

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA ZDRAVOTNÍHO A EKOLOGICKÉHO INŽENÝRSTVÍ



VLIV SOLENÍ SILNIČNÍCH KOMUNIKACÍ
NA CHOVÁNÍ TĚŽKÝCH KOVŮ
VE VSAKOVACÍCH ZAŘÍZENÍCH

DIPLOMOVÁ PRÁCE

JUDITA RUNCZIKOVÁ

Vedoucí diplomové práce: doc. Dr. Ing. Ivana Kabelková

leden 2019



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Runcziková</u>	Jméno: <u>Judita</u>	Osobní číslo: <u>424360</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra zdravotního a ekologického inženýrství</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Vodní hospodářství a vodní stavby</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Vliv solení silničních komunikací na chování těžkých kovů ve vsakovacích zařízeních</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Effect of road deicing salts on behavior of heavy metals in biofilters</u>	
Pokyny pro vypracování: Cílem práce je stanovit, za jakých podmínek a po jaké době dochází k vyplavování těžkých kovů ze vsakovacích zařízení do podzemní vody. Práce bude sestávat z literární rešerše a z laboratorních experimentů. Účelem rešerše je zjištění koncentrací TK a solí ve srážkovém odtoku z území o různém charakteru a jejich chování ve vsakovacích zařízeních vč. ovlivňujících faktorů a průzkum možností, jak toto chování napodobit laboratorně (použitá zařízení, postup při experimentaci). Vlastní experimentace se zaměří na napodobení 1 roku provozu vsakovacích zařízení bez a s ovlivněním solemi, především na sledování koncentrací na odtoku z referenčního a ze solemi zatíženého zařízení a na stanovení koncentrací TK v pevné matici v různých vrstvách zařízení.	
Seznam doporučené literatury:	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>doc. Dr. Ing. Ivana Kabelková</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>2.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

.....
Místo vypracování, úplné datum

.....
Judita Runcziková

Poděkování:

Děkuji všem, kteří přispěli radou a pomocí při tvorbě této diplomové práce – především doc. Dr. Ing. Ivaně Kabelkové, doc. Mgr. Janě Nábělkové, Ph.D. a doc. Ing. Davidu Stránskému, Ph.D.

Annotation

The master's thesis deals with effect of road de-icing salts on behavior of heavy metals from stormwater roads runoff in bioretention filters. Laboratory experiment contained two columns which simulated bioretention filter subjected to dynamic inflow of synthetic stormwater containing dissolved heavy metals (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) representing stormwater runoff from road with middle traffic density. It was simulated first year of an operation of the bioretention filter.

Keywords: heavy metals, de-icing salt, bioretention filter

Anotace

Diplomová práce se zabývá vlivem zimního solení silničních komunikací na chování těžkých kovů z dešťového odtoku ze silnic ve vsakovacích zařízeních. Laboratorní experiment obnášel dynamické zatěžování dvou válců vsakovacího zařízení syntetickou dešťovou vodou s rozpuštěnými formami těžkých kovů (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn) reprezentující dešťový odtok ze středně zatížené silniční komunikace. Simulován byl první rok provozu zařízení.

Klíčová slova: těžké kovy, posypová sůl, vsakovací zařízení

Obsah

1	Úvod	7
2	Cíle práce.....	8
3	Rešerše.....	9
3.1	Znečištění dešťového odtoku a jeho chování ve vsakovacích zařízeních.....	9
3.1.1	Vsakovací zařízení.....	9
3.1.2	Znečištění dešťového odtoku z pozemních komunikací	10
3.1.3	Chování těžkých kovů ve vsakovacích zařízeních	17
3.2	Laboratorní experimenty.....	20
3.2.1	Experimentální zařízení.....	20
3.2.2	Zatěžování zařízení.....	26
3.2.3	Měření a analýzy	30
4	Experimentace	32
4.1	Materiály a metody	32
4.1.1	Experimentální zařízení.....	32
4.1.2	Zatěžování zařízení.....	36
4.1.3	Měření a analýzy	39
4.2	Výsledky a diskuze	41
4.2.1	Časové průběhy parametrů ve vodě.....	41
4.2.2	Analýzy pevné matrice	53
5	Závěr.....	59
6	Literatura	61
7	Seznam příloh.....	67
	Příloha 1: Vyhodnocení vsakovacích zkoušek	68
	Příloha 2: Přehled dešťových událostí	70
	Příloha 3: Průběh přítoku a odtoku.....	72
	Příloha 4: Analýza vývodní trubičky.....	73

1 Úvod

Silniční komunikace jsou převážně zpevněné nepropustné plochy. Dešťový odtok z nich je znečištěný řadou látek, obsahuje nerozpuštěné látky, vázané a rozpuštěné formy těžkých kovů, polyaromatické uhlovodíky a mnohé další [1]. Během zimního období je navíc aplikována posypová sůl pro údržbu komunikace, kterou jsou do prostředí vnášeny chloridy. Znečištění dešťového odtoku má tak negativní dopad na životní prostředí, na půdu i vodní ekosystém [2].

Dešťový odtok může být odváděn do vsakovacího zařízení, které tvoří zatravněná vrstva půdy. Voda je skrz zařízení vsakována do podzemní vody a je též při průtoku zařízením fyzikálními, chemickými a biologickými procesy čištěna. Přítomnost posypové soli v dešťovém odtoku snižuje účinnost odstraňování těžkých kovů ve vsakovacích zařízeních [3] a může uvolňovat již akumulované těžké kovy [4].

Tato práce se zabývá problematikou možného zhoršení kvality podzemní vody v prvním roce provozu vsakovacího zařízení a jeho případného umocnění vlivem solení silničních komunikací. Za tímto účelem bylo vystavěno experimentální vsakovací zařízení, které bylo vystaveno dynamickému přítoku reprezentujícímu roční průběh dešťového odtoku ze silniční komunikace do vsakovacího zařízení.

2 Cíle práce

Cílem práce je na základě literární rešerše navrhnout laboratorní experiment zaměřený na chování těžkých kovů ve vsakovacích zařízeních za vlivu soli a experimentací zjistit, kde v zařízení jsou těžké kovy akumulovány a jestli již v prvním roce provozu zařízení může docházet k vyplavování těžkých kovů ze vsakovacího zařízení a zda je rozdíl mezi chováním těžkých kovů v zařízení vystaveném vlivu solení a zařízení bez solení. Případně zjistit, zda je účinnost odstraňování těžkých kovů ovlivněna dynamikou přítokových událostí.

3 Rešerše

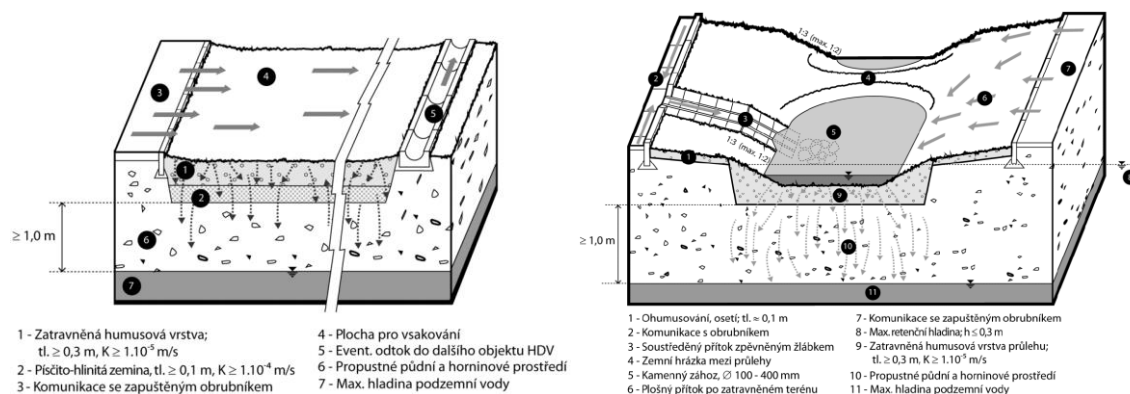
3.1 Znečištění dešťového odtoku a jeho chování ve vsakovacích zařízeních

3.1.1 Vsakovací zařízení

Vsakovací zařízení je jedním z objektů hospodaření s dešťovými vodami (HDV). „Hospodaření s dešťovými vodami je způsob nakládání se srážkovými vodami (převážně dešťovými), který klade důraz na zachování přirozené bilance vody v území po jeho urbanizaci. Základním přístupem HDV je decentrální způsob odvodnění.“ [5].

Vsakovací zařízení lze rozdělit podle hydraulického zatížení zařízení, které lze orientačně vyjádřit poměrem redukované plochy odvodněného území ku ploše vsakovacího zařízení (A_{red}/A_{vsak}). Poměr menší nebo rovno než 5 je volen pro plošné vsakování a menší nebo rovno než 15 (a větší než 5) pro decentrální vsakování v průlehu, případně doplněného rýhou [5]. Poměr A_{red}/A_{vsak} pro vsakování v průlehu, tj. interval 5 až 15, lze vyjádřit i tak, že plocha vsakovacího zařízení je rovna 7 až 20 % redukované plochy odvodňovaného území.

Vtok má dešťovou vodu rozvádět rovnoměrně po ploše zařízení. Při plošném vsakování není vytvořen prostor pro retenci vody, při vsakování v průlehu je vytvořen prostor krátkodobé retence o maximální hloubce 30 cm (Obr. 1) [5].



Obr. 1 – Objekt plošného vsakování (vlevo) a vsakovací průleh s povrchovým přívodem vody (vpravo) [5]

Při návrhu vsakovacího zařízení je vhodné přihlídnout k místním specifikám [6], požadavky na navrhovaná vsakovací zařízení jsou definovány v [5]. Hlavní část zařízení tvoří filtrační vrstvy s vegetačním pokryvem a případným retenčním prostorem [3].

Zatravněná humusová vrstva je „půdní prostředí se zvýšeným obsahem humusu, s udržovaným travním pokryvem a se specifickými vlastnostmi“ [5]. Tato vrstva zvyšuje účinnost čištění. I proto přes ni mohou, kromě přípustných vod, být vsakovány i podmíněčně

přípustné vody, které jsou více znečištěné. Humusová vrstva půdy o mocnosti minimálně 20 cm (optimálně 30 cm) obsahuje přibližně 10 hm. % jílu, minimálně 3 hm. % humusu a je souvisle pokryta trávou (o doporučené výšce 10 až 15 cm). Hodnota pH půdy se pohybuje mezi 6 a 9, hodnota koeficientu hydraulické vodivosti mezi 10^{-4} a 10^{-5} m.s⁻¹. Zatravnění je možné provést osetím nebo odrnováním ve vhodné sezóně [5].

Pod zatravněnou humusovou vrstvou se nachází podkladní vrstva. Její mocnost je minimálně 30 cm (optimálně 50 cm). Obsahuje přibližně 10 až 35 hm. % jílu a méně než 1 hm. % humusu. V případě průlehu doplněného rýhou je pod zatravněnou humusovou vrstvou a podkladní vrstvou situována rýha, tj. vrstva šterku frakce 16/32 mm, který neobsahuje jemné částice. Ty jsou předem odstraněny propláchnutím materiálu a proti případnému zanášení je chráněn geotextilií. Použitá zemina nemá být kontaminovaná [5].

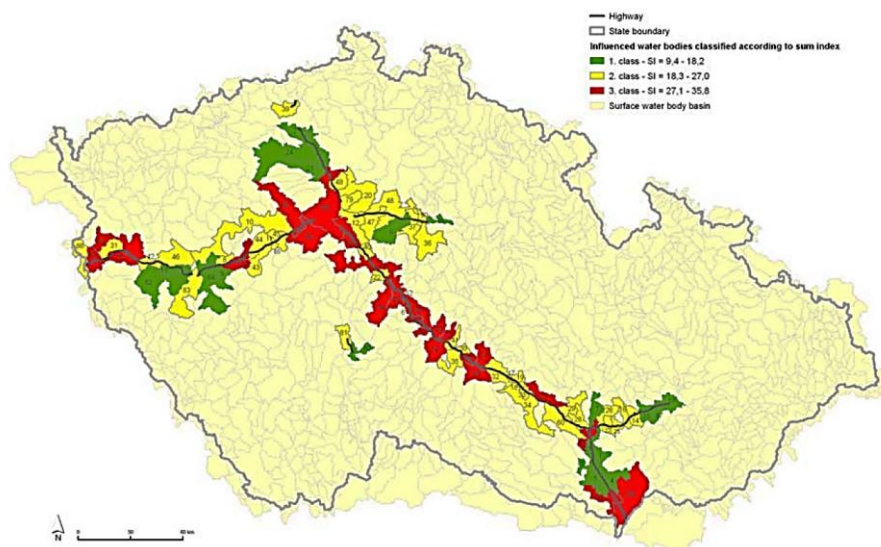
3.1.2 Znečištění dešťového odtoku z pozemních komunikací

Pozemní komunikace jsou různě znečištěné převážně nepropustné zpevněné plochy, které mohou být rozřazeny dle využití území do kategorií parkoviště, mosty a silnice, dálnice, které se dále dělí dle intenzity dopravy [7]. Dešťový odtok z nich je znečištěn organickými i anorganickými látkami [6], obsahuje nerozpuštěné látky, těžké kovy, živiny, pesticidy, mikroorganismy [8], uhlovodíky [2], např. PAU [6], ropné látky [9], posypové soli obsahující chloridy [6] atd.

Charakteristiky dešťového odtoku jsou proměnlivé prostorově i časově a ovlivňuje je řada faktorů, tj. místní a klimatické podmínky. V dané lokalitě mají na kvalitu dešťového odtoku z dopravních ploch a koncentraci kovů v něm vliv např. využití území [2, 8, 10] a charakteristiky dopravy jako intenzita provozu (vozidel/den) [8], resp. hustota dopravy, režim jízdy [11], rychlost vozidel, návrh komunikace [6] a její údržba a čištění [12], „množství a složení paliva, typ silnice, též typ a podmínky motoru“ [11]. Charakteristika dešťového odtoku je proměnlivá sezónně. Byly zjištěny rozdílné koncentrace látek v odtoku způsobeném deštěm, táním sněhu či deštěm za přítomnosti sněhu [2]. Sezónní vliv byl v [2] pozorován pro Cu, Zn, TOC a NL – vyšších průměrných hodnot dosahovaly parametry v zimním období, v odtocích z tání. Koncentrace se může měnit i v průběhu odtokové události [2]. Může být pozorován první splach, tj. vyšší koncentrace znečištění v počáteční fázi odtoku [9]. Vliv na kvalitu vody mají úhrn srážek, bezdeštné období předcházející srážce [8], intenzita a doba trvání deště, roční období [2, 6], suchá a mokrá atmosférická depozice [2, 10] aj. Vliv předcházejícího bezdeštného období je snižován čištěním ulic,

větrém a turbulencemi vzduchu způsobenými dopravou – v [2] je jeho vliv na koncentrace znečištění uvedený jako nízký.

Na zjištěné hodnoty koncentrací má vliv i způsob monitoringu, např. délka bezdeštného období definující novou dešťovou událost (0,5-10 h), minimální úhrn srážky a minimální doba trvání deště pro odběr vzorku [7].



Obr. 2 – Potenciální ohrožení vodních útvarů povrchové vody odtokem z dálnic a rychlostních komunikací v ČR [11]

Kovy

Odtok z pozemních komunikací je silně zatížen těžkými kovy (TK) [7], což jsou kovy, které mají měrnou hmotnost vyšší než $4500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ [13]. V dešťovém odtoku byla určena přítomnost Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Ni a Zn [8], ale i Co, W, Sb, Mn, Rh, Pd, Pt a Ti (Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3). Vyšších koncentrací z TK dosahují zejm. Pb, Cu a Zn [7]. V [7] jsou uváděny pro Evropu orientační hodnoty koncentrací Pb $30 \mu\text{g/l}$, Cu $60 \mu\text{g/l}$ a Zn $250 \mu\text{g/l}$, pro Severní Ameriku Pb $15 \mu\text{g/l}$, Cu $30 \mu\text{g/l}$ a Zn $170 \mu\text{g/l}$. Obecně jsou o 20-30 % vyšší koncentrace Cu, Pb a Zn v Evropě oproti Severní Americe [8]. Poměr koncentrací Zn ku Cu je zjištěn nejčastěji 3 až 5 [7].

Kovy se mohou nacházet ve vázané nebo rozpuštěné formě, přičemž jejich poměr závisí na okolních podmínkách, např. pH a redox. Poměr forem je „silně ovlivněn pH deště, přítomností NL, rozpustností všech látek, dobou zdržení na vozovce a typem povrchu“ [7]. Při změně podmínek může dojít i ke změně poměru forem [7]. Většina kovů ve vázané formě je navázána na jemné částice (menší než $20 \mu\text{m}$) [8].

V [8] je uváděno, že Al, As, Cd, Cr, Fe a Pb jsou zejm. ve vázané a Cu, Ni a Zn spíše v rozpuštěné formě. Dle [7] jsou Cr a Pb většinou vázané, Cd a Ni rozpuštěné a Cu a Zn

bez převažující formy či spíše rozpuštěné. Dle [9] jsou Cu, Fe a Zn spíše vázané. Průměrný podíl rozpuštěné formy k celkové udává [2] – Zn 27 %, Cu 21 %, Ni 17 %, Pb 0 %, tzn. pod 30 % rozpuštěné formy Cu a Zn a veškeré Pb nerozpuštěné. V zimě byly pozorovány vyšší koncentrace rozpuštěné formy Cd, Cr a Ni. Koncentrace rozpuštěné formy Cu, Pb a Zn se během roku výrazněji neměnily [7]. Poměr forem TK není dle [2] příliš odlišný sezónně, liší se zejm. mezi jednotlivými odtokovými událostmi.

Koncentrace se zvyšuje při změnách rychlosti, tj. brždění a rozjíždění, které zvyšují abrazi materiálů vozidla (pneumatik, brzd) a emisi výfukových plynů. Z tohoto důvodu mohou být koncentrace kovů např. v odtoku z komunikací ve městech, resp. silnic s intenzitou větší než 5000 vozidel/den, větší než z dálnic [7], resp. vyšší v lokalitách se světelnou signalizací či „stop-and-go“ provozem [6]. Vyšší koncentrace kovů jsou pozorovány v zimě. Důvodem jsou vyšší opotřebení, koroze způsobená posypovou solí i menší intenzita deště [7] a koroze vlivem chladného a vlhkého počasí [2].

Koncentrace kovů závisí i na míře jejich využití v rámci prvků vozidel a komunikací. Např. koncentrace Zn je lokálně vyšší při jeho použití na bezpečnostních zařízeních komunikací [7]. Koncentrace Pb vykazuje v posledních desetiletích klesající exponenciální [8] trend, který je zapříčiněn snížením jeho používání – např. omezením jeho obsahu v benzínu a nahrazováním v prvcích vozidel [7, 8]. Ostatní kovy žádný dlouhodobý trend nevykazují [8].

Přehled koncentrací TK v odtoku z pozemních komunikací z literatury je uveden v Tab. 1. Nejvyšší koncentrace z kovů vykazuje Fe [7]. Koncentrace Zn jsou uváděny jako druhé nejvyšší a jsou velmi proměnlivé dle lokality, mají hodnoty 162 $\mu\text{g/l}$ (medián mediánů koncentrací) či 215 $\mu\text{g/l}$ (medián průměrů koncentrací) [7]. V odtoku způsobeném dešťovými událostmi jsou průměrné koncentrace Zn pod 500 $\mu\text{g/l}$, zatímco v odtoku z tání sněhu činí 1200 $\mu\text{g/l}$ [2]. Koncentrace Pb je v současnosti cca 15 $\mu\text{g/l}$, resp. 18 $\mu\text{g/l}$ (medián mediánů koncentrací) či 19,2 $\mu\text{g/l}$ (medián průměrů koncentrací) [7]. V [8] je uváděna nynější průměrná koncentrace Pb pod 45 $\mu\text{g/l}$. V ČR byly měřeny koncentrace Pb 104,9-237 $\mu\text{g/l}$ při intenzitě do 20 tis. vozidel/den a koncentrace 19,5-78,1 $\mu\text{g/l}$ do 500 vozidel/den [9]. Koncentrace Cd a rozpuštěné formy Cr se pohybují blízko zjištěného limitu [2, 7], přičemž Cd je zjištěno jen v některých měřeních [2].

Tab. 1 – Koncentrace kovů v odtoku ze silničních komunikací

literatura	[14]	[11]	[7]	[7]	[8]	[15]	[16]	[17]
č. pozn.	1	2	3	4	5	6	7	8
jednotky	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
Al celk.	19				150; 4900			
Al rozp.					20; 160			
Cd celk.	4,5	0,77	3,2	4,1	18,2-350,6		0,3-13	1,9/3,7
Cd rozp.			0,2	1,3	ND-24,4			
Cr celk.	15	6,8	12,0	17,9	0,056-16,6	6-50 (27)		11/13
Cr rozp.			1,2	4,5	0,03-0,32			
Cu celk.	150	52,8	64,6	63,5	11,7	11-604 (100)		97/65
Cu rozp.			16,0	35,5	3,36			
Fe celk.	6				334-3580			
Fe rozp.					37; 70			
Pb celk.	0,3	6,1	32,3	33,1	5,64-319	<5-405 (43)	3-2410	170/224
Pb rozp.			0,9	3,0	0,14-3,3			
Ni celk.	40	132	16,3	19,2	9	4-403 (35)	4-70	11/27
Ni rozp.			0,9	14,9	1,2; 3,08			
Zn celk.	500	400	285	338	130-1784	15-3470 (400)	53-3550	407/345
Zn rozp.			68,0	217	22,5-140			

Pozn.: celk.: celková koncentrace; rozp.: koncentrace rozpuštěné formy kovu; ND: pod detekčním limitem;

1) průměrná koncentrace v dešťovém odtoku z ulic a silnic;

2) vyhodnocení měření z dálnice D1 v ČR, 90 % percentil;

3) průměrná koncentrace pro středně zatížené silnice s intenzitou 5000-15000 vozidel/den;

4) průměrná koncentrace pro dálnice v urbanizovaném území s intenzitou nad 30 tis. vozidel/den;

5) průměrná koncentrace pro dálnice v Evropě s max. intenzitou 12 tis. až 120 tis. vozidel/den;

6) koncentrace pro dálnice (v závorce uveden medián koncentrace);

7) koncentrace pro dálnice a hlavní silnice v Evropě;

8) průměrná koncentrace pro hlavní silnice/dálnice

Z dalších prvků byly v dešťovém odtoku z pozemních komunikací naměřeny Co, W, Sb, Mn, Rh, Pd, Pt a Ti o koncentracích uvedených v Tab. 2 [7] a As a Al uvedené v Tab. 3 [8]. Většina W, Pd a Pt se vyskytovala v rozpuštěné formě, v jednotlivých měřeních byla většina Mn buď ve formě vázané nebo ve formě rozpuštěné, většina Ti ve formě vázané [7]. V [9] měřená Hg s koncentracemi 0,82-3,45 µg/l nejspíš pochází z posypové materiálu použitého pro zimní údržbu, v [18] je uvedena koncentrace Hg 3,22 µg/l. Z dalších prvků bylo v odtoku ze silnic měřeno Ba, Be, Sb, Se, V a Mo [7]. Sb je indikátorem intenzity dopravy [19].

Tab. 2 – Koncentrace prvků Co, Mn, Pd, Pt, Rh, Sb, Ti a W [7]

prvek	Co	Mn	Pd	Pt	Rh	Sb	Ti	W
jedn.	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	mg/l	mg/l
typ	p	p	n	n	n	p	p	p
konc. celk.	1,5-13,3	11,1-659	0,34-8	0,0065-24	0,08-1,14	0,8-10,7	12,7	pod 2,5-25
konc. rozp.	0,1-15,1	9-255				1,2-5,05	0,026	

Pozn.: p: průměrná; n: = neurčeno; konc. celk.: celková koncentrace; konc. rozp.: koncentrace rozpuštěné formy kovů

Tab. 3 – Koncentrace prvků Al, As [8], Pd, Pt, Rh [20] a Hg [11]

prvek	Al	As	Pd	Pt	Rh	Hg
jedn.	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l	μg/l
konc. celk.	150-4900	0,7-11,6	<0,02-0,8	<0,01-0,208	<0,005-0,01	0,27
konc. rozp.	20-160	0,2-1,4				

Pozn.: Al pro dálnice v Evropě; As pro dálnice v Severní Americe; Hg pro dálnici D1 v ČR (90 % percentil); konc. celk.: celková koncentrace; konc. rozp.: koncentrace rozpuštěné formy kovů

Inertní a chemické posypové materiály pro zimní údržbu komunikací

V zimním období jsou vozovky udržovány pomocí rozmrazovacích prostředků (posypové soli) nebo aplikací hrubozrnných materiálů (šterk, písek) [21]. Koncentraci kovů zvyšuje jak posypová sůl, tak aplikovaný šterk mechanicky zvyšující opotřebení vozidel [2].

Mezi používané chemické materiály patří posypové soli (či jejich směs) na bázi chloridů, tj. NaCl, MgCl₂ a CaCl₂ a na bázi octanu, tj. CMA a KA [21]. Posypová sůl obsahuje zejm. NaCl a aditiva, kterými jsou protispékací látky – hexakynoželeznaté sloučeniny (v ČR 75 mg CN/kg). Koncentrace chloridových iontů se pohybuje mezi stovkami miligramů/l až gramy/l [9], v [11] činila koncentrace Q90 (tj. 90 % percentil) pro odtok z dálnice v ČR v zimním období 1510 mg/l. Koncentrace Na byla nižší než 25 mg/l bez aplikace posypové soli a 10400 mg/l s aplikací, což odpovídalo konduktivitě pod 300 μS/cm bez aplikace a 52000 μS/cm s aplikací [2].

