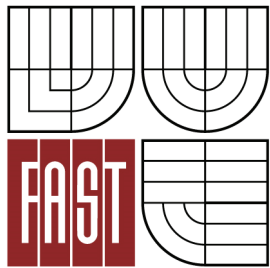




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ KOŘENOVÝCH ČISTÍREN ODPADNÍCH VOD

THE WASTE MANAGEMENT OF THE CONSTRUCTED TREATMENT WETLANDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAELA MRVOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL KRIŠKA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství krajiny

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Michaela Mrvová
Název	Odpadové hospodářství kořenových čistíren odpadních vod
Vedoucí diplomové práce	Ing. Michal Kriška, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	6. 10. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015
V Brně dne 6. 10. 2014	

.....
prof. Ing. Miloš Starý, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

1. Zákon č.185/2001 Sb.: Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů

Zásady pro vypracování

Práce bude obsahovat v teoretické části popis odpadů, vznikajících v rámci kořenové čistírny odpadních vod, zatřídění odpadů do jednotlivých tříd. V navazující části budou uvedeny možnosti řešení nakládání s vybranými odpady, se zaměřením na primární kal z usazovací nádrže a jeho zpracování v objektu čistírny. Práce se také bude věnovat odpadům, které tvoří odumřelé části mokřadních rostlin. V praktické části se diplomová práce bude zabývat vlastním měřením, vyhodnocením a posouzením co možná nejvhodnějšího řešení pro nakládání s odpady, bude zpracován software pro návrh odvodňovacích "reed-bed" systémů, který v současné době není k dispozici.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
Ing. Michal Kriška, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na odpadové hospodářství kořenových čistíren odpadních vod se zaměřením na objemově nejvýraznější položku – kalové hospodářství. Odvodňování kalů pomocí kalových polí je stále zavrhováno projektanty zejména z důvodu jejich nedostatečné zkušenosti a zároveň za současného prosazování technologicky složitějších řešení. Proto je práce zaměřena na rozepsání bilanční hydrologické rovnice kalového pole, kde jsou zahrnuty všechny parametry ovlivňující vodní bilanci systému. Výsledkem je návrh nejen designu, ale zejména popis vstupních dat a řídicích rovnic v software REED-BED, který je kalibrován vlastními provozními výsledky, zjištěnými na dvou objektech čistíren odpadních vod (obec Dražovice a Kotenčice). REED-BED systém bude plnit několik funkcí: stanovení půdorysné plochy kalového pole, investiční náklady potřebné pro realizaci kalového pole, návratnost investice, stanovení vlhkosti kalu v kalovém poli a maximální délku odvodňovacího období s ohledem na mokřadní vegetaci. Druhou největší položku v rámci kalového hospodářství vytváří biomasa mokřadních rostlin, proto se práce zabývá možnostmi zpracování biomasy rostlin po skončení vegetačního období. Technologický postup zpracování biomasy byl testován na rákosu obecném, finálním produktem jsou pelety určené pro vytápění.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kal, reed-bed, rákos obecný, odpad, odvodnění kalů, čistírna odpadních vod, kalové pole

ABSTRACT

The thesis is focused on the sludge management at root sewage treatment plants with focus on volum eis highest – sludge manahement. Sludge dewatering using sludge dryiing bed is still condemned designers mainly due to their lack of experience, while at the same time enforcing technologically complex solutions. Therefore, the thesis focuses on the break down balance hydrological equation sludge drying bed, which includes all parameters affecting water balance system. The result is a proposal not only design, but in particular a description of input data and the governing equations in software Reed-Bed, which is calibrated own operational results obtainde for the two sewage treatment plants (village Dražovice and Koteňice). Reed-Bed software will perform sevetal functions: setting the ground area of sludge bed, investment costs required for the implementation of sludge bed, return on investment, the determination of moisture contene of sludge in the sludge bed and maximum lenght of the dewatering period with regard to wetland vegetation. The second largest item within sludge system creates biomass wetland plants, so work deals with possibilities biomass processing plant at the end of the growing season. Technological processing of biomass was tested on common reed, final product pellets for heating.

KEYWORDS

Sludge, reed-bed, reed, waste, dewatering, sewage treatment plant, sludge drying bed

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

MRVOVÁ, Michaela. *Odpadové hospodářství na kořenové čistírně odpadních vod*. Brno, 2014. 114 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Kriška, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2015

.....
podpis autora

Bc. Michaela Mrvová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Michalu Křiškovi Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a čas strávený při konzultacích této práce.

Veškeré práce a výsledky uvedené v diplomové práci jsou podpořeny projektem MPO TIP FR-TI3/778 s názvem „BIOSTREAM“ – Čištění odpadních vod v integrovaném biotechnologickém systému.

Dále bych ráda poděkovala firmě Kovo Novák za umožnění zpracování pelet z rákosu obecného.

V poslední řadě bych ještě poděkovala své rodině za podporu a trpělivost při tvorbě této práce a v průběhu celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	3
2	CÍLE	4
3	PROBLEMATIKA ODPADŮ VZNIKAJÍCÍCH NA KOŘENOVÉ ČISTÍRNĚ ODPADNÍCH VOD	5
3.1	Druhy odpadů vznikajících na KČOV	5
3.2	Možnosti nakládání s vybranými odpady	6
3.2.1	Současný stav nakládání s čistírenskými kaly v ČR.....	6
3.2.2	Současný stav nakládání s čistírenskými kaly v Evropě	10
3.2.3	Využití kalů v zemědělství	11
3.2.4	Ukládání kalu na skládky, rekultivace	12
3.2.5	Mokřadní rostliny	13
4	ODVODŇOVÁNÍ KALŮ MOKŘADNÍMI ROSTLINAMI	18
4.1	Experimentální výzkum v severním Řecku	20
4.1.1	Výzkum	20
4.1.2	Výsledky	27
4.2	Experimentální výzkum Kanada	28
4.2.1	Výzkum	29
4.2.2	Výsledky	31
5	METODIKA MĚŘENÍ	35
5.1	REED-BED	35
5.1.1	Kalové pole – Poloprovozní zařízení ČOV Dražovice.....	36
5.1.2	Kalové pole – Poloprovozní zařízení ČOV Kotečnice	37
5.2	Zpracování software Reed-BED	40
5.2.1	Výpočet vlhkosti	40
5.2.2	Výpočet délky odvodňovacího období kalu	42
5.2.3	Výpočet plochy	42
5.2.4	Investiční náklady a návratnost investice	43
5.3	Numerický model kalového pole – Hydrus 2D	43

5.4	Zpracování biomasy mokřadních rostlin	43
5.4.1	Postup zpracování	44
6	VÝSLEDKY A DISKUZE VÝSLEDKŮ	46
6.1	REED-BED	46
6.1.1	Dražovice	46
6.1.2	Kotenčice	55
6.2	Software REED-BED	64
6.2.1	Software R-B-O pro výpočet vlhkosti odvodňovaného kalu a délky odvodňovacího období kalu v kalovém poli	64
6.2.2	Software R-B-P pro výpočet půdorysné plochy kalového pole a investice do kalového pole	75
6.3	Numerický model kalového pole – Hydrus 2D	78
6.3.1	Kalové pole v Hydrusu	79
6.4	Zpracování biomasy mokřadních rostlin	83
7	ZÁVĚR	86
8	POUŽITÁ LITERATURA	88
9	PŘÍLOHY	92
9.1	Fotodokumentace	92
9.2	Příklad řešení kalového hospodářství pro 250 eo	103
9.2.1	Mechanické předčištění	103
9.2.2	Hlavní čistící stupeň	104
9.2.3	Kalová pole	105
	SEZNAM TABULEK	106
	SEZNAM OBRÁZKŮ	108
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	112
	SUMMARY	114

1 ÚVOD

Otázka kalového hospodářství je pravidelně řešena v odborných kruzích, stejně jako při projektování malých čistíren odpadních vod, případně při jejich provozování. Velice často jsou provozovatelé nejmenších čistíren nuceni řešit otázku kalového hospodářství prostřednictvím svozu fekálními vozidly, přičemž nejsou vždy schopni využít naplno kapacitu nádrže fekálního vozu. Naskytá se efektivní řešení problému kalového hospodářství, které je sice již několik desetiletí známé, ale je zavrhané pro velkou náročnost na plošné uspořádání – kalová pole. V zahraničí jsou tyto systémy nazývané jako „reed-bed“ systémy, uplatňují se často jako poslední stupeň v rámci kalového hospodářství, zajišťující hygienizaci a mineralizaci odvodňovaného kalu.

Diplomová práce se soustředí na vyřešení obav projektantů, kteří nemají dostatečné zkušenosti, nemají k dispozici reálné výsledky a hodnoty zaručující schopnost kalového pole odvodnit požadované množství kalu. Z tohoto důvodu je v práci velice podrobně rozepsána bilanční hydrologická rovnice kalového pole s mokřadní vegetací do tvaru, který zahrnuje všechny parametry výrazně ovlivňující celkovou vodní bilanci systému. Výsledkem je první verze software REED-BED, která umožní projektantům určit půdorysnou velikost kalového pole podle počtu ekvivalentních obyvatel, dále bude schopen spočítat investiční náklady do výstavby kalového pole a jejich návratnost, dále délku odvodňovacího období kalu, a v poslední řadě bude schopen vypočítat vlhkost substrátu v již postaveném kalovém poli.

Software je kalibrován vlastními provozními výsledky, zjištěnými na dvou objektech čistíren odpadních vod. Na prvním objektu v obci Dražovice (okr. Vyškov) se testuje na dvou kalových polích, kde jedno je opatřeno skleníkovým přístřeškem a druhé bez přístřešku. Na druhém provozním objektu v obci Kotečnice (okr. Příbram) se testují čtyři kalová pole lišící se druhem mokřadní vegetace. První pole je neosázené, funguje jako pole kontrolní, další tři pole jsou postupně osazena chřasticí rákosovitou, rákosem obecným a orobincem širokolistým.

V další části se diplomová práce zaměřuje na zpracování biomasy mokřadních rostlin. Konkrétně se jedná o výrobu pelet z odpadu, vznikajícího odumřením jednoletých mokřadních rostlin, které jsou součástí systému kořenové čistírny.

2 CÍLE

Práce se zaměřuje na měření vycházející z bilanční rovnice a postupnou kalibraci neznámých hodnot, resp. číselných hodnot, které není možné v reálném provozu měřit vzhledem k uspořádání systému. Pro účely měření byla k dispozici kalová pole na čistírně v obci Dražovice a v obci Kotečnice. Na základě bilanční rovnice byla vyvinuta první verze software, který bude schopen podle vstupních hodnot spočítat vlhkost substrátu v kalovém poli, délku odvodňovacího období, půdorysnou plochu kalového pole podle počtu obyvatel a také investiční náklady do výstavby vložené a jejich návratnost.

Cílem práce je přiblížit projektantům reálné možnosti při procesu odvodňování kalů pomocí kalových polí (reed-bed systémů). Vyvíjený software nabídne menším producentům kalová pole jako jednu z možností, jak řešit nakládání s kalem, současně budou mít potenciální investoři možnost ekonomické bilance a srovnání s jinými řešeními jako odvoz kalu fekálním vozem na větší čistírnu odpadních vod, zpracování složitou technologickou linkou apod.

Dalším cílem je nalezení a popis možností, týkající se zpracování biomasy mokřadních rostlin. Naskytla se otázka, jak by se dala využít mokřadní vegetace po její odumření jinak než ji spálit přímo na filtračním poli nebo ji ponechat ladem jako izolační materiál (který před zahájením vegetační sezony často není sklizen). Práce se zabývá využitím odumřelého rákosu z kalového pole na čistírně odpadních vod v obci Dražovice. Byl proveden průzkum výroby pelet z rákosu obecného a provedeny rozbory těchto vyrobených pelet. Vyrobené pelety mohou být využity např. k vytápění provozní budovy na čistírně v zimním období, případně k přehřívání protékající odpadní vody.

3 PROBLEMATIKA ODPADŮ VZNIKAJÍCÍCH NA KOŘENOVÉ ČISTÍRNĚ ODPADNÍCH VOD

3.1 DRUHY ODPADŮ VZNIKAJÍCÍCH NA KČOV

Mezi odpady vznikající při čistění odpadních vod na kořenové čistírně řadíme: shrabky z česlí, nečistoty z lapáku písku a tuku, kal z usazovacích nádrží, pokosená makrofyta kalových polí či zakolmatovanou filtrační náplň.

Kaly hromadící se v lapáku písku či usazovací nádrži, patří kvůli svému vysokému obsahu živin mezi potenciálně vhodná hnojiva. Před jejich využitím je nutno provést důkladnou analýzu kvůli možnému výskytu polutantů, které by způsobovali kontaminaci nejen půdního prostředí, ale zejména při vsaku do podloží hrozí kontaminace podzemních vod.

Další kategorií odpadních materiálů tvoří biomasa makrofytní vegetace. Biomasu je nutné sklízet v průběhu vegetačního období. V mnoha zemích se vegetace vůbec nesklízí, a proto jsou filtrační lože uložena pod úroveň okolního terénu a časem je výškový rozdíl snížen rozkládající se biomasou. V ČR je nejběžnějším postupem kosení vegetace na konci zimního období. Hlavním důvodem v našich klimatických podmínkách je teplotní odizolování povrchu filtračních polí pokosenými rostlinami.

Všeobecně je otázka sklizení nadzemní biomasy nejasná, v mnoha státech se neřeší. Z analýz probíhajících v ČR vyplývá, že odpadní materiály z kořenových čistíren odpadních vod nepředstavují žádné riziko, ale naopak mnohou být využity v zemědělství jako hnojiva, či při výrobě energie z biomasy (bioplyn) (Hamanová, 2011).

Předčištěná odpadní voda se rozvádí přímo do rozvodné zóny, vyplněné kamením. Pro předcházení kolmatace se používají plastové trubky s velkými otvory. Sběrné potrubí je uloženo na dně filtračního lože, které je spojeno v odtokové šachtě s výpustním mechanismem. Hladina vodního sloupce odpadní vody se udržuje při běžném provozu 5 – 10 cm pod povrchem filtračního lože. S hladinou se může manipulovat, což je obzvlášť důležité v zimních měsících, kdy se krátkodobě hladina může zvýšit a po zamrznutí opět snížit (vzduch pod ledovou vrstvou společně s rostlinami pomáhá čistírnu chránit před mrazy). Avšak ukazuje se, že vegetace samotná poskytuje dostatečnou izolaci před zamrznutím i bez změn vodní hladiny (Vymazal, 2004).

Kaly vyprodukované na čistírnách odpadních vod podle katalogu odpadů spadají pod kód číslo 19 - Odpady ze zařízení na zpracování (využívání a odstraňování) odpadu z čistíren odpadních vod pro čištění těchto vod mimo místo jejich vzniku a z výroby vody pro spotřebu lidí a vody pro průmyslové účely (Katalog odpadů).

3.2 MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S VYBRANÝMI ODPADY

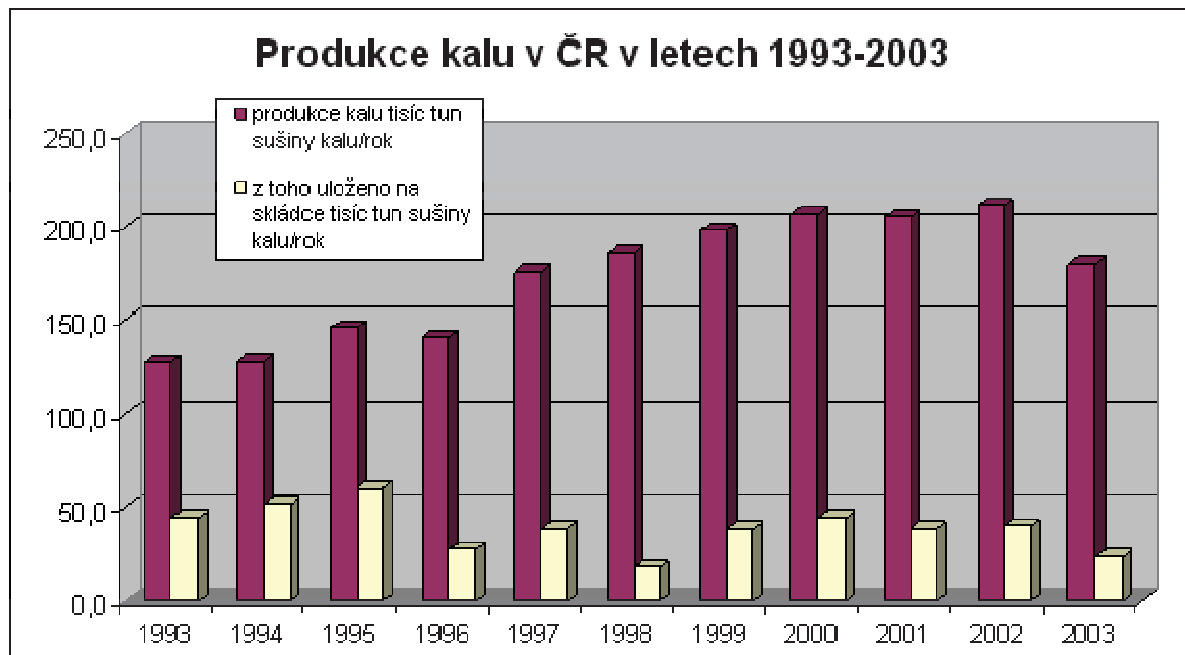
Jak bylo popsáno výše, při procesu čištění odpadních vod systémem kořenové čistírny vzniká několik druhů odpadů – od shrabků na česlích, písek v lapáku písku, kal v usazovací nádrži, až po biomasu mokřadních rostlin. Další pozornost je v práci věnována pouze primárnímu kalu z usazovacích nádrží a biomase jednoletých mokřadních rostlin, neboť se jedná o objemově nejvýraznější položky.

3.2.1 Současný stav nakládání s čistírenskými kaly v ČR

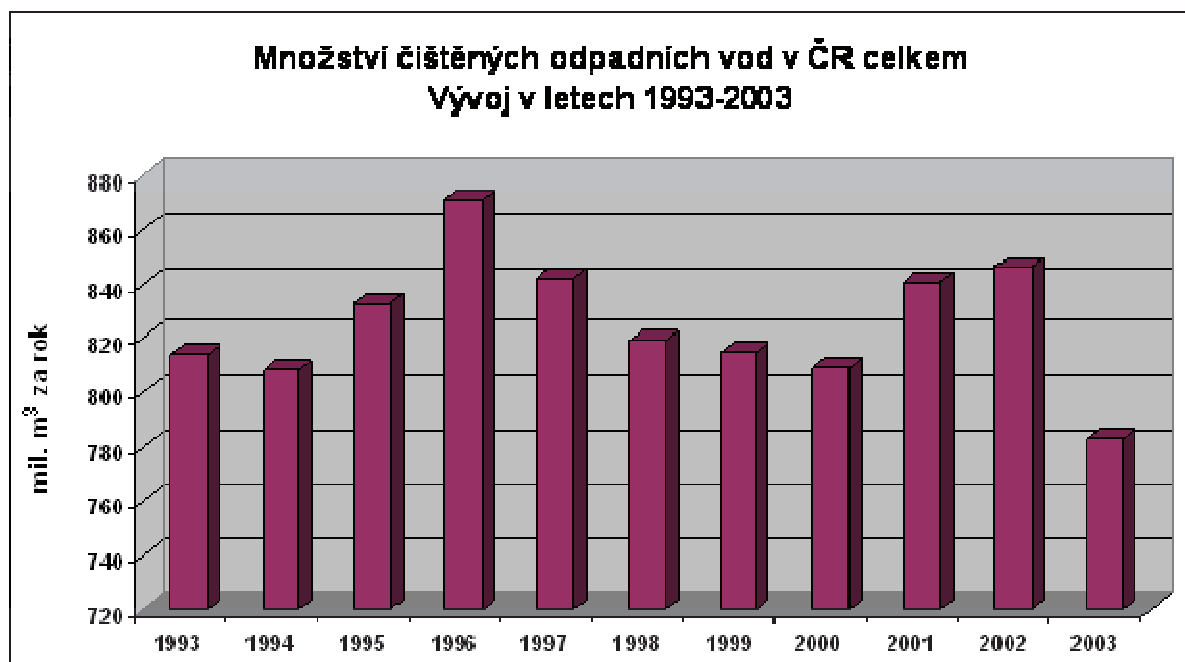
V ČR bylo podle výkazu Českého statistického úřadu (ČSÚ) Vodovody a kanalizace v roce 2003 7,928 mil. obyvatel napojeno na kanalizaci, tj. 77,7 % celkového počtu obyvatelstva, z toho na ČOV 7,033 mil. obyvatel, tj. 68,9 %, a z toho 6,86 mil. obyvatel bylo napojeno kanalizací na biologickou čistírnu. Celkem se v uvedených ČOV vyčistilo v roce 2003 820 mil. m³ odpadní vody za rok, čemuž odpovídá i vykazovaná produkce kalů. Oproti roku 2002 množství čištěných odpadních vod kleslo stejně jako produkce kalu.

Podle stejného výkazu ČSÚ Vodovody a kanalizace v roce 2003 se vyprodukovalo 186 tis. tun sušiny kalu, což je oproti roku 2002 poměrně značné snížení ve vykazovaných hodnotách, přesto podle našeho odhadu je tento údaj v odpovídajících mezích. Za rok 2013 bylo v ČR vyprodukováno kolem 154 tis. tun sušiny kalu, z toho cca 55 tis. bylo použito k přímé aplikaci a rekultivaci, cca 50 tis. na kompostování, 7 tis. bylo skládkováno, 3 tis. spalováno a 39 tis. naloženo jinak. Procentuální zastoupení je znázorněno na obr. 4 (Český statistický úřad, 2014).

Časový průběh množství čištěných odpadních vod a produkce kalu v ČR v letech 1993-2003 je znázorněno v obr. 1. a Obrázek 2 obr. 2. (Lyčková B., 2008).



Obrázek 1. Produkce kalu v ČR v letech 1993-2003 (Lyčková B., 2008)



Obrázek 2. Množství čištěných odpadních vod v ČR v letech 1993-2003 (Lyčková B., 2008)

Nakládání s kaly

Nakládání s kaly v ČR každoročně mapuje VÚV T.G.M. v Praze.

V roce 2002 byly hlavní způsoby nakládání s kaly v procentním vyjádření z celkové produkce v ČR následující:

a) 56 % stabilizovaných kalů bylo uplatněno v zemědělství, z toho:

- 0 % přímá aplikace na půdu (podle zaslaných evidenčních listů a v rámci přesnosti statistického vykazování)
- 8 % rekultivace
- 48 % kompostování

b) 19 % produkce kalů je ukládáno na skládky

c) 25 % nespecifikováno

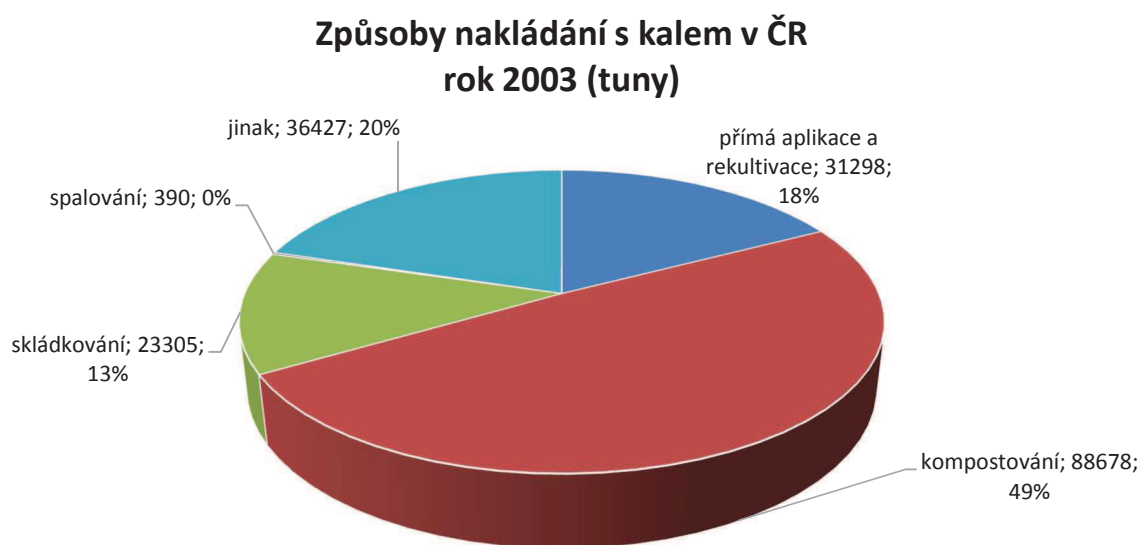
V roce 2003 bylo vykázáno celkem 67 % celkového uplatnění produkce kalu v zemědělství, z toho přímá aplikace podle zaslaných výkazů o využití kalů v zemědělství v rámci přesnosti statistického vykazování byla prakticky opět nulová. Jednotlivé hlavní způsoby nakládání s kalem v roce 2003 v ČR jsou též znázorněny na obr. 3.

67 % zemědělství, z toho:

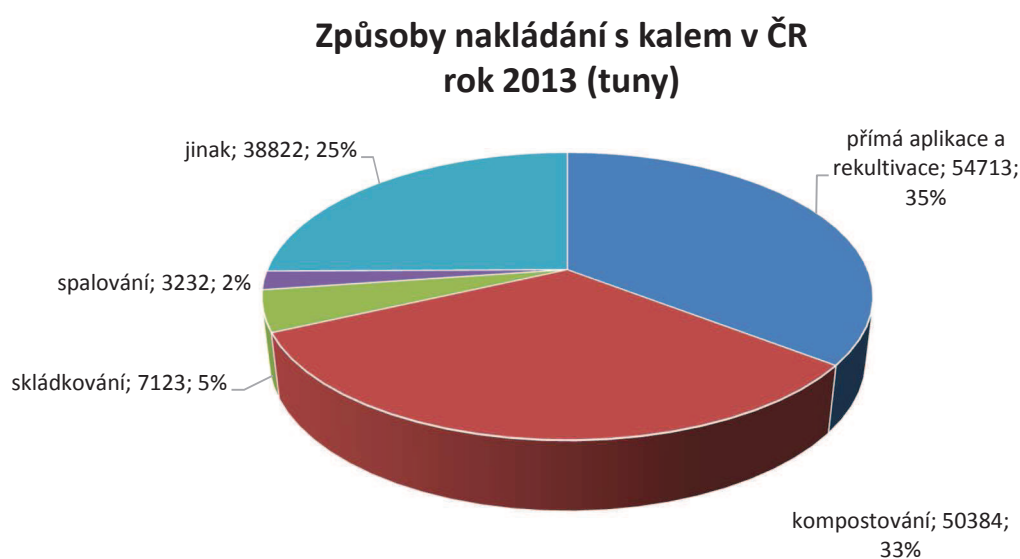
- 0 % přímá aplikace
- 17 % rekultivace
- 49 % kompostování

13 % ukládání na skládky

20 % nespecifikováno



Obrázek 3. Způsoby nakládání s kalem v ČR rok 2003 (Lyčková B., 2008)



Obrázek 4. Způsoby nakládání s kalem v ČR za rok 2013 (Český statistický úřad)

Oproti roku 2002 nastal v roce 2003 podle výkazu ČSÚ Vodovody a kanalizace nárůst u využití kalů pro rekultivace a pokles ukládání kalu na skládky, ostatní způsoby nedoznaly podstatných změn (Lyčková B., 2008). V roce 2013 se oproti roku 2003 dosti rozšířila přímá aplikace kalu a rekultivace.

3.2.2 Současný stav nakládání s čistírenskými kaly v Evropě

Množství a vývoj produkce kalů v Evropě

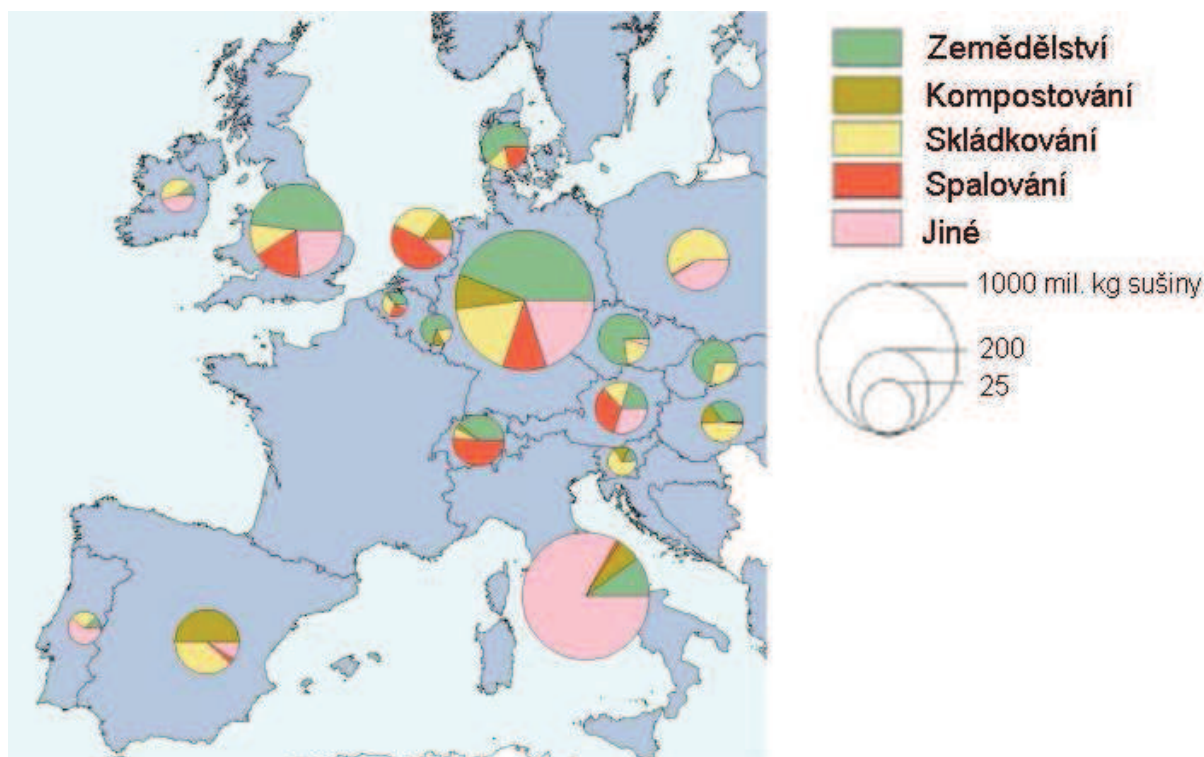
Produkce kalů z ČOV jednoznačně v Evropě stoupá. Je to dáno především rozšiřováním a zaváděním splaškové kanalizace a jejím následným vyústěním na ČOV. Druhořadým aspektem je intenzifikace procesů čištění. V mnoha zemích Evropy lze předpokládat, že dojde v průběhu několika let až desetiletí k několikanásobnému navýšení produkce. U několika států, vyspělých v oblasti odvádění a čištění odpadních vod, jako je Švýcarsko, Lucembursko a Švédsko lze předpokládat minimální navýšení produkce (Lyčková B., 2008).

