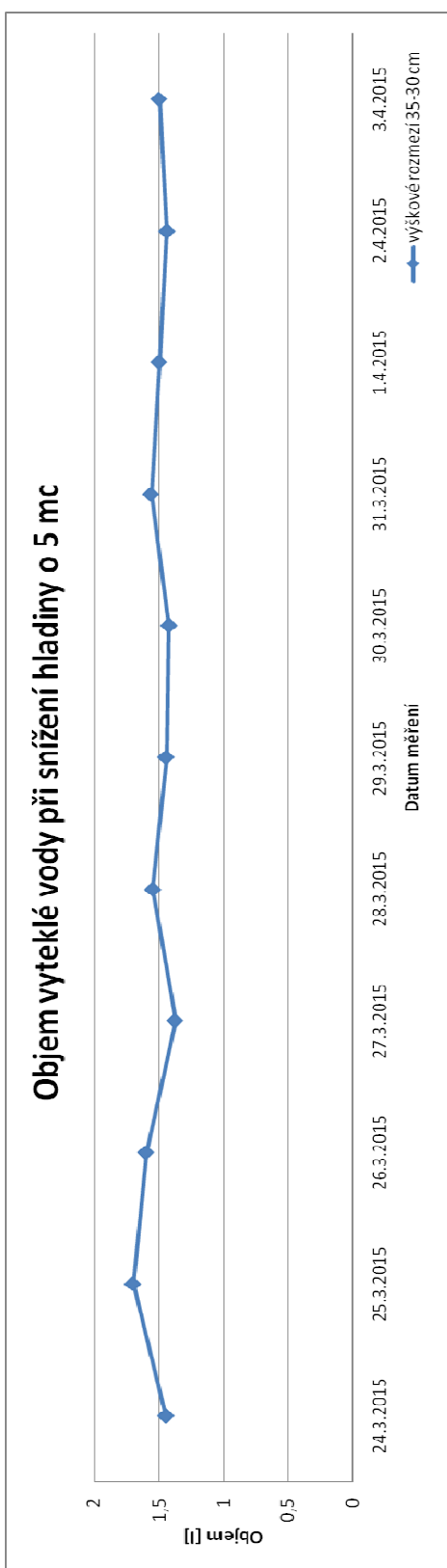
Graf 53. Objem vyteklé vody zobrazen ve všech výškách



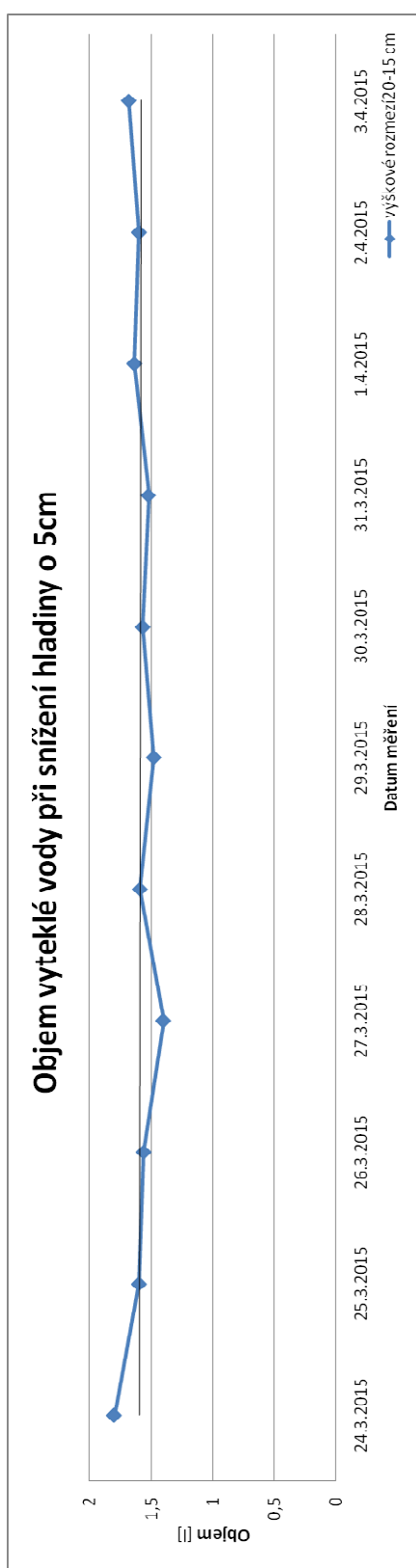
Graf 37: Objem vyteklé vody, měřený ve výšce sudu 1 od 35 do 30 cm



Graf 38: Objem vyteklé vody, měřený ve výšce sudu 1 od 20 do 15 cm



Graf 39: Objem vyleklé vody, měřený ve výšce sudu 2 od 35 do 30 cm



Graf 40: Objem vyleklé vody, měřený ve výšce sudu 2 od 20 do 15 cm

11.4 Rozptyl naměřených hodnot

Pro vhodnou interpretaci výsledků, se zvolilo vyjádření grafů pomocí tzv. boxplotů, které se vytvořily v programu R software version 3.0.0. Vstupními daty, byly naměřené objemy (l) a jejich datum měření. Výsledkem je boxplot který vymezuje:

Medián - použitých 50 % dat (tlustá čára uprostřed krabičky)

Střední interval hodnot – 25 % dat (tj. krabička)

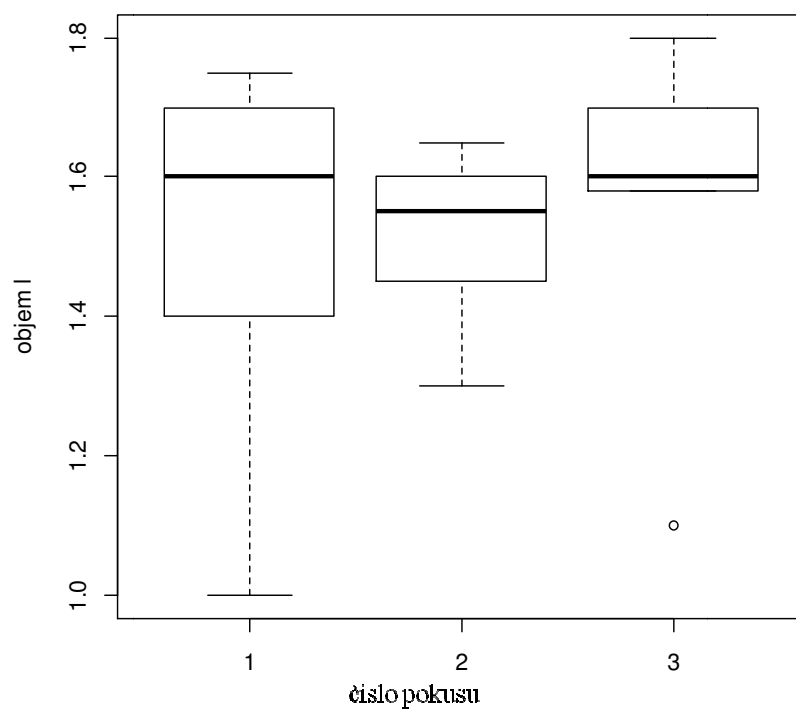
Tolerované hodnoty – 25 % (přerušované čáry)

Extrémní data (kolečka)

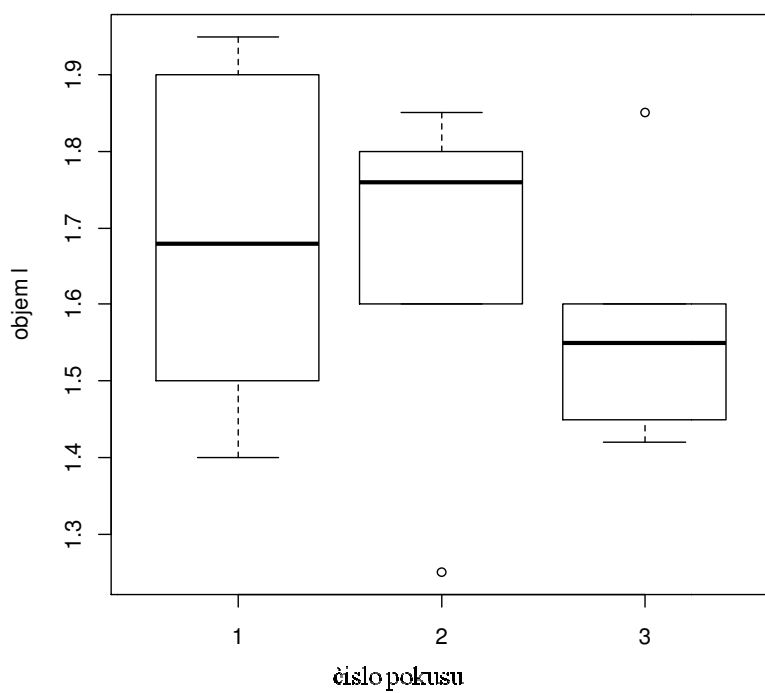
U grafu 48 je viditelné, že nejčastější naměřená hodnota při výtoku vody ze sudu 1 se pohybuje okolo 1,6l. Graf 49 má větší variabilitu měření, ale průměrná hodnota je velice blízká hodnotě sudu 1.

Graf 50 a 51 zobrazuje rozptyly naměřených hodnot vzhledem ke stáří rostlin. Pozorujeme velkou proměnlivost naměřených hodnot. Graf 50 zobrazuje sud 1, kde průměrná hodnota vyteklé vody se pohybuje okolo 1,45 l a u grafu 51, sud 2 je tato hodnota 1,5 l.

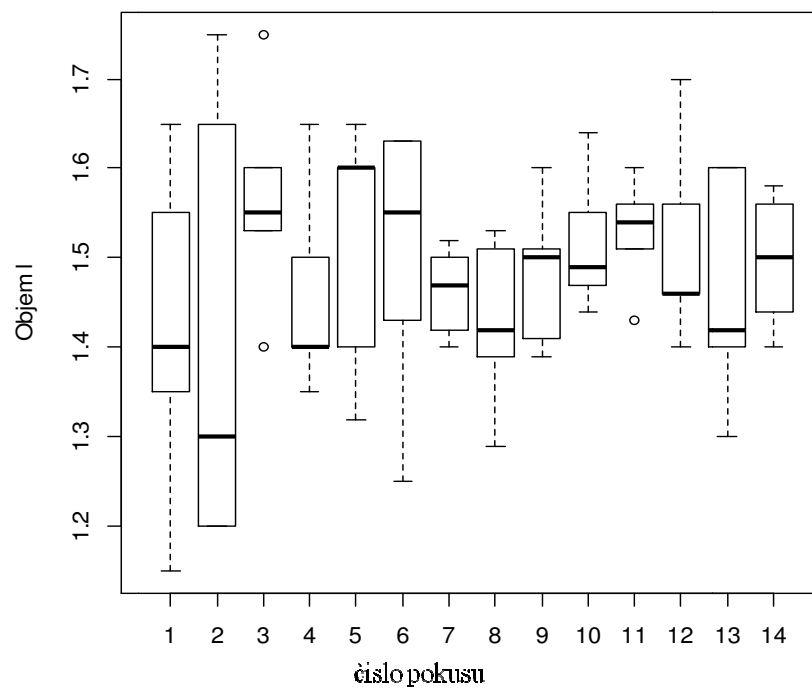
Na těchto grafech nelze prokázat, že s postupným stářím rostlin v prvním měsíci zakořenění se mění množství vyteklé vody.



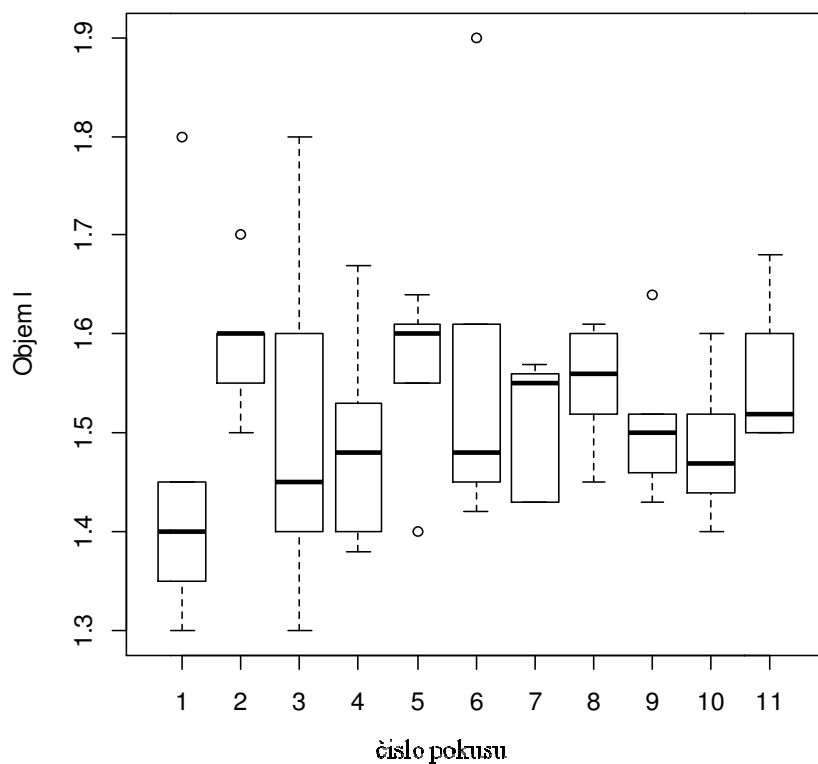
Graf 48: Boxplot naměřených hodnot vyteklého objemu ze vzorku při poklesu hladiny o 5cm u modelu 1 bez rákosu



Graf 49: Boxplot naměřených hodnot vyteklého objemu ze vzorku při poklesu hladiny o 5cm u modelu 2 bez rákosu



Graf 50: Boxplot naměřených hodnot vyteklého objemu ze vzorku při poklesu hladiny o 5cm u modelu 1 s rákosem



Graf 51: Boxplot naměřených hodnot vyteklého objemu ze vzorku při poklesu hladiny o 5cm u modelu 2 s rákosem

12 DISKUZE

Dle získaných výsledků se domníváme, že kořenový systém v prvním měsíci zakořenění rákosu obecného, nemá vliv na vlastnosti štěrku. Můžeme se domnívat, že jedním z důvodů může být i používaná voda při pokusech. Voda při pokusech se čerpala z vodovodního řádu, která je bez jakýchkoliv živin a to mohlo ovlivnit snížený růst rákosu. Naše modely byly umístěny v laboratoři KVHEM a přístup k jiné vodě nebyl možný, ale zároveň by tato odpadní voda nemohla být stejně použita, protože by došlo kvůli přítomným živinám k zanesení pórů v jemnozrnném písku. Dalším důvodem je pravděpodobně již zmíněný velice krátký časový úsek měření.

U výsledků retenčních vlastností jsme zjistili, že naměřené hodnoty na modelech bez rákosu a s rákosem se od sebe liší velice málo. Při porovnání výsledků modelu 1 a modelu 2 zjistíme, že vlastnosti samotného štěrku jsou skoro totožné. Totéž může říci, když porovnáme grafy 3 a 4, hodnoty obou grafů jsou velice podobné. Z toho může vyvozovat jakou „aktivní“ pórovitost má štěrk.

U výsledků, kde jsme zjišťovali objem vody vyteklé při snížení hladiny o 5 cm, jsme zkoumali funkci kořenového systému rákosu obecného v prvním měsíci jeho stáří. Výsledky prokázaly malý na průběh drenážní pórovitosti štěrku, který nelze z provedených pokusů vyhodnotit.