V [14] je uvedena průměrná koncentrace Cl 150 mg/l a v [17] 106 mg/l pro hlavní silnice a 159 mg/l pro dálnice spolu s koncentrací Na pro tyto kategorie 108 mg/l a 194 mg/l.

Další složky a parametry

Hlavní zdroje živin v odtoku z pozemních komunikací nejsou spjaté s dopravou, živiny pocházejí především z okolí (půda, vegetace). Jsou jimi **dusík** a **fosfor** v různých

sloučeninách (formách) [8] (Tab. 4). Vyšší koncentrace byly zjištěny v odtoku z tání oproti odtoku způsobenému srážkou [2].

Tab. 4 – Koncentrace živin

literatura	[14]	[8]	[8]	[18]	[16]	[17]
č. pozn.	1	2	3	4	5	6
jednotky	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
NH ₄	1,2	0,27-1	1; 2,3			0,9/0,5
NH ₃			0,83-4,6	0,07-0,22		
NO ₂	0,4	0,725	ND-0,3	0,013-0,25		
NO ₃	6	2,87-6,7	<0,05 -2,7	0,306-1,4		5/2,52
NO ₃ +NO ₂				0,15-1,636		
TKN		2,1; 2,3	1,13-9,6	0,335-55,0		
TN				4,1	0-4	
P-PO ₄			0,1-0,4			
TP	0,7	0,91	0,13-0,9	0,113-0,998		0,29/0,2

Pozn.: ND: pod detekčním limitem;

- 1) průměrná koncentrace v dešťovém odtoku z ulic a silnic;
- 2) průměrná koncentrace pro dálnice v Evropě;
- 3) průměrná koncentrace pro dálnice v Severní Americe;
- 4) průměrná koncentrace pro dálnice (vzato jako koncentrace N a P);
- 5) koncentrace pro dálnice a hlavní silnice v Evropě;
- 6) průměrná koncentrace pro hlavní silnice/dálnice

Dešťový odtok obsahuje nerozpuštěné látky (Tab. 5), dle [22] je v sedimentu 70 % jemných částic menších než 63 μm a 28 % částic o velikosti 63 až 2000 μm.

Tab. 5 – Koncentrace NL, CHSK, BSK, DOC a TOC

literatura	[14]	[8]	[18]	[2]	[16]	[16]	[17]
č. pozn.	1	2	3	4	5	6	7
jednotky	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
NL	240	46-476,3	45-798	18,3-3165 (355)	110-5700	11-5400	163/153
CHSK		64-252,5	14,7-272				
BSK		12	12,7-37		12-32	2-27	
DOC	7	18,7-66,9		3,6-81 (21)			
TOC	16	11,8-46	24-77	10-355 (71)			

Pozn.: v závorce uveden průměr;

- 1) průměrná koncentrace v dešťovém odtoku z ulic a silnic;
- 2) průměrná koncentrace pro dálnice v Evropě a Severní Americe;
- 3) průměrná koncentrace pro dálnice;
- 4) minimální až maximální analyzovaná koncentrace v odtoku z vysoce zatížené městské silnice;
- 5) koncentrace pro dálnice a hlavní silnice v Evropě;
- 6) koncentrace pro městské silnice v Evropě;
- 7) průměrná koncentrace pro hlavní silnice/dálnice

Koncentrace **CaCO₃** je uvedena v [8] pro dálnice v Severní Americe: 30,3; 36,5; 52,5 a 78,9 mg/l spolu s pH 7; 7,1; 7,4; 6,7. Koncentrace **Ca** je dle [17] 31 mg/l pro hlavní silnice a 37 mg/l pro dálnice a koncentrace **K** je pro tytéž kategorie 2 a 5 mg/l. Koncentrace **Mg**

dle [18] činí 1,062 mg/l a dle [17] je 1 mg/l pro hlavní silnice a 5 mg/l pro dálnice. Koncentrace **SO₄** je uvedena v [14] hodnotou 40 mg/l a v [17] hodnotami 15 a 39 mg/l.

Hodnotu **pH** (Tab. 6) ovlivňuje dle [7] typ povrchu vozovky (betonový povrch zvyšuje pH, asfaltový povrch má jen malý vliv).

Tab. 6 – pH

literatura	zdroj odtoku	pH (-)
[8]	dálnice v Evropě	6,4-7,7
[8]	dálnice v Severní Americe	6,7-7,4
[18]	dálnice	7,1-7,2
[14]	ulice a silnice	7,4
[2]	vysoce zatížená městská silnice	6,2-8,3 (7,5)
[7]	asfaltová vozovka	5,4-8,2 (6,8)
[7]	betonová vozovka	5,6-7,9 (7,2)
[7]	kombinace asfaltové a betonové vozovky	6,4-7,5 (6,9)

Pozn.: v závorce uveden medián pH

V [18] je pro dálnice uvedena koncentrace **tuků a olejů** 2,7-27 mg/l, v [8] pro dálnice v Severní Americe 2,5 až 14 mg/l, [14] uvádí koncentraci minerálních olejů 8 mg/l.

Celková koncentrace **uhlovodíků** v odtoku z dálnic a hlavních silnic je dle [16] 7,5-400 µg/l a v odtoku z městských silnic 2,8-31 µg/l. V dešťovém odtoku se vyskytují i POPs, tj. i PCB, které jsou jejich podskupinou [10]. V [23] byly v odtoku z urbanizovaného území měřeny koncentrace **PCB** ve Švýcarsku od hodnot pod detekčním limitem do 403 ng/l. Výsledky odpovídaly konstantní koncentraci 35,3 ng/l PCB v dešťové vodě a za bezdeštného období akumulaci 2,9 ng/(m².den) [23]. Dešťový odtok též obsahuje **PAU** [8] – vysokomolekulární pocházející ze spalování ve vozidlech [10] jsou spíše ve vázané formě [9] či nízkomolekulární v rozpuštěné formě [8]. Na dálnicích v ČR se jejich koncentrace pohybuje řádově ve stovkách ng/l [24]. [14] uvádí pro ulice a silnice koncentraci 3 mg/l a [16] koncentraci 0,03-6 µg/l pro dálnice a hlavní silnice a koncentraci 1-3,5 µg/l pro městské silnice. V [17] je pro hlavní silnice uvedeno 1,65 µg/l a pro dálnice 2,61 µg/l.

Dále může odtok obsahovat **mikroorganismy**, např. koliformní bakterie [8] v celkové koncentraci 570-6200 organismů/100 ml [18], a **pesticidy** v koncentraci 0,4-48,1 µg/l pro městské silnice a 0-17,5 µg/l pro městské dálnice [16].

3.1.3 Chování těžkých kovů ve vsakovacích zařízeních

Procesy a faktory

V zařízení dochází k množství mechanických (fyzikálních), chemických a biologických (biochemických) procesů [4]. Znečištění či jeho část je v zařízení zachyceno, odstraněno nebo zařízením prochází a dále proniká do podzemní vody. Jak ukazuje tabulka D.1 v [5], vsakování přes zatravněnou humusovou vrstvu je vhodným způsobem odstraňování hlavních složek znečištění, a to jak v pevné (vázané na NL) tak v rozpuštěné formě. Nerozpuštěné látky jsou odstraňovány filtrací – voda je filtrována gravitačně skrz vsakovací zařízení, částice jsou zachytávány v pórech filtračního média, čímž ho ucpávají a snižují postupně koeficient hydraulické vodivosti, a tedy kapacitu zařízení [15]. Tím jsou odstraňovány TK na tyto částice navázané [4]. Rozpuštěné formy kovů jsou odstraňovány pomocí iontové výměny (tj. výměny kationtů), specifické adsorpce, srážení, komplexace filtračním médiem, adsorpce biofilmem a absorpce vegetací [3, 4, 25]. Specifická adsorpce postupuje v pořadí $Cd < Zn < Cu < Pb$ [4]. Množství odstraněných TK tedy závisí na sorpční kapacitě filtračního média [15], která je významná zejm. ve vrchní vrstvě půdy [4].

Přítomnost některých dalších iontů může účinnost odstraňování daného TK snižovat, ale např. přítomnost PO_4^{3-} mobilitu TK redukuje [26].

Na chování TK ve vsakovacím zařízení, resp. na procesy má vliv řada faktorů. **Filtrační médium** je hlavním příjemcem TK. Zrnitost materiálu ovlivňuje proces filtrace, sorpce je ovlivněna „*obsahem humusu a jílu a oxidů železa, hliníku a manganu*“ [5]. Kovy jsou lépe odstraňovány v půdách alkalických než kyselých, jelikož „*od pH 6 není většina kovů mobilních*“ [5], zkoumány jsou materiály se zvýšenou schopností zachytávat znečištění (např. zeolit) [26]. V [25] byly porovnávány účinnosti odstraňování TK pro různá filtrační média. Podobné hodnoty účinnosti odstraňování ve zkoumaných médiích byly stanoveny pro Cr, Cu, Pb a Zn, zatímco účinnost odstraňování Ni se lišila dle použitého média [25].

Vegetace je také příjemcem některých TK [4], závisí na druhu vegetace, ročním období a dalších faktorech. Vegetace se podílí 5-10 % na odstranění TK [4], její vliv na jednotlivé procesy může být přímý či nepřímý [3]. Nepřímo ovlivňuje odstraňování TK skrze pH půdy, biofilm a kořeny [3], také odstraňuje živiny [4]. Proti kolmataci média pomáhá vegetace tím, že udržuje makropóry svými kořeny [27]. Přítomnost vegetace celkově přispívá k vyšší životnosti zařízení [28].

Teplota ovlivňuje zejm. biochemické procesy skrze omezení či podporu biologické aktivity [4]. Adsorpce TK půdou není teplotou výrazně ovlivněna [4]. V [3, 29] se odtokové koncentrace TK při různých teplotách bez přidání soli výrazně nelišily. V [4] byl vliv teploty (bez aplikace soli) pozorován pouze na rozpuštěnou formu Cu, která se váže preferenčně na organickou hmotu, příp. v menší míře i na rozpuštěnou formu Pb, též vázající se na organickou hmotu. Při vyšší teplotě rychleji organická hmota odumírá a vyplavuje se ze zařízení, proto je odtoková koncentrace Cu vyšší (dvojnásobná) [4]. Teplota ovlivňuje též absorpci znečištění vegetací – účinnost odstranění při 15 °C je nižší než při 25 °C [4].

Sůl ovlivňuje výměnu kationtů, tvorbu chloridových komplexů a disperzi koloidů [30], chloridy též mohou negativně ovlivňovat mikroorganismy [4]. Sodík se v půdě váže na záporně nabitě částice a vytěsňuje vápník s hořčíkem. Posloupnost vytěsňování je $H^+ = Al^{3+} > Ca^{2+} = Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ [21], Na^+ též vytěsňuje NH_4^+ a Cl^- vytěsňuje fosforečnany [31]. Záleží též na druhu soli – NaCl, $CaCl_2$ a $MgCl_2$ [26]. Sůl NaCl snižuje účinnost odstraňování TK [3] a může uvolňovat již akumulované TK, tj. remobilizovat TK již adsorbované na filtrační médium, skrze iontovou výměnu způsobenou Na [4]. Též zvyšuje zastoupení rozpuštěné formy organické hmoty (DOM), na které se může vázat remobilizované Cu [3]. Po aplikaci dávky s vyšší koncentrací soli NaCl do zařízení došlo při dalších událostech k postupnému snižování rychlosti infiltrace a k vyplavování jemných částic (zvýšení odtokové koncentrace NL přibližně ze 150 na 550 mg/l), které vznikají narušením půdní struktury výměnou dvojmocných iontů za jednomocné [31]. $MgCl_2$ mobilizuje Cd [30]. Chloridy nejsou zařízením odstraňovány, jsou nereaktivní a mobilní [3] a „jako rozpuštěné látky pronikají do podzemních vod“ [5].

Negativní vliv soli působí synergicky s vyšší teplotou, je tedy pozorován **kombinovaný vliv teploty a soli** [3]. Ve slaném prostředí je účinnost odstraňování TK nižší při vyšších teplotách. Zimní solení při nízkých teplotách snižuje účinnost odstraňování TK méně, než vliv mořské soli v teplých přímořských oblastech [29].

Saturovaná zóna (s přídavkem C) vzniká v dolní části zařízení umístěním výtoku vody v určité výšce nade dnem zařízení. Mocnost této vrstvy je dána výškou výtoku nade dnem [32]. Saturované prostředí slouží jako retence vody pro vegetaci [33] a k vyrovnání vlhkosti ve filtračním médiu [34]. Je možno do ní přidat organický materiál, a tím zvýšit obsah uhlíku, který napomáhá jak při odstraňování TK, tak vegetaci během suchých období [29]. Dle [29] působí saturovaná zóna na účinnost odstraňování TK pozitivně (zejm. Pb [34]) a též snižuje negativní vliv soli.

Vliv délky bezdeštného období (resp. suchého období před aplikací dešťové vody v experimentu) na účinnost odstraňování TK je dle [35] malý a závisí na kovu a na filtračním médiu [35]. Snížení účinnosti odstraňování TK bylo v [34] pozorováno až po 3-4 týdnech sucha. Délka období ovlivňuje dobu depozice znečištění, a tedy charakteristiky dešťového odtoku [2]. Podstatným faktor účinnosti odstraňování TK je **intenzita srážky** skrz dobu kontaktu, s jejímž poklesem klesá i účinnost [26].

Odstraňování TK ve vsakovacích zařízeních

Účinnost odstraňování TK se liší pro jednotlivé TK a je ovlivněna spolupůsobením mnoha faktorů, může se pohybovat i přes 90 % [29]. V [1] je uváděna účinnost odstraňování Cu 65-96 %, Pb 83-100 % a Zn 92-99 % a v [34] účinnost odstraňování Cu 70 %, Pb 90 % a Zn 85 až 90 % po 7 týdnech suchého období. Dle [25] roste účinnost v řadě Ni < Cu < Cr < Pb = Zn. V [29] je uváděna vysoká účinnost i za přítomnosti solí, vyjma rozpuštěné formy Cu a Pb, které vykazují i zápornou účinnost.

Pro většinu TK se největší koncentrace TK nacházejí ve svrchní vrstvě zatravněného zařízení a se vzrůstající hloubkou koncentrace TK prudce klesá. Od hloubky cca 30 cm je koncentrace TK blízká pozad'ové koncentraci v půdě [1]. V horních 10 cm zařízení byly měřeny nejvyšší koncentrace Cd, Cu, Pb a Zn [1], v [15] uvádí nejvyšší koncentrace Cr, Cu a Zn v horních 5 cm a koncentraci Pb po hloubce konstantní. Koncentrace TK klesá i s rostoucí vzdáleností od vtoku do zařízení, čemuž odpovídají i snižující se koncentrace TK v půdě podél silničních komunikací dále od komunikace [14]. Ve vzdálenosti 1,5 m od vtoku dosahuje zhruba hodnot pozad'ové koncentrace [1].

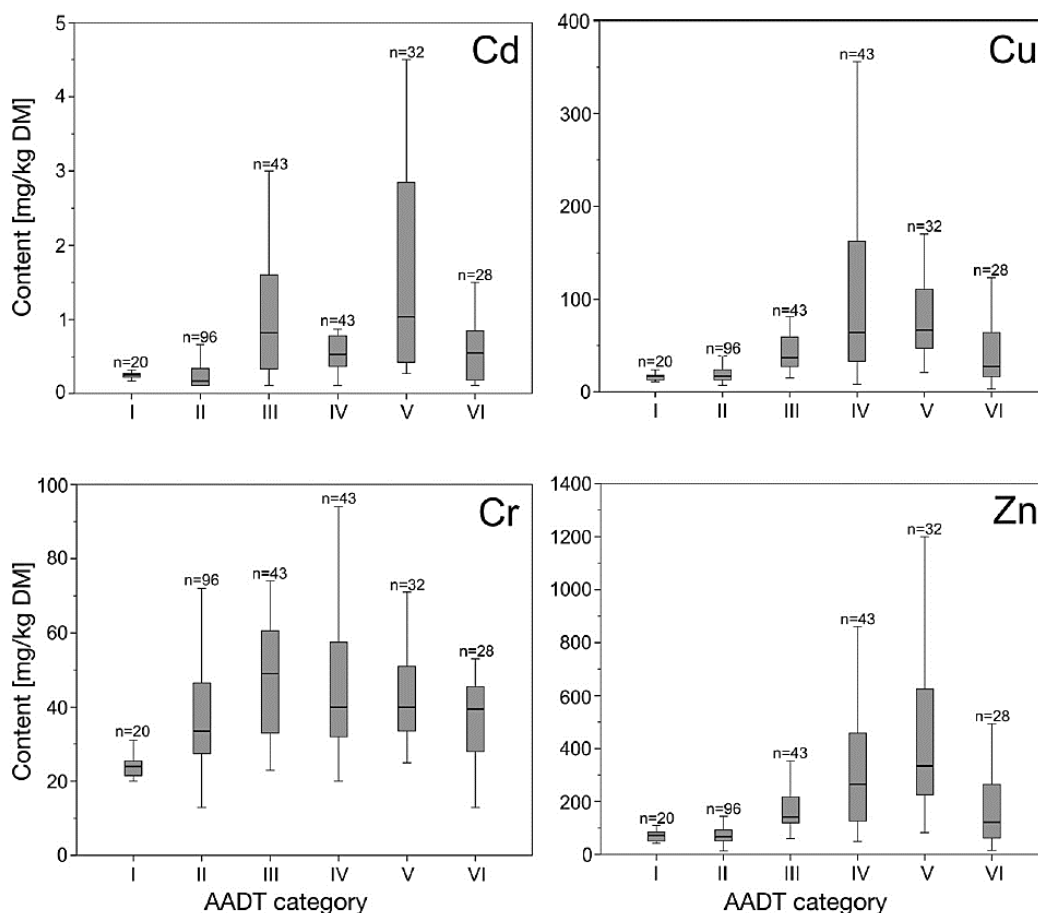
Koncentrace TK v zařízení závisí na účinnosti odstraňování, ale i na přítokové koncentraci – v [1] byly zjištěny koncentrace klesající v pořadí Zn, Cu, Pb a Cd, což odpovídá i posloupnosti koncentrací kovů v dešťovém odtoku.

Statistické vyhodnocení koncentrací TK měřených ve svrchní vrstvě infiltračních průlehů s vegetací provozovaných v Německu je uvedeno v [6] (Tab. 7, Obr. 3).

Tab. 7 – Statistické vyhodnocení obsahu těžkých kovů (mg/kg) [6]

TK	min.	medián	průměr	max.	SD
Cd	0,11	0,36	1,21	23,0	2,97
Cr	13,0	37,0	44,5	181	27,4
Cu	3,10	28,0	61,5	730	84,8
Pb	2,60	27,0	71,9	676	113
Zn	13,0	120	257	2520	347

Pozn.: SD: směrodatná odchylka



Obr. 3 – Obsah těžkých kovů Cd, Cu, Cr a Zn pro kategorie dle intenzity provozu (odlehlá pozorování nejsou zobrazena): (I) parkoviště, (II) silnice s intenzitou 0-5000 vozidel/den, (III) silnice s intenzitou 5000-15000 vozidel/den, (IV) silnice s intenzitou 15000-30000 vozidel/den, (V) silnice s intenzitou 30000-80000 vozidel/den, (VI) silnice s intenzitou nad 80 tis. vozidel/den [6]

3.2 Laboratorní experimenty

Laboratorní experimenty vsakovacích, resp. filtračních zařízení jsou součástí studií zabývajících se řadou problematik, například odstraňováním znečištění z přítékajících dešťových vod z území o různém charakteru nebo čištěním šedé vody. Zkoumány jsou účinnosti a způsoby odstraňování různých složek znečištění, jejich zachycení ve filtračním médiu a vegetaci, vlivy působících faktorů, schopnosti filtračních materiálů atd. Jedná se o nerozpuštěné látky, živiny, kovy (zejm. těžké kovy), soli, mikroorganismy aj. Výstupem těchto výzkumů jsou mj. podklady pro vhodný návrh a provoz těchto zařízení.

3.2.1 Experimentální zařízení

Aparatura

Experimentální zařízení pro posouzení vlivu určitého faktoru bývá sestaveno minimálně ve 2 exemplářích. Pro ověření výsledku experimentu se používá větší počet

shodných zařízení, např. 3 [3, 29] nebo 5 [4, 36, 37]. Tok experimentálním zařízením může být veden buď shora dolů (gravitační) nebo zdola nahoru, od čehož se odvíjí další návrh zařízení.

Častým základním tvarem zařízení je dutý válec (trubka) umístěný vertikálně na svou kruhovou základnu. Rozměry a materiály se v jednotlivých studiích liší. Výška zařízení se odvíjí od požadované hloubky filtrační náplně a retenčního prostoru. Vnitřní průměr válce se pohybuje řádově v desítkách centimetrů. Použity byly válce o průměru např. 74 mm [27], 94 mm [38], 95 mm [39], 100 mm [26, 40], 150 mm [32, 37, 41], 158 mm [42], 191 mm [31], 200 mm [33, 43] a 375-380 mm [3, 4, 34]. Výška zařízení se pohybovala od 458 mm [39], přes 600 mm [40, 42], 700 mm [27], 800 mm [32, 37], 1000 mm [33], 1220 mm [31], 1300 mm [3, 4, 34, 41], do 1600 mm [39].

Materiálem válce bývá PVC (využíváno je též vyráběné plastové potrubí) [3, 4, 33, 34, 39, 41], plexisklo [31], nebo sklo [15]. Skleněný válec byl použit v [15] při experimentu za saturovaných podmínek, při toku válcem zdola nahoru. V [44] je doporučeno, aby látky (filtrační médium i voda) přišly do kontaktu jen se sklem, křemenným pískem, ušlechtilou ocelí nebo PTFE. V závislosti na použitém materiálu a úpravě povrchu stěn jsou válec či jeho dílce průhledné či nikoli. Kvůli nutnosti zajištění dostatku osvětlení pro růst případné vegetace a kvůli retenci pro dávkovanou vodu [4, 34] byla použita PVC trubka délky 900 mm, na jejíž horní konec byla přilepena průhledná perspex [34] či plexiglas [3] trubka či vysoce průhledná PVC trubka [4] délky 400 mm (Obr. 4). V [35] byl vytvořen vertikální průhled pro zjišťování růstu kořenů. V [38] byl celý válec z perspex trubky délky 1600 mm. Pro zamezení preferenčního proudění podél stěn válce je povrch zdrsňen pomocí skelného papíru [33, 39], nebo jsou stěny opískovány [3, 41]. Dle [15] je možné stěnový efekt zanedbat při poměru průměru válce ku velikosti zrn filtračního média větším než 10, proto byl použit poměr průměru válce ku průměrné velikosti částic cca 20. Pro experiment s tokem zdola nahoru je poměr vnitřního průměru válce ku maximální velikosti zrn doporučen větší než 5 a průměr válce větší než 5 cm [44].



Obr. 4 – Válce biofiltru v klimatické místnosti [4]

Dalším využívaným základním tvarem experimentálního zařízení je kvádr, též postavený vertikálně na svou základnu o menší ploše. Příkladem může být plastový kontejner se čtvercovou základnou o šířce 350 mm se zaoblenými rohy [45] (Obr. 5).



Obr. 5 – Sestavené zařízení filtru na dešťovou vodu [45]

Vtok je řešen hadičkou zaústěnou do horní části zařízení (v [27] měla průměr 6 mm), dávkování vody ze zásobní nádrže probíhá peristaltickým čerpadlem [43] (Obr. 6). Odtok je řešen vyústěním drenážního potrubí, které je uloženo v drenážní vrstvě náplně. Průměr potrubí je např. 54 mm [3] či 58 mm [4]. Otvory perforované trubky jsou menší než velikost částic drenážní vrstvy, např. 6 mm pro štěrk o velikosti 8-15 mm [35]. V [39] je odtok řešen pomocí dvoucentimetrového otvoru ve středu dna. Výška umístění odtoku má vliv na to, zda a o jaké mocnosti je ve spodní části válce vytvořena saturovaná zóna. V [32] má odtokové potrubí dnovou větev a stoupající větev pro vytvoření saturované zóny, obě jsou osazeny uzávěrem (Obr. 7). Odtok je zaústěn do PE nádoby [4], která v [3] byla průhledná a vymytá kyselinou.



Obr. 6 – Sestava válců s distribuční nádrží a peristaltickými čerpadly [43]

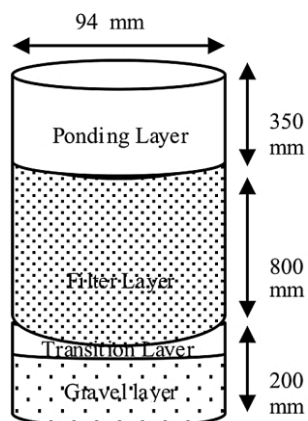


Obr. 7 – (a) Experimentální sestava zařízení ve skleníku, (b) Schematický diagram válců biofiltru (s připojenou stoupající větví odtoku pro saturovanou zónou) [32]

Zařízení umístěná v exteriéru jsou vystavena proměnlivé teplotě vzduchu dle období, v němž experiment probíhá. V interiéru je teplota udržovaná buď na úrovni pokojové teploty nebo na určité teplotě dané experimentem. V [4] zkoumající vliv nízkých teplot na odstraňování těžkých kovů a živin byly válce umístěny v místnostech s teplotami 2, 8 a 20 °C. Při experimentu zkoumajícím vliv posypové soli na mobilizaci kovů a organické hmoty byly válce v prostředí s teplotou 6 °C [46], vliv periodicky zvýšených koncentrací solí na odstraňování živin se zjišťoval v prostředí s teplotou 24 °C [31]. V [3, 29] bylo pro zkoumání vlivu teploty a soli zvoleno teplot $4,6 \pm 0,6$ °C a $17,1 \pm 1,5$ °C.

