

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra aplikované ekologie



Diplomová práce

**Posouzení vlivu vegetace na účinnost
odstraňování živin z drenážních vod**

Vedoucí práce: prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Diplomant: Bc. Jakub Láska

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Láska

Krajinné inženýrství

Název práce

Posouzení vlivu vegetace na účinnost odstraňování živin z drenážních vod

Název anglicky

Evaluation of the effect of vegetation on nutrient removal from tile drainage

Cíle práce

1. Charakterizovat umělé mokřady pro čištění odpadních vod.
2. Shrnout dosavadní poznatky při využití umělých mokřadů pročištění drenážních vod ze zemědělských ploch.
3. Popsat experimentální mokřady pro čištění drenážních vod v lokalitě Velký Rybník u Humpolce.
3. Stanovit množství živin, které je odstraněno akumulací v biomase rostlin.

Metodika

V první části práce bude provedena rešerše v oblasti využití umělých mokřadů pro odstraňování živin z drenážních vod. Další část práce bude obsahovat určení nadzemní biomasy rostlin na experimentálních mokřadech v lokalitě Velký Rybník u Humpolce. V biomase bude určena koncentrace dusíku a fosforu a bude vypočítán podíl živin kumulovaných v biomase na celkovém množství odstraněných živin.

Doporučený rozsah práce

60 stran včetně příloh

Klíčová slova

drenážní vody, fosfor, dusík, makrofyta

Doporučené zdroje informací

- Borin, M., Tocchetto, D., 2007. Five year water and nitrogen balance for a constructed surface flow wetland treating agricultural drainage waters. *Science of the Total Environment* 280: 38-47.
- Greenway, M., de Rozari, P., El Hannadeh, A., 2022. Plant growth and nutrient accumulation in *Melaleuca quinquenervia* and *Cymbopogon citratus* treating high strength sewage effluent in constructed wetland systems with biochar media. *Ecological Engineering* 180, 106667.
- Maucieri, C., Salvato, M., Borin, M., 2020. Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands. *Ecological Engineering* 152, 105853.
- Rodriguez, M., Brisson, J., 2016. Does the combination of two plant species improve removal efficiency in treatment wetlands? *Ecological Engineering* 91: 302-309.
- Tanner, C.C., J.S. Clayton, Upsdell, M.P., 1995. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands. II. Removal of nitrogen and phosphorus. *Water Research* 29: 27-34.
- Vymazal, J., Dvořáková Březinová, T., 2018. Treatment of a small stream impacted by agricultural drainage in a semi-constructed wetland. *Science of the Total Environment* 643: 52-62.
- Vymazal, J., 2020. Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting – Biomass and load matter the most. *Ecological Engineering* 155: 105962.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FŽP

Vedoucí práce

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 28. 2. 2023

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 3. 2023

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Posouzení vlivu vegetace na účinnost odstraňování živin z drenážních vod“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 31.03.2023

Bc. Jakub Láska

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Janu Vymazalovi, CSc. za cenné rady, odborné připomínky a čas, který mi věnoval. Dále děkuji své rodině a přítelkyni za podporu a velikou trpělivost při studiu.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřená na posouzení vlivu vegetace v umělých mokřadech na účinnost odstraňování živin z drenážních vod v zemědělském povodí. Na třech umělých mokřadech s různým typem filtračního materiálu byly naměřeny koncentrace dusíku a fosforu před a po průchodu filtračním materiálem. V letech 2021 a 2022 proběhl sběr biomasy, v které bylo stanoveno množství dusíku a fosforu. Výsledky ukázaly, že účinnost odstraňování dusíku a fosforu byla značně ovlivněna typem filtračního materiálu v mokřadu. Tyto výsledky naznačují, že typ filtračního materiálu a vegetace může hrát klíčovou roli při odstraňování dusíku a fosforu z drenážních vod ze zemědělského povodí. Tento výzkum může poskytnout užitečné poznatky pro navrhování a správu umělých mokřadů jako účinného a udržitelného řešení pro snižování znečištění drenážních vod v zemědělských oblastech.

Klíčová slova: drenážní vody, fosfor, dusík, makrofyta

Abstract

This thesis focused on assessing the impact of vegetation in constructed wetlands on the efficiency of nutrient removal from agricultural drainage water. Concentrations of nitrogen and phosphorus were measured before and after passing through different types of filter material in three constructed wetlands. Biomass was collected in 2021 and 2022, and the amounts of nitrogen and phosphorus were determined. The results showed that the efficiency of nitrogen and phosphorus removal was significantly influenced by the type of filter material in the wetland. These findings suggest that the type of filter material and vegetation may play a crucial role in removing nitrogen and phosphorus from agricultural drainage water. This research can provide useful insights for designing and managing constructed wetlands as an effective and sustainable solution for reducing pollution from agricultural drainage water in rural areas.

Keywords: drainage water, phosphorus, nitrogen, macrophyte

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíle práce	2
3 Literární řešerše	3
3.1 Mokřady	3
3.1.1 Přirozené mokřady	4
3.1.2 Umělé mokřady	4
3.1.3 Kořenové čistírny odpadních vod	5
3.2 Vegetace	7
3.2.1 Chrastice rákosovitá	7
3.2.2 Zblochan vodní	8
3.2.3 Orobinec širokolistý	8
3.2.4 Vrbovka chlupatá	8
3.2.5 Rákos obecný	9
3.3 Živiny	9
3.3.1 Fosfor	10
3.3.2 Dusík	11
3.4 Umělé mokřady pro čištění drenážních vod.....	11
4 Metodika	13
4.1 Popis zájmového území.....	13
4.2 Popis mokřadních systémů.....	14
4.3 Sběr nadzemní biomasy	17
4.4 Zpracování vzorků a dat.....	19
5 Výsledky práce	21
5.1 Rok 2021	21
5.1.1 Mokřad M1	21
5.1.2 Mokřad M2	24
5.1.3 Mokřad M3	26
5.1.4 Roční eliminace živin	29
5.2 Rok 2022	32
5.2.1 Mokřad M1	32
5.2.2 Mokřad M2	35
5.2.3 Mokřad M3	37
5.2.4 Roční eliminace živin	40

6	Diskuse	44
7	Závěr.....	46
8	Seznam použitých zdrojů	48
9	Přílohy	54

1 Úvod

V druhé polovině minulého století došlo na území České republiky ke zmizení spousty významných biotopů (remízky, mokřady, nivní louky). Hlavně z důvodu rozšiřování průmyslových areálů, výstavbě dálnic a silnic došlo k významnému zásahu do krajiny. Tento zásah do krajiny má za následek negativní dopady na přírodu i živočichy (Pullinger & Johnson, 2010). Vytváření velkých zemědělských ploch a současný trend hnojení pěstovaných plodin v kombinaci s velkými přivalovými dešti mají za následek smyv jemné zemědělské půdy, znečištění drenážních vod a následné zhoršení kvality malých i velkých toků (Foley et al., 2005).

Umělé i přirozené mokřady pomáhají vyrovnávat poměry podzemních vod, čistit odpadní i drenážní vody, účinně pomáhají v boji s povodněmi, a hlavně dokážou efektivně zadržovat vodu v krajině (Pokorný, 2004). Nedílnou součástí každého mokřadu je přítomnost vegetace, která plní spoustu funkcí, její hlavní funkce je absorpce velkého množství živin a toxických látek.

Mokřady zajišťují správné fungování krajiny. Tyto samostatné ekosystémy jsou ekotony souše a vody a skýtají domov pro mnoho živočišných i rostlinných druhů (Gallant, 2015). Mnohdy se na mokřadech vyskytují ohrožené rostliny nebo poskytují stanoviště pro ohroženou avifaunu. S vymizením těchto stanovišť by vymizeli i druhy na ně vázané.

Tato práce popisuje vliv vegetace umělých mokřadů na účinnost odstraňování dusíku a fosforu drenážních vod ze zemědělských ploch.

2 Cíle práce

Diplomová práce na téma „Posouzení vlivu vegetace na účinnost odstraňování živin z drenážních vod“. Má za cíl jasně a srozumitelně charakterizovat umělé i přírodní mokřadní systémy určené pro čištění odpadních vod i vod ze zemědělského povodí, shrnout dosavadní poznatky o umělých mokřadech a určit důležitost vegetace nacházející se na mokřadních systémech. V práci budou zmíněny živiny, které se na umělé mokřady dostávají ze zemědělských povodí v důsledku hnojení.

Následně má práce za cíl popsat experimentální mokřady, které se nachází v obci Velký Rybník a charakterizovat velikosti jednotlivých mokřadů, filtrační materiál, výšku hladiny a vegetaci, která se na umělých mokřadech nachází.

Poslední a nejdůležitější cíl diplomové práce je stanovit množství živin, které je odstraněno akumulací v biomase rostlin. Konkrétně bude v biomase bude určena koncentrace fosforu a dusíku.

Důležitost vegetace na umělých mokřadech je již mnoho studiemi dokázána. Tato diplomová práce by měla benefity vegetace potvrdit a následně určit jaké konstrukční řešení mokřadu je účinnější pro odstraňování živin z drenážních vod ze zemědělského povodí v našich klimatických podmínkách.

3 Literární rešerše

3.1 Mokřady

Ministerstvo životního prostředí definuje mokřad podle Ramsarské úmluvy takto: *„území bažin, slatin, rašelinišť i území pokrytá vodou, přirozeně i uměle vytvořená, trvalá či dočasná, s vodou stojatou či tekoucí, sladkou, brakickou či slanou, včetně území s mořskou vodou, jejíž hloubka při odlivu nepřesahuje šest metrů“* (MŽP ©2023).

Mitsch a Gosseling (2015) definují mokřady podle tří znaků. Mokřad (angl. wetland) se vyznačuje přítomností vody jak na povrchu, tak v kořenové zóně a často se zde vyskytují unikátní půdní podmínky. Zároveň se vyznačuje výskytem hydrofytů, což je vegetace adaptovaná na vlhkost.

Mokřady jsou považovány za velice ceněné a produktivní biotopy, z vodohospodářského hlediska jsou velmi významné především díky jejich schopnosti aktivně zadržovat vodu v krajině (Pokorný, 2004). Mokřady vytváří tzv. ekotony, což jsou hraniční ekosystémy mezi souší a vodou. Vyskytují se také na plochách s kolísající hladinou vody (podzemní i nadzemní), proto je často obtížné určit přesnou hranici mokřadu (Čížková et al., 2017).

Na našem území je definováno celkem 16 typů mokřadů podle AOPK ČR (©2023):

- tok, úsek toku;
- nivní jezero, mrtvé rameno, tůň;
- jiné vodní a bažinné biotopy;
- lužní les, či jiné mokřadní lesy;
- pramen, prameniště;
- zaplavovaná nebo mokrá louka;
- rákosina, ostřicová louka;
- rašeliniště a slatiniště;
- průmyslová odkalovací nádrž;
- horské jezero;
- slanisko;
- kanál, stoka, příkop;
- rybník, klausura;

- lom, štěrkovna, pískovna;
- soustava rybníků;
- údolní nádrž.

Jedno z hlavních rozdělení mokřadů souvisí hlavně s jejich vznikem. Jedná se o mokřady přirozené a mokřady umělé. I přes jejich rozdílný způsob vzniku se vždy jedná o velice unikátní biotopy, v kterých se nachází mnoho vzácných společenstev (Štech et al., 2007).

3.1.1 Přirozené mokřady

Přirozené mokřady byly lidmi až do 60. let 20. století považovány za bezcenné biotopy (Vymazal, 2004). Mokřady se nachází na pomezí souše a vody a jsou pro ně charakteristické vlastnosti obou míst, díky tomu se zde nachází velké množství hydrologických a ekologických jevů (Gallant, 2015). Využívání přirozených mokřadů k čištění odpadních vod je běžné již mnoho desítek let. Bohužel neexistoval žádný systém kontroly a v mnohých případech šlo spíše o neřízené vypouštění odpadních vod, čímž docházelo k devastaci velkých mokřadních ploch (Vymazal, 2004).

Přirozené mokřady se vyznačují vyšším množstvím obsahu uhlíku v půdě než u uměle vytvořených mokřadů. Zároveň se v umělých mokřadech nachází mnohem větší množství hornin a průměrná objemová hustota je v přirozených mokřadech poloviční (Campbell et al., 2002).

3.1.2 Umělé mokřady

Umělé mokřady jsou vytvořeny za účelem čištění odpadních, či drenážních vod. K jejich vědomému využívání dochází již přes 40 let, přičemž v České republice je nejrozšířenější mokřad s horizontálním podpovrchovým průtokem (Vymazal et al., 2014). Při navrhování umělého mokřadu je největší důraz kladen na biologické, chemické a ekologické procesy, které probíhají v přirozených mokřadech. K rozdělování umělých mokřadů lze použít mnoho kritérií, ale nejrelevantnější je způsob průtoku odpadní vody a druh použité vegetace. Dle druhu vegetace lze umělé mokřady rozdělit na mokřady s:

- plovoucí vegetací;
- ponořenou vegetací;
- vynořenou vegetací;
- rostlinami s plovoucími listy.

Mokřady s vynořenou vegetací lze dále rozdělovat podle přítomnosti vodní hladiny. Pokud je u mokřadu přítomna vodní hladina, jedná se o systém s povrchovým tokem, naopak umělý mokřad s podpovrchovým tokem je systém bez přítomnosti volné hladiny (Vymazal, 2013 a).

Většina umělých mokřadů určených pro odstraňování živin ze zemědělských drenážních vod byla navržena s volnou vodní hladinou a hlubší přítokovou sekcí pro usazený sediment (usazený sediment většinou vzniká po vydatných přívalových deštích s rychlým povrchovým odtokem). Hlubší část má většinou 1–2 m a často je zde udělaná taková technická úprava, aby bylo možné odstraňovat usazený sediment. Vegetační část umělého mokřadu je obvykle mělký příkop, kde se vodní hladina pohybuje od 10 do 50 cm (Kadlec & Wallace, 2009; Vymazal, 2013b). K nejvyšší účinnosti odstraňování organických látek, živin a nerozpuštěných látek dochází u umělých mokřadů při trvalém zaplavování mokřadu (Vymazal & Dvořáková Březinová, 2018).

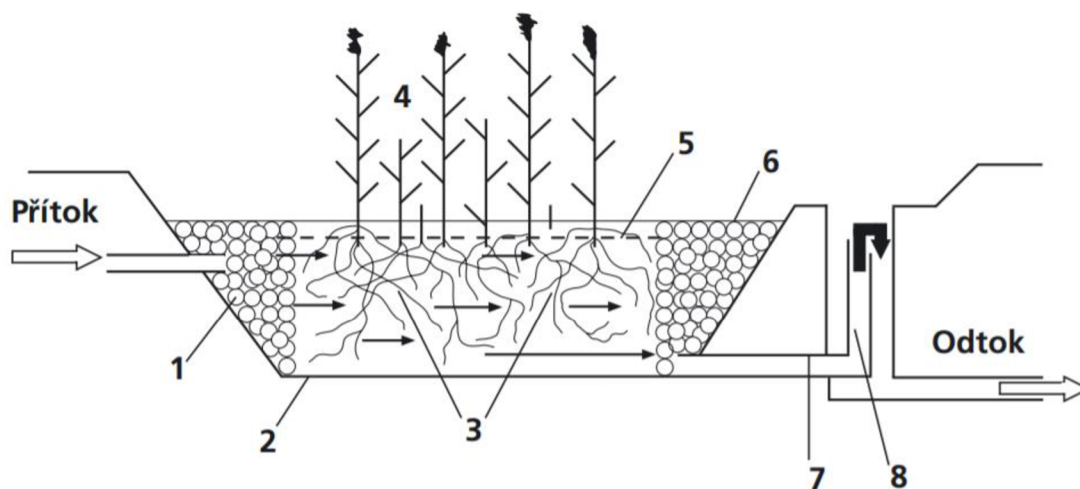
Brix (1993) říká, že umělé mokřady před mokřady přirozenými mají výhodu hlavně v rozměrové flexibilitě, výběrem lokality, nebo možností volby filtračního materiálu a doby zdržení vody. Účinnost odstraňování dusíku a fosforu je v umělých mokřadech větší než v mokřadech přirozených (Tanner et al., 1995).

3.1.3 Kořenové čistírny odpadních vod

Označení kořenová čistírna (dále KČOV) vzniklo z anglického názvu „root zone method“, což byl název pro umělý mokřad s podpovrchovým horizontálním průtokem v 70. a 80. letech minulého století. Právě horizontální průtok vody přes propustný substrát s vlhkostními mokřadními rostlinami je charakteristický pro kořenové čistírny. Následně dochází pomocí kombinace fyzikálních, chemických a biologických procesů k čištění vody, která se na KČOV dostává (Vymazal, 2004).

Kořenové čistírny mají vysokou účinnost odstraňování organického a bakteriálního znečištění (Mlejnská et al., 2015). Pro čištění odpadních vod pomocí KČOV je vždy nutné

mechanicky předčistit vodu před přivedením na filtrační lože. V případě, že by nedošlo k mechanickému předčištění, nedochází k odstraňování nerozpuštěných látek a následně hrozí ucpání filtračního lože. Poté voda přiteče na filtrační lože, které má hloubku 60 až 80 cm a je nutné, aby bylo vyplněno dostatečně propustným substrátem. Je vhodné používat pouze jeden typ substrátu, neboť při použití více typů může docházet k nedokonalému promísení, a to vede ke zkratkovým proudům. Nejčastěji se využívá kačírek o zrnitosti 4/8 nebo 8/16, praný štěrk a drcené kamenivo stejné frakce. Zároveň je důležité používat pouze prané materiály, které neobsahují žádný prach nebo zbytky zeminy. Dno filtračního lože je potřeba obalit nepropustnou vrstvou, nejčastěji se jedná o plastovou fólii (PE, PVC). Voda, která proteče filtračním ložem se dostává do sběrné potrubí, které je ve výpustné šachtě spojeno s výpustním mechanismem, v němž lze nastavovat výšku vodní hladiny ve filtračním loži. Výška hladiny lze nastavovat pomocí plastové trubky nebo lze použít flexibilní hadici zavěšenou na řetízích. V běžných provozních podmínkách se výška hladiny vody nechává 5-10 cm pod povrchem filtračního lože (Čížková et al., 2017). Schéma typického uspořádání kořenové čistírny s horizontálním průtokem vody můžeme vidět na obrázku 1.



Obr. 1: Typické uspořádání kořenové čistírny (Vymazal, 2004).

1 – distribuční zóna (kamenivo, 50-200 mm), 2 – nepropustná bariéra (PE nebo PVC), 3 – filtrační materiál (kačírek, štěrk, drcené kamenivo), 4 – vegetace, 5 – výška vodní hladiny v kořenovém loži nastavitelná v odtokové šachtě, 6 – odtoková zóna (shodná s distribuční zónou), 7 – sběrná drenáž, 8 – regulace výšky hladiny

3.2 Vegetace

Výběr druhu vegetace a počet rostlinných druhů použitých na umělém mokřadu může ovlivnit jeho účinnost (Brisson & Chazarenc, 2009). Mezidruhová diverzita v umělém mokřadu má za následek zvýšení tolerance vůči měnícím se podmínkám a také zvyšuje stabilitu v biochemických procesech (Rodriguez & Brisson, 2016 ex. Eviner and Chapin, 2003).

Podle Brisson & Chazarenc (2009) se výběr vhodných rostlinných druhů na mokřad řídí podle následujících kritérií:

- rychlost růstu;
- rychlost uchycení;
- preferovat rostliny s klonálním rozmnožováním;
- velké množství biomasy;
- dobře vyvinutý kořenový systém;
- dobrá tolerance mokřadních podmínek.

V mokřadech se vyskytuje hydrofytní vegetace, což jsou rostlinné druhy, které jsou schopné růst i v zamokřené půdě (Vymazal, 2004). Čížková et al. (2017) říkají, že vegetace v kořenových čistírnách plní čtyři nezastupitelné funkce:

- zatepluje povrchové lože
- díky kořenům a oddenkům vzniká podklad pro přisedlé bakterie, které se podílejí na odstranění znečištění
- do filtračního lože difunduje z kořenů kyslík, který není spotřebován na respiraci a který je nutný pro aerobní procesy
- poutají minerální živiny

3.2.1 Chrastice rákosovitá

Chrastice rákosovitá (*Phalaris arundinacea*) patří do čeledi lipnicovitých. Dorůstá výšky 30–220 cm a tím se řadí mezi nejvyšší trávy v ČR (Navratilova & Patočka, 2015). Jedná se o statnou a vytrvalou travu, která se běžně vyskytuje v České republice. Zároveň je původním druhem i v celé Evropě, Severní Americe a Asii. Chrastice roste hojně na březích

stojatých i tekoucích vod, na vlhkých mokřadních loukách a v podrostu lužních lesů. Díky charakteristickým vlastnostem jako je vlhkomilnost, rychlost růstu a tolerance na znečištění je velice často využíván k osazování v kořenových čističkách. Vzácněji se můžeme setkat s využitím této rostliny jako píce pro dobytek (právě díky rychlému a velkému množství tvorby biomasy), ale kvůli vysokému obsahu jedovatých alkaloidů, a dokonce i halucinogenního dimethyltriptaminu (DMT) se s tímto využitím setkáme opravdu zřídka (Baldini, 1995).