Při porovnání výsledných grafů (35 – 40) modelu 1 a modelu 2 zjistíme nepatrné změny výsledných hodnot. U obou modelů dochází k malému náznaku poklesu objemu vypuštěné vody na úkor stáří rostlin. U modelu 2 nastává změna ve viditelnosti nárůstu hodnot oproti modelu 1. Domníváme se, na základě porovnání tabulky hmotnosti (*tab. 1*) a obrázku 16 (viz. kapitola 15. 1.), že důvodem je biomasa, která je u modelu 2, více vzrostlá.

Na grafech, kde je vyobrazen rozptyl nám potvrdili je patrné, že kořenový systém nemá vliv na vlastnosti štěrku v prvním měsíci zakořenění. Boxploty nám zobrazují velikou variabilitu dat. Z toho plyne, že naměřené hodnoty nejsou ještě ustálené a nelze potvrdit, že kořeny vegetace jsou natolik vzrostlé, aby mohli ovlivnit objem vyteklé vody.

Hydraulická vodivost vyšla v řádech 10^{-4} ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

V experimentu bakalářské práci (Oncirková 2012), bylo prokázáno, že kořenový systém rákosu obecného má vliv na hydraulickou vodivost. Prokázalo se,

čím jsou rostliny starší tím, klesá hydraulická vodivost, graf 52 příloha 15.3. V této práci byla hydraulická vodivost sledována po dobu jednoho roku, kde byla možnost získat větší počet naměřených dat za delší časové období, než u pokusu této diplomové práce. Tudíž se můžeme pouze domnívat, že při pokračování tohoto pokusu se může prokázat vliv kořenového systému na hydraulickou vodivost jako se pokázalo v experimentu bakalářské práce Oncirková (2012).

13 ZÁVĚR

V literární rešerši se ukázalo na způsob, jak lze efektivně vyčistit odpadní vodu pomocí KČOV. Nastínily se principy fungování kořenových čistíren odpadních vod, šetrnější způsob čištění, využívání přirozených procesů a na lépe zapadající komplex tohoto systému v krajině.

Přiblížily se procesy vznikající v půdním prostředí a řešení jednotlivých hydro-pedologických charakteristik.

Z výsledků experimentální části se domníváme, že v prvním měsíci stáří kořenového systému rákosu obecného, nemá, popřípadě má jen velice nízký vliv na vlastnosti šterku. Pokračování tohoto experimentu může v další práci ukázat velice zajímavý průběh růstu kořenového systému v delším časovém období. Jak stáří rostlin bude působit na vlastnosti šterku.

14 PŘEHLED LITERATURY

BEAR, J. (1972). Dynamics of Fluids in Porous Media. *New York: American Elsevier.*

CAMMAROTA, C., FREIDE, M., & D, M. G. (2006). A review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content. *Bioresource Technology.*

CÍSLEROVÁ, M. (1989). Inženýrská hydrogeologie. *Praha: ČVUT.*

CÍSLEROVÁ, M., & VOGEL, T. (1998). Transportní procesy. *Praha: ČVUT.*

CORNELIS, W., KHLOSI, M., HARTMANN, R., VAN MEIRVENNE, M., & DE VOS, B. (2005). Comparison of Unimodal Analytical Expressions of the Soil-Water Retention Curve. *Soil Science Society of America Journal*, 1902-1911.

ČERMÁK, P. (2012). Vliv půdní struktury na hydraulické vlastnosti půdy, Bakalářská práce. *Brno: Vysoké učení technické.*

ČÍŽKOVÁ, H., & HUSÁK, Š. (1992). Účelové kultivace vodních a mokřadních rostlin. *Bot. ústav ČSAV.*

DARCY, H. (1856). Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon ("The Public Fountains of the Town of Dijon"). *Paris: Dalmont.*

DUŠEK, J. (1997). Rostliny ve vegetačních čistírnách. Diplomová práce, Biologická Fakulta Jihočeské univerzity, *České Budějovice, (angl. souhrn)*, .

DUŠEK, J., & KVĚT, J. (2001). Kosit či nekosit? V In: Sborník přednášek Přírodní způsoby čištění a využití odpadních vod II (stránky 89-91). *BRNO.*

HÁLEK, V., & ŠVEC, J. (1979). Groundwater Hydraulics. *Praha: Academia.*

HÁNKOVÁ, D. (2003). Vliv extrémních srážek na činnost odlehčovacích komor a stokového systému. 5. *Odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí*, 83-86.

HILLEL, D. (1998). Environmental Soil Physics. *San Diego, USA: Academic Press.*

HLAVÍNEK, P., MIČÍN, J., & PRAX, P. (2003). Stokování a čištění odpadních vod. *BRNO: Akademické nakladatelství CERM.*

HOSTĚNÍN. (2001). Přírodní způsoby čištění odpadních vod. *Voda a krajina*, 1-12.

- HUŠEK, O. (2014).** Vývoj hydraulických a migračních charakteristik KČOV. Žádost o grant IGA 20144261 .*PRAHA: ČZU*
- CHUDOBA, J. (1991).** Odpadní vody a jejich čištění. *PRAHA.*
- CHYTRÝ, M. (2011).** Vegetace České republiky.3,Vodní a mokradní vegetace (1. vyd.). *PRAHA: Academia Praha.*
- JEŘÁBEK, J. (2012).** Úvod do matematického modelování Darcyovského proudění v proměnlivě nasyceném pórézním prostředí. Bakalářská práce. *Praha: ČZU.*
- KAZDA, I. (1983).** Proudění podzemní vody. Řešení metodou konečných prvků. *Praha.*
- KODEŠOVÁ, R. (2005).** Modelování v pedologii. *Praha: ČZU.*
- KOLLER, J., DOHÁNYŠ, M., & STRNADLOVÁ, N. (1998).** Čištění odpadních vod (2. vyd.). *PRAHA: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze.*
- KOUŘIL, M. (2006).** Kořenové čistírny: Alternativní způsoby nakládání s odpadními vodami. *České Budějovice: Attavena.*
- KRÁLOVÁ, M. (2010).** Keď čistí příroda. *Pekné bývanie* (5), stránky 107-109.
- KUTÍLEK, M. (1978).** Vodohospodářská pedologie (2. přepracované vydání. vyd.). *Praha: SNTL.*
- KUTÍLEK, M., & NIELSEN, D. (1994).** Soil hydrology, Catena Verlag. *Germany.*
- KUTÍLEK, M., KURÁŽ, V., & CÍSLEROVÁ, M. (2004).** Hydropedologie. *Praha: ČVUT.*
- LAL, R., & SHLUKA, K. (2004).** Principles of Soil Physics. *New York.*
- LARIŠOVÁ, L. (2012).** Analýza vzájemného vztahu dvou metod terénního měření infiltrace vody do půdy, Bakalářská práce. *Brno: Vysoké učení technické v Brně.*
- MALOSZEWSKI, P., WACHNIEW, P., & CZUPRYNSKI, P. (2006).** Study of hydraulic parameters in heterogeneous gravel beds. *Journal of Hydrology* , 630-642.
- MLS, J. (1984).** Hydraulika podzemní vody. *Praha: ČVUT.*
- OKURUT, T. (2001).** Plant growth and nutrient uptake in a tropical constructed wetlands. In: Vymazal, J. (ed.), Transformations of Nutrients in Natural and Constructed Wetlands. Backhuys Publishers, Leiden, *Nizozemí* , 451-462.

ONCIRKOVÁ, K. (2012). Typy kořenových čistíren odpadních vod, Bakalářská práce. *Praha: ČZU.*

PAVLÁSEK, J. (2015). Ústní sdělení, Zaměstnanec FŽP (Kamýcká 1176, Praha 6), dne 14.4. 2015.

PAVLÁSEK, J., & JAČKA, L. (2014). *Hydropedologie. Praha.*

POŠTA, J. (2005). *Čistírny odpadních vod Praha. PRAHA: Česká zemědělská univerzita v Praze.*

PRUŠKA, J. (2015). *Podzemní voda. Praha.*

RICHTER, M. (2002). *Technologie ochrany životního prostředí. část 1 Technologie čištění odpadních vod. Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.*

ROZKOŠNÝ, M., & PROKEŠOVÁ, L. (2004). Čistící účinek sledovaný kořenových čistírnách v průběhu roku. Výzkumné práce na FAST VUT *Brno*, projekt MSM 261100006 , 1-6.

STOKLÁSKOVÁ, A. (2012). Stanovení hydraulických charakteristik půdy ve vybrané lokalitě. Diplomová práce. *Brno.*

ŠÍR, M. (1990). *Lesk a bída teorie potenciálu půdní vody. Praha: Vysoká škola zemědělská v Praze.*

ŠPERLING, M., & KRŠŇÁK, J. (2010). Kořenové čistírny odpadních vod - ekonomika výstavby a provozu. *TZB Haus Technik (3), stránky 36 - 38.*

ŠVEHLA, P., TLUSTOŠ, P., & Balík, J. (2007). *Odpadní vody. PRAHA: Česká zemědělská univerzita v Praze.*

TOURKOVÁ, J. (1996). *Hydrogeologie. Praha: ČVUT.*

TRPKOŠOVÁ, D., & MLS, J. (2008). *Hydraulické charakteristiky kapilární bariery ve vztahu k její účinnosti (2. vydání. vyd.). Praha: Karlova Univerzita.*

TUČEK, J., CHUDOBA, Z., & KONÍČEK, Z. (1988). *Základní procesy a výpočty technologií vody. PRAHA.*

VALENTOVÁ, J. (2001). *Hydraulika podzemní vody (Sv. 2). Praha: ČVUT.*

VÍTĚZ, T., & GRODA, B. (2008). Čištění a čistírny odpadních vod (1. vyd.). *BRNO: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.*

VYMAZAL, J. (2004). *Kořenové čistírny odpadních vod. Třeboň.*

VYMAZAL, J. (2009). *Kořenové čistírny odpadních vod: 20 let zkušeností v České republice. Vodní hospodářství (4), str. 113.*

VYMAZAL, J. (2004a). Removal of phosphorus in constructed with horizontal subsurface flow in the Czech Republic. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 4. 657-670.

VYMAZAL, J. (2008). Využití umělých mokřadů pro čištění odpadních vod z malých zdrojů znečištění. Sb. konf. Decentralizované nakládání s odpadními vodami , 61-70.

VYMAZAL, J., & KRÖPFLOVÁ, L. (2009). Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience. *Science of the Total* .

WEBER, E. (2003). Invasive plants of the world . In. Reference guide to environmental , 57,318,312.

YUAN-CHUN, Z., XIAN-GUO, L., MING, J., & ZUE, G. (2011). Migration and retention of dissolved iron in three mesocosm wetlands. *Ecological Engineering* , 1630-1637.

YU-CHEN LIN, A., DEBROUX, J.-F., CUNNINGHAM, J., & REINHARD, M. (2003). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic. *Ecological Engineering* , 469-501.

Použité internetové zdroje:

KUČEROVÁ, R., FEČKO, P., & LYČKOVÁ, B. (2010). Úprava a čištění vody. Získáno 13. 1 2013, z Multimediální učební texty zaměřené na problematiku úpravy a čištění vody, VŠB TU Ostrava:
http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Radka_2010/mc.html

PELIKÁN, P. (2013). 20 let provozu kořenové čistírny ve Spáleném Poříčí. Získáno 11. 1 2013, z ENVIC: <http://www.envic.cz/informacni-materialy/kvalita-vod/20-let-provozu-korenove-cistirny-ve-spalenem-porici.htm>

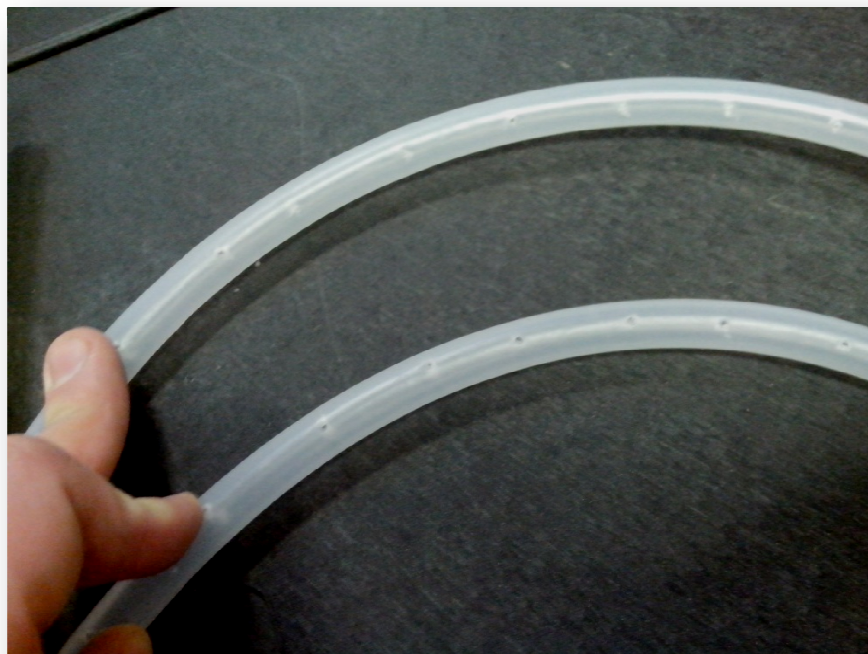
SOVÍK, Z. (1999-2013). Chrástice rákosovitá. Získáno 15. 3 2013, z BioLib: <http://www.biolib.cz/cz/taxon/id42641/>

VYMAZAL, J., & DUŠEK, J. (2002-2013). Využití mokřadů k ochraně kvalitě vody. Získáno 12. 1 2013, z eAMOS:
http://www.eamos.cz/amos/kek/externi/kek_407/12/12.htm

ZÍCHA, O. (1999-2013). Rákos obecný. Získáno 15. 3 2013, z BioLib: <http://www.biolib.cz/cz/taxon/id42664/>

15 PŘÍLOHA

15.1 Fotodokumentace



Obr. 12 perforovaná hadice



Obr 13. omotané látkové plátno kolem perforované hadice



Obr. 14 umístění hadice do válce a postupné přisýpání písku



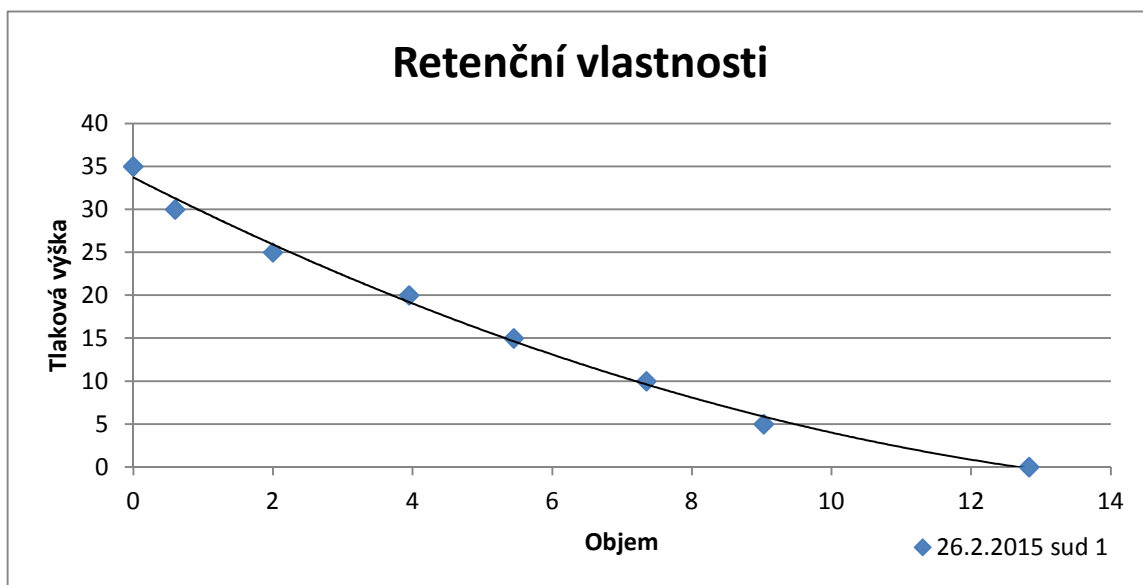
Obr.15 ochranné plátno, které rozděluje vrstvy písku od štěrku