Filtrační náplň

Filtrační náplň je volena tak, aby reprezentovala skladbu stávajícího nebo navrhovaného filtračního zařízení. Často je sestavena z jednotlivých vrstev různého složení (Obr. 8).



Obr. 8 – Schematický diagram válce biofiltru [38]

Nejhlouběji je v zařízení umístěna drenážní vrstva, kterou tvoří hrubší částice. Drenážní vrstvu o mocnosti 70 mm tvoří štěrk 4-8 mm [4] nebo písek 2-4 mm [3], vrstvu o mocnosti 100 mm tvoří tři postupně navazující frakce štěrku [41], o mocnosti 200 mm štěrk 8-15 mm [35], o mocnosti 53 mm štěrk 2-5 mm [42] a o mocnosti 30 mm štěrk 4-6 mm [27]. V [43] měla drenážní vrstva mocnost 305 mm. V [40] je dno řešeno sítkou z nerezové oceli, na níž je umístěna drenážní vrstva ze skleněných kuliček o průměru 2 cm.

Nad drenážní vrstvou je situována přechodová vrstva, která slouží k zabránění vyplavování částic z horních filtračních vrstev do drenážní vrstvy [4, 38]. V některých experimentech je tato vrstva vynechána [27], v jiných je nahrazena geotextilií [35]. Přechodovou vrstvu o mocnosti 30 mm [3, 4] tvoří štěrk 2-4 mm [4] či písek 1-2 mm [3, 38], pískem je tvořena vrstva o mocnosti 70 mm [31], 100 mm (písek 0,15-0,3 mm) [41] a 200 mm [37]. V [42] tvoří přechodovou vrstvu o mocnosti 80 mm zemina s velikostí částic 0,5-2 mm.

Filtrační vrstva je umístěna nad přechodovou vrstvou. V experimentech se filtrační vrstvy vzájemně odlišují mocností i složením. Filtrační vrstva je tvořena dvěma vrstvami písku o různých frakcích, každá o mocnosti 400 mm [3], vrstvu o mocnosti 300 mm tvoří hlinitý písek [37] a půdní médium tvoří filtrační vrstvu o mocnosti 770 mm [31], 300-500 mm [27] a o mocnosti 400 mm [42]. V [38] je vrstva o mocnosti 800 mm tvořena materiálem o velikosti menší než 1 mm s 8 % organické hmoty. V [4] je tvořena vrstvou jemného až středního písku bez obsahu částic menších než 0,075 mm o mocnosti 400 mm

a nad ní se nachází vrstva písku s 14 % šterku (2-4 mm) a s méně než 4 % prachu o mocnosti 400 mm. V [41] na sebe navazují vrstva o mocnosti 100 mm směsi písku, vermikulitu, perlitu a ornice, další o mocnosti 200 mm bez ornice a 100 mm doplňkové vrstvy zeolitu a/nebo granulovaného aktivního uhlí.

Horní část filtrační vrstvy se často vyznačuje vyšším obsahem organického materiálu, např. filtrační materiál ve vrchních 100 mm obsahuje 20 % ornice (píscité hlíny s vysokým obsahem organické hmoty) [4, 41] či ve vrchních 400 mm 15 % ornice [3].

Ve spodní části zařízení může být vytvořena saturovaná zóna, s případným přídavkem zdroje uhlíku – např. dřevěných hoblin [29, 41], pilin a prachu [32].

Materiál může být před jeho použitím v zařízení upraven pro dosažení požadovaných vlastností – lze ho např. sušit při 105 °C po dobu 24 h, prosévat a použít pouze určité frakce [27]. V [29] byl písek před použitím vysušen, v [31] byl šterk a písek do spodních vrstev zařízení před použitím vyprán. Materiál ve válci lze třikrát na 24 h nasytit vodou, aby došlo k vyplavení jemných částic a pro podporu biologické aktivity [4], v [38] byla dávkována 2 týdny dvakrát týdně kohoutková voda intenzitou 100 ml/min po dobu 3 hodin. V [32] byla mj. pro vyplavení volných částic dvakrát týdně dávkována semi-syntetická dešťová voda. V [44] se kvůli ze začátku zvýšenému zakalení doporučuje výměna vody v množství 2-3 objemů pórů.

Popis ukládání náplně bez jejího vrstvení obsahuje např. [39]. Na dno je nejprve umístěna vrstva skelné vaty, poté je celý válec (o DN 95 mm a výšce 457,5 mm) naplněn směsí a následně třikrát upuštěn z 5 cm výšky na pracovní plochu. Do nově vzniklého prostoru je doplněna směs a celý sloupec je zhutněn závažím o hmotnosti 1 kg upuštěným třikrát z 5 cm výšky nad povrchem sloupce [39]. Jiná literatura doporučuje plnění postupné [44]. V [32] byly jednotlivé vrstvy, pro něž byl určen objem a hmotnost, hutněny pomocí závaží pouštěného na povrch ze 100 mm výšky, dokud nebyla zajištěna požadovaná tloušťka a pórovitost vrstvy. V [38] bylo blíže nepopsané plnění navrženo tak, aby k ustavení požadovaných mocností vrstev došlo během 2 týdnů, v nichž je do válce dávkována dvakrát týdně voda po dobu 3 h intenzitou 100 ml/min.

Vegetace

Druh rostlin je volen na základě svého typického použití pro vsakovací zařízení v dané lokalitě nebo na základě zkoumání jejich vhodnosti pro použití. V [28] bylo použito trav *Panicum virgatum*, *Kentucky-31* a *Bromus ciliatus*, k zatěžování došlo po jejich 230denním

růstu. V [4] zkoumající funkci zařízení v chladných oblastech, resp. při nízkých teplotách, byl vršek filtru osazen osmi kusy Carex rostrata předpěstovanými mimo zařízení (5 týdnů) a následně pěstovanými 2 měsíce v zařízení. V [34] bylo v rozměrově stejně velkém válci těchto rostlin sedm. V [39] byl válec oset Lolium perenne L. v množství 420 kg/ha a zatěžován po šesti týdnech růstu. V [37] bylo vedle jiných rostlin použito i travníkových směsí Velvetene a Palmetto Soft Leaf Buffalo. V [3] bylo zvoleno osazení sedmi kusy rostlin, tj. 3 Juncus conglomeratus, 2 Phalaris arundinacea a 2 Carex panacea, odpovídající 64 ks/m². Rostliny byly zalévány dvakrát týdně kohoutkovou vodou, válec byl umístěn 4 měsíce v exteriéru a 2 měsíce v interiéru. V [32] byly rostliny (Carex appressa) předpěstovány po 12 týdnů ve skleníku při 25 °C a po přesazení zalévány dvakrát týdně po 5 týdnů semi-syntetickým deštěm. Jiné experimenty jsou prováděny bez vegetace [27, 41].

Po období růstu rostlin v zařízení, před experimentem, jsou rostliny zalévány kohoutkovou vodou v optimálním množství a časovém rozložení a jsou jim zajištěny vhodné životní podmínky, např. osvětlení [4, 42].

3.2.2 Zatěžování zařízení

Množství, intenzita a časové rozložení přítoku

Množství přítoku koresponduje s klimatickými podmínkami lokality, významný vliv má také velikost povodí, z něhož je voda odváděna na jednotku plochy vsakovacího zařízení [15], dávkování se liší též dle účelu experimentu. Pro zkoumání periodicky vyšších koncentrací solí byl dávkován přítok intenzitou 167 mm/h po dobu 6 hodin, a to v několika následných aplikacích [31]. Při zkoumání vlivu přídatných vrstev filtru na rozpuštěné TK bylo dávkováno 25 l ve 26 aplikacích, reprezentující typické roční srážky ve Velké Británii a plochu zařízení rovnou 2 % plochy povodí [41]. Pro zkoumání odstraňování kovů při nižších teplotách bylo dávkováno dvakrát týdně po dobu 10 týdnů 15 l (tj. 136 mm na plochu válce) reprezentující podmínky ve Švédsku [4], zato v [3] zkoumající vliv soli a teploty na odstraňování TK probíhalo stejné dávkování po dobu 18 týdnů. Množství a časové rozložení vychází z předpokladu „2 dešťových událostí týdně s průměrným dešťovým odtokem 5,4 l/m² a ploše zařízení rovné 4 % plochy povodí“ [3] s 85 % nepropustných ploch [4]. Při střídavém dávkování a vysychání filtru bylo po vlhké období dávkováno 25 l dvakrát týdně. Výpočet vycházel z ročního úhrnu efektivních srážek

590 mm, výskytu 104 dešťových událostí ročně a ploše vsakovacího zařízení rovné 2,5 % odvodněného území [34].

Při zastavení infiltrace během experimentu byl povrch manuálně narušen [32]. „*Mezi jednotlivými dávkami byla náplň ponechána gravitačnímu odvodňování.*“ [3] Ve válci o DN 94 mm a výšce filtračního média 800 mm (s částicemi menšími než 1 mm) trvalo oddrénování jedné dávky 16 h [38].

Klimatické podmínky a typická velikost odvodněného území na jednotku plochy zařízení v Austrálii byla reprezentována dávkou 2,25 l dvakrát týdně, zatěžování probíhalo po 3 měsíce [36]. Australské podmínky reprezentují i aplikace 4,2 l, resp. 3,7 l dávky dvakrát týdně ve vlhkém období (6 měsíců) a jednou za 2 týdny v suchém období (4 měsíce) [37]. Množství vychází z průměrného ročního efektivního srážkového úhrnu a plochy zařízení rovné 2,5 % plochy povodí [37].

V rámci studie zabývající se schopností čištění při dlouhodobého provozu filtrů byl roztok dávkován do válce (tok zdola nahoru) kontinuálně intenzitou 50 ml/min, dokud nebylo v odtoku dosaženo některé z daných maximálních hodnot koncentrací látky nebo dokud byla vyhovující některá daná minimální účinnost odstraňování. Počet let možného provozu se následně určil na základě ročního množství látky [15]. V [40] byl po 48 min dávkován shora přítok intenzitou 150 ml/min, který odpovídal srážce 25 l/(s.ha). Třicet takto aplikovaných dávek (0,72 mg Cu /l a 6,25 mg Zn /l) v experimentu simulovalo desetiletou zátěž těžkými kovy [40].

Složení dešťové vody

Vlastnosti syntetické či semi-syntetické dešťové vody, kterou je zatěžováno laboratorní zařízení, jsou voleny tak, aby reprezentovaly vlastnosti dešťové vody odtékající z dané lokality, resp. odvodňované plochy, například v [35] byly zvoleny průměrné koncentrace prvního splachu z komunikací.

Jako základ pro přípravu dešťové vody byla použita dechlorovaná kohoutková voda [32, 34], deionizovaná voda [40] nebo blíže nespecifikovaná kohoutková voda [3, 4, 29, 31, 37, 38, 41]. Aby byla zajištěna shodná teplota dávkované dešťové vody a prostředí, byla voda použitá na přípravu přítoku umístěna do místnosti se zařízením dostatečnou dobu před dávkování do zařízení (nejméně 24 h) [4] nebo byl nejméně 48 h před dávkování do zařízení přítok o požadovaných vlastnostech připraven a umístěn v místnosti se zařízením [3].

Z těžkých kovů obsahoval přítok zejm. Cd, Cu, Pb a Zn, ale i Al, Ba, Cr, Co, Fe, Mn, Ni, Ti a V. K dávkování těžkých kovů byly použity laboratorní referenční roztoky CuCl₂, CrCl₃, Pb(NO₃)₂, NiCl₂ a ZnCl₂ [15] a CdCl₂, Cu(II)Cl₂, Pb(II)NO₃ a ZnCl₂ [3]. V [34] bylo použito CuSO₄, PbNO₃ a ZnCl, v [39] CuSO₄, ZnSO₄ a NH₄H₂PO₄ a v [35] CuCl₂·2H₂O, Pb(NO₃)₂, CdCl₂·2,5H₂O a ZnSO₄·7H₂O (Tab. 8). V [38] bylo ke kohoutkové vodě přidáno i 100 mg/l montmorillonitu a kaolinitu (v hmotnostním poměru 1:1).

Při tvorbě semi-syntetické dešťové vody je použito sedimentu odebraného z reálného prostředí (vpust, dešťová nádrž) s velikostí částic menších než 300 [34], 400 [4], 500 [29] či 1000 µm [32] a přidáním chemikálií byla dorovnána hodnota složek na požadovanou koncentraci. Tímto přístupem bylo zajištěno při relativně konstantních koncentracích realistické složení přítoku [32], protože záleží na celkovém složení dešťové vody, tj. obsahu jiných látek než zkoumaných – dle [26] se při laboratorním experimentu snížila účinnost odstraňování zkoumaných TK (Cu a Zn) při použití reálného odtoku ze střechy oproti syntetickému přítoku do experimentálního zařízení o stejných koncentracích zkoumaných TK.

Tab. 8 – Chemikálie TK

literatura	[15]	[3]	[4]	[34]	[39]	[35]
Cd		CdCl ₂	CdCl ₂			CdCl ₂ ·2,5H ₂ O
Cr	CrCl ₃					
Cu	CuCl ₂	Cu(II)Cl ₂	CuCl ₂	CuSO ₄	CuSO ₄	CuCl ₂ ·2H ₂ O
Ni	NiCl ₂					
Pb	Pb(NO ₃) ₂	Pb(II)NO ₃	PbCl ₂	PbNO ₃		Pb(NO ₃) ₂
Zn	ZnCl ₂	ZnCl ₂	ZnCl ₂	ZnCl	ZnSO ₄	ZnSO ₄ ·7H ₂ O

V [15] bylo použito přítoku o pH $5,8 \pm 0,2$, jakožto hodnoty podobné té minimální vyskytující se v odtoku z komunikace. V [40] bylo pH $4,9 \pm 0,3$, v [4] $6,8 \pm 0,2$ a v [35] 6,05 a 4,05. Dané pH bylo dosahováno přidáním kyseliny HNO₃ SP či zásady NaOH [15], v [4] přidáním H₂SO₄ a v [35] přidáním HCl.

Jakožto sůl byla přidána NaCl [26, 30, 31], CaCl₂ [26] nebo MgCl₂ [26, 30]. Nebo byla přidána posypová sůl (AkzoNobel), v níž byl předem určen obsah zkoumaných složek, tj. Cd, Cu, Fe, Pb, Zn, P a N [29]. Koncentrace soli byly 10 mg NaCl /l [40], 2000 mg Cl /l [3, 29], 20 mg NaCl/l jako standardní koncentrace a 5000 a 10000 mg NaCl/l jako vyšší koncentrace [31]. Při existenci referenčního zařízení pro porovnání vlivu soli bylo postupováno tak, že byl připraven přítok bez přidání soli, následně byla odebrána polovina a do ní přidána sůl [29].

Tab. 9 – Složení (semi-)syntetické dešťové vody

literatura	[4]	[3]	[3]	[3]	[29]	[29]	[34]	[15]	jednotky
pozn.		požadované	bez soli	se solí	bez soli	se solí			
Cd celk.	4,2 ±0,4	6,4	4,5 ±1,6	4,7 ±1,6	4,5 ±1,7	4,5 ±1,5			µg/l
Cd rozp.	3,2 ±0,4		1,2 ±0,7	2,4 ±1,1	1,1 ±0,7	2,4 ±1,1			µg/l
Cr celk.								50	
Cu celk.	151,9 ±17,9	120	197,2 ±85,2	177,5 ±83,8	193,7 ±92,3	149,4 ±76,9	95,1	250	µg/l
Cu rozp.	21,0 ±4,2		5,4 ±3,1	6,0 ±5,2	4,7 ±3,4	5,7 ±5,1			µg/l
Ni celk.								50	
Pb celk.	42,3 ±4,4	50	46,5 ±12,1	44,7 ±13,1	46,3 ±12,0	41,8 ±13,8	199,1	50	µg/l
Pb rozp.	0,3 ±0,1		0,6 ±0,8	0,4 ±0,8	0,6 ±1,0	0,5 ±0,7			µg/l
Zn celk.	275,9 ±27,2	500	430,3 ±94,0	440,9 ±83,3	425 ±103	424 ±86	587,3	1000	µg/l
Zn rozp.	206,4 ±14,5		216,5 ±63,5	274,4 ±48,7	170 ±40	247 ±37			µg/l
Cl ⁻		0; 2000	46,1 ±7,1	2247,3 ±233,7	47 ±7	2241 ±239			mg/l
NL	137,7 ±12,1	150	124,8 ±29,6	129,7 ±37,1	127 ±39	131 ±48	154,2		mg/l
pH	6,8 ±0,2		7,7 ±0,1	7,7 ±0,2	7,7 ±0,1	7,6 ±0,2		5,8 ±0,2	-
redox. potenciál					158 ±34	159 ±32			
T	3,2 ±1,0; 8,6 ±0,6; 18,6 ±1,0				17,1	17,1			°C

Pozn.: průměr ± směrodatná odchylka; rozp.: koncentrace rozpuštěné formy; celk.: celková koncentrace

Připravená syntetická dešťová voda o požadovaných vlastnostech byla uchovávána v zásobní nádobě, např. o objemu 1 m³ [35]. Pro zajištění homogenity (zejm. rovnoměrné distribuce NL) byla předem připravená dešťová voda kontinuálně míchána [3], resp. byla konstantně míchána při jejím dávkování [32].

3.2.3 Měření a analýzy

Počáteční podmínky v zařízení

Zjištění počátečního stavu materiálů v sestaveném zařízení slouží jako ověření jeho vlastností, resp. k určení hodnot parametrů, které jsou použity jako počáteční podmínky (výchozí stav) při vyhodnocování experimentu. Data tvoří informace o mechanických, fyzikálních a chemických vlastnostech vrstev náplně, zejm. filtračního média. Pro použitou zeminu jsou určovány „především křivka zrnitosti, pH zeminy, podíl humózních příměsí“ [5]. Důležitým parametrem je i koeficient vsaku, příp. hydraulické vodivosti, který reprezentuje hydraulické kapacity vsakování. Jeho určení může být provedeno metodou s konstantním nebo proměnným spádem [35].

V [27] bylo určení koeficientu hydraulické vodivosti prováděno metodou s konstantním spádem, při níž byla udržována výtopa 100 mm, dávkována byla kohoutková voda. Po ustálení byl koeficient vypočten z Darcyho zákona. V [35] bylo použito obou metod – pro náplň z písku a zeolitu metoda s konstantním spádem a při předpokládaném koeficientu menším než $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tj. pro náplň z hlinitého písku, byla zvolena metoda s proměnným spádem. V první metodě výpočet vychází z času mezi doléváním daných objemů vody. V druhé byl zaznamenáván čas, úroveň klesající hladiny výtopy a teplota odtoku. Úroveň hladiny byla určována z hadičky o průměru menším než 10 mm s minimálně milimetrovou stupnicí [35]. Úroveň hladiny v zařízení může být sledována i během experimentu [40].

Voda

Před dávkováním je pro kontrolu kvality vody odebírán vzorek připravené dešťové vody [3, 29]. V [4] bylo „0,5 l směsného vzorku vytvořeno z 5 podvzorků“ [4]. Pro analýzu odtoku z jednotlivých zařízení byl odebírán buď směsný vzorek odtoku za celý průběh odtoku dané dávky [3, 4, 32] nebo byly odebírány vzorky v určitém čase od začátku dávkování, např. od 2 do 150 minut [38]. Před odběrem vzorku ze sběrné nádoby byl její obsah promíchán [29]. V první variantě byl odběr odtoku z dané aplikace započat např. poté, co se odtok relativně ustálil [35] a ukončen např. pokud byla odebrána většina dávky, tj. 3 l z 3,7 l [32] a 12 l z 15 l [4].

Z fyzikálních vlastností jsou v odtoku měřeny pH [3, 4], konduktivita [31, 40], redox. potenciál [3] a zákal [39]. Analyzovány jsou celková koncentrace a koncentrace rozpuštěné

formy těžkých kovů [3, 4, 29], příp. jen celková koncentrace [34], dále koncentrace NL [3] a koncentrace Na, K, Mg, Ca a Cl [25].

Pevná matrice

Před experimentem jsou odebrány vzorky použitého materiálu filtrační náplně a vegetace [4]. Po experimentu jsou vzorky filtrační náplně odebírány z různých hloubek po výšce filtrační náplně – např. 0-50, 250 a 600 mm [4], 0-50, 100, 350 a 650 mm [29], každých 200 mm [35] či 100 mm [1]. Odběr v menších hloubkách je prováděn manuálně, ve větších hloubkách je vzorek odebrán „*horizontálními jádry s průměrem 35 mm*“ [4] nebo 16 mm, což odpovídá cca polovině průměru válce [29]. Též je odebírán vzorek vegetace [4]. Během experimentu může být měřena vlhkost půdy v určité hloubce, v [34] v hloubce 225 mm.

Filtrační náplň je odebírána k analýze obsahu těžkých kovů, resp. koncentrací různých látek (v mg látky v kg sušiny filtračního materiálu) – např. celkové koncentrace, koncentrace rozpuštěné formy [4] nebo podrobněji formy výměnné, vázané na uhličitany, na oxidy železa a manganu, na organickou hmotu a zbytek [35].

4 Experimentace

4.1 Materiály a metody

4.1.1 Experimentální zařízení

Aparatura

Sestaveny byly 2 shodné aparatury lišící se pouze charakterem přitékající dešťové vody během zimního období, kdy byla první aparatura (A) vystavena působení soli, zatímco druhá (B) sloužila jako referenční. Aparatura se skládala ze zásobní nádrže syntetické dešťové vody, peristaltického čerpadla pro dávkování přítoku, sloupce vsakovacího zařízení, srážkoměru na odtoku ze zařízení a sběrné nádrže (Obr. 9, Obr. 10).

Aparatury měly společné peristaltické čerpadlo s hlavou se dvěma hadičkami a vyjma zimního období také společnou zásobní nádrž. Oba sloupce i další samostatné komponenty byly viditelně označeny písmeny A a B. Vzhledem k výskytu vegetačního krytu byl zvolen gravitační tok sloupcem náplně.

Jako základní tvar zařízení byl zvolen vertikálně umístěný dutý válec o průměru 200 mm. Byla použita průhledná trubka z plexiskla délky 1000 mm. Dolní část válce zaujímaly vrstvy materiálů zařízení, horní část zajišťovala retenční prostor pro dávkovanou vodu a prostor pro vegetaci. Vnitřní stěny válců byly po výšce náplně pro zabránění preferenčního proudění podél stěn zdrsňeny opískováním, tj. nanesením lepidla a následným vysypáním pískem, přičemž tento postup byl opakován několikrát. Na vnější stěně byl svisle přilepen metr o milimetrové stupnici. Nula odečtu byla situována u horního okraje válce.

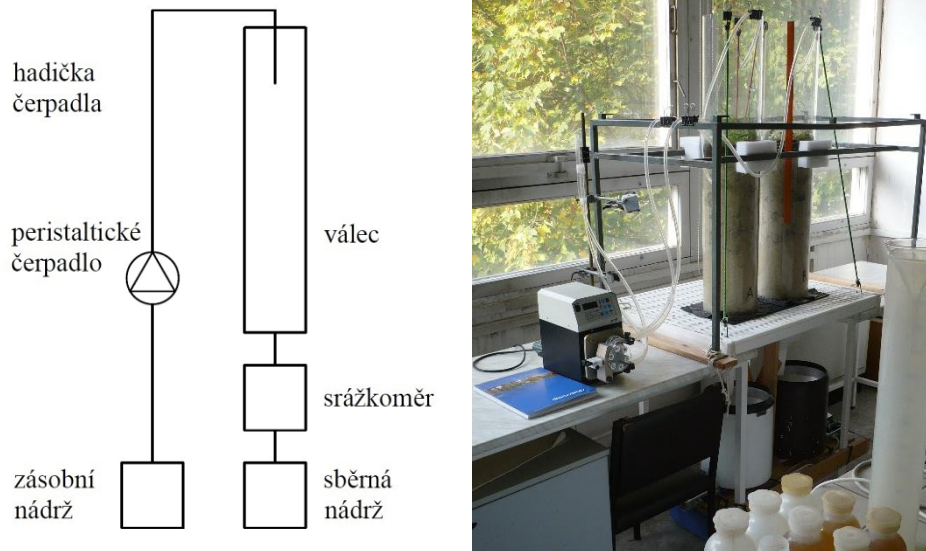
Celý válec byl svisle upevněn do misky s dnem vyspádovaným ke středu, kde se nacházela odtoková trubička ústící do plastového trychtýře, odkud voda vytékala přes srážkoměr do sběrné nádrže (Obr. 10). Spoj válce a misky byl utěsněn gumovým těsněním.

Aparatura byla umístěna v místnosti (laboratoři) o pokojové teplotě s dostatkem světla pro vegetaci.

