



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH

FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra biologických disciplín

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

České Budějovice
2024

Autoreferát disertační práce

Doktorand: Ing. Lenka Moulisová

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Aplikovaná a krajinná ekologie

Název práce: Struktura a produkce podzemních orgánů v travinných mokřadech

Školitel: prof. RNDr. Hana Čížková, CSc.

Impaktivé publikace

Moulisová, L., Čížková, H., Dušek, J., Kazda, M. (2023): Root and rhizome traits of the common reed (*Phragmites australis*) in a constructed wetland for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 186, 106832.

Vítková J., Dušek J., Stellner S., Moulisová L., Čížková H. (2017): Effect of hummock-forming vegetation on methane emissions from a temperate sedge-grass marsh. *Wetlands*, 37. 675-686 pp.

Honissová M., Hovorka F., Kuncová Š., Moulisová L., Vítková J., Plsová M., Čížek J., Čížková H. (2015): Seasonal dynamics of biomass partitioning in a tall sedge, *Carex acuta* L. *Aquatic Botany*, 125. 64-71 pp.

Ostatní publikace

Moulisová L., Čížková H. (2013): The structure and production of belowground organs in a herbaceous wetland. Abstract. Proceedings of the Wetland Systems: Ecology, Functioning and Management. Padova, 1.-4.9. 2013.

Moulisová L., Čížková H. (2011): Belowground biomass of the common reed (*Phragmites australis*) in a constructed wetland. Abstract. Proceedings of the Joint meeting of society of wetland scientists, wetpol and wetland biogeochemistry symposium. Prague, 3.-8.7. 2011.

Abstrakt

Podzemní části rostlin hrají důležitou roli ve fungování mokřadů, ale jejich biomasa a strukturální vlastnosti zůstávají stranou zájmu, a to jak v přirozených, tak v umělých mokřadech. Tato práce se skládá ze tří studií, jejichž cílem je shromáždit a dále rozvinout poznatky o struktuře a produkci podzemních orgánů zkoumaných druhů ve vztahu k produkci biomasy celé rostliny či porostu. Strukturní a produkční charakteristiky podzemních částí rostlin jsou hodnoceny z hlediska sezónní dynamiky a životního cyklu rostlin a dále ve vztahu k určujícím vnějším faktorům, zejména míře zaplavení.

V první studii byla posuzována biomasa a strukturní vlastnosti oddenků a kořenů *Phragmites australis* (Cav.) Steud. v nátokové a odtokové části nově založeného vybudovaného mokřadu s podpovrchovým horizontálním tokem (Slavošovice, Česká republika). Biomasa oddenků *P. australis* se zvyšovala až do 6. roku po výsadbě a dosahovala v nátokové a odtokové části kořenového pole přibližně 1,5 a 2,0 kg.m⁻². Průměrná živá kořenová biomasa činila asi 7 % celkové živé podzemní biomasy. Strukturní znaky kořenů ukázaly, že v nátokové části se tvořily silnější a kratší kořeny. Výsledkem byly rozdíly v celkové délce kořenů, která dosahovala 2,4 km.m⁻² v nátokové a 3,3 km.m⁻² v odtokové části. To pravděpodobně odráží toxicitu vypouštěných odpadních vod. Výsledky této studie podporují předchozí zjištění, že podzemní části *P. australis* jsou důležitým zdrojem uhlíku v kořenových čistírnách, dobře snášejí anaerobní prostředí v čistícím loži a poskytují velký povrch pro uchycení mikroorganismů.

Druhá studie se soustředila na morfologii kořenového systému ostřice štíhlé v přirozeném mokřadu. Potvrdila, že z odnoží vyrůstají dva druhy kořenů, a to tenké (vodní) a tlusté kořeny (půdní). V druhé polovině vegetačního období tvořily tlusté kořeny 78 % a tenké kořeny 22 % hmotnosti kořenové soustavy jedné odnože. Dále byla studována biomasa trsů ostřice a její rozdělení do různých složek. Průměrná biomasa kořenů vztažená na jednu odnož v bultu dosahovala 0,8–3,1 g. Sezónní minimum nastalo v červnu a sezónní maximum na konci vegetační sezóny (v říjnu). Průměrná biomasa kořenů celého porostu se pohybovala v rozmezí 80–240 g.m⁻². Poměr biomasy kořenů k biomase nadzemních částí (R:S) se během vegetačního období pohyboval od 2,8 do 3,2.

Předmětem třetí studie byl vliv záplavového režimu na kořenovou soustavu ostřice štíhlé. Studie byla prováděna v kultivačním pokusu, který se skládal ze čtyř variant: Limózní (s hladinou v úrovni povrchu substrátu), Litorální (hladina dosahovala asi 15 cm nad povrch substrátu), Jarní záplava (hladina v úrovni varianty Litorální do konce července a Limózní od začátku srpna) a Letní záplava (hladina v úrovni varianty Limózní do konce července a poté asi 35 cm, tj. přibližně do poloviny výšky odnoží). Záplavový režim průkazně ovlivnil strukturní charakteristiky kořenů (specifická délka, specifický povrch a specifický objem, tj. délka resp. povrch, objem vztažené na 1g sušiny). Tyto charakteristiky se lišily jak mezi různými hloubkovými vrstvami pěstebního substrátu v rámci téže varianty, tak mezi různými variantami v rámci téže hloubkové vrstvy. Kultivační pokus ukázal, že v Limózní variantě byla specifická délka kořenů v horní vrstvě menší než u ostatních variant a byla podobná ve všech vrstvách. Rozdíly ve specifické délce kořenů mezi variantami se odrazily i v celkové délce kořenů na jeden květináč. Ta byla největší ve variantě Litorální. Celková biomasa kořenů v květináči byla podobná ve všech variantách s výjimkou Letní záplavy. Varianta Letní záplava měla nejmenší biomasu kořenů v květináči a také nejmenší celkovou délku kořenů. Poměr biomasy kořenů k biomase nadzemních částí (R:S) odrážel míru zaplavení. Největší byl u varianty Limózní, v níž rostliny nebyly vůbec zaplaveny. Kultivační pokus ukázal, že *C. acuta* se dokáže adaptovat na různé hydrologické podmínky. *C. acuta* měla v Limózní variantě největší podzemní i celkovou biomasu a podobně na tom byly i rostliny vystavené Jarní záplavě. Nejméně příznivá byla Letní záplava.

Klíčová slova: *Phragmites australis*; podzemní biomasa; zásoba uhlíku; vegetační kořenová čistírna; struktura kořene; oddenek; *Carex acuta*; kultivační pokus; mokřad; ostřicový bult; vodní hladina.

Abstract

Belowground plant parts play an important role in the functioning of wetlands, but their biomass and structural properties remain out of concern in both natural and constructed wetlands. This thesis consists of three studies, the aim of which is to collect and further develop knowledge on the structure and production of belowground organs of the studied species in relation to the biomass production of the whole plant or stand. The structural and production characteristics of the belowground plant parts are evaluated in terms of seasonal dynamics and the plant life cycle and in relation to determining environmental factors, in particular the flooding regime.

In the first study, the biomass and structural properties of rhizomes and roots of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. were assessed in the inflow and outflow parts of a newly established constructed wetland with subsurface horizontal flow (Slavošovice, Czech Republic). The rhizome biomass of *P. australis* increased until the 6th year after planting and reaching about 1,5 and 2,0 kg.m⁻² in the inflow and outflow parts of the bed, respectively. The average live root biomass was about 7 % of the total live belowground biomass. The analysis of root structural traits showed that thicker and shorter roots were formed in the inflow part. As a result, there were differences in total root length, which reached 2,4 km.m⁻² in the inflow and 3,3 km.m⁻² in the outflow parts. This probably reflects a higher nutrient availability at the inflow rather than the toxicity of the discharged wastewater. The results of this study support previous arguments that the belowground parts of *P. australis* are an important carbon source in constructed wetlands, tolerate the anaerobic environment in the treatment bed well and provide a large surface area for the attachment of microorganisms.

The second study focused on the morphology of the root system of *Carex acuta* slender sedge, in a natural wetland. The study confirmed that the rhizomes grow two types of roots, namely fine roots (water) and coarse roots (soil). In the second half of the growing season, thick roots accounted for 78 % and thin roots for 22 % of the weight of the root system per tiller. Furthermore, the biomass of sedge clumps and its distribution into different compartments was studied. The average root biomass per tiller in a clump was 0,8 to 3,1 g. The seasonal minimum of belowground biomass occurred in June and the seasonal maximum at the end of the growing season (October). The average root biomass of the whole stand ranged from 80 to 240 g.m⁻².

The ratio of root to shoot biomass (R:S) ranged from 2,8 to 3,2 during the growing season.

The subject of the third study was the effect of the flood regime on the root system of *Carex acuta*. The study was conducted in a cultivation experiment (mesocosm experiment) that consisted of four treatments: Limosal (with water level at the substrate surface), Littoral (the level was about 15 cm above the substrate surface), Spring flood (level of the Littoral treatment until the end of July and the Limosal treatment from the beginning of August) and Summer flood (level in the Limosal treatment until the end of July and then about 35 cm, i.e. about a half of the shoot height). The flooding regime had a significant effect on the structural traits of the roots (specific length, specific surface area and specific volume, i.e. length, surface area, and volume per 1 g dry weight, respectively). These traits varied both between different depth layers of the growing medium within the same treatment and between different treatments within the same depth layer. The cultivation experiment showed that the specific root length in the Limosal treatments was similar in all depth layers and smaller than in the other treatments in the upper layer. The differences in specific root length between the treatments were also reflected in the total root length per pot. It was the largest in the Littoral treatments. The total root biomass per pot was similar in all treatments except Summer flood. The Summer flood treatment had the smallest root biomass per pot, and also the smallest total root length. The ratio of root to shoot biomass (R:S) reflected the flood regime. It was highest in the Limosal treatment, in which the plants were not flooded at all. The cultivation experiment showed that *C. acuta* can adapt to different hydrological regimes. It had the highest below-ground and total biomass in the Limosal treatment, similar to the Spring flood. The Summer flood was the most stressful among the treatments.