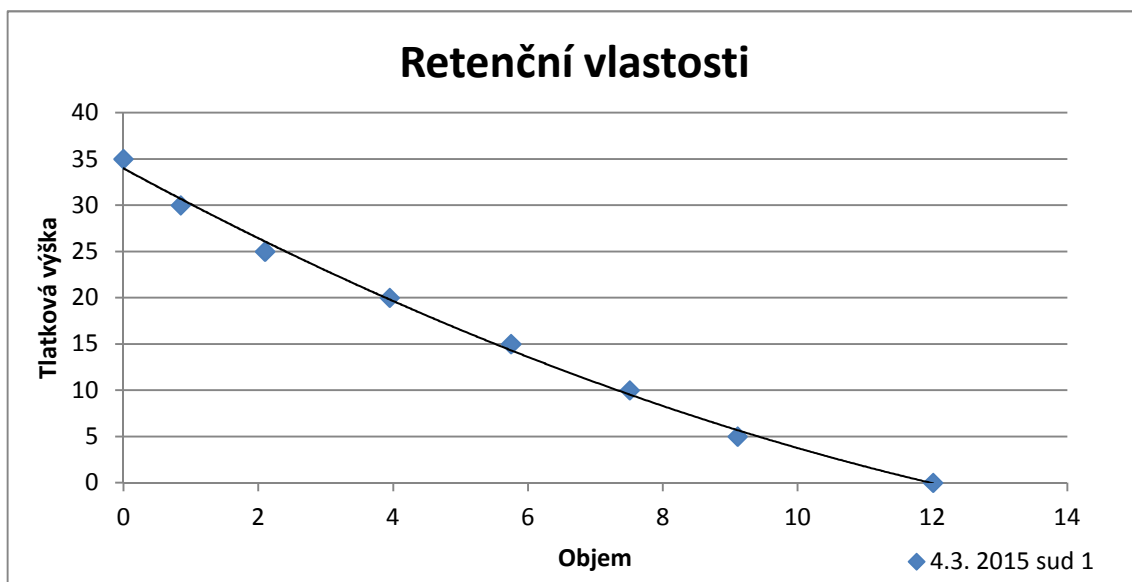
Obr. 16 Vzhled rákosu obecného po měsíci zasazení (model 2 napravo, model 1 na levo)

15.2 Grafy retenčních vlastností štěrku

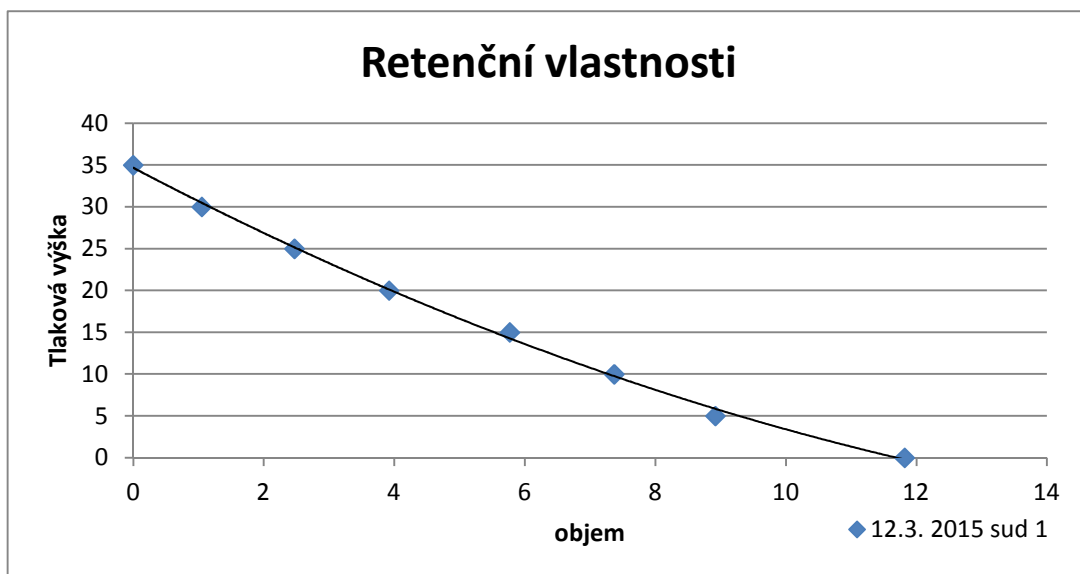
15.2.1 Měření bez rákosu



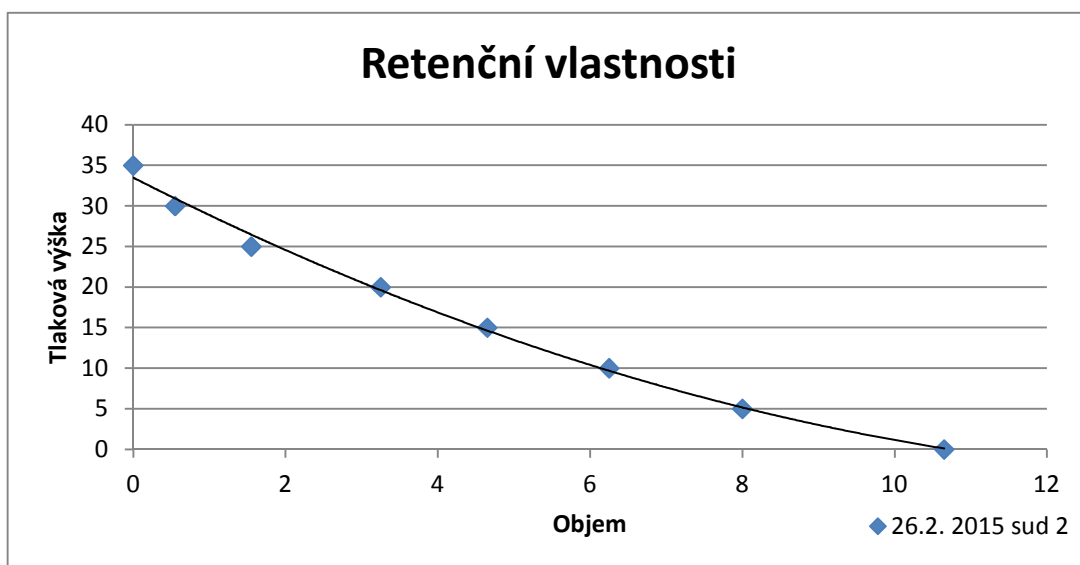
Graf 3: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, bez osázení rákosu s datem měření 26.2. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



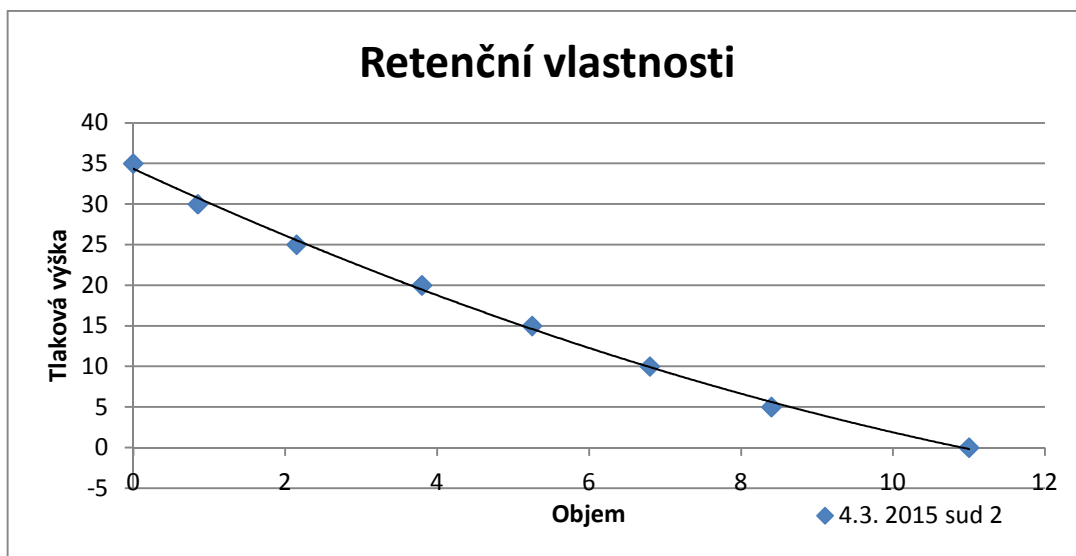
Graf 4: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, bez osázení rákosu s datem měření 4.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



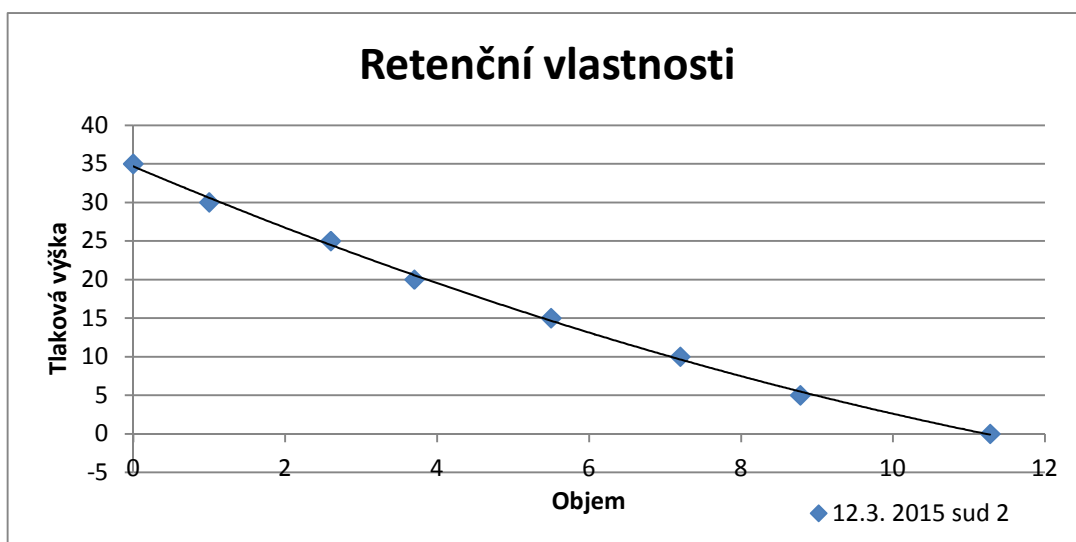
Graf 5: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, bez osázení rákosu s datem měření 12.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



Graf 6: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, bez osázení rákosu s datem měření 26.2.2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci

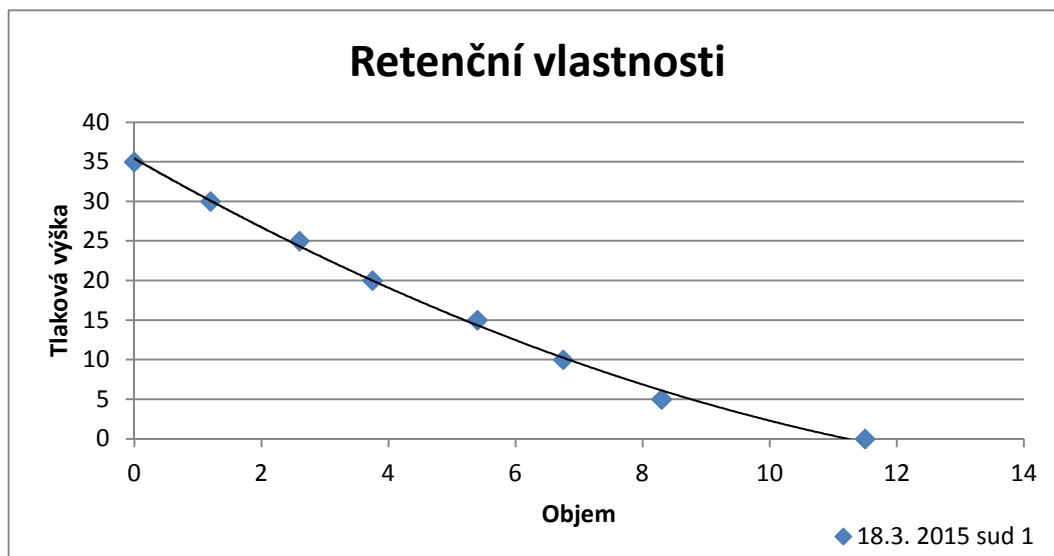


Graf 7: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, bez osázení rákosu s datem měření 4.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci

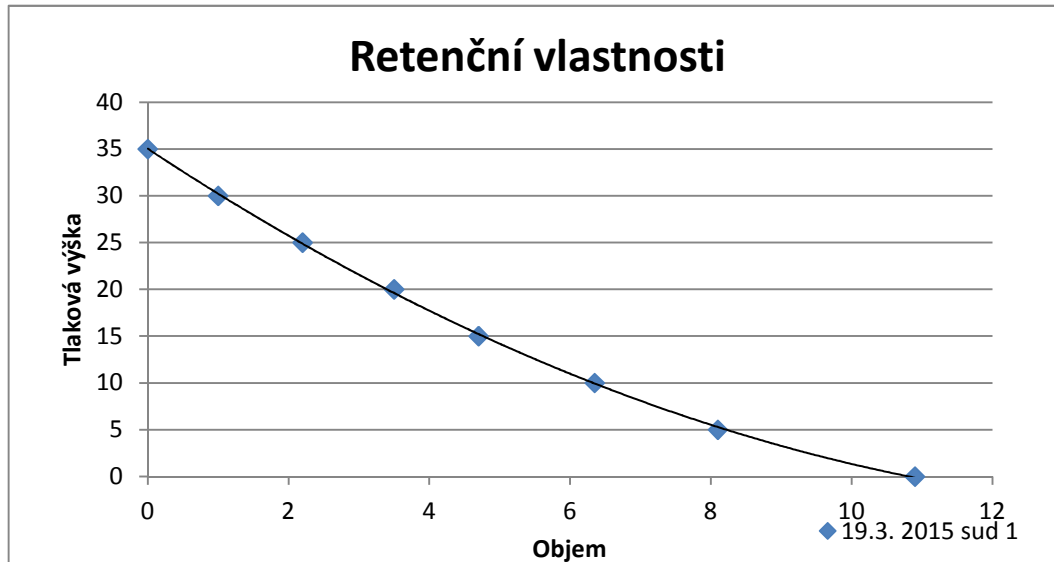


Graf 8: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, bez osázení rákosu s datem měření 12.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci

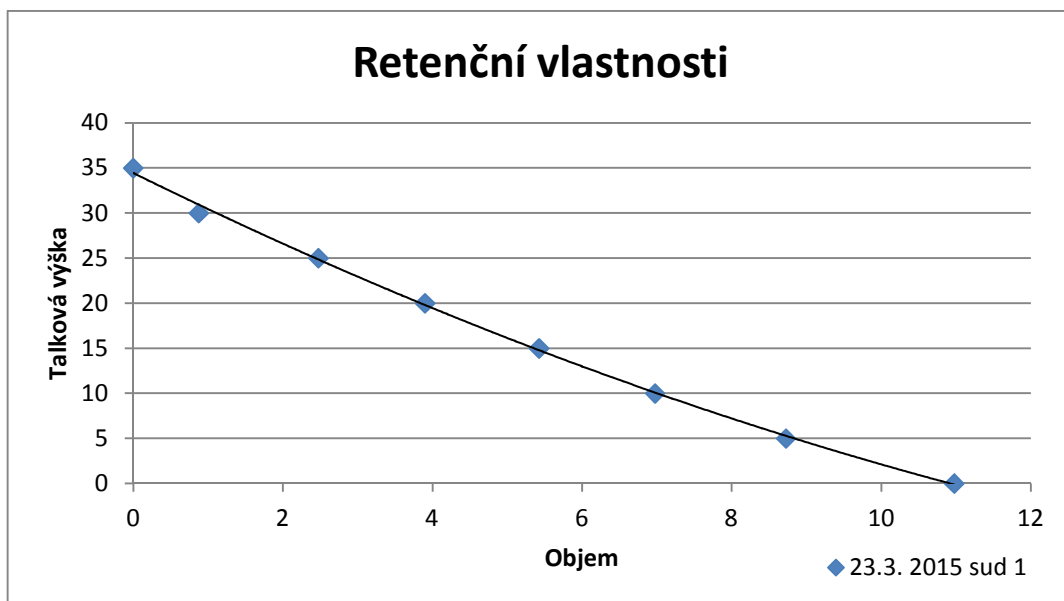
15.2.2 Měření s rákosem



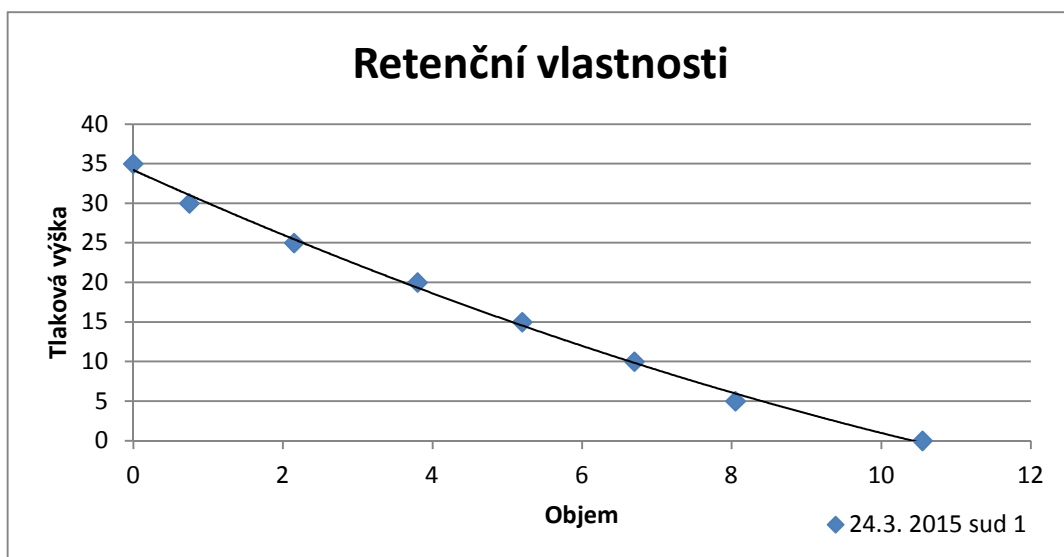
Graf 9: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 18.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



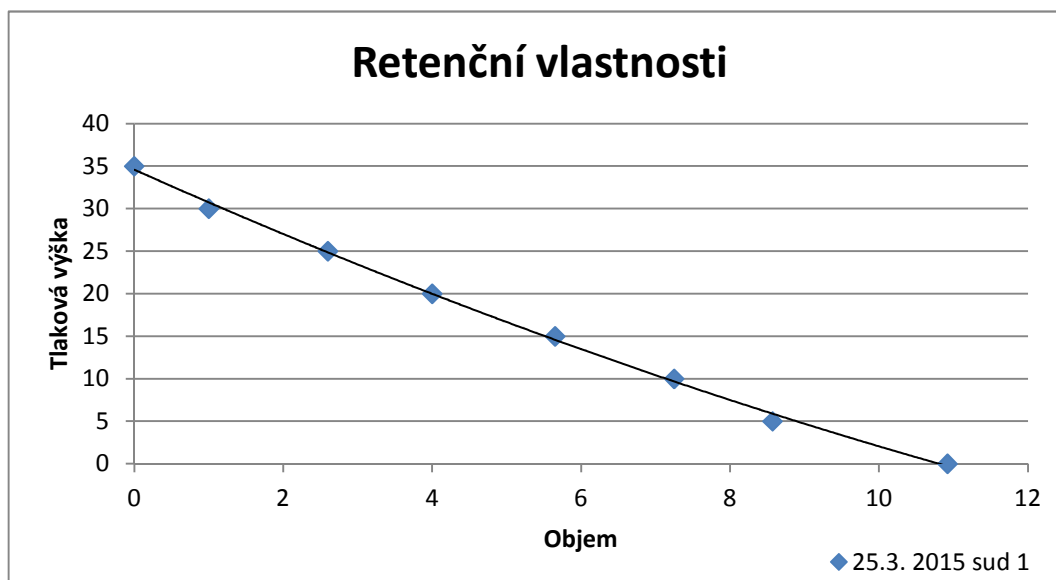
Graf 10: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 19.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



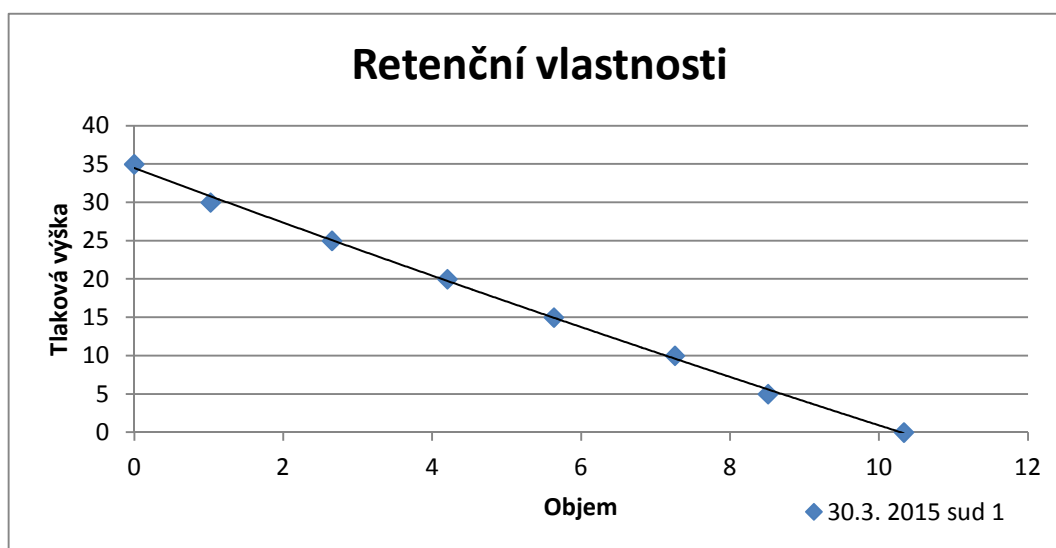
Graf 11: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 23.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



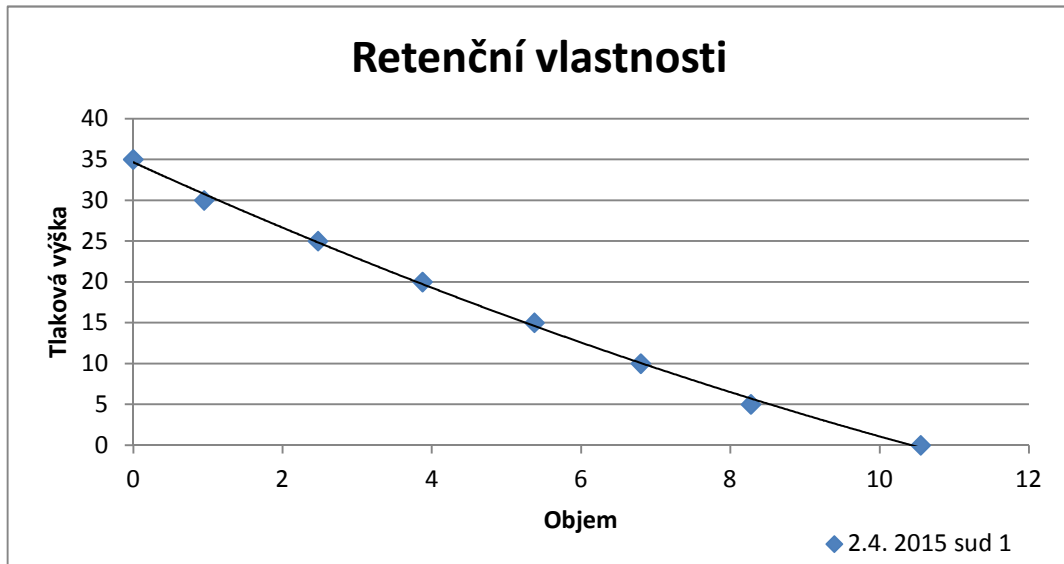
Graf 12: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 24.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



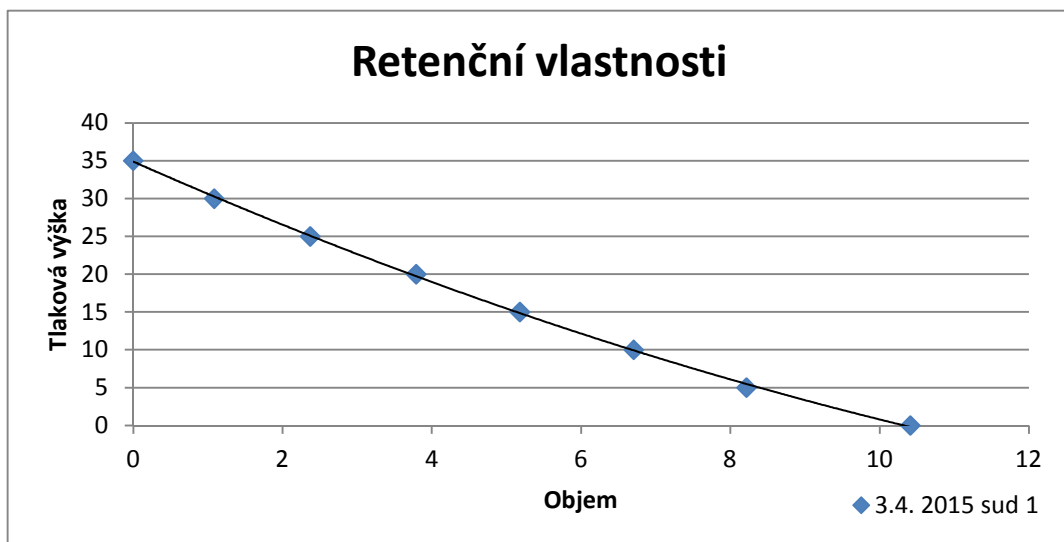
Graf 13: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 25.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



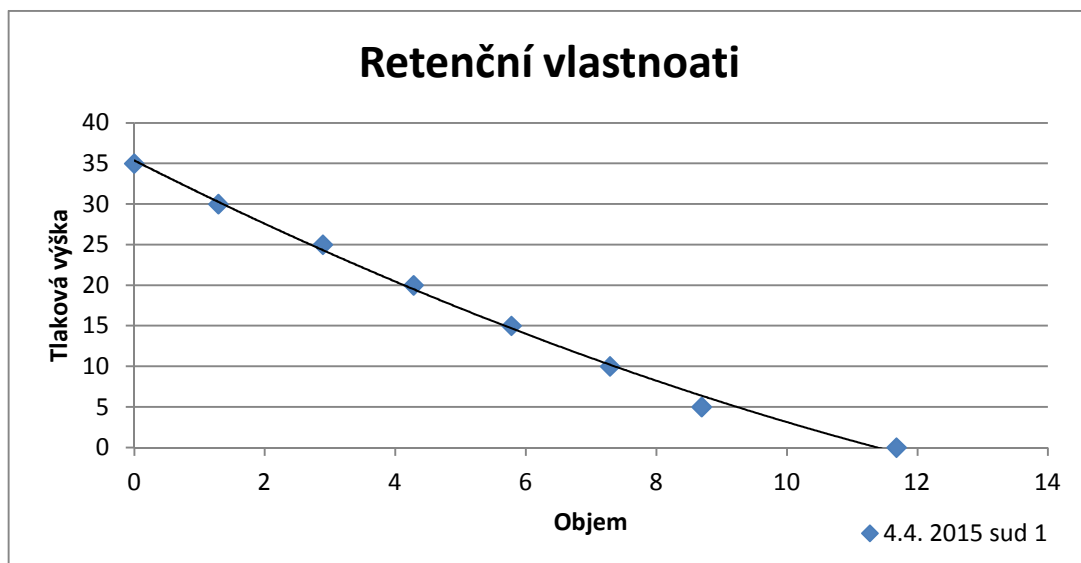
Graf 14: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 30.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



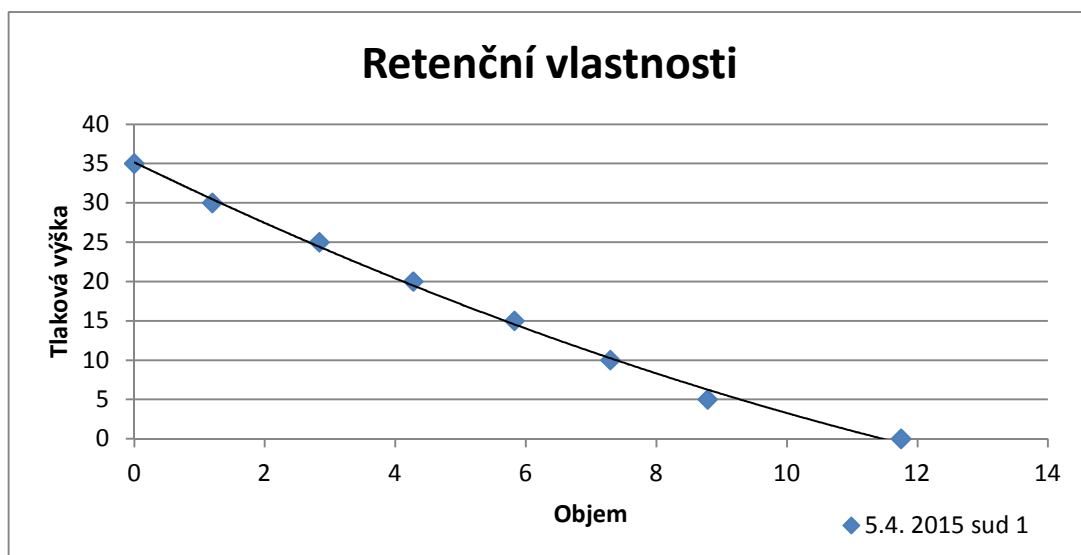
Graf 14: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 2.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