3.2.2 Zblochan vodní

Zblochan vodní (*Glyceria maxima*) je zástupcem čeledi lipnicovitých. Tato vlhkomilná, vytrvalá tráva se dorůstá obvykle 80-200 cm (Jírová, 2007). Vyznačuje se velice dlouhým vegetačním obdobím. Zblochan roste na místech s vodní hladinou 0-50 cm, nejčastěji ho můžeme nalézt na březích stojatých a pomalu tekoucích vod, rybnících, tůních a v slepých ramenech řek. Uměle vysazovaný zblochan se užívá pro zpevňování nestálých a vlhkých břehů a jako okrasná tráva v rybnících v městských parcích (Schimana, 2007).

3.2.3 Orobinec širokolistý

Orobinec širokolistý (*Typha latifolia*) je rostlina z čeledi orobincovitých, která je rozšířená napříč celým světem. Jedná se o travu, která se dorůstá 100-200 cm (Spohn et al., 2016). Nejčastěji se vyskytuje v tropických a mírných mokřadech, jezerech a řekách. Zároveň se jedná o velice vytrvalá emergentní makrofyta (Bonanno & Cirelli, 2017).

3.2.4 Vrbovka chlupatá

Vrbovka chlupatá (*Epilobium hirsutum*) je vytrvalá bylina z čeledi pupalkovitých. Dorůstá se výšky až 150 cm, má čtyřčetné, 2-3 cm široké květy v úžlabí listů a kvete sytě růžově. Roste i ve znečištěných vodách, a proto se velice často vyskytuje v mokřadních systémech. V České republice se vyskytuje velice hojně a typicky ji můžeme nalézt na okrajích stojatých i tekoucích vod, zaplavovaných luk, kanálů, pobřežních křovin a lužních

niv. Velice často je součástí mokřadní vegetace, kde se může vyskytovat jak jednotlivě, tak ve skupinách (Smejkal, 1997; Spohn et al., 2016).

3.2.5 Rákos obecný

Rákos obecný (*Phragmites australis*) je stálá a velice vytrvalá tráva. Dutá, silná stébla jsou dvouřadě olistěna a mají šířku až 15 mm. Rostlina dorůstá okolo 400 cm, ale jsou zmapováni i jedinci, kteří dosahují výšky 800 cm. Jedná se o kosmopolitně rozšířený druh, který se přirozeně nevyskytuje jen na Islandu. V České republice je velice hojně zastoupen. Roste především na březích stojatých a pomalu tekoucích vod, na okrajích rašelinišť, ve vlhkých příkopech. Lze ho vysazovat pro zpevnění břehů a podporuje zazemňování vod. Rákos obecný je dominantou mokřadních ekosystémů. Díky jeho schopnosti klonálního rozmnožování se jedná o velice expanzivní druh a často vytlačuje méně konkurenčně zdatné druhy (Spohn et al., 2016; Dostál, 1989; Meyerson et al., 2016).

3.3 Živiny

K nejvyšší účinnosti odstraňování organických látek, živin a nerozpuštěných látek dochází u umělých mokřadů při trvalém zaplavování mokřadu (Vymazal & Dvořáková Březinová, 2018). Vymazal (2016) uvádí, že neexistuje přímá závislost mezi zadrženým množstvím fosforu a dusíku a poměrem plochy mokřadu a plochy povodí. Množství živin zadržených v umělých mokřadech určených pro čištění drenážních vod může být značně ovlivněno skladbou půdního substrátu, druhem vegetace, a hlavně případným sklízením vegetace.

Nejvýznamnější fyzikálně-chemický proces, ke kterému dochází, je vazba látek na filtrační materiál. Důležitá je vazba fosforu na sloučeniny železa, hliníku nebo manganu. Právě zmíněný fosfor je pro vegetaci umělého mokřadu velice těžké odstraňovat, a proto je důležité vybrat vhodný typ filtračního materiálu a významně ovlivnit účinnost odstraňování fosforu (popř. jiných potřebných látek). U každého druhu filtračních materiálů můžeme sledovat vlastnosti jako (Mlejnská & Rozkošný, 2016):

- zrnitost;
- odolnost;
- mrazuvzdornost materiálu;
- struktura materiálu;
- textura zrn;
- chemické složení;
- měrná a objemová schopnost;
- obsah vyluhovatelných částic;
- hydraulická vodivost;
- pórovitost;
- dostupnost materiálu.

Každá lokalita je specifická, stejně tak jako voda, která do umělého mokřadu přiteče, a tak nelze tabulkově určit, které filtrační lože, či jaká vegetace by byla ideální pro danou lokalitu. Biologickým procesům v umělých mokřadech napomáhá především vegetace. Právě výběr vhodné vegetace má velký význam na odstraňování celkového dusíku. Umělé mokřady osázené emerzní vegetací dosahují mnohem větší účinnosti odstraňování celkového dusíku, než umělé mokřady se submerzní vegetací (Toet et al., 2005). Vymazal et al. (2021) říkají, že výběr makrofyt je podstatný pro odstraňování znečišťujících látek, při čemž vliv makrofyt je nepřímý (poskytnutí kyslíku rhizosféře, vazba bakterií na kořenovou část rostlin). Klíčovou roli při odstraňování organických látek a dusíku z odpadních vod hrají právě bakterie.

3.3.1 Fosfor

Fosfor jako takový je základní limitující živina v zemědělství, ale díky lidské činnosti se rapidně zvýšilo množství fosforu, které je ve vodách. Právě přebytek fosforu ve vodách může za přemnožení mikroorganismů (hlavně sinic) a následně dochází k charakteristickému zelenému zbarvení vod, které nazýváme tzv. vodní květ. Právě zmíněné kvetení vod má za následek nedostatek kyslíku ve vodě a ztížení růstu vodních rostlin. Nekontrolované vypouštění fosforu do přírody je často prvotní spouštěč pro mnoho dalších negativních dopadů na životní prostředí (EEC, 1998). Umělé mokřady jsou účinnou

přírodní technologii pro čištění vod s přebytkem fosforu (Józwiakowski et al., 2019; Maucieri et al., 2020). Účinnost odstraňování fosforu se pohybuje od 25 % (Toscano et al., 2015) do 48 % (Vymazal, 2007).

3.3.2 Dusík

Studie z roku 2007, která měla za úkol pozorovat účinnost odstraňování dusíku z drenážních vod na umělém mokřadu ukázala, že obsah dusíku na odtoku byl snížen zhruba o 90 % oproti přitékajícímu množství dusíku ze zemědělských ploch. Většina zmizení byla zapříčiněna akumulací dusíku ve vegetaci a půdě (Borin & Tocchetto, 2007). Nicméně velikost umělých mokřadů byla 5 % z celkové plochy povodí, což je relativně velká plocha ve srovnání s ostatními mokřady použity pro čištění drenážních vod (Kovacic et al., 2000), avšak správné umístění několika malých mokřadů po zemědělské oblasti by plnilo stejnou funkci odstraňování dusíku jako jeden velký mokřad. Tato podmínka samozřejmě platí za předpokladu, že by malé mokřady zachytily dostatečné množství vody ze zemědělské drenáže (Crumpton, 2001).

3.4 Umělé mokřady pro čištění drenážních vod

Umělé mokřady byly na počátku 90. let navrženy jako vhodný nástroj k odstraňování dusíku ze zemědělské drenáže (Mitsch, 1992; Van der Valk & Jolly 1992). Většina umělých mokřadů určených pro odstraňování živin z drenážních vod byla vybudována s otevřenou vodní hladinou (Kadlec & Wallace, 2009; Tanner & Sukias, 2011).

Kvůli soustavné zemědělské činnosti vzniká značné znečištění dusíkem a fosforem v přírodě. Voda ze zemědělských ploch stékají přímo do přírodních řek anebo jsou pomocí odvodňovacích kanálů do nich svedeny (Borin & Tocchetto, 2007). Samočisticí schopnosti vody pomocí vegetace a půdy se výrazně snížila v důsledku úbytku přirozených mokřadů a malých přírodních toků (Vought & Lacoursière, 2010). Právě z tohoto důvodu je nutné odstraňovat přebytečné množství nežádoucích látek z vod odtékajících ze zemědělsky obhospodařovaných půd. Jak je patrné z mnoha mezinárodních výzkumů, tak právě umělé mokřady jsou efektivním způsobem odstraňování těchto látek (Kadlec & Wallace, 2009).

Bylo prokázáno, že mnoho biologických, chemických a environmentálních procesů probíhá v mokřadech spolu s odstraňováním živin (Olson, 1992; Romero et al., 1999).

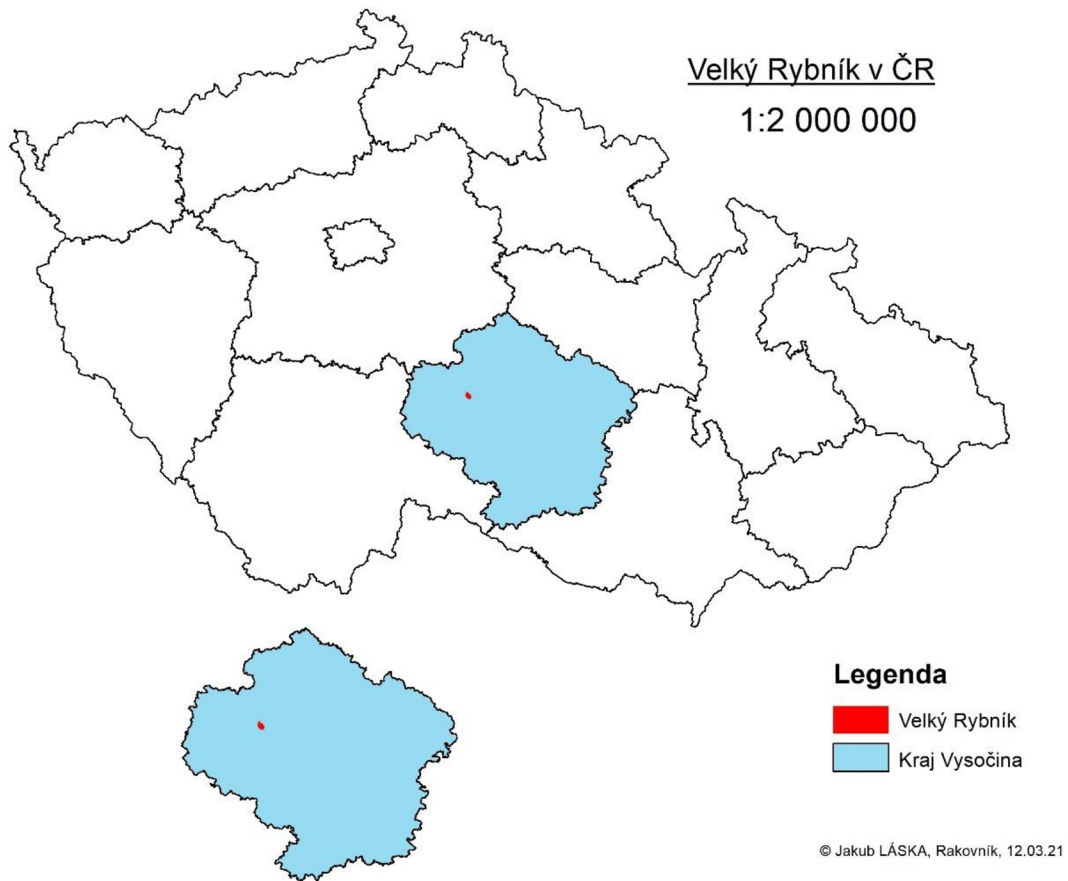
Mitsch (1992) definoval základní principy, které mají být použity při výstavbě umělých mokřadů určených k odstraňování znečištění z drenážních vod. Měly by:

- vyžadovat minimální údržbu
- využívat přírodní energii
- být navrženy tak, aby zapadaly do krajiny
- být navrženy s více využitími a fungovat jako ekoton
- být navrženy pro funkci, nikoli pro formu
- nebýt přetechnizovány
- mít dostatek času na vývoj

4 Metodika

4.1 Popis zájmového území

Tři umělé mokřady postavené pro čištění drenážních vod se nacházejí u obce Velký Rybník nedaleko Humpolce (Obr. 2). Výstavba umělých mokřadů započala v roce 2017 a provoz byl zahájen v srpnu 2018. Mokřady byly vybudovány v rámci projektu, na kterém se podílela i Česká zemědělská univerzita v Praze společně s Výzkumným ústavem meliorací a ochrany půd a firmou Dekonta. Do těchto tří umělých mokřadů odtéká voda z povodí o rozloze 15,73 ha. Z celého povodí je 9,85 ha pod zemědělskou drenáží.

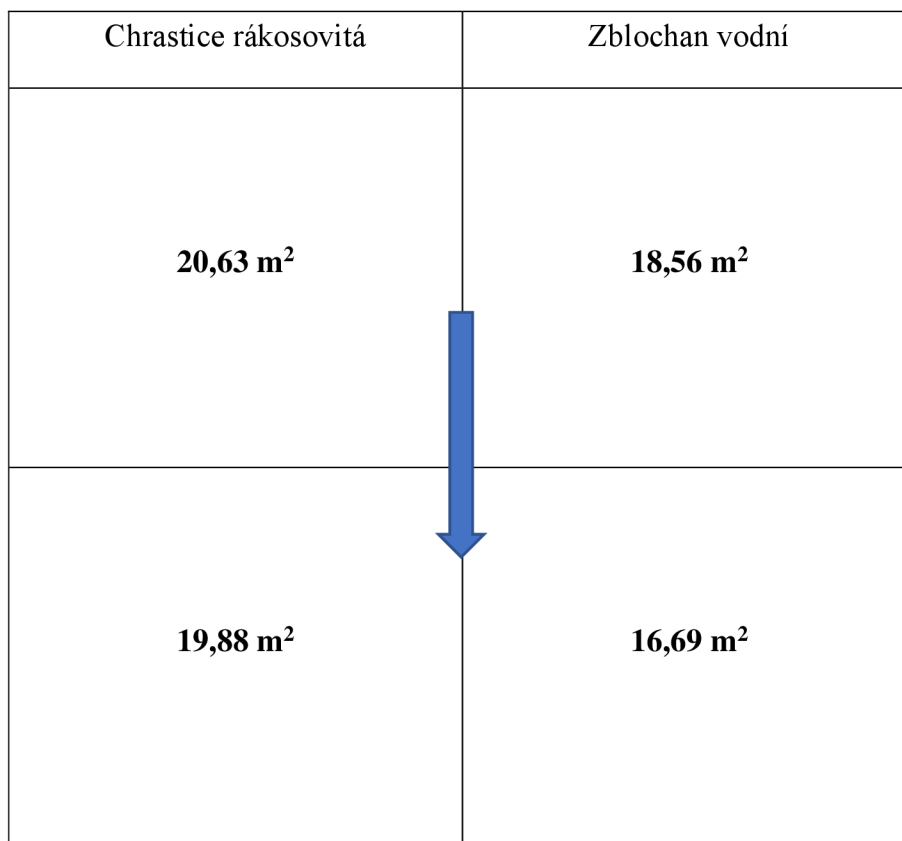


Obr. 2: Obec Velký Rybník na mapě ČR (zdroj: Láska, 2021).

4.2 Popis mokřadních systémů

Mokřad M1 má celkovou rozlohu 78,76 m². Jedná se o lichoběžníkový tvar s rozměry 5,2 metrů na přítoku, 5,3 metrů na odtoku a délce 15 metrů. Mokřad byl rozdělen na přítokovou polovinu a polovinu odtokovou. Následně se části dělí na část s chrasticí rákosovitou a část se zblochanem vodním. Schématické znázornění mokřadu M1 i se směrem vodního toku lze vidět na obrázku 3.

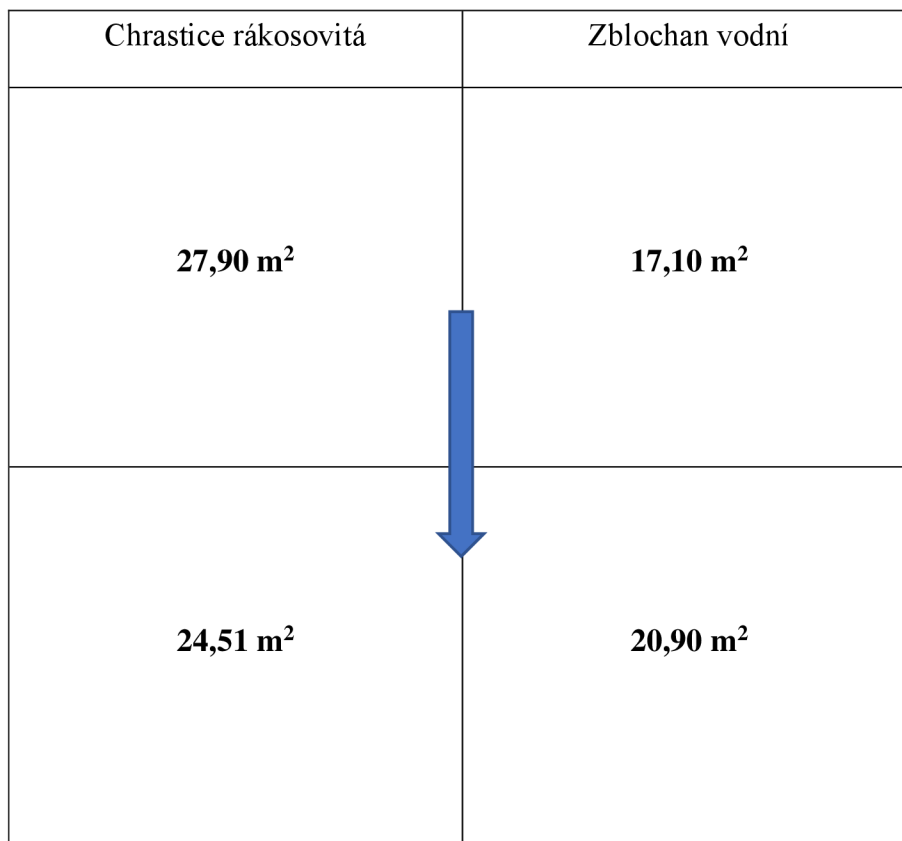
Hloubka mokřadu je 1 metr a filtrační materiál je drcené kamenivo (frakce 4-8 mm) ve směsi (10:1) s březovou štěpkou. Hladina vody je trvale udržována 10 cm nad povrchem filtračního materiálu.



Obr. 3: Schématické znázornění mokřadu M1 (šipka znázorňuje směr vodního proudění).

Mokřad M2 má celkovou rozlohu 90,41 m². Jedná se o lichoběžníkový tvar s rozměry 5,9 metrů na přítoku, 6,0 metrů na odtoku a délce 15,2 metrů. Mokřad byl rozdělen na přítokovou polovinu a polovinu odtokovou. Následně se části dělí na část s chrasticí rákosovitou a část se zblochanem vodním. Schématické znázornění mokřadu M2 i se směrem vodního toku lze vidět na obrázku 4.

Hloubka umělého mokřadu je 1 metr a jako filtrační materiál je použito drcené kamenivo (frakce 4-8 mm) ve směsi (10:1) s březovou štěpkou (shodně jako u mokřadu M1). Hladina vody je trvale udržována 5 cm pod povrchem filtračního materiálu.



Obr. 4: Schématické znázornění mokřadu M2 (šipka znázorňuje směr vodního proudění).

Mokřad M3 má celkovou rozlohu 97,93 m². Jedná se o lichoběžníkový tvar s rozměry 6,6 metrů na přítoku, 6,2 metrů na odtoku a délce 15,3 metrů. Mokřad byl rozdělen na přítokovou polovinu a polovinu odtokovou. Následně se části dělí na část s Chrasticí rákosovitou a část se Zblochanem vodním. Schématické znázornění mokřadu M3 i se směrem vodního toku lze vidět na obrázku 5.

Má shodnou hloubku 1 metr, ale rozdíl je v použitém filtračním materiálu, konkrétně se jedná o drcené kamenivo (frakce 4-8 mm) převrstvené 20 cm vrstvou březové štěpky. Hladina vody je trvale udržována 10 cm nad povrchem filtračního materiálu.

Chrastice rákosovitá	Zblochan vodní
19,13 m²	30,6 m²
17,6 m²	30,6 m²

Obr. 5: Schématické znázornění mokřadu M3 (šipka znázorňuje směr vodního proudění).

Všechny mokřady jsou osázeny chrasticí rákosovitou a zblochanem vodním v paralelních pruzích viz. Obr. 6 (Vymazal et al., 2020). Obrázek 7 ukazuje stejný mokřad po dvou letech.



Obr. 6. Umělý mokřad M2 v roce 2020 (Foto J. Vymazal).



Obr. 7. Umělý mokřad M2 v roce 2022.