Keywords: *Phragmites australis*; belowground biomass; carbon budget; constructed wetland; root structure; rhizome; *Carex acuta*; mesocosm experiment; sedge hummocks; water surface; wetland.

Obsah

Úvod.....	10
1 Cíle práce	12
2 Literární přehled.....	13
2.1 Půdní prostředí	13
2.2 Adaptace podzemních částí rostlin na podmínky v mokřadech	13
2.3 Úloha podzemních částí rostlin v mokřadech	14
3 Výběr rostlinných druhů	15
3.1 Rákos obecný	15
3.2 Ostřice štíhlá.....	15
4 Charakteristiky zkoumaných území	17
4.1 Vegetační kořenová čistírna ve Slavošovicích	17
4.2 Mokré Louky u Třeboně.....	17
5 Metodika	19
5.1 Rákos obecný na kořenové čistírně	19
5.1.1 Odběr biomasy	19
5.1.2 Analýza kořenů	19
5.2 Ostřice štíhlá na Mokřích Loukách	19
5.2.1 Odběr a hodnocení odnoží	19
5.2.2 Odběr a hodnocení trsů	20
5.3 Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu	20
5.3.1 Simulace různých režimů zaplavení.....	20
5.3.2 Odběry biomasy	21
5.3.3 Analýza struktury kořenů	21
5.4 Statistické hodnocení.....	22
6 Výsledky	23

6.1	Rákos obecný na kořenové čistírně	23
6.1.1	Hustota odnoží a biomasa	23
6.1.2	Struktura kořenů.....	23
6.2	Ostřice štíhlá na Mokřých Loukách	26
6.2.1	Analýza kořenů jednotlivých odnoží	26
6.2.2	Analýza kořenových systémů celých bultů.....	26
6.3	Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu	27
7	Diskuse.....	30
7.1	Obecné poznatky o struktuře kořenů.....	30
7.2	Rákos obecný	30
7.2.1	Rostlinná biomasa ve vztahu k věku porostu	30
7.2.2	Struktura kořenů.....	31
7.3	Ostřice štíhlá na Mokřých loukách.....	31
7.3.1	Biomasa kořenů.....	31
7.3.2	Struktura kořenů.....	32
7.4	Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu	32
7.4.1	Vliv vodního režimu na tvorbu biomasy a poměrů R/S, B/A	32
8	Závěr	35
8.1	Rákos obecný v kořenové čistírně ve Slavošovicích.....	35
8.2	Ostřice štíhlá na Mokřých Loukách	35
8.3	Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu	36
	Seznam použité literatury.....	37

Úvod

Podzemní orgány vytrvalých rostlin představují kolem 50-80 % celkové rostlinné hmotnosti v době jejího sezónního maxima a více než 90 % hmotnosti na jaře a na podzim. Podzemní orgány rostlin jsou důležité nejen pro vlastní životní pochody rostlin, ale i pro biologii půdy, pro její strukturu a bilanci uhlíku a minerálních živin v ekosystému.

Většina ekologických prací zabývajících se mokřadními porosty z produkčně ekologického hlediska studuje dynamiku nadzemních orgánů, ale podzemní orgány z metodických a technických důvodů opomíjí. Je tomu tak pro technickou náročnost spojenou s odebráním a zpracováním vzorků a velkou prostorovou variabilitou. Postihnout roční dynamiku podzemních částí mnoha druhů je obtížné také proto, že jsou víceleté a jejich stáří se v terénu obtížně odhaduje.

Předložená práce je zaměřena na strukturní a morfologické vlastnosti podzemních orgánů rákosu obecného (*Phragmites australis*) a ostřice štíhlé (*Carex acuta*). Tyto dva druhy jsou široce rozšířenými dominantami travinných mokřadních porostů a existuje již o nich bohatá literatura. Oba druhy náleží k taxonomické třídě jednoděložných, a proto se v hlavních rysech shoduje i jejich morfologická stavba. To umožňuje použití srovnatelného metodického přístupu.

Práce se skládá ze tří studií. První z nich (Rákos obecný na kořenové čistírně) vznikla při řešení projektů GAČR č. 206/02/1036 a GAJU č. 107/2010/Z. Analýzu strukturních charakteristik kořenů rákosu jsem provedla na Ústavu systematické botaniky a ekologie na Univerzitě v Ulmu pod vedením prof. Mariana Kazdy.

Druhá studie (Ostřice štíhlá na Mokřých loukách) a studie č. 3 (Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu) byly součástí projektů GAČR č. P504/11/1151 a GAJU č. 081/2016/Z. Terénní odběry ve studii č. 2 jsem provedla společně s Ing. Markem Nešporem (Nešpor, 2015), jemuž jsem konzultovala diplomovou práci.

Třetí studie (Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu) byla realizována v rámci projektů GAČR č. P504/11/1151 a GAJU č. 081/2016/Z jako součást týmového výzkumu. Rozvržení pokusu, odběry rostlin a vyhodnocení jejich nadzemní a celkové biomasy bylo součástí diplomové práce Vojtěcha Januše (Januš, 2015) a disertační práce Jitky Novotné (Novotná, 2020). Na podzim roku 2015 jsem se podílela na odběru podzemní biomasy a vyhodnotila jsem získané výsledky. Údaje o nadzemní biomase jsou zde použity jako sdílená data. Na analýze strukturních charakteristik

kořenů jsem spolupracovala s Ing. Markem Nešporem, který používal stejnou metodiku ve své disertační práci.

1 Cíle práce

Rámcovým cílem práce je shromáždit a dále rozvinout poznatky o struktuře a produkci podzemních orgánů zkoumaných druhů ve vztahu k produkci biomasy celé rostliny či porostu. Strukturní a produkční charakteristiky podzemních částí rostlin jsou hodnoceny z hlediska sezónní dynamiky a životního cyklu rostlin a dále ve vztahu k určujícím vnějším faktorům, zejména míře zaplavení. Výzkum je navržen tak, aby získané výsledky mohly být využity v kontextu studia fixace uhlíku v mokřadních ekosystémech.

Dílčí cíle práce se vztahují k jednotlivým terénním a experimentálním studiím. Dílčí cíle pro rákos obecný na kořenové čistírně jsou:

1. Zjistit rostlinnou biomasu (oddenků a kořenů) v nátokové a odtokové zóně čistírny v prvních osmi letech od osázení čistírny.
2. Zjistit strukturní parametry kořenů (délka, povrch, objem) v různých tloušťkových třídách v nátokové a odtokové zóně čistírny.

Dílčí cíle pro ostřici štíhlou na Mokřích Loukách jsou:

1. Popsat morfologickou stavbu kořenové soustavy jedné odnože.
2. Charakterizovat sezónní dynamiku biomasy kořenů jedné odnože.
3. Popsat sezónní dynamiku biomasy kořenů celých bultů.

Dílčí cíle pro ostřici štíhlou v kultivačním pokusu jsou:

3. Zjistit strukturní charakteristiky kořenů (distribuci kořenů v různých tloušťkových třídách) pro jednotlivé hloubkové vrstvy ve variantách záplavového režimu.
4. Porovnat biomasu kořenů v různých hloubkových vrstvách variant záplavového režimu.
5. Porovnat poměry nadzemní a podzemní biomasy ve variantách záplavového režimu.

2 Literární přehled

2.1 Půdní prostředí

Mokřady jsou území s trvalou nebo dočasnou přítomností vody nad povrchem půdy, nebo jí je půda nasycena (Květ a Čížková, 2017). Mokřady jsou tedy složeny ze tří základních komponentů: hydrologie, bioty a fyzikálně-chemického prostředí (Mitch a Gosselink, 2015). V prostředí mokřadů je půda nasycena vodou, což snižuje rychlost difúze plynů a hromadí fytotoxické sloučeniny, mění chemické formy minerálních živin a jejich dostupnost pro rostliny.

V zamokřených půdách se tvoří oxická a anoxická vrstva. Oxická vrstva, která je na povrchu půdy, obsahuje oxidované formy prvků NO_3^- , Fe^{3+} , SO_4^{2-} a Mn^{4+} . Pod ní je redukovaná vrstva s modrošedou barvou a redukovanými formami prvků (ionty Fe^{2+} a Mn^{2+} , amoniak, sulfidy) (Vymazal, 2004). Redukované formy vznikající v podmínkách bez kyslíku mohou být toxické (Ponnamperuma, 1984). Nedostatek kyslíku a s ním spojené chemické změny v půdě jsou nejčastějším typem stresového faktoru spojeného se zaplavením.

2.2 Adaptace podzemních částí rostlin na podmínky v mokřadech

Rostliny mají dvě strategie přežití při zaplavení: toleranci k anoxii a vyhýbání se anoxii (Larcher, 1988). Vyhýbání se anoxii zahrnuje tvorbu vzdušných prostor v kořenech (aerenchymu), které přivádějí kyslík z nadzemních částí (Armstrong, 1979). V zaplavené půdě je provzdušnění z nadzemních částí rostliny životně důležité (Armstrong, 1978; Brix, 1993). Vzduch, který se dostane do nadzemních částí rostliny, je veden součinností konvekce (hromadného toku po spádu tlaku) a prosté difúze (pohyb jednotlivé chemické látky po spádu koncentrace) systémem intercelulár až do kořenů (Visser et al., 2003).

Další důležitou adaptací mokřadních rostlin jsou ochranné bariéry. Ochranné bariéry, jako je exodermis, které zabraňují úniku kyslíku a průniku toxických látek z anoxického prostředí (Votrubová a Pecháčková, 1996).