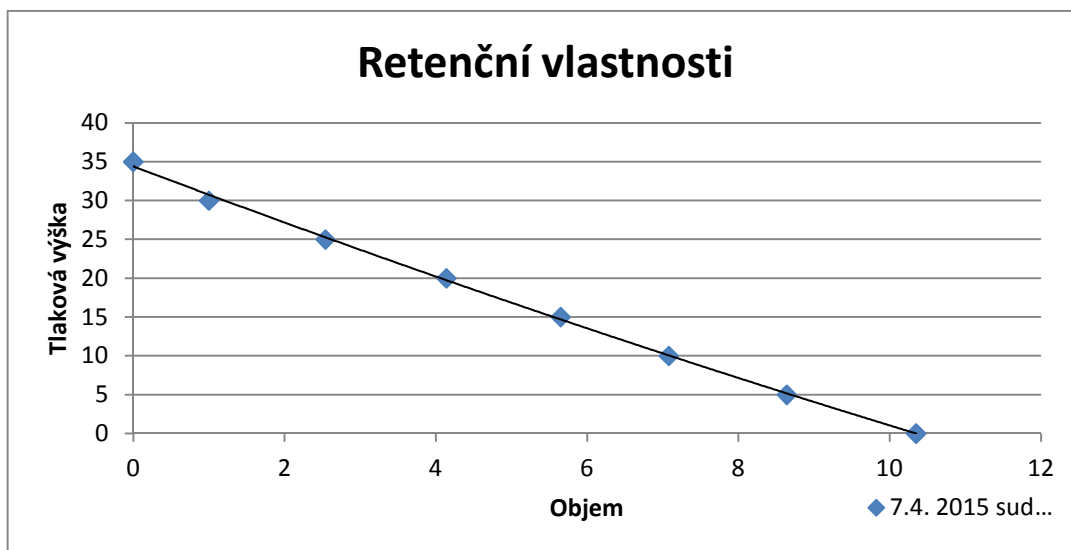
Graf 15: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 3.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



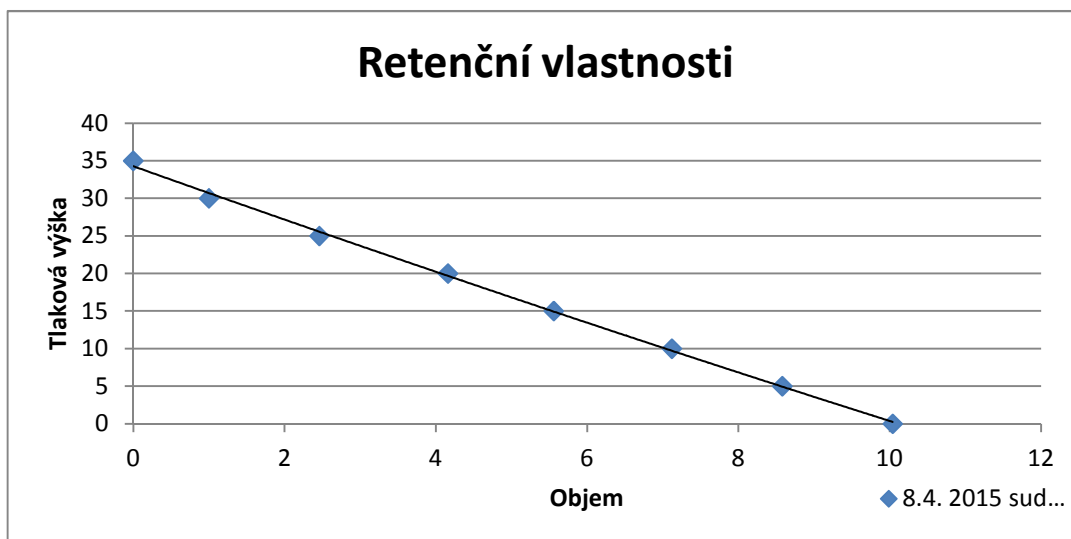
Graf 16: Retenční vlastnosti štěrků u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 4.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



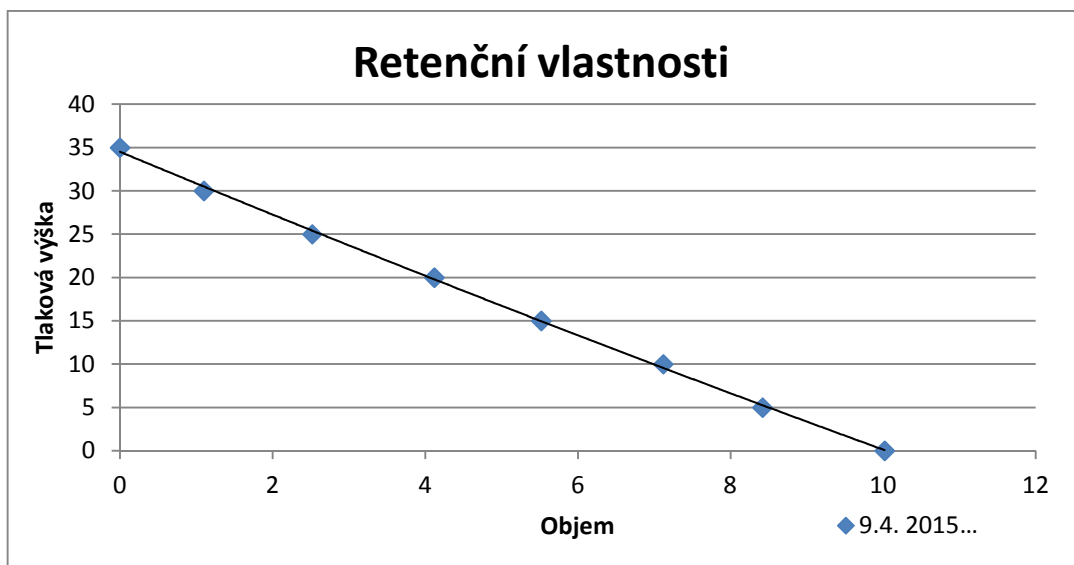
Graf 17: Retenční vlastnosti štěrků u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 5.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



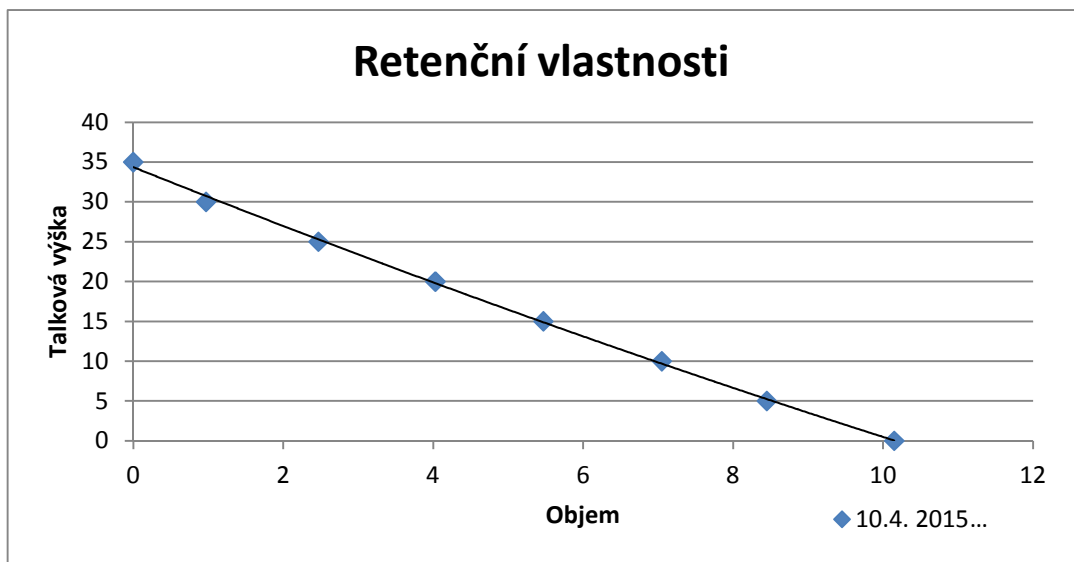
Graf 18: Retenční vlastnosti štěrků u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 7.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



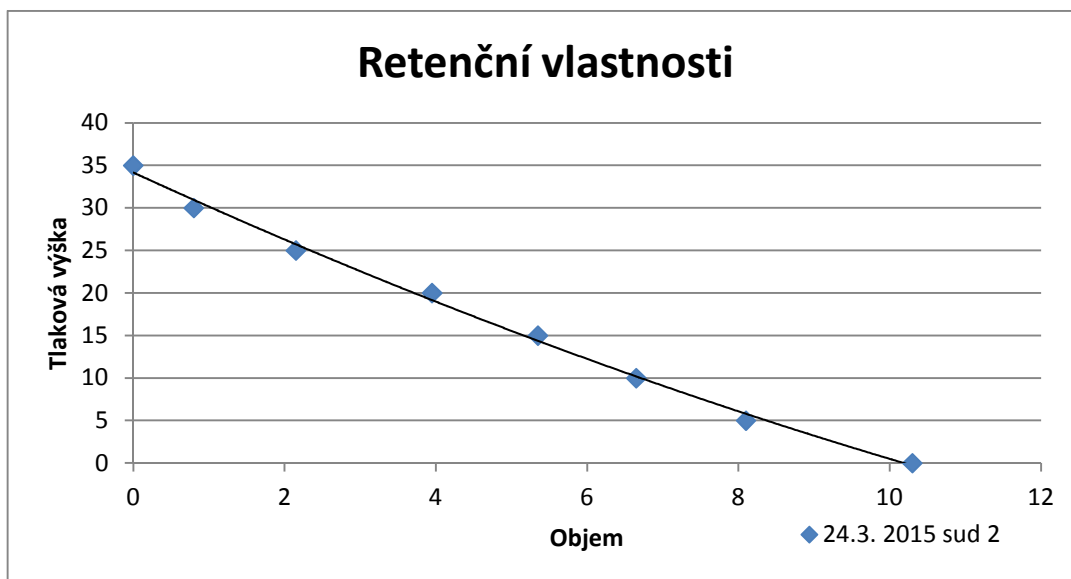
Graf 19: Retenční vlastnosti štěrků u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 7.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



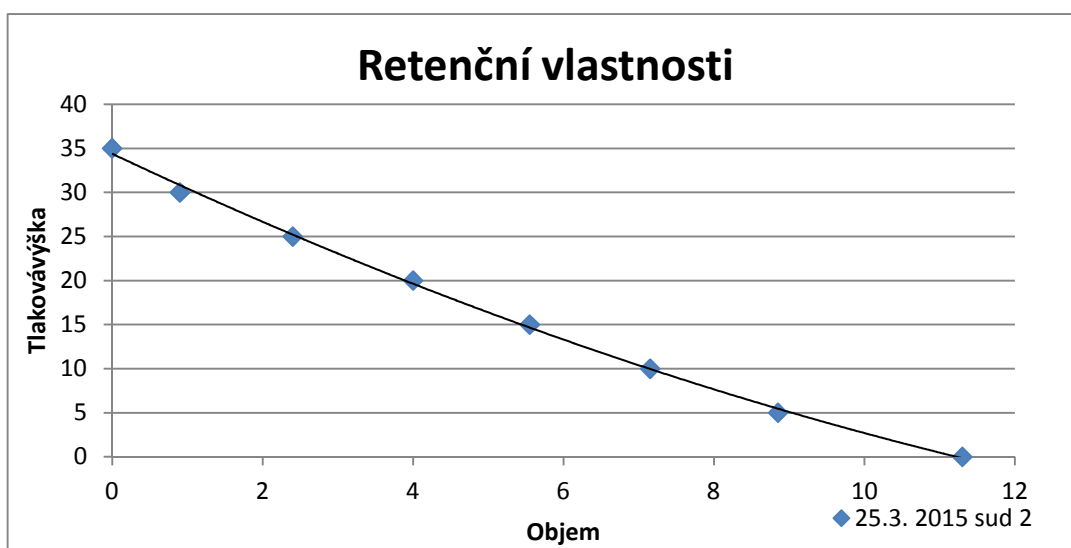
Graf 20: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 9.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



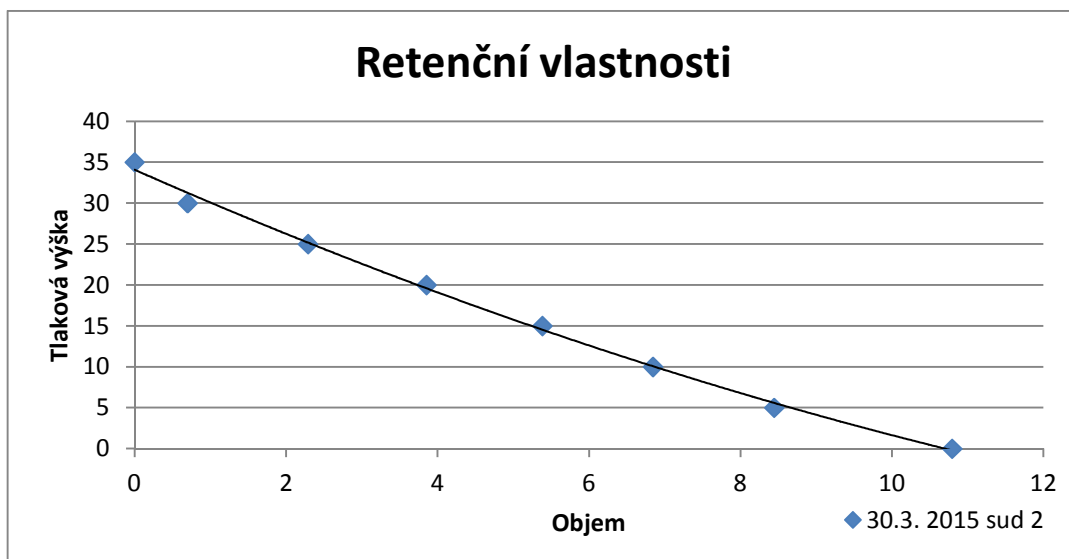
Graf 21: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 1, s osázení rákosu s datem měření 10.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



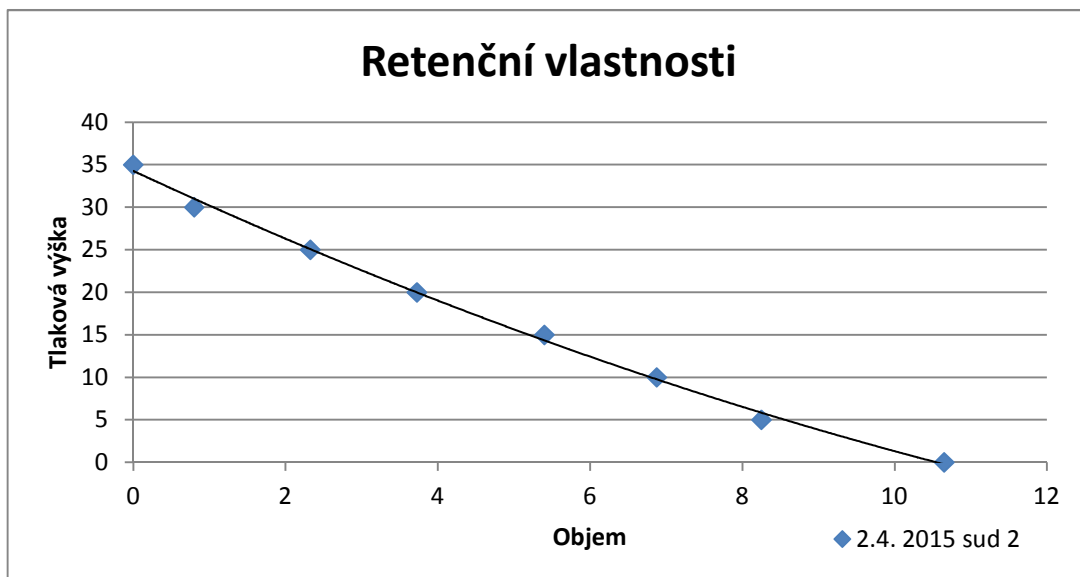
Graf 22: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 24.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