4.3 Sběr nadzemní biomasy

Odběr biomasy probíhal v roce 2021 i 2022 na přelomu července a srpna. Mokřady byly vždy rozděleny na přítokovou (PŘ) a odtokovou (OD) část.

V roce 2021 byl odběr biomasy prováděn pomocí čtverců o velikosti 50 x 50 cm (Obr. 8). Sklizeno bylo celkem 36 čtverců. Pro každou rostlinu tři vzorky na odtokové části a tři vzorky na přítokové části mokřadu. Stejný postup byl aplikován na všechny mokřady identicky. Odběr rostlin probíhal na úrovni povrchu mokřadu a plocha jednoho čtverce činila 0,25 m², což je dostatečná plocha pro odběr homogenního porostu emerzních rostlin (Richardson & Vymazal, 2001)



Obr. 8: Odběr biomasy z plochy 0,25 m².

Odběr vzorků v roce 2022 byl prováděn odlišnou metodou. Na přítoku i odtoku byl sklizen metr široký pruh biomasy vedoucí z levé strany mokřadu na pravou (Obr. 9). Tento postup byl aplikován na všechny tři mokřady, tudíž bylo sklizeno celkem šest pruhů biomasy. Ta byla na místě zvážena a rozdělena na požadované části (viz. kap. 3.4). Následně se biomasa odvezla do laboratoří ČZU na další testování.



Obr. 9: Odběr biomasy v roce 2022.

Testovací vzorky byly rozděleny podle mokřadu (M1/M2/M3), umístění na mokřadu (přítoková/odtoková část), druh rostliny (zblochan vodní/chrastice rákosovitá) a podle části rostliny (stonek/list/květ/standing litter). Standing litter jsou spodní odumřelé listy, které jsou ještě přirostlé na živý stonek.

4.4 Zpracování vzorků a dat

Stanovení fosforu v biomase bylo provedeno po mineralizaci pomocí kyseliny dusičné a kyseliny chloristé (Sommers & Nelson 1972). Finální měření bylo prováděno na spektrofotometru Cary 60 UV-Vis od společnosti Agilent podle ČSN EN ISO 6878.

Stanovení celkového dusíku bylo provedeno přímou spalovací metodou na přístroji Skalar - PRIMACS SNC Analyzer (Breda, Nizozemí).

Průtok vyčištěné vody byl měřen kontinuálně průtokoměry firmy Fiedler. Jednotlivá měření jsou prováděna každých deset minut. Pro výpočty byly použity průtoky v den, kdy probíhaly odběry vzorků na odtoku a přítoku ze všech mokřadů. V roce 2021 bylo uskutečněno celkem 38 odběrů vzorků vody (viz. Příloha 6, 8). A v roce 2022 bylo uskutečněno 32 odběrů vzorků vody pro dusík a 28 pro fosfor (viz. Příloha 7, 9). Pro dusík i fosfor v jednotlivých letech byla následně stanovena směrodatná odchylka i rozptyl. Analýzy vzorků vody byly provedeny v laboratoři FŽP ČZU.

Díky důkladnému sběru dat známe průměrné průtoky na každém mokřadu a množství N a P na přítoku i odtoku. Tím můžeme získat data o množství dusíku a fosforu, který je ročně z vody odstraněn. Všechna data, výpočty a grafy byly zpracovány v programu MS Office Excel.

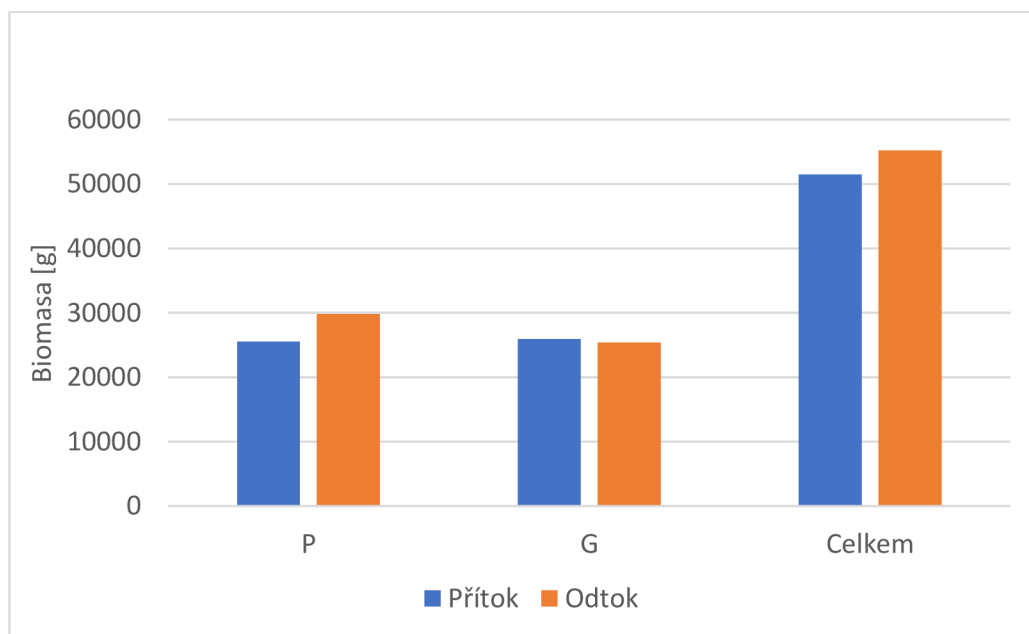
5 Výsledky práce

V následujících kapitolách jsou představeny výsledky práce, které jsou rozděleny do třech po sobě jdoucích roků (kap. 5.1; 5.2, 5.3) a každý rok je pak následně dělen na mokřady M1, M2, M3 a roční eliminaci živin. Pro každý mokřad je možné vidět množství biomasy, které se na mokřadech nachází a množství dusíku a fosforu v gramech na metr čtvereční pro jednotlivé rostliny. Grafy jsou přehledně rozděleny na přítokovou a odtokovou část a množství dusíku a fosforu u zblochanu vodního a chrastice rákosovité se dělí na listy, stonky, květy a standing litter.

5.1 Rok 2021

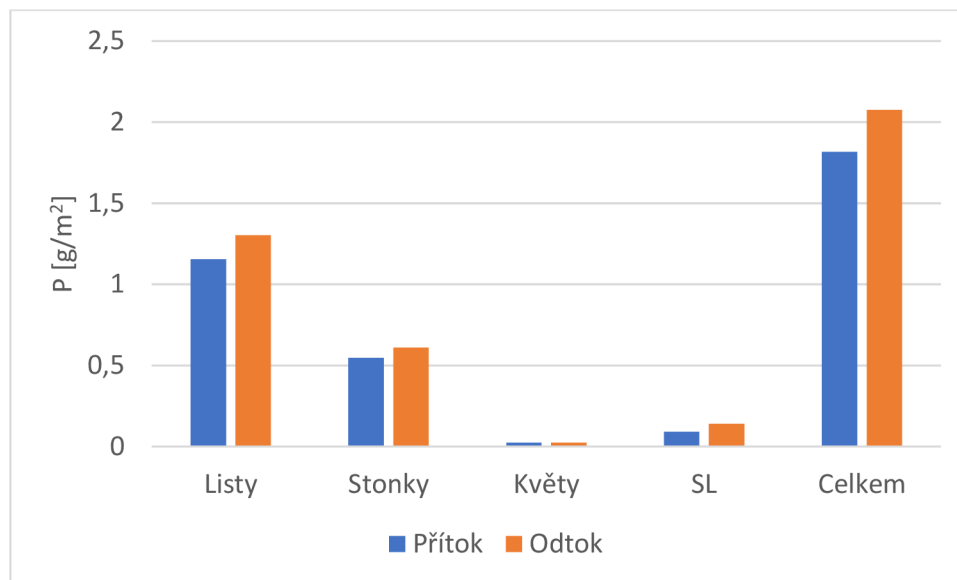
5.1.1 Mokřad M1

Množství biomasy na prvním mokřadu (M1) pro rok 2021 v gramech můžeme vidět znázorněné na obrázku 10, kde je biomasa rozdělena na přítok a odtok. Z grafu je patrné, že přítoková i odtoková část mají podobné hodnoty.



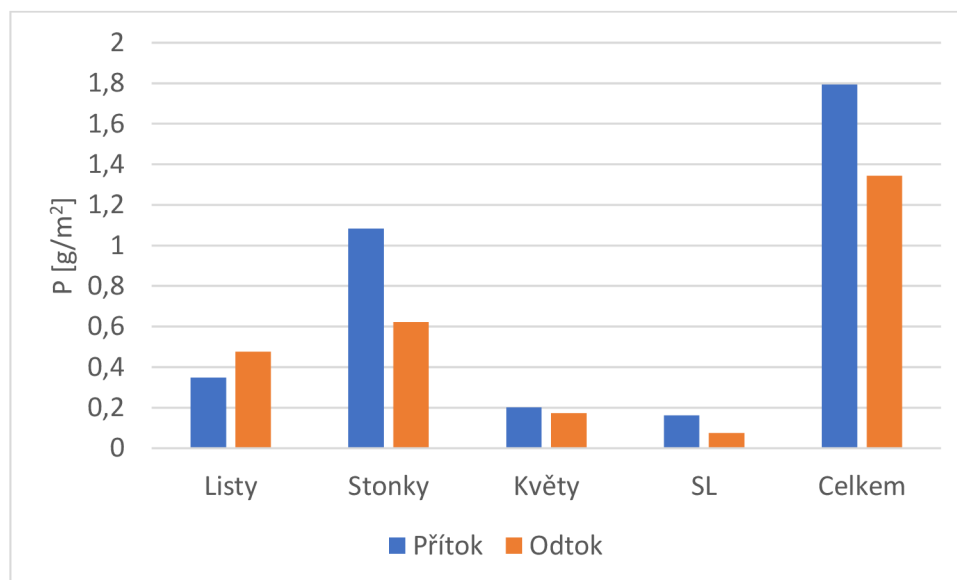
Obr. 10: Množství biomasy chrastice rákosovité (P) a zblochanu vodního (G) na M1 v roce 2021 [g].

Množství fosforu chrastice rákosovité v gramech na metr čtvereční v mokřadu M1 lze vidět na obrázku 11. Z obrázku je patrné, že největší množství fosforu se nachází na odtoku, přičemž nejvíce P se nachází v listech.



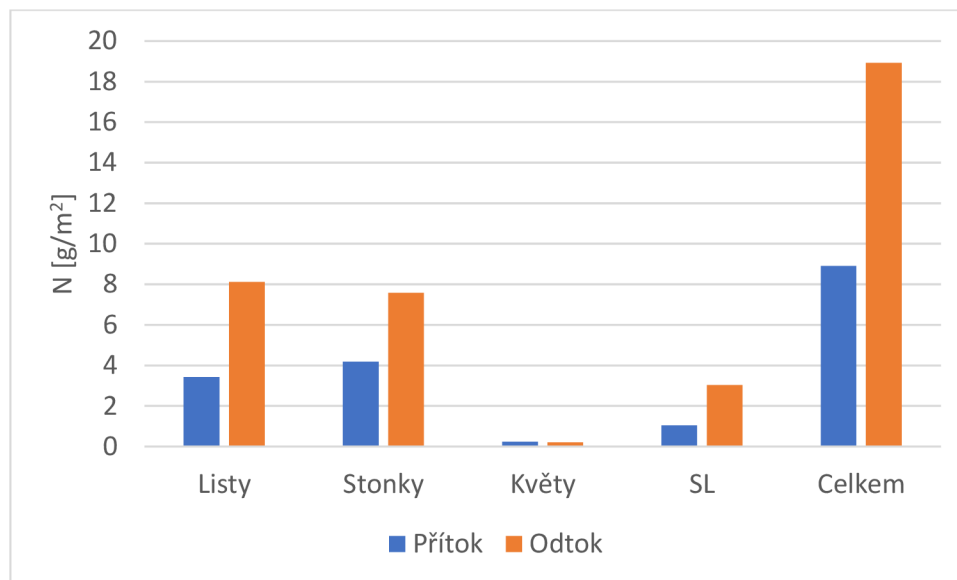
Obr. 11: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M1 v roce 2021 [g/m²].

Množství fosforu zblochanu vodního na mokřadu M3 je vidět na Obr. 12. Nejvíce P v gramech na metr čtvereční se nachází ve stoncích a více P se nachází v přítokové části.



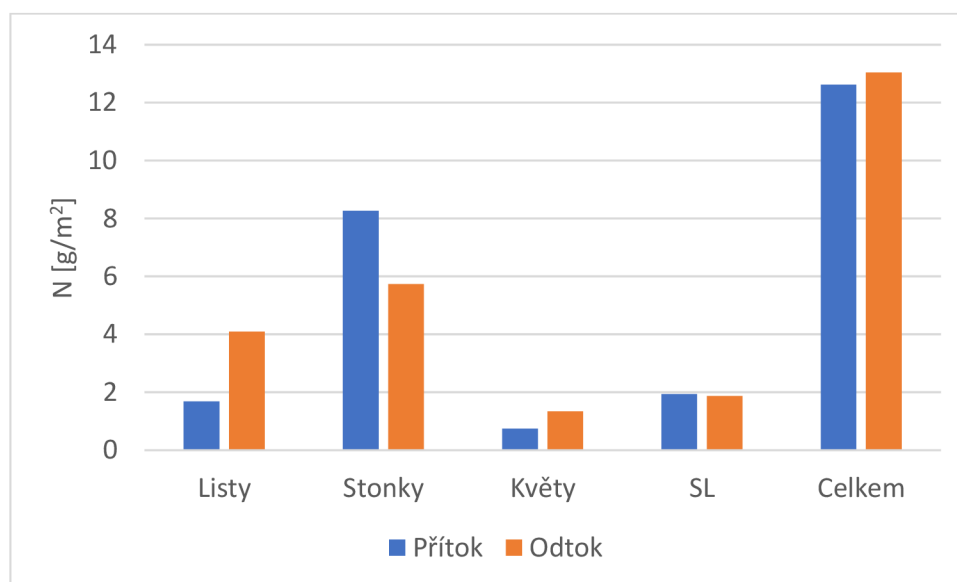
Obr. 12: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M1 v roce 2021 [g/m²].

Množství dusíku obsažené v chrastici rákosovité v gramech na metr čtvereční je zobrazeno na obrázku 13. Nejvíce dusíku se nachází v odtokové části. Množství v listech a stoncích dosahuje podobných hodnot.



Obr. 13: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M1 v roce 2021 [g/m²].

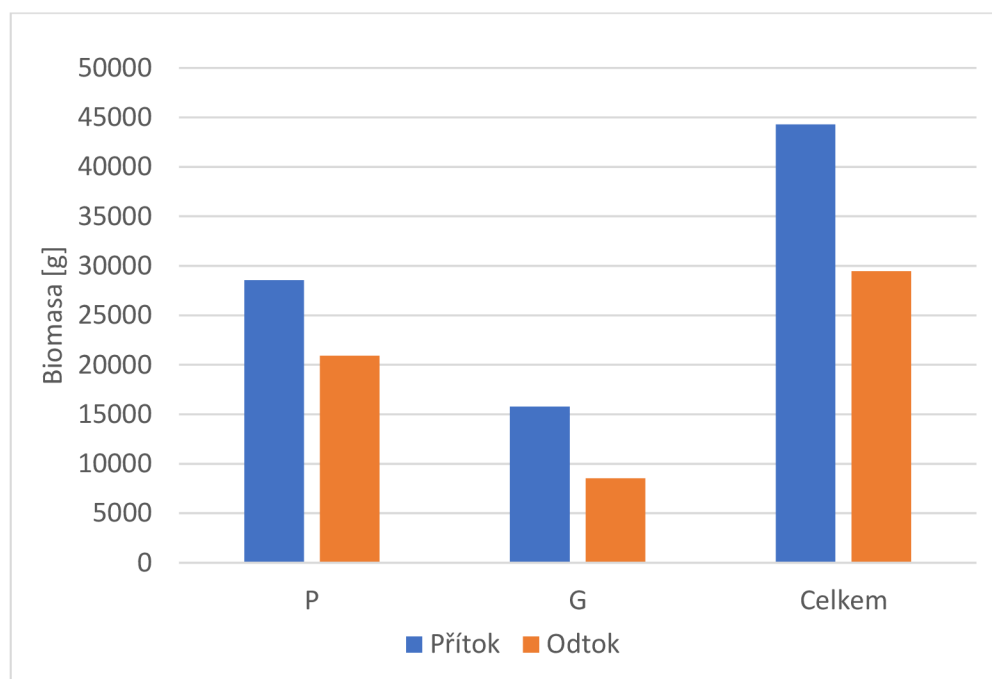
Přítoková a odtoková část mokřadu M1 obsahuje podobné množství gramů dusíku na metr čtvereční. Co se týče částí rostlin nejvíce je obsaženo ve stoncích viz. Obr. 14.



Obr. 14: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M1 v roce 2021 [g/m²].

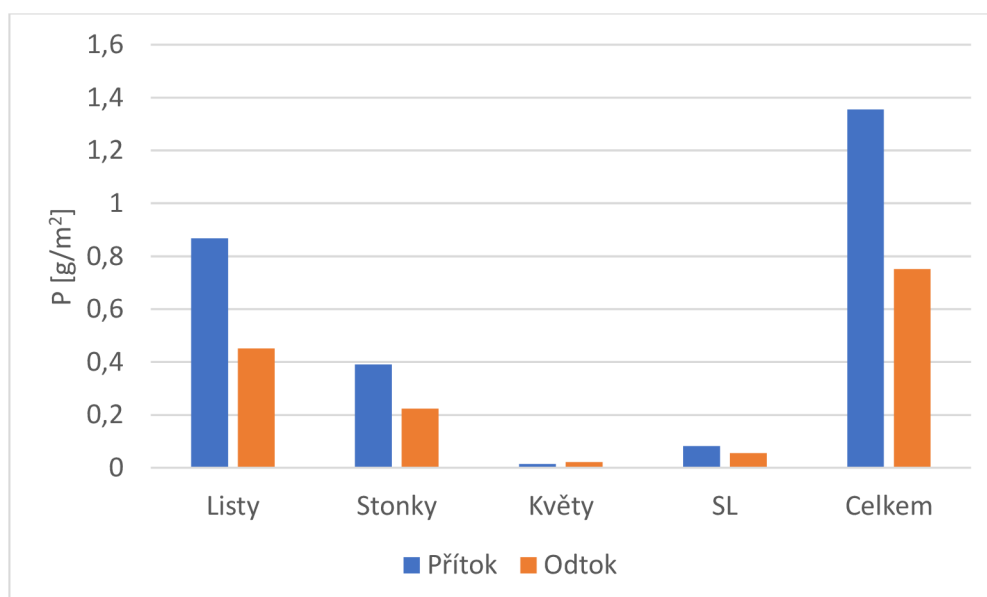
5.1.2 Mokřad M2

Mokřad M2 má více biomasy v gramech na přítokové části. Chrastice rákosovitá a podstatně větší množství biomasy než zblochan vodní viz. Obr. 15.



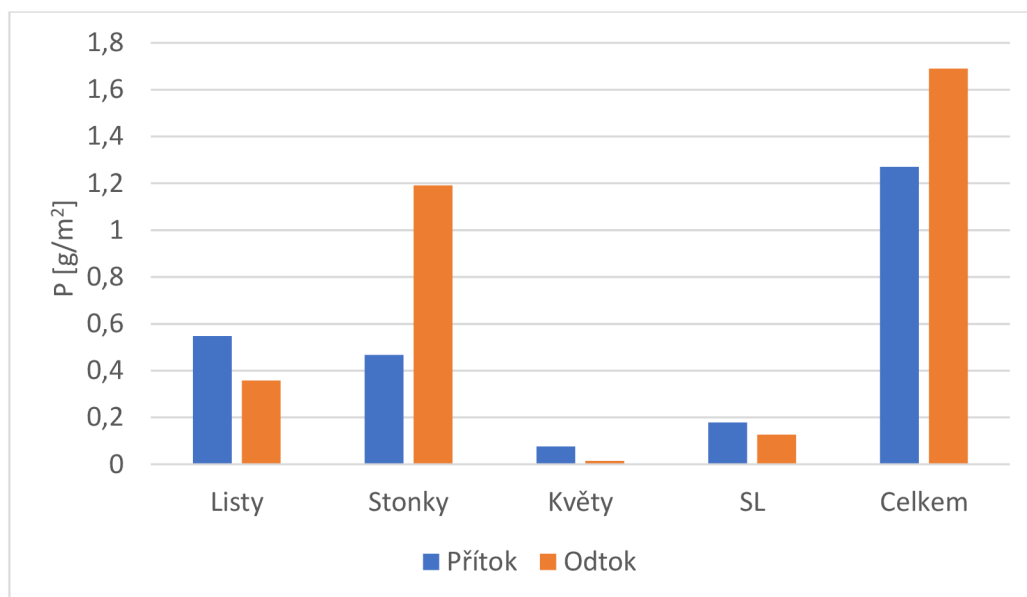
Obr. 15: Množství biomasy chrastice rákosovité (P) a zblochanu vodního (G) na M2 v roce 2021 [g].