Přehled:

- tvar: válec
- počet: 2 ks
- tok: shora dolů, gravitační
- DN: 200 mm

- materiál: plexisklo
- výška: 1000 mm
- povrchová úprava vnitřních stěn: zdrsnění opískováním
- řešení vtoku: hadička peristaltického čerpadla
- řešení výtoku: odtoková trubička ve dně válce



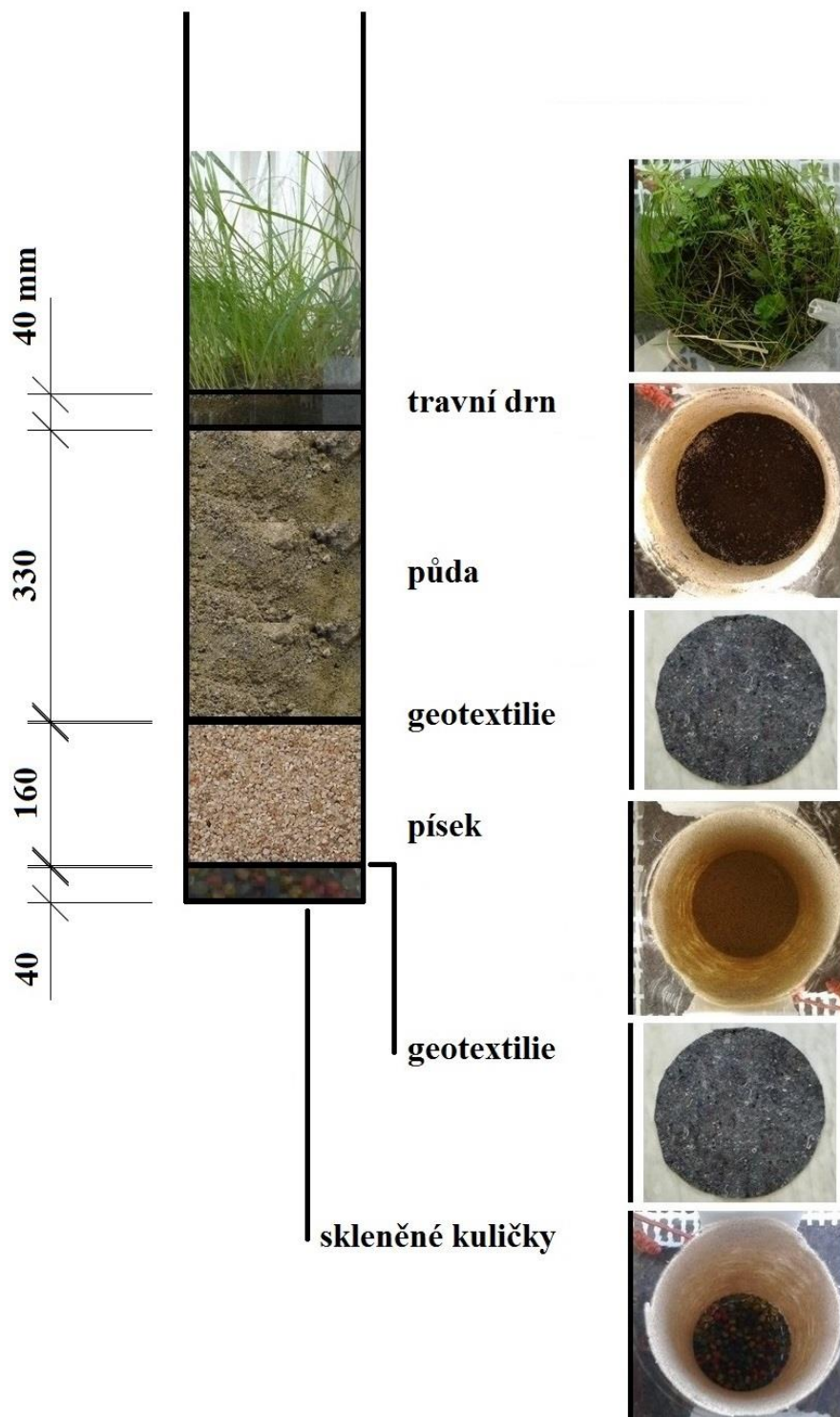
Obr. 9 – Schéma aparatury (vlevo) a fotografie aparatury (vpravo)



Obr. 10 – Válc s přítokovými hadičkami v konstrukci (vlevo) a odtok z válců (vpravo)

Filtrační náplň

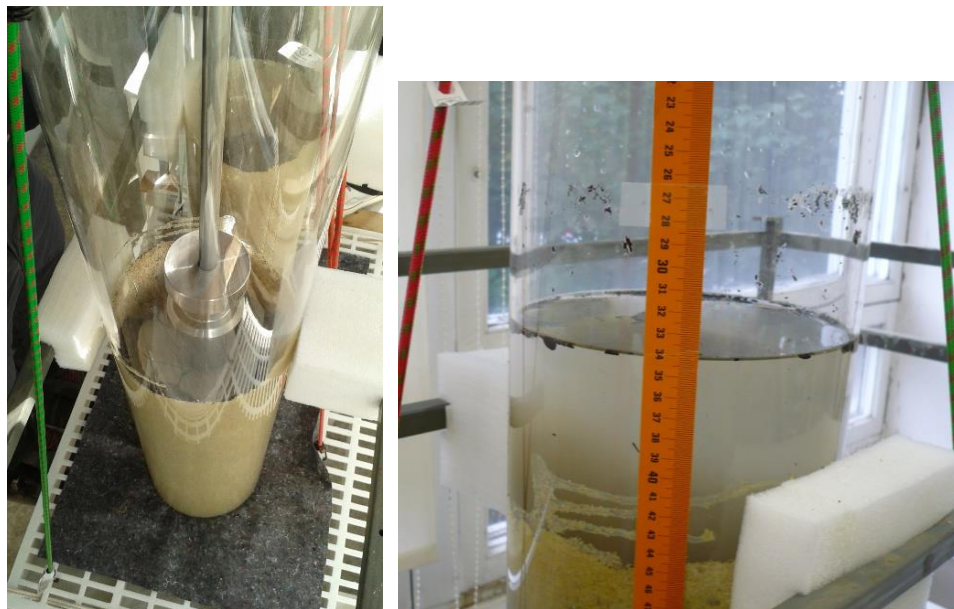
Návrh filtrační náplně a vlastnosti použitých materiálů vycházel z [5]. Do válce byly ode dna umístěovány drenážní, přechodová a filtrační vrstva oddělené geotextilií (Obr. 11). Trvale saturovaná zóna nebyla v zařízení nastavena, protože výtok byl situován ve dně válce.



Obr. 11 – Uspořádání vrstev filtrační náplně (schéma a materiály)

Nad miskou s odtokovou trubičkou byla umístěna drenážní vrstva o mocnosti 40 mm, kterou tvořily skleněné kuličky. Kuličky byly ukládány do vrstvy tak, aby byly minimalizovány mezery mezi nimi. Vrstva byla oddělena jednou vrstvou geotextilie. Další vrstvu o mocnosti 160 mm tvořil písek o velikosti 0,6-1,2 mm. Písek byl do válce nasypán,

uovrnán do roviny a překryt geotextilií. Horní filtrační vrstva byla tvořena humusovou vrstvou nasypávanou z mírně vlhké půdy o celkové mocnosti 330 mm. Hutnění probíhalo po vrstvách 100, 100 a 130 mm položením a mírným přitlačením plochého břemene na uovrnáný povrch (Obr. 12). Na tuto vrstvu byl umístěn travní drn o mocnosti přibližně 40 mm.



Obr. 12 – Hutnění půdy (vlevo) a vsakovací zkouška (vpravo)

Koeficient hydraulické vodivosti se má dle [5] pohybovat mezi 10^{-4} a 10^{-5} $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Jeho hodnota byla ověřena vsakovací zkouškou před osazením travního drnu (Obr. 12), která byla provedena třikrát. Do retenčního prostoru každého válce bylo nalito 8 litrů kohoutkové vody, následně byla odečítána poloha hladiny v daných časech (resp. pokles hladiny za určitý časový interval), z čehož byla určena hodnota koeficientu, která činila přibližně $8,5 \cdot 10^{-5}$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Průběhy vsakovacích zkoušek jsou uvedeny v Příloze 1.

Při vsakovacích zkouškách došlo též k prvotnímu vyplavení látek (částic), zajištění vlhkosti půdy pro růst následně osazené vegetace, a též k dalšímu zhutnění vlivem proudící vody. Pozorován byl pokles přibližně o 5 cm. Další takto výrazný pokles již v průběhu experimentace nenastal.

Vegetace

Zatravnění povrchu zařízení je možno provést osetím nebo osazením travního drnu [5]. Zde byla zvolena varianta osazení travním drnem (Obr. 13), který byl před osazením pěstován v květináči o průměru větším než průměr válce. Byly v něm zastoupeny různé druhy hub a rostlin tak, aby reprezentovaly rozmanitost vegetace rostoucí na reálném

vsakovacím zařízením. Před začátkem experimentu byla vegetace zalévána kohoutkovou vodou a před začátkem zimního období byla zastřížena.



Obr. 13 – Vegetace na konci letního (vlevo) a na konci zimního (vpravo) období ve válci A

4.1.2 Zatěžování zařízení

Experiment byl prováděn v období 2.10. až 29.11.2018.

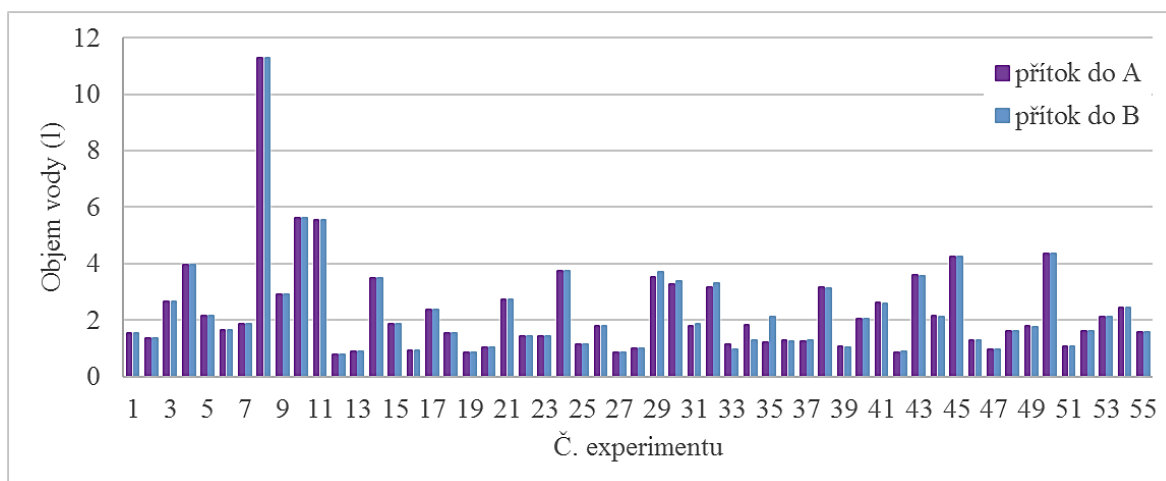
Simulované dešťové události

Při experimentaci byl simulován první rok provozu vsakovacího zařízení po jeho výstavbě. Zařízení bylo postupně podrobeno dynamickému přítoku reprezentujícímu odtok ze silniční komunikace způsobený dešťovými událostmi. Experimentace byla rozdělena do 3 částí nazvaných letní, zimní a jarní období. Letní období simulovalo červen až listopad, zimní prosinec až únor a jarní březen až květen.

Výstavba zařízení byla předpokládána v květnu, kdy je pak zařízení vystaveno odtokům z letních dešťů i o vysokých intenzitách. V zimním období byla do jednoho válce (A) dávkována voda, v níž byla oproti vodě dávkované do druhého válce (B) přidána sůl simulující aplikaci posypové soli na silniční komunikaci. Během jarního období byla do obou válců dávkována opět voda bez přidání soli.

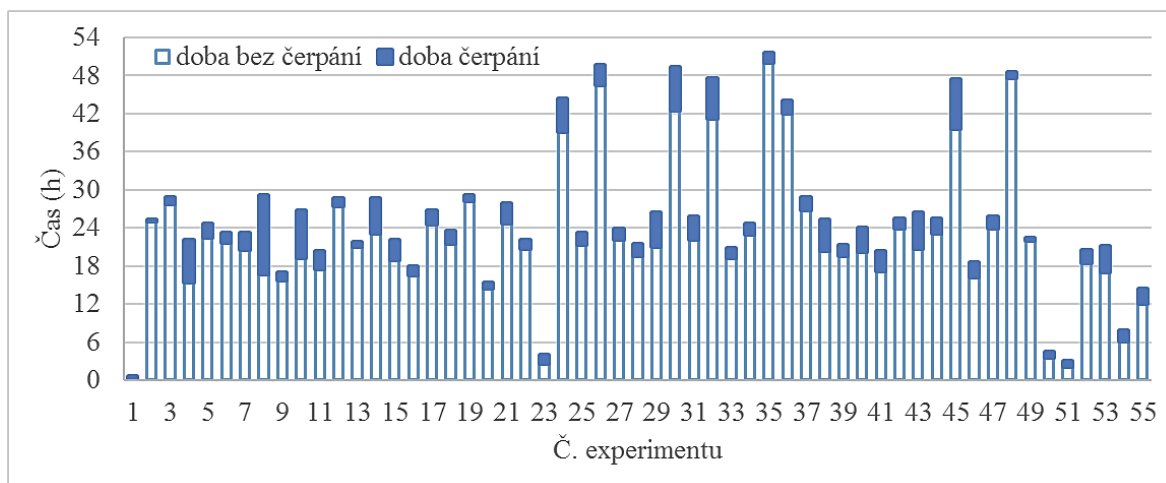
Výchozími daty pro návrh dynamického zatěžování vsakovacího zařízení byla reálná dešťová řada od 1. června 2005 do 31. května 2006 ze srážkoměru z města Hradec Králové v Královohradeckém kraji. Tento rok byl vybrán na základě podobnosti s průměrnými srážkovými úhrny ve zvolených obdobích z desetileté dešťové řady. Jednotlivé dešťové události byly definovány nejméně 60minutovou pauzou mezi dvěma překlopeními člunku a zároveň byly uvažovány pouze události s úhrnem větším než 3 mm. Takto bylo vytvořeno 55 událostí (Příloha 2). Letní srážkový úhrn činil 228 mm, zimní 66 mm a jarní 134 mm.

Tato upravená dešťová řada tvořila vstupní data do modelu SWMM, z něž byl získán průběh odtoku z odvodňovaného povodí v minutovém časovém kroku, který je přítokem do vsakovacího zařízení. Uvažován byl poměr A_{red}/A_{vsak} roven 10, dále parametry povodí: sklon povodí 2,5 %, drsnost nepropustných ploch 0,012 a povrchová retence 1,6 mm. Průběh přítoku byl nakonec upraven možnostmi peristaltického čerpadla a jeho ovládání tak, aby byl zachován objem čerpané vody roven objemu přítoku z výpočtu (Příloha 3). Do každého válce bylo v průběhu celé experimentace načerpáno 125 litrů syntetické dešťové vody (Obr. 14).



Obr. 14 – Objem načerpané vody (přítok do válců)

Doby trvání bezdeštných období mezi jednotlivými dešťovými událostmi byly oproti jejich skutečnému trvání upraveny. Bezdeštná období trvající dobu kratší než 1 den byla ponechána v původní délce, období trvající 1 až 14 dní byla zkrácena na 1 den, období delší než 14 dní byla nahrazena 2 dny. Takto změněné délky bezdeštných období byly následně upraveny ještě dle provozních možností experimentace. V Obr. 15 jsou zobrazeny doby bez čerpání představující bezdeštná období mezi jednotlivými událostmi a doby čerpání vody do válců.



Obr. 15 – Harmonogram experimentálního roku

Pro přehlednost jsou základní charakteristiky experimentů uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 – Přehled experimentace

válec A	válec B	zimní období
se soli	bez soli	experimenty č. 27-36

Složení dešťové vody

Pro přípravu syntetické dešťové vody byla použita směs kohoutkové a destilované vody v poměru přibližně 1:1 upravená tak, aby splňovala parametry uvedené v Tab. 11.

Hodnoty koncentrací rozpuštěných forem těžkých kovů Cd, Cr, Cu, Ni, Pb a Zn byly navrženy podobné průměrným celkovým koncentracím TK uvedené v [7] pro středně frekventované silnice s intenzitou 5-15 tis. vozidel/den s převážně asfaltovým povrchem (měření byla prováděna zejm. v Německu a USA). Koncentrace Al a Fe vycházela z koncentrací jejich rozpuštěné formy uvedené v [8] pro dálnici s intenzitou 18 tis. vozidel/den.

Koncentrace chloridových iontů odpovídala přibližně hodnotě 90 % percentilu v odtoku z dálnice v ČR v zimní sezóně, která dle [11] činí 1510 mg/l. Koncentrace fosforečnanového fosforu vycházela z [17], kde je uvedena koncentrace 200 µg/l, která odpovídá i rozmezí 100-400 µg/l uvedeného pro dálnice s intenzitou do 30 tis. vozidel/den v [8].

Hodnota pH byla zvolena 7,4, která je v [14] uváděna pro dopravní plochy jako průměrná. Hodnota alkality odpovídala horní hranici rozmezí výpočtových hodnot pro dešťový odtok uvedenému v [47].

Pro dosažení požadované koncentrace TK byly dávkovány certifikované referenční materiály příslušného kovu od firmy Analytika s.r.o. ve slabém roztoku kyseliny dusičné,

což snížilo hodnotu pH vody pod požadovanou hodnotu. Pro jeho zvýšení byly přidány amonné ionty ve formě slabého roztoku amoniaku.

Syntetická dešťová voda byla připravena předem ve 2 uzavíratelných sudech (v množství cca 400 litrů) a po celou dobu experimentace byla skladována v chladicím zařízení. Aktuální potřebné množství bylo 1 až 2 dny před daným experimentem ze sudů v poměru 1:1 odebráno a umístěno do laboratoře, aby získalo teplotu místnosti (15,9 až 24,0 °C). Kontrola složení vody probíhala vzorkováním přítoku při každém experimentu a jeho analýzou.

Tab. 11 – Složení syntetické dešťové vody

Parametr	Požadovaná hodnota	Analyzovaná hodnota		Jednotky
		přítok bez soli	přítok se solí	
Cd	3,5	5,00 ± 2,73	2,78 ± 0,42	µg/l
Cr	12,0	9,60 ± 7,65	20,76 ± 25,13	µg/l
Cu	65,0	52,06 ± 29,06	83,85 ± 41,41	µg/l
Ni	16,0	21,03 ± 3,39	24,48 ± 3,13	µg/l
Pb	30,0	20,24 ± 23,16	15,18 ± 12,35	µg/l
Zn	300	191 ± 57	285 ± 86	µg/l
Al	140			µg/l
Fe	70			µg/l
Cl ⁻	0; 1500 (v zimě do A)	27,5 ± 2,4	1522,6 ± 234,6	mg/l
P-PO ₄ ³⁻	200			µg/l
pH	7,4	7,5 ± 0,2	7,5 ± 0,1	-
alkalita	1,0	1,2 ± 0,1	1,3 ± 0,1	mmol/l

Pozn.: průměr ± směrodatná odchylka; u kovů se jedná o rozpuštěnou formu

4.1.3 Měření a analýzy

Analyzováno bylo 6 těžkých kovů ve vodě (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb a Zn) a ve filtračním médiu (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn a Fe). Sledovány byly i další parametry přítékající a odtékající vody.

Voda

Před dešťovou událostí byl odebrán vzorek vody ze zásobní nádrže. Vzorky odtoku (Obr. 16) byly odebrány po protečení většiny načerpaného objemu vody. Jednalo se tedy o směsné vzorky za dešťovou událost. Za experimenty č. 22 a 23, a dále č. 49, 50 a 51 byl odebrán 1 směsný vzorek za dvě, tři navazující události.

V zařízení je stále zadržován určitý objem vody, což ovlivňuje vzorky dalšího experimentu, tudíž vytéká část vody dávkované při předchozí dešťové události.



Obr. 16 – Vzoroky vody

Konduktivita, pH a teplota přítoku a odtoku byly měřeny příslušnou elektrodou, čidlem (WTW pH-metr, HACH).

Vzoroky na analýzu TK byly uchovávány v plastových lahvičkách v chladu, zařixované 100 ml kyseliny dusičné (HNO_3 SP). Analýzy TK byly prováděny pomocí atomového absorpčního spektrometru (ASS) iCE 3500 od Fischer Scientific. Používány byly 2 metody: elektrotermická atomizace pro analýzu Cd, Cr, Cu, Pb a Ni ve vodě a plamenná atomizace pro analýzu Zn ve vodě. Meze stanovitelnosti koncentrace TK pomocí AAS metodou plamenné atomizace jsou 0,05 mg/l pro stanovení Cr, Cu, Ca, Fe a Ni a 0,005 mg/l pro stanovení Na, Mg a Zn, meze stanovitelnosti pro metodu elektrotermické atomizace jsou 0,005 $\mu\text{g/l}$ pro Cd a 0,1 $\mu\text{g/l}$ pro Cr, Cu, Pb a Ni, přesnosti analýz TK ve vodě se pohybují do 20 %.

Koncentrace vápníku a hořčíku Ca+Mg byla určena pomocí titrace vzorku vody s tlumivým roztokem a eriochromčerní roztokem chelatonu (koncentrace 0,05 mol/l), při níž vínově červené až fialové zbarvení přechází do modrého. Kyselinová neutralizační kapacita $\text{KNK}_{4,5}$ byla určena pomocí titrace vzorku vody s kapkami methyloranže roztokem HCl, při níž žluté zbarvení přechází do cibulově oranžového.

V zimním a jarním období byla měřena též koncentrace chloridů Cl^- , která byla stanovena titrací vzorku vody s chromanem draselným (1 ml K_2CrO_4) roztokem dusičnanu stříbrného (AgNO_3 koncentrace 0,05 mol/l) ze žlutého do oranžovohnědého zbarvení.

Chemická koncentrace kyslíku CHSK_{Cr} byla stanovena kyvetovým testem Hach Lange s označením LCI 500 (pro předpokládaný rozsah 0-150 mg/l).

Množství načerpané vody bylo zjišťováno zvážením zásobní nádrže před a po jednotlivých experimentech.

K výpočtu účinnosti odstraňování daného TK bylo použito průměrné koncentrace v dávkované syntetické dešťové vodě a průměrné koncentrace TK v odtékající vodě, dle výrazu

$$\text{účinnost} = \frac{\text{přítoková konc.} - \text{odtoková konc.}}{\text{přítoková konc.}} \cdot 100 (\%).$$

Pevná matrice

V použitých filtračních materiálech byla analyzována výchozí koncentrace TK (v μg či mg kovu na kg materiálu). Po ukončení zatěžování zařízení byly analyzovány koncentrace TK v různých hloubkách filtračního média, konkrétně 0-2,5; 2,5-5,5; 5,5-9; 9-14; 14-21 a 21-31 cm, a ve vegetaci.

Po hloubce zařízení byla vrstva o zvolené mocnosti vyjmuta z válce, materiál byl promísením homogenizován a byla odebrána část materiálu jakožto reprezentativní vzorek dané vrstvy pro analýzu TK. Ten byl zmražen na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně sušen vakuovým vymrazováním při $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hrubší částice byly odděleny přesátím na síť s velikostí ok $600\text{ }\mu\text{m}$. K takto upravenému vzorku o hmotnosti 1-2 g bylo přidáno 9 ml HNO_3 PA a 1 ml H_2O_2 , tzn. byl podroben kyselinovému výluhu v prostředí HNO_3 . Dále byl proveden tlakový mikrovlnný rozklad podle metody US EPA 3051 (1994) Standard method. Microwave Assisted Acid Digestion of Sediment, Sludges, Soils, and Oils, Washington DC, USA. Před analýzou byl vzorek přefiltrován. V pevné matici byly koncentrace stanovovány pomocí ASS iCE 3500 od Fischer Scientific. Cd bylo stanovováno elektrotermickou atomizací a Cr, Cu, Pb, Ni a Zn plamennou atomizací. Ca, Mg, Na byly též určeny pomocí plamenné atomizace. Meze stanovitelnosti jsou uvedeny výše.

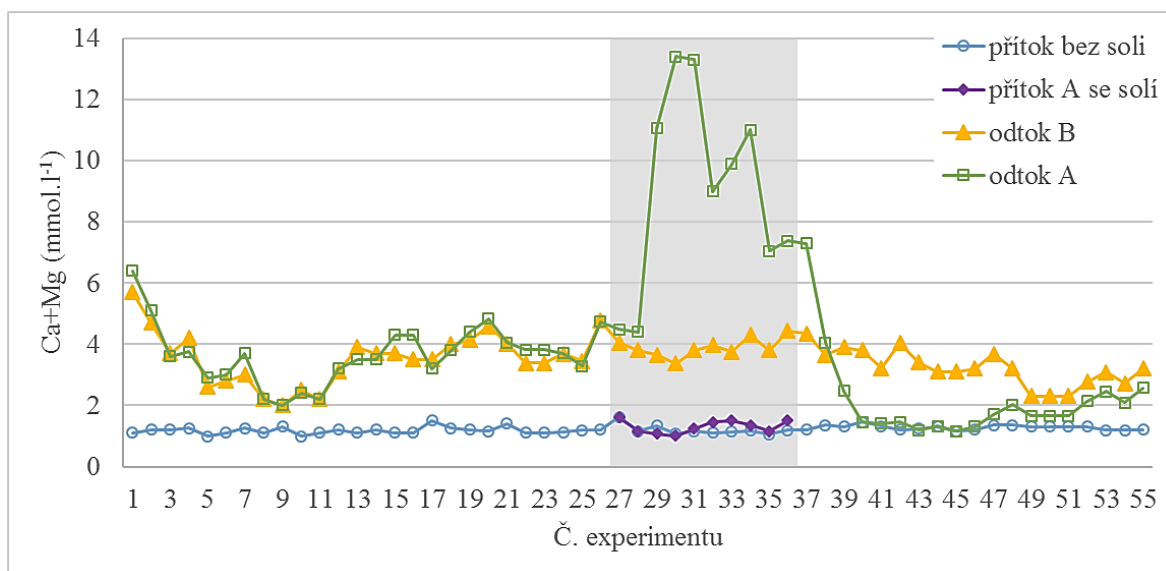
4.2 Výsledky a diskuze

Výsledky vycházejí z analýz dostupných do termínu odevzdání diplomové práce.