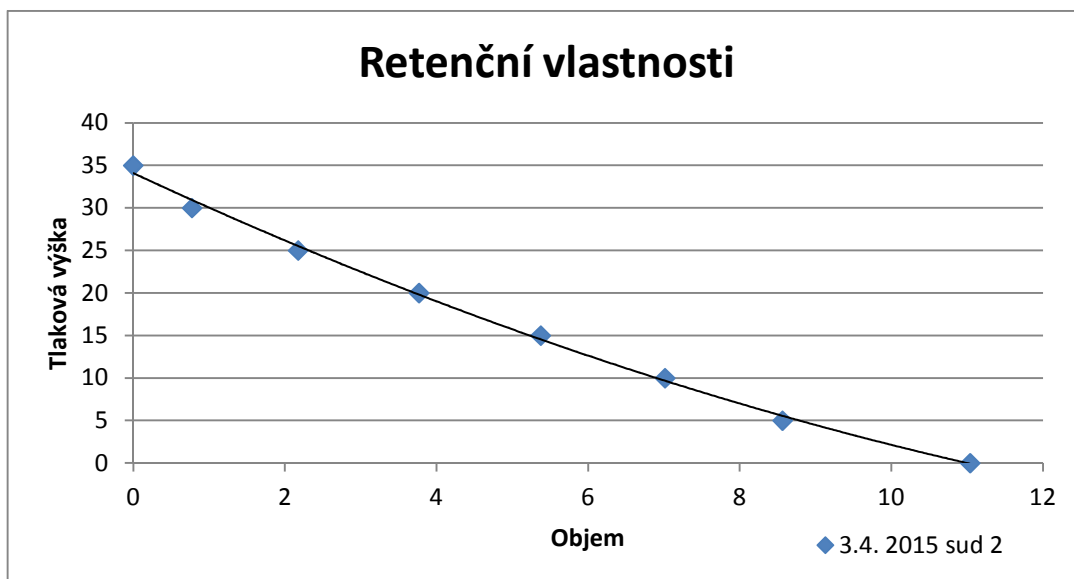
Graf 23: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 25.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



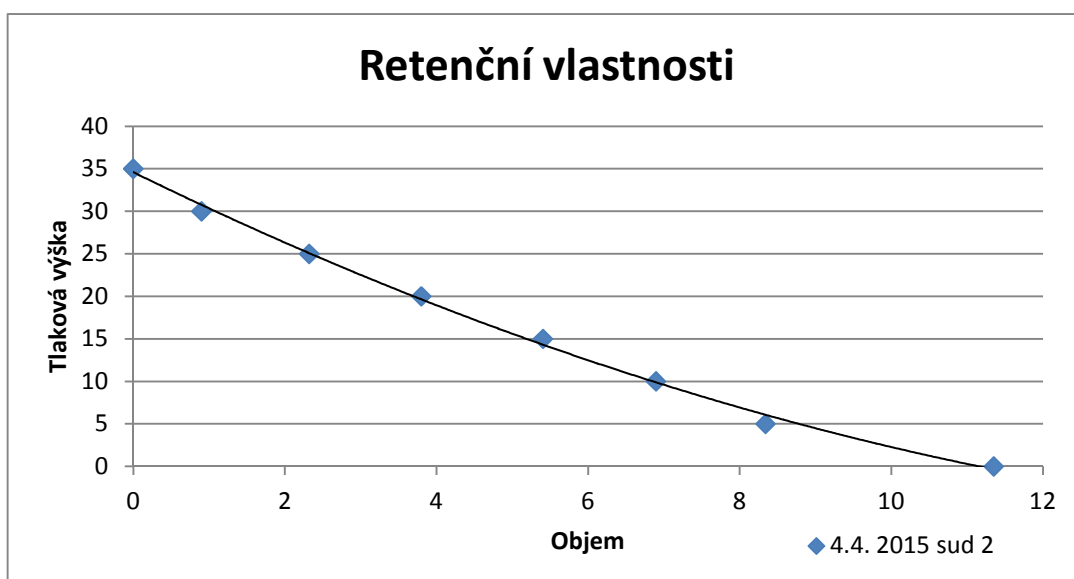
Graf 24: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 30.3. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



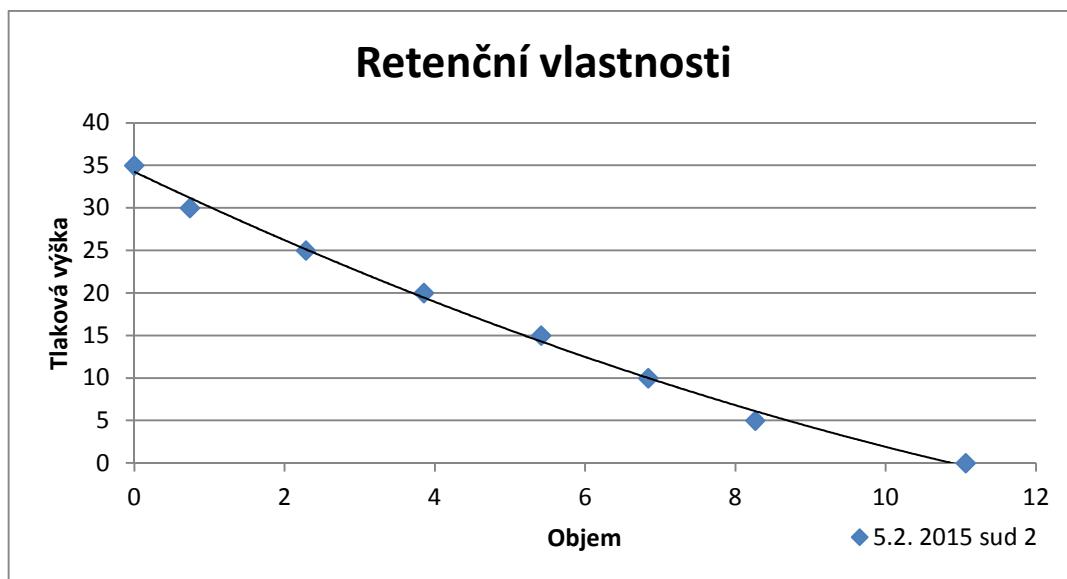
Graf 25: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 2.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci



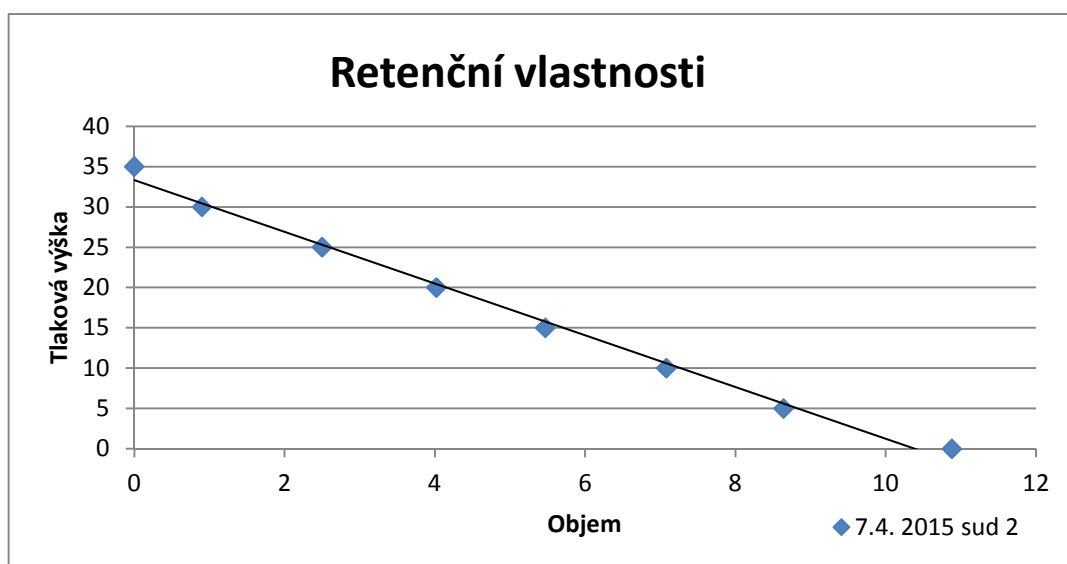
Graf 26: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 3.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



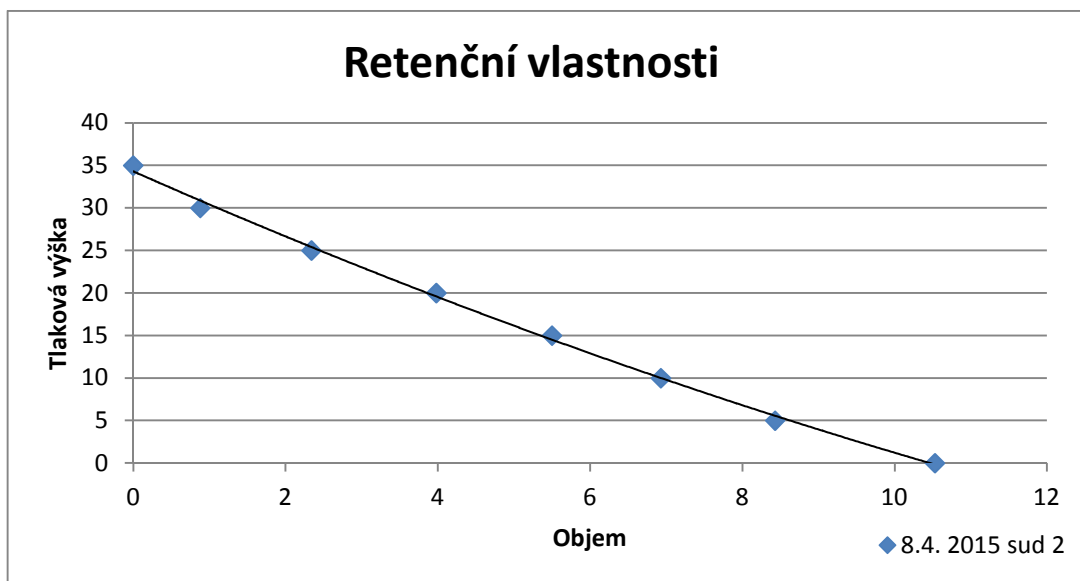
Graf 27: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 4.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



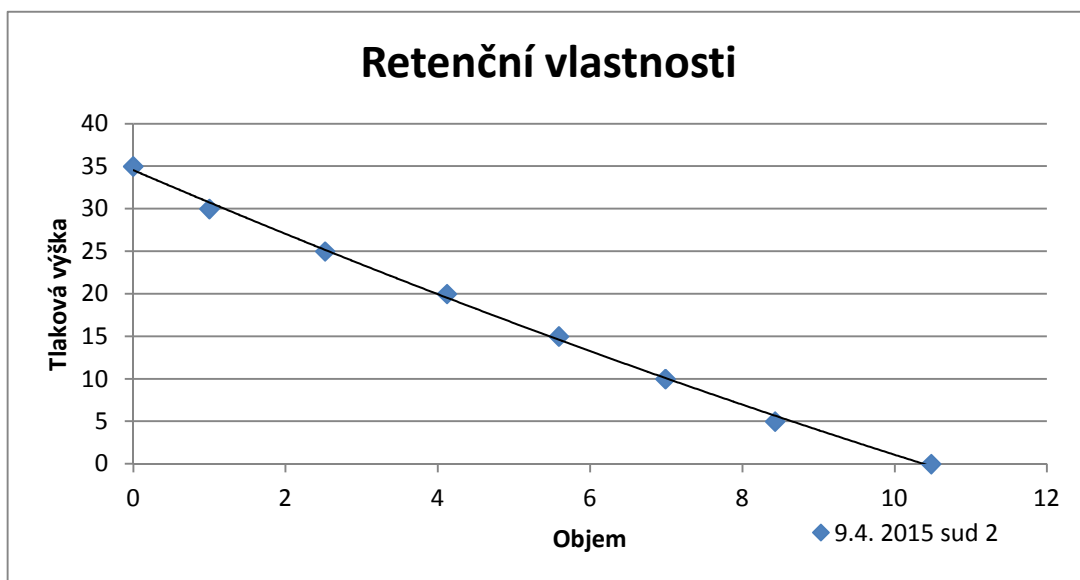
Graf 28: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 5.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



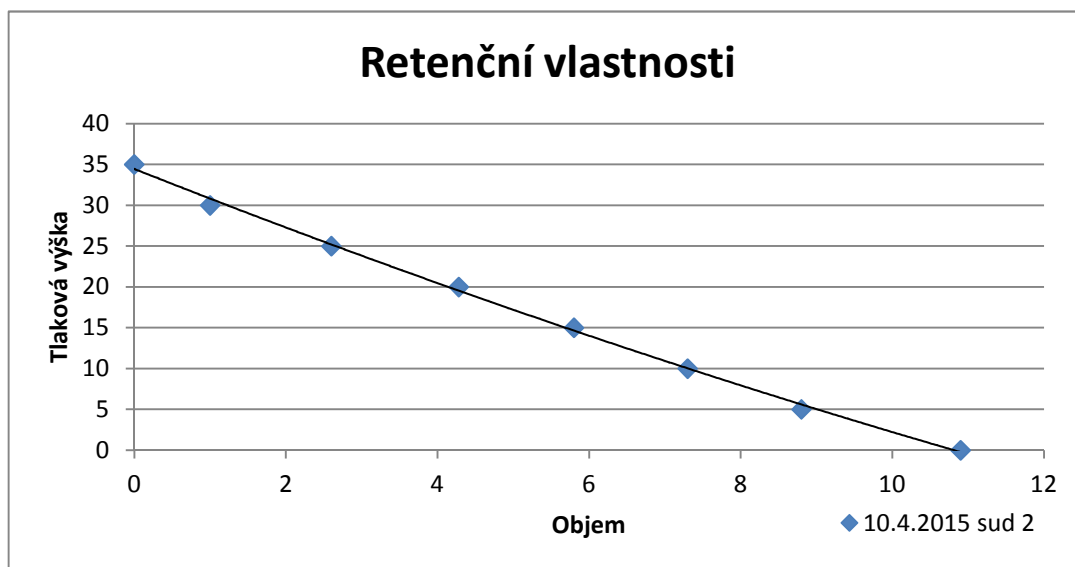
Graf 29: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 7.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci



Graf 30: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 8.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci

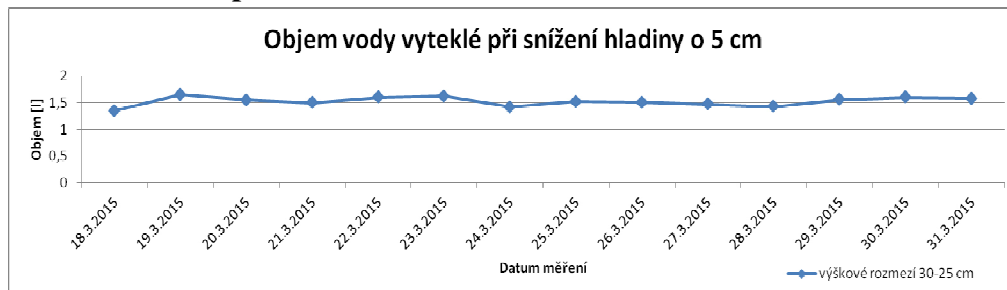


Graf 31: Retenční vlastnosti štěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 9.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnicí trendu, která má klesavou tendenci

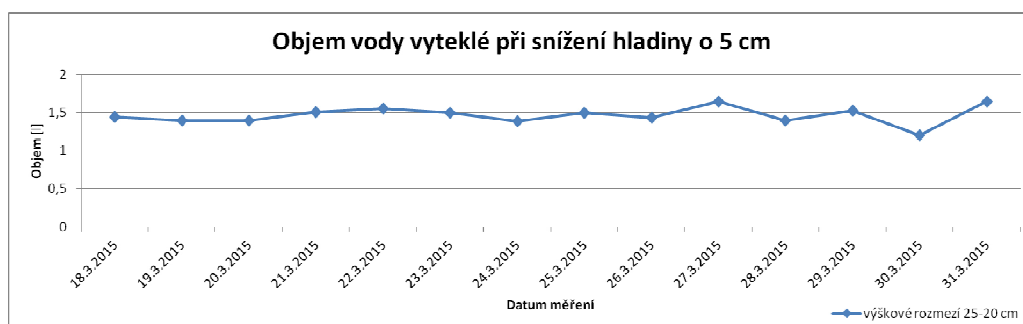


Graf 32: Retenční vlastnosti šěrku u sudu 2, s osázení rákosu s datem měření 10.4. 2015, jednotlivé data jsou proložena spojnici trendu, která má klesavou tendenci