Při nedostatku kyslíku přecházejí kořenové buňky na anaerobní metabolismus (anaerobní fermentaci). Což zahrnuje fermentaci sacharidů na ATP (Končalová, 1990). Při fermentaci se však spotřebuje velké množství rezervních sacharidů, protože anaerobní procesy produkují mnohem méně ATP než aerobní (Sauter, 2013; Reddy

a DeLaune, 2008). Vyčerpání zásob sacharidů pak může vést k úhynu rostliny (Končalová, 1990).

Hormonální regulace základním způsobem ovlivňuje vývoj kořenového systému. Stresové reakce se účastní různé fytohormony. Největší význam má ethylen. Ethylen stimuluje enzym celulózu, který je zodpovědný za rozpad buněčných stěn. Ethylen dále interaguje s gibereliny a auxiny (Liao a Lin, 2001). Gibereliny a auxiny obecně zvyšují rychlost metabolických procesů, mimo jiné indukují dlouhivý růst stonku (Podlešáková et al., 2012).

2.3 Úloha podzemních částí rostlin v mokřadech

V životě rostlin plní kořeny několik základních funkcí, které jsou základem provozních procesů na ekosystémové úrovni. Od těchto procesů se odvíjejí ekosystémové provozní procesy, v nichž mají kořeny a oddenky podstatnou roli. Kořeny zpevňují povrchovou vrstvu půdy, ovlivňují bilanci uhlíku a minerálních živin v ekosystému, poskytují vhodné prostředí a organické látky pro půdní mikroorganismy, přivádějí do svého okolí kyslík aerenchymem, a umožňují tak oxidaci redukovaných chemických látek.

3 Výběr rostlinných druhů

3.1 Rákos obecný

Rákos obecný [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.] patří mezi vytrvalé trávy (čeleď lipnicovité). Dorůstá do výšky 4 m, v teplejších oblastech může dosahovat do výšky přes 6 m. Podzemní části rákosu obecného se skládají z kořenů a oddenků. Kořenová soustava je svazčitá a je tvořena adventivními kořeny, které vyrůstají z kolének na oddenku a na bázích stonků. Oddenky jsou víceleté, dožívají se stáří kolem 4-6 let (Čížková a Lukavská, 1999). Kořeny prorůstají do značných hloubek (i přes 12 m). Hloubka prorůstání oddenků se udává v rozmezí 60–70 cm, ale může dosahovat i hloubky 1,5 m (Vymazal, 1995). Rákos se rozmnožuje vegetativně i generativně (semeny).

Životní cyklus jednotlivých odnoží trvá jeden rok. Na podzim dochází k vyrůstání nové větve oddenku, a to z podzemní části stébla nebo ze staršího oddenku. Z této nové větve se vytváří terminální pupen. Obvykle na začátku další vegetační sezóny. Ve vegetační sezóně z pupenu vyrůstá nadzemní prýt. Kromě nadzemního prýtu se tvoří prýty z tzv. laterálních pupenů na oddenkových větvích vyrůstajících z podzemní části víceletého stébla. Ke konci vegetační sezóny v podmínkách mírného a chladného klimatu nadzemní části zasychají a organické látky se přemísťují do podzemních částí (oddenků). V předjaří se dokončí formování nových výhonů (Haslam, 1971).

3.2 Ostřice štíhlá

Ostřice štíhlá (*Carex acuta* L., čeleď šáchorovité) dorůstá do výšky 30 až 150 cm. Vytváří silné odnože vyrůstající v trsech. Ostřice patří do skupiny ostřic horizontálně oddenkatých. Vytváří dlouhé podzemní výběžky (oddenky), jimiž se horizontálně šíří. Z oddenků a bází odnoží vyrůstají dva typy kořenů. Kořeny "půdní", které jsou tlusté, málo větvené a nachází se pod povrchem půdy. Tyto kořeny plní funkci upevňovací a potřebují mít provzdušnění. Kořeny "vodní", které jsou tenké, hodně větvené a nachází se nad povrchem trvale zaplavené půdy, tedy v prostředí s dostupným kyslíkem. Tyto tenké kořeny (≤ 2 mm v průměru) umožňují příjem živin (Lawrence et al., 2013; Jackson et al., 1997; Končalová 1990; Končalová a Pazourek, 1988).

Nadzemní odnože tvoří trsy. Trsy jsou víceleté. V nekoseném porostu v průběhu času vytvářejí vyvýšené buly, které mohou dosahovat výšky až 0,5 m (Honissová et al., 2015). Mezi buly zůstávají prohlubně (šlenky). Šlenky jsou jen málo prokořeněné,

což je způsobeno zaplavováním lokality. Buly jsou na rozdíl od šlenků hustě prokořeněné, protože při zaplavení je převážná část jejich kořenů nad zaplaveným povrchem.

Životní cyklus jednotlivých odnoží zahrnuje fázi vegetativní a generativní. Na podzim se vytvoří mladá vegetativní odnož. Z ní na jaře prvního roku vyrostе vegetativní odnož a ve stejném roce na podzim zakládají květní primordia. Na jaře druhého roku se odnož dostává do fáze generativní, vytvoří semena a odumírá.

4 Charakteristiky zkoumaných území

4.1 Vegetační kořenová čistírna ve Slavošovicích

Rákos obecný byl studován v prostředí umělého mokřadu, vegetační kořenové čistírny ve vesnici Slavošovice. Vegetační kořenová čistírna je umělý typ mokřadu, který funguje na stejných principech jako mokřady přirozené. Slouží jako model pro studium primární produkce, využití slunečního záření pro fixaci uhlíku (uhlíková bilance v ekosystému), evapotranspirace a dalších ekosystémových funkcí.

Vesnice Slavošovice je vzdálená přibližně 10 km od Třeboně. Čistírna byla v roce 2001 osázena rákosem a její provoz byl zahájen v srpnu roku 2001. Denně se v kořenové čistírně vyčistí přibližně 30 m³ odpadní vody. Kořenová čistírna se skládá ze dvou částí: předčištění a dvou kořenových polí. Předčištění je tvořeno z česel a lapáku písku, které zbavují odpadní vodu hrubých nečistot. Z předčištění je voda rozdělována na kořenové pole. Plocha každého pole je 374 m², celková plochy je 748 m². Délka pole je 17 m, šířka pole je 22 m a sklon pole je 1 %. Kořenové pole je odděleno od podloží nepropustnou vrstvou jílu. Pole je vyplněné říčními valouny o velikosti 1-2 cm. Nátoková a odtoková zóna pole je vyplněna hrubým štěrkem, ve kterém je umístěna perforovaná drenážní trubka, která slouží k přivádění a odvádění vody. Pole jsou osázena rákosem obecným (Pícek et al., 2007).

4.2 Mokré Louky u Třeboně

Druhá rostlina (ostřice štíhlá) byla studována na lokalitě Mokré Louky u Třeboně. Mokřad Mokré Louky se nachází poblíž města Třeboň v jižních Čechách, Česká republika, v centru biosférické rezervace Třeboňská pánev (49°8'10.3" N, 14°48'60.2" E, 426,5 m n. m.). Zabírá plochu 450 ha. Oblast je pokryta vrstvou rašeliny o tloušťce až několik metrů, která leží na kvartérních aluviálních písčích a jílech (Jeník et al., 2002). Mokřad se nachází v záplavové oblasti rybníka Rožmberka. Studovaná lokalita představuje nejvlhčí část tohoto mokřadu. Vegetaci tvoří převážně vysoké ostřice (*Carex acuta* L., syn. *Carex gracilis* Curt., *Carex vesicaria* L.) a mokřadní trávy (především *Calamagrostis canescens* (Weber) Roth.) (Prach, 1993, 2008; Prach a Soukupová, 2002). Významnou strukturu Mokřáků tvoří buly a šlenky. Buly jsou tvořeny převážně trsy *Carex acuta*. Doprovodné druhy obvykle osidlují okraje bultů a zasahují do šlenků pouze během suchých let. Od 80. let 20. století byla lokalita ovlivněna přísunem živin z vepřové kejdy, která byla

aplikována na obhospodařovanou část mokřadu výše proti proudu. Probíhající eutrofizace se projevuje rozšiřováním *Urtica dioica* L., *Phalaris arundinacea* L., *Rumex* sp. div. a dalších ruderálních druhů do vegetace vysokých ostřic (Prach, 2008).

5 Metodika

5.1 Rákos obecný na kořenové čistírně

5.1.1 Odběr biomasy

Na kořenovém poli byly vytyčeny tři transekty v pravé, střední a levé části lože. Transekt na pravé a levé straně byl umístěn 2 m od okraje filtračního lože. Místa odběru vzorků byla situována v nátokové (2–4 m od začátku filtračního lože) a odtokové části (10–12 m).

Odběr vzorků probíhal destruktivní metodou podle Jakrlové (1987). Vzorky nadzemní biomasy byly odebrány z plochy 0,5 x 0,5 m, zatímco monolity podzemní biomasy byly odebírány z plochy 0,5 x 0,25 m. Výška monolitů odpovídala hloubce prokořenění (0,3 m v nátokové části a přibližně 0,4 m v odtokové části). Monolity byly vykopány, důkladně vyčištěny a převezeny do laboratoře. Rostlinný materiál byl poté roztržěn na frakce: živé kořeny, živé oddenky a odumřelé části. Vzorky byly vysušeny na konstantní hmotnost při 85 °C a množství sušiny přepočteno na metr čtvereční ($\text{g DW} \cdot \text{m}^{-2}$).