4.2.1 Časové průběhy parametrů ve vodě

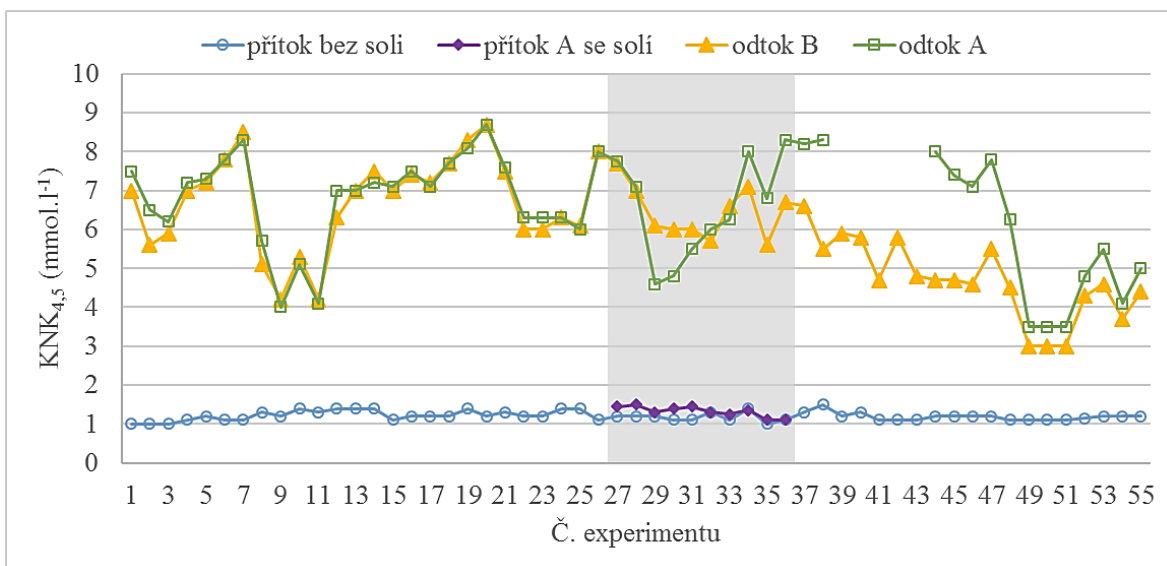
Koncentrace vápníku a hořčíku (Obr. 17) přitékající dešťové vody kolísala mezi 1 a $1,63\text{ mmol/l}$. Koncentrace v odtoku z obou válců byly vyšší než přítoková koncentrace. Odtokové koncentrace nejprve klesaly z hodnot okolo 6 mmol/l na 2 mmol/l , což mohlo být způsobeno vyplavováním volných částic spolu s Ca a Mg po výstavbě zařízení. Od experimentu 9 došlo k zastavení poklesu koncentrace a k relativnímu ustálení odtokové koncentrace. V experimentech č. 8, 10 a 11 byly do válců načerpány 3 největší objemy vody.

Koncentrace v odtoku z referenčního válce B se pohybovaly mezi 2,0 a 5,7 mmol/l, přičemž průměr činil 3,5 mmol/l. Koncentrace v odtoku z válce A vzrostla na začátku zimního období až na 13,4 mmol/l a následně se skokově snižovala. Po ukončení dávkování soli koncentrace postupně klesala až na 1,2 mmol/l. Nárůst odtokové koncentrace může být způsoben vyplavením dvojmocných iontů Ca a Mg vytěsněných jednomocnými ionty Na pocházejícími z dávkované soli, jak uvádí např. [21]. Ke konci jarního období se rozdíl hodnot odtoku A a B opět snižoval, jak byla ve válci A nastolována nová chemická rovnováha.



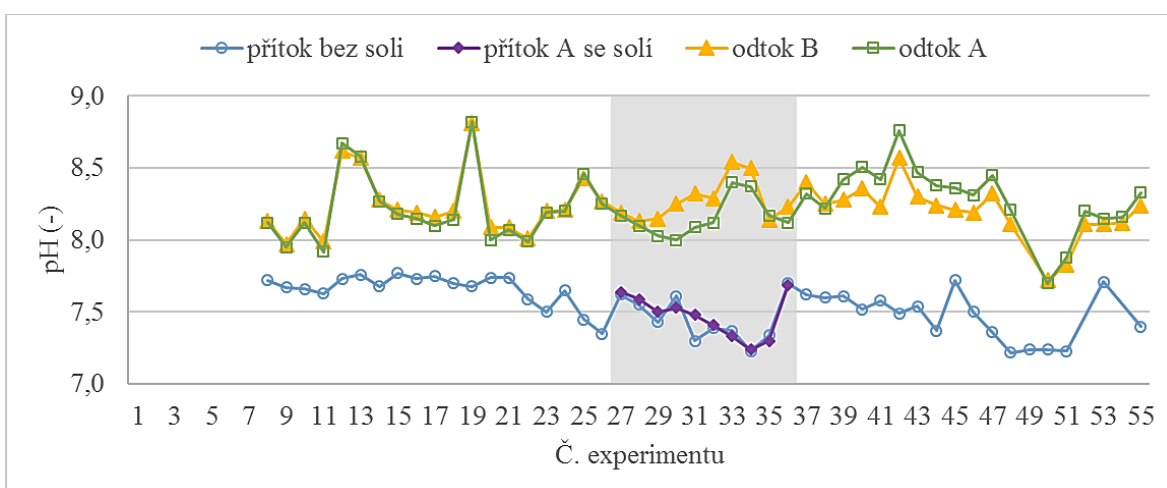
Obr. 17 – Graf průběhu koncentrace vápníku a hořčíku

Kyselinová neutralizační kapacita $KNK_{4,5}$ (Obr. 18) přítékající dešťové vody během celého období kolísala mezi 1 a 1,5 mmol/l, odtékající mezi 3 a 8,7 mmol/l. V zařízení tedy docházelo při průtoku vody k pufrování. V letním období byly hodnoty $KNK_{4,5}$ na odtoku z obou válců přibližně stejné, od třetího experimentu v zimním období (tj. č. 29) se výrazněji odlišovaly, což je patrné i pro jiné měřené parametry. Po prvotním zimním poklesu na 4,6 mmol/l v odtoku ze soleného válce A stoupla hodnota během zimního období nad 8 mmol/l. Zvýšení odtokové koncentrace Ca a Mg mělo na hodnotu $KNK_{4,5}$ jen malý vliv. Začátkem jarního období nebylo možné $KNK_{4,5}$ určit kvůli barvě odtoku z válce A (viz dále). Nejnižší hodnota $KNK_{4,5}$ odtoku z obou válců byla měřena ke konci jarního období ve směsném vzorku odtoku z experimentů 49, 50 a 51 a činila 3,5 mmol/l v odtoku z A a 3 mmol/l v odtoku z B.



Obr. 18 – Graf průběhu kyselinové neutralizační kapacity

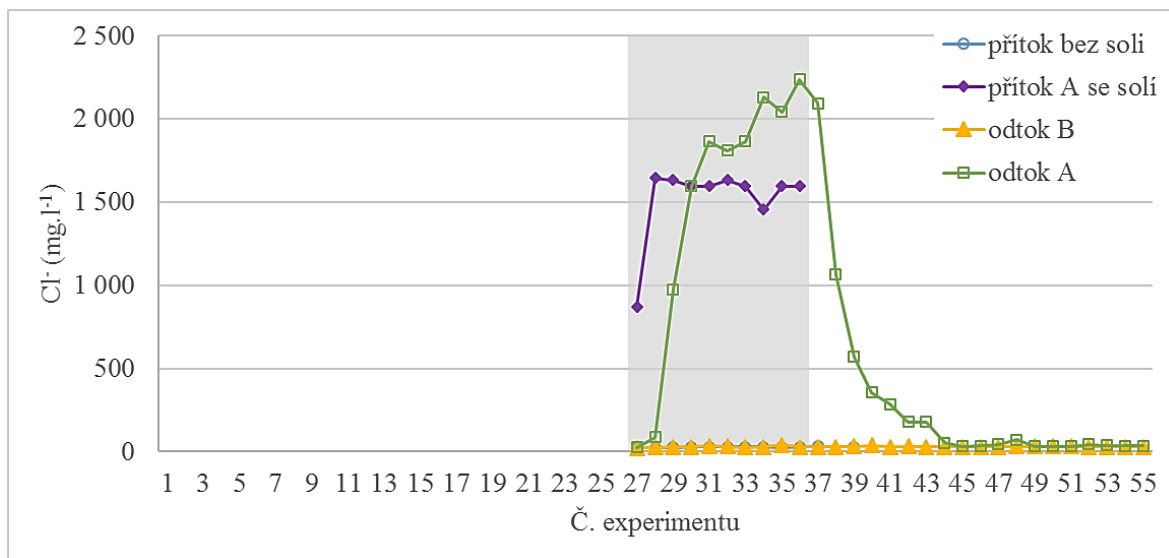
Počáteční hodnoty **pH** byly zatíženy chybou z poruchy pH-metru. Průměrné pH (Obr. 19) přítoku se solí i bez ní, při vynechání měření z prvních 7 experimentů, činilo 7,5 a hodnoty kolísaly od 7,2 do 7,8. pH odtoku bylo vyšší než pH přítoku. Hodnoty pH odtoku z obou válců byly víceméně obdobné, v zimním období byly mírně vyšší na odtoku z válce B (bez soli) než z válce A (se solí), zatímco na začátku jarního období tomu bylo naopak. Ve většině měření byly hodnoty pH odtoku větší než 8,0, průměrná hodnota pro A i B činila 8,2. Relativně stabilní pH bylo způsobeno jeho pufrováním, které se projevuje vysokou hodnotou $KNK_{4,5}$. Mírně vyšší pH než v přítoku bylo měřeno i v [4].



Obr. 19 – Graf průběhu hodnot pH

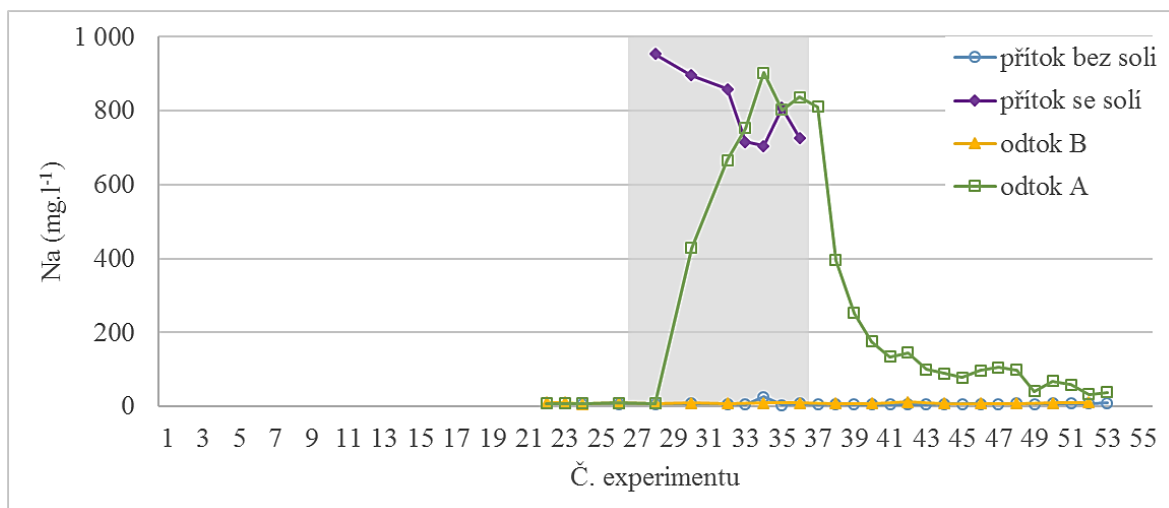
Koncentrace chloridů (Obr. 20) v přítoku bez soli byla měřena 23 až 32 mg/l, v přítoku se solí činila přibližně 1600 mg/l, vyjma první hodnoty, kdy do připravované vody bylo nadávkováno nižší množství soli. Nižší byla z tohoto důvodu i konduktivita.

Koncentrace v odtoku z válce B se pohybovala mezi 23 a 39 mg/l s průměrnou hodnotou 30 mg/l, která odpovídala koncentraci v přítoku. Koncentrace chloridů v odtoku z válce A zatíženého solí nejprve prudce vzrostla během první poloviny zimních experimentů na hodnotu cca 1800 mg/l, po ukončení dávkování soli klesala koncentrace z 2237 mg/l v 36. experimentu na 32 mg/l v 45. experimentu. Poté již nebyla naměřena koncentrace vyšší než 43 mg/l (vyjma experimentu č. 48, kde bylo měřeno 71 mg/l).



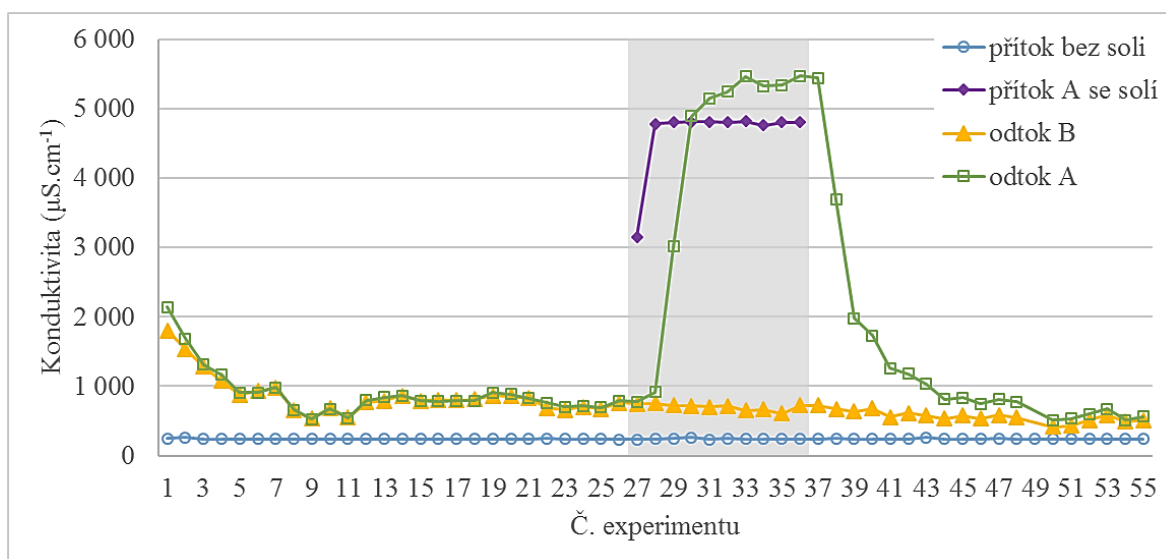
Obr. 20 – Graf průběhu koncentrace chloridů

Koncentrace sodíku (Obr. 21) vykazovala podobný průběh jako koncentrace chloridů. Jeho koncentrace v přítoku bez soli činila průměrně 7 mg/l a v přítoku se solí 809 mg/l. Koncentrace v odtoku z referenčního válce B se pohybovala mezi 7 a 13 mg/l, zatímco koncentrace ve válci A vzrostla během zimního období až na 902 mg/l a v jarním období postupně klesala k původním hodnotám, kterých do 53. experimentu nedosáhla.



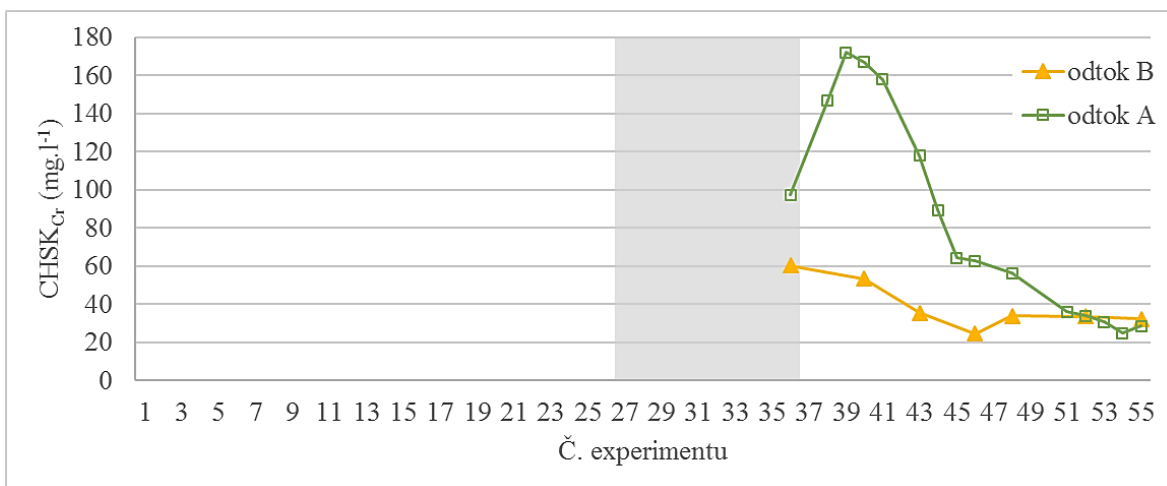
Obr. 21 – Graf průběhu koncentrace sodíku

Konduktivita (Obr. 22) přítoku bez soli se pohybovala okolo 240 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Konduktivita přítoku s přidanou solí byla okolo 4800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Konduktivita v odtoku z obou válců se během letního období po prvotním poklesu způsobeném vyplavováním volných půdních částic po výstavbě zařízení ustálila přibližně na 700 až 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Během zimy vykazoval odtok z referenčního válce B i dále relativně ustálené hodnoty konduktivity s minimem na hodnotě 416 $\mu\text{S}/\text{cm}$, zatímco v odtoku z válce A od zimního experimentu č. 29 konduktivita kvůli vyšší koncentraci Ca, Mg, Na a Cl prudce vzrostla. Maximální hodnoty 5470 $\mu\text{S}/\text{cm}$ bylo dosaženo v odtoku z posledního experimentu zimního období. Během jarního období konduktivita postupně klesala.

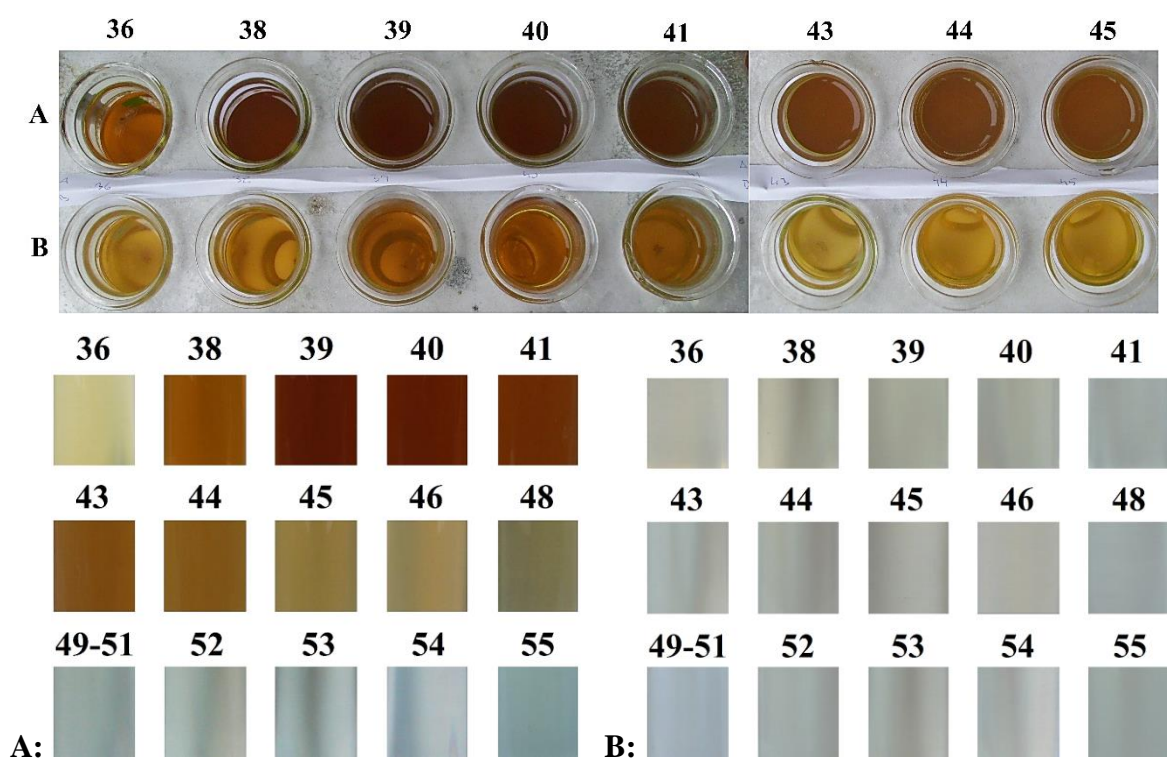


Obr. 22 – Graf průběhu konduktivity

Barva a CHSK. Během zimního období vytékal ze soleného válce A odtok mírně světlejší barvy než z válce B (Obr. 25). Od začátku jarního období měly vzorky odtoku ze solí zatíženého válce A výrazně tmavší barvu než během předcházejícího letního a zimního období i v porovnání s barvou odtoku z válce B (Obr. 24). Příčinou mohlo být vyplavování částic vznikajících narušením půdní struktury [31] či humínových kyselin, které se projevilo vyšší chemickou spotřebou kyslíku, protože vyšší měřené koncentrace CHSK_{Cr} odpovídaly tmavší barvě odtoku. Nejvyšší hodnoty CHSK_{Cr} rovné 172 mg/l i nejtmaší barvy dosahoval odtok experimentu č. 39. Od přibližně 50. experimentu se hodnoty i barvy odtoku z obou válců vyrovnaly (Obr. 23).



Obr. 23 – Graf průběhu chemické spotřeby kyslíku

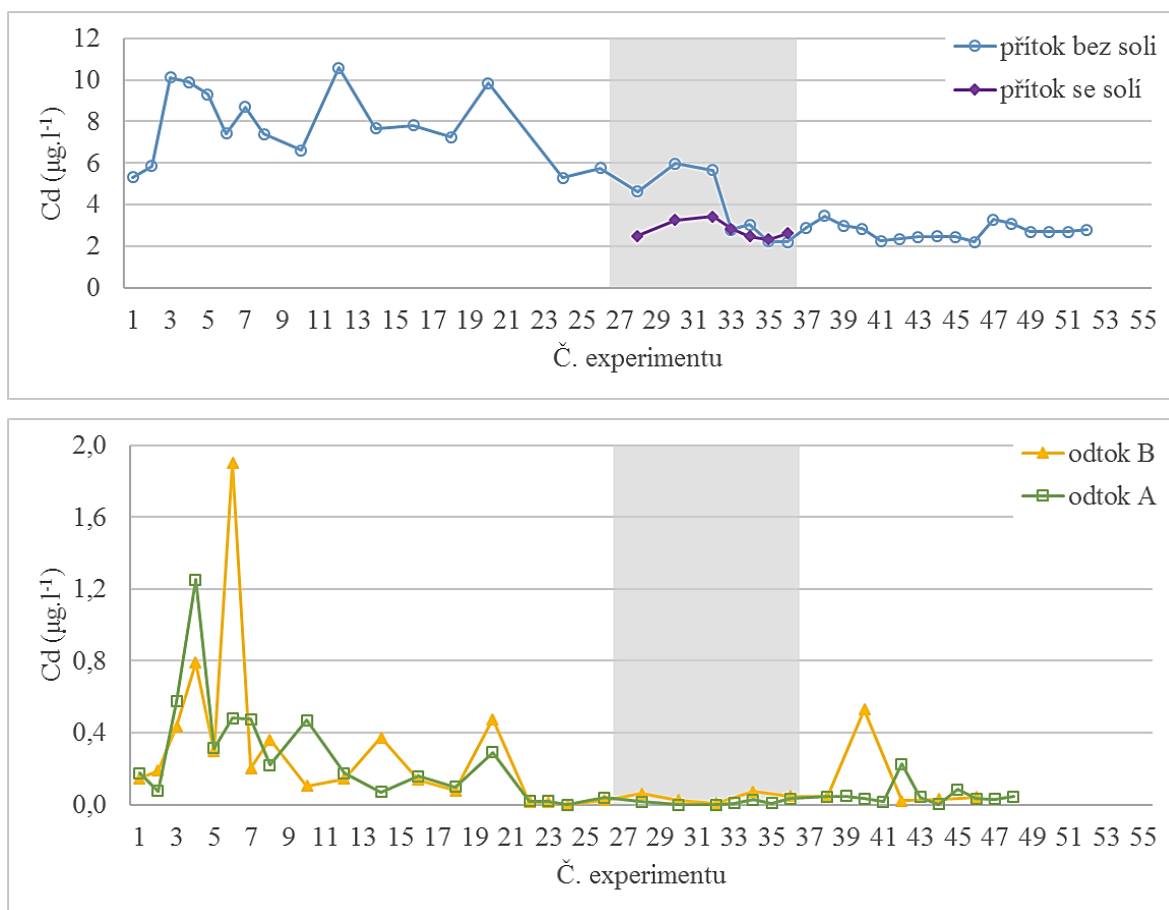


Obr. 24 – Barva odtoku z válců A a B od konce zimního období (číslování dle č. experimentu)