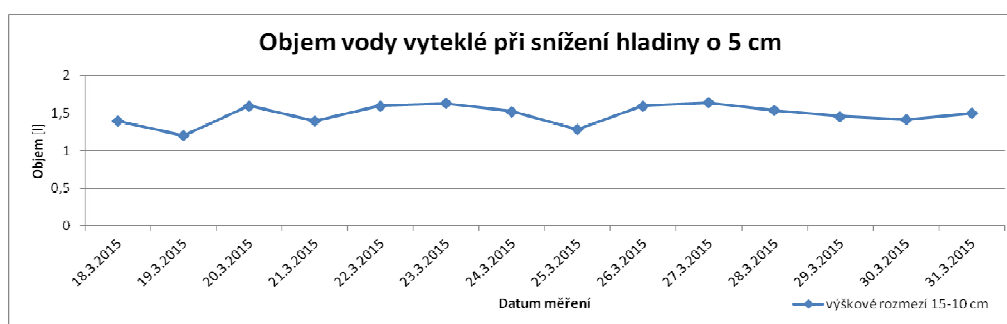
15.2.3 Drenážní pórovitost



Graf 41: Objem vyteklé vody v sudu 1 ve výšce 30-25 cm



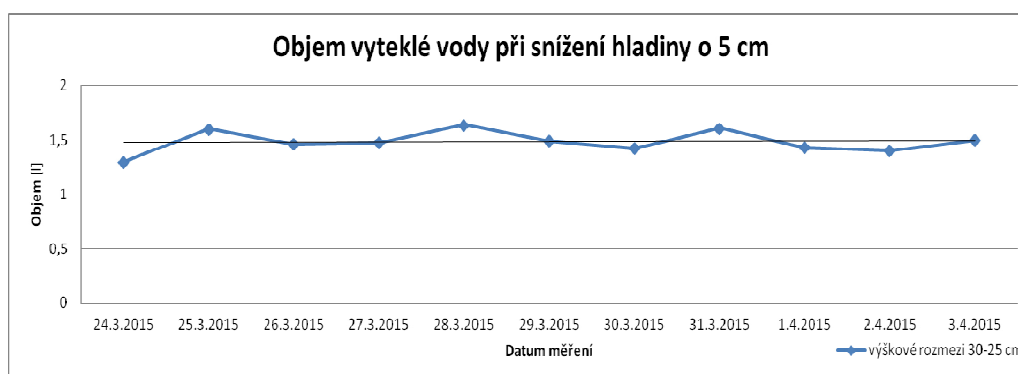
Graf 42: Objem vyteklé vody v sudu 1 ve výšce 25-20 cm



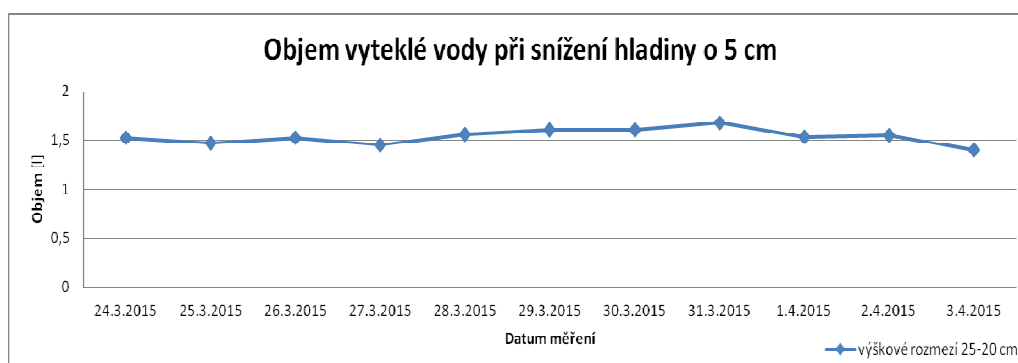
Graf 43: Objem vyteklé vody v sudu 1 ve výšce 15-10 cm



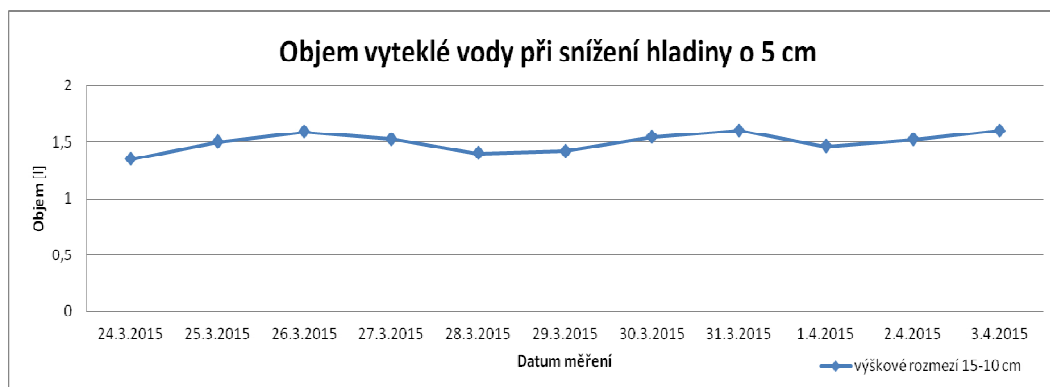
Graf 43: Objem vyteklé vody v sudu 1 ve výšce 10-2 cm



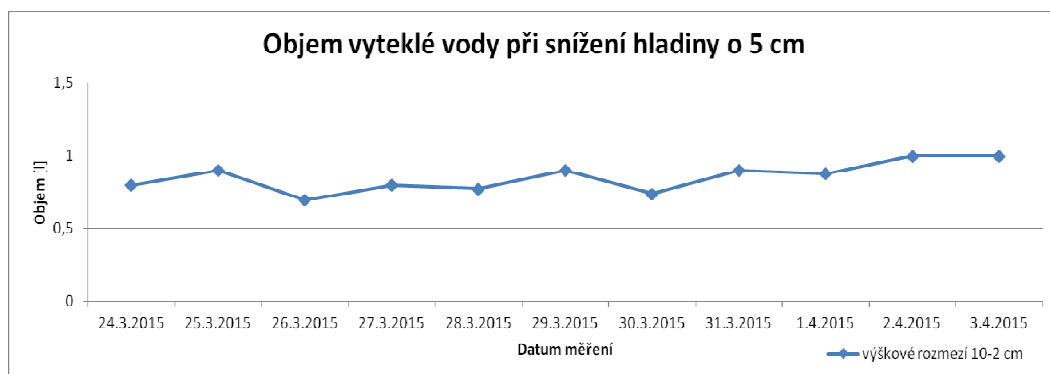
Graf 44: Objem vyteklé vody v sudu 2 ve výšce 30-25 cm



Graf 45: Objem vyteklé vody v sudu 2 ve výšce 25-20 cm



Graf 46: Objem vyteklé vody v sudu 2ve výšce 15-10 cm



Graf 47: Objem vyteklé vody v sudu 2ve výšce 10-2 cm

15.3 Hydraulická vodivost

Odvození vzorce (15)

$$Q_1 = S \cdot K_1 \cdot \frac{\Delta H}{L}$$

$$Q_1 = S \cdot K_1 \cdot \frac{h_1 - h_2}{L_1}$$

$$Q_2 = S \cdot K_2 \cdot \frac{h_2 - h_3}{L_2}$$

$$\frac{Q_1 \cdot L_1}{S \cdot K_1} = h_1 - h_2$$

$$\frac{Q_2 \cdot L_2}{S \cdot K_2} = h_2 - h_3$$

$$h_1 - h_2 + h_2 - h_3 = h_1 - h_3$$

$$\frac{Q_1 \cdot L_1}{S \cdot K_1} + \frac{Q_2 \cdot L_2}{S \cdot K_2} = h_1 - h_3$$

$$Q = \frac{S \cdot (h_1 - h_3)}{\frac{L_1}{K_1} + \frac{L_2}{K_2}}$$

Dosazované hodnoty do vzorce 15

$$h_1 = 40 \text{ cm}$$

$$L_1 = 38 \text{ cm}$$

$$L_2 = 5 \text{ cm}$$

$$h_3 = 13 \text{ cm}$$

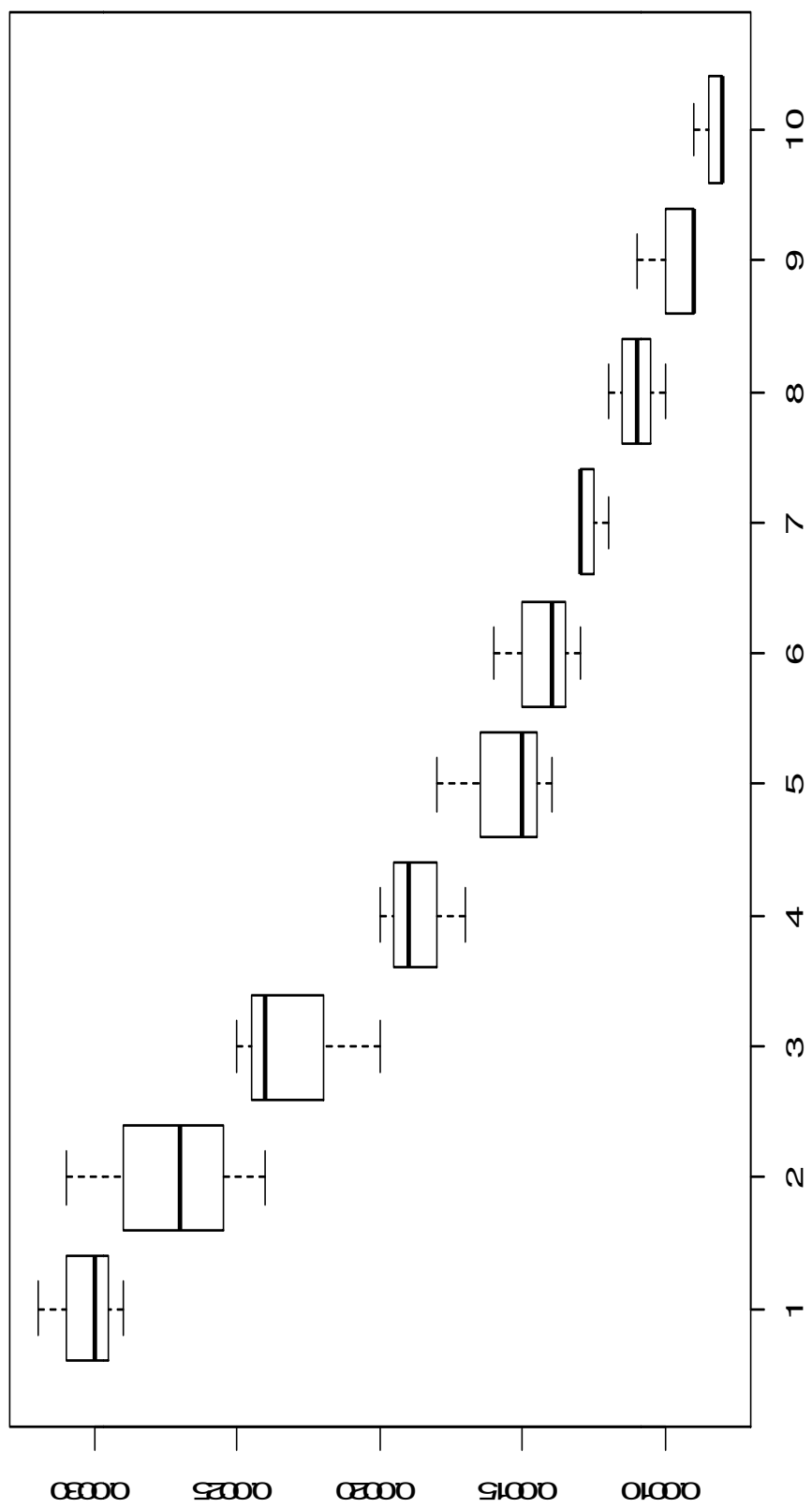
$$d = 29 \text{ cm}$$

hydraulická vodivost použitého písku

$$= 0,00009 \text{ (m/s)}$$

$$Q = 0,16 \text{ m}^3$$

Tab. 2 dosazované hodnoty



Graf 52: Zobrazení naměřené hodnoty při zkoušce hydraulické vodivosti, kde je patrný pokles hydraulické vodivosti s přibývajícími střižinami (Oukropec 2012.)

15.4 Naměřená data, bez rákosu

sud 1		26.2.2015		sud 2		26.2.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,65	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	12,83
40-35	2,65	31:25,5	8	40-35	3,8	27:24,4	9,03
35-30	1,75	23:09,7	6,25	35-30	1,68	28:12,1	7,35
30-25	1,6	30:42,5	4,65	30-25	1,9	29:12,1	5,45
25-20	1,4	26:54,4	3,25	25-20	1,5	24:28,6	3,95
20-15	1,7	25:43,2	1,55	20-15	1,95	25:07,6	2
15-10	1	32:56,3	0,55	15-10	1,4	25:01,2	0,6
10-2	0,55	02:11,9	0	10-2	0,6	01:59,7	0
suma	10,65			suma	12,83		
4.3.2015				4.3.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	12,01
40-35	2,6	35:10,5	8,4	40-35	2,9	29:35,1	9,11
35-30	1,6	33:14,2	6,8	35-30	1,6	26:04,1	7,51
30-25	1,55	34:10,6	5,25	30-25	1,76	25:35,1	5,75
25-20	1,45	31:17,7	3,8	25-20	1,8	28:35,4	3,95
20-15	1,65	29:54,4	2,15	20-15	1,85	21:33,4	2,1
15-10	1,3	31:01	0,85	15-10	1,25	22:16,3	0,85
10-2	0,85	03:59,2	0	10-2	0,85	03:11,3	0
suma	11			suma	12,01		
12.3.2015				12.3.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,28	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,82
40-35	2,5	33:23,4	8,78	40-35	2,9	28:21,4	8,92
35-30	1,58	28:09,0	7,2	35-30	1,55	22:24,2	7,37
30-25	1,7	38:50:00	5,5	30-25	1,6	19:47,4	5,77
25-20	1,8	35:57,7	3,7	25-20	1,85	21:31,3	3,92
20-15	1,1	26:08,9	2,6	20-15	1,45	22:46,8	2,47
15-10	1,6	25:17,4	1	15-10	1,42	24:10,3	1,05
10-2	1	04:20,4	0	10-2	1,05	03:46,3	0
suma	11,28			suma	11,82		

15.5 Naměřená data, s rákosem

Sud 1		18.3.2015		Sud2	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,5		
40-35	3,2	44:57,7	8,3		
35-30	1,55	34:39,9	6,75		
30-25	1,35	37:33,9	5,4		
25-20	1,65	31:27,9	3,75		