5.1.2 Analýza kořenů

Analýza kořenové soustavy se prováděla na podzim 2009 z 12 vzorků odebraných na nátokové a odtokové části pole. Z každého vzorku byly vybrány tři oddenky. Z každého oddenku byla pomocí skalpelu odříznuta jedna uzlina s kořeny, na které byl spočítán počet adventivních kořenů. Kořeny pak byly odříznuty od oddenku a oskenovány. Výsledné obrázky byly vyhodnoceny pomocí programu WinRhizoPro (Régent Instruments, Canada). Pro každý vzorek byly zjištěny tyto charakteristiky: celkový počet kořenů, celková délka všech kořenů, celková délka adventivních kořenů, celkový počet kořenových špiček a celkový počet větvení ve vzorku. Vzorky kořenů byly vysušeny do konstantní hmotnosti a zváženy. Pro každou frakci kořene v analyzovaném vzorku byla dále vypočtena specifická délka, a to jako poměr délky a sušiny.

5.2 Ostřice štíhlá na Mokrých Loukách

5.2.1 Odběr a hodnocení odnoží

V této studii jsem se zaměřila na popis morfologické struktury kořenů ostřice štíhlé během životního cyklu odnože. Pro tento účel byly odebrány trsy z plochy 20 x 20 cm

a hloubky 35 cm. Odběry probíhaly v roce 2012 (červenec, srpen, listopad) a 2013 (měsíčně od dubna do listopadu). Po promytí trsu byly vypreparovány vegetativní odnože a kořeny rozděleny do kategorií: VN – vodní kořeny nevětvené, VV – vodní kořeny větvené, PNS – půdní kořeny nevětvené světlé, PNT – nevětvené tmavé, PVS – větvené světlé, PVT – větvené tmavé.

5.2.2 Odběr a hodnocení trsů

Trsy ostřice štíhlé byly odebírány na podzim v letech 2012 a 2013 a 4x během roku 2014 (březen, červen, srpen, říjen).

Při každém odběru byla vybrána tři odběrová místa. Z každého místa byly odebrány tři buly ostřice štíhlé a tři vzorky zeminy z jejich bezprostředního okolí, a to z plochy 20 x 20 cm do hloubky 35 cm. Odebraný bult byl rozdělen na části nad a pod povrchem půdy. Vzorky byly umístěny do popsaných igelitových pytlů a odvezeny do laboratoře. Zde byly proprány a roztříděny na kategorie: živé a odumřelé odnože, nové letošní odnože (kratší než 10 cm), živé kořeny (půdní a vodní), odumřelé kořeny, odumřelé a živé oddenky. Roztříděné vzorky byly vloženy do popsaných sáčků a vysušeny v sušárně při 85°C na konstantní hmotnost, poté zváženy s přesností na 0,01 g.

5.3 Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu

Práce byla součástí týmového výzkumu, jehož cílem bylo zhodnotit reakci rostlin ostřice na různý záplavový režim, simulovaný variantami nádobového pokusu. Rozvržení pokusu a odběry rostlin a vyhodnocení jejich nadzemní a celkové biomasy bylo součástí diplomové práce Vojtěcha Januše (Januš, 2015) a disertační práce Jitky Novotné (Novotná, 2020). Údaje o nadzemní biomase jsou zde použity jako sdílená data. Na podzim roku 2015, v rámci řešení společného projektu GA ČR, jsem se podílela na odběru podzemní biomasy. V této práci jsem využila výsledná data o biomase kořenů, poměru nadzemní biomasy ku podzemní biomase a R/S. Tato práce se zaměřuje na růst podzemních částí a zejména strukturních charakteristik kořenů.

5.3.1 Simulace různých režimů zaplavení

Nádobový pokus simulující různé režimy zaplavení byl založen v listopadu roku 2013 a pokračoval až do roku 2015. Nádrže byly umístěny na pozemku ZF JU. Jednalo se

o osm laminátových nádrží o rozměrech 187 x 106 x 40 a osm nádrží o rozměrech 187 x 106 x 60 cm. Pro pokus byly vybrány květníky o rozměrech 40 x 40 x 32 cm a objemu 27 l. Odběr a analýza kořenů, která je součástí této práce, proběhla až na podzim roku 2015.

Pokus měl čtyři varianty, v nichž byly simulovány čtyři typy vodního režimu (Limózní ekofáze, Litorální ekofáze, Jarní záplava a Letní záplava). U Limózní ekofáze byla hladina vody v nádrži udržována 10 cm pod povrchem substrátu. U varianty Litorální ekofáze byla hladina vody cca 15 cm nad povrchem substrátu. Jarní záplava měla v první fázi vegetační sezóny (květen, červen a červenec) stejnou výšku vodní hladiny jako varianta Litorální ekofáze a druhé části vegetační sezóny (srpen, září a říjen) stejnou výšku vodní hladiny jako v Limózní ekofáze. Letní záplava měla vodní režim v prvních třech měsících stejný jako Limózní ekofáze. Další tři měsíce byla hladina zvýšena na přibližně 35 cm nad povrch substrátu v květnících. Tato hodnota odpovídala polovině průměrné výšky odnoží. Změna vodní hladiny u variant Jarní a Letní záplava proběhla 30. 7. 2014.

5.3.2 Odběry biomasy

Biomasa rostlin v této práci byla odebrána koncem října 2015. Nadzemní biomasa byla ošťihána těsně nad povrchem substrátu, zvážena na dvě desetinná místa (čerstvá biomasa) a poté usušena do konstantní hmotnosti (sušina). Poměr sušiny k čerstvé hmotnosti byl použit pro přepočítání zbývajících vzorků na sušinu. Odběry podzemní biomasy probíhaly po ukončení vegetační sezóny, od 10. 11. do 10. 12., společně s nadzemní biomasou. Podzemní biomasa byla rozdělena do pěti vzorků. Květník byl vyklopen na pracovní plochu a nožem oddělena horní vrstva (H) o výšce 7 cm, obsahující hlavně báze odnoží a vodní kořeny. Pro analýzu byla použita polovina této vrstvy. Po oddělení horní vrstvy vznikly dvě části: střední (S) a dolní (D).

Vzorky byly po zjištění strukturních charakteristik kořenů vysušeny do konstantní hmotnosti a zváženy.

5.3.3 Analýza struktury kořenů

Z každého promytého vzorku byl odebrán dílčí vzorek pro stanovení strukturních parametrů kořenů. Před měřením byl znovu promyt a umístěn do misky s vodou na skenovací plochu skeneru. Menší vzorky byly skenovány celé, větší rozděleny na

poloviny. Struktura kořenů (délka, tloušťka, větvení) byla hodnocena na naskenovaných vzorcích, rozdělených podle tloušťkových tříd, pomocí aplikace WinRhizoPro. Pro výběr tříd jsem použila konfiguraci Ing. Marka Nešpora, v níž tloušťkové třídy odpovídaly úrovním větvení: 0–0,2 mm (kořeny 3. řádu), 0,2–0,6 mm (kořeny 2. řádu) a >0,6 mm (kořeny 1. řádu).

5.4 Statistické hodnocení

Údaje ve všech studiích byly hodnoceny pomocí programu STATISTICA 12.0 (StatSoft, Inc., USA). Normální rozdělení dat rákosu obecného na kořenové čistírně bylo testováno Lillieforsovým testem, který je modifikací Kolmogorovova–Smirnovova testu. Lineární regrese byla použita k otestování vztahu mezi stářím porostu (roky) a frakcí biomasy, zvláště pro nátokou a odtokovou část pole. Hírearchická ANOVA byla použita pro testování rozdílů v parametrech kořenové soustavy mezi nátokem a odtokem. Vliv data odběru na biomasu různých frakcí ostřice štíhlé v porostu na Mokrých loukách během roku byl hodnocen jednofaktorovou analýzou variance. Pro hodnocení dat kultivačního pokusu byly použity obecné lineární modely.

6 Výsledky

6.1 Rákos obecný na kořenové čistírně

6.1.1 Hustota odnoží a biomasa

Ve druhém roce po výsadbě nadzemní části rostlin pokrývaly již většinu pole, ačkoli stále existovaly velké prostorové rozdíly v hustotě odnoží. Průměrná hustota živých odnoží byla podobná na nátokové i odtokové části pole. Ve druhém roce po výsadbě hustota odnoží dosahovala přibližně 140 odnoží na 1 m² a klesla na přibližně 100 výhonů na m² v šestém roce. V osmém roce byla hustota živých odnoží výrazně nižší než v předchozích letech (méně než 30 výhonů na 1 m² v nátokové i v odtokové části pole). To souviselo s vysokou hustotou odumřelých odnoží z předchozího roku, které nebyly v zimě pokoseny. Po celou dobu studie byla hustota letošních odumřelých výhonů poměrně vysoká. Ve 2. a 3. roce po výsadbě tvořila 30 až 40 % všech výhonů běžného roku.

V r. 2003, tedy dva roky po osázení čistírny rákosem, tvořila živá nadzemní biomasa asi 1 kg.m⁻², a to na nátoku i na odtoku. V roce 2007, tedy za další čtyři roky, dosáhla téměř 2 kg. m⁻² na nátoku a asi 1,5 kg. m⁻² na odtoku. Tento rozdíl však nebyl průkazný kvůli velké variabilitě dat. Nižší hodnoty v roce 2009 byly způsobeny zastíněním odumřelými stébly vytvořenými v předchozím roce, protože porost nebyl v zimě pokosen.