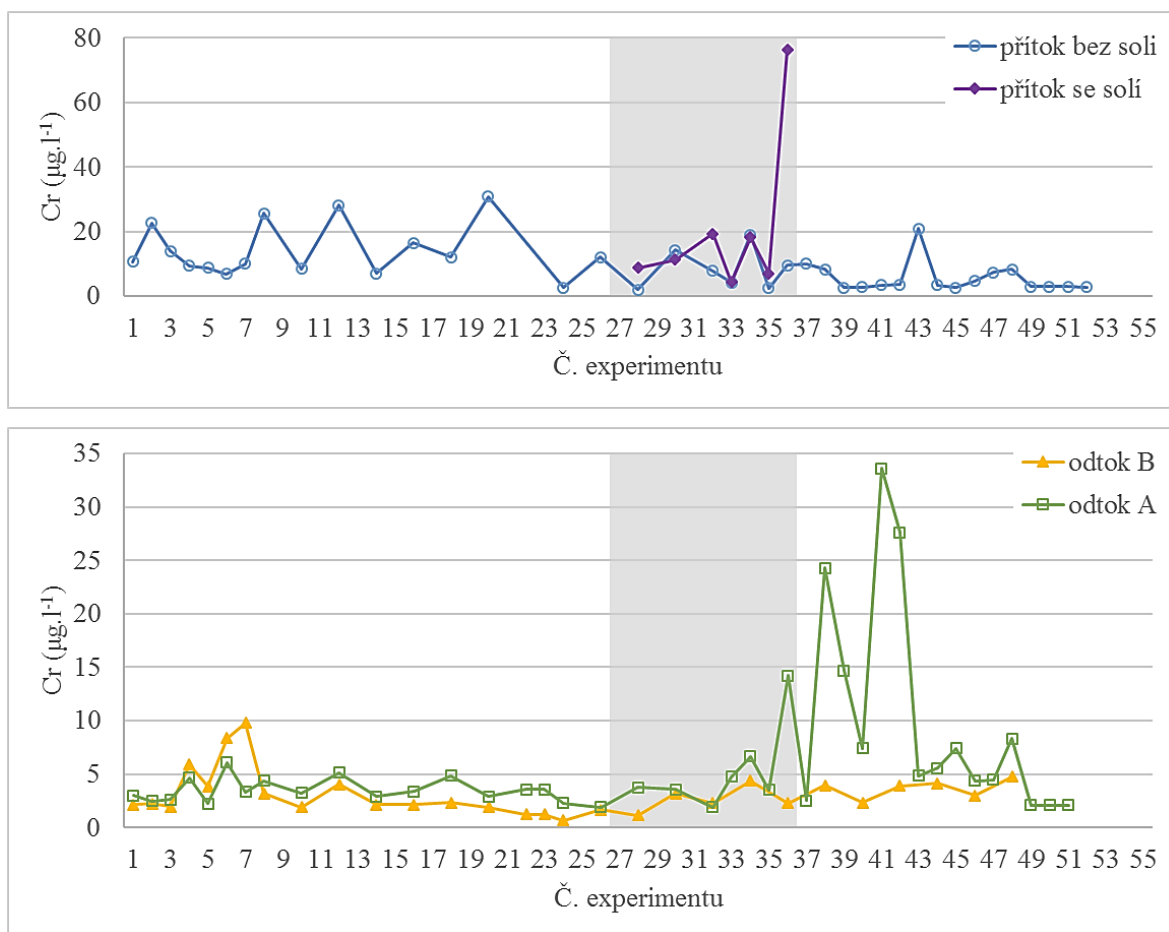
Obr. 25 – Barva odtoku ze vsakovací zkoušky (vlevo) a ze zimního experimentu č. 29 (vpravo)

Koncentrace kadmia (Obr. 26) během letního období v přítoku i v odtoku z obou válců mírně kolísala. Přítoková koncentrace v letním období činila průměrně 7,8 $\mu\text{g/l}$ s rozpětím 5,3 až 10,6 $\mu\text{g/l}$, odtoková koncentrace z obou válců činila průměrně 0,3 $\mu\text{g/l}$ a dosahovala maximální hodnoty 1,9 $\mu\text{g/l}$. Během zimního a jarního období byly koncentrace v přítoku bez soli i se solí nižší (průměrně 3,3 $\mu\text{g/l}$), což se projevilo i nižší koncentrací v odtoku. Průměrná koncentrace za tato 2 období v odtoku ze soleného válce A byla 0,04 $\mu\text{g/l}$ a z referenčního válce B 0,09 $\mu\text{g/l}$.



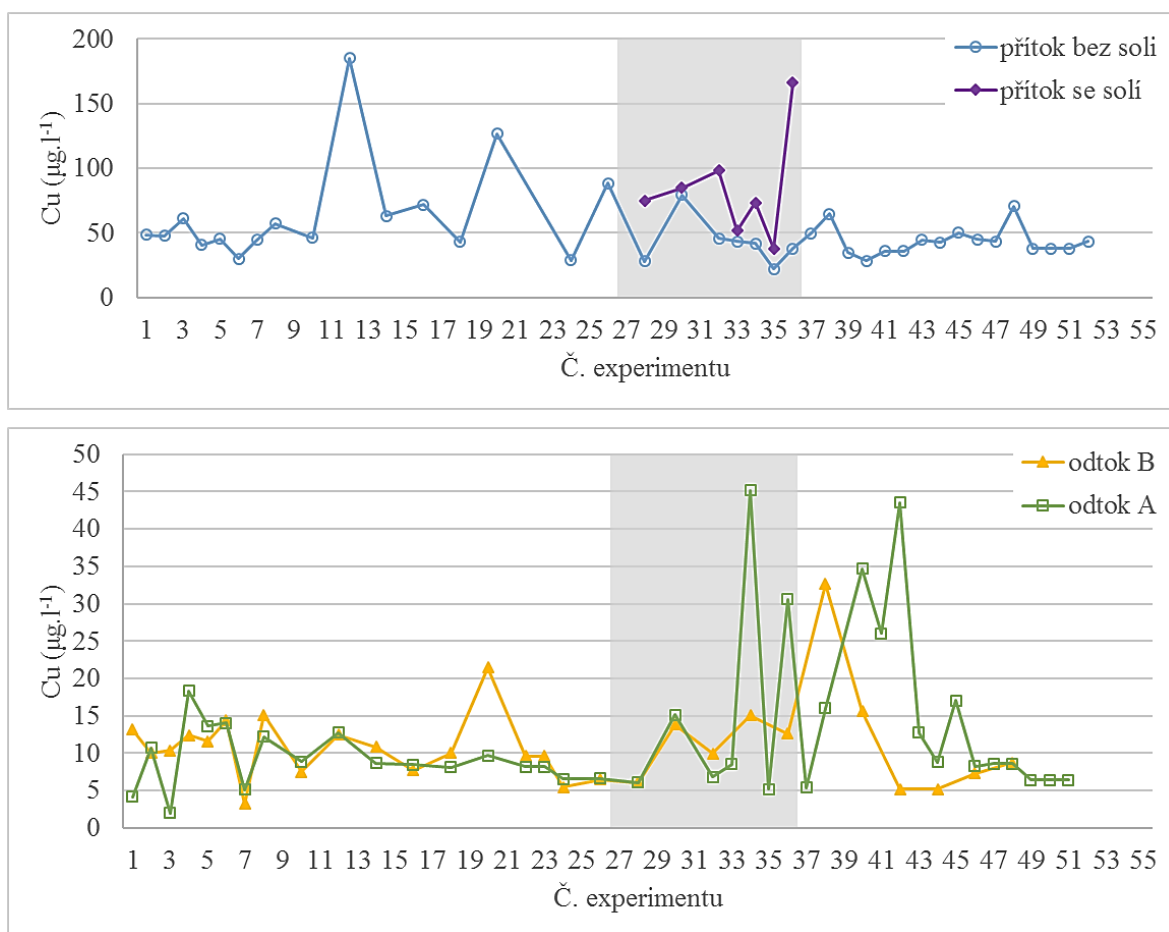
Obr. 26 – Graf průběhu koncentrace Cd v přítoku do válců (nahore) a v odtoku z válců (dole)

Koncentrace chromu (Obr. 27) v přítoku bez soli se pohybovala mezi 2,0 a 30,8 $\mu\text{g/l}$ (průměrně 9,6 $\mu\text{g/l}$) a se solí mezi 4,4 a 76,3 $\mu\text{g/l}$. V odtoku z referenčního válce B byla průměrná koncentrace Cr za celé období 3,2 $\mu\text{g/l}$. Oproti tomu v odtoku ze soleného válce A byl od konce zimního období pozorován nárůst odtokové koncentrace (na maximální hodnotu 33,6 $\mu\text{g/l}$), jehož důvodem mohl být vliv přítomnosti soli spolu s vyšší přítokovou koncentrací. Od 43. experimentu byla v odtoku z válce A pozorována obdobná hodnota koncentrace jako v letním období.



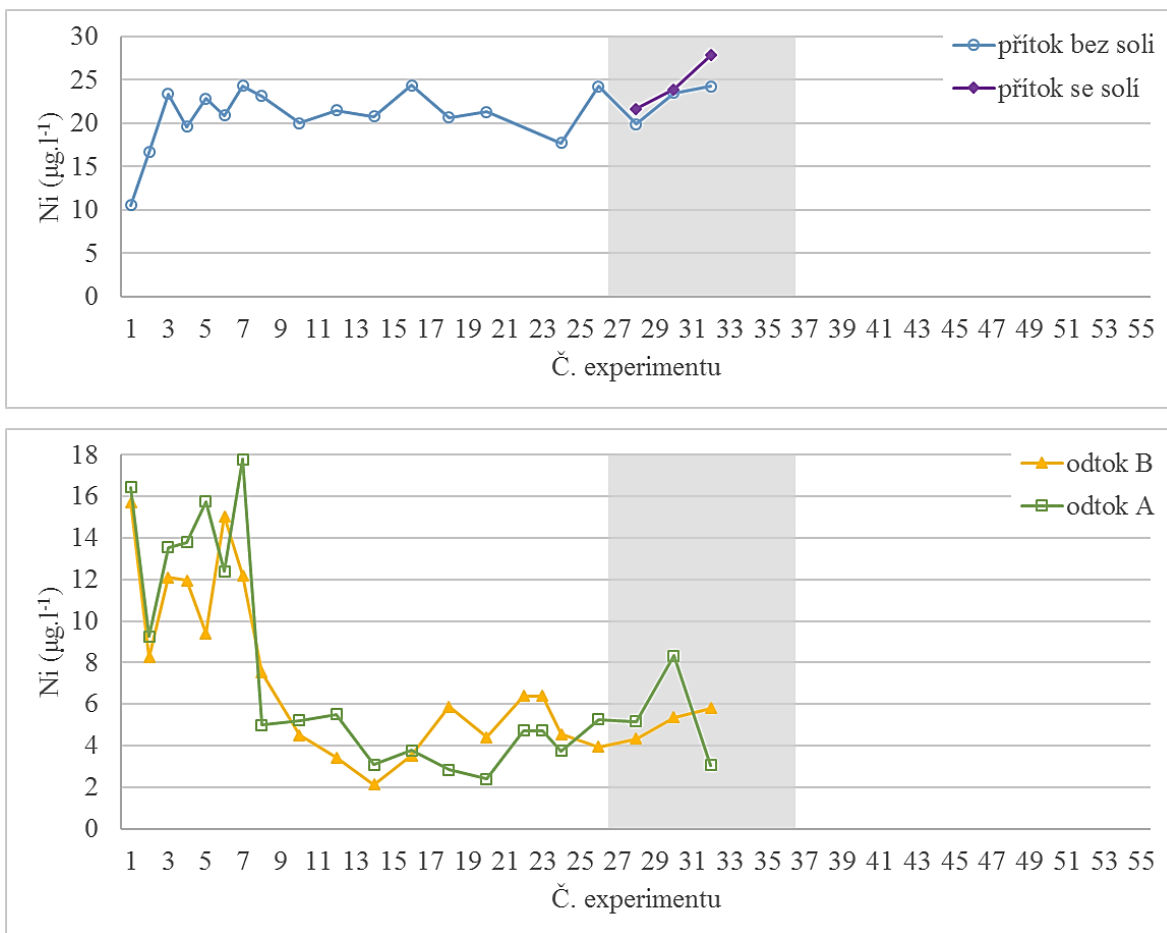
Obr. 27 – Graf průběhu koncentrace Cr v přítoku do válců (nahore) a v odtoku z válců (dole)

Koncentrace mědi (Obr. 28) v přítoku (bez soli i se solí) činila průměrně 56,9 $\mu\text{g/l}$ s rozpětím od 22,1 do 185,1 $\mu\text{g/l}$. Během letního období měly odtokové koncentrace podobný průběh, průměrná odtoková koncentrace Cu z obou válců během letního období byla 9,9 $\mu\text{g/l}$. Během zimního období v odtoku ze soleného válce A začalo docházet ke kolísání koncentrace spolu s dosahováním vyšších hodnot (až 45,1 $\mu\text{g/l}$), což po 46. experimentu ustalo. Též v odtoku z válce B byl pozorován nárůst koncentrace, a to v odtoku z 38. experimentu, což může souviset s větším (cca dvojnásobným) načerpaným objemem vody během tohoto experimentu než během pěti předchozích experimentů.



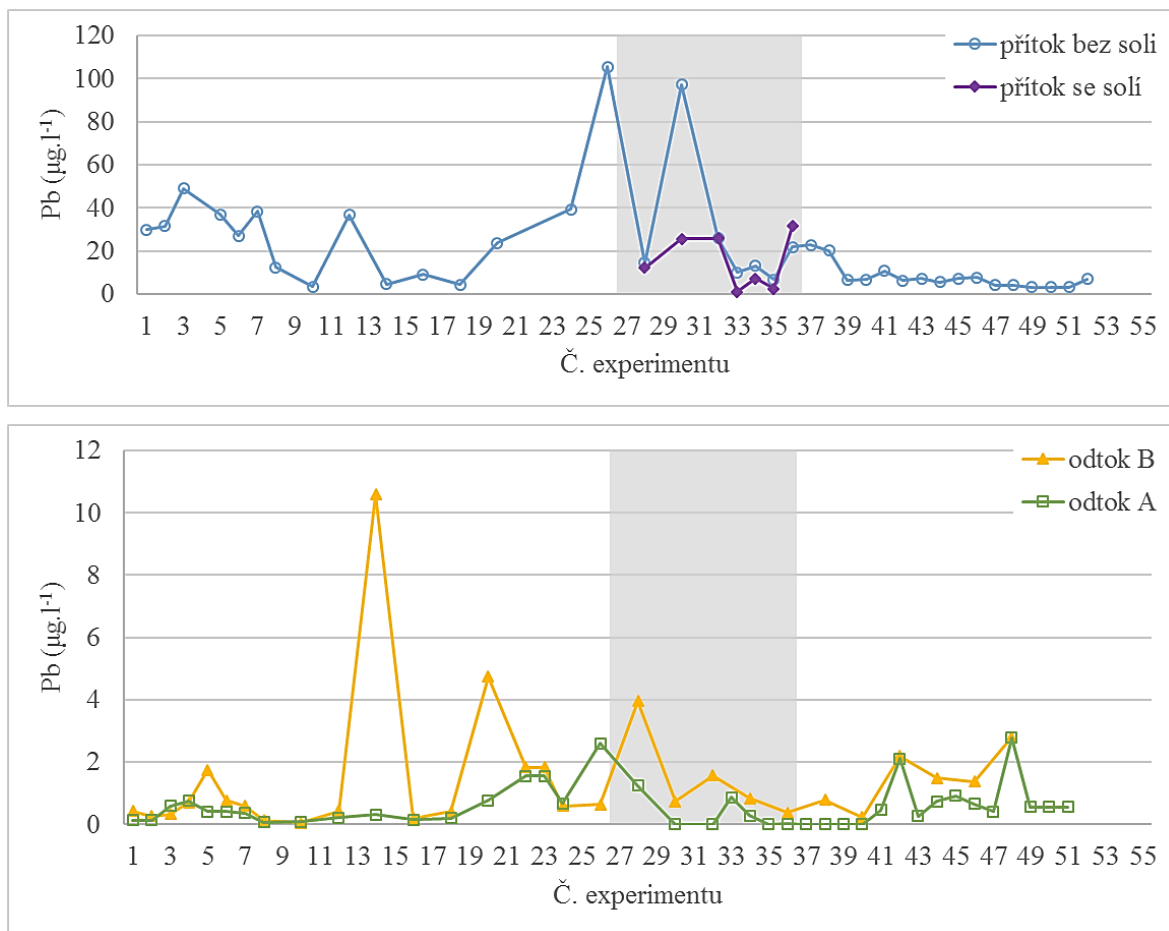
Obr. 28 – Graf průběhu koncentrace Cu v přítoku do válců (nahore) a v odtoku z válců (dole)

Koncentrace niklu (Obr. 29) v přítoku (bez soli i se solí) činila průměrně 21,5 $\mu\text{g/l}$, odtoková koncentrace byla pro oba válce podobná. Odtoková koncentrace klesla po prvních 7 experimentech, kde činila průměrně 13,1 $\mu\text{g/l}$, na hodnotu 4,7 $\mu\text{g/l}$.



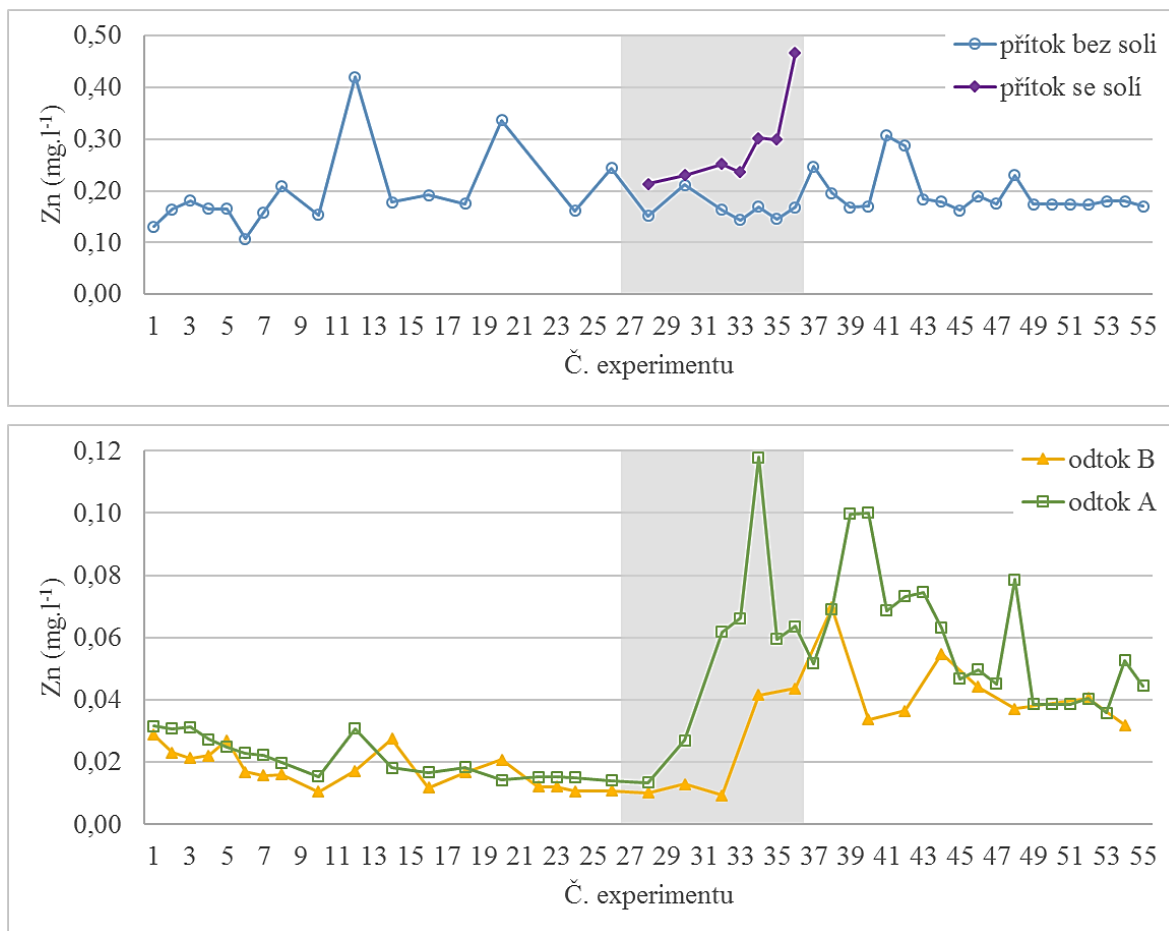
Obr. 29 – Graf průběhu koncentrace Ni v přítoku do válců (nahore) a v odtoku z válců (dole)

Koncentrace olova (Obr. 30) v přítoku bez soli výrazně kolísala od 3,3 do 105,6 $\mu\text{g/l}$ a v přítoku se solí od 1,1 do 31,5 $\mu\text{g/l}$. Během jarního období byla přítoková koncentrace nízká, průměrně 7,2 $\mu\text{g/l}$. Odtokové koncentrace obsahovaly hodnoty pod mezí stanovitelnosti, zároveň byly pozorovány i vyšší koncentrace, zejm. v odtoku z válce B, kde byla maximální koncentrace Pb 10,6 $\mu\text{g/l}$, zatímco v odtoku z válce A dosahovala 2,8 $\mu\text{g/l}$.



Obr. 30 – Graf průběhu koncentrace Pb v přítoku do válců (nahore) a v odtoku z válců (dole)

Koncentrace zinku (Obr. 31) v přítoku bez soli činila průměrně 0,20 mg/l a v přítoku se solí 0,29 mg/l. Odtokové koncentrace Zn se během letního období pohybovaly okolo průměrné hodnoty 0,02 mg/l. Ke konci zimního období vzrostly koncentrace v odtoku z obou válců a jen pozvolna klesaly k původním hodnotám, přičemž větší nárůst byl zaznamenán v odtoku ze soleného válce A.



Obr. 31– Graf průběhu koncentrace Zn v přítoku do válců (nahore) a v odtoku z válců (dole)

Průměrná účinnost odstraňování TK za simulovaný rok provozu činí 77 % v soli zatíženém válci A a 81 % v referenčním válci B (Tab. 12). Průměrná účinnost odstraňování TK za rok i za jednotlivá období přesahovala v obou válcích pro Cd 95 % a pro Pb 80 % s vyššími účinnostmi pozorovanými v soli zatíženém válci A. Vyšší účinnosti odstraňování v referenčním válci B byly pozorovány pro Zn, pro něž se účinnosti pohybovaly nad 70 %. Během roku byl pro Cu, Pb a Zn zaznamenán pokles účinnosti. Pro Ni byl pozorován naopak nárůst účinnosti odstraňování, což však vychází z nekompletních analýz. Účinnost odstraňování Cu přesahovala 65 %, taktéž pro Cr za letní a za zimní období, kdežto za jarní období měl ve válci A zápornou účinnost odstraňování (-80,5 %) a ve válci B účinností nízkou (34,4 %).

Tab. 12 – Průměrná účinnost odstraňování TK za simulovaný rok a za jednotlivá období pro válce A a B (%)

TK	Cd		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
roční	96,8	95,3	46,7	67,0	78,8	78,6	63,9	65,4	96,8	92,7	79,5	86,7
letní	96,5	95,9	75,4	77,7	85,7	83,5	61,1	63,2	98,0	95,2	89,1	90,9
zimní	99,5	98,8	73,6	68,8	80,0	73,0	77,5	77,1	97,7	94,5	79,5	85,7
jarní	98,0	95,0	-80,5	34,4	66,0	71,7	-	-	91,6	81,3	70,2	77,7

Maximální i průměrné odtokové koncentrace TK jsou vyšší než koncentrace analyzované v pitné vodě. V porovnání s hygienickými limity ukazatelů pitné vody [48] jsou maximální koncentrace Cd, Cr, Cu, Ni a Pb na odtoku z obou válců nižší než uvedený limit vyjma koncentrace Pb v odtoku z válce B, která limit mírně překročila o 0,6 µg/l (Tab. 13). V rozpětí hygienického limitu 6,5-9,5 se pohybuje i hodnota pH (7,7-8,8), zatímco maximální hodnoty CHSK_{Cr} v odtoku z válce A (172 mg/l) i z válce B (60 mg/l) limit CHSK_{Mn} 3 mg/l výrazně překračovaly.

Tab. 13 – Porovnání maximálních odtokových koncentrací TK s koncentrací TK analyzovaných v pitné vodě a s hygienickými limity ukazatelů pitné vody uvedenými v [48]

TK	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
jednotky	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l
válec A	1,25	33,58	45,14	17,78	2,78	0,118
válec B	1,90	9,81	32,63	15,71	10,59	0,070
pitná voda	0,04	0,17	0,30	5,30	0,45	0,002
hyg. limit (typ NMH)	5,00	50,00	1000,00	20,00	10,00	-

Pozn.: NMH: nejvyšší mezní hodnota

4.2.2 Analýzy pevné matrice

Měřeny byly počáteční koncentrace TK v použitém filtračním materiálu (Tab. 14) a po ukončení zatěžování válce výsledné koncentrace ve vzorcích materiálu po hloubce

zařízení (Tab. 16), totéž i ve vegetaci (Tab. 15). Zvýšení či snížení koncentrace těžkých kovů určené jako rozdíly koncové a počáteční koncentrace je zobrazeno v Obr. 32 a Obr. 33.