Trendy řešení kalového hospodářství v Evropě

- V zemích s rozvinutým hospodářstvím a vyšší životní úrovni obyvatelstva je věnována pozornost problematice kalů z ČOV a nakládání s nimi, klíčovou otázkou je používání kalů v zemědělství, v méně rozvinutých zemích je tato otázka méně aktuální
- Zákaz vypouštění kalů do povrchových vod
- Výrazný odklon od skládkování kalů až po úplný zákaz
- Stále přísnější limity pro využívání kalů v zemědělství, týká se rovněž používání kalů jako příměsí do průmyslových kompostů
- Vzrůst zapracování kalů do půdy a kompostování (kromě Holandska, Dánska, Rakouska, Lucemburska a Švýcarska)
- Nárůst energetického využívání kalů ve všech státech Evropy

Hlavními způsoby zpracování kalů z čistíren odpadních vod:

- Používání v zemědělství (tekuté, polosuché, suché, kompostované kaly)
- Spalování (přímé spalování nebo spoluspalování)
- Skládkování (na jednodruhových skládkách nebo s jinými odpady)
- Ostatní (použití na lesní půdu a porosty, rekultivace a zúrodnování), (Lyčková B., 2008).



Obrázek 5. Nakládání s kalem v některých evropských zemích (Perry R. H., 1997)

3.2.3 Využití kalů v zemědělství

Stabilizované čistírenské kaly představují svým bohatým obsahem organických látek, živin a biologicky aktivních látek významný doplňkový zdroj pro zemědělskou půdu. Hnojivý účinek kalů spočívá především v obsahu pro půdu příznivých prvků (N, P, K, Ca, Mg), dostatku organické hmoty a obsahu stopových prvků nezbytných pro zdárný vývin a růst rostlin. Aktivovaný kal se jeví jako výtečný kondicionér, neboť humusový materiál je dobrou živnou půdou pro růst rostliny. Pro obsah škodlivých látek však na druhou stranu kaly představují značná hygienická a ekologická rizika jako znečištění spodních a povrchových vod, kontaminaci půdy, následně vegetace a tím i potravního řetězce. V současné době se přímá aplikace čistírenských kalů na zemědělskou půdu řídí prováděcí vyhláškou č. 382/2001 Sb., novelizace s formálními úpravami této vyhlášky je obsažena ve vyhlášce č. 504/2004 Sb. Tyto vyhlášky jsou plně v souladu se směrnicí Rady EU č. 86/278/EEC a určují, za jakých podmínek lze čistírenské kaly v zemědělství využívat (obsah těžkých kovů, patogenních mikroorganismů, četnost a místo aplikace (druh plodin), apod.), (Šťasta P., 2009).

V tab. 1. jsou znázorněny limitní hodnoty obsahu těžkých kovů v kalech určených pro přímou aplikaci, obsažené ve vyhlášce č. 382/2001 Sb., resp. pro kompostování obsažené

v ČSN 46 5735. Po stránce ekonomické lze přímou aplikaci kalů označit za nepřijatelnější, neboť náklady ČOV jsou v porovnání s ostatními způsoby zpracování kalu nejnižší i nulové.

Tabulka 1. Limitní obsahy těžkých kovů v kalech pro použití v zemědělství (Vyhláška 383/2001 Sb.)

Prvek	Přímá aplikace na půdu [mg/kg sušiny]		Surovina pro výrobu kompostu [mg/kg sušiny]
	382/2001 Sb.	86/278/EEC	ČSN 46 5735
As	30	-	50
Cd	5	20 - 40	13
Cr	200	-	1000
Cu	500	1000 - 1750	1200
Hg	4	16 - 25	10
Ni	100	300 - 400	200
Pb	200	750 - 1200	500
Zn	2500	2500 - 4000	3000

3.2.4 Ukládání kalu na skládky, rekultivace

Tato metoda je v České republice spolu s využitím kalu pro zemědělské účely druhou nejrozšířenější. Poplatky za uložení jsou však relativně vysoké a neustále rostou. Po přistoupení ČR do EU je skládkování kalů dále omezováno platnou legislativou, která přímo zakazuje skladování neupravených kalů (kaly bez fyzikální a chemické stabilizace) a zároveň striktně omezuje podíl biodegradabilních odpadů na skládkách. Protože skládkování kalů je považováno za nejhorší způsob odstranění, předpokládá se, že objem takto likvidovaných kalů se bude postupně snižovat. Při ukládání surových či vyhnílených kalů na skládku vzniká řada nebezpečí jako kontaminace půdy, vody, zápach, a dále při hnilobných procesech často unikají do ovzduší skleníkové plyny (CO_2 a CH_4 , který je pouze v několika málo případech sbírán a energeticky využit), (Štřasta P., 2009). Podle směrnice EU 99/31/EEC je nutné snížit množství biodegradabilních odpadů ukládaných na skládku, a to do konce roku 2010 na 75 % produkce roku 1995. Po roku 2010 jsou touto směrnicí stanovena další snížení množství těchto odpadů ukládaných na skládky. Podobně je tomu i v české legislativě (zákon č. 185/2001 o odpadech), kde je snaha omezit ukládání veškerých odpadů na skládky zřejmá z průběžného zvyšování poplatků. Limitní hodnoty pro terénní úpravy, rekultivace či uložení na skládce dle 383/2001

Sb. ukazuje tab. 2. (Dobšáková M., 2004). V současné době je připravována v ČR vyhláška zakazující ukládání na skládku odpadů s obsahem biodegradabilních látek > 5 %. Tento fakt by představoval zvýšenou orientaci k jiným, především termickým způsobům zpracování kalu (Šťasta P., 2009).

Tabulka 2. Limitní hodnoty ukazatelů výluhu (Vyhláška 383/2001 Sb.)

Ukazatel	Vyhláška 383/2001 Sb.		
	Výluh I, terénní úpravy [mg/l]	Výluh II, rekultivace skládek [mg/l]	Výluh III, skládka S-O [mg/l]
As	0,05	0,1	5
Cd	0,005	0,05	0,5
Cr	0,1	1	50
Cu	0,5	1	-
Hg	0,002	0,005	0,05
Ni	0,1	0,5	50
Pb	0,1	0,5	10
Zn	5	5	-
PCB	0,2 mg/kg	10 mg/kg	< 20 mg/kg
Mikrobiální rozbory	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost	Nesmí mít nebezpečnou vlastnost

3.2.5 Mokřadní rostliny

Názory na nakládání s odumřelými částmi mokřadních rostlin na kořenových čistírnách jsou různé. Někteří odborníci tvrdí, že rostliny je nutno po jejich odumření sklídit, jiní zase ponechat na kalovém poli.

A) Ponechání rostlin na povrchu filtru

Vyšší rostliny čistírnu zateplují, což je důležité především v chladnějším klimatu, jaké u nás panuje. Proto mnozí odborníci doporučují rákos a jiné rostliny na podzim nesklízet. Odumřelé nadzemní části rostlin totiž vytvářejí na povrchu čistírny jakousi izolační vrstvu (Plamínková, 1998). Odumřelá organická hmota rostlin na dně mokřadu způsobuje vznik podmínek bez přístupu kyslíku, kde probíhají důležité redukční procesy. Testování ovlivnění teploty protékající vody prostřednictvím mokřadních rostlin během zimního období bude probíhat v zimním období 2014/2015 na několika vybraných kořenových čistírnách a není tedy součástí této diplomové práce.

B) Sklizení rostlin

Rostliny jako je Zblochan vodní a Chrastice rákosovitá je možné kosit a sklízet i během vegetačního období a sklizenou biomasu posléze použít ke kompostování nebo zkrmováním dobyt看em. Na některých čistírnách odpadních vod se odklizení odumřelého rákosu řeší jejich spálením. V kalovém poli se zvedne hladina a rostliny na kalovém poli se za dohledu hasičského sboru zapálí. Tím dojde k odstranění odumřelých nadzemních částí rostlin, resp. přeměně spalitelných organických částí na uhlík, který může následně sloužit jako zdroj energie pro bakterie, zajišťující čistící procesy ve filtračním prostředí. Nicméně, společně s uhlíkem mohou do filtrující odpadní vody prosakovat také další sekundární znečištění a je tedy možné vlivem spalování zvyšovat koncentrace znečištění v rámci filtračního pole.

C) Vybrané druhy používaných rostlin

Mezi často používané mokřadní rostliny pro kořenové čistírny patří hlavně Rákos obecný, dále pak Orobinec širokolistý a úzkolistý, Zblochan vodní, Chrastice rákosovitá, Skřípinec jezerní, Kyprej vrbice, Zblochan vodní a další.

- Rákos obecný (*Phragmites australis*) – patří mezi vytrvalé trávy s tuhým, v dolní části chlupatým, v horní části holým stéblem vysokým až 4,4 metrů. Listy dorůstají délky až 50 cm a jsou 4 cm široké. Květenstvím je hustá lata, která se za květu rozkládá. Klásky jsou 3 – 7 květů. Kvete od srpna do září. Patří mezi nejčastěji používanou rostlinu na kořenových čistírnách odpadních vod (Mižík, 2008).
- Orobinec širokolistý (*Typha latifolia*) – jedná se o vytrvalou statnou rostlinu se silnou lodyhou. Listy jsou dlouhé modrozelené barvy a široké 10 – 20 cm. Vyrůstají střídavě a protistraně pod ostrým úhlem. Květenství je pohlavně oddělené. Samičí palice je ve spodní části a na ní přímo nebo s maximálně 2,5 cm mezerou navazuje palice samčí. Samičí válcovité palice mohou dosahovat až 20 cm délky a průměru až 3 cm, samčí jsou stejně dlouhé a spíše užší. Zbarvení palic je tmavohnědé. Drobné květy, resp. Později plodné nažky jsou opatřeny chmýrem tvořeným až 50 chlupy. Ten slouží od pozdního léta po rozpadu palice k vydařenému rozšiřování vzduchem. Samčí palice po opylení odpadávají. Kvete od července do srpna (Krása, 2008a).
- Orobinec úzkolistý (*Typha angustifolia*) – jde o statnou vytrvalou rostlinu s výrazným oddenkem, se silnou přímou lodyhou a dlouhými listy. Lodyha obsahuje vzdušný

arenchym zásobující rostlinu, resp. její spodní část potřebnými plyny. Listy jsou vzpřímené tmavě zelené barvy, často delší jak květenství, šířky do 10 mm. Listy odstávají od lodyhy pouze pod ostrým úhlem a vytváří na rostlině placatý a úzký vějíř. Květenství je tvořeno dvojicí válcovitých palic dlouhých až 30 cm. Spodní palice je samičí, horní samčí, která po opylení odpadá. Samčí květy vyrůstají v úžlabí zřetelných listenů, plodová stopka výrazně chlupatá, s chmýrem. Chmýr po dozrání zajišťuje po rozpadu palice ideální šíření větrem. Květenství probíhá od června do srpna (Krása, 2008b).



Obrázek 6. Rákos obecný (<http://www.kvetenacr.cz/>), orobinec širokolistý (www.botany.cz), orobinec úzkolistý (www.botany.cz)

- Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*) – jde o vysokou travu s dlouhými podzemními oddenky. Statná rostlina dorůstá výšek 60 – 200 (- 300) cm. Stébla jsou přímá, hladká a lesklá, se 4 – 6 kolénky, pochvy listů hladké, úzké, bíle blanité lemované. Jazyček dosahuje délky 6 – 10 mm a je dřipený. Čepele jsou 10 – 35 cm dlouhé a 6 – 18 mm široké, ploché, dlouhé zašpičatělé, lysé a drsné. Lata je v obrysu kopinatá, hustá, 10 – 25 cm dlouhá, často načervenalá, klásky jsou krátce stopkaté, až 6 mm dlouhé, plevy i pluchy bezosinné. Chrastice patří mezi rostliny náročné na vodu, má ráda fosfor v půdě a lze ji vyžít i jako biopalivo. Květenství probíhá v červnu až červenci (Mrázek, 2012).
- Skřípinec jezerní (*Schoenoplectus lacustris*) – jedná se o vytrvalou rostlinu dorůstající výšek až 3 metry. Má vysokou silnou lodyhu vyrůstající z plazivého oddenku. Silná lodyha je v průřezu kulatá a ve spodní části ji objímají listové pochvy. Listy jsou

omezeny na pochvy, jen nejvyšší pochva je zakončena krátkou čepelí. Květenství je bohatě větvené, složené ze svazčitých i jednotlivých klásků velikých od 5 do 10 cm. Pod květenstvím se nachází dlouhý, úzký a špičatý listen. Kveté od června do září (Krása, 2007).

- Kyprej vrbice (*Lythrum salicaria*) – jedná se o vytrvalou, 30 – 180 cm vysokou bylinu. Při dobrých podmínkách je schopna dorůst až 2 metrů. Lodyha je přímá, čtyřhranná, jednoduchá nebo na bázi větvená, alespoň na hranách krátce chlupatá. Listy vstřícné, horní někdy střídavé, přisedlé, poloobjímavé, kopinaté, 5 – 10 cm dlouhé a 2 – 2,5 cm široké, celokrajní až jemně pilovité, téměř lysé až srstnaté. Květenstvím jsou klasy skládající se ze dvou až šestikvětých vidlanů vyrůstajících z úžlabí listenů. Květy pravidelné, šestičetné, kališní lísky přibližně 1 mm dlouhé, široce trojúhelníkovité, lysé, korunní lístky červenofialové, úzce kopist'ovité, 8 – 12 mm dlouhé. Plodem je tobolka. Kyprice je vhodná jako doplňková rostlina na kořenové čistírně. Kveté od července do září (Houska, 2007).



Obrázek 7. Chrastice rákosovitá (www.lastura.cz), Skřipinec jezerní (www.botany.cz), Kyprej vrbice (www.botanika.wendys.cz)

- Zblochan vodní (*Glyceria maxima*) – jde o dlouze se plazivou travu dorůstající výšek 80 – 200 cm. Listy široké 8 – 20 mm mají rodově typickou dvojřížku a na vrcholu se náhle zužují v kápovitou špičku. Čepel je na líci hladká, na rubu naopak drsná a na rozdíl od ostatních našich zblochanů jsou na ní proti světlu krásně patrné anastomózy (spojky mezi žilkami vyššího rádu u listů některých vodních rostlin). Stébla jsou až 10

mm silná, pochvy oblé nebo jen slabě smáčklé. Laty bývají 20 – 40 cm dlouhé. Žlutavé či fialové vejčité klásky dosahují délky nanejvýš 12 mm (Jírová, 2007).



Obrázek 8. Zblochan vodní (www.botanickafotogalerie.cz)

4 ODVODŇOVÁNÍ KALŮ MOKŘADNÍMI ROSTLINAMI

Kalové hospodářství se stalo klíčovým tématem městských a průmyslových odpadních vod ze dvou hlavních důvodů:

1. velká množství kalu jsou generována jako odpad nebo vedlejší produkt z čištění odpadních vod
2. nakládání s pevnými odpady a likvidace patří mezi nejsložitější problémy v problematice procesu čištění odpadních vod.

Obecně platí, že kaly vyplývající z čistíren odpadních vod v kapalně formě obvykle obsahují 0,5 až 15 % celkové sušiny (Uggetti a kol., 2010). Většina z nich jsou organické sloučeniny s širokou škálou obsahu těkavých pevných látek (50 % až 80 %), obvykle od 75 % do 80 % celkové sušiny (von Sperling a Goncalves, 2007). Množství vyprodukovaného kalu a jeho vlastnosti jsou vysoce závislé na složení odpadních vod a hygienizaci.

Hlavní technologie kalového hospodářství jsou zaměřeny na zvýšení koncentrace celkových pevných látek za účelem snížení objemu kalu (tj. zahušťování a odvodňování), nebo snížení koncentrace těkavých pevných látek a stabilizaci biologického rozkladu organické hmoty, tj. stabilizaci kalu pomocí anaerobní disgesce nebo kompostování (Werther a Ogada, 1998). Snížení objemu kalu pomocí odvodňovací technologie snižuje náklady na manipulaci s kalem, dopravu a konečnou likvidaci. Kromě toho je odvodnění kalu vždy nutné před jeho konečným nakládáním, tj. před kompostování, spalování a skládkování. Odvodnění může být provedeno za použití konvenčních mechanických procesů, jako je například odstředění a filtrace, nebo pomocí jiných postupů, jako je odpařování vody, evapotranspirace a perkolace (Uggetti a kol., 2010).

Obecně platí, že systémy nakládání s kaly jsou spojeny s vysokými náklady, a to od 20 do 60 % celkových provozních nákladů na čištění odpadních vod (Wei a kol., 2003; Von Sperling a Goncalves, 2007). V případě řešení kalového hospodářství v kombinaci s kořenovou čistírnou odpadních vod se jedná v podstatě o jedinou výraznou provozní položku, tvořící cca 90 – 95 % provozních nákladů kořenové čistírny.

Reed-bed systémy, jak jsou v zahraničí nazývány kalová pole s mokřadní vegetací a drenážním systémem, jsou používány v mnoha oblastech světa pro odvodňování a následnou mineralizaci kalů (Caselles - Osorio a kol., 2007). Jsou tvořeny mělkými zemními jámkami

nebo příkopy hydraulicky izolovanými od podloží, naplněnými šterkem a osázenými mokřadní vegetací, např. rákosem obecným (Cole, 1998) nebo chrasticí rákosovitou. Odvodnění kalů a stabilizace pomocí mokřadní vegetace se v Evropě používá již od roku 1980. Největší rozšíření Reed-bed systémů pochází z Dánska, kde je více než 140 realizací v provozním zapojení a systémy jsou v současné době stále v provozu (Nielsen, 2008). Jiné systémy realizované v Evropě se nachází v Polsku, Belgii a Spojeném království. V oblasti Středozevního moře jsou systémy v Itálii, Francii a ve Španělsku. Několik studií poloprovozních podmínek bylo zpracováno v Palestině (Nassar a kol., 2006) a Kamerunu (Kengne Noumsi a kol., 2006).

Výše uvedenými a citovanými autory je popsán proces odvodňování mj. doprovodným efektem, kdy se na povrchu odvodňovaného kalu tvoří praskliny, které zvyšují odpařování vody a přenos kyslíku, který přispívá k vyšší pórovitosti do hloubky odvodňovaného kalu a zároveň přítomnost kyslíku zajišťuje mineralizaci kalů na spodních vrstvách. Přenos kyslíku rostlinami ze vzduchu až po kořeny a prostřednictvím popraskaného povrchu se současným provzdušněním přes rozpraskaný povrch odvodňovaného kalu vytváří aerobní podmínky v některých částech kalové vrstvy, což vede k přítomnosti aerobních mikroorganismů a tím zlepšení mineralizace kalu (Nielsen, 2003, 2005a, b).

Princip odvodnění tekutého stabilizovaného čistírenského kalu mokřadními rostlinami spočívá ve využití jejich vysoké transpirace, schopnosti přizpůsobené anaerobnímu prostředí, v přívodu kyslíku do kořenové zóny a využívání nutrientů k vytváření jejich mohutné biomasy. Z rostlin, vhodných pro tento účel, se u nás používají rákos obecný (*Phragmites australis*), orobinec širokolistý a úzkolistý (*Typha latifolia* a *angustifolia*), zblochan vodní (*Glyceria maxima*), chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*), aj. Po dostatečném zakořenění rostliny a dosavadním zavlažování kalového pole, obvykle v druhé polovině května, se započne s napouštěním stabilizovaných čistírenských kalů (Šálek, J., 2003).

Za nejdůležitější faktor, který rozhoduje o výkonu odvodňovacích kalových polí s mokřadní vegetací, se považuje znalost průběhu evapotranspirace. Průběh evapotranspirace úzce souvisí s klimatickými činiteli, dále na druhu, vývoji a hustotě porostu, ale také s velikostí odvodňovacích polí a s tím souvisejícím mikroklimatem, uspořádáním kalových polí, krytu povrchu aj. Většina specialistů uvádí průměrné hodnoty denní evapotranspirace. Podle Čížkové a kol. (2003) hodnoty evapotranspirace na velkých plochách dosahují 5 až 7

mm.d⁻¹. Hodnoty evapotranspirace mokřadních rostlin podle Přibáně (1986) u velkoplošných mokřadů u rákosu obecného činí 3,2 mm.d⁻¹, u orobince 3,5 až 5,7 mm.d⁻¹ a na malých plochách u rákosu obecného 6,9 až 11,4 mm.d⁻¹.

Se stále více se zvyšující produkcí kalu je nutné vyvíjet alternativní technologie ošetření, s cílem snížit množství kalu, organické hmoty a obsah těžkých kovů, jakož i obsah některých rozvíjejících se toxických látek. Odvodňovací účinnost systémů Reed-bed, která je založena na evapotranspiraci a odvodnění, je srovnatelná s mechanickými metodami odvodnění (Nielsen, 2003; Uggetti a kol, 2010a). Mezi hlavní výhody reed-bed systému oproti jiným systémům patří, mimo jiné, nižší počáteční investice, nižší provoz a náklady na údržbu a relativně nízká spotřeba energie. Obvykle však vyžadují větší oblasti ve srovnání s mechanickými metodami. Reed-bed slouží nejen k odvodňování kalu, ale také k jeho stabilizaci (Uggetti a kol, 2010a). Proto za předpokladu správné stabilizace probíhající v reed-bed systému, lze konečný produkt použít jako prospěšné organické hnojivo (Nielsen a Willoughby, 2005), což tvoří alternativu šetrnou k životnímu prostředí u odpadních kalů od malých a středních obcí. Aktuální diskuze publikované v literatuře jasně rozlišují pojmy „stabilita“ a „zralost“ (Iannotti a kol., 1993; Barrena a kol., 2006). Stabilita se týká rozkladu organické hmoty mikrobiální aktivitou, která se obvykle měří pomocí spotřeby kyslíku nebo vytvoření CO₂ (Iannotti a kol., 1993). Na druhé straně zralost je přímo podmíněna účinkem organického materiálu na růst rostlin nebo na klíčení semen (Wu a kol., 2000).

4.1 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM V SEVERNÍM ŘECKU

Ve městě Xanthi byl proveden výzkum, jehož cílem bylo posoudit stabilitu a vospělost kalu zpracovaného pomocí reed-bed systémů. Dále zkoumali efekt variability konstrukce a provoz systémových parametrů na kvalitu zbytkového kalu. Hlavním cílem bylo vytvořit zralý a stabilizovaný kal, který by se mohl běžně aplikovat na půdu (Alexandros a kol., 2011).

4.1.1 Výzkum

Bylo zkonstruováno a provozováno pod širým nebem laboratoře Xanthi 13 jednotek reed-bed (S1 – S13). Jednotky S1 – S11 byly postaveny a osazeny v červnu 2007, zatímco nakládání kalu začalo o 4 měsíce později, aby se rostliny dostatečně rozrostly (Stefanakis a Tsihrintzis, 2011). Jednotky S12 – S13 byly zkonstruovány a provoz zahájen o jeden rok

dříve, tedy v říjnu 2006 (Stefanakis a kol., 2009). V tab. 3. jsou uvedeny provozní a konstrukční charakteristiky 13 jednotek. Parametry, které se liší, jsou následující:

- vznik porézního prostředí,
- velikost porézního média,
- přítomnost rostlin,
- přítomnost aeračních trubek,
- velikost kalového zatížení,
- koncentrace chromu (Alexandros a kol., 2011).

Tabulka 3. Experimentální design a provozní charakteristiky 13 zkoumaných jednotek (Alexandros a kol., 2011)

Jednotka	Porézní médium		Druh rostlin	Aerační trubky	Chrom	SLR ^c (kg TS/m ² /rok)	TSAOSP ^h (kg TS/m ²)	SL (EO/m ²) ^d
	Původ ^a	Velikost						
S1	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ne	75	160	4,7
S2	Q	Dobrá	Rákos	Ano	Ne	75	160	4,7
S3	R	Dobrá	Orobinec ^b	Ano	Ne	75	160	4,7
S4 ^g	R	Dobrá	Nic	Ano	Ne	75	160	4,7
S5	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ne	30	67	1,9
S6	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ne	60	129	3,8
S7	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ano	75	160	4,7
S8	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ano	30	67	1,9
S9	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ano	60	129	3,8
S10	R	Dobrá	Rákos ^b	Ne	Ne	75	160	4,7
S11	R	Chatrná	Rákos	Ano	Ne	75	160	4,7
S12	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ne	30	106 ^e	1,9
S13	R	Dobrá	Rákos	Ano	Ne	75	136 ^f	4,7

Vysvětlivky:

a – R = koryto řeky, kde převládají vyvěřeliny, Q = lom z uhličitánové horniny

b – Rostliny vysušené v průběhu prvního léta provozu

c – SLR = velikost kalového zatížení, TS = sušina kalu

d – SL = kalové zatížení, na základě klasické nakládací rychlosti 16 kg TS/ EO /rok

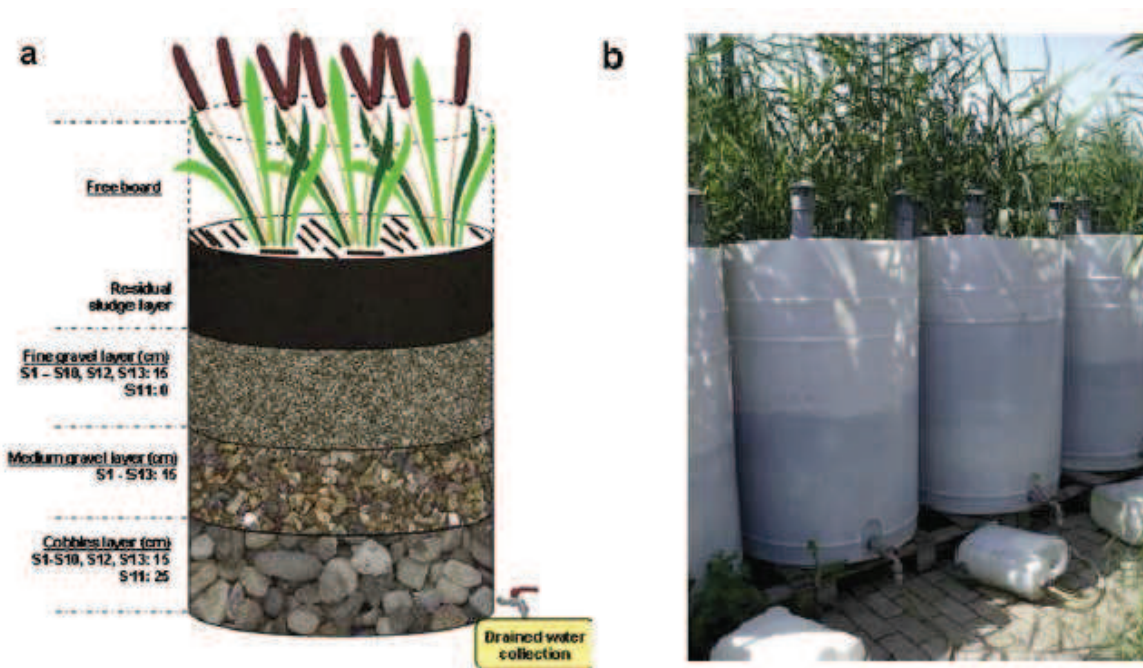
e – provozováno 3,5 let

f – provozováno 1,5 let

g – kontrolní jednotka

h – celková aplikace kalů za sledované období

Každá experimentální jednotka se skládala z plastové válcové nádrže (0,82 metrů průměr a 1,5 metrů výšky, tj. celková plocha 0,53 m²). Všechny jednotky obsahovaly 10 cm drenážní vrstvu, na dně každé jednotky. Pro vzdušňovací trubice byly umístěny do drenážní vrstvy. Na obr. 9. je vidět svislý řez a obraz testovaných jednotek (Alexandros a kol., 2011).



Obrázek 9. (a) schéma vertikálního rozdělení testovaných jednotek, (b) pohled na sledované jednotky (Alexandros a kol., 2011)

Přebytečný kal byl získán z čistírny odpadních vod města Komotini v severním Řecku. Krmení jednotek bylo prováděno ručně pomocí perforovaného plastového potrubí, které zapříčinilo rovnoměrné zaplavení kalem celé ložné plochy. Prvních sedm dní byl každý den stejným dílem dodán kal, poté následovala klidová fáze 1 – 3 týdny. Během léta byly použity kratší klidové fáze (1 – 2 týdny). Jednotky S1 – S11 byly v provozu 2,5 roku nepřetržitě (od října 2007 do dubna 2010), zatímco jednotky S12 – S13 byly v provozu pouze jeden rok (říjen 2006 – říjen 2007). Výzkum se zaměřoval na poslední rok provozu jednotek, neboť cílem bylo sledování stability a zralosti zbytkového kalu (Alexandros a kol., 2011).

Vzorky byly odebírány z celé hloubky zbytkového kalu a rozděleny na horní a dolní část pro měření potencionálních rozdílů v jednotlivých vrstvách. Všechny vzorky byly analyzovány v laboratoři bezprostředně po odběru, kde byla stanovena celková sušina (TS), těkavé pevné látky (VS) (tj. organická hmota) a celkové koliformní bakterie (TC) v závislosti na APHA a AWWA (1998).

Tab. 4. obsahuje průměrné vlastnosti přitékajícího kalu používaného během celého experimentálního období. Uvedené hodnoty jsou průměry vlastností kalu ze tří dávkovacích akcí (Alexandros a kol., 2011).