20-15	1,15	35:27,5	2,6
15-10	1,4	31:25,9	1,2
10-2	1,2	04:25,4	0
suma	11,5		
		19.3.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,9
40-35	2,8	37:33,2	8,1
35-30	1,75	32:05,2	6,35
30-25	1,65	33:30,3	4,7
25-20	1,2	32:40,3	3,5
20-15	1,3	33:59,8	2,2
15-10	1,2	29:15,1	1
10-2	1	04:56,8	0
suma	10,9		
		23.3.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,05
40-35	2,3	29:28,8	8,75
35-30	1,8	32:15,9	6,95
30-25	1,5	29:54,5	5,45
25-20	1,5	30:30,2	3,95
20-15	1,45	34:25,3	2,5
15-10	1,5	32:29,9	1
10-2	1	05:55,2	0
suma	11,05		
		23.3.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,9
40-35	2,2	33:13,9	8,7
35-30	1,7	35:06,7	7
30-25	1,6	31:09,8	5,4
25-20	1,55	30:10,3	3,85
20-15	1,4	29:55,2	2,45
15-10	1,7	35:22,5	0,75
10-2	0,75	05:00,5	0
suma	10,9		
průměr hodnot ze dne 23.3. 2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	
40-35	2,25	31:21,4	10,975
35-30	1,75	33:41,3	8,725
30-25	1,55	30:32,1	6,975
25-20	1,525	30:20,2	5,425

20-15	1,425	32:10,3	3,9				
15-10	1,6	33:56,2	2,475				
10-2	0,875	05:27,8	0,875				
suma	10,975		0				
		24.3.2015				24.3.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,55	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,3
40-35	2,5	35:37,9	8,05	40-35	2,2	34:17,3	8,1
35-30	1,35	29:57,3	6,7	35-30	1,45	26:41,2	6,65
30-25	1,5	33:40,9	5,2	30-25	1,3	32:02,2	5,35
25-20	1,4	36:58,2	3,8	25-20	1,4	37:51,7	3,95
20-15	1,65	32:51,4	2,15	20-15	1,8	30:58,9	2,15
15-10	1,4	34:18,1	0,75	15-10	1,35	31:33,2	0,8
10-2	0,75	04:31,8	0	10-2	0,8	03:59,4	0
suma	10,55			suma	10,3		
		25.3.2015				25.3.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,92	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,3
40-35	2,35	30:26,7	8,57	40-35	2,45	39:39,3	8,85
35-30	1,32	37:48,6	7,25	35-30	1,7	29:56,9	7,15
30-25	1,6	35:04,2	5,65	30-25	1,6	36:57,3	5,55
25-20	1,65	38:48,3	4	25-20	1,55	36:53,7	4
20-15	1,4	30:48,8	2,6	20-15	1,6	28:38,1	2,4
15-10	1,6	31:34,5	1	15-10	1,5	31:04,6	0,9
10-2	1	04:41,7	0	10-2	0,9	05:36,8	0
suma	10,92			suma	11,3		
		30.3.2015				30.3.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,3	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,08
40-35	1,55	35:46,8	8,75	40-35	2,65	46:26,7	8,43
35-30	1,4	35:27,2	7,35	35-30	1,5	30:00,6	6,93
30-25	1,65	39:59,2	5,7	30-25	1,42	31:48,2	5,51
25-20	1,4	39:28,0	4,3	25-20	1,56	40:40,5	3,95
20-15	1,7	43:15,4	2,6	20-15	1,53	28:18,1	2,42
15-10	1,6	42:48,9	1	15-10	1,62	46:13,7	0,8
10-2	1	05:44,2	0	10-2	0,8	05:45,8	0
suma	10,3			suma	11,08		
		30.3.2015				30.3.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,37	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,51
40-35	2,1	39:59,2	8,27	40-35	2,05	42:33,8	8,46
35-30	1,1	36:17,4	7,17	35-30	1,7	38:10,1	6,76
30-25	1,6	39:01,3	5,57	30-25	1,5	37:17,8	5,26
25-20	1,46	36:40,6	4,11	25-20	1,5	39:46,4	3,76

20-15	1,4	35:16,3	2,71	20-15	1,6	37:07,5	2,16
15-10	1,66	40:01,4	1,05	15-10	1,56	38:59,9	0,6
10-2	1,05	03:51,0	0	10-2	0,6	05:48,6	0
suma	10,37			suma	10,51		
průměr hodnot z 30.3.2015				průměr hodnot z 30.3.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,335	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,795
40-35	1,825	37:53,0	8,51	40-35	2,35	44:30,3	8,445
35-30	1,25	35:52,3	7,26	35-30	1,6	34:05,4	6,845
30-25	1,625	26:00,0	5,635	30-25	1,46	34:33,0	5,385
25-20	1,43	38:04,3	4,205	25-20	1,53	40:13,5	3,855
20-15	1,55	39:15,9	2,655	20-15	1,565	32:42,8	2,29
15-10	1,63	41:25,1	1,025	15-10	1,59	42:36,8	0,7
10-2	1,025	04:47,6	0	10-2	0,7	05:47,2	0
suma	10,335			suma	10,795		
2.4.2015				2.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,95	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,45
40-35	2,55	36:22,8	8,4	40-35	2,05	46:32,9	8,4
35-30	1,4	32:13,7	7	35-30	1,4	34:37,1	7
30-25	1,45	35:18,3	5,55	30-25	1,5	30:31,4	5,5
25-20	1,5	32:47,3	4,05	25-20	1,6	33:48,2	3,9
20-15	1,5	39:04,1	2,55	20-15	1,6	38:23,7	2,3
15-10	1,65	35:34,7	0,9	15-10	1,6	34:19,5	0,7
10-2	0,9	03:32,2	0	10-2	0,7	04:15,5	0
suma	10,95			suma	10,45		
2.4.2015				2.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,15	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,85
40-35	2	38:11,7	8,15	40-35	2,75	40:01,6	8,1
35-30	1,55	32:29,5	6,6	35-30	1,35	33:32,3	6,75
30-25	1,4	36:13,7	5,2	30-25	1,45	32:27,8	5,3
25-20	1,5	37:57,4	3,7	25-20	1,75	31:24,5	3,55
20-15	1,3	38:55,4	2,4	20-15	1,2	40:11,6	2,35
15-10	1,4	34:23,6	1	15-10	1,45	40:11,6	0,9
10-2	1	03:52,6	0	10-2	0,9	05:55,2	0
suma	10,15			suma	10,85		
průměr hodnot z 2.4.2015				průměr hodnot z 2.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,55	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,65
40-35	2,275	37:17,3	8,275	40-35	2,4	43:17,3	8,25
35-30	1,475	32:21,6	6,8	35-30	1,375	34:04,7	6,875
30-25	1,425	35:46,0	5,375	30-25	1,475	31:29,6	5,4

25-20	1,5	35:22,3	3,875	25-20	1,675	32:36,4	3,725
20-15	1,4	38:59,8	2,475	20-15	1,4	39:17,7	2,325
15-10	1,525	34:59,1	0,95	15-10	1,525	07:15,5	0,8
10-2	0,95	03:42,0	0	10-2	0,8	05:05,4	0
suma	10,55			suma	10,65		
		3.4.2015				3.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	9,77	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,57
40-35	1,85	35:41,5	7,92	40-35	2,5	40:36,2	8,07
35-30	1,45	35:41,5	6,47	35-30	1,35	31:18,6	6,72
30-25	1,45	36:55,0	5,02	30-25	1,6	39:03,4	5,12
25-20	1,35	35:42,8	3,67	25-20	1,82	33:21,6	3,3
20-15	1,4	39:55,7	2,27	20-15	1,5	38:34,5	1,8
15-10	1,07	28:56,4	1,2	15-10	1,3	34:11,8	0,5
10-2	1,2	06:09,5	0	10-2	0,5	04:12,0	0
suma	9,77			suma	10,57		
		3.4.2015				3.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,05	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,51
40-35	2,54	44:35,0	8,51	40-35	2,45	37:27,8	9,06
35-30	1,57	27:53,7	6,94	35-30	1,75	26:41,8	7,31
30-25	1,6	31:39,6	5,34	30-25	1,68	30:27,8	5,63
25-20	1,43	31:18,0	3,91	25-20	1,39	30:53,8	4,24
20-15	1,44	30:32,1	2,47	20-15	1,69	30:39,5	2,55
15-10	1,5	31:10,6	0,97	15-10	1,5	36:49,1	1,05
10-2	0,97	08:15,7	0	10-2	1,05	07:10,6	0
suma	11,05			suma	11,51		
		3.4.2015				3.4.2015	
průměr hodnot z 3.4.2015				průměr hodnot z 3.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,41	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,04
40-35	2,195	40:08,3	8,215	40-35	2,475	39:02,0	8,565
35-30	1,51	01:47,6	6,705	35-30	1,55	29:00,2	7,015
30-25	1,525	34:17,3	5,18	30-25	1,64	34:45,6	5,375
25-20	1,39	33:30,4	3,79	25-20	1,605	32:07,7	3,77
20-15	1,42	35:13,9	2,37	20-15	1,595	34:37,0	2,175
15-10	1,285	30:03,5	1,085	15-10	1,4	35:30,4	0,775
10-2	1,085	07:12,6	0	10-2	0,775	05:41,3	0
suma	10,41			suma	11,04		
		4.4.2015				4.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,68	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,33
40-35	3,02	36:04,0	8,66	40-35	2,92	44:55,6	8,41
35-30	1,45	36:32,8	7,21	35-30	1,5	34:30,4	6,91
30-25	1,48	25:43,8	5,73	30-25	1,51	30:39,7	5,4

25-20	1,5	34:17,4	4,23	25-20	1,59	36:23.8	3,81
20-15	1,49	32:36,2	2,74	20-15	1,61	33:43.2	2,2
15-10	1,5	29:09,5	1,24	15-10	1,19	30:13.8	1,01
10-2	1,24	06:04,3	0	10-2	1,01	5:49.5	0
suma	11,68			suma	11,33		
		4.4.2015				4.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,68	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,37
40-35	2,95	38:45.2	8,73	40-35	3,1	39:51.3	8,27
35-30	1,36	32:25.8	7,37	35-30	1,39	29:53.2	6,88
30-25	1,54	34:27.1	5,83	30-25	1,47	32:36.8	5,41
25-20	1,5	30:39.7	4,33	25-20	1,62	31:42.5	3,79
20-15	1,29	29:15.9	3,04	20-15	1,35	32:20.6	2,44
15-10	1,7	28:40.4	1,34	15-10	1,65	29:55.8	0,79
10-2	1,34	8:32.1	0	10-2	0,79	7:37.1	0
suma	11,68			suma	11,37		
		průměr hodnot z 4.4.2015				průměr hodnot z 4.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,68	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,35
40-35	2,985	37:25.5	8,695	40-35	3,01	42:52.5	8,34
35-30	1,405	34:28.5	7,29	35-30	1,445	31:35.7	6,895
30-25	1,51	29:37.4	5,78	30-25	1,49	31:37.5	5,405
25-20	1,5	32:28.2	4,28	25-20	1,605	33:32.2	3,8
20-15	1,39	31:25.7	2,89	20-15	1,48	32:30.1	2,32
15-10	1,6	28:25.3	1,29	15-10	1,42	29:40.2	0,9
10-2	1,29	7:16.3	0	10-2	0,9	6:43.9	0
suma	11,68			suma	11,35		
		5.4.2015				5.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,81	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,86
40-35	3,04	37:17.2	8,77	40-35	2,56	36:25.5	8,3
35-30	1,54	30:06.1	7,23	35-30	1,49	29:43.7	6,81
30-25	1,49	30:11.8	5,74	30-25	1,44	29:54.6	5,37
25-20	1,59	32:13.6	4,15	25-20	1,46	32:54.8	3,91
20-15	1,39	27:09.5	2,76	20-15	1,6	38:34.5	2,31
15-10	1,7	30:09.8	1,06	15-10	1,75	32:43.9	0,56
10-2	1,06	7:28.7	0	10-2	0,56	5:03.4	0
suma	11,81			suma	10,86		
		5.4.2015				5.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,69	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,27
40-35	2,89	40:38,8	8,8	40-35	3,04	38:48.6	8,23
35-30	1,44	29:08,2	7,36	35-30	1,36	30:46.4	6,87
30-25	1,45	25:02.8	5,91	30-25	1,41	26:21.4	5,46

25-20	1,51	29:19.8	4,4	25-20	1,66	28:51.3	3,8
20-15	1,49	30:16.5	2,91	20-15	1,54	32:42.5	2,26
15-10	1,58	31:15.4	1,33	15-10	1,34	29:03.2	0,92
10-2	1,33	7:08.2	0	10-2	0,92	6:35.4	0
suma	11,69			suma	11,27		
průměr hodnot z 5.4.2015				průměr hodnot z 5.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,75	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	11,065
40-35	2,965	38:32.5	8,785	40-35	2,8	37:38.5	8,265
35-30	1,49	29:13.1	7,295	35-30	1,425	29:49.5	6,84
30-25	1,47	27:11.8	5,825	30-25	1,425	27:42.5	5,415
25-20	1,55	30:17.7	4,275	25-20	1,56	30:52.5	3,855
20-15	1,44	28:17.5	2,835	20-15	1,57	35:38.1	2,285
15-10	1,64	30:14.5	1,195	15-10	1,545	30:25.4	0,74
10-2	1,195	7:18.1	0	10-2	0,74	6:21.5	0
suma	11,75			suma	11,065		
7.4.2015				7.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,35	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,88
40-35	1,71	34:40,8	8,64	40-35	2,24	39:24,6	8,64
35-30	1,56	31:51,9	7,08	35-30	1,56	32:38,4	7,08
30-25	1,43	29:38,1	5,65	30-25	1,61	32:39,4	5,47
25-20	1,51	31:13,6	4,14	25-20	1,45	28:58,2	4,02
20-15	1,6	38:29,5	2,54	20-15	1,52	37:11,9	2,5
15-10	1,54	32:41,0	1	15-10	1,6	34:59,4	0,9
10-2	1	04:32,3	0	10-2	0,9	5:36	0
suma	10,35			suma	10,88		
8.4.2015				8.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,04	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,53
40-35	1,46	34:43,8	8,58	40-35	2,1	37:01,7	8,43
35-30	1,46	34:55,9	7,12	35-30	1,5	32:05,4	6,93
30-25	1,56	35:21,6	5,56	30-25	1,43	30:27,7	5,5
25-20	1,4	27:27,4	4,16	25-20	1,52	29:54,4	3,98
20-15	1,7	39:44,3	2,46	20-15	1,64	37:42,0	2,34
15-10	1,46	28:18,2	1	15-10	1,46	29:52,8	0,88
10-2	1	04:38,4	0	10-2	0,88	05:32,2	0
suma	10,04			suma	10,53		
9.4.2015				9.4.2015			
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,02	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,48
40-35	1,6	37:31,8	8,42	40-35	2,05	39:12,3	8,43
35-30	1,3	27:45,7	7,12	35-30	1,44	29:56,5	6,99
30-25	1,6	36:43,6	5,52	30-25	1,4	33:13,8	5,59

25-20	1,4	29:05,8	4,12	25-20	1,47	29:44,4	4,12
20-15	1,6	37:32,1	2,52	20-15	1,6	36:51,5	2,52
15-10	1,42	30:19,7	1,1	15-10	1,52	33:56,4	1
10-2	1,1	05:56,7	0	10-2	1	06:01,6	0
suma	10,02			suma	10,48		
		10.4.2015				10.4.2015	
výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,15	výška hladiny(cm)	V (l)	t(min)	10,9
40-35	1,7	39:12,8	8,45	40-35	2,1	40:32,4	8,8
35-30	1,4	34:05,6	7,05	35-30	1,5	31:54,7	7,3
30-25	1,58	35:44,7	5,47	30-25	1,5	35:25,4	5,8
25-20	1,44	30:48,7	4,03	25-20	1,52	33:47,9	4,28
20-15	1,56	36:38,1	2,47	20-15	1,68	38:06,7	2,6
15-10	1,5	31:15,5	0,97	15-10	1,6	35:36,2	1
10-2	0,97	05:41,7	0	10-2	1	6:24,6	0
suma	10,15			suma	10,9		