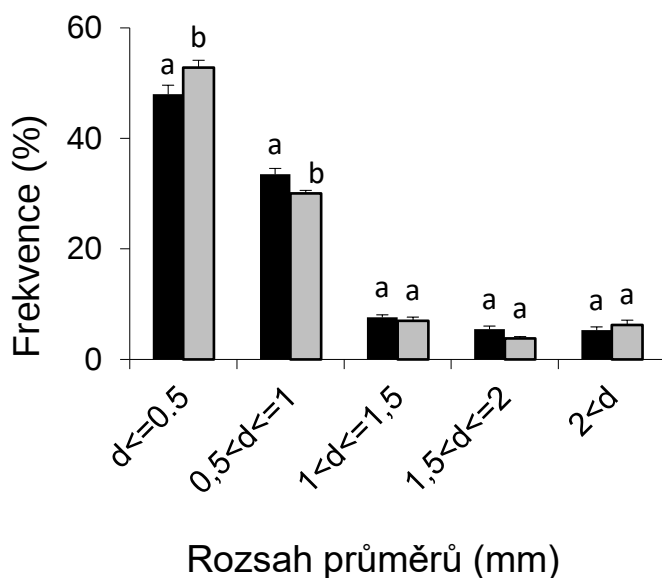
Celková živá podzemní biomasa se od roku 2003 do roku 2007 zvýšila. Od roku 2007, tedy od šestého roku po osázení, byly zaznamenány hodnoty nad 1 kg.m⁻². V roce 2009 (v osmém roce po osázení) činila průměrná celková živá podzemní biomasa na nátoku 1,7 kg.m⁻² a 1,5 kg.m⁻² na odtoku. Živé kořeny tvořily přibližně 7 % celkové živé podzemní biomasy. Mezi nátokovou a odtokovou částí kořenového pole nebyly zjištěny statisticky významné rozdíly, a to ani v biomase živých kořenů a ani v biomase živých oddenků. Naopak významné rozdíly mezi nátokem a odtokem byly zjištěny u podzemní odumřelé biomasy. Biomasa odumřelých kořenů a oddenků byla na nátoku 436 g.m⁻² a na odtoku 130 g.m⁻².

6.1.2 Struktura kořenů

Počet a sušina adventivních kořenů na nátoku a odtoku byly velmi podobné. Z jedné uzliny vyrůstaly v průměru čtyři adventivní kořeny o celkové hmotnosti asi o 80 mg. Na těchto adventivních kořenech rostly laterální kořeny o celkové hmotnosti

cca 40 mg. Laterální kořeny tvořily > 95 % celkové délky kořenů jak na nátokové, tak odtokové části kořenového pole. V detailní analýze struktury kořenového systému však byly některé rozdíly mezi nátokem a odtokem nalezeny. Na odtoku byl zjištěn větší podíl tenčích, delších a více větvených laterálních kořenů. Dokladem toho je statisticky průkazný rozdíl ve specifické délce laterálních kořenů ($df = 1$, $F = 5,6670$, $p = 0,021486$) na hladině významnosti menší než 0,05 a rozdíl v celkovém počtu špiček ($df = 1$, $F = 3,6016$, $p = 0,064010$) významný na hladině 0,064).

Větší podíl tenčích kořenů na odtoku potvrdila hierarchická ANOVA provedená na procentickém podílu kořenů různých tloušťkových tříd v celkové délce kořenové soustavy. Na odtokové části byl nalezen výrazně menší podíl tenkých kořenů (o průměru ≤ 0.5 mm) a větší podíl tlustých kořenů (průměr od 0.5 mm do 1 mm) (Obrázek 1.1).



Obrázek 1.1: Četnost tloušťkových tříd rákosu obecného v devátém roce provozu kořenové čistírny ve Slavošovicích. Sloupce a úsečky představují průměrnou a směrodatnou odchylku. Černé sloupce – nátoková, šedé sloupce – odtoková část pole. Rozdílné symboly (a, b) vykazují statisticky významné rozdíly mezi nátokem a odtokem pro určité tloušťkové třídy $p < 0,05$.

Celková délka kořenů činila 1694 m.m^{-2} na nátokové části a 3360 m.m^{-2} na odtokové části (Tabulka 2.1). Laterální kořeny tvořily 95 % celkové délky kořenů na nátoku a 96 % na odtoku.

Tabulka 2.1: Strukturní charakteristiky kořenů rostoucího z jedné uzliny na oddenku rákosu obecného na kořenové čistírně ve Slavošovicích. Na jejich základě jsou hodnoty extrapolovány na 1 m plochy kořenového pole. Čísla představují medián (1. kvartil; 3. kvartil). Hvězdičky označují významné rozdíly ($p < 0,05$) mezi nátokem a odtokem, na základě transformovaných údajů.

Proměnné	Část lože		–
	Nátok	Odtok	
Počet adventivních kořenů	4 (3; 5)	4 (3; 5)	
Sušina adventivních kořenů (mg)	68 (46; 92)	69 (38; 98)	
Sušina laterálních kořenů (mg)	43 (27; 54)	38 (16; 53)	
Počet špiček na 1m délky kořene (m^{-1})	214 (198; 264)	253 (228; 294)	*
Počet větvení na 1m délky kořene (m^{-1})	326 (262; 416)	334 (270; 403)	
Specifická délka adventivních kořenů ($cm \cdot g^{-1}$)	1,56 (1,38; 1,95)	1,74 (1,14; 2,32)	*
Specifická délka laterálních kořenů ($cm \cdot g^{-1}$)	59,4 (39,8; 106,1)	83,9 (45,2; 145,0)	*
Specifický povrch adventivních kořenů ($m^2 \cdot g^{-1}$)	0,0128 (0,0104; 0,0153)	0,0150 (0,0115; 0,0203)	
Specifický povrch laterálních kořenů ($cm^2 \cdot g^{-1}$)	0,1187 (0,0806; 0,1770)	0,1361 (0,0793; 0,2503)	
Hodnoty extrapolované na 1 m² plochy kořenového pole			
Délka adventivních kořenů ($m \cdot m^{-2}$)	81	127	
Délka laterálních kořenů ($m \cdot m^{-2}$)	1613	3233	
Povrch adventivních kořenů ($m^2 \cdot m^{-2}$)	0,66	1,1	
Povrch postranních kořenů ($m^2 \cdot m^{-2}$)	3,22	5,24	

6.2 Ostřice štíhlá na Mokrých Loukách

6.2.1 Analýza kořenů jednotlivých odnoží

První pokus o morfologickou analýzu kořenové soustavy ostřice štíhlé byl založen na hodnocení morfologických rysů kořenů jednotlivých odnoží odebraných v terénu. Každá z odebraných odnoží měla vyvinutý dimorfismus kořenů, jak ji popsala Končalová (1990). Tenké kořeny měly variantu větvenou a nevětvenou. Stejně tak i tlusté kořeny měly variantu větvenou a nevětvenou.

Průměrný počet vodních kořenů na 1 odnož byl v roce 2012 větší než v roce 2013. Tedy v roce 2012 se průměrně na jedné odnoži vyskytovaly 4 vodní kořeny a v roce 2013 to byly 2 vodní kořeny na odnož. Průměrný počet půdních kořenů na 1 odnož v roce 2012 a 2013 byl velmi podobný (2-3 kořeny na odnož).

Podstatná část hmotnosti kořenové soustavy byla tvořena tlustými kořeny (v průměru 78 %). Hmotnostní podíl tenkých nevětvených kořenů se pohyboval v rozmezí 1,5 – 6,5 % a podíl tenkých větvených kořenů dosahoval hodnot 7,5 – 27,5 % celkové hmotnosti kořenů. Podobně i podíl tlustých nevětvených kořenů byl menší než podíl tlustých větvených. Podíl tlustých nevětvených kořenů se pohyboval v rozmezí hodnot 1 – 9 %, zatímco podíl tlustých větvených se pohyboval mezi 17 – 47 %.

6.2.2 Analýza kořenových systémů celých bultů

Paralelně s odběrem jednotlivých odnoží pro morfologickou analýzu byly odbírány také celé trsy s cílem odhadnout biomasu kořenů v terénu. Protože přes veškerou snahu při odběrech byl každý bult jinak velký, velikost biomasy kořenů se vztahovala na jednu odnož v trsu. V průběhu sledovaného období se průměrná hmotnost sušiny kořenů vztažených na jednu odnož pohybovala mezi dvěma a třemi gramy (Tabulka 2.2). Rozdíly v průměrné biomase kořenů jedné odnože mezi různými odběry však nebyly průkazné pro velkou variabilitu mezi odnožemi.

Z odběrů byla odhadnuta také biomasa na 1 m². V průběhu roku se sušina živých kořenů pohybovala od 14,8 do 216,8 g.m⁻², ale rozdíly mezi odběry nebyly průkazné.

Tabulka 2.2: Souhrnné hodnoty v bultu, pod bultem a mimo bult. 5.8.2014 není uvedena SD z důvodu provedení jen dvou měření.

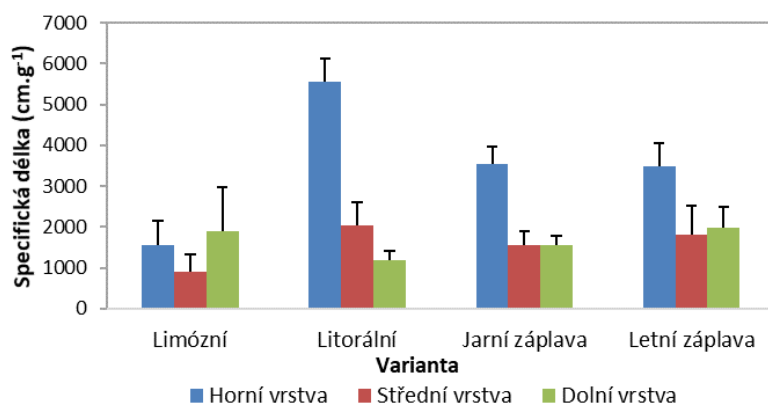
Proměnné	Datum odběru			
	25.3.14	5.6.14	5.8.14	21.10.14
Hmotnost živých kořenů na 1 letošní živou odnož	2,02±0,57	1,36±0,92	4,00	4,15±2,86
Hmotnost odumřelých kořenů na 1 letošní živou odnož	0,20±0,05	0,54±0,26	1,18	0,75±0,86
Biomasa živých kořenů podle hustoty bultů (kg.m ²)	483,7±131,5	310,3±83,4	427,3	332,9±231,1
Biomasa odumřelých kořenů podle hustoty bultů (kg.m ²)	66,5±18,6	92,6±35,1	122,4	62,3±61,4
Sušina nadzemních částí	51,3±8,8	111,2±23,2	133,1	66,7±45,1
R/S živých částí	9,43	2,79	3,21	4,99

6.3 Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu

Ve střední vrstvě bylo více bází rostlin, oddenků a tenkých kořenů, zatímco v dolní vrstvě převažovaly kořeny a oddenky, báze byly výjimečné. Podrobná data uvádí Novotná (2020), zde slouží k porovnání s dalšími charakteristikami. Strukturní parametry kořenů ostřice štíhlé (délka, objem na 1 g sušiny) závisely na vrstvě a variantě pokusu.