Fosfor v gramech na metr čtvereční je zhruba dvojnásobný na přítoku, než na odtoku a největší množství fosforu je obsaženo v listech viz. Obr. 16.



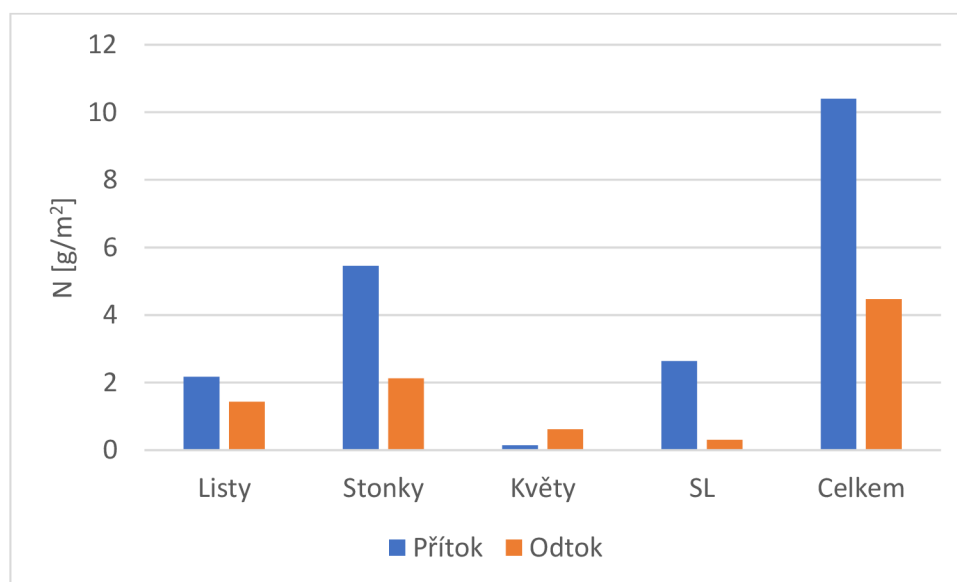
Obr. 16: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M2 v roce 2021 [g/m²].

Množství fosforu zblochanu vodního na mokřadu M2 je vidět na Obr. 17. Nejvíce P v gramech na metr čtvereční se nachází ve stoncích a více P se nachází v odtokové části.



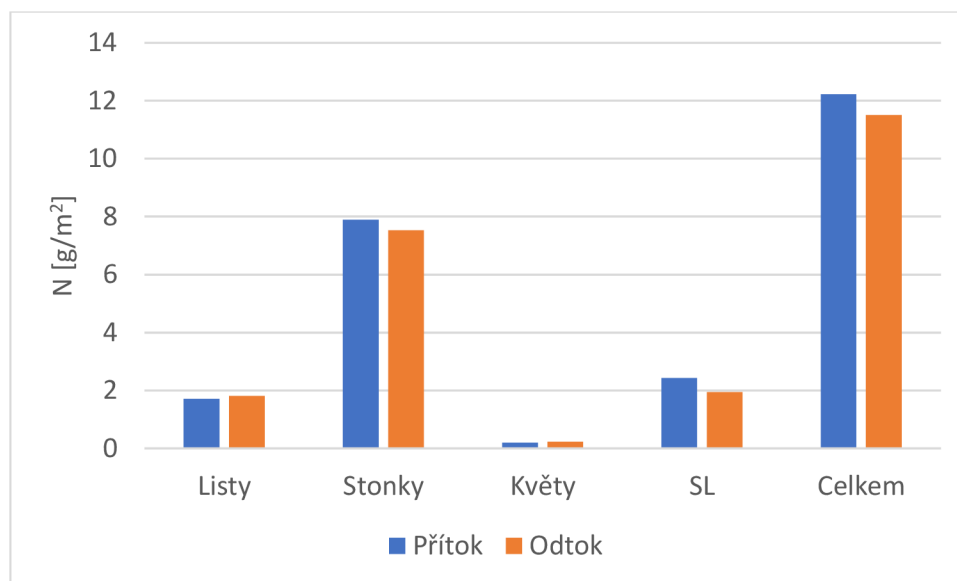
Obr. 17: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M2 v roce 2021 [g/m²].

Chrastice rákosovitá vykazuje dvojnásobné množství dusíku na metr čtvereční na přítokové části oproti části odtokové. Co se týče jednotlivých částí rostlin, tak nejvíce N se nachází ve stoncích viz. Obr. 18.



Obr. 18: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M2 v roce 2021 [g/m²].

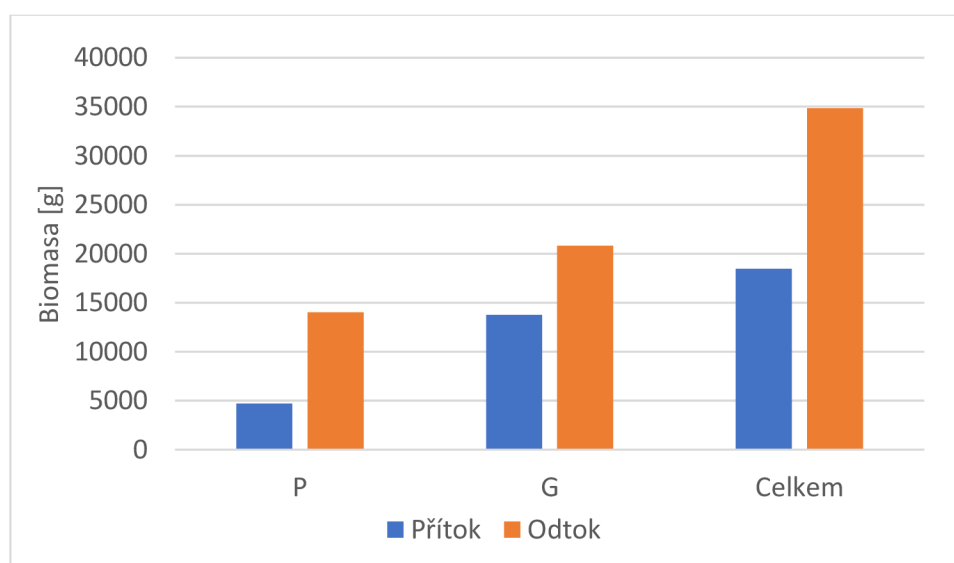
Zblochan vodní má nejvíce dusíku na metr čtvereční v přítokové části. Co se týče částí rostlin nejvíce je obsaženo ve stoncích viz. Obr. 19.



Obr. 19: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M2 v roce 2021 [g/m²].

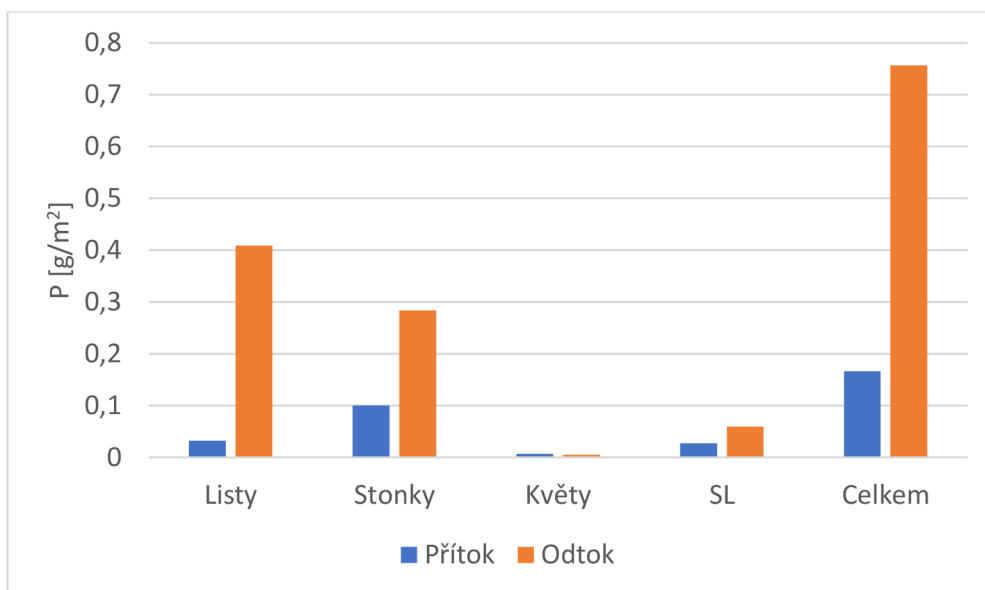
5.1.3 Mokřad M3

Množství biomasy v gramech na mokřadu M3 v roce 2021 lze vidět na obrázku 20. Zblochan vodní má větší množství vegetace oproti chrastici rákosovité. Odtoková část měla téměř dvojnásobné množství biomasy než přítoková část.



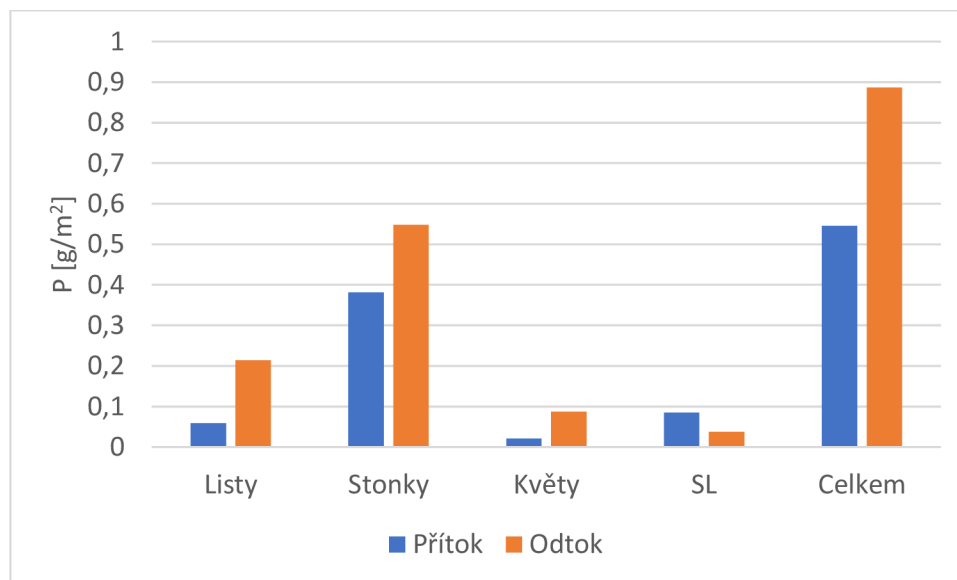
Obr. 20: Množství biomasy chrastice rákosovité (P) a zblochanu vodního (G) na M3 v roce 2021 [g].

Fosfor v gramech na metr čtvereční na mokřadu M3 pro chrastici rákosovitou dosahuje největších hodnot na odtokové části viz. Obr. 21.



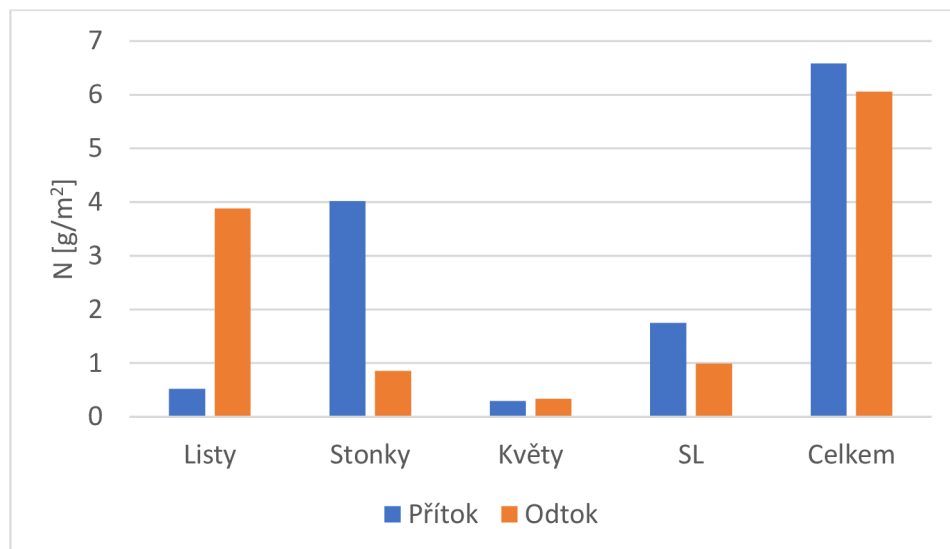
Obr. 21: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M3 v roce 2021 [g/m²].

Množství fosforu zblochanu vodního v gramech na metr čtvereční je vidět na Obr. 22. Nejvíce P se nachází ve stoncích a více fosforu se nachází v odtokové části.



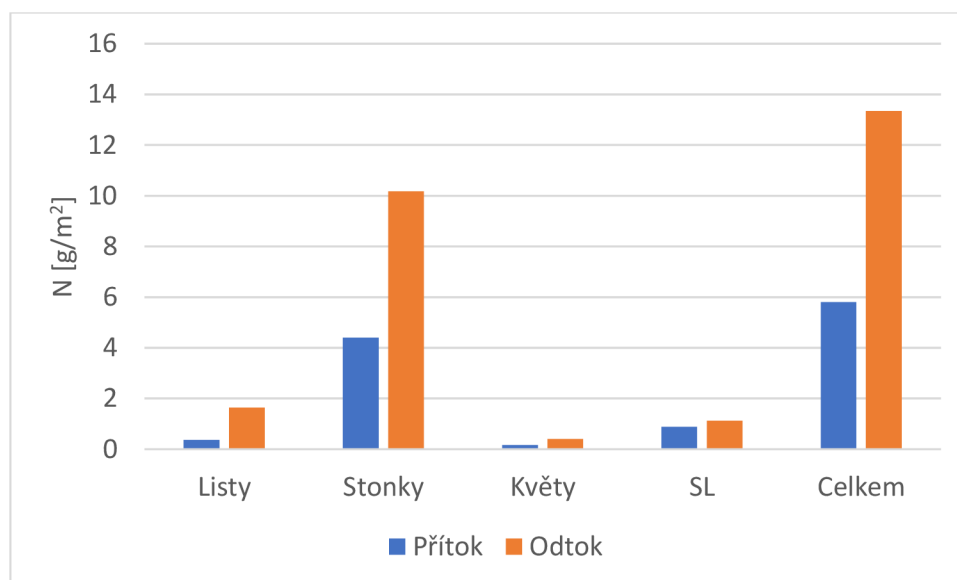
Obr. 22: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M3 v roce 2021 [g/m²].

Přítoková i odtoková část mokřadu M3 (chrastice rákosovitá) má velice vyrovnané množství dusíku v gramech na metr čtvereční viz. Obr. 23. Nejvíce N se nachází v listech a stoncích rostlin.



Obr. 23: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M3 v roce 2021 [g/m²].

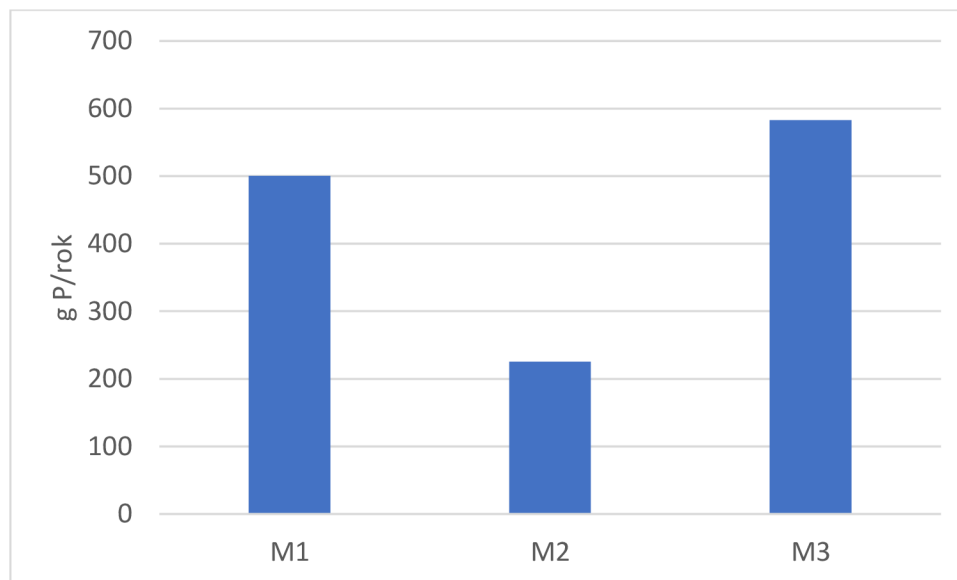
Zblochan vodní má nejvíce dusíku na metr čtvereční v odtokové části. Co se týče částí rostlin nejvíce je obsaženo ve stoncích viz. Obr. 24.



Obr. 24: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M3 v roce 2021 [g/m²].

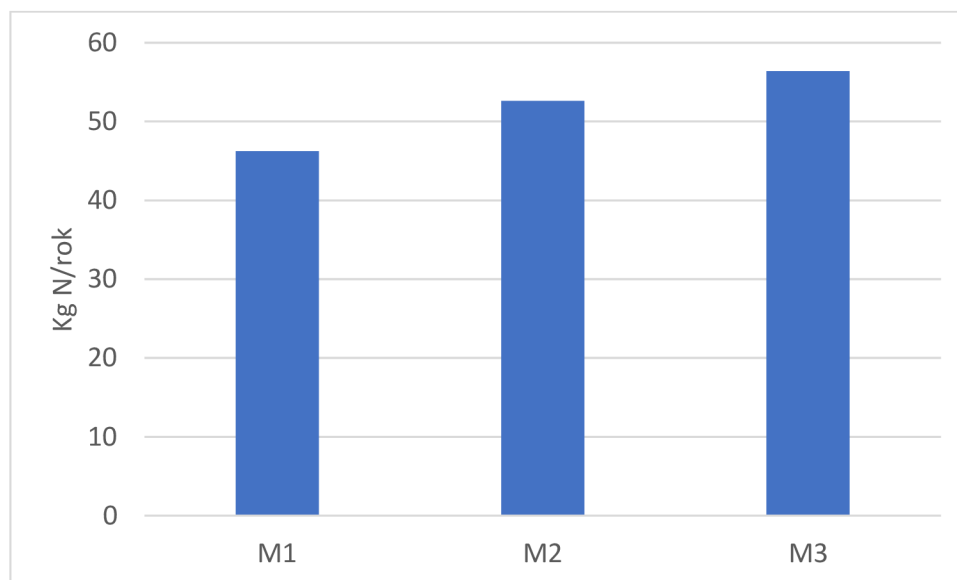
5.1.4 Roční eliminace živin

Obr. 25 znázorňuje roční eliminaci fosforu na mokřadech (M1, M2, M3) v gramech P za rok. Mokřad M3 ročně eliminoval nejvíce fosforu.



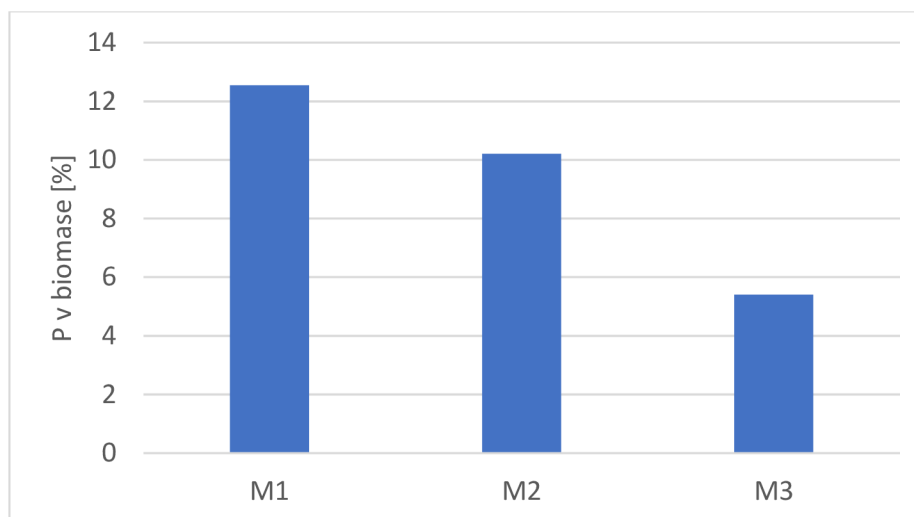
Obr. 25: Množství eliminovaného P v mokřadech M1, M2 a M3 v roce 2021 [g P/rok].

Na obrázku 26 lze vidět množství eliminovaného dusíku v kilogramech N za rok na sledovaných mokřadech. Nejvíce dusíku vyloučil mokřad M3 a nejméně M1.