Tabulka 4. Průměrné vlastnosti zahuštěného přebytečného aktivovaného kalu použitého v experimentech (Alexandros a kol., 2011)

Parametr	Hodnota ^a
Celková sušina (% vlhké hmotnosti)	3,1 ± 0,73
Těkavé pevné látky (% sušiny)	73,7 ± 3,2
C-CO ₂ (g C/ suchý kg) ^b	79,0 ± 23,0
SRI ₁₂ (mg O ₂ / suchý kg/h) ^c	1512 ± 709
GI (% z kontroly) ^d	63,5 ± 52,3
pH	8,7 ± 0,26
Elektrická vodivost (mS/cm)	19,7 ± 0,08
Celkový Cr (g/ Cr/ kg sušiny)	0,28 ± 0,072

Vysvětlivky:

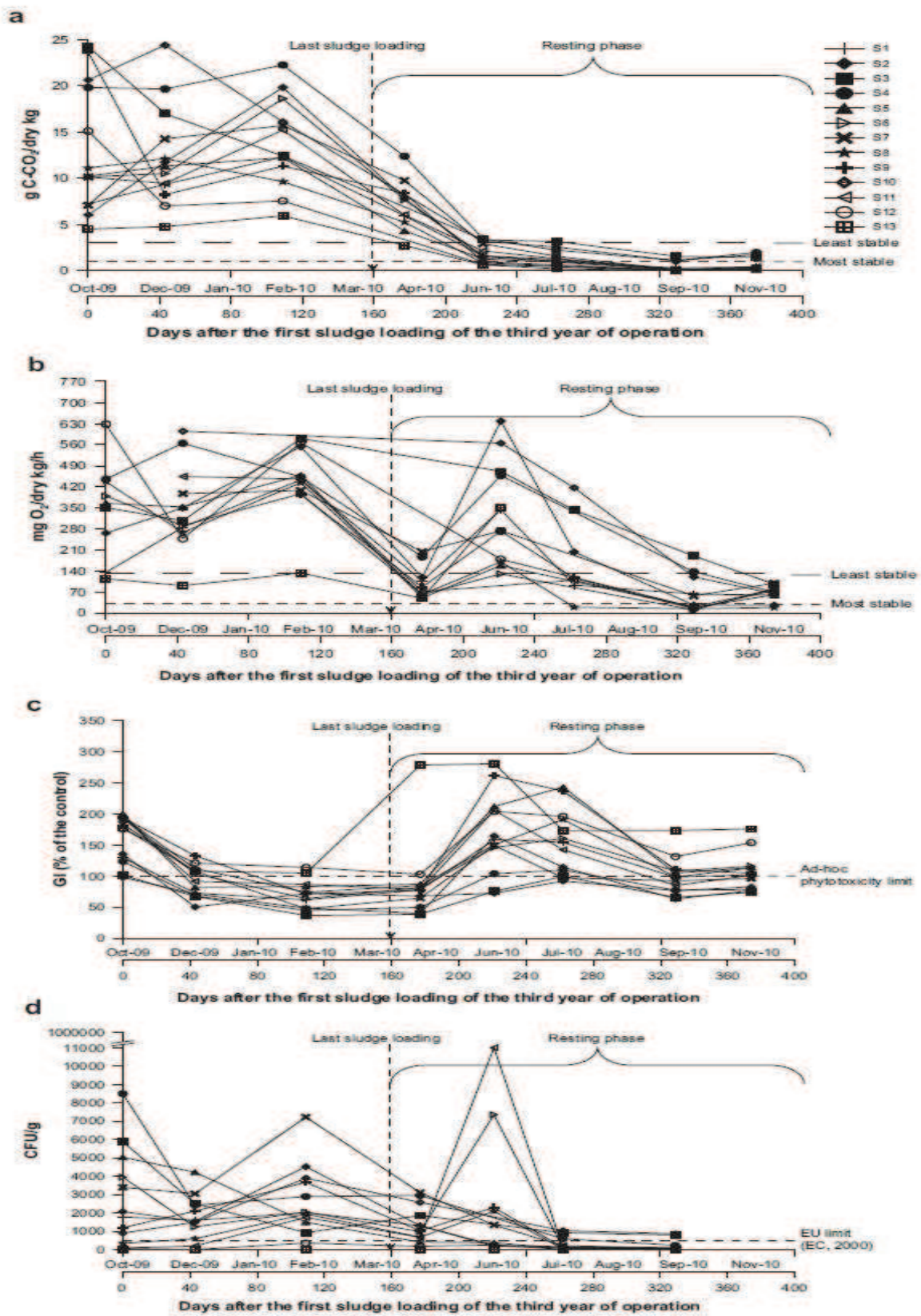
a – průměrná hodnota ± standardní odchylka

b – Celkový C-CO₂ generovaný po inkubační době 7 dní při teplotě 35 °C

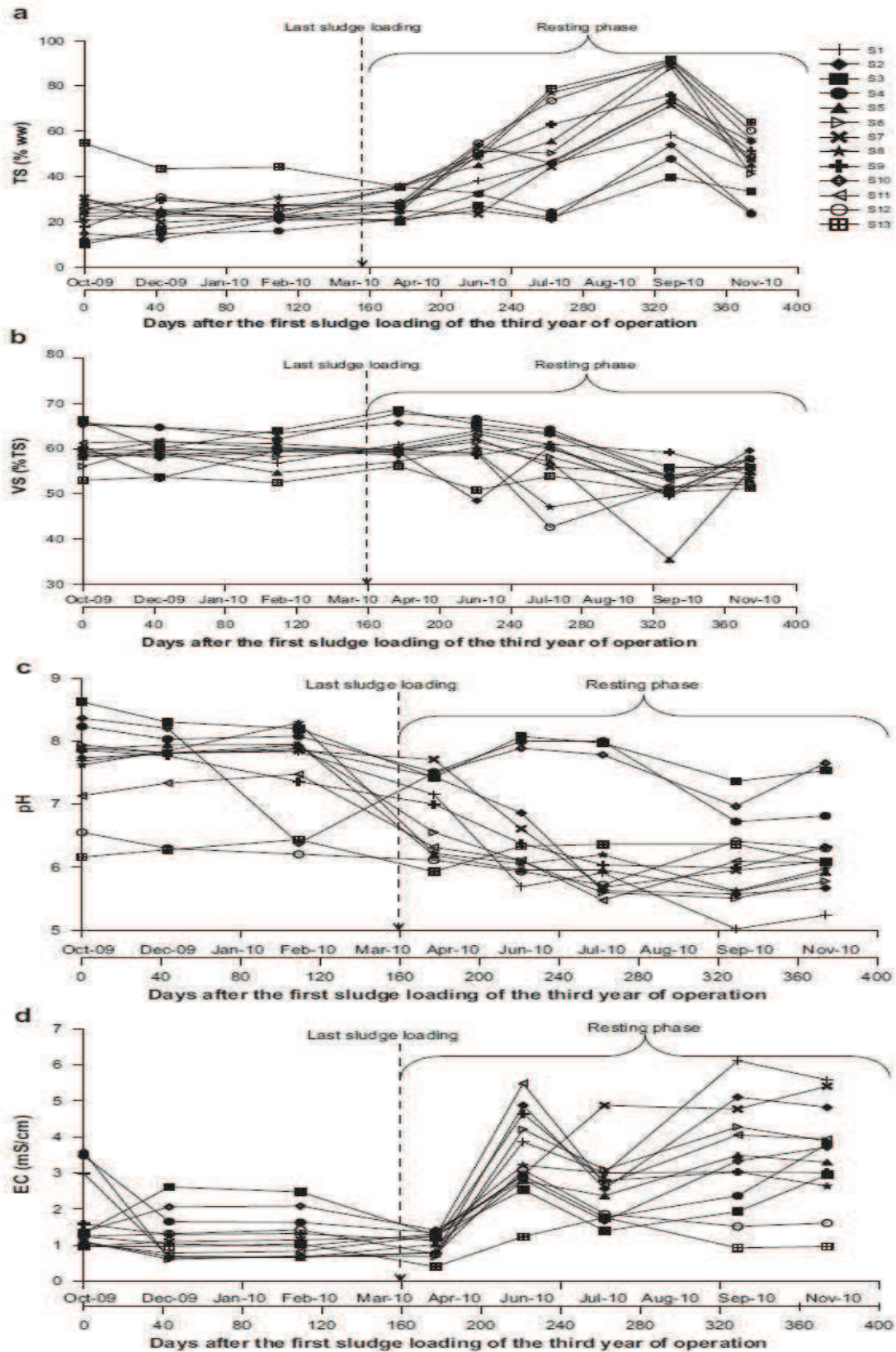
c - Statický index respirace, což je maximální rychlost spotřeby kyslíku v průběhu 12 hodinové periody během 7 denní inkubaci při 35 °C za použití statického manometrického respirometru.

d - Index klíčení založený na klíčení semen biotestem

Obr. 10. zobrazuje časový vývoj C-CO₂, SRI₁₂ (statický index respirace) a celkové koliformní bakterie (TC) v průběhu studia jednoho roku, zatímco na obr. 11. znázorňuje časové variace celkové sušiny (TS), těkavé látky (VS), pH a elektrické vodivosti (EC) pro všech 13 reed-bed jednotek. Hodnoty obsažené v obrázcích jsou průměry z měření v horní a spodní vrstvy z každé jednotky (Alexandros a kol., 2011).



Obrázek 10. Časový vývoj (a) C-CO₂; (b) SRI12; (c) GI; (d) Celkové koliformní bakterie během 1 roku pozorování (Alexandros a kol., 2011)



Obrázek 11. Časový vývoj (a) celkové sušiny (%); (b) těkavých látek (% TS); (c) pH; (d) elektrické vodivosti (mS/cm) během 1 roku pozorování (Alexandros a kol., 2011)

Nebyly zjištěny žádné statisticky významné rozdíly indexů (C-CO₂ a SRI₁₂ stability a obsahu sušiny mezi horní a dolní vrstvou porézního média. Statisticky významný rozdíl mezi obsahem těkavých pevných látek ze dvou kalových vrstev byl vypořádan v jednotkách S6, S7, S9 a S11. Tyto rozdíly byly přítomny po celou dobu klidové fáze (s výjimkou v případě S11). V této jednotce byl vždy vyšší obsah organických látek ve vrchní vrstvě v porovnání se spodní vrstvou. Zdá se tedy, že spodní vrstva obsahovala kal ze starší aplikace, který byl oxidován ve větší míře ve srovnání s horní vrstvou, která je bezprostřední receptor nového kalu (Alexandros a kol., 2011).

Stejná statistická analýza byla použita k porovnání dvojice jednotek s různými konstrukčními vlastnostmi. Například jednotky S1, S5 a S6 se lišily pouze velikostí kalového zatížení oproti ostatním výzkumným jednotkám, které měli všechny konstrukční znaky podobné. Vzhledem k tomu, že nebyly nalezeny žádné rozdíly mezi jednotkami během klidové fáze, zdá se, že k rozdílům docházelo jen při zatěžovacích fázích. To se vysvětluje tím, že při nižších zatěžovacích stavech a příslušným menším množstvím kalu bylo dosaženo rychlejší zralosti a organické látky se rozkládaly ve vyšší míře v porovnání s vyšší velikostí kalového zatížení. Přítomnost vegetace jasně ovlivnila výkon jednotek. Jednotka S1 obsahovala sušší kal (tj. vyšší obsah sušiny) ve srovnání s jednotkou S4 (neosázená). Stejně významné rozdíly byly také získány z pozorování jednotky S1 (rákos obecný) a jednotkou S3 (orobínek širokolistý). Dále kal z S1 měl vyšší obsah organické hmoty v průběhu celého jednoho období ve srovnání s jednotkou S3 a S4. To je vysvětleno faktem, že rákos pouze neabsorbuje vodu (de Maeseneer, 1997) a nutrienty pro svůj růst, ale umí přeměnit kyslík přes jeho kořenový systém. Může tak vytvořit aerobní prostředí a zlepšit oxidaci organické hmoty (Uggetti a kol., 2010a). Z toho lze konstatovat, že přítomnost rostlin na čistících jednotkách je nutností pro získání stabilního a zralého suchého zbytkového kalu jako konečného produktu. Původ a velikost porézního média nemělo významný vliv na stabilitu a vyspělost kalové vrstvy. Přítomnost aeračních trubek mělo za cíl zvýšit provzdušnění substrátu, a tím napomáhat růstu rostlin (Edwards a kol., 2001). Absence provzdušňovacích trubek u jednotky S10 vedlo k úmrtí rostlin během prvního léta provozu (2008). Kal z jednotky S7, který byl obohacen Cr, měl vyšší mikrobiální respirační aktivitu během zatěžovací fáze, ve srovnání s jednotkou S1, která byla bez přídavku Cr. Zdá se tedy, že při vysokých zatěžovacích dávkách a vysoké koncentraci Cr probíhala degradace pomaleji ve srovnání s absencí Cr (Epstein, 1997). Srovnání jednotky S1, kdy došlo k 2,5 roku zatěžování kalem a 6 měsíců klidové části a S13, kde probíhala klidová část více než 5 let se

potvrdilo, že v průběhu prodloužené klidové fáze kal může dosáhnout ještě vyšší úrovně stability a zralosti (Alexandros a kol., 2011).

4.1.2 Výsledky

Obr. 10. (a) jasně ukazuje, že dochází k postupnému snížení tvorby CO₂ (index C-CO₂) během klidové fáze. Hodnoty 1,0 a 3,0 g/C-CO₂ sušiny kg a z 30 a 130 mg O₂ /sušiny kg/h jsou limity pro nejstabilnější komposty v závislosti na práci Komilis a kol. (2011). Tyto limity jsou zobrazeny na obr. 10. (a) a (b) jako vodorovné čárkované čáry (Alexandros a kol., 2011).

Na druhé straně byl zpozorován prudký nárůst SRI₁₂ při 2. odběru vzorků během klidové fáze. Zajímavým povšimnutím bylo, že toto zvýšení se časově shodovalo s prudkým nárůstem elektrické vodivosti (obr. 11. (d)) a celkových počtů koliformních bakterií (obr. 10. (d)). Toto zvýšení bylo pozorováno na počátku června (tj. začátek léta) a může být pravděpodobně vysvětleno tím, že zvýšení teploty vede k odstranění vody a koncentraci některých prvků (Alexandros a kol., 2011).

Index klíčivosti semen vykazoval pokles během zatěžovací fáze na hodnoty menší než 100 % téměř ve všech jednotkách. Pokles je přičítán rozkladu kalu v průběhu této fáze a pravděpodobnému uvolnění meziproductů metabolitů (např. kyseliny), které mnohou bránit klíčení semen (Epstein, 1997). Index klíčivosti nezatížené jednotky S13 dosáhl nejvyšších hodnot ze všech jednotek (asi 300 %) během klidové fáze. Závěrečné hodnoty indexu klíčivosti asi po 5 měsících odpočinku se pohybovaly v rozmezí od 74 % do 176 % (Alexandros a kol., 2011).

Celkový obsah koliformních bakterií také ukázal postupné snižování v průběhu období studie (obr. 10. (d)). Evropská komise navrhla limit 5×10^2 *E. coli* KTJ/g, jako fekální indikátor bakterií (EC, 2000). Toto omezení bylo v poslední době zvýšeno na 5×10^5 *E. coli* KTJ/g, na základě nedávného evropského dokumentu pro kaly a biologický odpad (EC, 2010). Celkový obsah koliformních bakterií v tomto výzkumu se pohyboval od 15 do 102 KTJ/g pro všechny osázené jednotky, naopak pro neosázené byla průměrná koncentrace 640 KTJ/g (Alexandros a kol., 2011).

Obsah sušiny zůstal pod 35 % pro všechny jednotky (s výjimkou pro jednotku S13) během zatěžovací fáze. To se vysvětluje tím, že zatěžovací fáze se shodovala se zimní a brzkou jarní teplotou, se zvýšeným výskytem srážek a omezenou aktivitou rostlin (v důsledku nižších

teplot). Po posledním zatěžování kalem (na začátku dubna 2010) se obsah sušiny a organických látek postupně zvyšoval a dosáhl průměrné konečné hodnoty 69,2 % u jednotek s vysokým kalovým zatěžováním (S1, S2, S7 a S11), 80,2 % u jednotek se středním zatěžováním kalem (S6 a S9) a 90,1 % u jednotek s nízkým kalovým zatížením (S5 a S8). Tyto hodnoty ukazují na dostatečně odvodněné konečné produkty. Neosázená jednotka dosáhla hodnoty 38,8 %. V posledním případě odběru vzorků (listopad 2010) bylo pozorováno výrazné snížení sušiny vzhledem k zahájení dešťů (Alexandros a kol., 2011).

Po celou dobu zatěžovací fáze zůstala hodnota pH nad 7,5 u téměř všech jednotek. Po vstupu do klidové fáze došlo k postupnému snížení na hodnoty nižší než 6,5. Nedostatek vody během klidové fáze může mít nucený účinek na rostliny pro uspokojení svých potřeb transpirace vody z pórů v systému při současném uvolnění různých solí (Kadlec a Wallace, 2009).

Výsledkem experimentu po jednom roku nepřetržitého monitorování je, že reed-bed systémy jsou schopny produkovat stabilní a zralý kalový konečný produkt, při zatěžovacích rychlostech až 75 kg/m²/rok, po 4 měsících klidové fáze. Konečný obsah koliformních bakterií byl hluboko pod legislativními limity. Nebyly zjištěny žádné rozdíly mezi měřeními stability a zralosti mezi horní a spodní kalovou vrstvou. Přítomnost rostlin je rozhodující a vedla k produkci stabilnějšího a vyspělejšího zbytkového kalu ve srovnání s neosázenou jednotkou. Zatěžování kaly s vysokým obsahem chromu ve vysokém zatížení kalem brání mikrobiální respiraci během zatěžovacích fází. Přítomnost aeračních trubek, typ a velikost porézního média nemá vliv na kvalitu konečného produktu kalu (Alexandros a kol., 2011).

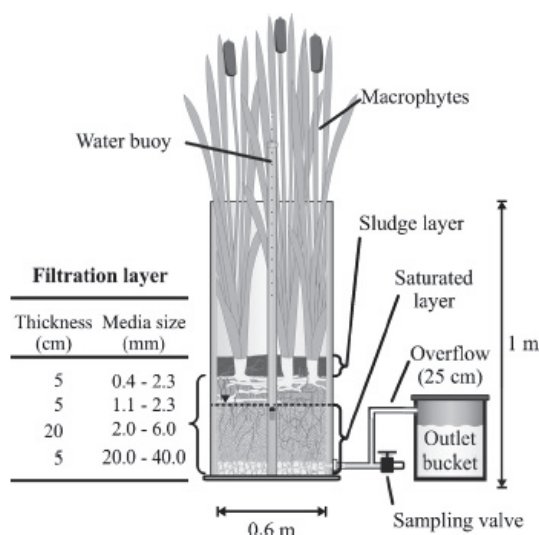
4.2 EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM KANADA

Cílem toho výzkumu bylo zhodnotit vliv přítomnosti rostlin a specifických druhů rostlin na odvodnění kalu a jeho mineralizaci, a určit osud vody a znečišťujících látek při ošetření kalů v reed-bed systémech. Experiment byl prováděn tři léta ve velkých mokřadních systémech, kde byly vysázeny v monokultuře rákos obecný (*Phragmites australis*), orobinec úzkolistý (*Typha angustifolia*) a skřípinec jezerní (*Scirpus Fluviatilis*). Pro srovnání byla zavedena i kontrola, neosázený mokřad, to vše v duplikátech. Experimentální systémy nebyly zcela vypuštěny a nasycená vrstva byla zachována v dolní části mokřadu upřednostňující evapotranspiraci a odstranění znečišťujících látek. Systémy byly krmeny koncentrovaným kalem z rybí farmy

a byl hodnocen výkon účinností odvodnění kalu a mineralizací, stejně tak analýzou hmotnostní bilance (Gagnon a kol., 2013).

4.2.1 Výzkum

Experiment byl proveden v poli nacházejícím se v Montrealské botanické zahradě (Quebec, Kanada), které má semi-kontinentální klima s teplými, vlhkými léty a velmi chladné zimy. Vegetační období zde trvá asi 195 dnů, od poloviny dubna do poloviny září. Experimentální uspořádání se skládalo z nádob válcového tvaru o průměru 0,6 metrů a výšky 1 metr. V těchto nádobách byly 4 filtrační vrstvy různých velikostí zrn (obr. 12.). Vše bylo provedeno v duplikátu, tedy celkem 8 výzkumných nádob. Krmený kal se skládal hlavně z usazených rybích výkalů a nespotřebovaných potravin. Průměrné vlastnosti kalu a celkové množství znečišťujících látek jsou uvedeny v tab. 5. Systémy byly osazeny na konci léta 2007 a zpočátku doplněna 1500 g.m⁻², dále následovalo týdenní zatížení farmy během léta 2008, 2009 a 2010. Zatížení bylo přerušované (1 den krmení, následovalo 6 dní pracovního klidu) s týdenním kurzem 412 g.m⁻².týden⁻¹ v roce 2008 (9 týdnů), 338 g.m⁻².týden⁻¹ v roce 2009 (12 týdnů) a 575 g.m⁻².týden⁻¹ v roce 2010 (14 týdnů), celkem tedy 0,59 m³.m⁻² kalu z rybí farmy v průběhu experimentu. Nádoby nebyly krmeny během zimy, neboť cílem experimentu bylo změřit vliv rostlinných druhů, kde by se očekávalo, že bude v kalových čistících mokřadech minimální při teplotách pod bodem mrazu (Gagnon a kol., 2013).



Obrázek 12. Průřez experimentální nádrží zobrazující zrnitosti jednotlivých vrstev (Gagnon a kol., 2013)

Tabulka 5. Průměrná koncentrace znečišťujících látek v čerstvém kalu a celkové zatížení znečišťujícími látkami na povrchu čistícího mokřadu po třetím létě krmení (Gagnon a kol., 2013)

Znečišťující látky v kalu	Koncentrace g.l ⁻¹	Znečištění na výstupu kg.m ⁻²
Celková sušina	32,5 ± 14,0	17,4
Celkové těkavé pevné látky	23,5 ± 13,0	12,4
Celkový dusík dle Kjeldahla	2,0 ± 0,8	0,91
Celkový fosfor	0,75 ± 0,2	0,42

Vzorky byly odebírány ve třech místech:

1. kalový koláč na povrchu,
2. z nasycené vrstvy
3. na výstupu systému.

Vzorky byly odebrány 1 týden po poslední aplikaci kalů. Rozdíly mezi druhy rostlin a neosázenou kontrolou byly hodnoceny pomocí dvou různých přístupů:

1. obsah znečišťujících látek v kalu určených poměrem znečišťujících látek k celkovému obsahu sušiny kalu,
2. analýzou hmotnostní bilance, která dává distribuci vody a znečišťujících látek v experimentální nádrži, které umožnilo zhodnotit zbývající množství v kalovém koláči, rostliny a nasycenou vrstvu nebo výstup.

Velmi nízké množství znečišťujících látek se pravděpodobně ztratilo během zimního období a bylo tak považované za zanedbatelné. Celkový obsah sušiny (TS) a těkavé látky (VS) byly analyzovány standardními metodami (APHA a kol., 2012). Celkový dusík podle Kjeldahla (TKN), celkový fosfor (TP) a celkový uhlík (TC) byly měřeny za použití automatického analyzátoru QuikChem vstříkovaní proudu podle pokynů výrobce (QuikChem 8500, Lachat). Procentuální zastoupení obsahu pevných látek jsou uvedeny za vlhkého kalového koláče, zatímco obsah těkavých látek, dusíku, fosforu a uhlíku jsou prezentovány na suchém kalovém koláči tab. 6. (Gagnon a kol., 2013).

Tabulka 6. Charakteristika surového kalu a kalového koláče podle různých druhů rostlin na konci léta 2010 (v průměru ± standardní odchylka) (Gagnon a kol., 2013)

	Snížení objemu (%)	TS (%)	TVS (%)	TC (%)	TKN (%)	TP (%)
Kal		4 ± 2	72 ± 14	39 ± 8	6,4 ± 1,6	2,4 ± 0,9
Rákos obecný	89 ± 1	31 ± 3	40 ± 6	32 ± 2	3,7 ± 0,3	2,3 ± 0,2
Orobinec úzkolistý	80 ± 10	28 ± 1	42 ± 6	31 ± 1	3,0 ± 0,4	2,2 ± 0,7
Skřípinec jezerní	84 ± 1	33 ± 15	39 ± 2	31 ± 2	2,8 ± 0,4	1,9 ± 0,2
neosázené	85 ± 3	28 ± 5	34 ± 1	30 ± 7	2,1 ± 0,3	1,6 ± 0,2

Na konci každého léta byl počítán počet kmenů a nadzemní části byly nařezány, usušeny a zváženy. Naměřená hmotnost nadzemní biomasy sloužila k odhadu příjmu živin rostlinami. Podzemní část biomasy byla hodnocena na konci třetího léta pouze v jednom opakování pro každý druh. Příjem dusíku a fosforu rostlinami byl odhadnut vynásobením suché biomasy (nad i podzemní) obsahem specifických živin suché biomasy podle hodnot stanovených Tanneret a kol. (1995), Ennabili a kol. (1998) a Smith a kol. (2008). Hustota rostlin a biomasy na konci léta 2010 je uvedena v tab. 7., která odpovídá vrcholu založení rostlin v systému (Gagnon a kol., 2013).

Tabulka 7. Rostlinné biomasy, hustota, a evapotranspirace podle různých druhů rostlin pro léto 2010 (v průměru ± směrodatná odchylka) (Gagnon a kol., 2013)

	Biomasa		Hustota rostlin	Evapotranspirace
	Pod (g.m ⁻²)	Nad (g.m ⁻²)	(ks.m ⁻²)	(l.m ⁻² .d ⁻¹)
Rákos obecný	3087 ± 69	3331	1432 ± 165	10,9 ± 0,6
Orobinec úzkolistý	827 ± 331	2183	258 ± 55	5,3 ± 1,3
Skřípinec jezerní	100 ± 48	453	120 ± 50	3,3 ± 0,6
Neosázené				3,0 ± 1,1

4.2.2 Výsledky

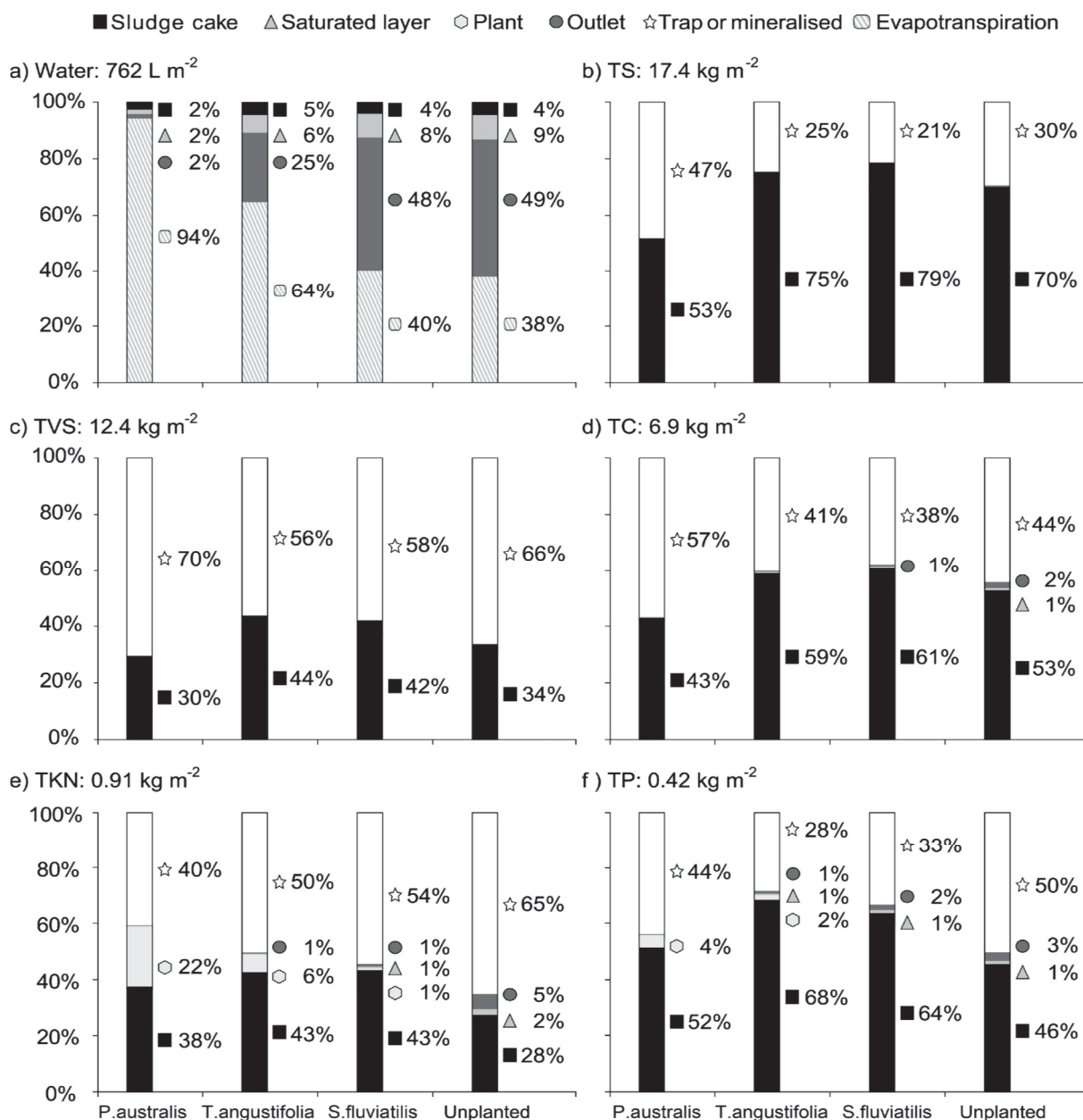
Rostliny dosáhly maximální hustoty, biomasy a evapotranspirace v létě roku 2010, přičemž nejvyšší hodnoty byla získána u rákosu obecného, dále pak orobinec úzkolistý a skřípinec jezerní (tab. 7.). Celkem bylo použito 0,59 m³.m⁻² kalu během experimentu. K nejvyššímu snížení objemu kalu došlo u rákosu obecného, kde se objem snížil na 0,07 m³.m⁻², dále následovali neosázený a skřípinec jezerní, které dosáhli stejného objemu kalu a to 0,09 m³.m⁻² a nakonec orobinec úzkolistý s hodnotou 0,12 m³.m⁻² viz tab. 7. Celkem bylo dodáno do experimentu 762 l.m⁻² vody (kal + déšť) během léta 2010. Největší evapotranspirace byla zjištěna hlavně u rákosu obecného (1034 ± 80 l.m⁻²), v menší míře u orobince úzkolistého (491

$\pm 125 \text{ l.m}^{-2}$), zatímco u skřípince jezerního pouze $307 \pm 63 \text{ l.m}^{-2}$ a u neosázené $291 \pm 98 \text{ l.m}^{-2}$. Mezi jednotlivými druhy rostlin nedošlo k žádnému výraznému rozdílu obsahu sušiny, mimo neosázenou nádobu, zde je výraznější rozdíl oproti osázeným nádobám. Obsah těkavých látek se pohyboval v rozmezí od 72 % u čerstvého kalu do cca 40 % u kalového koláče ze systémů, které obsahovaly nějaké rostliny, zatímco neosázené kontroly měly nejnižší (34 %) obsahem těkavých látek (tab. 6.). Těkavé látky byly považovány za zachycené nebo mineralizované v systémech s vyšší frakcí, u rákosu obecného ($8,7 \pm 0,9 \text{ kg.m}^{-2}$), po nichž následuje neosázené ($7,8 \pm 0,5 \text{ kg.m}^{-2}$), skřípinec jezerní ($7,1 \pm 0,1 \text{ kg.m}^{-2}$) a orobinec úzkolistý ($6,9 \pm 1,1 \text{ kg.m}^{-2}$) viz obr. 13. (c). Obsah celkového uhlíku se pohyboval od 39 % u čerstvého kalu do asi 30 %, bez významného rozdílu mezi druhy rostlin nebo neosázeným systémem (tab. 6.). Obsah dusíku poklesl z 6,4 % u čerstvého kalu na 3,7 % v kalovém koláči u rákosu obecného, u orobince úzkolistého na 3,0 %, u skřípince jezerního na 2,8 % a u kontrolní na nejmenší hodnotu 2,1 %. Obsah fosforu se snížil jen málo, z 2,4 % u čerstvého kalu na 2,3 % u rákosu obecného, 2,2 % u orobince úzkolistého, 1,9 % u skřípince jezerního a u neosázeného systému na 1,6 % (Gagnon a kol., 2013).