Tab. 14 – Výchozí koncentrace v použitých materiálech před experimenty (mg/kg)

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Ca	Mg	Na
travní drn	22,25	22,84	19,38	22,32	69,54	17694,9	3338,7	1077,8	167,5
půda	17,82	14,11	10,97	8,16	45,28	9071,2	6519,7	3171,6	129,5

Tab. 15 – Výchozí, dílčí a koncové koncentrace ve vegetaci (mg/kg)

	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Fe	Ca	Mg	Na
výchozí	9,24	15,14	5,70	6,81	25,92	1398,8	10668,7	4665,1	266,8
A po létě	0,85	18,88	4,28	0,18	55,46	249,3	10531,5	2620,4	750,5
B po létě	9,10	26,26	13,57	1,10	103,70	4126,3	20379,5	4701,4	1340,0
A po jaře	8,23	34,13	14,82	12,30	170,66	3840,7	12538,2	1085,8	1271,0
B po jaře	4,61	32,72	16,66	10,31	222,24	1297,0	11266,9	1482,4	255,7

Tab. 16 – Průměrná analyzovaná koncentrace Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe, Ca, Mg a Na (mg/kg) po experimentech ve vegetaci a vrstvách zařízení

materiál		vegetace	travní drn	travní drn/ půda	půda			
hloubka (cm)			0-2,5	2,5-5,5	5,5-9	9-14	14-21	21-31
Cr	A	8,23	18,35	20,86	23,81	14,88	15,00	15,39
	B	4,61	18,47	22,02	19,53	14,94	13,80	14,87
Cu	A	34,13	19,22	22,70	24,48	13,61	11,62	12,03
	B	32,72	19,44	21,06	23,35	12,97	12,73	12,63
Ni	A	14,82	12,50	15,80	18,97	9,41	9,12	9,24
	B	16,66	15,06	15,82	18,12	9,39	8,77	9,06
Pb	A	12,30	13,97	24,66	25,66	10,34	9,97	9,95
	B	10,31	17,31	29,69	23,91	9,43	9,43	9,58
Zn	A	170,66	66,55	70,65	56,07	42,32	45,44	44,51
	B	222,24	73,30	68,26	59,57	48,48	60,64	45,75
Fe	A	3840,7	11712,5	14391,6	12860,0	10268,0	10034,4	10165,6
	B	1297,0	13195,2	14212,3	14949,7	9725,3	9415,5	9538,7
Ca	A	12538,2	8786,4	4524,4	4041,9	5462,8	5767,8	7109,6
	B	11266,9	7007,1	4412,4	3418,2	5571,1	6161,8	6025,9
Mg	A	1085,8	2249,0	1658,5	1333,0	1976,3	1987,2	2153,8
	B	1482,4	1845,9	1540,5	1347,0	1973,6	1989,1	2046,1
Na	A	1271,0	286,9	366,3	361,7	190,5	179,5	176,9
	B	255,7	186,6	202,0	133,7	210,3	80,8	79,5

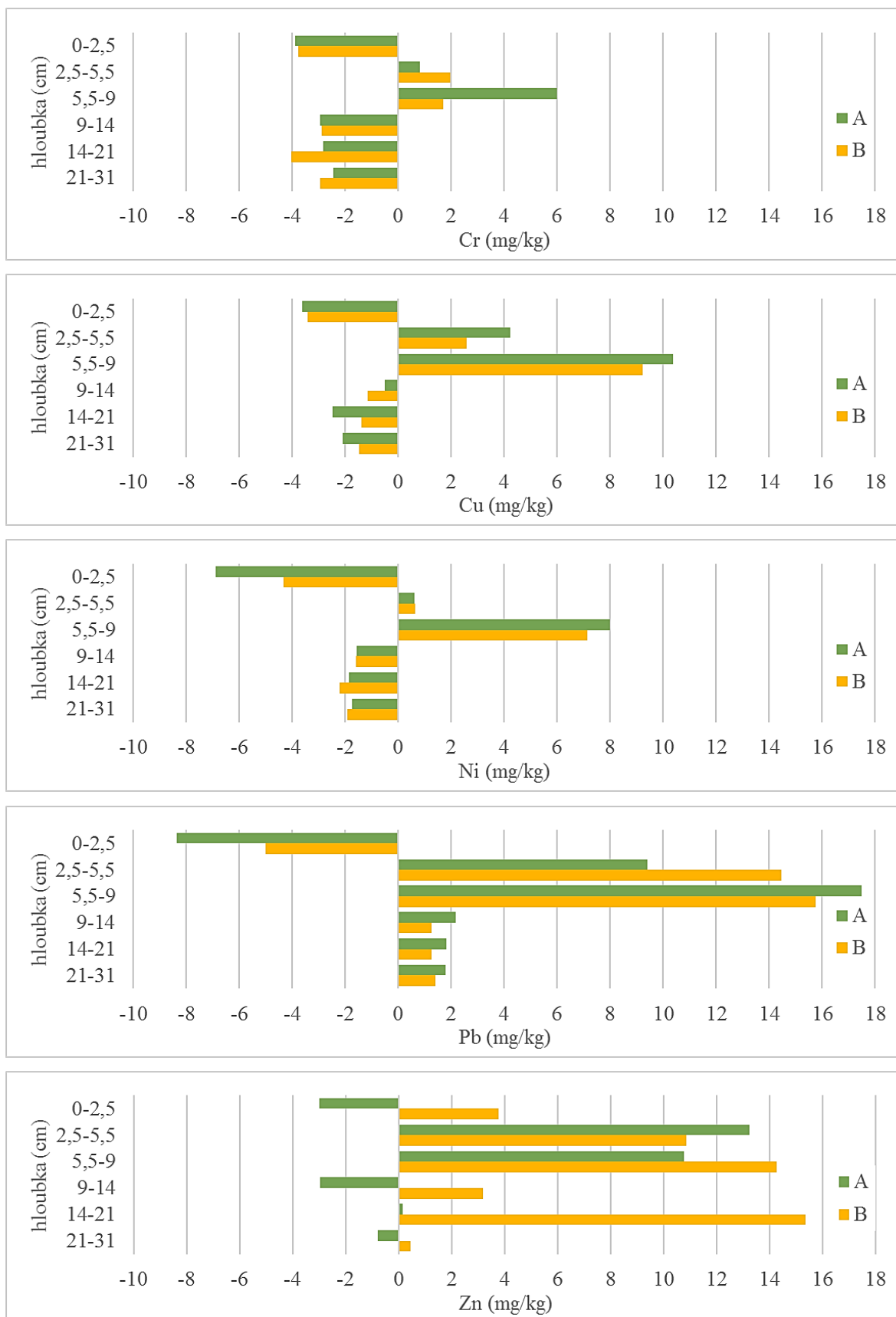
Vegetace má oproti filtračnímu médiu vysokou koncentraci Cu, Zn, Ca a Na (Tab. 16).

V horních 2,5 cm filtračního média čili v travním drnu klesla v obou válcích oproti výchozí koncentraci v drnu koncentrace Cr, Cu, Ni, Pb a Fe a ve válci A též koncentrace Zn (Obr. 32, Obr. 33). Zároveň byl zaznamenán nárůst koncentrace Ca a Mg i Na, který byl výraznější ve válci A než ve válci B (Obr. 33). Výchozí koncentrace kovů v horní vrstvě média, tj. v travním drnu, před experimenty byly vyšší než v níže použité půdě, u koncentrací Ca a Mg tomu bylo naopak (Tab. 14). Pokles koncentrací kovů může být způsoben jejich vyplavováním do nižších vrstev. Nárůst Ca a Mg mohl být způsoben zachycování Ca a Mg ze syntetické vody i přes nárůst koncentrace Na.

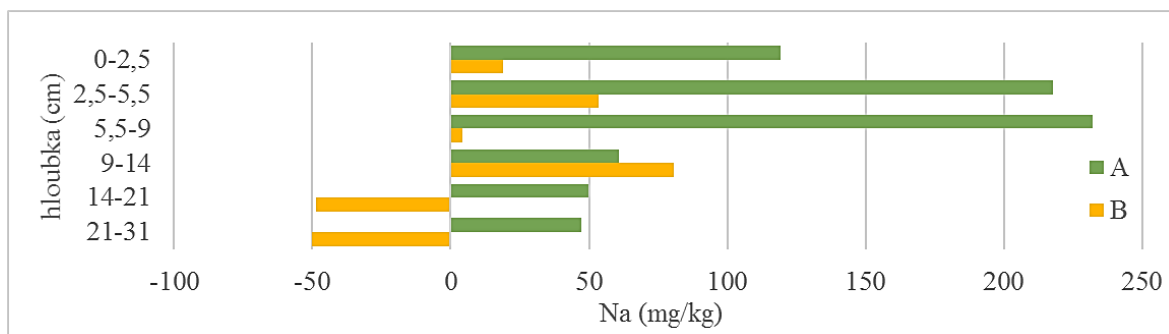
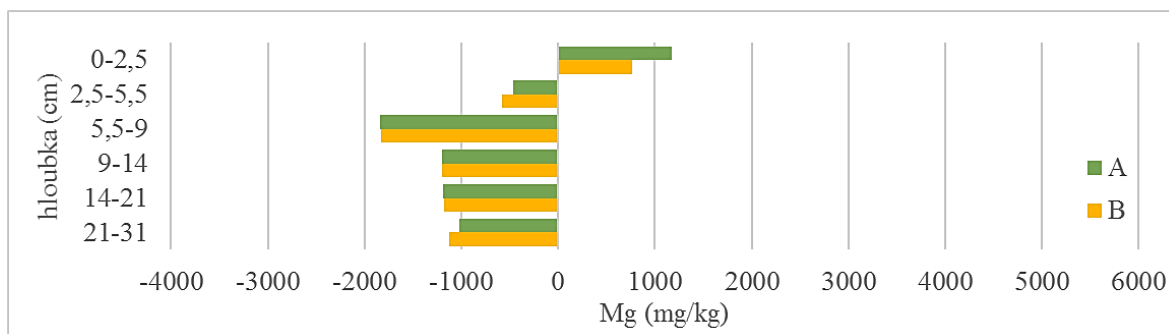
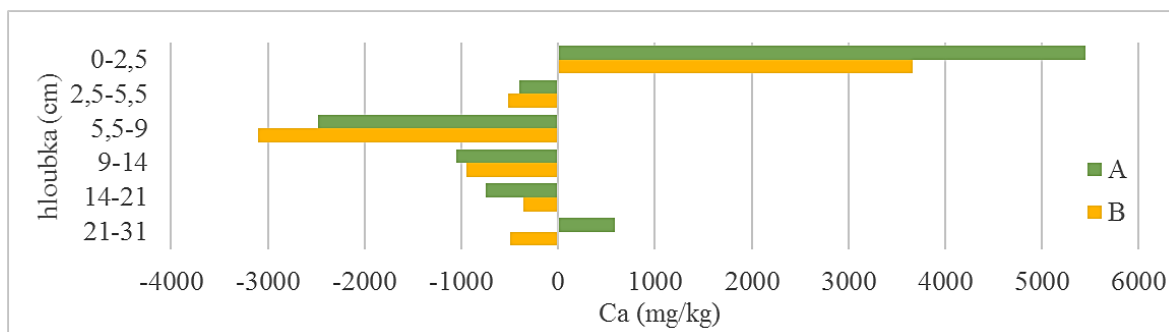
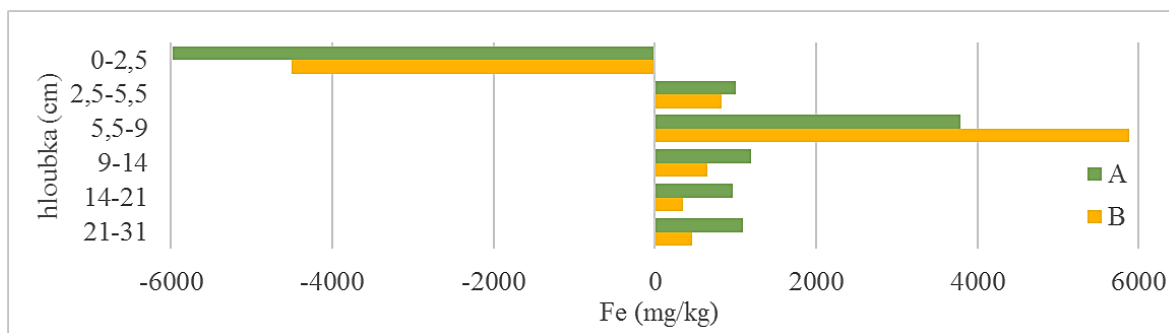
V hloubce 2,5 až 9 cm filtračního média nastalo výrazné zvýšení koncentrací Cr, Cu, Ni, Pb, Zn a Fe (tj. všech analyzovaných TK). Koncentrace Ca a Mg se snížila a koncentrace Na naopak vzrostla. Příčinou je pravděpodobně iontová výměna, podpořená větší kapacitou půdy filtračního média než travního drnu.

V půdě v hloubce 9-31 cm byl pro Cr, Cu a Ni pozorován pokles koncentrace oproti výchozím hodnotám, zatímco pro Pb a Fe nárůst. Koncentrace Zn byla v hloubce 9-31 cm ve válci B oproti výchozí koncentraci vyšší, zatímco v solí zatíženém válci A byla nižší. Koncentrace Ca a Mg byla v hloubce 9-21 cm nižší než výchozí koncentrace, zatímco v hloubce 21-31 cm ve válci A byla vyšší. Koncentrace Na v solí zatíženém válci A díky dávkování NaCl výrazně vzrostla po celé hloubce, v referenčním válci B byl nárůst koncentrace menší, a to do hloubky 14 cm, hlouběji se koncentrace oproti výchozí snížila. Nárůst koncentrace ve válci B může být mj. způsoben tím, že i v přítoku bez soli byla určitá koncentrace Na (průměrně 7,4 mg/l).

Koncentrace Zn dosahovala v referenčním válci B maximální hodnoty v hloubce 14-21 cm, což je vrstva, od níž byla koncentrace Na ve válci B nižší než výchozí. Ve válci A bylo zaznamenáno spíše snížení koncentrace Zn oproti výchozí hodnotě vyjma výrazného nárůstu ve vrstvě 2,5-9 cm.

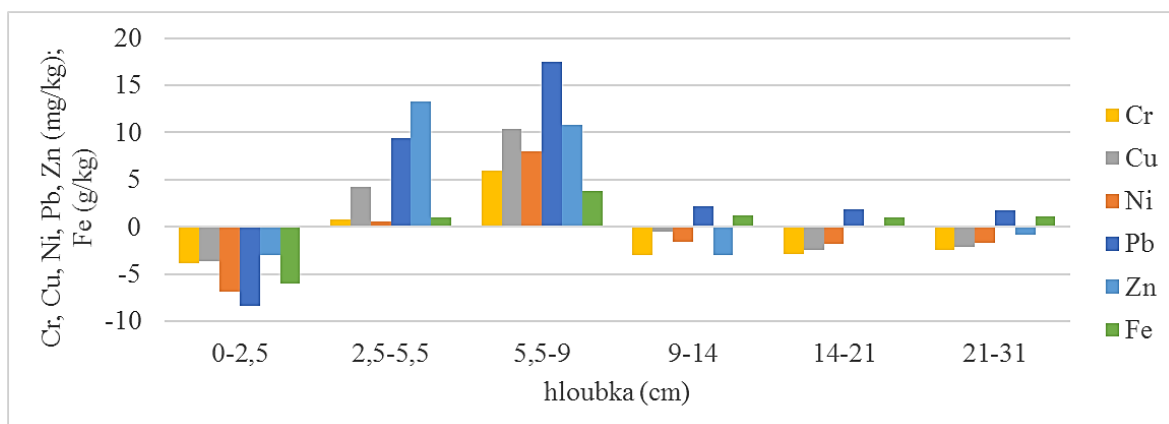


Obr. 32 – Rozložení nárůstu a poklesu koncentrací Cr, Cu, Ni, Pb a Zn po hloubce válců

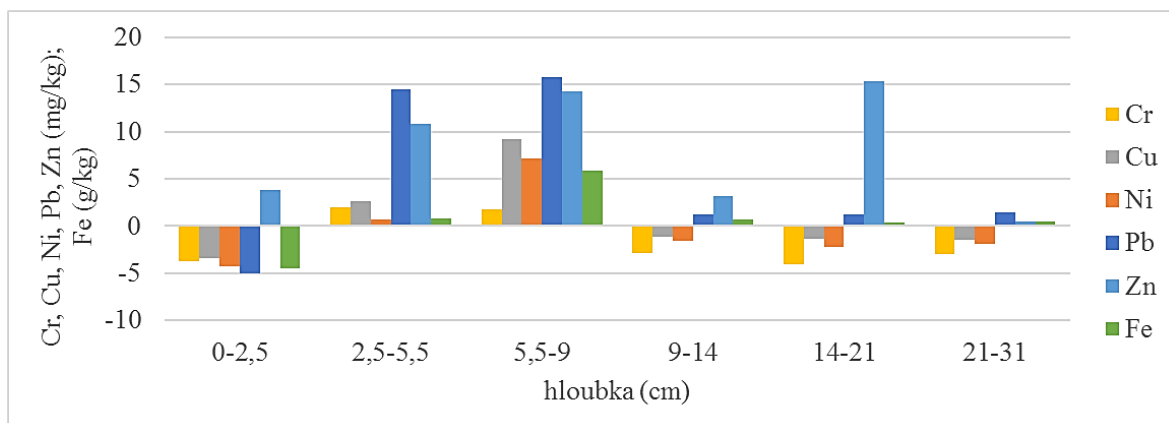


Obr. 33 – Rozložení nárůstu a poklesu koncentrací Fe, Ca, Mg a Na po hloubce válců

Souhrnné grafické znázornění nárůstu a poklesu koncentrací TK ve vrstvách filtračního média válců jsou uvedeny v Obr. 34 a Obr. 35.



Obr. 34 – Nárůst a pokles koncentrací TK ve vrstvách filtračního média válce A



Obr. 35 – Nárůst a pokles koncentrací TK ve vrstvách filtračního média válce B

5 Závěr

V diplomové práci byla provedena literární rešerše vsakovacích zařízení, znečištění dešťového odtoku z pozemních komunikací, chování těžkých kovů ve vsakovacích zařízeních a laboratorních experimentů zaměřených na zatěžování sloupců vsakovacích zařízení za účelem zjišťování vlivu solí aj., na jejímž základě byl navržen vlastní laboratorní experiment.

Laboratorní experiment obnášel dynamické zatěžování dvou válců vsakovacího zařízení syntetickou dešťovou vodou reprezentující dešťový odtok ze středně zatížené silniční komunikace. Simulován byl první rok provozu zařízení. Oba válce byly zatíženy rozpuštěnou formou těžkých kovů (Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb a Zn). První válec byl během simulovaného zimního období přidavně zatížen solí NaCl, druhý válec sloužil jako referenční.

Vliv zimního solení se projevil již během aplikace soli zejm. zvýšeným vyplavováním Ca a Mg z filtračního média a vysokou odtokovou koncentrací Cl. Po ukončení aplikace soli výrazně ztmavla barva odtoku z válce a současně vzrostla hodnota CHSK. U CHSK došlo k překročení hygienického limitu ukazatele pitné vody v jarním období v odtoku z obou válců.

Na odtokových koncentracích těžkých kovů není vliv solení jednoznačně patrný, nárůst či pokles koncentrace mohl být způsoben řadou dalších faktorů. Odtokové koncentrace Cd, Cr, Cu a Ni z obou válců i hodnoty pH vyhovovaly hygienickým limitům ukazatelů pitné vody, zatímco odtoková koncentrace Pb limit mírně překračovala. Maximální odtokové koncentrace Cr, Cu, Ni i Zn byly vyšší v odtoku ze solí zatíženého válce, zatímco u Cd a Pb tomu bylo naopak.

Celková průměrná účinnost odstraňování analyzovaných těžkých kovů ve válci je mírně nižší v solí zatíženém válci (77 %) než v referenčním válci (81 %). Průměrná roční účinnost odstraňování rozpuštěné formy Cd činila 96 %, Cr 57 %, Cu 79 %, Ni 65 %, Pb 95 % a Zn 83 %, přičemž byl zaznamenán postupný pokles účinnosti odstraňování Cr, Cu, Pb a Zn během experimentace. Průměrné účinnosti za jednotlivá období přesahovaly 65 % vyjma účinnosti odstraňování Cr v jarním období, která byla v referenčním válci nízká a v solí zatížením válci záporná.

Vzhledem k výraznějšímu kolísání koncentrací těžkých kovů v přítoku, ovlivnění měřených hodnot vodou z předcházejících dešťových událostí a nekompletním výsledkům

nebylo možné dostatečně vyhodnotit vliv dynamického zatěžování na odstraňování těžkých kovů ve vsakovacím zařízení.

Největší nárůst koncentrace všech analyzovaných těžkých kovů v obou válcích byl pozorován v hloubce 2,5 až 9 cm pod zatravněným povrchem zařízení. Negativní vliv soli je patrný zejm. na změně koncentrace Zn, která v referenčním válci vzrostla po celé hloubce, zatímco v solí zatíženém válci jen v hloubce 2,5 až 9 cm.

Z výsledků vyplývá, že po prvním roce provozu není ještě vyčerpána adsorpční kapacita filtračních materiálů, a tudíž lze stále očekávat významné odstraňování přitékajících těžkých kovů.

6 Literatura

- [1] KLUGE, B., MARKERT, A., FACKLAM, M., SOMMER, H., KAISER, M., PALLASCH, M. and G. WESSOLEK. 2016. Metal accumulation and hydraulic performance of bioretention systems after long-term operation. *J Soil Sediments*, 8. DOI: 10.1007/s11368-016-1533-z
- [2] HELMREICH, B., HILLIGES, R., SCHRIEWER, A. and H. HORN. 2010. Runoff pollutants of a highly trafficked urban road – Correlation analysis and seasonal influences. *Chemosphere*, 80(9), 991–997. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.05.037
- [3] SØBERG, L. C., VIKLANDER, M. and G.-T. BLECKEN. 2014. The influence of temperature and salt on metal and sediment removal in stormwater biofilters. *Water Science & Technology*, 69(11), 2295–2304. DOI: 10.2166/wst.2014.161
- [4] BLECKEN, G.-T., MARSALEK, J. and M. VIKLANDER. 2011. Laboratory Study of Stormwater Biofiltration in Low Temperatures: Total and Dissolved Metal Removals and Fates. *Water, Air, and Soil Pollution*, 219(1-4), 303–317. DOI: 10.1007/s11270-010-0708-2
- [5] TNV 75 9011. *Hospodaření se srážkovými vodami*. Praha: MZe, březen 2013.
- [6] HORSTMAYER, N., HUBER, M., DREWES, J.E. and B. HELMREICH. 2016. Evaluation of site-specific factors influencing heavy metal contents in the topsoil of vegetated infiltration swales. *Science of the Total Environment*, 560–561, 19–28. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.051
- [7] HUBER, M., WELKER, A. and B. HELMREICH. 2016. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: Occurrence, influencing factors, and partitioning. *Science of the Total Environment*, 541, 895–919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.033
- [8] KAYHANIAN, M., FRUCHTMAN, B.D., GULLIVER, J.S., MONTANARO, C., RANIERI, E. and S. WUERTZ. 2012. Review of highway runoff characteristics: comparative analysis and universal implications. *Water Research*, 46, 6609–6624. DOI: 10.1016/j.watres.2012.07.026
- [9] BERÁNKOVÁ, D., BRTNÍKOVÁ, H., KUPEC, J., HUZLÍK, J. a V. JANDOVÁ. 2005. Srážkoodtokové poměry dálničních a rychlostních komunikací – informace o dílčích výsledcích grantového úkolu MDČR v roce 2005. *Conference Paper*, 8s. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228690467_Srazkoodtoko

ve_pomery_dalnicnich_a_rychlostnich_komunikaci-
informace_o_dilcich_vysledcich_grantoveho_ukolu_MDCR_v_roce_2005

- [10] ZGHEIB, S., MOILLERON, R. and G. CHEBBO. 2012. Priority pollutants in urban stormwater: part 1 – case of separate storm sewers. *Water Research*, 46 (20), 6683–6692. DOI: 10.1016/j.watres.2011.12.012
- [11] BERÁNKOVÁ, D., BRTNÍKOVÁ, H., KUPEC, J., PRAX, P. and J. HUZLÍK. 2008. Pollution of the Highways Runoff. *Transactions on Transport Sciences*, 1(2). DOI: 10.5507/tots.2008.011
- [12] BORRIS, M., ÖSTERLUND, H., MARSALEK, J. and M. VIKLANDER. 2016. Contribution of coarse particles from road surfaces to dissolved and particle-bound heavy metal loads in runoff: A laboratory leaching study with synthetic stormwater. *Science of the Total Environment*, 573, 212–221. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.062
- [13] GRÜNWARD, A. 2005. *Chemie*. Vydavatelství ČVUT, Praha, 131s., ISBN 80-01-03243-4
- [14] KREJČÍ, V. a kol. 2002. *Odvodnění urbanizovaných území – koncepční přístup*. Eds. P. Hlavínek a E. Zeman, NOEL 2000 s.r.o., Brno, 562s., ISBN 80-86020-39-8
- [15] HAILE, T.M., HOBIGER, G., KAMMERER, G., ALLABASHI, R., SCHAERFINGER, B. and M. FUERHACKER. 2016. Hydraulic Performance and Pollutant Concentration Profile in a Stormwater Runoff Filtration Systems. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227:34. DOI: 10.1007/s11270-015-2736-4
- [16] LUNDY, L., ELLIS, J.B. and D.M. REVITT. 2012. Risk prioritisation of stormwater pollutant sources. *Water Research*, 46(20), 6589–6600. DOI: 10.1016/j.watres.2011.10.039
- [17] GÖBEL, P., DIERKES, C. and W. G. COLDEWEY. 2007. Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, 91(1–2), 26–42. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.08.008
- [18] BARRETT, M.E., ZUBER, R.D., COLLINS, III, E.R. et al. 1995. Review and evaluation of literature pertaining to the quantity and control of pollution from highway runoff and construction. *CRWR Online Report 95-5*. Dostupné z: https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/6737/crwr_onlinereport_95-5.pdf?sequence=2