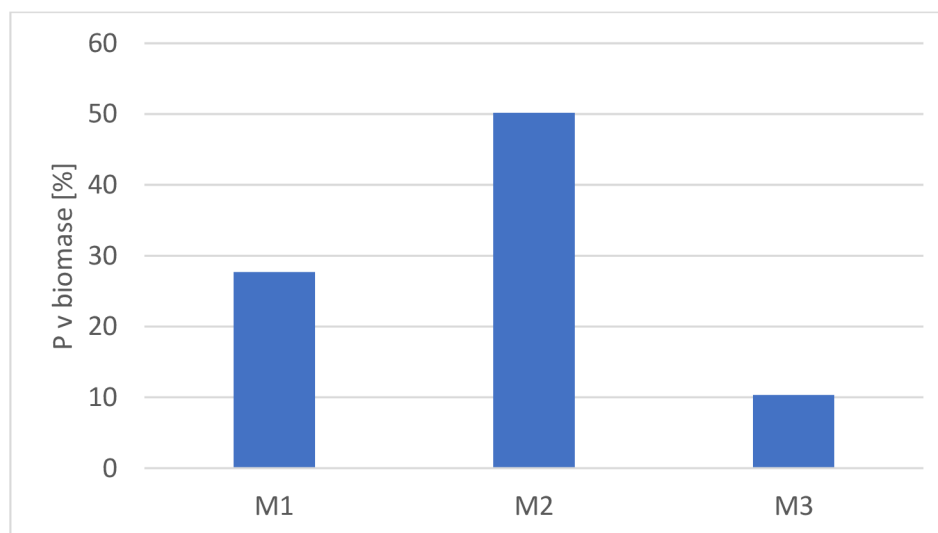
Obr. 26: Množství eliminovaného N v mokřadech M1, M2 a M3 v roce 2021 [Kg N/rok].

Obrázek 27 procentuálně ukazuje kolik fosforu z přítoku se nachází v nadzemní biomase v mokřadech M1, M2 a M3. Množství fosforu v biomase dosahující vysokých hodnot je zapříčiněno velkými přívalovými dešti, které odnáší jemnou vrstvu zemědělské půdy a ta obsahuje veliké množství fosforu. Pokud dojde k situaci, že se ucpe silniční propustek dochází k přelévání vody přes silnice a tím se do mokřadu dostává také veliké množství fosforu.



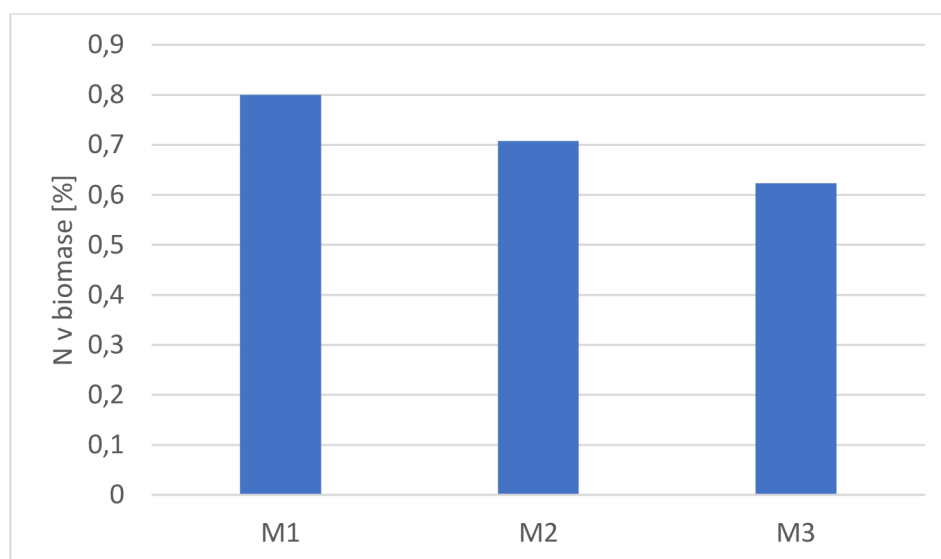
Obr. 27: Porovnání množství kumulovaného fosforu v nadzemní biomase s množstvím, které ročně přiteče na mokřad v roce 2021 [%].

Obrázek 28 procentuálně ukazuje kolik z eliminovaného fosforu se nachází v nadzemní biomase v jednotlivých mokřadech M1, M2 a M3 v roce 2021.



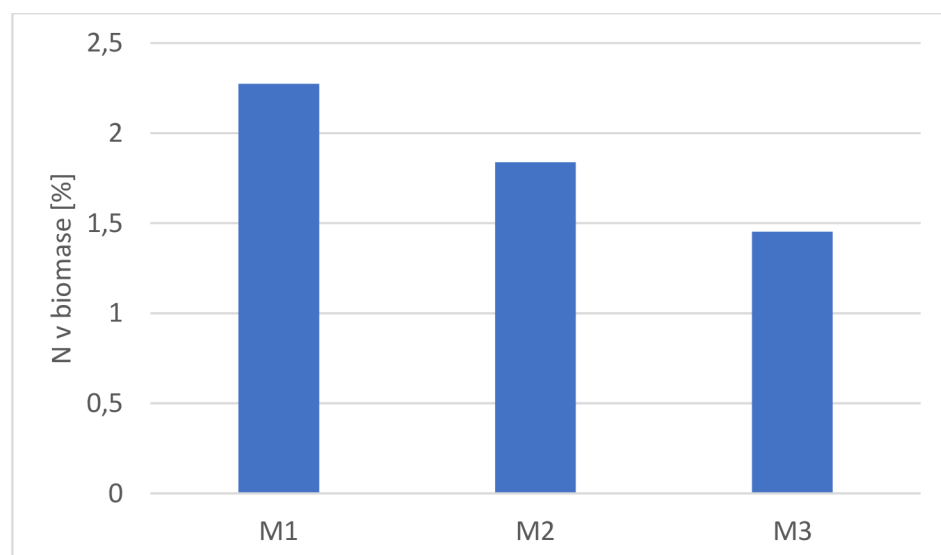
Obr. 28: Porovnání množství kumulovaného fosforu v nadzemní biomase s množstvím, které se ročně eliminuje na mokřadech v roce 2021 [%].

Obrázek 29 procentuálně ukazuje kolik dusíku z přítoku se nachází v nadzemní biomase zblochanu vodního a chrastice rákosovité v jednotlivých mokřadech (M1, M2, M3).



Obr. 29: Porovnání množství kumulované-ho dusíku v nadzemní biomase s množstvím, které ročně přiteče na mokřad v roce 2021 [%].

Obrázek 30 procentuálně ukazuje kolik z eliminovaného dusíku se nachází v nadzemní biomase v jednotlivých mokřadech M1, M2 a M3 v roce 2021.

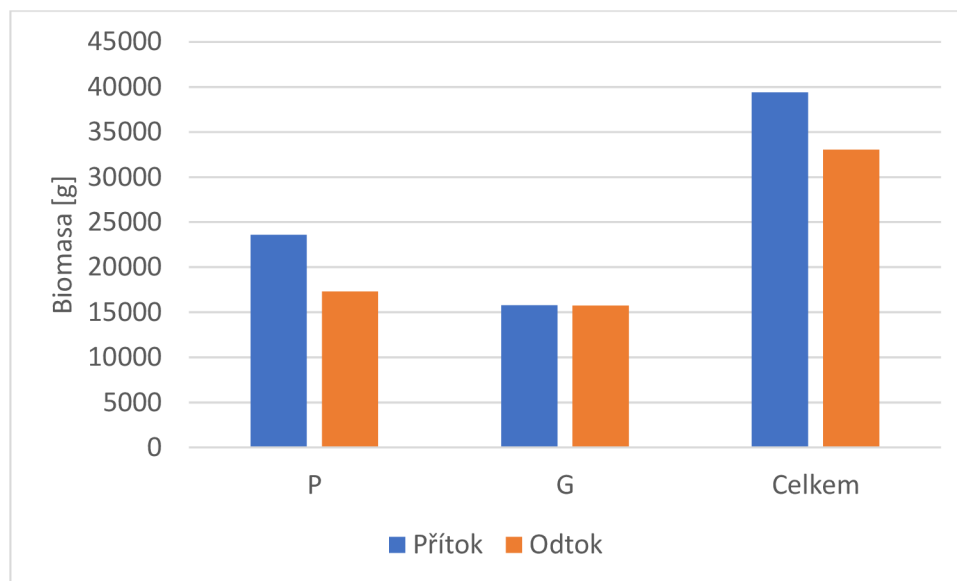


Obr. 30: Porovnání množství kumulované-ho dusíku v nadzemní biomase s množstvím, které se ročně eliminuje na mokřadech v roce 2021 [%].

5.2 Rok 2022

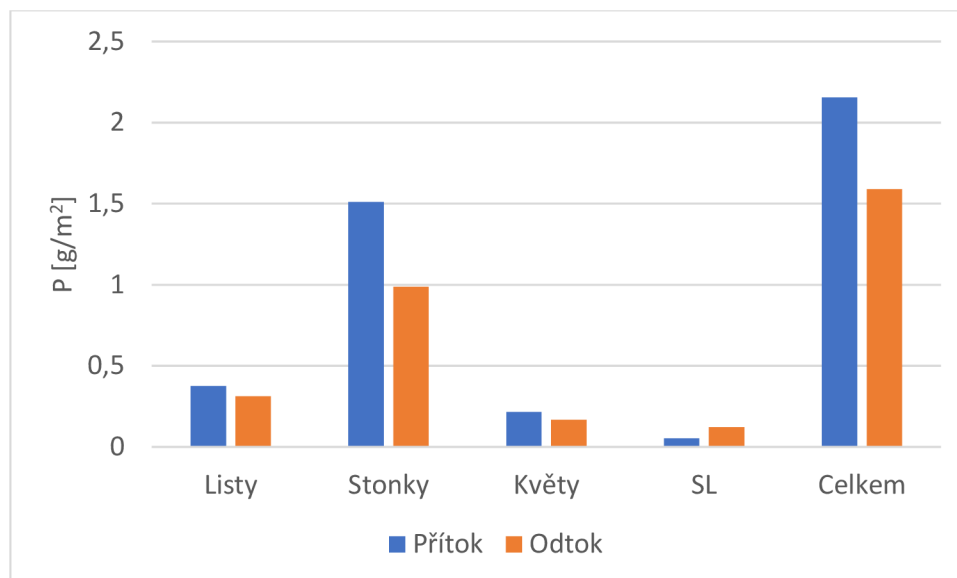
5.2.1 Mokřad M1

Množství biomasy na prvním mokřadu (M1) v gramech můžeme vidět znázorněné na obrázku 31, kde je biomasa rozdělena na přítok a odtok. Z grafu je patrné, že nejvíce biomasy se nachází na přítokové části.



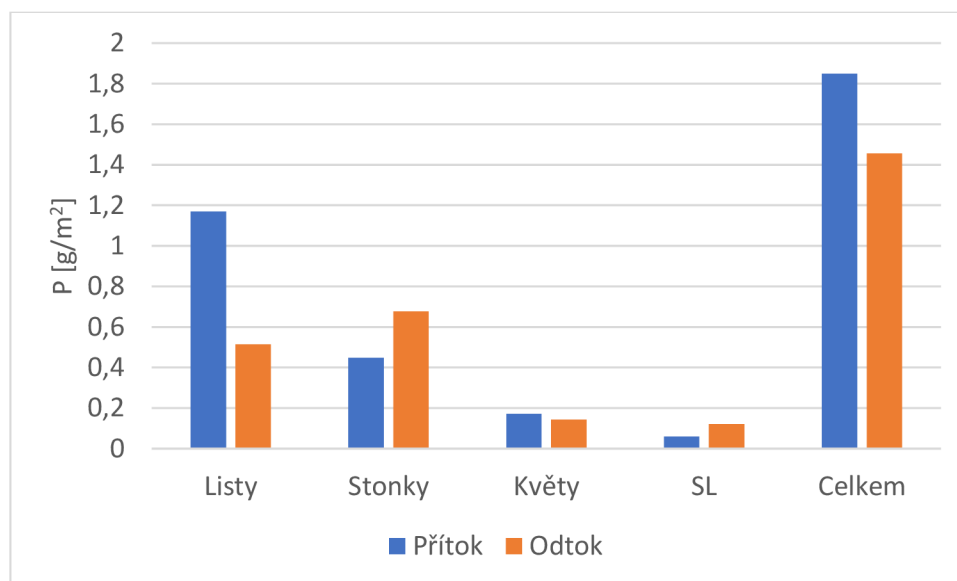
Obr. 31: Množství biomasy chrastice rákosovité (P) a zblochanu vodního (G) na M1 v roce 2022 [g].

Množství fosforu chrastice rákosovité v gramech na metr čtvereční v mokřadu M1 lze vidět na obrázku 32. Z obrázku je patrné, že největší množství fosforu se nachází na přítoku, přičemž nejvíce P se nachází ve stoncích.



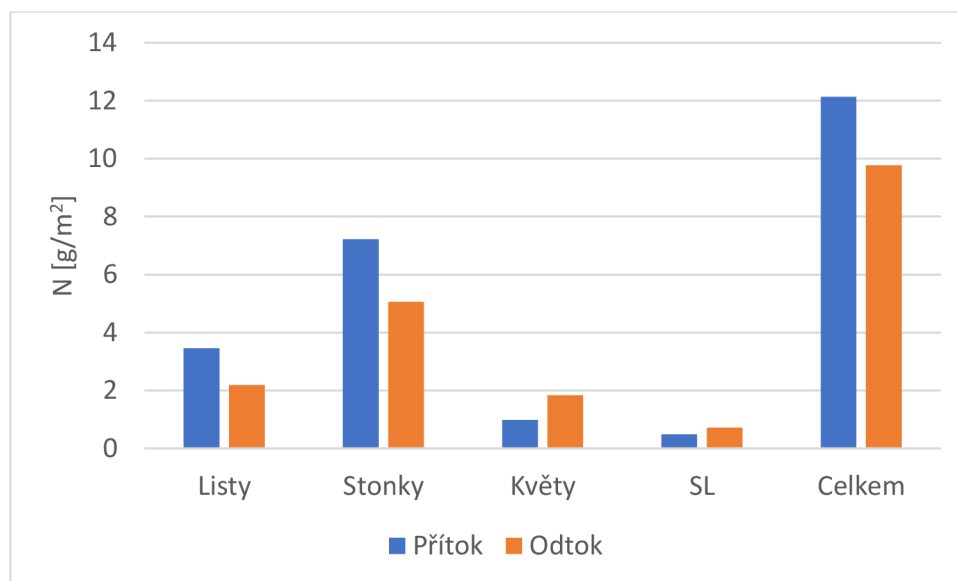
Obr. 32: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M1 v roce 2022 [g/m²].

Zblochan vodní má nejvíce fosforu v listech a přítoková část dosahuje vyšších hodnot, než část odtoková (Obr. 33).



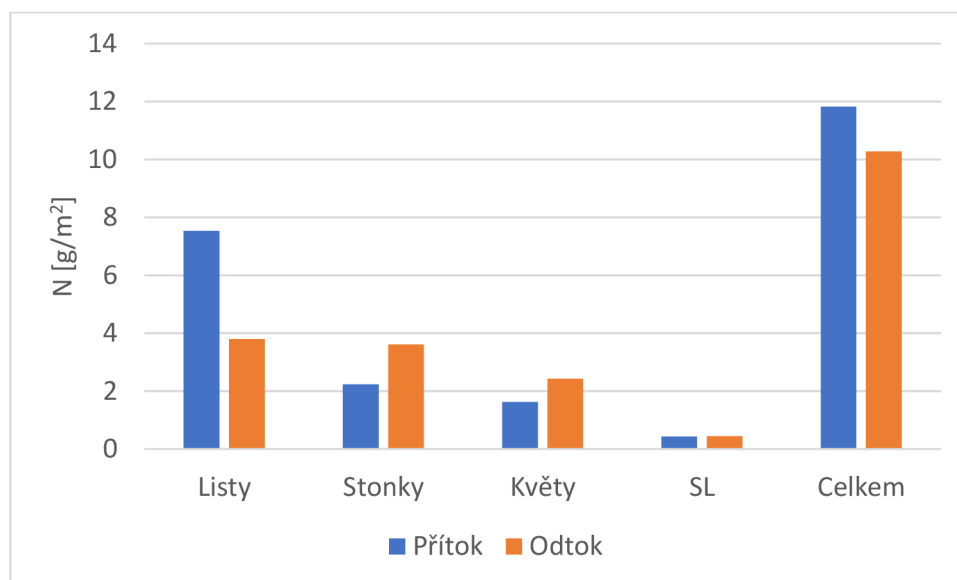
Obr. 33: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M1 v roce 2022 [g/m²].

Chrástice rákosovitá obsahuje nejvíce dusíku v gramech na metr čtvereční na přítokové části mokřadu M2, konkrétně ve stoncích viz. Obr. 34.



Obr. 34: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech chrástice rákosovité na M1 v roce 2022 [g/m²].

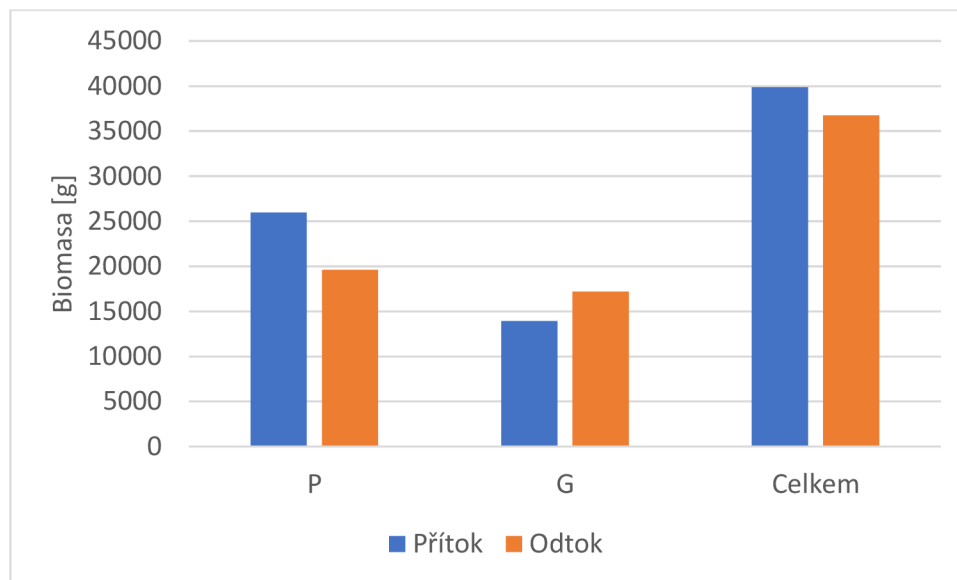
Množství dusíku zblochanu vodního dosahuje vyrovnaných hodnot na přítoku i odtoku, avšak největší množství v gramech na metr čtvereční je obsaženo v listech (Obr. 35)



Obr. 35: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M1 v roce 2022 [g/m²].

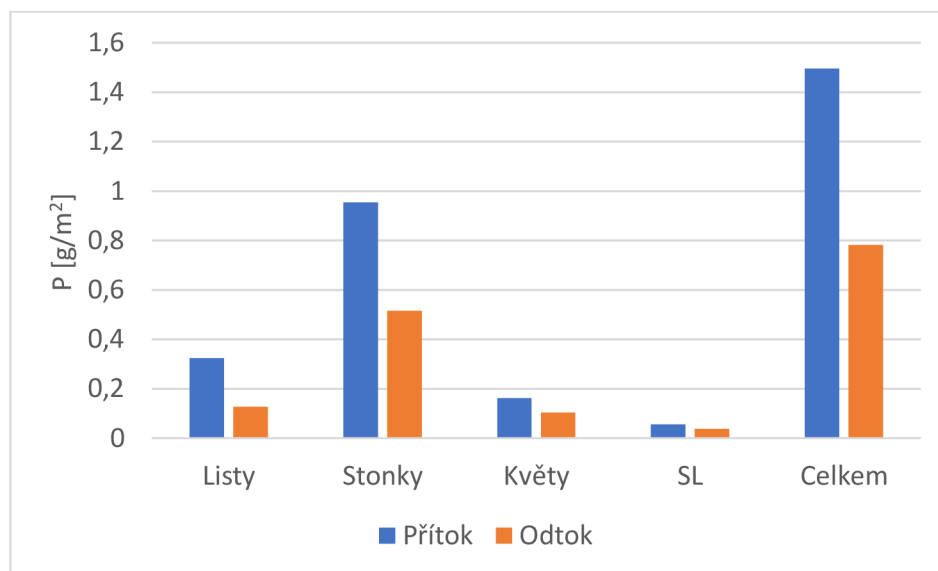
5.2.2 Mokřad M2

Biomasa na mokřadu M2 je vidět na obrázku 36. Přítok i odtok má poměrně vyrovnané hodnoty, ale více biomasy v gramech má chrastice rákosovitá.