Systémy osázené rákosem obecným měly nejvyšší snížení objemu kalu a byly neúčinnější v odvodnění kalu na základě analýzy hmotnostní bilance (obr. 13. a, b). Snížení objemu kalu se pohybovalo mezi 80 – 89 % v závislosti na druhu rostliny, která je v rozmezí uvedeném v literatuře (81 – 98 %) pro čištění pomocí mokřadních rostlin (Cooper a kol., 2004). Nižší množství vody na povrchu v kalového koláče rákosu obecného (obr. 13. a), může být částečně vysvětleno velmi vysokou mírou evapotranspirace rákosu, 2 - 3,5 krát vyšší než u orobince a skřípince (tab. 7.). Rákos měl také zdaleka největší hustotu rostliny, které vytváří mezeru v kalu okolo stonku. Tyto tunely jsou považovány za přednost odvodnění a provzdušnění kalového koláče a následné mineralizaci (Nielsen, 2003).

Větší snížení kalového objemu rákosu také přispělo ke zvýšení mineralizace organické hmoty (Nielsen, 2003), kde část pevných látek se transformuje na jednodušší sloučeniny, jako jsou minerální látky, plyny a voda. Vyšší mineralizace v rákosovém systému je znázorněna v hmotnostní bilanci spodního množství pevných látek, těkavých pevných látek a uhlíku na povrchu, ve srovnání s ostatními druhy rostlin, a v menší míře u nesázené kontroly. Tím by mohlo být vysvětleno zvýšení mikrobiální aktivity zvýhodněné lepším provzdušňováním kalového koláče u rákosového systému (Wang a kol., 2012). Nicméně mírně větší množství z organického pohledu na povrchu mokřadu byla měřena v orobincovém a skřípincovém

systému ve srovnání s kontrolou neosázenou. To by mohlo být způsobeno přítomností rostlinných odpadků v kalu (Hofmann, 1990), fragmenty, které byly jasně viditelné u vzorků kalu, i když byly rostliny sklizeny na konci každého léta. To znamená, že přidavek organických látek, z rostlinných odpadků by zmírnily mineralizační proces orobince a skřípince, ale měly by menší dopad na rákosový systém, kde odpadky spadly na vysoce mineralizovaný kalový koláč (Gagnon a kol., 2013).



Obrázek 13. Hmotnostní bilance pro osud vody a znečišťující látky, pro léta 2008-2010 podle druhů rostlin: (a) vodní bilance, (b) celková sušina (c) celkové těkavé pevné látky, (d) celkový uhlík, (e) celkový dusík podle Kjeldahla, a (f) celkový fosfor. Procenta po 1% nejsou uváděny (Gagnon a kol., 2013)

Znečišťující látky byly zachovány především na povrchu kalového koláče a zbytek byl lapán nebo přeměněn na minerální látky, plyny a vodu. Kromě toho frakce dusíku a fosforu z různých množství, v závislosti na druhu rostliny, byl oddělený v biomase. Velmi malé procento znečišťujících látek přidaných do kalu bylo přítomno v nasycené vrstvě nebo byly vypuštěny na výstupu. Nízký obsah znečišťujících látek vypouštěných lze vysvětlit účinnou fyzikální filtrací poskytovanou systémem a tím, že systémy nebyly zcela vypuštěny, což upřednostňuje evapotranspiraci a delší dobu kontaktu mezi znečišťujícími látkami a rostlinami v rhizosféře. Tento výzkum ukazuje, že analýza hmotnostní bilance je více vhodná metoda pro srovnání účinku rostlinných druhů, protože představuje kvantitativní měření znečišťujících látek v porovnání k obsahu znečišťujících látek v kalu, kdy je potřeba přesné porovnání. Nicméně měření obsahu znečišťujících látek je stále účinná metoda pro posouzení velké variace, jako je rozdíl mezi čerstvým kalem a obsahem znečišťujících látek v kalovém koláči na povrchu systému (Gagnon a kol., 2013).

5 METODIKA MĚŘENÍ

5.1 REED-BED

Pro účely testování účinnosti reed-bed systémů v podmínkách České republiky jsme vybudovali dva poloprovozní objekty, které se liší samotným uspořádáním, realizovanou zemní jámkou, přítomností mokřadních rostlin a inovací ve formě skleníkového přístřešku. První poloprovozní objekt se nachází na kořenové čistírně odpadních vod v obci Dražovice (okres Vyškov), kde jsou dvě kalová pole osázená rákosem obecným, z toho jedno pole je zakryto skleníkovým přístřeškem a druhé ponecháno působení deště a větru. Druhý poloprovozní objekt je realizován na kořenové čistírně v obci Kotečnice (okres Příbram), kde jsou čtyři samostatná kalová pole. Na polích je vysazen rákos obecný, chrastice rákosovitá a orobinec širokolistý.

Samotné měření vychází z bilanční rovnice a postupné kalibrace neznámých hodnot, resp. číselných hodnot, které není možné v reálném provozu měřit vzhledem k uspořádání systému. Na jednotlivá kalová pole je dávkován kal pomocí fekálního vozu se savicí o průměru 110 mm. Výška jednotlivé dávky kalu je volena v rozmezí 0,30 – 0,40 m, pozorována je vlhkost a koncentrace sušiny v substrátu, jehož vzorky jsou odebrány v časovém intervalu 7 – 14 dní.

Bylo provedeno rozepsání bilanční hydrologické rovnice kalového pole s mokřadní vegetací, kde rovnice zahrnuje všechny nezanedbatelné parametry ovlivňující celkovou bilanci systému.

$$W = \frac{\left(\frac{w_1}{100} \cdot H\right) + \left(\frac{100 - S_k}{100}\right) \cdot H_k - \frac{V_d}{A_{kp}} + \frac{H_d}{1000} - \frac{E_p}{1000}}{(H + H_k)}$$

Kde	W	-	vlhkost odvodňovaného kalu (%)
	w ₁	-	vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
	H	-	hloubka substrátu před aplikací kalu (m)
	A _{KP}	-	půdorysná plocha kalového pole (m ²)
	S _k	-	koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)
	H _k	-	výška nového aplikovaného kalu (m)
	V _d	-	odtok z drenáže (m ³)

H_d - dešťový úhrn za sledované období (mm)

E_p - teoretický výpar za sledované období (mm)

Výsledek této rovnice, kterým je finální vlhkost substrátu, se snažíme přiblížit reálné naměřené hodnotě v kalovém poli. Po kalibraci tohoto modelu je zjištěna skutečná evapotranspirace v jednotlivých kalových polích. Měření probíhalo průběžně od jara do podzimu.

5.1.1 Kalové pole – Poloprovozní zařízení ČOV Dražovice

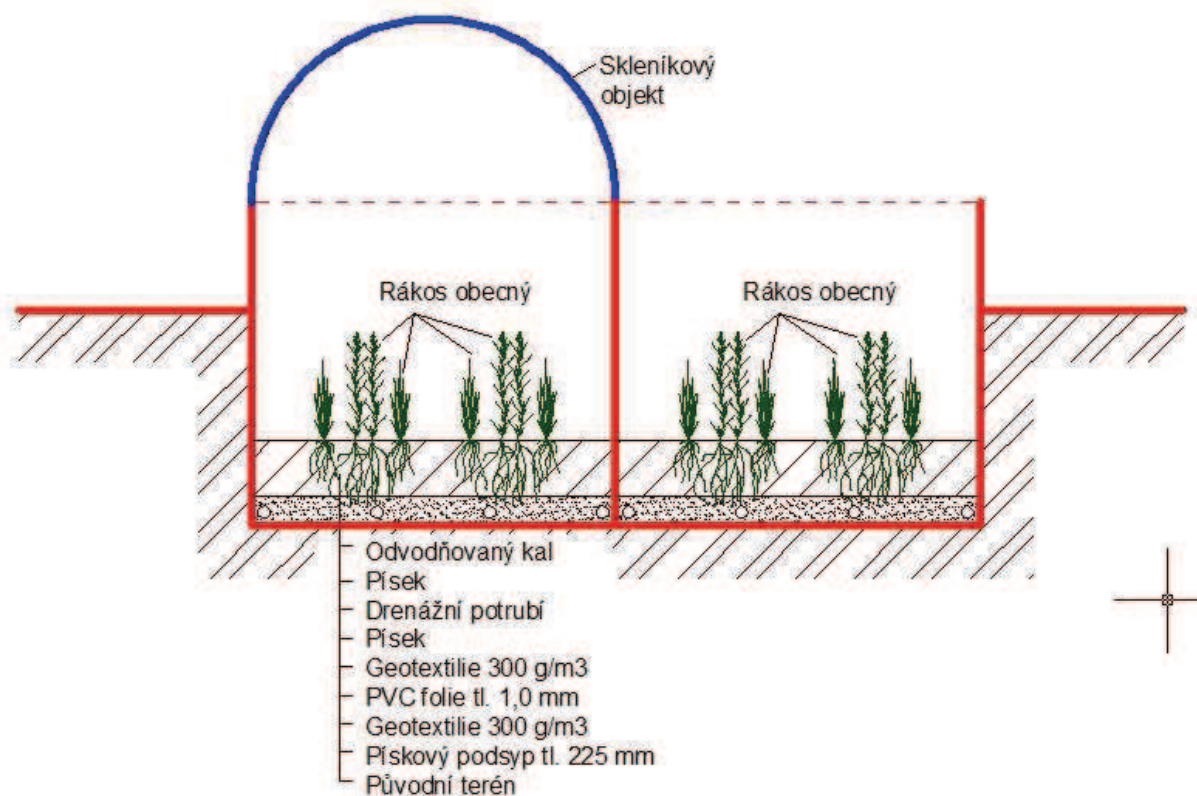
Čistírna je napojena na obec Dražovice, která má 780 ekvivalentních obyvatel (EO). Kaly, které se při běžném technologickém zapojení na kořenové čistírně vyskytují, jsou akumulovány v každém objektu. Odpady vznikají z mechanického předčištění odpadních vod. Odpady jsou tedy tvořeny usazeninami z odlehčovací komory a dešťové zdrže, hrubými shrabky z česlí, pískem (směs písku a organických látek) z horizontálního lapáku písku, tuky a oleje z lapáku tuku a olejů (resp. shrabky z usazovací nádrže). Množství shrabků z česlí v čerstvém stavu činí 4 až 6 kg na 1 obyvatele na rok, množství písku z lapáku je 5,5 až 7,3 litrů na 1 obyvatele za rok a množství tuků 3 až 8 kg na 1 obyvatele za rok (Šálek, 2012).

Na čistírně jsou vybudována dvě experimentální kalová pole o půdorysné ploše jednoho pole 9,5 m². Pole jsou postavena jako betonové nádrže, které jsou ve spodní části opatřeny drenážním systémem, který nebyl v době výzkumu zapojen. Drenážní potrubí je zasypáno pískem. Obě kalová pole jsou osazena rákosem obecným, z toho jedno kalové pole je zakryto skleníkovým přístřeškem a druhé nezakryto.

Do kalového pole vstupuje směs, kde je 5 % kalu a 95 % vody. Z kalového pole poté vystupuje odvodněná směs s 35 % kalu a 65 % vody.



Obrázek 14. Kalová pole v Dražovicích - vlevo se skleníkovým přístřeškem a vpravo bez přístřešku



Obrázek 15. Schéma kalových polí v Dražovicích

5.1.2 Kalové pole – Poloproduční zařízení ČOV Kotenčice

Čistírna odpadních vod slouží k čištění splaškových vod z obce Kotenčice a současně k výzkumné činnosti, která má za cíl zjistit možnosti přírodních způsobů čištění. Čistírna je složena z horizontálního lapáku písku (HLP), šterbinové nádrže (ŠN), akumulační a čerpací jímky s odlehčovacím objektem, hydroponického skleníku, 9x horizontálně podpovrchově protékaných kořenových filtrů, 4x vertikálně podpovrchově protékaných kořenových filtrů,

4x kalová pole. Vertikálně a horizontálně protékané filtry jsou osázeny Rákosem obecným, Chrasticí rákosovitou a další zkušební mokřadní vegetací. Výzkumná kalová pole o ploše 20 m² jsou odvodněná do šterbinové nádrže. Čistírna odpadních vod je dimenzována na čištění splaškových odpadních vod pro 250 EO. Odpadní vody jsou na ČOV přiváděny stávající oddílnou splaškovou kanalizací. Hlavním způsobem likvidace nerozpustných látek je filtrace. Látky rozpustné a nerozpustné jsou rozkládány působením mikroorganismů jak aerobním tak anaerobním způsobem. Aerobní podmínky ve filtru vznikají působením kořenových procesů rostlin a impulsním plněním vertikálních kořenových filtrů. Organický dusík se mineralizuje na amonný, ten bakterie oxidují na dusičnanový a ten se denitrifikuje v anaerobním prostředí na plynný dusík. Fosfor se odstraňuje srážením a přeměnou na nerozpustné fosforečnany a částečným zabudováním do tkání rostlin a absorpcí ve struskovém filtru, který je součástí některých horizontálních kořenových filtrů. Množství vody na přítoku do čistírny je rovno $Q_{hmax} = 3$ l/s viz tab. 8.

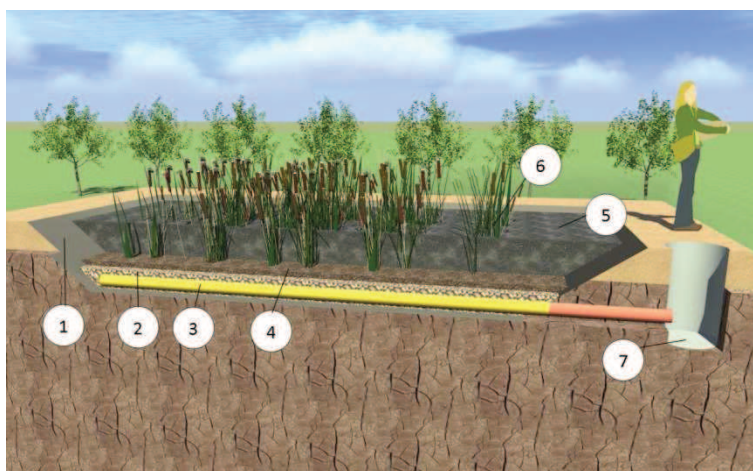
Tabulka 8. Přítoky odpadních vod na ČOV

Průtok odpadních vod na ČOV			
Průtok	m ³ /den	m ³ /hod	l/s
Q ₂₄	41,25	1,72	0,48
Q _d (1,5)	60,00	2,50	0,69
Q _h (3,5)	-	10,80	3,00
Q _h déšť	-	-	0

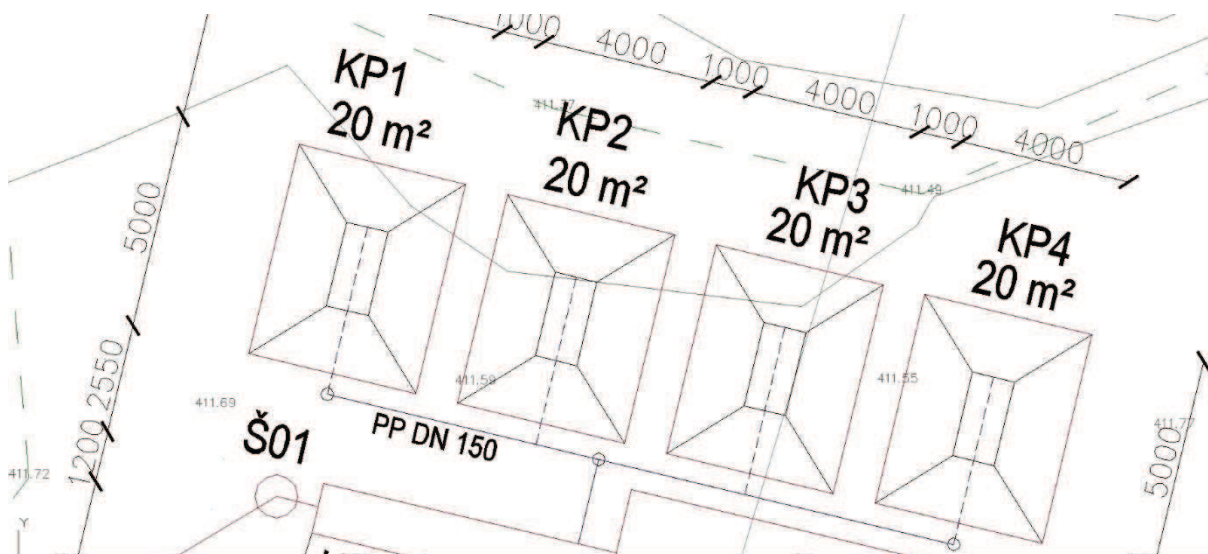
Jak již bylo zmíněno, na čistírně se nacházejí čtyři kalová pole. Kalová pole slouží k ukládání primárního stabilizovaného kalu ze šterbinové nádrže. Objekt je navržen jako hydroizolační vana, která je opatřena drenážním potrubím DN 160, které je uloženo do pískového podsypu a zásypu. Průsaková odpadní voda z kalových polí je odváděna zpět do šterbinové nádrže. Na pískový zásyp jsou položeny silniční panely, které tvoří dno kalových polí, které bude odolné proti manipulaci těžké techniky (rypadla). Zastavěná plocha kalových polí je 4 x 20 m², hloubka 1,5 m a objem 15,0 m³. Jednotlivá pole se liší v druhu použité mokřadní rostliny. Jedno pole je bez mokřadní vegetace, druhé osázené rákosem obecným, další chrasticí rákosovitou a poslední orobincem širokolistým.



Obrázek 16. Kalová pole na ČOV v Kotenčicích



Obrázek 17. Schéma uspořádání kalového pole s drenážním systémem: 1 - hydroizolace, 2 - drenážní vrstva, 3 - odvodňovací potrubí, 4 - mělký substrát pro výsadbu rostlin, 5 - odvodňovaný kal, 6 - mokřadní rostliny, 7 - revizní šachtice



Obrázek 18. Půdorys a uspořádání kalových polí v Kotenčicích (autor: Ing. Kršňák)

5.2 ZPRACOVÁNÍ SOFTWARE REED-BED

V současné době probíhá zpracování dvou softwarů, které budou ve finální verzi sloužit pro účely návrhu Reed-bed systému. Jeden program bude umožňovat při zadaných parametrech odhad vlhkosti odvodňovaného substrátu s ohledem na mokřadní rostliny (nesmí dojít ke kritickému odvodnění např. ve skleníkovém přístřešku). Dále bude schopen vypočítat délku období, kdy se bude kal v kalovém poli odvodňovat a určí, za kolik dní bude potřeba provést další zatížení reed-bed systému kalem. Druhý program bude zaměřen pro potenciální investory, kteří budou mít zájem o realizaci reed-bed systému. Tento software bude schopen spočítat potřebnou plochu kalového pole a četnost jeho dávkování za rok. Dále pak schopen stanovit celkové investiční prostředky vložené do realizace kalového pole a časový horizont jejich návratnosti. Výpočet je kalibrován a testován doplněnou bilanční rovnicí na reálných provozních výsledcích. Podoba software je zobrazena v kapitole 6.2 Software REED-BED

Výsledné software (SW) budou obsahovat dvě základní karty:

1. R-B-O: (Reed Bed Operating) - výpočet vlhkosti a výpočet odvodňovacího období kalu
2. R-B-P: (Reed Bed Projecting) - výpočet velikosti potřebné půdorysné plochy podle EO a určení nákladů na realizaci a návratnost investice

5.2.1 Výpočet vlhkosti

Výpočet je nastaven pro čtyři možné varianty uspořádání kalového pole, mezi které patří:

- a) kalové pole zastřešené skleníkovým objektem s odvodňovací drenáží
- b) kalové pole zastřešené skleníkovým objektem bez drenážního odvodnění
- c) kalové pole nezastřešené s drenáží
- d) kalové pole nezastřešené bez drenážního systému

Po výběru uspořádání kalového pole již stačí zadat vstupní parametry, získané vlastním měřením (odtok drenáží, teplota vzduchu, výška aplikovaného kalu, koncentrace sušiny apod.) nebo odhadem podle databáze předem nadefinovaných vstupních hodnot (průměrná teplota za dlouhodobé období pro danou oblast v rámci ČR, průměrný dlouhodobý úhrn srážek pro danou oblast ČR, atd.). Databáze předem nadefinovaných hodnot je propojena s daty z Českého hydrometeorologického ústavu. Po zadání všech vstupních veličin je možné spuštění výpočtu s výstupem „Vlhkost substrátu (%) po XX dnech od aplikace kalu“, přičemž XX je požadovaná a zadaná délka období.

Výpočet vlhkosti v software pracuje pomocí již zmíněné rovnice:

$$W = \frac{\left(\frac{w_1}{100} \cdot H\right) + \left(\frac{100 - S_k}{100}\right) \cdot H_k - \frac{V_d}{A_{kp}} + \frac{H_d}{1000} - \frac{E_p}{1000}}{(H + H_k)}$$

- Kde W - vlhkost odvodňovaného kalu (%)
- w_1 - vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
- H - hloubka substrátu před aplikací kalu (m)
- A_{kp} - půdorysná plocha kalového pole (m²)
- S_k - koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)
- H_k - výška nového aplikovaného kalu (m)
- V_d - odtok z drenáže (m³)
- H_d - dešťový úhrn za sledované období (mm)
- E_p - teoretický výpar za sledované období (mm)

Výpočet teoretického výparu za sledované období je počítáno z následující rovnice, podle Linecreaova (Novák, 1995):

$$E_p = \frac{\left(500 \cdot \frac{t + 0,006 \cdot h}{100 - \varphi}\right) + 15 \cdot (t - t_D)}{t - 80} \cdot T$$

- Kde
- T - délka sledovaného období (dny)
 - t - průměrná teplota ve sledovaném období (°C)
 - φ - zeměpisná šířka daného území (°)
 - t_D - průměrná teplota rosného bodu (°C)
 - h - nadmořská výška (m)

Konkrétní úpravy rovnic v závislosti na čtyřech možnostech variant uspořádání kalového pole jsou rozepsány v kapitole 6.2 Software REED-BED.

5.2.2 Výpočet délky odvodňovacího období kalu

Z důvodu časté nejasnosti délky období, při kterém dochází k odvodňování stabilizovaného kalu v kalovém poli, je software vybaven kartou výpočtu přesné délky odvodňovacího období. Do software je nutno zadat měřené hodnoty na kalovém poli, jako je např. vlhkost substrátu a jeho hloubka před samotnou aplikací kalu, dále pak půdorysná plocha kalového pole, koncentrace sušiny aplikovaného kalu, výška nadávkovaného kalu, odtok z drenáže, pokud je kalové pole vybaveno drenážním systémem a další parametry. Jiné hodnoty, jako je průměrná teplota nebo dešťový úhrn lze získat přímo z databáze programu. Tyto hodnoty jsou závislé na vyplnění kraje oblasti a měsíce, ve kterém probíhá měření. Databáze programu je propojená s daty naměřenými Českým hydrometeorologickým ústavem. Konkrétní použité rovnice a podoba software jsou zobrazeny v kapitole 6.2.1

5.2.3 Výpočet plochy

Pro projekci REED-BED systémů a usnadnění práce projektantům, je připravena karta „Výpočet plochy kalového pole“. Samotné určení velikosti plochy vychází z počtu

ekvivalentních obyvatel (EO), produkce kalu, specifickým zatížením, požadované a doporučené četnosti dávkování kalu během roku. Součástí výstupu tohoto výpočtu je i výška jedné dávky kalu. Konkrétní použité rovnice a podoba software jsou zobrazeny v kapitole 6.2.2.

5.2.4 Investiční náklady a návratnost investice

Výpočet celkových investičních nákladů potřebných pro realizaci kalového pole je založen na předchozím stanovení potřebné velikosti kalového pole (předchozí karta v software). Dále stačí zvolit další parametry, jako je druh rostliny, kterou plánujeme vysadit, druh použité geotextilie jejich ceny, software určí potřebné zemní práce přibližné celkové náklady na realizaci. Zároveň při zadání ceny za odvoz kalu na nejbližší čistírnu s kalovým hospodářstvím nebo dostupnou zemědělskou plochou, na níž je možné kal vyvážet, software vyčíslí návratnost investičních prostředků. Konkrétní použité výpočtové vztahy jsou zobrazeny v kapitole 6.2.2.

5.3 NUMERICKÝ MODEL KALOVÉHO POLE – HYDRUS 2D

Pomocí programu Hydrus bylo provedeno modelování průběhu vlhkosti v kalovém poli během sledovaného období. Pro výpočet v programu Hydrus bylo použito první období (tj. 26. 6. – 24. 7.) měření koncentrace sušiny a vlhkosti u kalového pole bez přístřešku na čistírně odpadních vod v obci Dražovice. Sledované období bylo tedy stanoveno na 28 dní. Do výpočtu jsou započítány naměřené dešťové srážky, evapotranspirace a počítá se s osazením pole rákosem obecným. Dále se uvažuje se dvěma materiály v kalovém poli (pískem a kalem), s drenážním systémem se nepočítá, v době tohoto měření nebyl na čistírně zapojen. Pozorován byl povrch kalového pole, kde byl také v programu vložen pozorovací bod, aby bylo možno srovnat výsledky z programu s výsledky naměřenými přímo na čistírně. Výstup z programu je znázorněn v kapitole 6.3.

5.4 ZPRACOVÁNÍ BIOMASY MOKŘADNÍCH ROSTLIN

Na kořenové čistírně odpadních vod v Dražovicích, byl dále proveden výzkum ve zpracování biomasy mokřadních rostlin. Kalová pole v Dražovicích jsou osázena rákosem obecným. Na konci vegetačního období, kdy rostliny již odumřou, se naskytne otázka jak s nimi naložit. Někteří odborníci tvrdí, že je vhodné odumřelé rostliny na kalovém poli zanechat, jiní tvrdí, že výhodnější je rostliny odstranit. Výzkum byl zaměřen na odstranění odumřelých nadzemních částí rákosu obecného a z nich zpracování pelet. Zpracování pelet bylo provedeno

s pomocí firmy Kovo Novák, která tyto peletovací linky vyrábí a provádí také velkovýrobu pelet, převážně ze slámy. Peletování rákosu obecného u nás není moc rozšířené. Ve zpracování rákosu převažují tzv. hranolové lisované balíky, kde při spalování získáme spalné teplo celých rostlin kolem 17 kJ.g^{-1} (Moudrý, Stražil, 1998). Náklady na jednotku energetického produktu (lisované balíky) podle uvedených autorů činí $2\,276 \text{ Kč.t}^{-1}$, z čehož plyne, že cena energie v palivu je 127 Kč.GJ^{-1} .

5.4.1 Postup zpracování

Na kalovém poli byl dne 25. 3. 2014 vysekán obdelník $6,0 \times 7,0$ metrů rákosu, tzn. 42 m^2 . Rákos byl sekán pomocí křovinořezu. Plocha byla posekána za 15 minut, spotřeba benzínu byla cca $0,13$ litrů. Celkem tedy bylo nařezáno a sklizeno 35 kg rákosu. Obsah sušiny v rákosu byl stanoven vlastním měřením bezprostředně po pokosení sušením při 105°C na $97,7 \%$.

Pokosený rákos byl poté odvezen do firmy Kovo Novák, která sídlí v obci Cítovice u Znojma. Ve stejné lokalitě bylo taktéž provedeno zpracování rákosu na pelety. V první fázi zpracování bylo zajištěno řezání a drcení rákosu na drobné částičky, pomocí řezacího šrotovníku RS 650. Dávkování rákosu probíhalo ručně pomocí vidlí. Důmyslným provedením rotoru řezacího šrotovníku byla sláma řezacími noži najemno pořezána a speciálními kladivy přes síta pošrotována. Tato fáze řezání a drcení zabrala 10 minut. V další fázi byl rákosový šrot převezen k peletovací lince, kde již došlo k samotné výrobě pelet. K výrobě pelet byla použita linka na výrobu pelet MGL 200. Linka se skládá ze zásobníku s vynášecím a dávkovacím šnekem, vlhčícího promíchávače s čerpadlem, peletovacího lisu, třídičky s chladičem peletek, odsávání a elektrorozvaděče. Linka je vybavena moderním elektronickým regulátorem, který zamezuje přetížení peletizátoru. Jedinečnou konstrukcí dávkovacího šneku s uzavřenou násypkou je stálou cirkulací zajištěno přesné dávkování materiálu do granulátoru. Vlastní konstrukce míchacího zařízení zajišťuje dokonalé promíchávání peletované hmoty s vodou a párou. Součástí linky je i třídička pelet, kde dochází k průchodu vzduchu, čímž dochází k chlazení pelet. Fáze peletování rákosu trvala 20 minut.

Z celkového nařezaného množství 35 kg rákosu bylo vyrobeno 20 kg pelet. Část (cca 19 kg) byla spálena v kamnech na pelety ve firmě Kovo Novák, kde místní odborník na pelety zhodnotil, že výhřevnost pelet z rákosu je srovnatelná s výhřevností slámových pelet. Část pelet

cca 1 kg bylo odneseno na Strojírenský zkušební ústav, s.p. v Brně, kde byly zjištěny konkrétní hodnoty výhřevnosti a jiné vlastnosti.