Průměrná specifická délka kořenů byla největší v horní vrstvě Litorální varianty, kolem 5500 cm.g-1, zatímco hodnoty u Jarní a Letní záplavy byly podobné (Obrázek 1.2). Specifický povrch vykazoval podobné vzorce jako specifická délka. Specifický objem měl podobné hodnoty ve všech vrstvách a ve všech variantách.

V horní a střední vrstvě se délka, povrch a objem nejtenčích kořenů (<0,2 mm) lišily mezi variantami, přičemž Litorální varianta měla nejvyšší hodnoty a Limózní nejnižší. V dolní vrstvě byly tyto hodnoty podobné u všech variant. Nejtenčí kořeny tvořily v horní vrstvě 71,7 % délky v Litorální variantě, v Limózní 43,8 %. Ve střední vrstvě byly nejvyšší hodnoty v Litorální variantě (54,7 %), zatímco v Limózní variantě činily 37,5 %. V dolní vrstvě se hodnoty příliš nelišily (Tabulka 2.3).



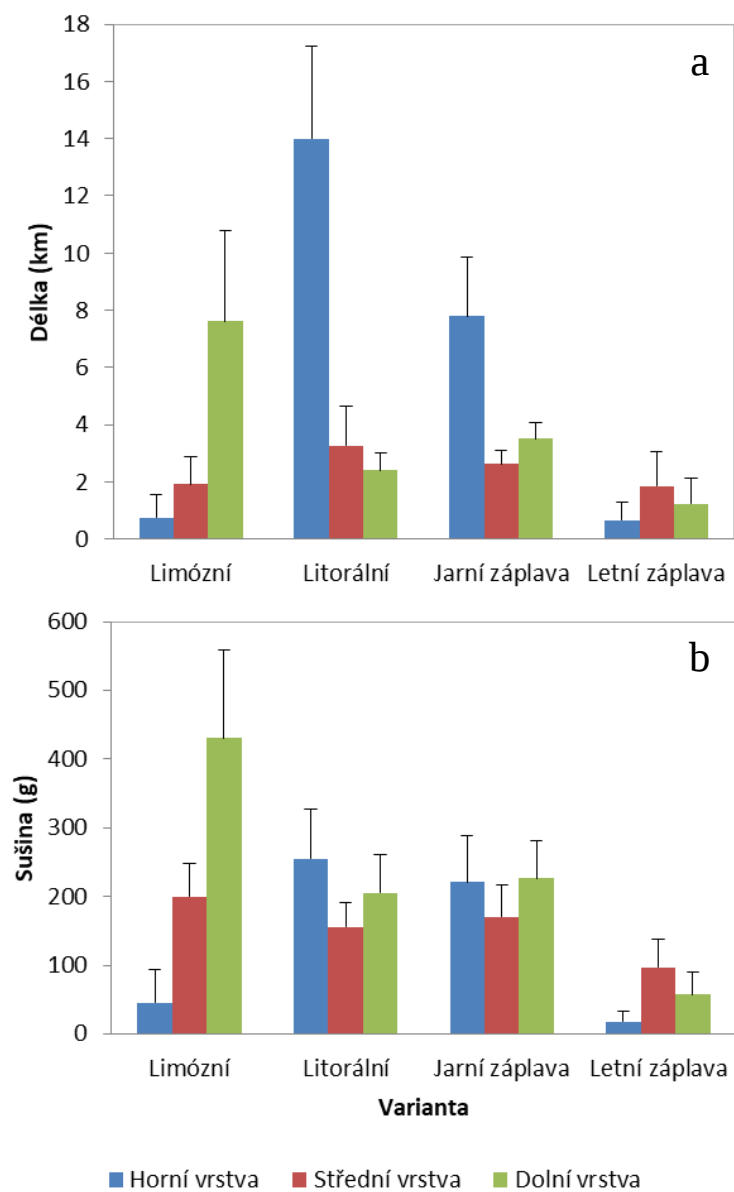
Obrázek 1.2: Průměrná specifická délka kořenů v nádobovém pokusu. Sloupce představují průměr a úsečky směrodatnou odchylku (n=4).

Tabulka 2.3: Procentické hodnoty charakteristik nejtenčích kořenů (o průměru $\leq 0,2$ mm) vztažené na celý skenovaný vzorek (100% je délka všech kořenů ve variantě, tj. o průměru $\leq 0,2$ mm, $0,2 - 0,6$ mm a $< 0,6$ mm). K hodnocení rozdílů mezi byl použit neparametrický test (Kruskal-Wallisova ANOVA). Různá písmena označují statisticky významné rozdíly ($p < 0,05$) mezi variantami v rámci téže vrstvy. H - horní vrstva, S - střední vrstva, D - dolní vrstva. L – délka, SA – povrch, V – objem. Modré buňky – minima, žluté buňky maxima v rámci téže vrstvy.

Vrstva	Varianta	$0 < L \leq 0,2$ (%)	$0 < SA \leq 0,2$ (%)	$0 < V \leq 0,2$ (%)
H	Jarní	60,2 ^{ac}	27,4 ^{ac}	6,31 ^{ac}
H	Letní	53,7 ^{ab}	22,4 ^{ab}	5,36 ^{ab}
H	Limózní	43,8 ^b	14,5 ^b	3,14 ^b
H	Litorální	71,7 ^c	38,5 ^c	12,55 ^c
S	Jarní	50,0 ^b	15,5 ^{ac}	2,30 ^{ab}
S	Letní	47,2 ^{ab}	12,9 ^{ab}	1,77 ^a
S	Limózní	37,5 ^a	9,2 ^b	1,29 ^a
S	Litorální	54,7 ^b	20,5 ^c	3,71 ^b
D	Jarní	43,9 ^a	11,6 ^a	1,26 ^a
D	Letní	43,1 ^a	10,4 ^a	1,26 ^a
D	Limózní	47,2 ^a	13,1 ^a	1,81 ^a
D	Litorální	44,1 ^a	12,9 ^a	1,76 ^a

Celková sušina kořenů byla největší v dolní vrstvě v Limózní variantě a to kolem 425 g. Hodnoty ve všech vrstvách u variant Litorální a Jarní záplava byly podobné (Obrázek 1.3b).

Celková délka kořenů v květináči byla největší v horní vrstvě Litorální varianty, a to kolem 14 km. Nejmenší celková délka kořenů byla ve všech vrstvách ve variantě Letní záplava (Obrázek 1.3a).



Obrázek 1.3: Celková délka a celková sušina kořenů v květníku u různých variant v nádobovém pokusu. Sloupce představují průměr a úsečky směrodatnou odchylku (n=4). Data nadzemní sušiny poskytl Jitka Novotná (Novotná, 2020).

7 Diskuse

7.1 Obecné poznatky o struktuře kořenů

Funkci kořenového systému ovlivňuje nejen jeho biomasa, ale i morfologická stavba, zahrnující tloušťku, délku kořenů a jejich větvení, což zkoumá topologie. Stavbu lze popsat pomocí měřitelných veličin, jako jsou délka a větvení, a životnost jednotlivých částí (Fitter, 1987). Je ovlivněna genotypem, fyziologickým stavem rostliny a půdním prostředím (Leyser a Fitter, 1998). Fitter (1987) zjistil, že existuje korelace mezi efektivitou využívání půdního prostředí a topologií kořenů.

Distribuce biomasy tenkých kořenů (≤ 2 mm) a jejich délka se liší podle biomech (Jackson et al., 1997). V travinných ekosystémech mírného pásu je živá biomasa tenkých kořenů kolem $1,0 \text{ kg.m}^{-2}$ a délka 112 km.m^{-2} , z toho 83 % biomasy se nachází v horních 30 cm půdy. Van Noordwijk a Brouwer (1991) popsali specifickou délku kořenů obilovin a trav, přičemž trávy dosahují vyšších hodnot.

Publikované údaje o kořenech planě rostoucích jednoděložných rostlin jsou omezené a variabilní. U C3 trav se specifická délka kořenů pohybuje mezi $40\text{--}600 \text{ m.g}^{-1}$, což závisí na druhu a geografické lokalitě (Bakker et al., 2019; Cheng et al., 2016). Hodnoty zjištěné pro *P. australis* v této práci jsou nižší ($60\text{--}80 \text{ m.g}^{-1}$), což odráží jejich silnější kořeny. Podobné hodnoty byly zjištěny i pro vodní stanoviště *P. australis* (Li et al., 2014), ale v suchozemských stanovištích jsou hodnoty výrazně nižší (Chen et al., 2017).

Pro ostřici štíhlou nebyly dostupné srovnatelné studie. Zjištěná specifická délka se pohybuje v rozmezí hodnot pro C3 trávy, ale je nižší než pro rákos. I zde se ukázalo, že podmínky prostředí ovlivňují biomasu, tloušťku a specifickou délku kořenů.