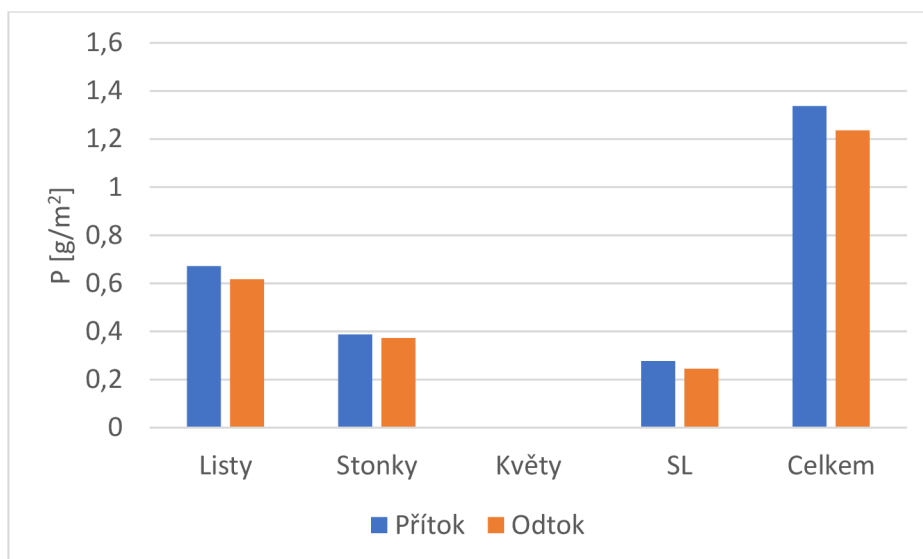
Obr. 36: Množství biomasy chrastice rákosovité (P) a zblochanu vodního (G) na M2 v roce 2022 [g].

Přítoková část chrastice rákosovité má téměř dvojnásobné množství P v gramech na metr čtvereční oproti odtokové části. Nejvíce se nachází ve stoncích viz. Obr. 37.



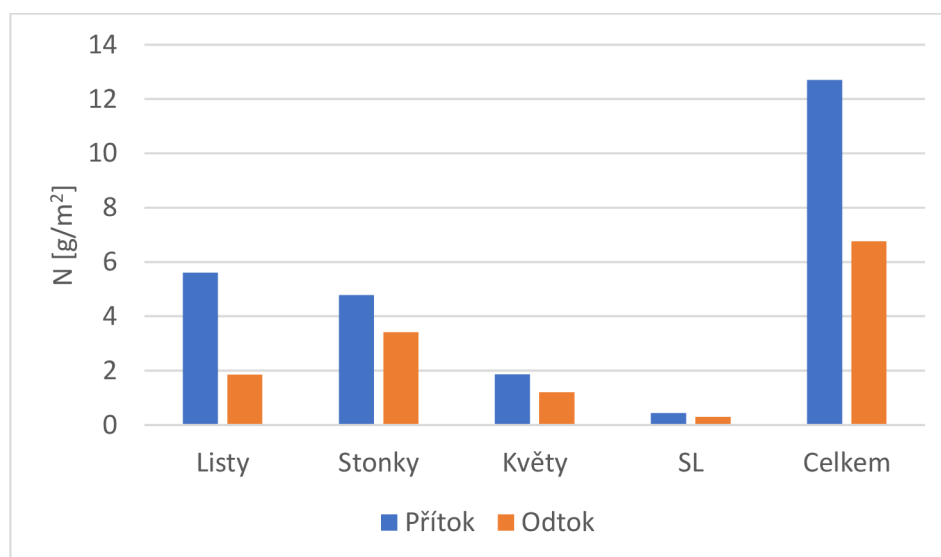
Obr. 37: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M2 v roce 2022 [g/m²].

Přítoková i odtoková část mokřadu M3 (zblochan vodní) má velice vyrovnané množství fosforu v gramech na metr čtvereční viz. Obr. 38. Nejvíce P se nachází v listech.



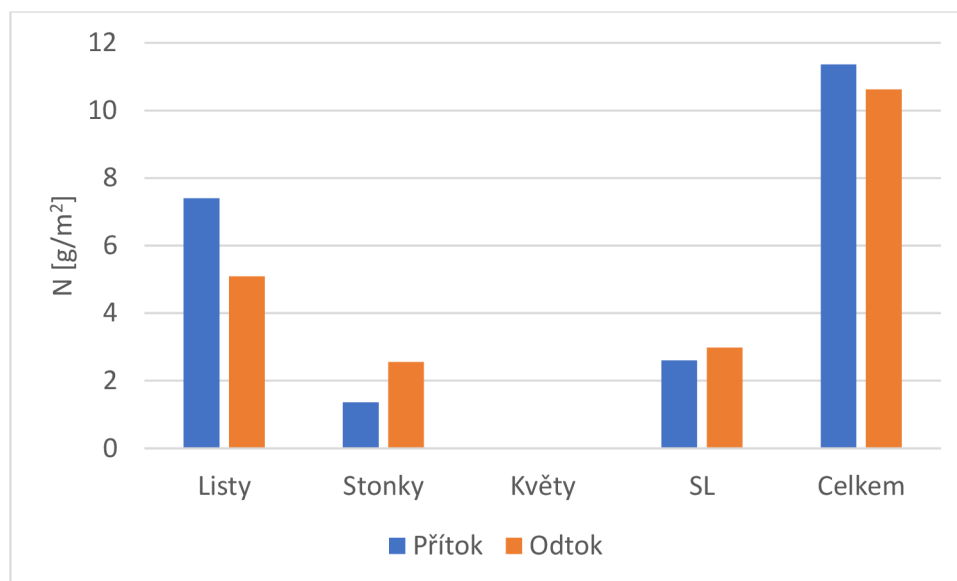
Obr. 38: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M2 v roce 2022 [g/m²].

Množství dusíku obsažené v chrastici rákosovité v gramech na metr čtvereční je zobrazeno na obrázku 39. Nejvíce dusíku se nachází v přítokové části, konkrétně ve stoncích a listech.



Obr. 39: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M2 v roce 2022 [g/m²].

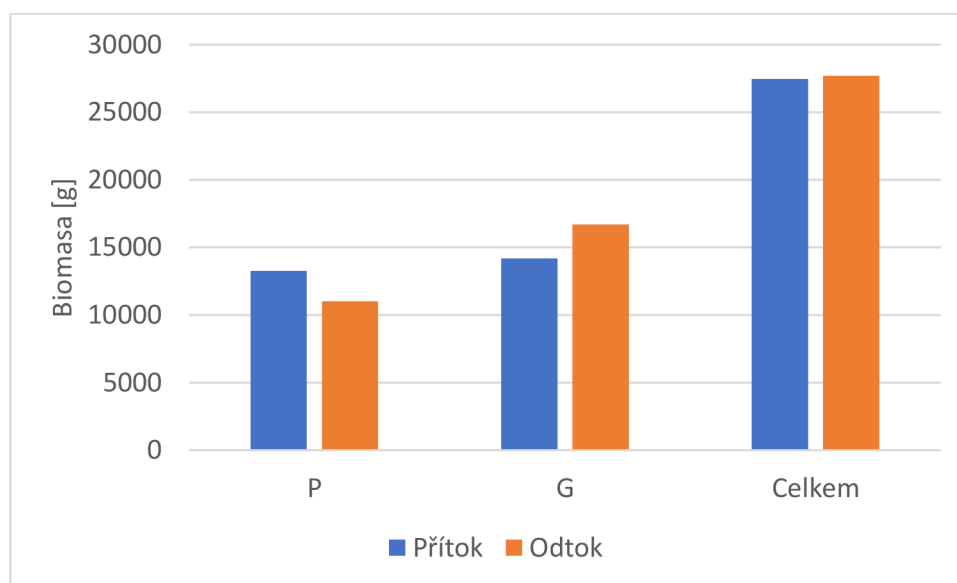
Zblochan vodní má množství dusíku na metr čtvereční v odtokové části téměř shodné s přítokovou částí. Co se týče částí rostlin nejvíce je obsaženo v listech viz. Obr. 40.



Obr. 40: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M2 v roce 2022 [g/m²].

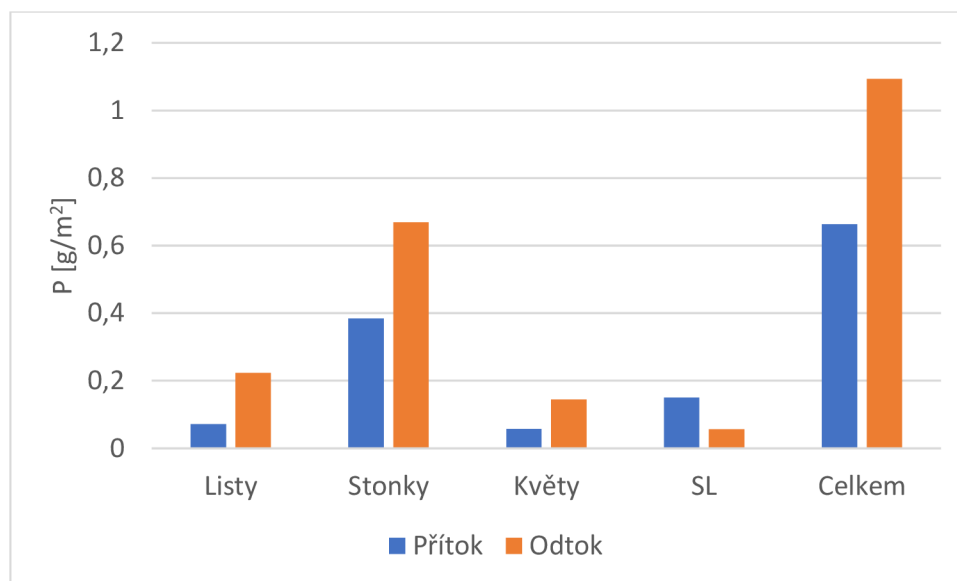
5.2.3 Mokřad M3

U třetího mokřadu (M3) je množství biomasy na odtokové zóně téměř shodné jako v zóně přítokové viz. Obr. 41.



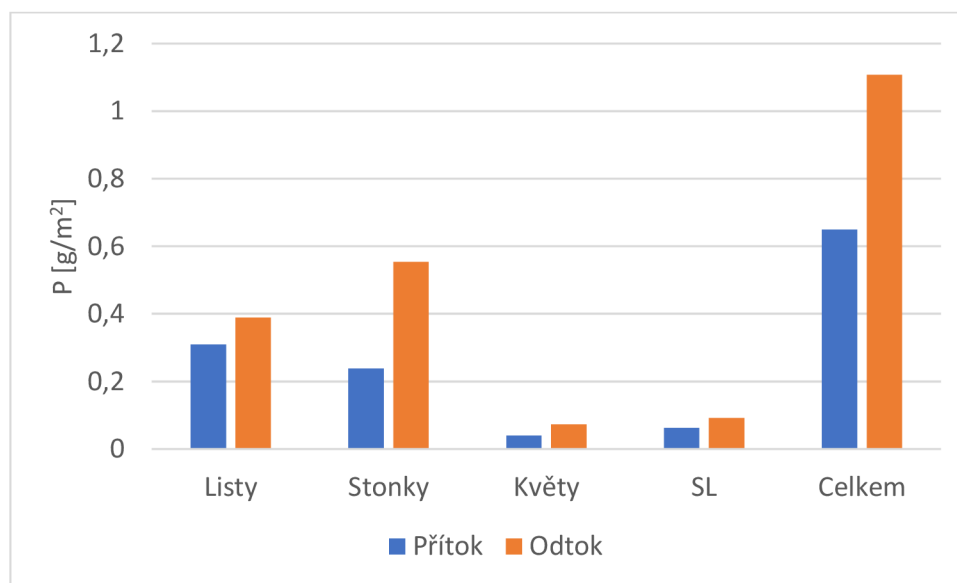
Obr. 41: Množství biomasy chrastice rákosovité (P) a zblochanu vodního (G) na M3 v roce 2022 [g].

Množství fosforu v gramech na metr čtvereční převažuje v odtokové části mokřadu. U částí rostlin mají nejvíce P stonky (Obr 42).



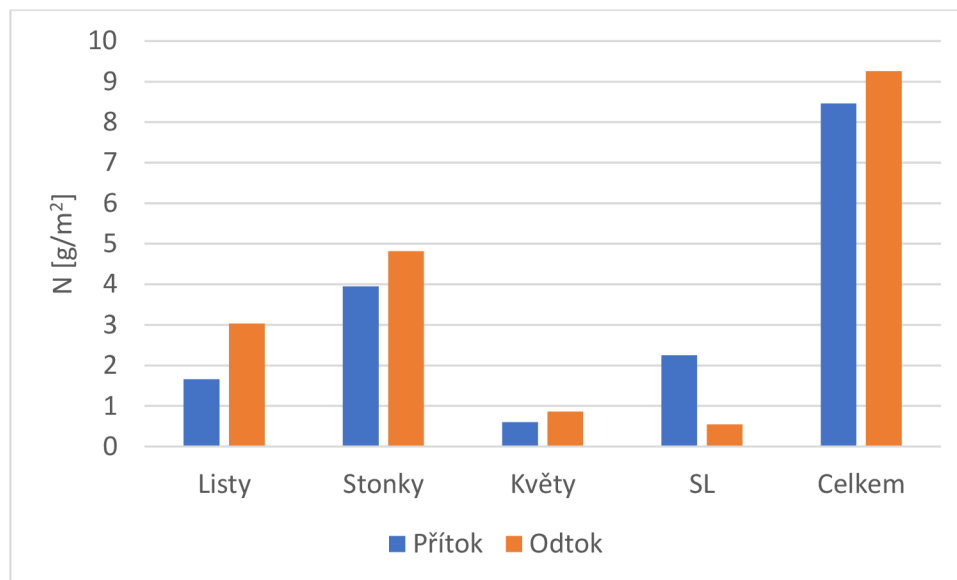
Obr. 42: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M3 v roce 2022 [g/m²].

Zblochan vodní má nejvíce fosforu na odtokové části mokřadu viz. Obr. 43. U částí rostlin mají největší množství P listy a stonky.



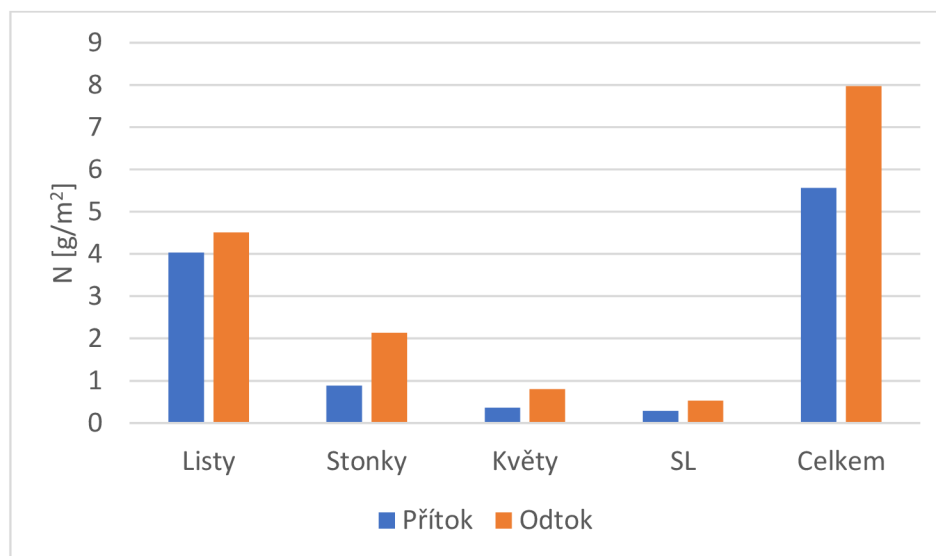
Obr. 43: Množství fosforu (P) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M3 v roce 2022 [g/m²].

Přítoková a odtoková část mokřadu M3 má velice vyrovnané hodnoty dusíku v gramech na metr čtvereční. U jednotlivých částí rostlin mají největší množství dusíku stonky viz. Obr. 44.



Obr. 44: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech chrastice rákosovité na M3 v roce 2022 [g/m²].

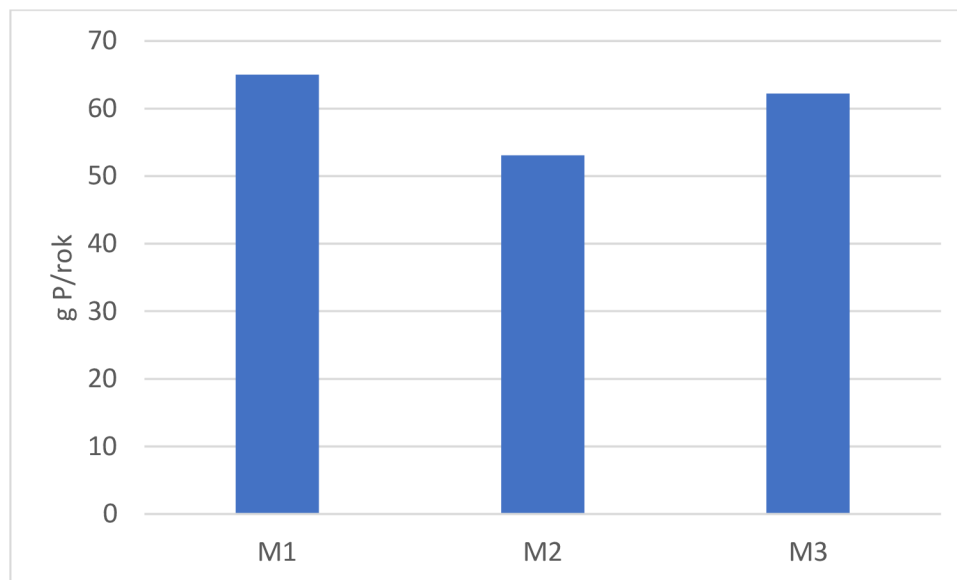
Množství dusíku zblochanu vodního v gramech na metr čtvereční je nejvíce v odtokové části mokřadu M3 a většina se nachází v listech viz. Obr. 45.



Obr. 45: Množství dusíku (N) v listech, stoncích a květech zblochanu vodního na M3 v roce 2022 [g/m²].

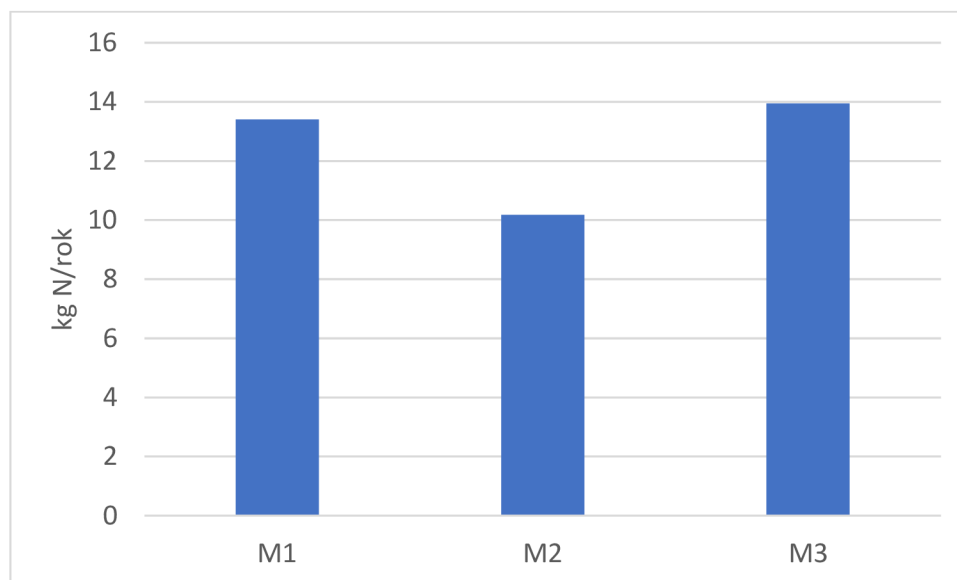
5.2.4 Roční eliminace živin

Obr. 46 znázorňuje roční eliminaci fosforu na mokřadech (M1, M2, M3) v gramech P za rok. Mokřady M1 a M3 ročně eliminovaly nejvíce fosforu.



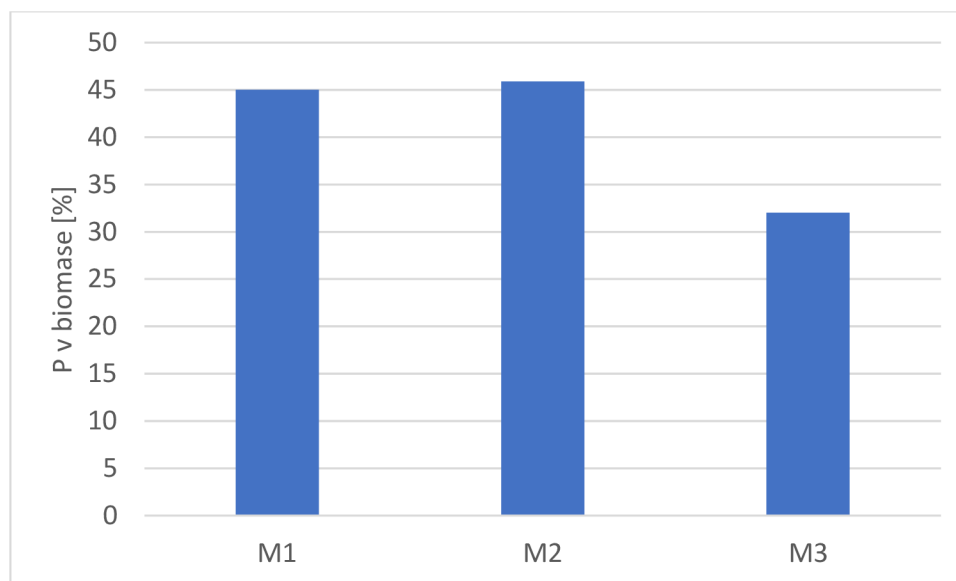
Obr. 46: Množství eliminovaného P v mokřadech M1, M2 a M3 v roce 2022 [g P/rok].