6 VÝSLEDKY A DISKUZE VÝSLEDKŮ

6.1 REED-BED

6.1.1 Dražovice

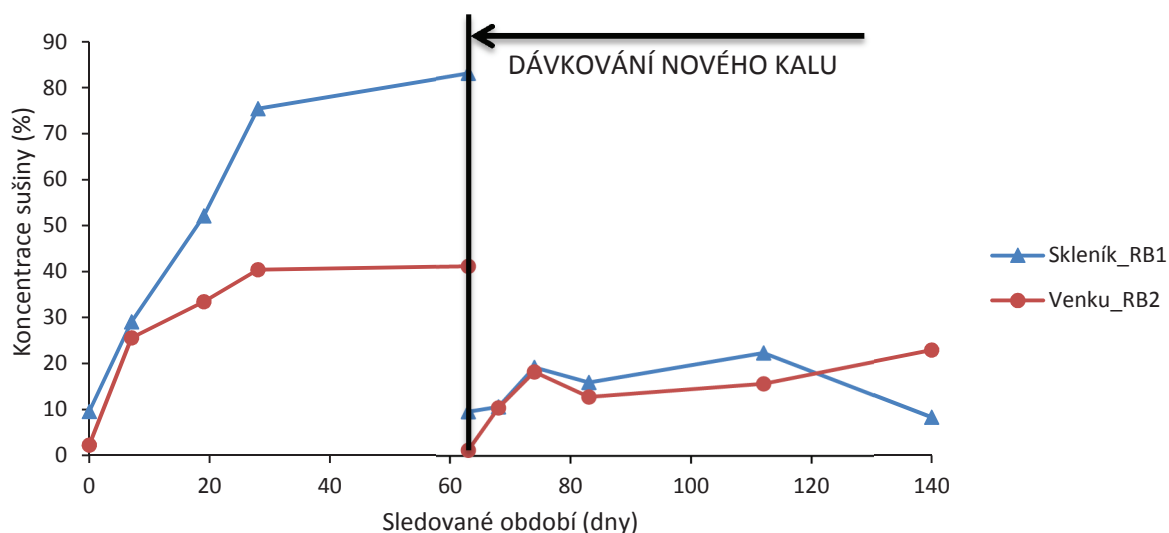
A) Naměřené hodnoty procent koncentrace sušiny a vlhkosti

Tabulka 9. Měřené hodnoty na RB1_Skleník

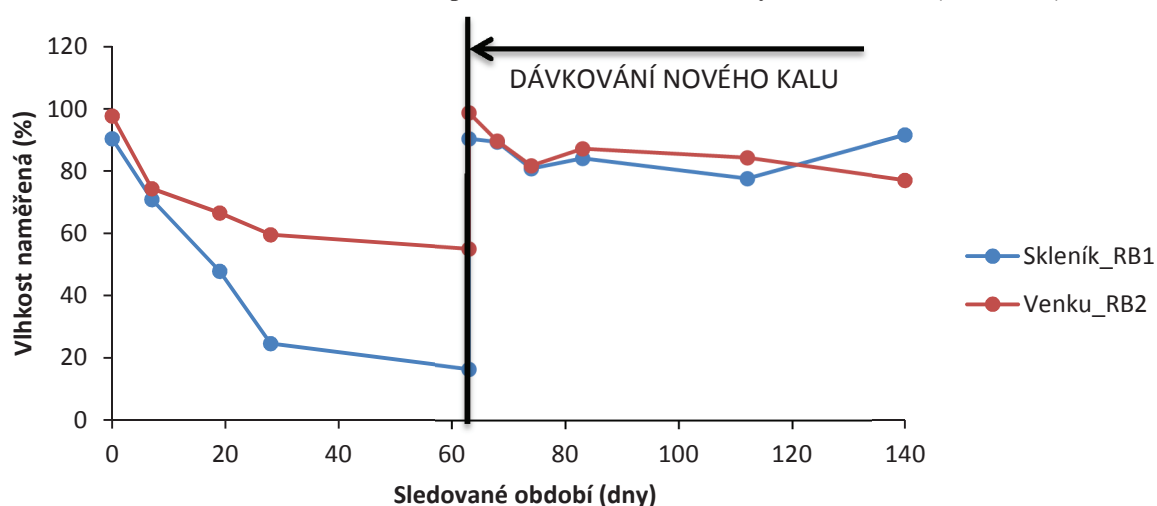
Datum	Popis vzorku	Dny	Hmotnost misky (g)	Miska + kal (g)	Miska + sušina(g)	Koncentrace sušiny (%)	Vlhkost (%)
26.6.2014	kal po načerpání	0	90,06	168,47	97,57	9,6	90,4
3.7.2014	kal po 7 dnech	7	124,36	246,49	159,87	29,1	70,9
15.7.2014	kal po 19 dnech	19	183,03	363,97	277,31	52,1	47,9
24.7.2014	kal po 28 dnech	28	144,88	268,25	237,93	75,4	24,6
28.8.2014	čerpaný kal	63	144,87	336,83	163,39	9,6	90,4
2.9.2014	kal po 5 dnech	68	145,08	340,62	165,93	10,7	89,3
8.9.2014	kal po 11 dnech	74	152,59	522,83	223,83	19,2	80,8
17.9.2014	kal po 19 dnech	83	152,56	357,15	185,22	16,0	84,0
16.10.2014	kal po 48 dnech	112	153,22	330,94	193,02	22,4	77,6
13.11.2014	kal po 77 dnech	140	480,8	991,06	523,04	8,3	91,7

Tabulka 10. Měřené hodnoty na RB2_Venku

Datum	Popis vzorku	Dny	Hmotnost misky (g)	Miska + kal (g)	Miska + sušina (g)	Koncentrace sušiny (%)	Vlhkost (%)
26.6.2014	kal po načerpání	0	85,26	180,32	87,38	2,2	97,8
3.7.2014	kal po 7 dnech	7	103,88	273,36	147,24	25,6	74,4
15.7.2014	kal po 19 dnech	19	209,43	389,93	269,84	33,5	66,5
24.7.2014	kal po 28 dnech	28	144,92	393,04	245,20	40,4	59,6
28.8.2014	čerpaný kal	63	144,94	352,71	147,65	1,3	98,7
2.9.2014	kal po 5 dnech	68	109,64	256,77	124,99	10,4	89,6
8.9.2014	kal po 11 dnech	74	168,79	623,25	251,95	18,3	81,7
17.9.2014	kal po 19 dnech	83	168,80	513,52	213,07	12,8	87,2
16.10.2014	kal po 48 dnech	112	184,60	488,57	232,37	15,7	84,3
13.11.2014	kal po 77 dnech	140	486,69	1042,70	614,26	22,9	77,1



Obrázek 19. Grafické srovnání průběhu koncentrace sušiny v RB1 a RB2 (Dražovice)



Obrázek 20. Grafické srovnání vlhkosti v RB1 a RB2 (Dražovice)

Z výše znázorněných grafů lze jasně pozorovat, že na odvodnění kalu v reed-bed systému má lepší vliv kalové pole opatřené skleníkovým objektem. Maximální hodnota koncentrace sušiny během 63 dní dosáhla u kalového pole se skleníkovým objektem hodnotu 83 %, kdežto kalové pole nezastřešené pouze hodnoty 41,2 %. V následujícím období dosáhlo kalové pole se skleníkovým objektem maximální hodnoty 22,4 % a kalové pole bez objektu 22,9 %, nicméně výsledek je velice ovlivněn neohlášenou manipulací a dávkováním nového kalu za účasti správce čistírny bez předchozího upozornění. Jelikož se při neplánovaném dávkování do skleníkového objektu nezaznamenalo množství čerpaného kalu, není možné srovnávat účinnost dvou pozorovaných objektů v tomto období.

B) Výpočet vlhkosti a kalibrace evapotranspirace**Tabulka 11. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 3. 7. 2014**

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w ₁ (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	S _k (%)	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	H _k (m)	0,15	0,15
Odtok z drenáže	V _d (m ³)	0	0
Sledované období	T (dny)	7	7
Dešťový úhrn za sledované období	H _d (mm)	0	19
Odhad úhrnu evapotranspirace	E _{pr} (mm/rok)	1125	800
Odhad denní evapotranspirace	E _{pd} (mm/den)	3,1	2,2
Teoretický výpar za sledované období	E _p (mm)	21,6	15,3
Teoretická vlhkost substrátu	W _p (%)	70,9	74,4
Naměřená vlhkost substrátu	W _m (%)	70,9	74,4
Teoretická koncentrace sušiny	S _t (%)	29,1	25,6
Naměřená koncentrace sušiny	S _m (%)	29,1	25,6

Tabulka 12. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 15. 7. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w ₁ (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	S _k (%)	0	0
Výška nového aplikovaného kalu	H _k (m)	0,15	0,15
Odtok z drenáže	V _d (m ³)	0	0
Sledované období	T (dny)	19	19
Dešťový úhrn za sledované období	H _d (mm)	0	21
Odhad úhrnu evapotranspirace	E _{pr} (mm/rok)	1425	810
Odhad denní evapotranspirace	E _{pd} (mm/den)	3,9	2,2
Teoretický výpar za sledované období	E _p (mm)	74,2	42,2
Teoretická vlhkost substrátu	W _p (%)	47,9	66,5
Naměřená vlhkost substrátu	W _m (%)	47,9	66,5
Teoretická koncentrace sušiny	S _t (%)	52,1	33,5
Naměřená koncentrace sušiny	S _m (%)	52,1	33,5

Tabulka 13. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 24. 7. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	0	0
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,15	0,15
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0	0
Sledované období	T (dny)	28	28
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	25
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	1575	807
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	4,3	2,2
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	120,8	61,9
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	24,6	59,6
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	24,6	59,6
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	75,4	40,4
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	75,4	40,4

Tabulka 14. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 2. 9. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	1,3
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,5	0,5
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,9	0,9
Sledované období	T (dny)	5	5
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	24
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	1380	1350
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	3,8	3,7
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	18,9	18,5
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	89,3	89,6
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	89,3	89,6
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	10,7	10,4
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	10,7	10,4

Tabulka 15. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 8. 9. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	1,3
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,5	0,5
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	2,2	2,2
Sledované období	T (dny)	11	11
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	20
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	1700	1520
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	4,7	4,2
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	51,2	45,8
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	80,8	81,7
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	80,8	81,7
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	19,2	18,3
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	19,2	18,3

Tabulka 16. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 17. 9. 2014

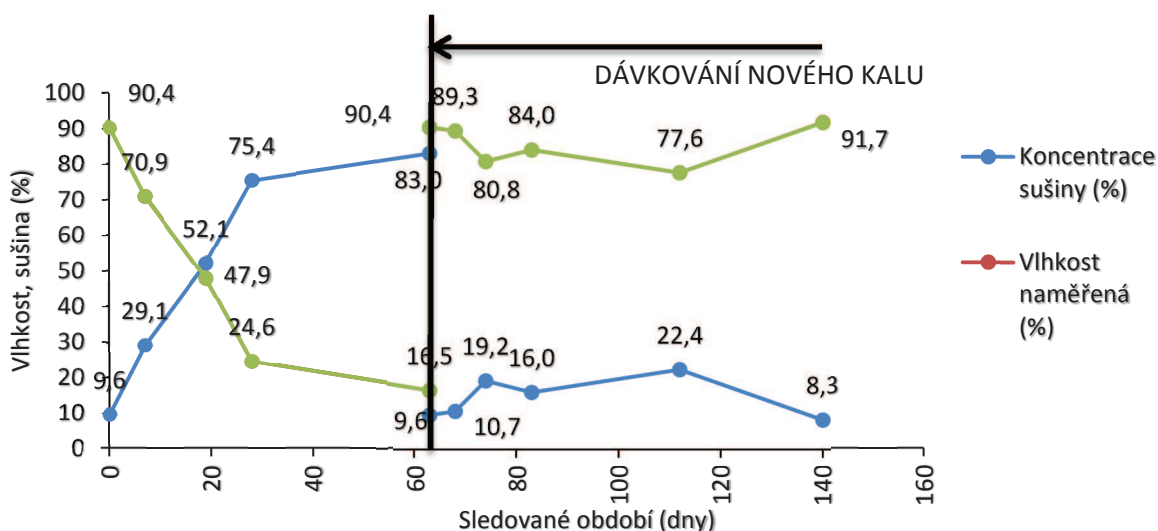
Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	0	0
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,5	0,5
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0	0
Sledované období	T (dny)	19	19
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	20
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	1110	740
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	3,0	2,0
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	57,8	38,5
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	84,0	87,2
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	84,0	87,2
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	16,0	12,8
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	16,0	12,8

Tabulka 17. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 16. 10. 2014

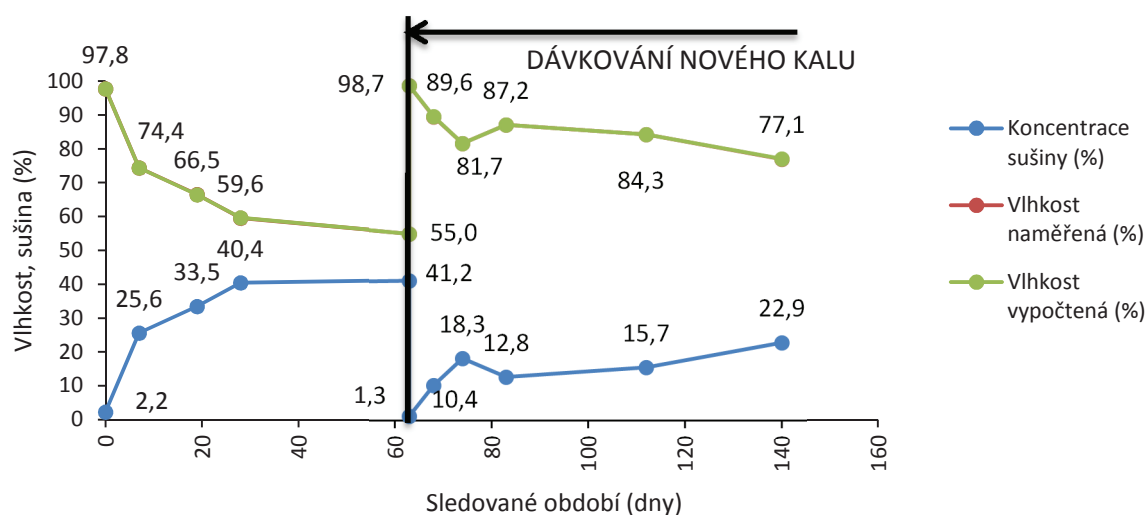
Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	0	0
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,5	0,5
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0	0
Sledované období	T (dny)	48	48
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	16,4
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	710	390
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	1,9	1,1
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	93,4	51,3
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	77,6	84,3
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	77,6	84,3
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	22,4	15,7
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	22,4	15,7

Tabulka 18. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 13. 11. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole	
		skleník	venku
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,08
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	0	0
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,5	0,5
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0	0
Sledované období	T (dny)	77	77
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	16,4
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	75	442
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	0,2	1,2
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	15,8	93,2
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	91,7	77,1
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	91,7	77,1
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	8,3	22,9
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	8,3	22,9

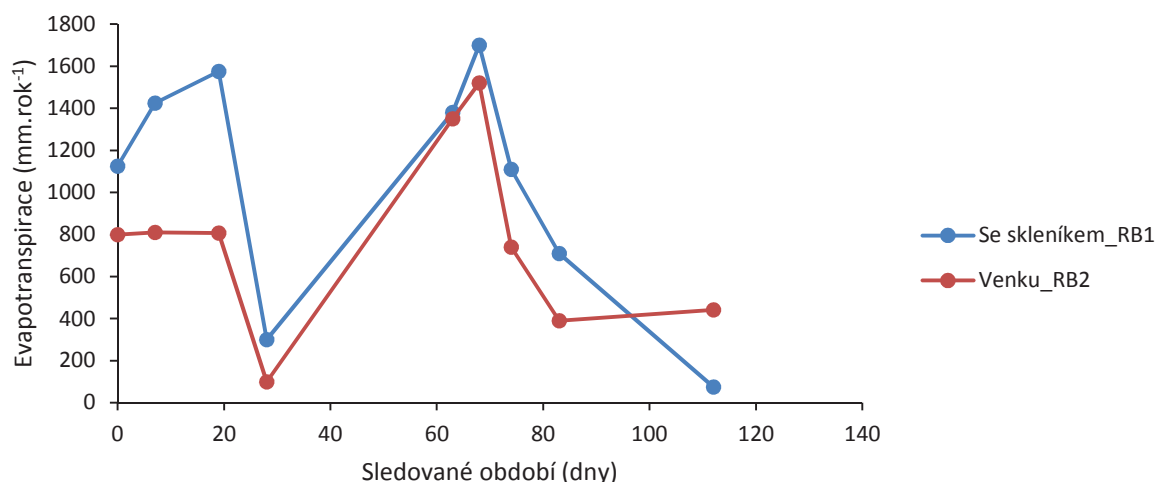


Obrázek 21. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB1 (Dražovice)



Obrázek 22. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB2 (Dražovice)

Ve výše uvedených grafech lze sledovat v každém kalovém poli průběh koncentrace sušiny a vlhkosti naměřené, ke které je doplněna hodnota vlhkosti vypočítané. Jak již bylo zmíněno, hodnoty vlhkosti vypočtené byly dorovnávány na hodnoty vlhkosti naměřené kalibrací rozepsané bilanční hydrologické rovnice kalového pole s mokřadní vegetací, kde byly měněny hodnoty evapotranspirace u jednotlivých kalových polí.



Obrázek 23. Průběh evapotranspirace u RB1 a RB2 (Dražovice)

Z grafu lze vypožorovat, že mezi kalovým polem se skleníkovým objektem a kalovým polem bez přístřešku dochází k viditelně většímu rozdílu v průběhu evapotranspirace. Ve skleníku dochází k většímu výparu, což je způsobeno vyšší teplotou ve skleníku a dále neovlivněním odvodňování kalu případnými dešťovými srážkami. Srážky ovlivňují kalové pole bez přístřešku a tím zpomalují proces odvodňování kalu a výparu.

C) Srovnání evapotranspirace s výsledky bakalářské práce

Vlastní bakalářská práce (Mrvová, 2013) mimo jiné také zaměřena na výpočet evapotranspirace u kalových polí na čistírně odpadních vod v Dražovicích. Výpočet vychází z měření v období květen 2012 až duben 2013. Evapotranspirace byla počítána podle tří autorů (Papadakis; Thorntwait; Mintz a Walker). Roční evapotranspirace získaná kalibrační hodnot bilanční hydrologické rovnice, byla provedena jako průměr hodnot v jednotlivých dnech měření.

Tabulka 19. Hodnoty vypočtené evapotranspirace na ČOV Dražovice v období květen 2012 - duben 2013 (použito z bakalářské práce)

Roční evapotranspirace na ČOV Dražovice (mm/rok)					
Se skleníkovým objektem			Bez přístřešku		
Papadakis	Thorntwait	Mintz a Walker	Papadakis	Thorntwait	Mintz a Walker
1191,68	1423,32	914,15	810,81	882,30	788,39

Tabulka 20. Průměrná hodnota evapotranspirace v období červenec - listopad 2014

Vypočtená průměrná evapotranspirace na ČOV Dražovice (mm/rok)	
Se skleníkovým objektem	Bez přístřešku
1044,45	773,22

Při srovnání hodnot vypočtených podle různých autorů a hodnot při kalibraci bilanční rovnice lze pozorovat, že se hodnoty řádově neliší. Hodnoty nemohou vyjít stejně, protože evapotranspirace je závislá na teplotě vzduchu a ta se rok od roku mění. Při srovnání hodnot můžeme říci, že kalibrace hodnot v bilanční hydrologické rovnici je další z možných správných způsobů jak zjistit hodnotu evapotranspirace na kalovém poli.

6.1.2 Kotenčice

A) Naměřené hodnoty procent koncentrace sušiny a vlhkosti

Tabulka 21. Měřené hodnoty na RB1 Bez rostlin

Datum	Popis vzorku	Dny	Hmotnost misky (g)	Miska + kal (g)	Miska + sušina (g)	Koncentrace sušiny (%)	Vlhkost (%)
2.7.2014	čerpaný kal	0	96,58	172,32	99,93	4,42	95,58
16.7.2014	kal po 14 dnech	14	144,94	419,26	167,94	8,38	91,62
7.8.2014	kal po 36 dnech	36	75,89	183,67	109,45	31,14	68,86
21.8.2014	kal po 50 dnech	50	96,53	186,23	133	40,66	59,34
21.8.2014	čerpaný kal	50	152,56	252,66	157,3	4,74	95,26
29.8.2014	po 8 dnech	58	87,95	177,73	100,98	14,51	85,49
16.10.2014	po 56 dnech	106	87,86	166,94	101,15	16,81	83,19
31.10.2014	po 71 dnech	121	87,89	235,77	116,02	19,02	80,98
14.11.2014	po 85 dnech	135	93,77	229,24	123,94	22,30	77,70

Tabulka 22. Měřené hodnoty na RB2 Chrastice rákosovitá

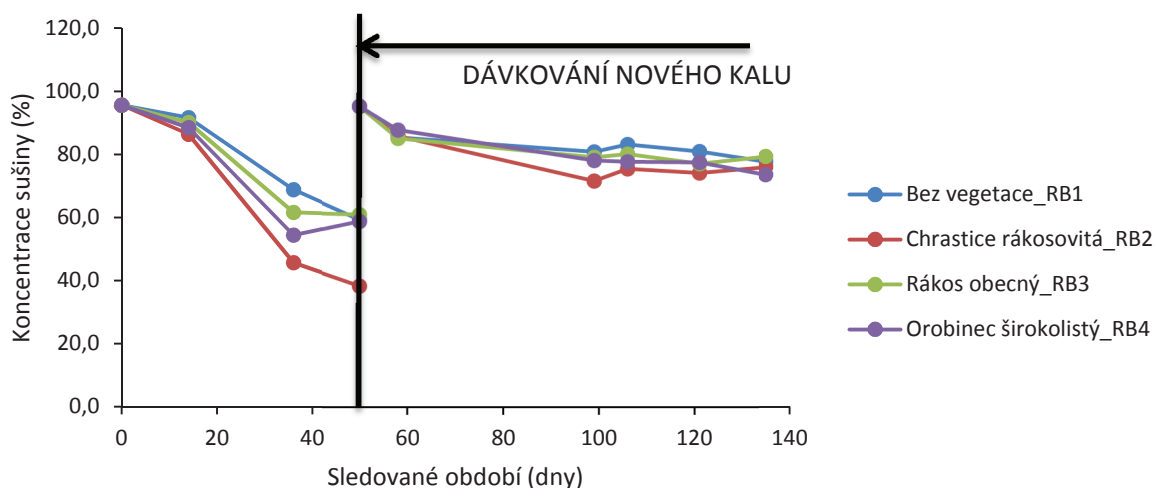
Datum	Popis vzorku	Dny	Hmotnost misky (g)	Miska + kal (g)	Miska + sušina (g)	Koncentrace sušiny (%)	Vlhkost (%)
2.7.2014	čerpaný kal	0	96,58	172,32	99,93	4,42	95,58
16.7.2014	kal po 14 dnech	14	152,55	421,68	189,34	13,67	86,33
7.8.2014	kal po 36 dnech	36	85,93	137,02	113,69	54,34	45,66
21.8.2014	kal po 50 dnech	50	85,77	165,15	134,67	61,60	38,40
21.8.2014	čerpaný kal	50	87,87	184,36	92,38	4,67	95,33
29.8.2014	po 8 dnech	58	144,94	263,16	161,65	14,13	85,87
16.10.2014	po 56 dnech	106	93,75	168,57	112,08	24,50	75,50
31.10.2014	po 71 dnech	121	93,78	190,06	118,63	25,81	74,19
14.11.2014	po 85 dnech	135	147,69	267,79	176,55	24,00	76,00

Tabulka 23. Měřené hodnoty na RB3 Rákos obecný

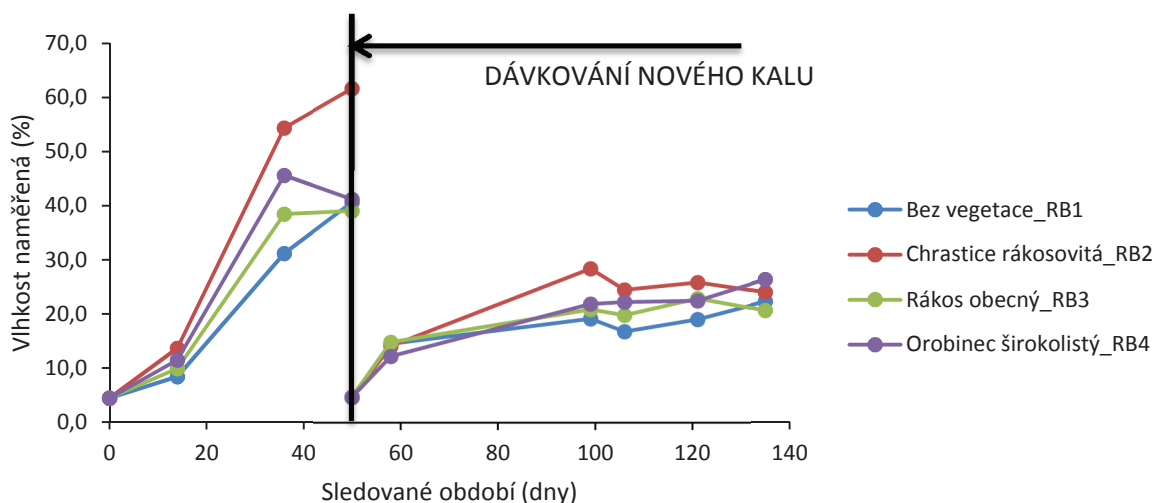
Datum	Popis vzorku	Dny	Hmotnost misky (g)	Miska + kal (g)	Miska + sušina (g)	Koncentrace sušiny (%)	Vlhkost (%)
2.7.2014	čerpaný kal	0	96,58	172,32	99,93	4,42	95,58
16.7.2014	kal po 14 dnech	14	109,59	312,33	129,64	9,89	90,11
7.8.2014	kal po 36 dnech	36	90,07	155,45	115,20	38,44	61,56
21.8.2014	kal po 50 dnech	50	94,35	180,54	127,98	39,02	60,98
21.8.2014	čerpaný kal	50	152,56	252,66	157,30	4,74	95,26
29.8.2014	po 8 dnech	58	152,54	297,74	174,04	14,81	85,19
16.10.2014	po 56 dnech	106	147,00	236,98	164,81	19,79	80,21
31.10.2014	po 71 dnech	121	146,99	279,93	177,42	22,89	77,11
14.11.2014	po 85 dnech	135	87,85	219,19	114,96	20,64	79,36

Tabulka 24. Měřené hodnoty na RB4 Orobinec širokolistý

Datum	Popis vzorku	Dny	Hmotnost misky (g)	Miska + kal (g)	Miska + sušina (g)	Koncentrace sušiny (%)	Vlhkost (%)
2.7.2014	čerpaný kal	0	96,58	172,32	99,93	4,42	95,58
16.7.2014	kal po 14 dnech	14	76,77	286,34	100,79	11,46	88,54
7.8.2014	kal po 36 dnech	36	85,26	162,96	120,70	45,61	54,39
21.8.2014	kal po 50 dnech	50	89,06	203,72	136,24	41,15	58,85
21.8.2014	čerpaný kal	50	152,56	252,66	157,30	4,74	95,26
29.8.2014	po 8 dnech	58	168,79	331,34	188,70	12,25	87,75
16.10.2014	po 56 dnech	106	147,71	234,66	167,03	22,22	77,78
31.10.2014	po 71 dnech	121	147,70	279,59	177,31	22,45	77,55
14.11.2014	po 85 dnech	135	147,00	249,35	174,01	26,39	73,61



Obrázek 24. Grafické srovnání koncentrace sušiny u RB1, RB2, RB3 a RB4 (Kotenčice)



Obrázek 25. Grafické srovnání naměřené vlhkosti u RB1, RB2, RB3 a RB4 (Kotenčice)

Z výše uvedených grafů lze pozorovat v prvním odvodňovacím období větší rozdíly koncentrace sušiny a vlhkosti než u druhého odvodňovacího období. V obou obdobích lze pozorovat, že nejlepší vliv na odvodňování kalu má chrastice rákosovitá. V prvním období je na druhém místě v odvodňování kalu orobinec širokolistý a za ním rákos obecný. V druhém období se účinek rákosu obecného a orobince širokolistého střídá. Nejhorší s odvodňováním je na tom kalové pole bez vegetace.