Další kapitoly se budou specifickým rysům struktury kořenů věnovat podrobněji v rámci jednotlivých studií.

7.2 Rákos obecný

7.2.1 Rostlinná biomasa ve vztahu k věku porostu

U nově založených porostů je produkce biomasy výrazně ovlivněna jejich věkem. Tato studie dokumentuje nárůst nadzemní a podzemní biomasy rákosu na kořenové čistírně během prvních devíti let od osázení. Výsledky souhlasí se studií Vymazala a Kröpfelové (2005), která zjistila, že nadzemní biomasa se po šestiletém období

zvýšila na 5 kg.m^{-2} . Výsledky této disertace a publikace Moulisové et al. (2023) jsou první, které dokumentují podobný vývoj i u podzemních částí.

Údaje o podzemní biomase v kořenových čistírnách jsou vzácné. Parr (1990) zaznamenal v nově založených čistírnách ve Velké Británii hodnoty od 0,8 do 1 kg.m^{-2} . Tyto hodnoty odpovídají datům z kořenové čistírny ve Slavošovicích ve čtvrtém roce od osázení.

Moulisová a Hudcová (nepublikovaná data) zkoumaly biomasu a strukturu oddenků rákosu na čistírně v Kotenčicích, která byla v provozu 18 let. Podzemní biomasa dosahovala $3\text{--}5 \text{ kg.m}^{-2}$, přičemž podíl kořenů byl 2–3 % v celkové podzemní biomase. Hodnoty biomas jsou dvojnásobné oproti Slavošovicím, což naznačuje, že biomasa zde může i nadále růst. Další vývoj však závisí na více faktorech a je obtížné jej předvídat bez experimentálních měření.

7.2.2 Struktura kořenů

Menší podíl tenkých kořenů na nátoku (Obrázek 1.1) může být způsoben (a) nepříznivými účinky organického zatížení (toxicity, nedostatek kyslíku) nebo (b) tím, že rostlina investuje méně biomasy do kořenů, protože nátok je bohatší na živiny než odtok. Podle Armstronga et al. (1996a, b) se anatomické charakteristiky kořenů mění vlivem toxických látek v anaerobním prostředí, což může vést ke kratším, tlustším a méně rozvětveným kořenům. Tyto změny by se projevíly menší délkou a specifickou délkou kořenů, větším počtem kořenových špiček na jednotku délky a/nebo menším počtem větvení na jednotku délky v nátokové části ve srovnání s odtokem. Takové rozdíly se v této studii skutečně projevíly (Tabulka 2.1), s významnými rozdíly v počtu špiček na 1 m délky kořene a ve specifické délce adventivních a laterálních kořenů (cm.g^{-1}). Tato zjištění podporují domněnku, že struktura kořenů byla ovlivněna toxickými látkami, přičemž vliv minerální výživy nelze vyloučit.

7.3 Ostřice štíhlá na Mokřých loukách

7.3.1 Biomasa kořenů

Ostřice mají vysoký podíl podzemních orgánů na celkovou biomasu rostliny (Soukupová 2002; Květ a Westlake 1998; Bernard et al., 1988). Podle Bernarda et al. (1988) se nadzemní biomasa pohybovala v rozmezí $500\text{--}1050 \text{ g.m}^{-2}$ a podzemní

biomasa 150–900 g.m⁻². V této práci byla zjištěna podzemní biomasa ostřice štíhlé v rozmezí 310,3–483,7 g.m⁻² rok⁻¹, což odpovídá uvedenému rozmezí.

Bernard et al. (1988) shromáždili výsledky ukazující poměr podzemních a nadzemních částí pro monodominantní porosty různých druhů ostřic v době maximální biomasy. Tyto hodnoty se mezi druhy výrazně lišily. Medián pro *C. rostrata* a *C. lacustris* byl přibližně 0,4, zatímco pro *C. aquatilis* byl 4,0. V této práci byl zjištěn poměr 2,8–3,2 pro *C. acuta* (Tabulka 2.2), což je blízké hodnotě pro *C. aquatilis*.

Květ a Westlake (1998) popisují sezónní kolísání podzemní biomasy ostřice zobánkaté (*C. rostrata*), která na jaře a začátku léta klesla z přibližně 300 g.m⁻² na méně než 100 g.m⁻², a následně se na konci léta a na podzim opět zvýšila. Průměrné hodnoty podzemní biomasy ostřice štíhlé na Mokřých loukách naznačují podobnou sezónní dynamiku, avšak díky velké variabilitě dat nebyly prokázány významné rozdíly mezi odběry.

7.3.2 Struktura kořenů

Končalová (1990) zjistila, že ostřice štíhlá (*Carex acuta*) vytváří dva typy kořenů v zaplaveném substrátu: tlusté, málo větvené kořeny pro upevnění a tenké, větvené kořeny pro příjem živin. Suchozemská varianta tento dimorfismus nevykazuje. Tato studie potvrzuje dimorfismus a ukazuje, že tlusté kořeny tvoří přibližně 78 % hmotnosti kořenové soustavy (Vítková et al. 2017).

Studie Lawrence et al. (2012) v travinných porostech s dominantní *Carex stricta* zjistila, že hustota kořenů je nejvyšší v bultu, menší pod ním a nejmenší mezi bulty. Kořeny byly víceleté, s průměrným věkem 2,3 roku; tenké kořeny byly mladší a tvořily 75 % biomasy. V této práci jsem dospěla k podobným závěrům, ale tenké kořeny tvořily menší podíl biomasy, což mohlo být ovlivněno rozdíly mezi studovanými druhy a podmínkami stanoviště. Podíl tenkých kořenů se mění s mírou zaplavení substrátu.

7.4 Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu

7.4.1 Vliv vodního režimu na tvorbu biomasy a poměrů R/S, B/A

Rozmanitost půdních podmínek ovlivňuje morfologii rostlin na různých stanovištích (Więclaw et al., 2022; Więclaw, 2017). Janyszek et al. (2008) uvádí, že rozdíly ve

velikosti mezi populacemi či jedinci závisejí na jejich genetických vlastnostech a podmínkách prostředí. Moog a Janiesch (1990) zjistili, že *C. pseudocyperus* měla za anoxických podmínek vyšší poměr R/S než za aerobních, zatímco *C. extensa* a *C. remota* vykazovaly opak. Tyto rozdíly mezi druhy odpovídají míře adaptace na zamokření na jejich přirozených stanovištích. Tyto rozdíly souvisejí s adaptací na zamokření.

Moog a Brüggemann (1998) zjistili, že maximální délka kořene, jehož potřeba O₂ je pokryta pouze difuzí, u *C. extensa* 34 cm a u *C. pseudocyperus* 56 cm. U *C. extensa* a *C. remota* byla délka kořenů nižší za anaerobních podmínek, zatímco u *C. pseudocyperus* byla vyšší o 36 % oproti aerobním podmínkám.

Soukupová (1994) zjistila, že zaplavení snižuje produkci biomasy u ostřic na zaplavovaných biotopech. Ve tříletém pokusu s *C. acuta* (syn. *C. gracilis*) a *C. vesicaria* byla největší biomasa v terestrické ekofázi. V litorální ekofázi byla biomasa nižší o jednu osminu u *C. gracilis* a o jednu pětinu u *C. vesicaria*. Nejvíce zasaženy byly kořeny, u *C. gracilis* o 27 % a u *C. vesicaria* o 69 %. Podobně v naší studii byla sušina kořenů a poměr R/S nejnižší ve variantě Letní záplava, která znamenala největší stres.

Alokace biomasy je klíčovou strategií mokřadních rostlin pro přežití během záplav. Yan et al. (2015) zkoumali vliv výšky vodní hladiny na růst *C. schmidtii*, včetně investic do nadzemních a podzemních částí a struktury kořenů. Zjistili, že vyšší hladina vody negativně ovlivňuje růst rostlin, přičemž nejnižší biomasa byla při nejvyšším zaplavení. Hmotnost kořenů byla ovlivněna méně, rozdíly se projevily hlavně mezi kontrolou a nejvyšším zaplavením. Podobně jako tito autoři jsme zjistili, že výška vodní hladiny má vliv na strukturní charakteristiky kořene, hmotnost kořenů a poměr biomasy kořenů k nadzemní biomase a poměr podzemní biomasy k nadzemní biomase. V nádobovém pokusu byla nejnižší hmotnost kořenů na 1 kg nadzemních částí (R:S) ve variantě Letní záplava ($0,75 \pm 0,27$). Podobně tomu bylo i u hmotnosti kořenů a oddenků na 1 kg hmotnosti nadzemních částí (A:B).

Steed et al. (2002) zkoumali vliv hloubky podzemní vody na rozmístění kořenů a tvorbu biomasy u *C. lanuginosa*, *C. nebrascensis* a *C. rostrata*. Kořeny byly měřeny ve třech vrstvách (0–12 cm, 12–4 cm, 124 cm ode dna květináče). *C. rostrata*, která je ze všech tří druhů nejvíce tolerantní k zaplavení, přidělovala více kořenové biomasy do spodní vrstvy ve všech variantách (hloubky 4, 19 a 35 cm), zatímco *C. lanuginosa*

a *C. nebrascensis* alokovaly méně biomasy do spodní vrstvy. Podobně v našem pokusu měla varianta Letní záplava nejmenší sušinu v dolní vrstvě (Obrázek 1.3b).