Na obrázku 47 lze vidět množství eliminovaného dusíku v kilogramech N za rok na sledovaných mokřadech. Nejvíce dusíku vyloučil mokřad M3.



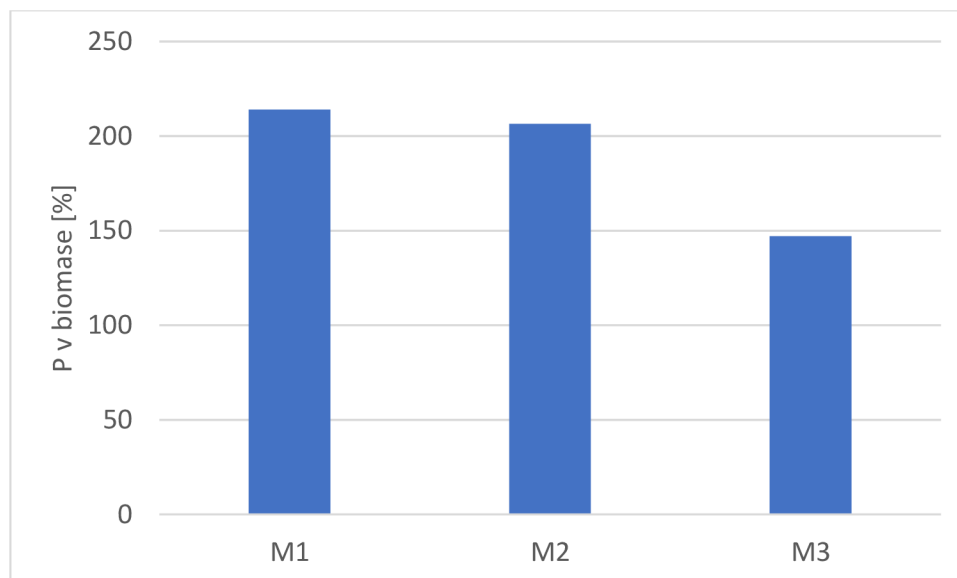
Obr. 47: Množství eliminovaného N v mokřadech M1, M2 a M3 v roce 2022 [Kg N/rok].

Na obrázek 48 můžeme vidět, kolik procent fosforu z přítoku se nachází v nadzemní biomase mokřadů M1, M2 a M3 pro rok 2022. Množství fosforu v biomase dosahující vysokých hodnot je zapříčiněno velkými přívalovými dešti, které odnáší jemnou vrstvu zemědělské půdy a ta obsahuje velké množství fosforu. Pokud dojde k situaci, že se ucpe silniční propustek dochází k přelývání vody přes silnice a tím se do mokřadu dostává také velké množství fosforu.



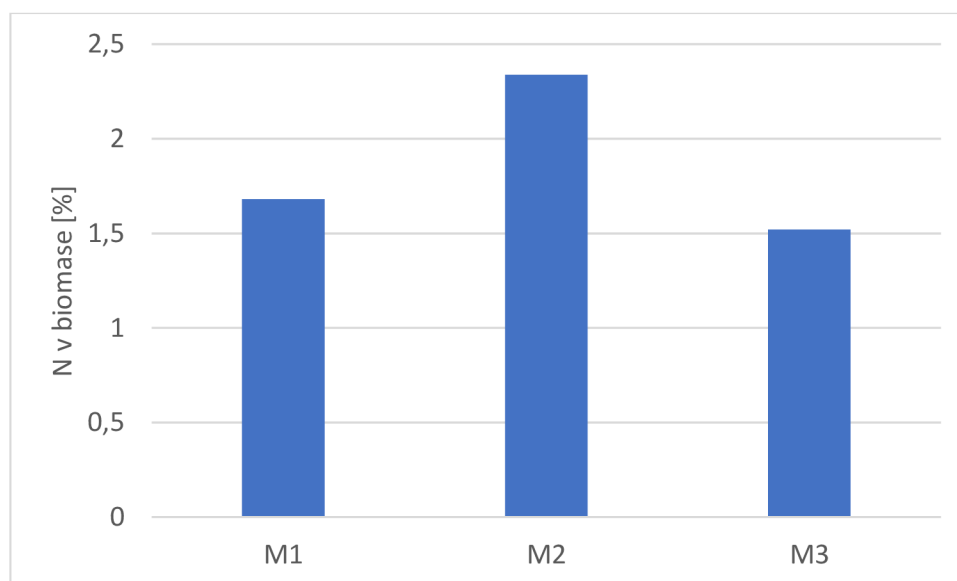
Obr. 48: Porovnání množství kumulovaného fosforu v nadzemní biomase s množstvím, které ročně přiteče na mokřad v roce 2022 [%].

Obrázek 49 procentuálně ukazuje kolik z eliminovaného fosforu se nachází v nadzemní biomase v mokřadech M1, M2 a M3 pro roky 2022. Množství fosforu v biomase dosahující nad 100% je zapříčiněno velkými přívalovými dešti, které odnáší jemnou vrstvu zemědělské půdy a ta obsahuje velké množství fosforu. Pokud dojde k situaci, že se ucpe silniční propustek dochází k přelývání vody přes silnice a tím se do mokřadu dostává také velké množství fosforu.



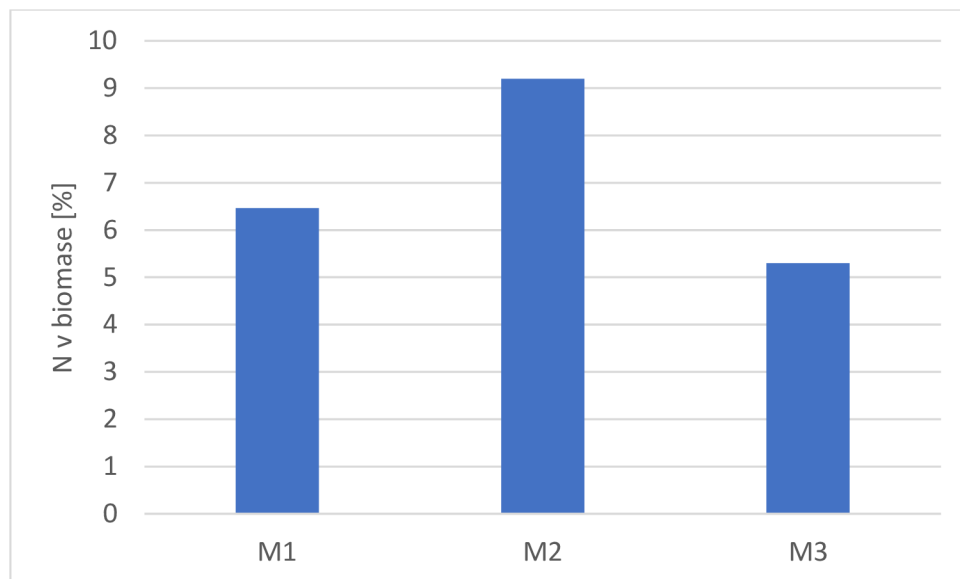
Obr. 49: Porovnání množství kumulovaného fosforu v nadzemní biomase s množstvím, které se ročně eliminuje na mokřadech v roce 2022 [%].

Obrázek 50 procentuálně ukazuje kolik dusíku z přítoku se nachází v nadzemní biomase zblochanu vodního a chrastice rákosovité v jednotlivých mokřadech (M1, M2, M3).



Obr. 50: Porovnání množství kumulovaného dusíku v nadzemní biomase s množstvím, které ročně přiteče na mokřad v roce 2022 [%].

Obrázek 51 procentuálně ukazuje kolik z eliminovaného dusíku se nachází v nadzemní biomase v jednotlivých mokřadech M1, M2 a M3 v roce 2022.



Obr. 51: Porovnání množství kumulované-ho dusíku v nadzemní biomase s množstvím, které se ročně eliminuje na mokřadech v roce 2022 [%].

6 Diskuse

Množství odstraněného dusíku a fosforu se může lišit napříč různými vědeckými studii. Vegetace je jeden z hlavních parametrů, které odstraňování živin ovlivňuje, ale roli zde hrají i jiné faktory. Množství srážek za rok, klimatické poměry, plodina pěstovaná na zemědělské půdě v povodí (kolik množství umělých látek je do půdy přidáváno), množství použité vegetace, velikost a stáří mokřadu, velikost povodí, ale stejně tak může rozhodovat i výběr filtračního materiálu nebo výška hladiny vody v mokřadu. Právě kvůli množství faktorů, jež mohou efektivitu umělého mokřadu ovlivnit, nelze s přesností určit, který mokřad je neúčinnější a nejefektivnější. Každá lokalita je specifická a můžeme se pouze domnívat na základě předchozích pokusů a studií, jaká je ideální kombinace mokřadního systému, který by v našich podmínkách účinně odstraňoval nežádoucí látky ve vodě. Každý další vybudovaný mokřad, který bude následně podroben testování, nám sdělí důležité informace a v budoucnu se můžeme řídit radami minulých studií.

Mokřady M1 a M3 v roce 2021 odstranily 63,4 a 59,5 kg P/ha/rok, což je srovnatelné se švédskou studií z roku 2013 (Kynkäänniemi et al., 2013), kde mokřad odstranil 69 kgP/ha/rok. Do tohoto mokřadu odtékala voda z 26 ha velkého povodí (11 ha zemědělsky obhospodařovaná půda). Mokřad M2 (25,1 kg P/ha/rok) má podobné výsledky jako studie Koskiaho et al. (2003), kde na mokřad přitékala voda z 12 ha povodí a fosfor dosahoval hodnot odstranění 24 kg/ha/rok. Zajímavé je, že množství biomasy na finském mokřadu Hovi je 44 g/m², zatímco na mokřadu M2 816 g/m². Nutno podotknout, že na mokřadu Hovi bylo použito více druhů vegetace, a to může mít za následek nižší hustotu vegetace, avšak podobné hodnoty odstraňování fosforu.

V roce 2022 mokřady M1, M2 a M3 odstranily 8,2, 5,9 a 6,3 kg P/ha/rok. Díaz et al. (2012) uvádějí, že na sedmi mokřadech v USA obklopených zemědělsky hojně využívanou půdou mokřady dosahují odstraňování fosforu 5,8 kg P/ha/rok. Jedná se o mokřady s 1–3 druhy rozdílné vegetace a osázenost mokřadu je maximálně 60 %. Jsou to poměrně velké mokřady s rozsáhlou zemědělskou plochou v okolí (4 250 ha).

Dusík odstraněný pomocí mokřadů u Velkého Rybníku v roce 2021 dosahoval hodnot 5854 (M1), 5846 (M2) a 5753 (M3) kg N/ha/rok. Studie z roku 2005 z Nového Zélandu (Tanner et al., 2005) dosahuje odstranění dusíku 8410 kg N/ha/rok. Skupina osmi mokřadů ve Švédsku (Arheimer & Wittgren, 2002) dosahovala odstraňování 4336 kg N/ha/rok. Obě tyto

studie mají srovnatelné výsledky s daty z roku 2021. V obou případech se jednalo o mokřady, které se používají k čištění drenážních vod ze zemědělského povodí.

Rok 2022 ukazuje mírný pokles stejně jako u fosforu. M1, M2 a M3 odstranily 1697, 1131 a 1423 kg N/ha/rok. Švédský mokřad Slogstorp o velikosti 0,65 ha má podobné hodnoty odstraňování dusíku jako námi sledované mokřady. Konkrétně se zde odstraní 1524 kg N/ha/rok a do mokřadu odtéká voda ze zemědělsky obhospodařovaného povodí o velikosti 880 ha (Strand & Weisner, 2013).

Z tabulky 1 je vyplývá, že neúčinnější mokřad na odstraňování dusíku a fosforu ze zemědělského povodí je mokřad M1. Co se týče výsledků nemá v sobě největší množství biomasy ani největší obsah dusíku a fosforu v biomase, ale po přepočtení na stejnou jednotku plochy (hektar) za rok dosahuje nejlepších výsledků pro rok 2021 i 2022. Na tomto mokřadu byl zvolen filtrační materiál drcené kamenivo o frakci 4-8 mm ve směsi s březovou štěpkou (poměr směsi 10:1) a hladina vody byla trvale udržována 10 cm nad povrchem filtračního materiálu. Kombinace směsi kameniva a štěpky s trvale udržovanou hladinou nad povrchem filtračního materiálu se jeví jako účinné řešení čištění drenážních vod ze zemědělského povodí pro naše klimatické poměry.

	M1	M2	M3
TP Kg/ha/rok			
2021	63,4	25,1	59,5
2022	8,2	5,9	6,3
TN Kg/ha/rok			
2021	5854	5846	5753
2022	1697	1131	1423

Tabulka 1: Množství odstraněných živin v letech 2021 a 2022 [kg/ha/rok].

Výsledky této práce jsou důležité pro rozvoj udržitelného zemědělství a ochrany vodních zdrojů v zemědělských oblastech. Přechod k tzv. agroekologickému hospodaření nejen se zemědělskou půdou, ale s krajinou jako celkem, vyžaduje spolupráci mezi zemědělci a výzkumem, ale stejně tak je nezbytná podpora spotřebitelů a součinnost politických představitelů.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo posoudit vliv vegetace na účinnost odstraňování živin z drenážních vod ze zemědělského povodí. V roce 2021 a 2022 byl proveden odběr biomasy z umělých mokřadů a vypočítáno množství dusíku a fosforu, které se nachází v jednotlivých mokřadech v biomase. Zároveň byla měřena hodnota fosforu a dusíku na přítoku a odtoku, z čehož lze vypočítat množství odstraněných živin a následně porovnat s množstvím živin v biomase.

Na mokřady M1, M2 a M3 přiteklo v roce 2021 1104, 1110 a 1115 g fosforu a odstraněno bylo 500, 226, 583 g P. Ve vegetaci v roce 2021 bylo zjištěno 138 g P na mokřadu M1, 113 g P na mokřadu M2 a 60 g P na mokřadu M3. V biomase se tedy nacházelo 12,5 % fosforu pro mokřad M1, 10,2 % fosforu pro mokřad M2 a 5,4 % fosforu pro mokřad M3 z přítoku. Porovnání odstraněného fosforu s fosforem ve vegetaci je 27,7 % fosforu na M1, 50,2 % fosforu na M2 a 10,3 % fosforu na M3.

Dusík v roce 2021 dosahoval na přítoku pro mokřady M1, M2 a M3 131, 120 a 131 kg N. Odstraněno bylo 46, 53, 56 kg dusíku (M1, M2, M3). Ve vegetaci se nacházelo 1,05 kg dusíku na mokřadu M1, 0,85 kg dusíku na M2 a 0,82 kg dusíku na M3. Srovnání s dusíkem, který na mokřad přiteče a který je ve vegetaci, ukazuje, že v biomase zůstává z přítoku 0,8 %, 0,7 % a 0,6 % dusíku. V mokřadech M1, M2 a M3 se nachází 2,3, 1,8 a 1,5 % dusíku z odstraněného dusíku.

Fosfor na přítoku v roce 2022 dosahoval hodnot 309 g na M1, 239 g na M2 a 286 g na M3. Odstraněno bylo 65, 53, 62 g fosforu (M1, M2, M3). Ve vegetaci mokřadů se nacházelo 139, 110, 92 g P (M1, M2, M3). Při porovnání množství P v biomase s fosforem, který přiteče, mokřady dosahovaly 45, 46, 32 % fosforu z přítoku a 214, 206, 147 % (M1, M2, M3) z odstraněného fosforu. Množství fosforu dosahující hodnot nad 100% bylo zapříčiněno velkými přivalovými dešti a podrobněji bylo popsáno ve výsledcích.

Na mokřady M1, M2 a M3 v roce 2022 přiteklo 52, 40 a 49 kg dusíku a odstraněno bylo 13, 10, 14 kg N. Ve vegetaci se nacházelo 0,9 kg na M1, 0,9 kg na mokřadu M2 a 0,7 na M3. Ve vegetaci se z přítoku naměřilo 1,7 %, 2,3 % a 1,5 % dusíku (M1, M2, M3) a z odstraněného množství bylo ve vegetaci 6,4 %, 9,2 % a 5,3 %.

V porovnání s literárními údaji z diskuse je patrné, že mokřady odstraňují poměrně veliké množství dusíku a fosforu, ale množství živin ve vegetaci dosahuje menších hodnot.

Na základě výsledků této práce by se mohla navrhnout opatření pro zlepšení výsledků odstraňování živin z drenážních vod, například zlepšení druhového složení vegetace nebo zvýšení jejího pokryvu. Nicméně, i přes pozitivní výsledky této práce, je třeba mít na paměti omezení této studie a nutnost dalšího výzkumu, zejména v dlouhodobém měřítku.

8 Seznam použitých zdrojů

- Arheimer, B., & Wittgren, H. B. (2002). Modelling nitrogen removal in potential wetlands at the catchment scale. In *Ecological Engineering*, 19, 63-80.
- AOPK ČR, ©2023: Typ mokřadu (online) [cit. 2023.02.18]. Dostupné z <<http://mokrady.ochranaprirody.cz/o-mokradech-typ-mokradu/>>.
- Baldini, R. M. (1995). Revision of the genus *Phalaris* L. (Gramineae). *Webbia*, 49(2), 265–329. <https://doi.org/10.1080/00837792.1995.10670587>.
- Bonanno, G., & Cirelli, G. L. (2017). Comparative analysis of element concentrations and translocation in three wetland congener plants: *Typha domingensis*, *Typha latifolia* and *Typha angustifolia*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 143, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.021>.
- Borin, M., & Tocchetto, D. (2007). Five year water and nitrogen balance for a constructed surface flow wetland treating agricultural drainage waters. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.12.039>.
- Brisson, J., & Chazarenc, F. (2009). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: Should we pay more attention to macrophyte species selection? *Science of The Total Environment*, 407(13), 3923–3930. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2008.05.047>.
- Brix, H. (1993). Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance. In: MOSHIRI A.G., (ed.): *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. CRC Press, Boca Raton, Florida, 9-22.
- Campbell, D. A., Cole, C. A., & Brooks, R. P. (2002). A comparison of created and natural wetlands in Pennsylvania, USA. In *Wetlands Ecology and Management*, 10, 41-49.
- Commission Directive 98/15/EC of 27 February 1998 amending Council Directive 91/271/EEC with respect to certain requirements established in Annex I thereof (Text with EEA relevance) - Publications Office of the EU. (b.r.). (online) [cit. 2023.02.03]. Dostupné z <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ff7ec087-8cc3-4619-bffc-b08ea4883d2c>>.

- Crumpton, W. G. (2001). Using wetlands for water quality improvement in agricultural watersheds; the importance of a watershed scale approach. *Water Sci Technol*, 44 (11-12), 559–564.
- Čížková, H., Vlasáková, L., & Květ, J. (2017). *Mokřady: Ekologie, ochrana a udržitelné využívání*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- Díaz, F. J., Ogeen, A. T., & Dahlgren, R. A. (2012). Agricultural pollutant removal by constructed wetlands: Implications for water management and design. *Agricultural Water Management*, 104, 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.012>.
- Dostál, J. (1989). *Nová květena ČSSR*, vol. 2. – Academia, Praha, 1563 p.
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Stuart Chapin, F., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Colin Prentice, I., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science* 309, 570-574.
- Gallant, A. L. (2015). The challenges of remote monitoring of wetlands. *Remote Sensing*, 7(8): 10938-10950. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs70810938>.
- Jírová, A. (2007). *GLYCERIA MAXIMA (Hartman.) Holmberg. – zblochan vodní / steblovka vodná*. (online) [cit. 2023.03.05]. Dostupné z <<https://botany.cz/cs/glyceria-maxima/>>.
- Józwiakowski, K., Marzec, M., Kowalczyk-Juško, A., Gizińska-Górna, M., Pytko-Woszczyło, A., Malik, A., Listosz, A., & Gajewska, M. (2019). 25 years of research and experiences about the application of constructed wetlands in southeastern Poland. *Ecological Engineering*, 127, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.013>.
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment wetlands*. CRC Press.
- Koskiaho, J., Ekholm, P., Rätty, M., Riihimäki, J., & Puustinen, M. (2003). Retaining agricultural nutrients in constructed wetlands - Experiences under boreal conditions. *Ecological Engineering*, 20(1), 89–103. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(03\)00006-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(03)00006-5).