B) Výpočet vlhkosti a kalibrace evapotranspirace**Tabulka 25. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 16. 7. 2014**

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrstice	RB3 rákos	RB4 orobinec
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,51	5,51	5,51	5,51
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,05	0,05	0,05
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,38	0,38	0,38	0,38
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,400	0,400	0,400	0,400
Sledované období	T (dny)	14	14	14	14
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	80	80	80	80
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	710	510	80	260
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	1,9	1,4	0,2	0,7
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	27,2	19,6	3,1	10,0
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	91,6	86,3	90,1	88,5
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	91,6	86,3	90,1	88,5
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	8,4	13,7	9,9	11,5
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	8,4	13,7	9,9	11,5

Tabulka 26. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 7. 8. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrstice	RB3 rákos	RB4 orobinec
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,51	5,51	5,51	5,51
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,05	0,05	0,05	0,05
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,38	0,38	0,38	0,38
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,500	0,500	0,500	0,500
Sledované období	T (dny)	36	36	36	36
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	0	0	0
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	350	975	280	595
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	1,0	2,7	0,8	1,6
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	34,5	96,2	27,6	58,7
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	68,9	45,7	61,6	54,4
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	68,9	45,7	61,6	54,4
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	31,1	54,3	38,4	45,6
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	31,1	54,3	38,4	45,6

Tabulka 27. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 21. 8. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrastice	RB3 rákos	RB4 orobínek
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,71	5,71	5,71	5,71
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,1	0,1	0,1	0,1
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,33	0,33	0,33	0,33
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,500	0,500	0,500	0,500
Sledované období	T (dny)	50	50	50	50
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	0	0	0	0
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	350	750	40	107
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	1,0	2,1	0,1	0,3
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	47,9	102,7	5,5	14,7
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	51,2	38,4	61,0	58,9
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	59,3	38,4	61,0	58,9
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	48,8	61,6	39,0	41,1
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	40,7	61,6	39,0	41,1

Tabulka 28. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 29. 8. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrastice	RB3 rákos	RB4 orobínek
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,71	5,71	5,71	5,71
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,1	0,1	0,1	0,1
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,33	0,33	0,33	0,33
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,400	0,400	0,400	0,400
Sledované období	T (dny)	8	8	8	8
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	90	90	90	90
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	350	270	420	0
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	1,0	0,7	1,2	0,0
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	7,7	5,9	9,2	0,0
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	85,5	85,9	85,2	87,3
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	85,5	85,9	85,2	87,8
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	14,5	14,1	14,8	12,7
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	14,5	14,1	14,8	12,2

Tabulka 29. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 9. 10. 2014

Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrastice	RB3 rákos	RB4 orobínek
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,71	5,71	5,71	5,71
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,1	0,1	0,1	0,1
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,33	0,33	0,33	0,33
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,400	0,400	0,400	0,400
Sledované období	T (dny)	49	49	49	49
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	80	80	80	80
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	135	430	190	220
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	0,4	1,2	0,5	0,6
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	18,1	57,7	25,5	29,5
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	80,8	71,6	79,1	78,1
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	80,8	71,6	79,1	78,1
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	19,2	28,4	20,9	21,9
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	19,2	28,4	20,9	21,9

Tabulka 30. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 16. 10. 2014

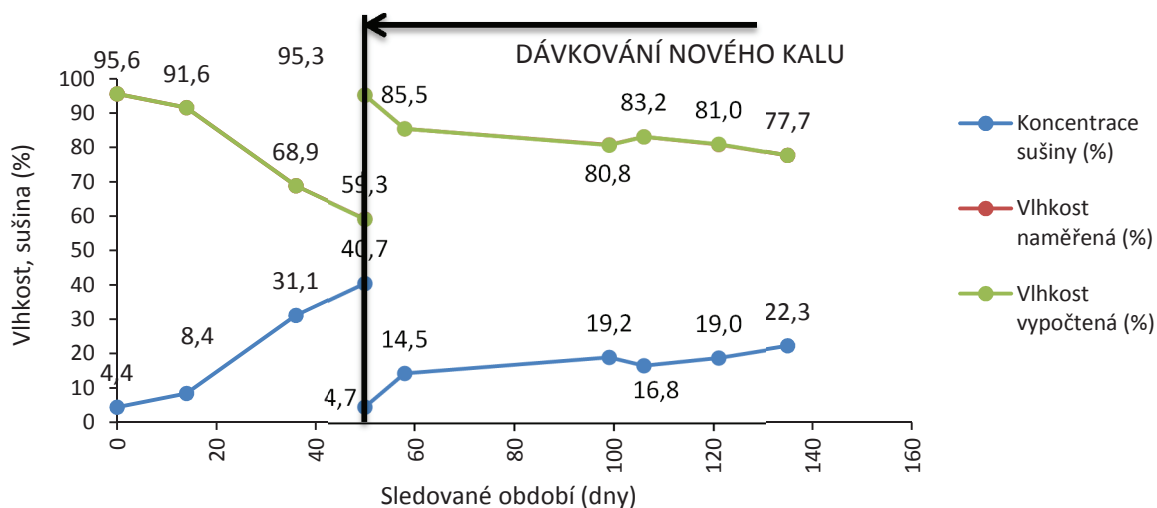
Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrastice	RB3 rákos	RB4 orobínek
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,71	5,71	5,71	5,71
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,1	0,1	0,1	0,1
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,33	0,33	0,33	0,33
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,100	0,100	0,100	0,100
Sledované období	T (dny)	56	56	56	56
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	30	30	30	30
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	67	282	150	218
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	0,2	0,8	0,4	0,6
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	10,3	43,3	23,0	33,4
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	83,2	75,5	80,2	77,8
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	83,2	75,5	80,2	77,8
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	16,8	24,5	19,8	22,2
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	16,8	24,5	19,8	22,2

Tabulka 31. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 30. 10. 2014

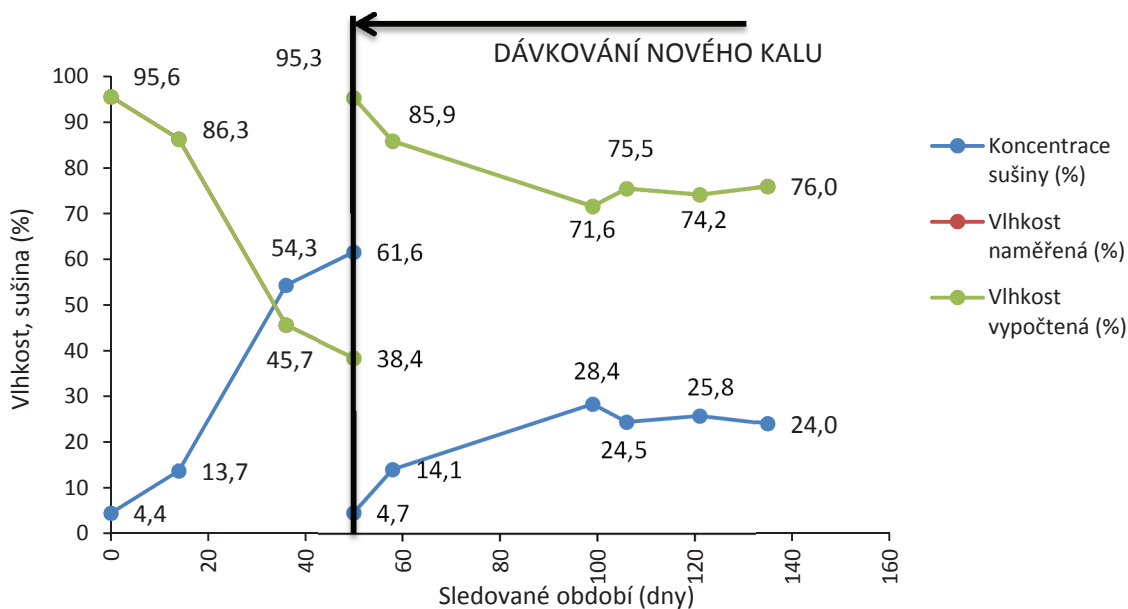
Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrastice	RB3 rákos	RB4 orobinec
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,71	5,71	5,71	5,71
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,1	0,1	0,1	0,1
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,33	0,33	0,33	0,33
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,100	0,100	0,100	0,100
Sledované období	T (dny)	71	71	71	71
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	30	30	30	30
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	100	252	188	178
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	0,3	0,7	0,5	0,5
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	19,5	49,0	36,6	34,6
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	81,0	74,2	77,1	77,5
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	81,0	74,2	77,1	77,5
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	19,0	25,8	22,9	22,5
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	19,0	25,8	22,9	22,5

Tabulka 32. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 14. 11. 2014

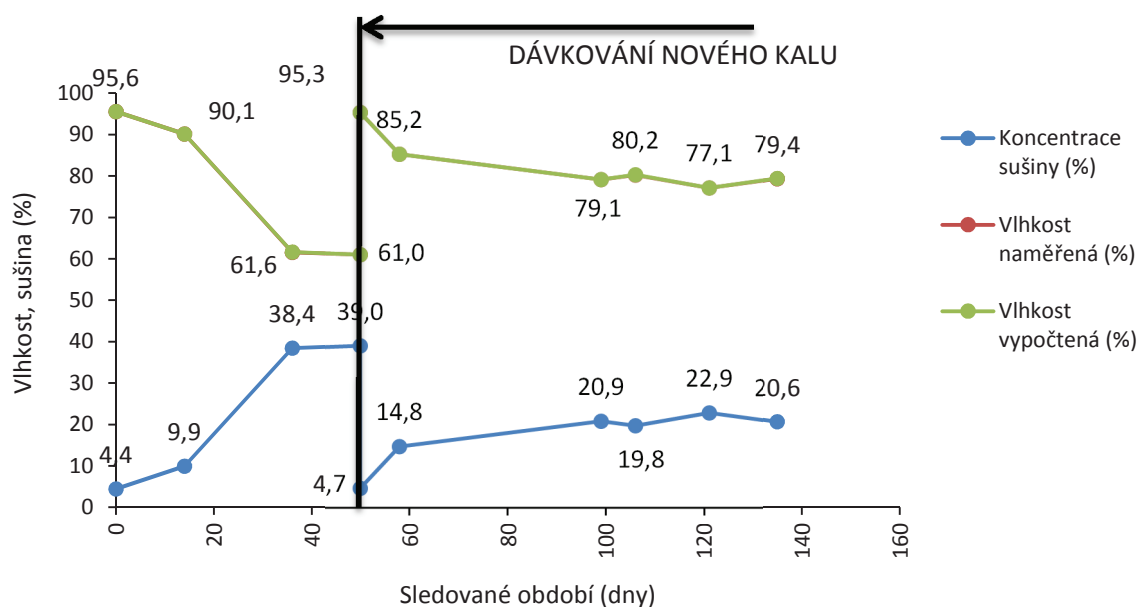
Pozorovaný parametr	Označení	Označení kalového pole			
		RB1 bez rostlin	RB2 chrastice	RB3 rákos	RB4 orobinec
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	5,71	5,71	5,71	5,71
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w1 (%)	40	40	40	40
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,1	0,1	0,1	0,1
Koncentrace sušiny nového kalu	Sk (%)	4,4	4,4	4,4	4,4
Výška nového aplikovaného kalu	Hk (m)	0,33	0,33	0,33	0,33
Odtok z drenáže	Vd (m ³)	0,100	0,100	0,100	0,100
Sledované období	T (dny)	85	85	85	85
Dešťový úhrn za sledované období	Hd (mm)	30	30	30	30
Odhad úhrnu evapotranspirace	Epr (mm/rok)	145	177	114	222
Odhad denní evapotranspirace	Epd (mm/den)	0,4	0,5	0,3	0,6
Teoretický výpar za sledované období	Ep (mm)	33,8	41,2	26,5	51,7
Teoretická vlhkost substrátu	Wp (%)	77,7	76,0	79,4	73,6
Naměřená vlhkost substrátu	Wm (%)	77,7	76,0	79,4	73,6
Teoretická koncentrace sušiny	St (%)	22,3	24,0	20,6	26,4
Naměřená koncentrace sušiny	Sm (%)	22,3	24,0	20,6	26,4



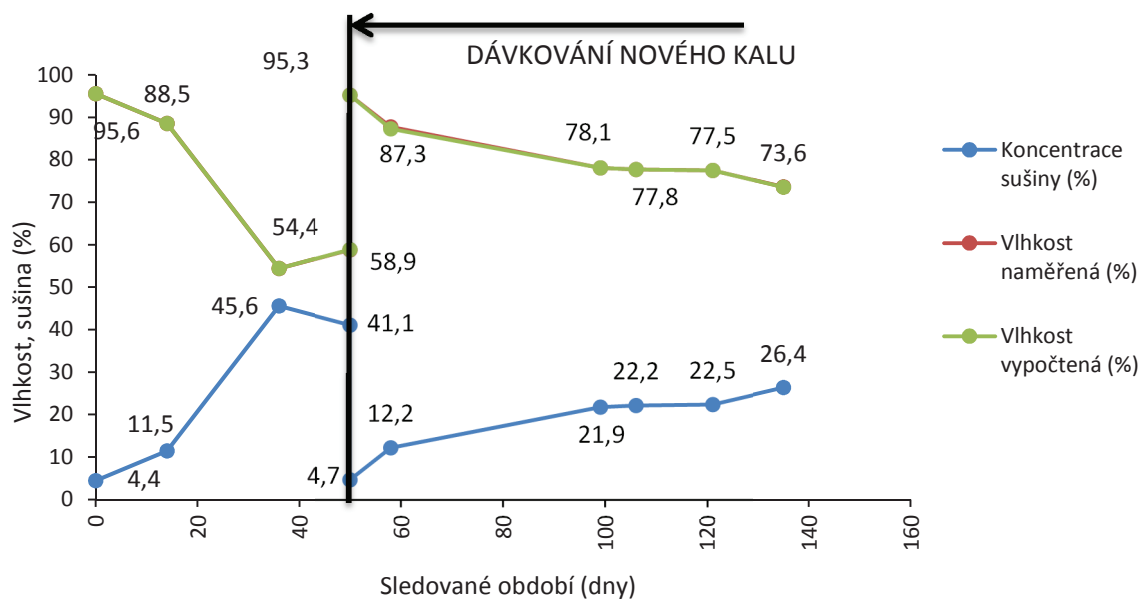
Obrázek 26. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB1 (Kotenčice)



Obrázek 27. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB2 (Kotenčice)



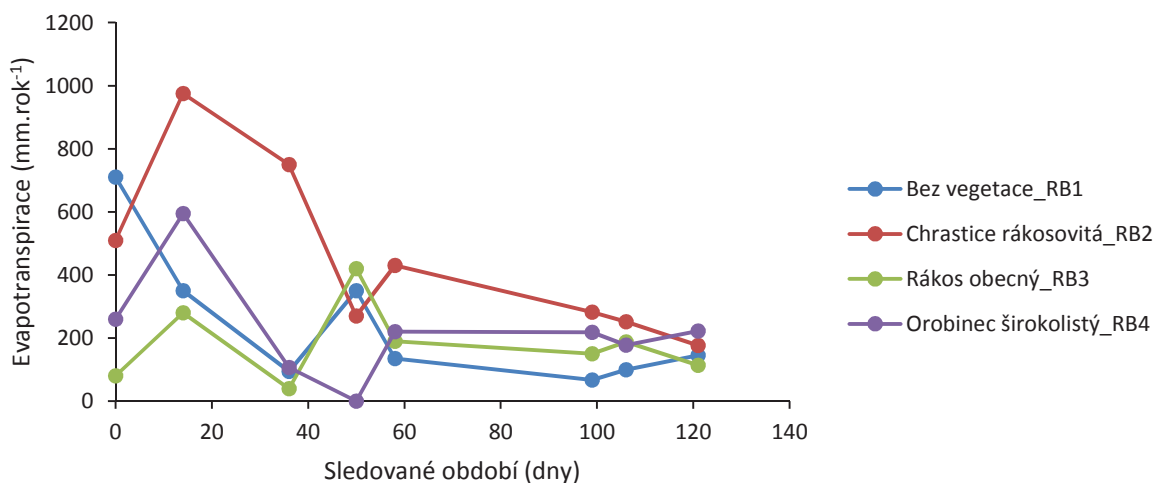
Obrázek 28. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB3 (Kotenčice)



Obrázek 29. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB4 (Kotenčice)

Ve výše uvedených grafech lze sledovat průběh koncentrace sušiny a vlhkosti naměřené, ke které je vyrovnána hodnota vlhkosti vypočítané, v každém kalovém poli v závislosti na druhu mokřadní rostliny. Jak již bylo zmíněno, hodnoty vlhkosti vypočtené byly dorovnávány na hodnoty vlhkosti naměřené kalibrací rozepsané bilanční hydrologické rovnice

kalového pole s mokřadní vegetací, kde byly měněny hodnoty evapotranspirace u jednotlivých kalového poli.



Obrázek 30. Průběh ročního úhrnu evapotranspirace vztažený pro dané období u RB1, RB2, RB3 a RB4 (Kotenčice)

Sledované období bylo rozděleno na dvě období čerpáním kalu. Druhé období (druhé čerpání) následovalo po 50 dnech od prvního období. V grafu lze sledovat, že v prvním období došlo k největšímu výparu u kalového pole osázeného chrasticí rákosovitou, následoval orobinec širokolistý, kalové pole bez vegetace a rákos obecný, ke konci prvního odvodňovacího období se hodnoty posledních tří zmíněných typů relativně srovnaly. V druhém období již nedošlo k tak výraznému rozdílu mezi hodnotami výparu. K největšímu výparu opět došlo u chrastice rákosovité, dále pak orobince širokolistého, rákosu obecného a kalového pole bez vegetace. U obou období převažovaly vyšší teploty vzduchu a u prvního období minimum dešťových srážek, kdežto u druhého období se vyskytovalo více srážkových úhrnů.

6.2 SOFTWARE REED-BED

6.2.1 Software R-B-O pro výpočet vlhkosti odvodňovaného kalu a délky odvodňovacího období kalu v kalovém poli

A) Výpočet vlhkosti kalu

Ukázky jednotlivých karet výpočtů možných s pomocí vyvíjeného software REED-BED. Výpočet vlhkosti závisí na čtyřech možnostech kalového pole, a to:

- Kalové pole opatřené skleníkovým přístřeškem a drenáží
- Kalové pole bez skleníkového přístřešku a s drenáží
- Kalové pole opatřené skleníkovým přístřeškem a bez drenáže
- Kalové pole bez skleníkového přístřešku a bez drenáže
- Kalové pole opatřené skleníkovým přístřeškem a drenáží

Obrázek 31. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli opatřeném skleníkovým objektem a drenáží

Vlhkost odvodňovaného kalu je v tomto případě počítána pomocí takto upravené bilanční rovnice:

$$W = \frac{\left(\frac{w_1}{100} \cdot H\right) + \left(\frac{100 - S_k}{100}\right) \cdot H_k - \frac{V_d}{A_{kp}} - \frac{E_p}{1000}}{(H + H_k)}$$

- Kde W - vlhkost odvodňovaného kalu (%)
 w_1 - vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
 H - hloubka substrátu před aplikací kalu (m)
 A_{KP} - půdorysná plocha kalového pole (m^2)
 S_k - koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)
 H_k - výška nového aplikovaného kalu (m)
 V_d - odtok z drenáže (m^3)
 E_p - teoretický výpar za sledované období (mm)

Jelikož je kalové pole opatřeno skleníkovým objektem, dešťový úhrn je nulový, takže je tento člen v rovnici zanedbán. Teoretický výpar je vypočten pomocí této rovnice:

$$E_p = \frac{\left(500 \cdot \frac{t + 0,006 \cdot h}{100 - \varphi}\right) + 15 \cdot (t - t_D)}{t - 80} \cdot T$$

- Kde T - délka sledovaného období (dny)
 t - průměrná teplota ve sledovaném období ($^{\circ}C$)
 φ - zeměpisná šířka daného území ($^{\circ}$)
 t_D - průměrná teplota rosného bodu ($^{\circ}C$)
 h - nadmořská výška (m)

- Kalové pole bez skleníkového přístřešku a s drenáží

The screenshot shows a software window titled "Vlhkost odvodňovaného kalu" (Humidity of drained manure). It has a sub-header "Délka odvodňovacího období" (Duration of the drainage period). The interface is divided into two main sections: "Se skleníkem" (With greenhouse) and "S drenáží" (With drainage). Under "Se skleníkem", there are two buttons: "Bez skleníku" (Without greenhouse) and "S skleníkem" (With greenhouse). Under "S drenáží", there are two buttons: "Bez drenáže" (Without drainage) and "S drenáží" (With drainage). The "S drenáží" button is currently selected. Below these are input fields for "Kraj" (Region) and "Měsíc" (Month). A list of parameters follows, each with an input field, a unit, and a description: w_1 (%), H (m), A_{kp} (m²), S_k (%), H_k (m), V_d (m³), T (dny), t (°C), φ (°), t_D (°C), h (m), E_p (0 mm), and H_d (mm). A "Výpočet" (Calculate) button is located below the list. At the bottom, there is an output field for W (%).

Obrázek 32. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli bez skleníkového objektu a s drenáží

Vlhkost odvodňovaného kalu je v tomto případě počítána pomocí takto upravené bilanční rovnice:

$$W = \frac{\left(\frac{w_1}{100} \cdot H\right) + \left(\frac{100 - S_k}{100}\right) \cdot H_k - \frac{V_d}{A_{kp}} + \frac{H_d}{1000} - \frac{E_p}{1000}}{(H + H_k)}$$

- Kde
- W - vlhkost odvodňovaného kalu (%)
 - w_1 - vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
 - H - hloubka substrátu před aplikací kalu (m)

- A_{KP} - půdorysná plocha kalového pole (m^2)
 S_k - koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)
 H_k - výška nového aplikovaného kalu (m)
 V_d - odtok z drenáže (m^3)
 E_p - teoretický výpar za sledované období (mm)
 H_d - dešťový úhrn za sledované období (mm)

Teoretický výpar je vypočten pomocí této rovnice:

$$E_p = \frac{\left(500 \cdot \frac{t + 0,006 \cdot h}{100 - \varphi}\right) + 15 \cdot (t - t_D)}{t - 80} \cdot T$$

- Kde T - délka sledovaného období (dny)
 t - průměrná teplota ve sledovaném období ($^{\circ}C$)
 φ - zeměpisná šířka daného území ($^{\circ}$)
 t_D - průměrná teplota rosného bodu ($^{\circ}C$)
 h - nadmořská výška (m)

Hodnota dešťového úhrnu (H_{dR}) vychází z naměřených hodnot Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMI). Do programu je nutno v horní části zadat kraj, kde se nachází kalové pole a dále měsíc, ve kterém provádíme měření a software automaticky zjistí potřebný dešťový úhrn pro výpočet, pomocí nahraných dat z ČHMI.

- Kalové pole opatřené skleníkovým přístřeškem a bez drenáže

The screenshot shows a software window titled "Vlhkost odvodňovaného kalu" (Moisture of dewatered sludge) with a sub-header "Délka odvodňovacího období" (Dewatering period length). It features two radio buttons: "Se skleníkem" (With cover) and "Bez skleníku" (Without cover), with "Bez skleníku" selected. Below, there are two more radio buttons: "S drenáží" (With drainage) and "Bez drenáže" (Without drainage), with "Bez drenáže" selected. A list of input parameters follows, each with a text box and a unit: w_1 (%), H (m), A_{kp} (m^2), S_k (%), H_k (m), V_d (m^3), T (dny), t ($^{\circ}C$), φ ($^{\circ}$), t_D ($^{\circ}C$), h (m), E_p (0 mm), and H_d (mm). Each parameter has a brief description in parentheses. At the bottom, there is a "Výpočet" (Calculate) button and an output field labeled "W".

Obrázek 33. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli se skleníkovým objektem a bez drenáže

Vlhkost odvodňovaného kalu je v tomto případě počítána pomocí takto upravené bilanční rovnice:

$$W = \frac{\left(\frac{w_1}{100} \cdot H\right) + \left(\frac{100 - S_k}{100}\right) \cdot H_k - \frac{E_p}{1000}}{(H + H_k)}$$

- Kde
- W - vlhkost odvodňovaného kalu (%)
 - w_1 - vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
 - H - hloubka substrátu před aplikací kalu (m)
 - S_k - koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)

H_k - výška nového aplikovaného kalu (m)

E_p - teoretický výpar za sledované období (mm)

Jelikož je kalové pole opatřeno skleníkovým objektem, dešťový úhrn je nulový, takže je tento člen z rovnice vyřazen. Dále je vyřazen člen s drenážním odtokem, protože není součástí tohoto typu kalového pole, tím pádem se zanedbá i plocha kalového pole, která je součástí výpočtového členu drenážního odtoku. Teoretický výpar je vypočten pomocí této rovnice:

$$E_p = \frac{\left(500 \cdot \frac{t + 0,006 \cdot h}{100 - \varphi}\right) + 15 \cdot (t - t_D)}{t - 80} \cdot T$$

Kde T - délka sledovaného období (dny)

t - průměrná teplota ve sledovaném období (°C)

φ - zeměpisná šířka daného území (°)

t_D - průměrná teplota rosného bodu (°C)

h - nadmořská výška (m)

- Kalové pole bez skleníkového přístřešku a bez drenáže

The screenshot shows a software interface titled "Vlhkost odvodňovaného kalu" (Humidity of compost to be drained) and "Délka odvodňovacího období" (Duration of the drainage period). It features two radio buttons for "Se skleníkem" (With greenhouse) and "Bez skleníku" (Without greenhouse), and two radio buttons for "S drenáží" (With drainage) and "Bez drenáže" (Without drainage). Below these are input fields for parameters: w_1 (%), H (m), A_{xp} (m^2), S_k (%), H_k (m), V_d (m^3), T (dny), t ($^{\circ}C$), φ ($^{\circ}$), t_D ($^{\circ}C$), h (m), E_p (0 mm), and H_d (mm). Each field has a corresponding description in parentheses. A "Výpočet" (Calculate) button is located below the input fields, and a result field for w is at the bottom.

Obrázek 34. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli bez skleníkového objektu a bez drenáže

Vlhkost odvodňovaného kalu je v tomto případě počítána pomocí takto upravené bilanční rovnice:

$$W = \frac{\left(\frac{w_1}{100} \cdot H\right) + \left(\frac{100 - S_k}{100}\right) \cdot H_k + \frac{H_d}{1000} - \frac{E_p}{1000}}{(H + H_k)}$$

- Kde
- W - vlhkost odvodňovaného kalu (%)
 - w_1 - vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
 - H - hloubka substrátu před aplikací kalu (m)
 - S_k - koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)

H_k - výška nového aplikovaného kalu (m)

E_p - teoretický výpar za sledované období (mm)

H_d - dešťový úhrn za sledované období (mm)

Protože kalové pole není opatřeno drenáží, je vyřazen člen s drenážním odtokem, tím pádem se zanedbá i plocha kalového pole, která je součástí výpočtového členu drenážního odtoku. Teoretický výpar je vypočten pomocí této rovnice:

$$E_p = \frac{\left(500 \cdot \frac{t + 0,006 \cdot h}{100 - \varphi}\right) + 15 \cdot (t - t_D)}{t - 80} \cdot T$$

Kde T - délka sledovaného období (dny)

t - průměrná teplota ve sledovaném období (°C)

φ - zeměpisná šířka daného území (°)

t_D - průměrná teplota rosného bodu (°C)

h - nadmořská výška (m)

Hodnota dešťového úhrnu (H_{dR}) vychází z naměřených hodnot Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMI). Do programu je nutno v horní části zadat kraj, ve kterém se nachází kalové pole a dále měsíc, ve kterém provádíme bilanci, přičemž software automaticky zjistí potřebný dešťový úhrn pro výpočet pomocí implementovaných dat z ČHMI.

B) Výpočet délky odvodňovacího období

Vlhkost odvodňovaného kalu		Délka odvodňovacího období	
Bez skleníku			
S drenáží			
Kraj		▼	
Měsíc		▼	
w_1	<input type="text"/>	%	(Vlhkost substrátu před aplikací kalu)
H	<input type="text"/>	m	(Hloubka substrátu před aplikací kalu)
A_{kp}	<input type="text"/>	m ²	(Půdorysná plocha kalového pole)
S_k	<input type="text"/>	%	(Koncentrace sušiny aplikovaného kalu)
H_k	<input type="text"/>	m	(Výška nového aplikovaného kalu)
V_d	<input type="text"/>	m ³	(Odtok z drenáže)
W	<input type="text"/>	%	(Požadovaná hodnota vlhkosti, <40-60%>)
t	<input type="text"/>	°C	(Průměrná teplota)
φ	<input type="text"/>	°	(Zeměpisná šířka)
t_d	<input type="text"/>	°C	(Průměrná teplota rosného bodu - lze získat z ČHMI)
h	<input type="text"/>	m	(Nadmořská výška)
E_{pR}	<input type="text"/>	mm	(Teoretický výpar v daném měsíci a kraji)
H_{dR}	<input type="text"/>	mm	(Dešťový úhrn daném měsíci a kraji)
Výpočet			
T	<input type="text"/>	dny	

Obrázek 35. Schematizace software pro výpočet období odvodňování kalu v kalovém poli.

Výpočet délky odvodňovacího období kalu, který zohledňuje minimální potřebnou vlhkost odvodňovaného substrátu s ohledem na životní podmínky přítomných mokřadních rostlin, vychází z již zmíněné bilanční rovnice, která je upravena do následujícího tvaru:

$$T = \frac{10 \cdot W \cdot (H + H_k) - 10 \cdot w_1 \cdot H - 10 \cdot (100 - S_k) \cdot H_k + \frac{1000 \cdot V_d}{A_{kp}}}{\frac{(H_{dR} - E_{pR})}{30}}$$

Kde T - délka odvodňovacího období (dny)

- W - vlhkost odvodňovaného kalu (%)
- w₁ - vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
- H - hloubka substrátu před aplikací kalu (m)
- A_{KP} - půdorysná plocha kalového pole (m²)
- S_k - koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)
- H_k - výška nového aplikovaného kalu (m)
- V_d - odtok z drenáže (m³)
- E_{pR} - teoretický výpar v daném měsíci (mm)
- H_{dR} - dešťový úhrn v daném měsíci (mm)

Výpar v daném měsíci je poté spočítán z této rovnice:

$$E_{pR} = \frac{\left(500 \cdot \frac{t + 0,006 \cdot h}{100 - \varphi}\right) + 15 \cdot (t - t_D)}{t - 80} \cdot 30$$

- Kde t - průměrná teplota ve sledovaném období (°C)
- φ - zeměpisná šířka daného území (°)
- t_D - průměrná teplota rosného bodu (°C)
- h - nadmořská výška (m)

Hodnota dešťového úhrnu (H_{dR}) vychází z naměřených hodnot Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMI). Do programu je nutno v horní části zadat kraj, kde se nachází kalové pole a dále měsíc, ve kterém provádíme měření a software automaticky zjistí potřebný dešťový úhrn pro výpočet, pomocí nahraných dat z ČHMI.