- [19] MAREŠOVÁ, V., ŠUCMANOVÁ, M., MARVANOVÁ, S., HUZLÍK, J., ADAMEC, V., OCELKA, T. and J. TRÍSKA. 2004. Ecotoxicological and chemical evaluation of runoff waters coming from motorways. *Poster*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/260036749_Ecotoxicological_and_chemical_evaluation_of_runoff_waters_coming_from_motorways
- [20] ADAMEC, V., LIČBINSKÝ, R., SIKOROVÁ, L. and J. HUZLÍK. 2010. Platinum, Palladium and Rhodium in the Environment. *Proceedings of IV Czech-Slovak Scientific Conference „Transport, Health and Environment“*, Blansko, Česká republika, 2010. 217-224
- [21] KELTING, D.L. and C.L. LAXSON. 2010. Review of Effects and Costs of Road De-icing with Recommendations for Winter Road Management in the Adirondack Park. Paul Smith's College, *Adirondack Watershed Institute Report # AWI2010-01*. Dostupné z: http://www.adkwatershed.org/files/road_salt-_final_dlk.pdf
- [22] BAUM, P. and U. DITTMER. 2017. Characteristics of particles and associated micropollutants in stormwater runoff. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 527-534
- [23] ROSSI, L., DE ALENCASTRO, L., KUPPER, T. and J. TARRADELLAS. 2002. Urban stormwater contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs) and its importance for urban water systems in Switzerland. *Science of the Total Environment*, 322 (2004), 179–189. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00361-9
- [24] TRÍSKA, J., ADAMEC, V., RŮŽIČKOVÁ, K., HUZLÍK, J. and V. MAREŠOVÁ. 2003. Vliv dopravy na životní prostředí – polyaromatické uhlovodíky v odtokové vodě a sedimentu z dálničního tělesa. *Conference Paper*. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/266097569_VLIV_DOPRAVY_NA_ZIVOTNI_PROSTREDI_-_POLYAROMATICKE_UHLOVODIKY_V_ODTOKOVE_VODE_A_SEDIMENTU_Z_DALNICNIHO_TELESA
- [25] ALLABASHI, R., MEASHO HAILE, T., FÜRHACKER, M., PITHA, U., SCHARF, B., STACH, W., ZIEGENBALG, F., HEIDINGER, S. and T. ERTL. 2017. Performance evaluation of sustainable drainage systems regarding to heavy metal retention. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 1046-1048

- [26] WELKER, A., DIERKES, C., DIERSCHKE, M. and M. HUBER. 2017. Evaluation of novel sorption media filter materials for the advanced treatment of stormwater runoff from highways *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 1019-1022
- [27] HUSNA TAKAIJUDIN, HOW TION PUAY, AMINUDDIN AB. GHANI, NOR AZAZI ZAKARIA and TZE LIANG LAU. 2015. The influence of filter depths in capturing nutrient contaminants for nonvegetated bioretention column: A preliminary study. *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, The Hague, the Netherlands, 2015. ISBN 978-90-824846-0-1
- [28] SUN, X. and DAVIS, A. P. 2007. Heavy metal fates in laboratory bioretention systems. *Chemosphere*, 66(9), 1601-1609. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.08.013
- [29] SØBERG, L. C., VIKLANDER, M. and G.-T. BLECKEN. 2017. Do salt and low temperature impair metal treatment in stormwater bioretention cells with or without a submerged zone? *Science of the Total Environment*, 579, 1588–1599. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.179
- [30] NELSON, S. S., YONGE, D. R., and M. E. BARBER. 2009. Effects of road salts on heavy metal mobility in two eastern Washington soils. *Journal of Environmental Engineering*, 135(7), 505-510. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:7(505)
- [31] MCMANUS, M. and A. DAVIS. 2017. Impact of periodic high concentrations of salts on bioretention nutrients performance. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 913-915
- [32] GLAISTER, B.J., FLETCHER, T.D., COOK, P.L.M. and B. E. HATT. 2013. Co-optimisation of Phosphorus and Nitrogen Removal in Stormwater Biofilters: the Role of Filter Media, Vegetation and Saturated Zone. *Proceedings of 8th International Conference Novatech*, Lyon, France, 2013.
- [33] HERMAWAN, A.A., TALEI, A., SALAMATINIA, B. and A. DELETIC. 2017. Performance of biofiltration system in stormwater treatment under tropical conditions. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 935-938

- [34] BLECKEN, G.-T., ZINGER, Y., DELETIC, A., FLETCHER, T. D. and M. VIKLANDER. 2008. Heavy Metal Removal by Stormwater Biofilters: Can It Withstand Alternative Wetting and Drying Conditions? *Proceedings of 11th International Conference on Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, 2008.
- [35] WANG, J., ZHAO, Y., YANG, L., TU, N., XI, G. and X. FANG. 2017. Removal of Heavy Metals from Urban Stormwater Runoff Using Bioretention Media Mix. *Water*, 9, 854. DOI: 10.3390/w9110854
- [36] NG, K.T., MCCARTHY, D., FARRELLY, M. and B. HATT. 2017. Improving the safety of vegetables cultivated in stormwater biofilters: Increasing metal retention with filter media amendments. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 953-956
- [37] PAYNE, E.G.I., PHAM, T., COOK, P.L.M., FLETCHER, T.D., HATT, B.E. and A. DELETIC. 2013. Biofilter design for effective nitrogen removal from stormwater – influence of plant species, inflow hydrology and use of a saturated zone. *Proceedings of 8th International Conference Novatech*, Lyon, France, 2013.
- [38] SUBRAMANIAM, D. N., EGODAWATTA, P., GALLAGE, C., MATHER P. and J. RAJAPAKSE. 2014. Significance of Drying Periods on Nitrate Removal in Experimental Biofilters. *Journal of Water Management Modeling*. DOI: 10.14796/JWMM.C381
- [39] BROWN, S., CORFMAN, A., MENDREY, K., KURTZ, K. and F. GROTHKOPP. 2015. Stormwater Bioretention Systems: Testing the Phosphorus Saturation Index and Compost Feedstocks as Predictive Tools for System Performance. *Journal of Environmental Quality*, Special Section: Soil in the City. DOI: 10.2134/jeq2014.10.0414
- [40] HELMREICH, B., HUBER, M., REMPE, L.M. and J.E. DREWES. 2017. Development of a two-step decentralized stormwater treatment system with a low-cost filter material for space-limited ultra-urban traffic areas. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 1016-1018
- [41] AIELLO, A., TILLOTSON, M. and C. BERRETTA. 2017. The influence of amendments on dissolved heavy metals and phosphate control in biofilters.

- Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 1002-1006
- [42] CHOWDHURY, R., ABAYA, J., KSIKSI, T. and M. MOSTAFA. 2017. Greywater pollutant removal dynamics in the vegetative biofiltration systems. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 961-965
- [43] HINMAN, C. 2017. Analysis of bioretention soil media for improved nitrogen, phosphorus, and copper retention *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 999-1001
- [44] LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, ODENSAß, M. und S. SCHROERS. 2000. Empfehlungen für die Durchführung und Auswertung von Säulenversuchen gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). *LUA NRW Merkblätter*, Nr.20, ISSN: 0947 – 5788
- [45] TOTA-MAHARAJ, K. and O. O. AJIBADE. 2017. Water quality performance of biofiltration systems as a stormwater treatment strategy in refugee camps. *Proceedings of 14th IWA/IAHR International Conference on Urban Drainage*, Prague, Czech Republic, 2017. 916-923
- [46] AMRHEIN, C., STRONG, J.E. and P.A. MOSHER. 1992. Effect of Deicing Salts on Metal and Organic Matter Mobilization in Roadside Soils. *Environmental Science & Technology*, 26(4), 703-709.
- [47] KABELKOVÁ, I., HAVLÍK, V., KUBA, P. a P. SÝKORA. 2010. *Metodická příručka Posuzování dešťových oddělovačů jednotných stokových systémů v urbanizovaných územích*, ČVTVHS.
- [48] PRAŽSKÉ VODOVODY A KANALIZACE, a.s. 2018. *Kvalita pitné vody v distribuční síti hl. m. Prahy v září 2018 - kohoutek u spotřebitele*. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/-kvalita-vody/aktualni-kvalita-vody/>
- [49] HARAŠTA, L. 2018. *Vyhodnocení dat ze srážkoměrů*.

7 Seznam příloh

Příloha 1: Vyhodnocení vsakovacích zkoušek

Příloha 2: Přehled dešťových událostí

Příloha 3: Průběh přítoku a odtoku

Příloha 4: Analýza vývodní trubičky

Příloha 1: Vyhodnocení vsakovacích zkoušek

Vsakovací zkouška 1

datum 18.9.2018

dávka (l) 8

k (m/s)	A	B
počáteční	2,93E-04	2,77E-04
koncové	1,37E-04	1,23E-04

Válec A

čas (h:min)	poloha (cm)	k (m/s)
10:57	31,1	2,93E-04
11:02	39,9	1,43E-04
11:07	44,2	1,37E-04
11:12	48,3	
11:17	51,5	půda

pokles vrstev: 4,5 cm

Válec B

čas (h:min)	poloha (cm)	k (m/s)
11:21	30,0	2,77E-04
11:26	38,3	1,50E-04
11:31	42,8	1,23E-04
11:36	46,5	
11:41	49,5	půda

pokles vrstev: 3,5 cm

Vsakovací zkouška 2

datum 19.9.2018

dávka (l) 8

k (m/s)	A	B
počáteční	9,33E-05	1,10E-04
koncové	4,33E-05	5,33E-05

Válec A

čas (h:min)	poloha (cm)	k (m/s)
7:40	26,6	9,33E-05
7:45	29,4	7,33E-05
7:50	31,6	6,67E-05
7:55	33,6	6,67E-05
8:00	35,6	7,00E-05
8:05	37,7	6,00E-05
8:10	39,5	5,67E-05
8:15	41,2	6,00E-05
8:20	43,0	6,00E-05
8:25	44,8	5,33E-05
8:30	46,4	6,00E-05
8:35	48,2	4,33E-05
8:40	49,5	
8:45	51,2	půda

pokles vrstev: 1 cm

Válec B

čas (h:min)	poloha (cm)	k (m/s)
7:47	26,4	1,10E-04
7:52	29,7	8,00E-05
7:57	32,1	7,33E-05
8:02	34,3	7,00E-05
8:07	36,4	6,67E-05
8:12	38,4	6,67E-05
8:17	40,4	6,67E-05
8:22	42,4	6,00E-05
8:27	44,2	6,67E-05
8:32	46,2	5,33E-05
8:37	47,8	5,33E-05
8:42	49,4	
8:47	52,0	půda

pokles vrstev: 1,5 cm

Vsakovací zkouška 3

datum 20.9.2018
dávka (l) 8

k (m/s)	A	B
počáteční	1,30E-04	1,37E-04
koncové	8,00E-05	8,67E-05

Válec A

čas (h:min)	poloha (cm)	k (m/s)
9:15	26,9	1,30E-04
9:20	30,8	1,13E-04
9:25	34,2	1,03E-04
9:30	37,3	9,67E-05
9:35	40,2	9,00E-05
9:40	42,9	9,00E-05
9:45	45,6	9,00E-05
9:50	48,3	8,00E-05
9:55	50,7	
10:00	52,5	půda

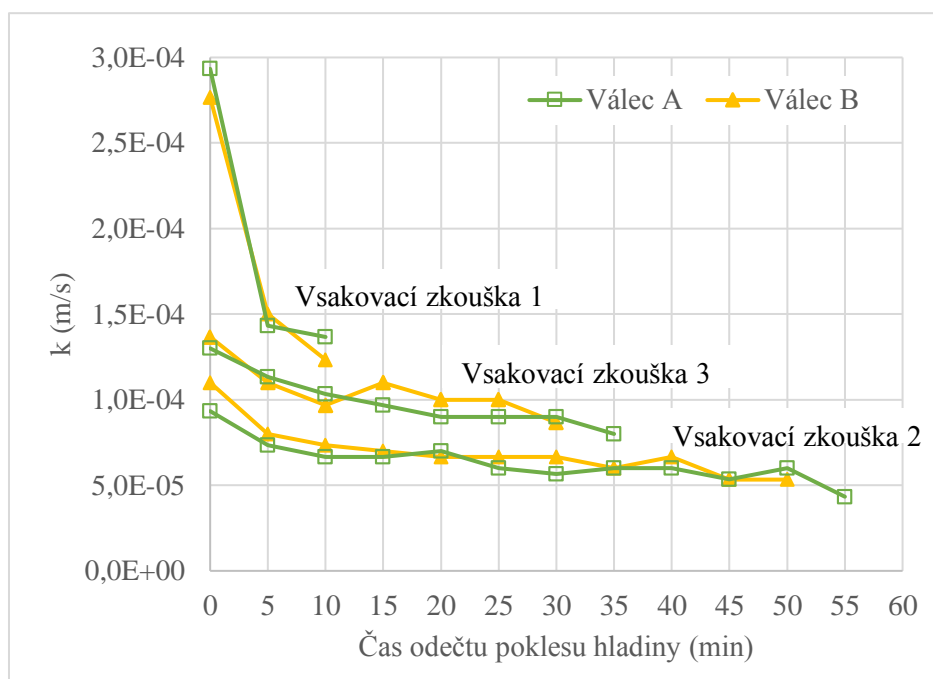
Válec B

čas (h:min)	poloha (cm)	k (m/s)
9:22	26,8	1,37E-04
9:27	30,9	1,10E-04
9:32	34,2	9,67E-05
9:37	37,1	1,10E-04
9:42	40,4	1,00E-04
9:47	43,4	1,00E-04
9:52	46,4	8,67E-05
9:57	49,0	
10:02	51,8	půda

pokles vrstev: 0 cm

pokles vrstev: 0 cm

Graf průběhu koeficientu k při vsakovacích zkouškách



Koeficient je roven přibližně $8,5 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Příloha 2: Přehled dešťových událostí

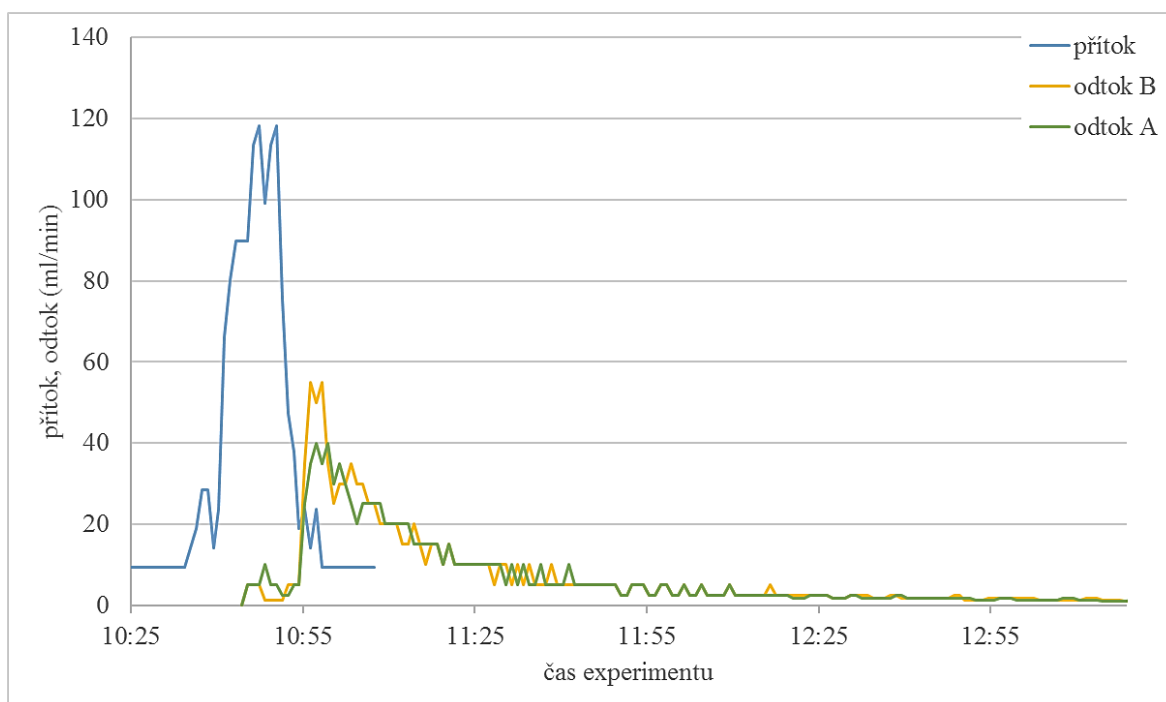
Období	Č.	Začátek deště	Konec deště	Doba trvání deště (min)	Srážkový úhrn (mm)	Bezdeštné období před deštěm (d)
letní	1	4.6.2005 12:28	4.6.2005 17:19	291	6,2	
	2	5.6.2005 15:51	5.6.2005 16:05	14	4,5	0,94
	3	1.7.2005 12:44	1.7.2005 13:59	75	8,5	25,86
	4	1.7.2005 16:25	2.7.2005 07:52	927	13,9	0,10
	5	5.7.2005 12:04	6.7.2005 04:13	969	39,0	3,18
	6	7.7.2005 14:40	7.7.2005 15:58	78	10,4	1,44
	7	8.7.2005 10:06	8.7.2005 21:24	678	19,1	0,76
	8	10.7.2005 13:53	10.7.2005 16:53	180	7,7	1,69
	9	20.7.2005 23:00	21.7.2005 00:36	96	5,0	10,25
	10	21.7.2005 18:13	22.7.2005 02:35	502	5,6	0,73
	11	30.7.2005 21:57	31.7.2005 02:53	296	19,7	8,81
	12	6.8.2005 05:26	6.8.2005 07:48	142	3,1	6,11
	13	7.8.2005 13:10	7.8.2005 13:56	46	3,5	1,22
	14	15.8.2005 04:51	15.8.2005 11:43	412	11,2	7,62
	15	16.8.2005 07:25	16.8.2005 13:08	343	5,4	0,82
	16	21.8.2005 15:05	21.8.2005 18:42	217	3,7	5,08
	17	22.8.2005 17:33	22.8.2005 20:18	165	8,0	0,95
	18	24.8.2005 05:22	24.8.2005 08:32	190	5,1	1,38
	19	12.9.2005 22:49	13.9.2005 00:18	89	3,1	19,60
	20	16.9.2005 10:28	16.9.2005 12:09	101	3,8	3,42
	21	16.9.2005 16:42	16.9.2005 22:20	338	9,3	0,19
	22	27.9.2005 00:59	27.9.2005 04:31	212	5,2	10,11
	23	27.9.2005 05:34	27.9.2005 07:51	137	5,4	0,04
	24	17.11.2005 14:02	17.11.2005 21:20	438	11,9	51,26
	25	20.11.2005 13:55	20.11.2005 20:35	400	3,5	2,69
	26	26.11.2005 18:40	27.11.2005 01:11	391	5,9	5,92
zimní	27	5.12.2005 09:22	5.12.2005 15:29	367	3,1	8,34
	28	6.12.2005 16:44	6.12.2005 22:49	365	3,4	1,05
	29	16.12.2005 07:00	16.12.2005 15:27	507	12,2	9,34
	30	18.1.2006 02:41	18.1.2006 13:51	670	11,4	32,47
	31	20.1.2006 21:21	21.1.2006 05:02	461	6,1	2,31
	32	7.2.2006 22:06	8.2.2006 11:56	830	10,6	17,71
	33	10.2.2006 11:39	10.2.2006 14:17	158	3,7	1,99
	34	15.2.2006 22:04	16.2.2006 00:47	163	4,5	5,32
	35	16.2.2006 08:50	16.2.2006 14:29	339	6,6	0,34
	36	17.2.2006 04:38	17.2.2006 09:13	275	4,2	0,59

Období	Č.	Začátek deště	Konec deště	Doba trvání deště (min)	Srážkový úhrn (mm)	Bezdeštné období před deštěm (d)
jarní	37	3.3.2006 18:33	3.3.2006 23:24	291	4,2	14,39
	38	9.3.2006 05:36	9.3.2006 21:01	925	10,8	5,26
	39	12.3.2006 07:26	12.3.2006 11:07	221	3,9	2,43
	40	26.3.2006 07:16	26.3.2006 18:00	644	6,7	13,84
	41	28.3.2006 11:25	28.3.2006 15:40	255	7,5	1,73
	42	29.3.2006 00:46	29.3.2006 10:57	611	11,6	0,38
	43	9.4.2006 10:50	9.4.2006 13:33	163	3,0	11,00
	44	14.4.2006 08:33	14.4.2006 13:44	311	7,1	4,79
	45	28.4.2006 19:33	29.4.2006 07:42	729	14,0	14,24
	46	30.4.2006 04:54	30.4.2006 10:36	342	4,9	0,88
	47	30.4.2006 20:59	1.5.2006 03:40	401	3,6	0,43
	48	16.5.2006 14:39	16.5.2006 15:37	58	5,5	15,46
	49	17.5.2006 02:51	17.5.2006 03:58	67	5,6	0,47
	50	17.5.2006 07:51	17.5.2006 10:53	182	13,7	0,16
	51	17.5.2006 12:56	17.5.2006 14:04	68	3,6	0,09
	52	18.5.2006 18:50	19.5.2006 01:27	397	6,9	1,20
	53	26.5.2006 19:04	27.5.2006 00:56	352	7,5	7,73
	54	27.5.2006 18:05	27.5.2006 20:48	163	8,3	0,71
55	29.5.2006 21:30	30.5.2006 01:33	243	5,8	2,03	

Příloha 3: Průběh přítoku a odtoku

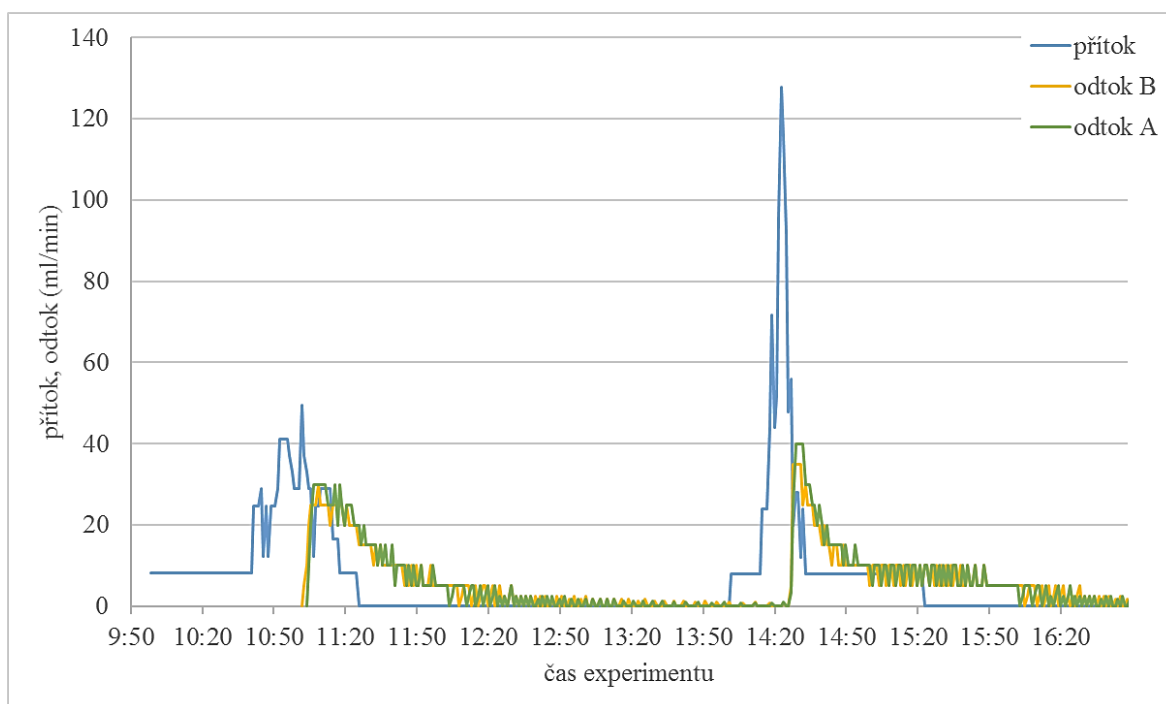
Znázorněny byly průběhy přítoku a odtoku vybraných experimentů.

Děšť č. 1 ze dne 4.6.2005



Graf průběhu přítoku do válců a odtoku z válce A a B během experimentu [49]

Deště č. 22 a 23 ze dne 27.9.2005



Graf průběhu přítoku do válců a odtoku z válce A a B během experimentu [49]

Příloha 4: Analýza vývodní trubičky

Po protečení dávkované vody skrz válec byla voda trubičkou ve dně odváděna přes srážkoměr do nádrže. Jelikož je vývodní trubička kovová, byla před začátkem experimentace ponechána déle jak 1 měsíc v kohoutkové vodě, jež byla před tím i poté analyzována. Koncentrace jednotlivých TK v této vodě uvádí tabulka níže. Podíl nárůstu koncentrace TK ve vodě připadající na jeden den ponechání trubičky ve vodě, který odpovídá přibližně době přináležející na 1 experiment, je velmi malý, tudíž lze vliv vývodní trubičky na odtokové koncentrace TK pro analýzu TK zanedbat.

Tabulka – Analýza vývodní trubičky

TK	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
koncentrace:	($\mu\text{g/l}$)	($\mu\text{g/l}$)	($\mu\text{g/l}$)	($\mu\text{g/l}$)	($\mu\text{g/l}$)	(mg/l)
počáteční	0,04	0,17	0,30	5,30	0,45	0,002
koncová	0,12	0,30	1,30	8,40	20,00	0,030
rozdíl	0,08	0,13	1,00	3,10	19,55	0,028