- Kovacic, D. A., David, M. B., Gentry, L. E., Starks, K. M., & Cooke, R. A. (2000). Effectiveness of Constructed Wetlands in Reducing Nitrogen and Phosphorus Export from Agricultural Tile Drainage. *Journal of Environmental Quality*, 29(4), 1262–1274. <https://doi.org/10.2134/JEQ2000.00472425002900040033X>.
- Kynkäänniemi, P., Ulén, B., Torstensson, G., & Tonderski, K. S. (2013). Phosphorus Retention in a Newly Constructed Wetland Receiving Agricultural Tile Drainage Water. *Journal of Environmental Quality*, 42(2), 596–605. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0266>.
- Maucieri, C., Salvato, M., & Borin, M. (2020). Vegetation contribution on phosphorus removal in constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 152, 105853. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105853>.
- Meyerson, L. A., Cronin J. T. & Pyšek P. (2016). *Phragmites australis* as a model organism for studying plant invasions. – *Biological Invasions* 18: 2421–2431.
- Ministerstvo životního prostředí, ©2023: Ramsarská úmluva o mokřadech 2023 (online) [cit.2023.02.18], dostupné z <https://www.mzp.cz/cz/ramsarska_umluva_o_mokradech>.
- Mitsch, W. J. (1992). Landscape design and the role of created, restored, and natural riparian wetlands in controlling nonpoint source pollution. *Ecological Engineering*, 1, 27-47.
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands Fifth Edition*. Wiley, Hoboken, New Jersey, 91(5), 721.
- Mlejnská, E., Rozkošný, M., Baudišová, D. (2015). Optimalizace provozu a zvýšení účinnosti čištění odpadních vod z malých obcí pomocí extenzivních technologií. Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha.
- Mlejnská, E., Rozkošný, M. (2016). Návrhové parametry, provozní zkušenosti a možnosti intenzifikace umělých mokřadů. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*, 58, 11-19.
- Navratilova, Z., & Patocka, J. (2015). Chrástice rákosovitá: rostlina k zamyšlení. *Botanika* 3(2), 2015.

- Olson, R. K. (1992). Evaluating the role of created and natural wetlands in controlling nonpoint source pollution. *Ecological Engineering*, 1(1–2), 11–15. [https://doi.org/10.1016/0925-8574\(92\)90022-T](https://doi.org/10.1016/0925-8574(92)90022-T).
- Pokorný, J. (2004). Koncepce řešení malých vodních nádrží a mokřadů (online) [cit. 2023.02.18], dostupné z <<https://doczz.cz/doc/230224/pdf-mok%C5%99ady---jamiprojekt>>.
- Pullinger, M. G., & Johnson, C. J. (2010). Maintaining or restoring connectivity of modified landscapes: Evaluating the least-cost path model with multiple sources of ecological information. *Landscape Ecology*, 25(10), 1547–1560. <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9526-6>.
- Richardson, C.J., Vymazal, J. (2001). Sampling macrophytes in wetlands. In: Rader, R.B., Batzer, D.P. and Wissinger, S. (eds.), *Bioassessment and Management of North American Freshwater Wetlands*. John Wiley and Sons, 297–337.
- Rodriguez, M., & Brisson, J. (2016). Does the combination of two plant species improve removal efficiency in treatment wetlands? *Ecological Engineering*, 91, 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.02.047>.
- Romero, J. A., Comín, F. A., & García, C. (1999). Restored wetlands as filters to remove nitrogen. *Chemosphere*, 39(2), 323–332. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00113-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00113-7).
- Schimana, Walter. (2007). *Vodní rostliny: nejkrásnější druhy, výběr, kombinování, péče*. Rebo Productions, vol. 1, Čestlice, 96.
- Sommers, L.E., Nelson, D.W. (1972). Determination of total phosphorus in soils: a rapid perchloric acid digestion procedure. *Soil Science Society of America Journal*, 36, 902–904.
- Smejkal, M. (1997). *Epilobium L.* In: Slavík B. (ed.), *Květena České republiky*, vol. 5, Academia, Praha, 99–132.
- Strand, J. A., & Weisner, S. E. B. (2013). Effects of wetland construction on nitrogen transport and species richness in the agricultural landscape-Experiences from Sweden. *Ecological Engineering*, 56, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.087>.

- Spohn, M. (2016). *Co tu kvete?: originální průvodce přírodou*. Přeložila JANÁČKOVÁ, H. Praha: Knižní klub, 2016. ISBN 978-80-242-5066-3.
- Štech, M., Hroudová, Z., Kaplan, Z., & Hrouda, L. (2007). Vodní a mokřadní rostliny - taxony, společenstva, vztahy. *Zprávy Čes. Bot. Společ.*, Praha 42, Mater. 22: 113–117.
- Tanner, C. C., Clayton, J. S., & Upsdell, M. P. (1995). Effect of loading rate and planting on treatment od dairy farm wastewaters in constructed wetlands-II. Removal of nitrogen and phosphorus. *War. Res*, 29(1), 27-34.
- Tanner, C. C., Nguyen, M. L., & Sukias, J. P. S. (2005). Nutrient removal by a constructed wetland treating subsurface drainage from grazed dairy pasture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105(1–2), 145–162. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.05.008>.
- Tanner, C.C., Sukias, J.P.S., (2011). Multiyear Nutrient Removal Performance of Three Constructed Wetlands Intercepting Tile Drain Flows from Grazed Pastures. *J. Environ. Qual*, 40, 620-633.
- Toet, S., Logtestijn, R. S. P. V., Schreijer, M., Kampf, R., Verhoeven, J. T. A. (2005). The functioning of a wetland system used for polishing effluent from a sewage treatment plant. *Ecological Engineering*. 25, 101-124.
- Toscano, A., Marzo, A., Milani, M., Cirelli, G. L., & Barbagallo, S. (2015). Comparison of removal efficiencies in Mediterranean pilot constructed wetlands vegetated with different plant species. *Ecological Engineering*, 75, 155–160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.12.005>.
- Van der Valk, A.G., Jolly, R.W. (1992). Recommendations for research to develop guidelines for the use of wetlands to control rural nonpoint source pollution. *Ecological Engineering*, 1, 115-134.
- Vought, L. B.-M., & Lacoursière, J. O. (2010). Restoration of Streams in the Agricultural Landscape. In: Eiseltoová, M. (eds) *Restoration of Lakes, Streams, Floodplains, and Bogs in Europe. Wetlands: Ecology, Conservation and Management*, vol. 3. Springer, Dordrecht. 225–242. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9265-6_12.
- Vymazal, J. (2004). Kořenové čistírny odpadních vod. ENKI, Třeboň, 14.

- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>.
- Vymazal, J. (2013a). Vegetation development in subsurface flow constructed wetlands in the Czech Republic. *Ecological Engineering* 61, 575–581.
- Vymazal, J. (2013b). Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 61, 582–592. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.023>.
- Vymazal, J., Kröpfelová, L., Hrnčíř, P., (2014). Hybridní kořenová čistírna se zvýšeným účinkem při odstraňování dusíku. *Vodní hospodářství*, 4, 9–13.
- Vymazal, J. (2016). Využití umělých mokřadů pro čištění drenážních vod ze zemědělských ploch. *Vodní hospodářství*, 66, 5–7.
- Vymazal, J., & Dvořáková Březinová, T. (2018). Treatment of a small stream impacted by agricultural drainage in a semi-constructed wetland. *Science of the Total Environment*, 643, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.148>.
- Vymazal, J., Sochacki, A., Fučík, P., Šereš, M., Kaplická, M., Hnátková, T., & Chen, Z. (2020). Constructed wetlands with subsurface flow for nitrogen removal from tile drainage. *Ecological Engineering*, 155, 105943. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2020.105943>.
- Vymazal, J., Zhao, Y., Mander, Ü. (2021). Recent research challenges in constructed wetlands for wastewater treatment: A review. *Ecological Engineering*, 169, 106318.

9 Přílohy

Příloha č. 1: Chrastice rákosovitá 2021

chrastice rákosovitá 2021	M1		M2		M3	
	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok
Biomasa [g/m ²]						
Stonky	817,33	1066,67	638,67	572,00	102,33	532,00
Listy	278,67	261,33	201,33	129,33	144,00	152,00
Květy	29,33	21,67	16,00	29,33	14,67	13,33
Standing litter	114,67	150,67	166,67	122,67	93,33	100,00
P [g/m ²]						
Stonky	1,15	1,30	0,87	0,45	0,03	0,41
Listy	0,55	0,61	0,39	0,22	0,10	0,28
Květy	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01
Standing litter	0,09	0,14	0,08	0,06	0,03	0,06
N [g/m ²]						
Stonky	3,43	8,11	2,17	1,43	0,52	3,88
Listy	4,18	7,58	5,46	2,12	4,02	0,85
Květy	0,24	0,21	0,14	0,62	0,30	0,33
Standing litter	1,04	3,03	2,63	0,31	1,75	0,99

Příloha č. 2: Zblochan vodní 2021

zblochan vodní 2021	M1		M2		M3	
	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok
Biomasa [g/m ²]						
Stonky	560,00	638,67	380,00	205,33	150,00	241,33
Listy	533,33	398,67	364,00	358,67	289,67	354,67
Květy	73,33	80,00	32,00	16,00	10,00	32,00
Standing litter	230,67	172,00	146,00	136,00	184,00	52,00
P [g/m ²]						
Stonky	0,35	0,48	0,55	0,36	0,06	0,21
Listy	1,08	0,62	0,47	1,19	0,38	0,55
Květy	0,20	0,17	0,08	0,01	0,02	0,09
Standing litter	0,16	0,07	0,18	0,13	0,09	0,04
N [g/m ²]						
Stonky	1,68	4,09	1,71	1,81	0,36	1,64
Listy	8,27	5,74	7,90	7,53	4,40	10,18
Květy	0,74	1,34	0,19	0,23	0,16	0,40
Standing litter	1,94	1,87	2,42	1,94	0,88	1,12

Příloha č. 3: Chrastice rákosovitá 2022

chrastice rákosovitá 2022	M1		M2		M3	
	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok
Biomasa [g/m ²]						
Stonky	154,71	86,06	139,14	87,00	54,45	81,61
Listy	811,84	587,74	613,93	542,50	411,16	408,04
Květy	131,73	142,74	142,01	122,18	71,34	104,21
Standing litter	45,95	54,58	35,86	24,44	156,45	31,39
P [g/m ²]						
Stonky	0,38	0,31	0,32	0,13	0,07	0,22
Listy	1,51	0,99	0,95	0,51	0,38	0,67
Květy	0,22	0,17	0,16	0,10	0,06	0,14
Standing litter	0,05	0,12	0,06	0,04	0,15	0,06
N [g/m ²]						
Stonky	3,45	2,19	5,61	1,85	1,66	3,03
Listy	7,23	5,05	4,79	3,42	3,95	4,81
Květy	0,97	1,83	1,86	1,20	0,60	0,86
Standing litter	0,48	0,71	0,44	0,29	2,25	0,55

Příloha č. 4: Zblochan vodní 2022

zblochan vodní 2022	M1		M2		M3	
	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok	Přítok	Odtok
Biomasa [g/m ²]						
Stonky	459,40	255,05	496,69	413,61	213,42	213,64
Listy	269,20	379,64	166,29	222,32	200,30	245,18
Květy	89,49	124,59	0,00	0,00	27,23	42,57
Standing litter	32,22	40,06	151,00	186,00	22,85	44,15
P [g/m ²]						
Stonky	1,17	0,51	0,67	0,62	0,31	0,39
Listy	0,45	0,68	0,39	0,37	0,24	0,55
Květy	0,17	0,14	0,00	0,00	0,04	0,07
Standing litter	0,06	0,12	0,28	0,24	0,06	0,09
N [g/m ²]						
Stonky	7,53	3,80	7,40	5,09	4,03	4,51
Listy	2,23	3,61	1,36	2,56	0,88	2,13
Květy	1,62	2,43	0,00	0,00	0,36	0,80
Standing litter	0,43	0,44	2,60	2,98	0,29	0,53

Příloha č. 5: Hodnoty fosforu a dusíku (2021, 2022)

	Přítok	M1	M2	M3
2021				
Celkový fosfor	0,12	0,07	0,07	0,04
Přítok P [kg/ha/rok]		139,78	123,30	113,78
Odstraněno P [kg/ha/rok]		63,35	25,06	59,47
Celkový dusík	16,63	12,28	10,95	11,53
Přítok N [kg/ha/rok]		16632,48	13337,14	13399,35
Odstraněno N [kg/ha/rok]		5853,52	5845,74	5753,10
2022				
Celkový fosfor	0,09	0,07	0,07	0,07
Přítok P [kg/ha/rok]		39,14	26,54	29,16
Odstraněno P [kg/ha/rok]		8,23	5,90	6,35
Celkový dusík	12,32	8,91	7,97	7,29
Přítok N [kg/ha/rok]		6522,70	4449,90	4961,89
Odstraněno N [kg/ha/rok]		1697,01	1130,64	1423,08

Příloha č. 6: Koncentrace fosforu 2021 [mg/l]

Koncentrace P 2021 [mg/l]				
Datum měření	Přítok	M1	M2	M3
11.1.	0,09	0,03	0,03	0,00
14.1.	0,08	0,09	0,09	0,09
21.1.	0,10	0,08	0,07	0,06
15.2.	0,09	0,04	0,02	0,00
9.3.	0,19	0,18	0,05	0,10
23.3.	0,12	0,09	0,11	0,10
8.4.	0,08	0,07	0,07	0,10
19.4.	0,09	0,07	0,07	0,00
4.5.	0,21	0,16	0,05	0,10
13.5.	0,12	0,15	0,35	0,05
17.5.	0,15	0,03	0,03	0,00
18.5.	0,10	0,03	0,03	0,00
3.6.	0,09	0,04	0,04	0,00
5.6.	0,12	0,11	0,03	0,00
6.6.	0,08	0,07	0,35	0,00
10.6.	0,05	0,04	0,04	0,02
21.6.	0,06	0,05	0,06	0,03
29.6.	0,06	0,03	0,02	0,00
8.7.	0,31	0,08	0,07	0,10
9.7.	0,72	0,08	0,20	0,10
13.7.	0,09	0,06	0,08	0,04
25.7.	0,11	0,10	0,07	0,06

26.7.	0,10	0,08	0,04	0,02
27.7.	0,09	0,04	0,04	0,10
3.8.	0,11	0,09	0,04	0,00
7.8.	0,14	0,11	0,01	0,05
11.8.	0,11	0,09	0,08	0,03
24.8.	0,13	0,04	0,05	0,10
2.9.	0,04	0,03	0,03	0,03
21.9.	0,13	0,05	0,05	0,00
28.9.	0,04	0,04	0,05	0,05
4.10.	0,05	0,05	0,03	0,04
17.10.	0,05	0,04	0,05	0,03
21.10.	0,15	0,11	0,03	0,00
5.11.	0,07	0,06	0,05	0,03
18.11.	0,04	0,04	0,04	0,05
11.12.	0,04	0,04	0,04	0,03
14.12.	0,09	0,09	0,06	0,03
SM. Odchylka	0,1117	0,0372	0,0734	0,0373
Rozptyl	0,0125	0,0014	0,0054	0,0014

Příloha č. 7: Koncentrace fosforu 2022 [mg/l]

Koncentrace P 2022 [mg/l]				
Datum měření	Přítok	M1	M2	M3
10.1.	0,09	0,05	0,06	0,04
8.2.	0,04	0,04	0,04	0,05
2.3.	0,04	0,01	0,01	0,04
9.3.	0,10	0,10	0,09	0,08
17.3.	0,01	0,01	0,01	0,01
6.4.	0,03	0,02	0,10	0,02
28.4.	0,05	0,01	0,04	0,08
29.4.	0,14	0,10	0,01	0,11
26.5.	0,12	0,10	0,10	0,10
2.6.	0,05	0,02	0,02	0,02
8.6.	0,12	0,10	0,10	0,01
23.6.	0,11	0,01	0,01	0,09
27.6.	0,09	0,05	0,06	0,06
7.7.	0,05	0,03	0,03	0,01
25.7.	0,08	0,08	0,07	0,07
28.7.	0,09	0,10	0,09	0,09
24.8.	0,08	0,07	0,06	0,06
7.9.	0,09	0,09	0,09	0,10
12.9.	0,11	0,09	0,10	0,18
16.9.	0,09	0,08	0,10	0,09

19.9.	0,10	0,08	0,05	0,06
23.9.	0,09	0,08	0,09	0,09
25.9.	0,09	0,09	0,09	0,08
6.10.	0,19	0,09	0,09	0,09
17.10.	0,07	0,05	0,06	0,07
1.11.	0,16	0,11	0,13	0,14
14.11.	0,06	0,07	0,06	0,05
25.11.	0,09	0,09	0,09	0,09
13.12.	0,06	0,06	0,08	0,05
28.12.	0,11	0,09	0,09	0,08
SM. Odchylka	0,0377	0,0331	0,0326	0,0374
Rozptyl	0,0014	0,0011	0,0011	0,0014

Příloha č. 8: Koncentrace dusíku 2021 [mg/l]

Koncentrace N 2021 [mg/l]				
Datum měření	Přítok	M1	M2	M3
11.1.	16,90	14,80	14,20	14,93
14.1.	10,95	4,21	7,02	9,42
21.1.	8,84	7,32	2,20	5,14
15.2.	26,76	23,80	24,90	24,60
9.3.	13,04	7,20	10,20	12,30
23.3.	20,23	16,57	15,24	14,03
8.4.	17,52	14,23	13,51	14,98
19.4.	21,36	18,56	13,94	15,32
4.5.	21,67	17,56	16,38	15,41
13.5.	14,26	12,36	10,36	15,32
17.5.	22,94	16,54	13,25	13,16
18.5.	21,28	19,71	10,98	17,96
3.6.	24,68	22,65	14,65	20,84
5.6.	24,32	17,28	15,32	6,58
6.6.	25,21	18,24	17,03	19,32
10.6.	23,22	20,62	17,58	18,55
21.6.	23,04	19,44	16,31	16,78
29.6.	21,44	16,22	12,58	13,25
8.7.	14,20	12,06	10,36	9,32
9.7.	19,32	9,25	8,51	10,03
13.7.	15,99	11,04	9,56	9,89
25.7.	12,36	8,23	7,15	7,32
26.7.	13,72	8,56	6,98	6,14
27.7.	13,12	4,56	4,36	3,98
3.8.	15,39	10,26	10,87	9,03
7.8.	16,47	11,25	10,65	10,35

11.8.	14,35	10,36	10,98	8,84
24.8.	11,12	9,12	8,54	9,06
2.9.	11,70	9,02	9,21	8,74
21.9.	12,37	10,25	9,54	9,32
28.9.	15,08	8,37	6,43	6,86
4.10.	16,37	9,25	8,84	8,64
17.10.	13,06	8,85	7,85	8,64
21.10.	10,80	7,25	8,15	7,74
5.11.	12,68	8,54	8,78	8,16
18.11.	10,40	6,36	7,76	10,96
11.12.	16,02	7,54	7,26	9,34
14.12.	9,56	9,16	8,48	7,99
SM. Odchylka	4,9429	5,1269	4,2351	4,6311
Rozptyl	24,4325	26,2847	17,9361	21,4474

Příloha č. 9: Koncentrace dusíku 2022 [mg/l]

Koncentrace N 2022 [mg/l]				
Datum měření	Přítok	M1	M2	M3
10.1.	14,26	12,98	13,02	12,23
8.2.	17,56	16,02	16,24	15,55
2.3.	17,65	18,98	18,24	18,11
9.3.	18,23	18,25	19,12	17,55
17.3.	13,35	12,02	10,26	10,33
6.4.	14,23	12,03	12,36	11,88
28.4.	13,25	11,25	12,03	10,54
29.4.	19,55	16,45	13,50	10,35
26.5.	8,64	5,68	4,01	2,03
2.6.	10,23	5,47	2,06	0,95
8.6.	5,23	2,06	1,02	0,88
23.6.	12,56	3,12	1,03	1,55
27.6.	11,65	3,21	0,21	0,18
7.7.	10,21	3,49	0,56	0,85
25.7.	10,58	3,02	0,58	0,55
28.7.	9,58	1,03	1,25	1,34
24.8.	8,89	2,54	1,97	1,55
7.9.	10,59	4,21	1,11	0,56
12.9.	9,35	10,06	2,22	0,65
16.9.	16,87	10,32	15,65	14,71
19.9.	14,21	5,84	4,26	3,50
23.9.	15,01	10,64	12,40	13,68
25.9.	12,87	11,32	10,21	10,49
6.10.	11,34	9,58	9,03	8,56

12.10.	11,25	11,02	10,54	7,23
17.10.	11,56	9,64	9,12	8,19
25.10.	12,36	11,03	11,58	8,32
1.11.	4,37	2,80	2,03	2,46
14.11.	10,19	8,31	5,28	5,69
25.11.	8,49	6,73	6,73	6,80
13.12.	11,65	10,15	10,14	10,12
28.12.	18,56	15,92	17,24	15,95
SM. Odchyłka	3,6053	4,9564	5,9360	5,6883
Rozptył	12,9984	24,5660	35,2355	32,3564