6.2.2 Software R-B-P pro výpočet půdorysné plochy kalového pole a investice do kalového pole

A) Výpočet plochy kalového pole

Půdorysná velikost REED-BED systému		Investiční náklady a návratnost investice	
Počet připojených (EO)	<input type="text"/>	obyvatel	
Produkce kalu (P _k)	<input type="text"/>	l.EO ⁻¹ .den ⁻¹	
Celkový objem kalu (V _{kc})	<input type="text"/>	m ³ kalu / rok	
Specifické zatížení (Z _{spec})	<input type="text"/>	m ² /EO (0.4-0.5-0.6)	
Výpočet			
Potřebná plocha (A)	<input type="text"/>	m ²	
Roční zátěž kalem na plochu (H _k)	<input type="text"/>	m	
Četnost dávkování kalu za rok (T _k)	<input type="text"/>	x za rok	
Výška jedné dávky kalu (H _k)	<input type="text"/>	m	
Upravená četnost dávkování (T _{ku})	<input type="text"/>	x za rok	
Výška jedné dávky kalu (H _{ku})	<input type="text"/>	m	

Obrázek 36. Schematizace software pro výpočet půdorysné plochy kalového pole

Výpočet plochy kalového pole a výšky jedné dávky kalu software vychází z těchto výpočtových vzorců:

$$V_{kc} = \frac{EO \cdot 365 \cdot P_k}{1000}$$

- Kde
- V_{kc} - celkový objem kalu (m³ kalu.rok⁻¹)
 - EO - počet ekvivalentních obyvatel (obyv)
 - P_k - produkce kalu (l.EO⁻¹.den⁻¹)

$$A = Z_{spec} \cdot EO$$

- Kde
- A - potřebná plocha kalového pole (m²)
 - Z_{kspec} - specifické zatížení (m².EO⁻¹)
 - EO - počet ekvivalentních obyvatel (obyv)

$$H_r = \frac{A}{V_{kc}}$$

- Kde
- H_r - roční zátěž kalem na plochu (m)
 - A - potřebná plocha kalového pole (m²)
 - V_{kc} - celkový objem kalu (m³ kalu.rok⁻¹)

$$H_k = \frac{H_r}{T_k}$$

- Kde
- H_k - výška jedné dávky kalu (m)
 - H_r - roční zátěž kalem na plochu (m)
 - T_k - četnost dávkování kalu během roku (-)

B) Výpočet investice do kalového pole a návratnost investice

Půdorysná velikost REED-BED systému		Investiční náklady a návratnost investice	
$A_{kp} =$	<input type="text"/> m ²	plocha kalového pole	
$H_{kp} =$	<input type="text"/> m	hloubka kalového pole (1,2 - 1,5 m)	
Investice:			
PVC fólie	<input type="text"/> Kč/m ²	např. EKOPLAST 806 (154 - 184 Kč/m ²)	
Geotextilie 300g/m ²	<input type="text"/> Kč/m ²	např. JUTA geoNETEX S 300 (24,20 Kč/m ²)	
Sazenice rostliny	<input type="text"/> Kč/kus	např. rákos obecný 20 Kč, chrastice rákosovitá 45Kč	
Počet rostlin	<input type="text"/> ks/m ²	(doporučeno 5 ks rostlin na m ² kalového pole)	
Zemní práce	<input type="text"/> Kč/m ³		
Výpočet			
Celkové náklady	<input type="text"/>	Kč	
Návratnost:			
Cena za vývoz kalu	<input type="text"/> Kč/m ³	(cca kolem 500Kč/m ³)	
Celkový objem kalu (V_{kd})	<input type="text"/> m ³ kalu / rok	(z předchozí karty)	
Výpočet			
Celkem za vývoz	<input type="text"/>	Kč/rok	
Návratnost investice	<input type="text"/>	roky	

Obrázek 37. Schematizace software pro výpočet investičních nákladů na výstavbu kalového pole a jejich návratnost

Celkové investiční náklady na kalové pole jsou pomocí software vypočítány podle následující rovnice:

$$CN = PVC \cdot A_{kp} + G \cdot A_{kp} + PR \cdot A_{kp} \cdot SR + ZP \cdot A_{kp} \cdot H_{kp}$$

- Kde
- CN - celkové náklady (Kč)
 - PVC - PVC fólie (Kč/m²)
 - A_{kp} - plocha kalového pole (m²)
 - G - geotextilie 300g/m² (Kč/m²)
 - PR - počet rostlin (ks/m²)
 - SR - sazenice rostliny (Kč/ks)

ZP - zemní práce (Kč/m³)

H_{kp} - hloubka kalového pole (m)

$$CV = EXP \cdot V_{kc}$$

Kde CV - celkové náklady na vývoz kalu (Kč/rok)

EXP - cena za vývoz kalu na jinou ČOV (Kč/m³)

V_{kc} - celkový objem kalu (m³ kalu/rok)

$$NI = \frac{CN}{CV}$$

Kde NI - návratnost investice (roky)

CN - celkové náklady vložené do investice (Kč)

CV - celkové náklady na vývoz kalu (Kč/rok)

6.3 NUMERICKÝ MODEL KALOVÉHO POLE – HYDRUS 2D

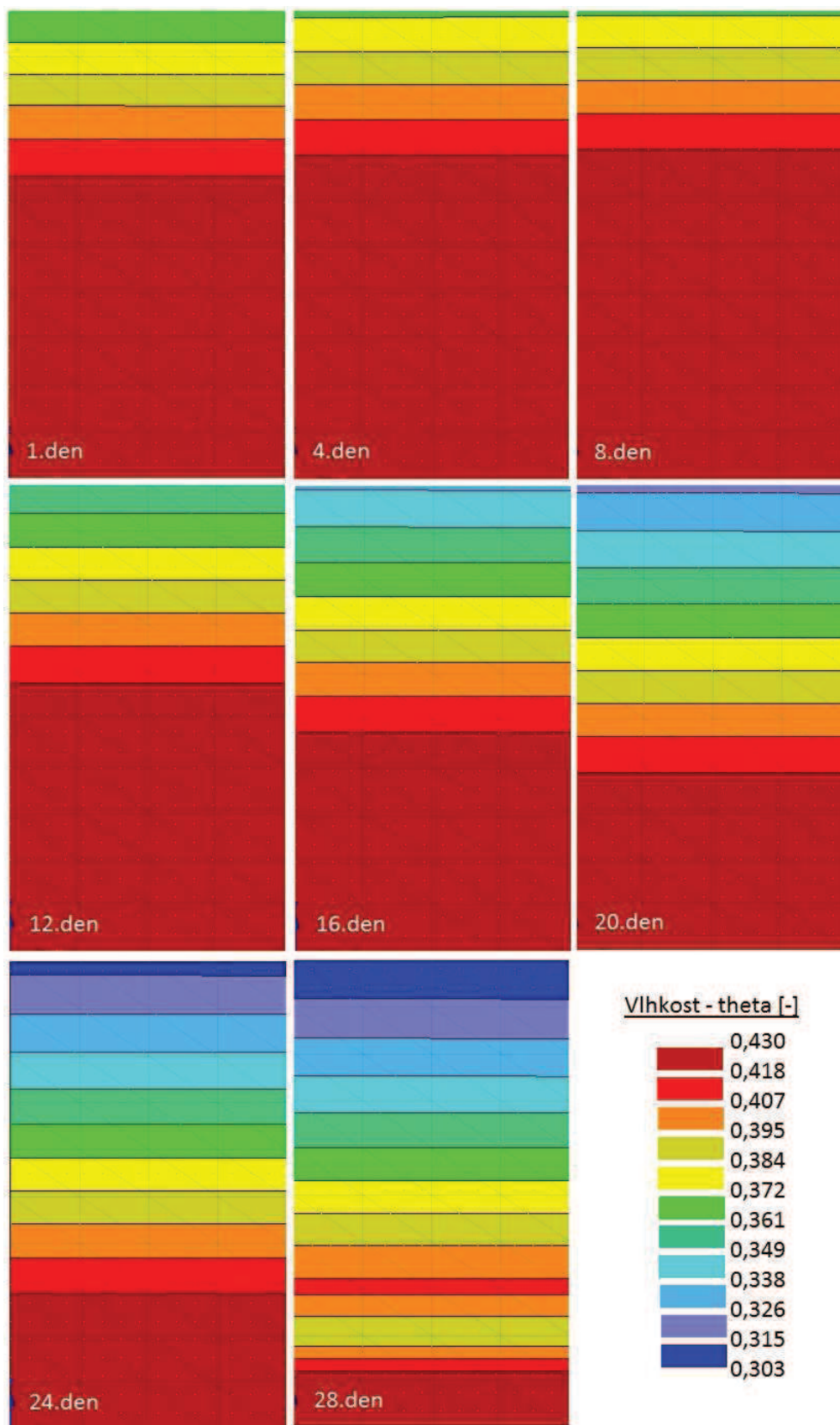
Pomocí programu Hydrus bylo provedeno modelového průběhu změny vlhkosti kalu v kalovém poli, které bylo následně srovnáno s reálnými naměřenými výsledky. Bylo použito měření z období 26. 6. - 24. 7. (tj. 28 dní) na ČOV Dražovice, kde byly použity naměřené hodnoty na kalovém poli bez přístřešku. Do programu byly implementovány naměřené dešťové srážky, evapotranspirace horní okrajovou podmínkou, kterou představuje povrch kalového pole osázený rákosem obecným. Drenážní systém byl v době měření odpojen, proto také není zahrnut do simulovaného výpočtu.

Tabulka 33. Hodnoty vstupující do výpočtu pomocí programu Hydrus

	Označení	Datum		
		3.7.2014	15.7.2014	24.7.2014
Půdorysná plocha kalového pole	A (m ²)	9,5	9,5	9,5
Vlhkost substrátu před aplikací kalu	w ₁ (%)	30	30	30
Hloubka substrátu před aplikací kalu	H (m)	0,08	0,08	0,08
Koncentrace sušiny nového aplikovaného kalu	S _k (%)	4,4	0	0
Výška nového aplikovaného kalu	H _k (m)	0,15	0,15	0,15
Odtok z drenáže	V _d (m ³)	0	0	0
Sledované období	T (dny)	7	19	28
Dešťový úhrn za sledované období	H _d (mm)	19	21	25
Odhad úhrnu evapotranspirace	E _{pr} (mm/rok)	800	810	807
Odhad denní evapotranspirace	E _{pd} (mm/den)	2,2	2,2	2,2
Teoretický výpar za sledované období	E _p (mm)	15,3	42,2	61,9
Teoretická vlhkost substrátu	W _p (%)	74,4	66,5	59,6
Naměřená vlhkost substrátu	W _m (%)	74,4	66,5	59,6
Teoretická koncentrace sušiny	S _t (%)	25,6	33,5	40,4
Naměřená koncentrace sušiny	S _m (%)	25,6	33,5	40,4

6.3.1 Kalové pole v Hydrusu

Šířka kalového pole je 0,3 m, výška 0,51 m. Doba trvání stanovena na 28 dní. Výpočet byl proveden na základě vstupní vlhkosti, která činila 42 %. Protože to je maximální možná velikost vlhkosti, která lze v programu zadat, nebylo možné použít skutečnou naměřenou hodnotu. Ve spodní části kalového pole se uvažuje s vrstvou písku a na ní vrstvou kalu, který byl v programu nahrazen hlinou. Jelikož program ve své databázi neobsahuje rákos obecný, byla do výpočtu místo něj zvolena tráva. Průběh vlhkosti během jednotlivých dní je znázorněn na následujícím obrázku (obr. 38).



Obrázek 38. Grafický výstup vlhkosti z programu Hydrus

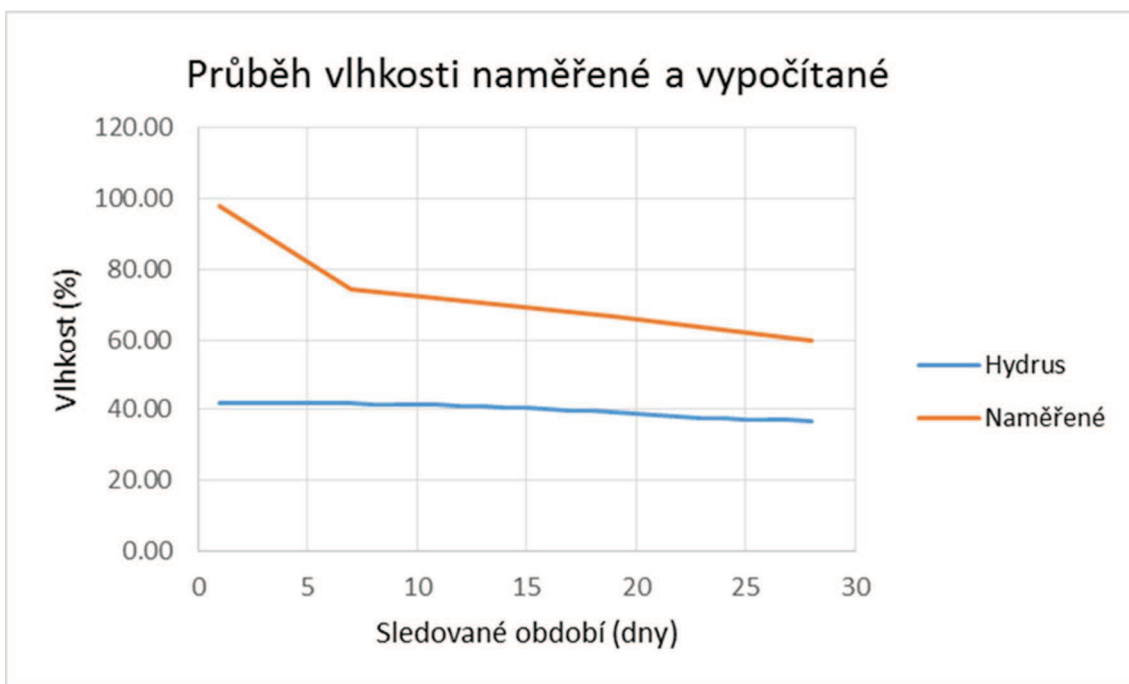
Výsledky v pozorovacím bodě. Pozorovací bod je funkce programu, pomocí níž lze umístit bod do zkoumaného obrazce. Tento bod se umísťuje do místa, kde chceme zjistit konkrétní hodnoty měření. V našem případě je umístěn na povrchu kalového pole, aby bylo možno porovnávat výsledky s naměřenými, které byly odebírány z povrchu kalového pole, s výsledky z programu.

Tabulka 34. Výpočet vlhkosti v pozorovacím bodě pomocí programu

Dny	Vlhkost		Dny	Vlhkost	
	Theta [-]	[%]		Theta [-]	[%]
1	4.20E-01	42.00	15	4.04E-01	40.40
2	4.20E-01	41.96	16	4.02E-01	40.15
3	4.19E-01	41.93	17	3.99E-01	39.88
4	4.19E-01	41.89	18	3.96E-01	39.57
5	4.18E-01	41.83	19	3.92E-01	39.23
6	4.18E-01	41.77	20	3.89E-01	38.86
7	4.17E-01	41.69	21	3.85E-01	38.47
8	4.16E-01	41.60	22	3.81E-01	38.07
9	4.15E-01	41.49	23	3.77E-01	37.71
10	4.14E-01	41.36	24	3.74E-01	37.41
11	4.12E-01	41.21	25	3.72E-01	37.19
12	4.10E-01	41.04	26	3.70E-01	37.04
13	4.09E-01	40.85	27	3.69E-01	36.94
14	4.06E-01	40.64	28	3.68E-01	36.84



Obrázek 39. Průběh vlhkosti v pozorovacím bodě během sledovaného období



Obrázek 40. Porovnání vlhkosti naměřené a vypočítané programem Hydrus

Při porovnání vlhkostí naměřených s vlhkostmi vypočtenými pomocí programu Hydrus, lze pozorovat značné rozdíly. To je dáno nepřesností programu pro výpočet těchto účelů. Hodnoty při modelování, které byly použity z databáze programu, pravděpodobně neodpovídají přesně podmínkám, které na čistírně v Dražovicích ve skutečnosti nastaly. Dále je možno do

programu volit jako počáteční hodnotu vlhkosti maximálně 42 %, což neodpovídá naměřené hodnotě tj. 97,8 %. Hydrus není schopen uvažovat snižující se vrstvu kalu, ke které dochází při jeho postupnému odvodňování.

6.4 ZPRACOVÁNÍ BIOMASY MOKŘADNÍCH ROSTLIN

Abychom získali kompletní výsledky ohledně výhřevnosti a emisních hodnot ve vyrobených rákosových peletách, oslovili jsme Strojírenský zkušební ústav, s.p. v Brně. Rozbory spalného tepla, výhřevnosti a dalších parametrů v aktuálním stavu (nevysušené pelety ponechané dlouhodobě v laboratorním prostředí při teplotě cca 20 °C) a po vysušení při 105 °C jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 35. Výsledky měření rákosových pelet

Ukazatel	Jednotka	Aktuální stav	Bezvodný stav	Nejistota měření
Spalné teplo	[MJ.kg-1]	17,49	19,05	0,14
Výhřevnost	[MJ.kg-1]	15,97	17,61	0,14
Veškerá voda	[% hmot.]	8,19	0,00	0,04
Popel	[% hmot.]	4,00	4,36	0,08
Uhlík	[% hmot.]	43,58	47,47	0,25
Vodík	[% hmot.]	6,07	6,61	0,10
Dusík	[% hmot.]	0,69	0,75	0,10
Chlor	[% hmot.]	0,098	0,106	0,001
Síra	[% hmot.]	0,103	0,112	0,006
Kyslík (dopočtem)	[% hmot.]	37,27	40,60	

Porovnání chemického složení pelet ze slámy obilné a rákosu obecného.

Tabulka 36. Srovnání vlastností pelet z rákosu a ze slámy

Ukazatel	Jednotka	Sláma obilná	Rákos obecný
Výhřevnost	[MJ.kg-1]	14,00	15,97
Popel	[% hmot.]	5,0	4,0
Uhlík	[% hmot.]	47,00	43,58
Vodík	[% hmot.]	5,60	6,07
Chlor	[% hmot.]	0,100	0,098
Síra	[% hmot.]	0,100	0,103
Kyslík	[% hmot.]	38,00	37,27

Ze srovnání pelet z rákosu obecného a slámy obilné, lze vidět, že všechny hodnoty jsou téměř totožné. Jelikož v dnešní době výroba pelet ze slámy obilné je dosti rozšířená, lze tedy pro tyto účely využít i odumřelý rákos z čistíren odpadních vod. Tím by se využila biomasa

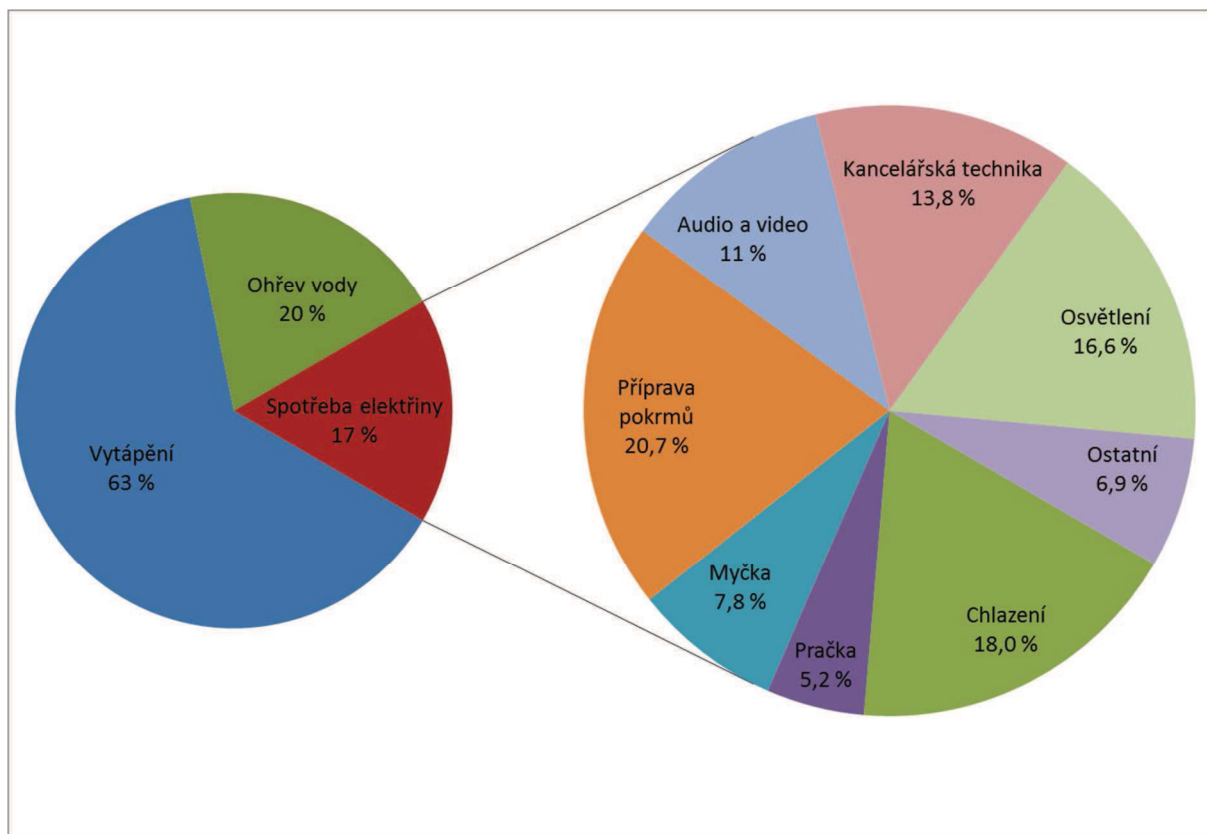
mokřadních rostlin, která je považována za jeden z odpadů vznikajících na kořenových čistírnách odpadních vod.

Pro komplexní představu ohledně využitelnosti rákosových peletek můžou posloužit průměrné spotřeby elektrické energie pro modelové domácnosti, uvedené např. na webu:

http://vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=spotreba_energie_v_domacnostech&site=energie

Tabulka 37. Rozložení spotřeby energie v modelové domácnosti (<http://vitejtenazemi.cz>)

Účel spotřeby	Spotřeba energie [kWh/rok]	Spotřeba energie [%]	Poznámka
Vytápění	10 000	63%	
Ohřev vody	3 128	20%	
Spotřeba elektřiny, z toho:	2 643	17%	
Chlazení	475	18%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Pračka	137	5%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Myčka	207	8%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Příprava pokrmů	548	21%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Audio a video	292	11%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Kancelářská technika	365	14%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Osvětlení	438	17%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Ostatní	183	7%	(podíl ze spotřeby elektřiny)
Celkem	15 771	100%	



Obrázek 41. Grafické znázornění rozložení spotřeby energie v modelové domácnosti (<http://vitejtenazemi.cz>)

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá otázkou odpadového hospodářství na kořenové čistírně odpadních vod. Tato otázka je v dnešní době stále aktuální. Proto diplomová práce přináší četné výsledky, získané na základě měření a teoretických informací, které část této problematiky objasní a dále usnadní vyřešit některé problémy vyskytující se již u stávající čistírny odpadních vod (bez ohledu na technologii čištění) nebo při samotném návrhu kalového hospodářství, které je řešeno prostřednictvím kalových polí – tzv. reed-bed systémů.

V teoretické části je rozebrána problematika odpadů vznikajících na kořenových čistírnách odpadních vod. Konkrétně se zabývá druhem odpadů, které na kořenových čistírnách vznikají, a následně možnostmi nakládání s těmito odpady. Dále je zaměřena na odvodňování kalů pomocí mokřadní vegetace a výzkumy tohoto odvodňování proběhlé v zahraničí, konkrétně v Kanadě a Řecku.

Praktická část je rozdělena na čtyři části. První část se zabývá rozepsáním bilanční hydrologické rovnice odvodňování kalů pomocí mokřadní vegetace, pomocí níž jsou kalibrovány hodnoty, kde výsledkem je evapotranspirace na jednotlivých druzích kalových polí. Toto měření probíhalo na čistírně odpadních vod v obci Dražovice a Kotečnice. Výsledky evapotranspirace v Dražovicích u kalového pole se skleníkem se pohybují v rozmezí 1700 – 75 mm.rok⁻¹ (z průměrných ročních hodnot vychází krátkodobé pozorované období, proto jsou zjištěné hodnoty tak vysokého rozpětí), u kalového pole bez přístřešku mezi 1520 – 100 mm.rok⁻¹. Na čistírně v Kotečnicích se hodnoty roční evapotranspirace pohybují u kalového pole bez vegetace v rozmezí 710 – 67 mm.rok⁻¹, u chrastice rákosovité 975 – 177 mm.rok⁻¹, u rákosu obecného 420 – 40 mm.rok⁻¹ a u orobince širokolistého 595 - 0 mm.rok⁻¹.

Druhá část je zaměřena na vývoj software, který je založen na konkrétních naměřených hodnotách z přechozí části. Software je rozdělen na dva programy, kde jeden bude schopen vypočítat vlhkost kalu v kalovém poli a délku odvodňovacího období kalu (R-B-O popsány v kapitole 5.1.1.). Druhý, R-B-P popsány v kapitole 5.1.2., bude schopen vypočítat potřebnou plochu kalového pole v závislosti na počtu obyvatel a současně umožní určení investičních nákladů a návratnost investice do kalového pole. Třetí část je zaměřena na program Hydrus, v němž bylo provedeno numerické modelování snižující se vlhkosti v kalovém poli. Kalibrace proběhla pomocí naměřených hodnot na kalovém poli v obci Dražovice, výsledky přináší srovnání naměřených hodnot s výslednými hodnotami ze simulačního prostředí Hydrus 2D.

Poslední část se zabývala zpracováním rákosu obecného po skončení vegetačního období. Z rákosu obecného byly zpracovány pelety a jejich vlastnosti srovnány s vlastnostmi pelet vyrobených ze slámy obilné. V rámci této dílčí části jsem zjistila, že rákos lze peletovat, výsledné spalné teplo je $17,49 \text{ MJ.kg}^{-1}$, výhřevnost rákosu obecného je $15,97 \text{ MJ.kg}^{-1}$ a slámy obilné $14,00 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Pro účely transfer výsledků do reálných podmínek je nasnadě přepočítat na velikost filtračních polí kořenových čistíren odpadních vod. Pakliže je možné z filtračního pole sklídit $0,8 - 1,0 \text{ kg}$ biomasy za jednu vegetační sezonu, lze pomocí peletovacího zpracování následně získat $12,8 - 15,9 \text{ MJ / m}^2$. Při uvažování běžně navrhované plochy filtračního pole v rozmezí $5,0 - 10,0 \text{ m}^2/\text{obyvatele}$ je tedy výhřevnost v rozmezí $64,0 - 159,0 \text{ MJ/EO}$.

Jiná bilance, vycházející z příkladu půdorysné plochy kořenové čistírny pro 750 EO (obec Dražovice) a její půdorysné plochy filtračních polí $A = 4200 \text{ m}^2$, může např. za předpokladu průměrného množství získaného tepla $14,3 \text{ MJ/m}^2$ za jeden rok produkovat 66780 MJ (tj. $18\,550 \text{ kWh}$ za předpokladu $1 \text{ joule} = 2,778 \times 10^{-7} \text{ kWh}$). Po přepočtu průměrné spotřeby modelové domácnosti $10\,000 \text{ kWh/rok}$ na vytápění vychází tedy, že kořenová čistírna pro 750 EO je teoreticky schopna odpadovým teplem, získaným ze spalování rákosových pelet, zajistit vytápění téměř dvě průměrné domácnosti. Lze tedy přepokládat, že na vytápění jedné průměrné domácnosti se spotřebou energie na vytápění $10\,000 \text{ kWh}$ je za potřebí přibližně 2300 m^2 resp. 400 EO.

8 POUŽITÁ LITERATURA

ALEXANDROS I. STEFANAKIS, DIMITRIOS P. KOMILIS, VASSILIOS A. TZIHRINTZIS, *Stability and maturity of thickened wastewater sludge treated in pilot-scale sludge treatment wetlands*, Water Research, Volume 45, Issue 19, 1 December 2011, Pages 6441-6452, ISSN 0043-1354, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.036>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135411005665>)

APHA and AWWA, 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, twentieth ed. American Public Health Association, Washington, D.C.

APHA, AWWA, WEF, 2012. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed. American Public Health Association/American WaterWorks Association, Water Environment Federation, Washington, DC.

BARRENA, R., VA'ZQUEZ, F., SA'NCHEZ, A., 2006. *The use of respiration indices in the composting process: a review*. Waste Management and Research 24, 37-47.

CASELLES-OSORIO, A., PUIGAGUT, J., SEGU, E., VAELLO, N., GRANES, F., GARCIA, D., GARCIA, J., 2007. *Solids accumulation in five full-scale subsurface flow constructed wetlands*. Water Research 41 (6), 1388–1398.

COLE, S., 1998. *The emergence of treatment wetlands*. Environmental Science and Technology 32 (9), 218A–223A.

COOPER, P., WILLOUGHBY, N., COOPER, D., 2004. *The use of reed-beds for sludge drying*. Water Environ. J. 18 (2), 85–89.

ČÍŽKOVÁ H. et al. 2003. *Úloha rostlin ve vegetačních čistírnách*. In: Přírodní způsoby čištění odpadních vod III. Brno: FAST VUT. pp. 41-44.

Český statistický úřad: Vodovody, kanalizace a vodní toky. In: Český statistický úřad [online]. 2014 [cit. 2015-01-08]. Dostupné z: <http://www.czso.cz/csu/2014edicniplan.nsf/p/280021-14>

ČSN 46 5736. *Průmyslové komposty*. Praha: Český normalizační ústav, 1991.

de MAESENEER, L.J., 1997. *Constructed wetlands for sludge dewatering*. Water Science & Technology 35, 279-285

DOBŠÁKOVÁ, Martina. *Analýza způsobu nakládání s kaly z čistíren komunálních odpadních vod*. Brno, 2004. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně

EDWARDS, K.J., GRAY, R.K., COOPER, J.D., BIDDLESTONE, J.A., WILLOUGHBY, N., 2001. *Reed bed dewatering of agricultural sludges and slurries*. Water Science & Technology 44, 551-558.

ENNABILLI, A., ATER, M., RADOUX, M., 1998. *Biomass production and NPK retention in macrophytes from wetlands of the Tingitan Peninsula*. Aquat. Bot. 62 (1), 45–56.

EPSTEIN, E., 1997. *The Science of Composting*. Technomic Pub. Co., Lancaster, PA, USA.

European Commission - DG Environment, 2000. *Working Document on Sludge*, 3rd Draft. Brussels. Available from: http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/sludge_en.pdf (accessed September 2011)

European Commission-DG Environment, 2010. *Working Document, Sludge and Biowaste*. Brussels. Available from: <http://www.compostnetwork.info/wordpress/wp->

content/uploads/2010/12/101021_ECN_bio-sludge-working-doc_comments.pdf (accessed September 2011).

GAGNON Vincent, CHAZARENCO Florent, COMEAU Yves, BRISSON Jacques, *Effect of plant species on sludge dewatering and fate of pollutants in sludge treatment wetlands*, Ecological Engineering, Volume 61, Part B, December 2013, Pages 593-600, ISSN 0925-8574, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.02.017>.
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857413000979>)

HAMANOVÁ, Sabina. *Odstraňování farmak v kořenových čistírnách odpadních vod*. Praha, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze - Přírodovědecká fakulta.

HOFMANN, K., 1990. *Use of phragmites in sewage sludge treatment*. In: Cooper, P.F., Findlater, B.C. (Eds.), *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, pp.269–277.

HOUSKA, Jindřich. *LYTHRUM SALICARIA L.* In: BOTANY.cz [online]. 2007 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/lythrum-salicaria/>

IANNOTTI, D.A., PANG, T., TOTH, B.L., ELWELL, D.L., KEENER, H.M., HOITINK, H.A.J., 1993. *A quantitative respirometric method for monitoring compost stability*. *Compost Science and Utilization* 1, 52-65.

JÍROVÁ, Alena. *GLYCERIA MAXIMA (Hartman.) Holmberg*. In: Bozany [online]. 2007 [cit. 2014-12-05]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/glyceria-maxima/>

KADLEC, R.H., WALLACE, S.D., 2009. *Treatment Wetlands*, second ed. CRC Press, Boca Raton, USA.

Katalog odpadů [online]. [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.kr-jihomoravsky.cz/websouhlasyl/katalog.php>

KENGNE NOUMSI, I.M., AMOUGOU, A., BEMMO, N., STRAUSS, M., TROECH, S., NTEP, F., TSAMA NJITAT, V., NGOUTANE PARE, M., KONE, D., 2006. *Potentials of sludge drying beds vegetated with Cyperus papyrus L. and Echinachloa pyramidakis (LAM.) Hitchc. and Chase for faecal sludge treatment in tropical regions*. In: Dias, V., Vymazal, J. (Ed.), *Proceedings of the Conference on the Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands*, Lisbon, Portugal.

KOMILIS, D., KONTOU, I., NTOUGIAS, S., 2011. *A modified static respiration assay and its relationship with an enzymatic test to assess compost stability and maturity*. *Bioresource Technology* 102 (10), 5863-5872

KRÁSA, Petr. *SCHOENOPLECTUS LACUSTRIS (L.) Palla*. In: BOTANY.cz [online]. 2007 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/schoenoplectus-lacustris/>

KRÁSA, Petr. *TYPHA ANGUSTIFOLIA L.* In: BOTANY.cz [online]. 2008b [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/typha-angustifolia/>

KRÁSA, Petr. *TYPHA LATIFOLIA L.* In: BOTANY.cz [online]. 2008a [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/typha-latifolia/>

KRIŠKA-DUNAJSKÝ, M.; MRVOVÁ, M.; NĚMCOVÁ, M. *Extenzivní kalové hospodářství malých čistíren s minimálními nároky na energii*. In Voda 2013, Sborník přednášek a posterových sdělení. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2013. s. 245-252. ISBN: 978-80-263-0506-4.

- LYČKOVÁ, Barbora. *Zpracování kalů: Nakládání s čistírenskými kaly* [online]. 2008 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/index.html>
- MIŽÍK, Peter. *PHRAGMITES AUSTRALIS (Cav.) Steud.* In: BOTANY.cz [online]. 2008 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/phragmites-australis/>
- MLEJNSKÁ, E., ROZKOŠNÝ, M., BAUDIŠOVÁ, D., VÁŇA, M., et al., *Extenzivní způsoby čištění odpadních vod*. Praha, 2009. Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka
- MRÁZEK, Tomáš. *PHALARIS ARUNDINACEA L.* In: BOTANY.cz [online]. 2012 [cit. 2014-12-03]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/phalaris-arundinacea/>
- MRVOVÁ, Michaela. *Přirozené odvodnění čistírenských kalů malých producentů*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- MOUDRÝ, J., STRAŠIL, Z.: *Energetické plodiny v ekologickém zemědělství*. VH Press, Hradec Králové, 1998
- NASSAR, A.M., SMITH, M., AFITI, S., 2006. *Sludge dewatering using the reed bed systems in the Gaza Strip, Palestine*. Water and Environmental Journal 20, 27–34.
- NIELSEN, S., 2003. *Sludge drying reed beds*. Water Science & Technology 48 (5), 101-109.
- NIELSEN, S., 2005a. *Sludge reed bed facilities: operation and problems*. Water Science and Technology 51 (9), 99–107.
- NIELSEN, S., 2005b. *Mineralization of hazardous organic compounds in a sludge reed bed and sludge storage*. Water Science and Technology 51 (9), 109–117.
- NIELSEN, S., 2008. *Sludge treatment and drying reed bed systems 20 years of experience*. In: Proceedings of the European Conference on Sludge Management, Liege, Belgium.
- NIELSEN, S., WILLOUGHBY, N., 2005. *Sludge treatment and drying reed bed systems in Denmark*. Journal of Water and Environmental Management 19 (4), 296-305.
- NOVÁK, V., *Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určivanie*. SAV Bratislava, 1995, ISBN 80-224-0409-8
- PERRY R. H., *Perry's chemical engineers' handbook*, McGraw-Hill companies, Inc., New York, 1997
- PLAMÍNKOVÁ, Jana. *Slabikář ekologického bydlení*. 1. vyd. Praha: LEA, 1998, 118 s. ISBN 80-238-2218-7.
- PRIBÁŇ K. 1992. *Výpar z porostu mokřadních rostlin*. Sborník referátů: Seminář BÚ ČSAV. Třeboň. pp. 67-70.
- SMITH, K.E., SCHWAB, A.P., BANKS, M.K., 2008. *Dissipation of PAHs in saturated, dredged sediments: a field trial*. Chemosphere 72 (10), 1614–1619.
- STEFANAKIS, A.I., AKRATOS, C.S., MELIDIS, P., TSIHRINTZIS, V.A., 2009. *Surplus activated sludge dewatering in pilot-scale sludge drying reed beds*. Journal of Hazardous Materials 172, 1122-1130.
- STEFANAKIS, A.I., TSIHRINTZIS, V.A., 2011. *Dewatering mechanisms in pilot-scale sludge drying reed beds: effect of design and operational parameters*. Chemical Engineering Journal 172, 430-443.

ŠÁLEK, J., Využití mokřadní vegetace k odvodnění tekutých stabilizovaných čistírenských kalů. In: Přírodní způsoby čištění odpadních vod III. Brno: FAST VUT, 2003, s.71-76.

ŠÁLEK, Jan. Voda v domě a na chatě: využití srážkových a odpadních vod. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 144 s. Profi. ISBN 978-80-247-3994-6.

ŠŤASTA, Pavel. *Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva*. Brno, 2009. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

TANNER, C.C., CLAYTON, J.S., UPSDELL, M.P., 1995. *Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands*. 2. Removal of nitrogen and phosphorus. *Water Res.* 29 (1), 27–34.

UGGETTI, E., FERRER, I., LLORENS, E., GARCÍA, J., 2010. *Sludge treatment wetlands: a review on the state of the art*. *Bioresour. Technol.* 101 (9), 2905–2912.

Von SPERLING, M., GONCALVES, R.F., 2007. *Sludge characteristics and production*. In: Cleveron, V.A., von Sperling, M., Fernandes, F. (Eds.), *Sludge Treatment and Disposal*. IWA Publishing, London, UK.

Vyhláška 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: Odpadové hospodářství. 2001. Dostupné z:

<http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/d8ba26756f2f18b5c1257561003d1242?OpenDocument>

VYMAZAL, J., *Kořenové čistírny odpadních vod*, ENKI Třeboň, 2004

WANG, R., BALDY, V., PÉRISSOL, C., KORBOULEWSKY, N., 2012. *Influence of plants on micro-bial activity in a vertical-downflow wetland system treating waste activated sludge with high organic matter concentrations*. *J. Environ. Manage.* 95 (Suppl.), S158–S164.

WEI, Y., VAN HOUTEN, R.T., BORGER, A.R., EIKELBOOM, D.H., FAN, Y., 2003. *Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment*. *Water Research* 37 (18), 4453–4467.

WERTHER, J., OGADA, T., 1998. *Sewage sludge combustion*. *Progress in Energy and Combustion Science* 25 (1), 55–116.

WU, L., MA, L.Q., MARTINEZ, G.A., 2000. *Comparison of methods for evaluating stability and maturity of biosolids compost*. *Journal of Environmental Quality* 29, 424-429.

9 PŘÍLOHY

9.1 FOTODOKUMENTACE



Obrázek 42. Kalové pole osazené rákosem obecným na konci vegetačního období na ČOV Dražovice (vlevo se skleníkovým přístřeškem, vpravo bez přístřešku)



Obrázek 43. Kalové pole bez přístřešku v zimním období, ČOV Dražovice



Obrázek 44. Kalové pole se skleníkovým objektem napuštěné kalem, ČOV Dražovice



Obrázek 45. Odvod vody drenážním systémem z kalových polí a následné čerpání zpět na ČOV, ČOV Dražovice



Obrázek 46. Aplikace primárního stabilizovaného kalu na reed-bed systém, ČOV Koteňčice



Obrázek 47. Reed-bed v Koteňčicích těsně po aplikaci kalu dne 2. 7. 2014 - zleva: bez vegetace, chrastice rákosovitá



Obrázek 48. Reed-bed v Kotenčích těsně po aplikaci kalu dne 2. 7. 2014 - zleva: rákos obecný, orobinec úzkolistý



Obrázek 49. Reed-bed v Kotenčích po 14 dnech: bez vegetace



Obrázek 50. Reed-bed v Kotečičích po 14 dnech: chrastice rákosovitá



Obrázek 51. Reed-bed v Kotečičích po 14 dnech: rákos obecný



Obrázek 52. Reed-bed v Kotečnicích po 14 dnech: orobinec úzkolistý



Obrázek 53. Reed-bed v Kotečnicích po 19 dnech: bez vegetace



Obrázek 54. Reed-bed v Kotečnicích po 19 dnech: chrastice rákosovitá



Obrázek 55. Reed-bed v Kotečnicích po 19 dnech: rákos obecný



Obrázek 56. Reed-bed v Kotenčicích po 19 dnech: orobinec úzkolistý



Obrázek 57. Zpracování kalu odebraného v Kotenčicích po 14 dnech, zleva: bez vegetace, chrastice rákosovitá, rákos obecný a orobinec úzkolistý



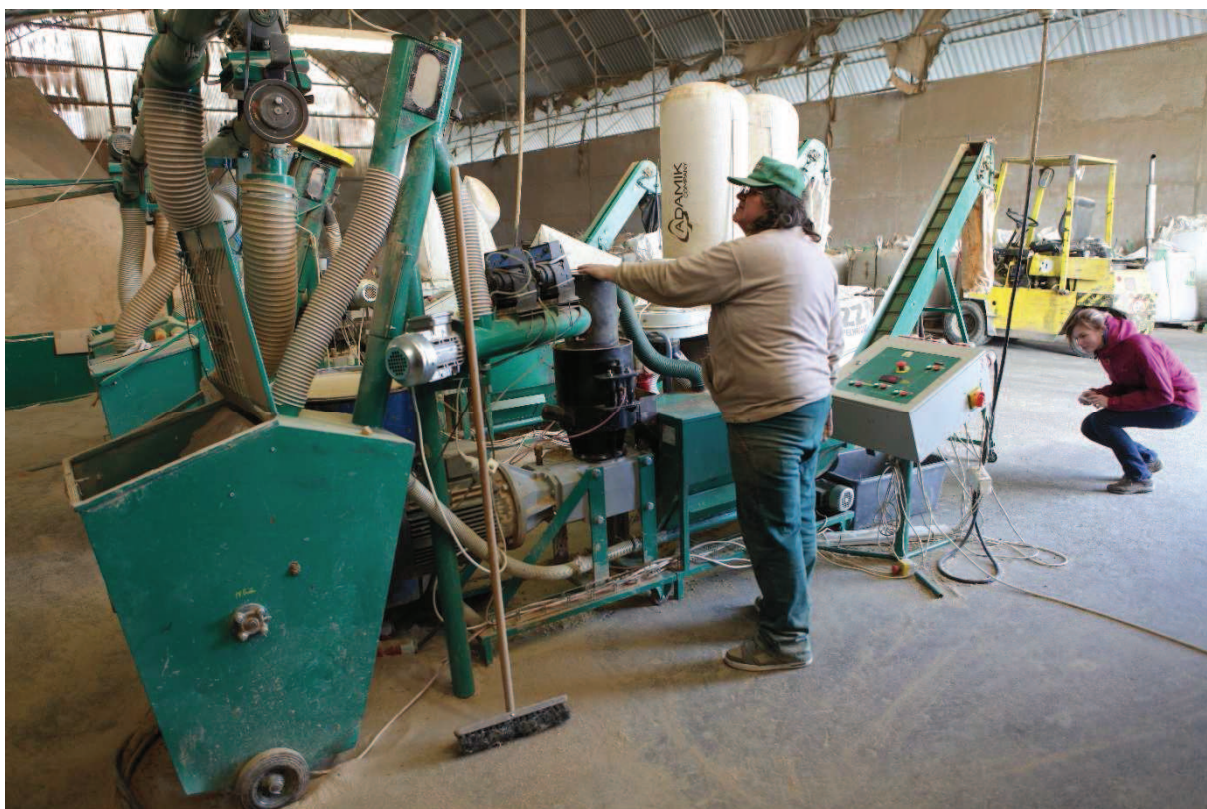
Obrázek 58. Kosení rákosu, celková pokosená plocha 6 x 7 metrů



Obrázek 59. Drcení rákosu pomocí řezacího šrotovníku



Obrázek 60. Rozdrcený rákos (rácový šrot), dávkování do peletovací linky



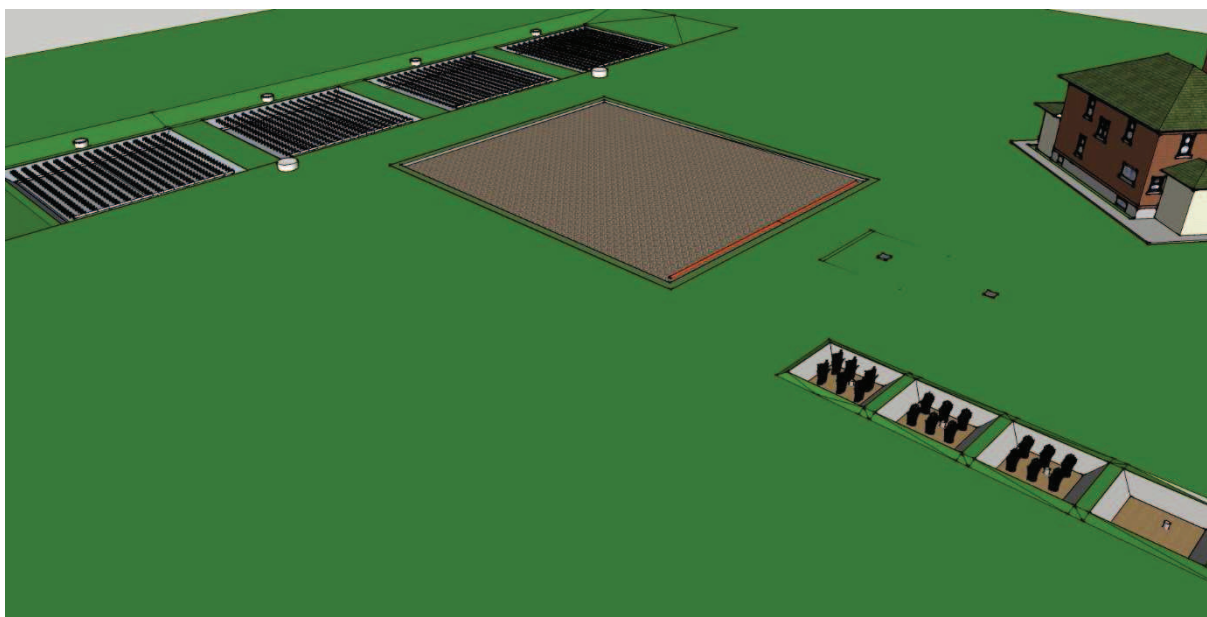
Obrázek 61. Peletovací linka



Obrázek 62. Vyrobené pelety z rákosu obecného

9.2 PŘÍKLAD ŘEŠENÍ KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ PRO 250 EO

Jako doplňující výsledek práce je příklad řešení kalového hospodářství pro 250 EO, které je i v rámci výzkumných prací testováno na kořenové čistírně v obci Kotenčice. Řešení samotné čistírny je v současné době řešeno jiným způsobem a není předmětem diplomové práce.



Obrázek 63. Schéma možného uspořádání kořenové čistírny odpadních vod

Optimálním řešením, vycházejícím z uplatnění přírodních způsobů čištění vod, které zahrnují tříkomorový septik, jedno centrální horizontální pole (mechanické odstranění nerozpuštěných látek, predenitrifikace, snížení BSK₅ a CHSK_{Cr}) a 4 vertikální pole (nitrifikace, dočištění BSK₅ a CHSK_{Cr}). Pro účely odvodnění kalu pomocí reed-bed systému poslouží celkem čtyři samostatná pole, umožňující kontinuální provoz. Kalová pole slouží k odvodnění stabilizovaného kalu. Mohou být opatřeny mokřadní vegetací nebo bez vegetace. Výhodnější je kalové pole s mokřadní vegetací, dochází tak k lepšímu a rychlejšímu odvodnění kalu.

9.2.1 Mechanické předčištění

Septik je průtočná sedimentační nádrž. Patří mezi hlavní součást mechanického předčištění malých producentů. Minimální doba zdržení se udává 5 dní (v ČSN 75 6402 je uvedena obvyklá doby 3 dny). Kalový prostor tvoří 50 – 60 % účinného prostoru septiku.

Minimální velikost účinného prostoru je 3 m^3 . Do každé komory je nutno zřídít vstup $600 \times 600 \text{ mm}$. Objem septiku lze spočítat dle následující rovnice:

$$V = a \cdot n \cdot q \cdot t \text{ (m}^3\text{)}$$

Kde a - součinitel pro kalový parametr (1,5 – 1,6)

n - počet obyvatel

q - specifická spotřeba vody (l/s/den)

t - střední doby zdržení 3 (5) dní

Objem septiku je tedy roven 250 m^3 , za předpokladu, že počet ekvivalentních obyvatel je 250, součinitel pro kalový prostor 1,6, specifická potřeba vody 125 l/s/den a doba zdržení 5 dní.

9.2.2 Hlavní čistící stupeň

Filtrační pole je považováno za hlavní stupeň čištění v rámci kořenové čistírny odpadních vod. Podle směru proudění se rozlišuje na horizontální a vertikální. Vertikální lze dále rozdělit podle přítomnosti vody na zatopené (nasyčené vodou) a nezatopené (nenasyčené vodou). Mezi výhody filtrů obecně patří snadná výstavba, dlouhodobě stabilní chování, a mezi nevýhody náročnosti na plochu a citlivost na mechanické předčištění.

Obecná pravidla pro horizontální filtry:

- Sklony svahů 1:1 (strmější v případě vhodného podloží)
- Velikost $5 - 8 \text{ m}^2/\text{EO}$ – zastaralé, pouze pro případ samostatného filtru (za mechanickým stupněm)
- Velikost $1 - 2 \text{ m}^2/\text{EO}$ – pouze v případě vícestupňové filtrace (musí následovat další stupeň)

Při stavbě je potřeba dodržet:

- Na urovnaný písek geotextilie min 500 g/m^2
- Fólie PVC (1,5 mm), PE (1,5 mm), Kaučuk (1,0 mm)
- Na fólii netkaná geotextilie 500 g/m^2
- V případě aplikace drceného kameniva pískový násyp na geotextilii 50 mm

- Výsadba rostlin až po zatopení filtru, při zatápění postupné rovnání terénu

V našem případě bylo navrženo jedno horizontální pole podle pravidla $2 \text{ m}^2/\text{EO}$, tzn. plocha horizontálního pole je rovna 500 m^2 . Plocha vertikálního pole byla vyčíslena pomocí CHSK znečištění, kde je uvažováno odstranění na 1 m^2 vertikálního pole 20 g CHSK/den . Za horizontálním polem je CHSK 48 g/EO . Z toho plyne plocha vertikálního pole pro 250 EO rovna 600 m^2 . Celková plocha byla rozdělena na 4 pole o velikosti 150 m^2 .

9.2.3 Kalová pole

Pomocí předběžné verze software Reed-bed vychází plocha kalového pole 80 m^2 , která je rozdělena do 4 kalových polí o ploše 20 m^2 .

Skladba kalového pole:

- Hydroizolace
- Drenážní systém – odvodňovací potrubí
- Mělký substrát pro výsadbu rostlin – písek
- Vrstva odvodňovaného kalu
- Mokřadní rostliny

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Limitní obsahy těžkých kovů v kalech pro použití v zemědělství (Vyhláška 383/2001 Sb.).....	12
Tabulka 2. Limitní hodnoty ukazatelů výluhu (Vyhláška 383/2001 Sb.)	13
Tabulka 3. Experimentální design a provozní charakteristiky 13 zkoumaných jednotek (Alexandros a kol., 2011)	21
Tabulka 4. Průměrné vlastnosti zahuštěného přebytečného aktivovaného kalu použitého v experimentech (Alexandros a kol., 2011).....	23
Tabulka 5. Průměrná koncentrace znečišťujících látek v čerstvém kalu a celkové zatížení znečišťujícími látkami na povrchu čistícího mokřadu po třetím létě krmení (Gagnon a kol., 2013).....	30
Tabulka 6. Charakteristika surového kalu a kalového koláče podle různých druhů rostlin na konci léta 2010 (v průměru ± standardní odchylka) (Gagnon a kol., 2013).....	31
Tabulka 7. Rostlinné biomasy, hustota, a evapotranspirace podle různých druhů rostlin pro léto 2010 (v průměru ± směrodatná odchylka) (Gagnon a kol., 2013)	31
Tabulka 8. Přítoky odpadních vod na ČOV	38
Tabulka 9. Měřené hodnoty na RB1_Skleník	46
Tabulka 10. Měřené hodnoty na RB2_Venku	46
Tabulka 11. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 3. 7. 2014.....	48
Tabulka 12. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 15. 7. 2014.....	48
Tabulka 13. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 24. 7. 2014.....	49
Tabulka 14. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 2. 9. 2014.....	49
Tabulka 15. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 8. 9. 2014.....	50
Tabulka 16. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 17. 9. 2014.....	50
Tabulka 17. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 16. 10. 2014.....	51
Tabulka 18. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 13. 11. 2014.....	51

Tabulka 19. Hodnoty vypočtené evapotranspirace na ČOV Dražovice v období květen 2012 - duben 2013 (použito z bakalářské práce)	53
Tabulka 20. Průměrná hodnota evapotranspirace v období červenec - listopad 2014	54
Tabulka 21. Měřené hodnoty na RB1_Bez rostlin	55
Tabulka 22. Měřené hodnoty na RB2_Chrastice rákosovitá.....	55
Tabulka 23. Měřené hodnoty na RB3_Rákos obecný	56
Tabulka 24. Měřené hodnoty na RB4_Orobinec širokolistý.....	56
Tabulka 25. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 16. 7. 2014.....	58
Tabulka 26. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 7. 8. 2014.....	58
Tabulka 27. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 21. 8. 2014.....	59
Tabulka 28. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 29. 8. 2014.....	59
Tabulka 29. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 9. 10. 2014.....	60
Tabulka 30. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 16. 10. 2014.....	60
Tabulka 31. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 30. 10. 2014.....	61
Tabulka 32. Záznam zjištěných hodnot do bilanční rovnice ze dne 14. 11. 2014.....	61
Tabulka 33. Hodnoty vstupující do výpočtu pomocí programu Hydrus	79
Tabulka 34. Výpočet vlhkosti v pozorovacím bodě pomocí programu	81
Tabulka 35. Výsledky měření rákosových pelet	83
Tabulka 36. Srovnání vlastností pelet z rákosu a ze slámy	83
Tabulka 37. Rozložení spotřeby energie v modelové domácnosti (http://vitejtenazemi.cz)....	84

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Produkce kalu v ČR v letech 1993-2003 (Lyčková B., 2008)	7
Obrázek 2. Množství čištěných odpadních vod v ČR v letech 1993-2003 (Lyčková B., 2008)	7
Obrázek 3. Způsoby nakládání s kalem v ČR rok 2003 (Lyčková B., 2008).....	9
Obrázek 4. Způsoby nakládání s kalem v ČR za rok 2013 (Český statistický úřad).....	9
Obrázek 5. Nakládání s kalem v některých evropských zemích (Perry R. H., 1997)	11
Obrázek 6. Rákos obecný (http://www.kvetenacr.cz/), orobinec širokolistý (www.botany.cz), orobinec úzkolistý (www.botany.cz).....	15
Obrázek 7. Chrastice rákosovitá (www.lastura.cz), Skřípinec jezerní (www.botany.cz), Kyprej vrbice (www.botanika.wendys.cz)	16
Obrázek 8. Zblochan vodní (www.botanickafotogalerie.cz).....	17
Obrázek 9. (a) schéma vertikálního rozdělení testovaných jednotek, (b) pohled na sledované jednotky (Alexandros a kol., 2011)	22
Obrázek 10. Časový vývoj (a) C-CO ₂ ; (b) SRI12; (c) GI; (d) Celkové koliformní bakterie během 1 roku pozorování (Alexandros a kol., 2011)	24
Obrázek 11. Časový vývoj (a) celkové sušiny (%); (b) těkavých látek (% TS); (c) pH; (d) elektrické vodivosti (mS/cm) během 1 roku pozorování (Alexandros a kol., 2011).....	25
Obrázek 12. Průřez experimentální nádrží zobrazující zrnitosti jednotlivých vrstev (Gagnon a kol., 2013).....	29
Obrázek 13. Hmotnostní bilance pro osud vody a znečišťující látky, pro léta 2008-2010 podle druhů rostlin: (a) vodní bilance, (b) celková sušina (c) celkové těkavé pevné látky, (d) celkový uhlík, (e) celkový dusík podle Kjeldahla, a (f) celkový fosfor. Procenta po 1% nejsou uváděny (Gagnon a kol., 2013).....	33
Obrázek 14. Kalová pole v Dražovicích - vlevo se skleníkovým přístřeškem a vpravo bez přístřešku	37
Obrázek 15. Schéma kalových polí v Dražovicích.....	37
Obrázek 16. Kalová pole na ČOV v Kotenčicích.....	39

Obrázek 17. Schéma uspořádání kalového pole s drenážním systémem: 1 - hydroizolace, 2 - drenážní vrstva, 3 - odvodňovací potrubí, 4 – mělký substrát pro výsadbu rostlin, 5 - odvodňovaný kal, 6 - mokřadní rostliny, 7 - revizní šachtyce	39
Obrázek 18. Půdorys a uspořádání kalových polí v Kotečnicích (autor: Ing. Kršňák)	40
Obrázek 19. Grafické srovnání průběhu koncentrace sušiny v RB1 a RB2 (Dražovice).....	47
Obrázek 20. Grafické srovnání vlhkosti v RB1 a RB2 (Dražovice)	47
Obrázek 21. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB1 (Dražovice).....	52
Obrázek 22. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB2 (Dražovice).....	52
Obrázek 23. Průběh evapotranspirace u RB1 a RB2 (Dražovice).....	53
Obrázek 24. Grafické srovnání koncentrace sušiny u RB1, RB2, RB3 a RB4 (Kotečnice)	57
Obrázek 25. Grafické srovnání naměřené vlhkosti u RB1, RB2, RB3 a RB4 (Kotečnice)	57
Obrázek 26. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB1 (Kotečnice)	62
Obrázek 27. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB2 (Kotečnice)	62
Obrázek 28. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB3 (Kotečnice).....	63
Obrázek 29. Průběh změn koncentrace sušiny a vlhkostí během sledovaného období u RB4 (Kotečnice)	63
Obrázek 30. Průběh ročního úhrnu evapotranspirace vztažený pro dané období u RB1, RB2, RB3 a RB4 (Kotečnice).....	64
Obrázek 31. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli opatřeném skleníkovým objektem a drenáží	65
Obrázek 32. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli bez skleníkového objektu a s drenáží	67

Obrázek 33. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli se skleníkovým objektem a bez drenáže.....	69
Obrázek 34. Schematizace software pro výpočet vlhkosti na kalovém poli bez skleníkového objektu a bez drenáže	71
Obrázek 35. Schematizace software pro výpočet období odvodňování kalu v kalovém poli. .	73
Obrázek 36. Schematizace software pro výpočet půdorysné plochy kalového pole.....	75
Obrázek 37. Schematizace software pro výpočet investičních nákladů na výstavbu kalového pole a jejich návratnost.....	77
Obrázek 38. Grafický výstup vlhkosti z programu Hydrus.....	80
Obrázek 39. Průběh vlhkosti v pozorovacím bodě během sledovaného období.....	82
Obrázek 40. Porovnání vlhkosti naměřené a vypočítané programem Hydrus	82
Obrázek 41. Grafické znázornění rozložení spotřeby energie v modelové domácnosti (http://vitejtenazemi.cz).....	85
Obrázek 42. Kalové pole osazené rákosem obecným na konci vegetačního období na ČOV Dražovice (vlevo se skleníkovým přístřeškem, vpravo bez přístřešku)	92
Obrázek 43. Kalové pole bez přístřešku v zimním období, ČOV Dražovice.....	92
Obrázek 44. Kalové pole se skleníkovým objektem napuštěné kalem, ČOV Dražovice.....	93
Obrázek 45. Odvod vody drenážním systémem z kalových polí a následné čerpání zpět na ČOV, ČOV Dražovice	93
Obrázek 46. Aplikace primárního stabilizovaného kalu na reed-bed systém, ČOV Kotečnice	94
Obrázek 47. Reed-bed v Kotečnicích těsně po aplikaci kalu dne 2. 7. 2014 - zleva: bez vegetace, chrastice rákosovitá	94
Obrázek 48. Reed-bed v Kotečnicích těsně po aplikaci kalu dne 2. 7. 2014 - zleva: rákos obecný, orobinec úzkolistý	95
Obrázek 49. Reed-bed v Kotečnicích po 14 dnech: bez vegetace.....	95
Obrázek 50. Reed-bed v Kotečnicích po 14 dnech: chrastice rákosovitá	96

Obrázek 51. Reed-bed v Kotenčicích po 14 dnech: rákos obecný	96
Obrázek 52. Reed-bed v Kotenčicích po 14 dnech: orobinec úzkolistý.....	97
Obrázek 53. Reed-bed v Kotenčicích po 19 dnech: bez vegetace.....	97
Obrázek 54. Reed-bed v Kotenčicích po 19 dnech: chrastice rákosovitá	98
Obrázek 55. Reed-bed v Kotenčicích po 19 dnech: rákos obecný	98
Obrázek 56. Reed-bed v Kotenčicích po 19 dnech: orobinec úzkolistý.....	99
Obrázek 57. Zpracování kalu odebraného v Kotenčicích po 14 dnech, zleva: bez vegetace, chrastice rákosovitá, rákos obecný a orobinec úzkolistý.....	99
Obrázek 58. Kosení rákosu, celková pokosená plocha 6 x 7 metrů	100
Obrázek 59. Drcení rákosu pomocí řezacího šrotovníku	100
Obrázek 60. Rozdrcený rákos (rákosový šrot), dávkování do peletovací linky	101
Obrázek 61. Peletovací linka	101
Obrázek 62. Vyrobené pelety z rákosu obecného	102
Obrázek 63. Schéma možného uspořádání kořenové čistírny odpadních vod	103

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

KČOV	–	kořenová čistírna odpadních vod
ČOV	-	čistírna odpadních vod
ČSÚ	–	Český statistický úřad
R	–	koryto řeky, kde převládají vyvřeliny
Q	–	lom z uhličitánové horniny
SLR	–	velikost kalového zatížení
TS	–	sušina kalu
SL	–	kalové zatížení
VS	–	těkavé pevné látky
TC	–	koliformní bakterie
EC	–	elektrická vodivost
GI	–	index klíčení
TKN	-	celkový dusík podle Kjedahla
TP	–	celkový fosfor
W	-	vlhkost odvodňovaného kalu (%)
w ₁	-	vlhkost substrátu před aplikací kalu (%)
H	-	hloubka substrátu před aplikací kalu (m)
A _{KP}	-	půdorysná plocha kalového pole (m ²)
S _k	-	koncentrace sušiny aplikovaného kalu (%)
H _k	-	výška nového aplikovaného kalu (m)
V _d	-	odtok z drenáže (m ³)
H _d	-	dešťový úhrn za sledované období (mm)
E _p	-	teoretický výpar za sledované období (mm)
EO	–	ekvivalentní obyvatel
HLP	–	horizontální lapák písku
ŠN	–	šěrbinová nádrž
T	–	sledované období (dny)
E _{pr}	–	odhad úhrnu evapotranspirace (mm/rok)
E _{pd}	–	odhad denní evapotranspirace (mm/den)
W _p	–	teoretická vlhkost substrátu (%)
W _m	–	naměřená vlhkost substrátu (%)
S _t	–	teoretická koncentrace sušiny (%)

S_m	-	naměřená koncentrace sušiny (%)
T	-	délka sledovaného období (dny)
t	-	průměrná teplota ve sledovaném období ($^{\circ}\text{C}$)
φ	-	zeměpisná šířka daného území ($^{\circ}$)
t_D	-	průměrná teplota rosného bodu ($^{\circ}\text{C}$)
h	-	nadmořská výška (m)
CN	-	celkové náklady (Kč)
PVC	-	PVC fólie ($\text{kč}/\text{m}^2$)
A_{kp}	-	plocha kalového pole (m^2)
G	-	geotextilie $300\text{g}/\text{m}^2$ ($\text{Kč}/\text{m}^2$)
PR	-	počet rostlin (ks/m^2)
SR	-	sazenice rostliny ($\text{Kč}/\text{ks}$)
ZP	-	zemní práce ($\text{Kč}/\text{m}^3$)
H_{kp}	-	hloubka kalového pole (m)
CV	-	celkové náklady na vývoz kalu ($\text{Kč}/\text{rok}$)
EXP	-	cena za vývoz kalu na jinou ČOV ($\text{Kč}/\text{m}^3$)
V_{kc}	-	celkový objem kalu (m^3 kalu/rok)
NI	-	návratnost investice (roky)
CN	-	celkové náklady vložené do investice (Kč)
CV	-	celkové náklady na vývoz kalu ($\text{Kč}/\text{rok}$)

SUMMARY

In theoretical part is described the issue of waste produces at the root sewage treatment plants. Specifically this chapter deals with the types of waste which arise at root sewage treatment plants and then the options for handling this waste. It is focused on dewatering using wetland vegetation and research this type dewatering in foreign countries, particularly in Canada and Greece.

The practical part is divided into four parts. The first part deals with itemizing hydrological balance equation dewatering sludge using wetland vegetation, through which are calibrated values, which is the result of evapotranspiration in different types of sludge beds. The measurements were carried out at the sewage treatment plants in village Dražovice and Kotečnice. The second part focuses on the development of software, which is based on specific values from previous part. The software is divided into two schemes, where one will be able to calculate the moisture content of sludge in sludge bed and length of dewatering time. The second scheme will be able to calculate the required area sludge bed dependent population and investment costs and their return to the sludge beds inserted. The third part focused on a program Hydrus, where was performed modeling during the moisture in sludge bed using the measured values from Dražovice and comparing the measured values with the values resulting from the program. The last part deals with the processing of reed at the end of growing season. From reed were made pellets and their properties compared with the properties of pellets made from straw.