Zhang et al. (2019) vystavili rostliny trsnaté ostřice *C. schmidtii* suchu a opětovnému zaplavení vodním sloupcem o výšce 5 cm, a to po 30 dnech (DF30), 40 dnech (DF40) a 60 dnech (DF60) sucha a studovali vliv na morfologické charakteristiky, produkci biomasy a fotosyntetické charakteristiky rostlin. Opětovné zaplavení mělo nejprve negativní efekt na studované charakteristiky, ale poté rostliny úspěšně regenerovaly. Opětovné zaplavení je podobné variantě Letní záplava v nádobovém pokusu, avšak zde byla výška vodního sloupce výrazně vyšší (35 cm). Proto tato varianta měla silný negativní efekt na růst rostlin (Obrázek 1.2, Tabulka 2.3).

Dá se tedy říct, že nedostatek kyslíku a zaplavení mají negativní vliv na délku kořenů. V naší studii jsme zjistili, že nejmenší délka kořenů byla ve variantě Letní záplava (Obrázek 1.3a), v níž stres nedostatku kyslíku byl pravděpodobně největší ze všech zkoumaných variant.

8 Závěr

Struktura kořene úzce souvisí s jeho funkcemi, a proto jsou poznatky o struktuře kořenového systému potřebné vždy, když studujeme funkci rostlinných porostů, případně celých ekosystémů. Studium struktury kořenů je nezbytné pro pochopení vztahu mezi kořeny a prostředím, ve kterém rostlina roste. Při podrobném studiu rostlin ve specifických životních podmínkách (mokřady) nebo při studiu určitých procesů (čištění vody) jsou znalosti o struktuře kořenů obzvláště důležité.

8.1 Rákos obecný v kořenové čistírně ve Slavošovicích

Podzemní biomasa *P. australis* se během prvních šesti let po výsadbě zvýšila na průměrné hodnoty $1,7 \text{ kg m}^{-2}$ na nátokové a $1,5 \text{ kg m}^{-2}$ odtokové části kořenového pole a v dalších dvou letech se již výrazně neměnila. Tyto hodnoty jsou nižší než hodnoty zjištěné v 18 let staré kořenové čistírně v Kotečnicích a v přírodních mokřadech ve stejné zeměpisné oblasti. To naznačuje, že se podzemní biomasa na kořenové čistírně může dále zvyšovat.

Struktura kořenů se lišila mezi nátokovou a odtokovou částí kořenového pole. V nátokové části byly kořeny tlustší, kratší a méně větvené. To se projevilo i menší průměrnou celkovou délkou kořenů na jednotku plochy kořenového lože. Ta dosáhla na nátok $1,69 \text{ km.m}^2$ a na odtok $3,36 \text{ km.m}^{-2}$. Rozdíly ve strukturních charakteristikách kořenů mezi nátokovou a odtokovou částí pole mohly být způsobeny účinkem toxických látek v anaerobním substrátu na nátok, ale celková biomasa rostlin tím nebyla ovlivněna.

Výsledky této studie potvrzují předchozí úvahy o tom, že podzemní části rostlin *P. australis* jsou důležitým zdrojem uhlíku v kořenových čistírnách, dobře snášejí anaerobní prostředí a poskytují velký povrch pro uchycení mikroorganismů.

8.2 Ostřice štíhlá na Mokřích Loukách

Studium jednotlivých odnoží ostřice štíhlé, odebraných na Mokřích loukách, potvrdilo předchozí výzkumy ukazující, že z odnoží vyrůstají dva druhy kořenů, a to tenké (vodní) a tlusté kořeny (půdní). V druhé polovině vegetačního období tvořily tlusté kořeny 78 % a tenké kořeny 22 % hmotnosti kořenové soustavy jedné odnože.

Průměrná biomasa kořenů vztažená na jednu odnož v bultu dosahovala 0,8– 3,1 g. Sezónní minimum nastalo v červnu a maximum na konci vegetační sezóny (v říjnu), avšak tyto rozdíly nebyly statisticky průkazné.

Průměrná biomasa kořenů celého porostu se pohybovala v rozmezí 80– 240 g.m⁻². Sezónní chod byl podobný jako u biomasy jednotlivých odnoží, ale rozdíly opět nebyly průkazné. Poměr biomasy kořenů k biomase nadzemních částí (R:S) se během vegetačního období pohyboval od 2,8 do 3,2.

8.3 Ostřice štíhlá v kultivačním pokusu

Různý záplavový režim v kultivačním pokusu průkazně ovlivnil strukturní charakteristiky kořenů (specifická délka, specifický povrch a specifický objem, tj. délka resp. povrch, objem vztažené na 1g sušiny). Tyto charakteristiky se lišily jak mezi různými hloubkovými vrstvami v rámci téže varianty, tak mezi různými variantami v rámci téže hloubkové vrstvy.

S výjimkou Limózní varianty byla největší specifická délka kořenů i největší procentuální podíl tenkých kořenů ($\leq 0,2$ cm) v horní vrstvě substrátu, což dokumentuje velkou hustotu tenkých větvených (vodních) kořenů v této vrstvě. Naopak v Limózní variantě (s hladinou v úrovni povrchu substrátu) byla specifická délka kořenů v horní vrstvě menší než u předchozích variant a byla podobná ve všech vrstvách. Rozdíly ve specifické délce kořenů mezi variantami se odrazily i v celkové délce kořenů na jeden květináč. Ta byla největší ve variantě Litorální.

Celková biomasa kořenů v květináči byla podobná ve všech variantách s výjimkou Letní záplavy. Varianta Letní záplava měla nejmenší biomasu kořenů v květináči a také nejmenší celkovou délku kořenů. To ukazuje na výrazný stresový vliv na rostliny v této variantě. Poměr biomasy kořenů k biomase nadzemních částí (R:S) odrážel míru zaplavení. Největší byl u varianty Limózní, v níž rostliny nebyly vůbec zaplaveny. Následovaly varianty Litorální a Jarní záplava, nejmenší hodnotu měla varianta Letní záplava.

Výsledky pokusu ukazují, že ostřice štíhlá se dokáže adaptovat na různé hydrologické podmínky, nicméně ze studovaných variant je pro ni Letní záplava nejméně příznivá.

Seznam použité literatury

- Armstrong, W. (1978): Root aeration in the wetland condition. Plant life in anaerobic environments, 1, 197.
- Armstrong, J., Armstrong, W., Zenbin, W., Afreen-Zobayed, F. (1996a). A role of phytotoxins in the *Phragmites* die-back syndrome? Folia Geobotanica 31 (1), 127–142.
- Armstrong, J., Afreen-Zobayed, F., Armstrong, W. (1996b). *Phragmites* die-back: sulphide and acetic acid-induced bud and root death, lignifications, and blockages within aeration and vascular systems. New Phytol. 134 (4), 601–614.
- Armstrong, W. (1979). Aeration in higher plants. In: Woolhouse H. W.: Advances in botanical research. Academic Press Inc., London, pp. 226 - 331.
- Bakker, L. M., Mommer, L., van Ruijven, J. (2019). Using root traits to understand temporal changes in biodiversity effects in grassland mixtures. Oikos, 128(2), 208-220.
- Bernard, J. M., Solander, D., Květ, J. (1988). Production and nutrient dynamics in *Carex* wetlands. Aquatic Botany, 30(1-2), 125-147.
- Brix, H. (1993): Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: transport mechanisms and rates. In: Moshiri, G.A. (Ed.), Constructed Wetlands for Water Pollution Improvement. CRC Press, Boca Raton, pp. 391-398.
- Čížková, H. a Lukavská, J. (1999). Rhizome age structure of three populations of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.: Biomass and mineral nutrient concentrations. Folia Geobotanica, 34, 209-220.
- Fitter, A. H. (1987). An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems. New phytologist, 106, 61-77.
- Haslam, S. M. (1971). The development and establishment of young plants of *Phragmites communis* Trin. Annals of Botany, 35(5), 1059-1072.
- Honissová, M., Hovorka, F., Kuncová, Š., Moulisová, L., Vítková, J., Plsová, M., Čížek, J., Čížková, H. (2015). Seasonal dynamics of biomass partitioning in a tall sedge, *Carex acuta* L. Aquatic botany, 125, 64-71.
-

-
- Chen, Q., Wang, Y., Zou, C.B., Wang, Z.L. (2017). Aboveground biomass invariance masks significant belowground productivity changes in response to salinization and nitrogen loading in reed marshes. *Wetlands*. 37 (5), 985–995.
- Cheng, J., Chu, P., Chen, D., Bai, Y. (2016). Functional correlations between specific leaf area and specific root length along a regional environmental gradient in Inner Mongolia grasslands. *Functional ecology*, 30(6), 985-997.
- Jackson, R. B., Mooney, H. A., Schulze, E. D. (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(14), 7362-7366.
- Jakrlová, J. (1987). Primární produkce. In: Dykyjová D. (Ed.): *Metody studia ekosystémů*. Academia, Praha, pp. 56-60.
- Januš, V. (2015). Vliv režimu zaplavení na růst ostřice štíhlé (*Carex acuta*) v nádobovém pokuse. Diplomová práce, Jihočeská univerzita, Fakulta Zemědělská.
- Janyszek, M., Jagodziński, A. M., Janyszek, S., Wrońska-Pilarek, D. (2008). Morphological variability of *Carex spicata* Huds. utricles among plant communities. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 203(5), 386-395.
- Končalová, H. (1990). Anatomical adaptations to waterlogging in roots of wetland graminoids: limitations and drawbacks. 38: 127-134.
- Končalová, H. a Pazourek, J. (1988). Root dimorphism in flooded *Carex gracilis* Curt. *Acta Universitatis Carolinae Biologica* 31: 43-50.
- Květ, J. a Čížková, H. (2017). Definice mokřadů. In: Čížková, H., Vlasáková, L., Květ, J. (Eds.), *Mokřady: ekologie, ochrana a udržitelné využívání*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, pp. 27-32. ISBN 978-80-7394-658-6.
- Květ, J. a Westlake, D.F. (1998). Primary production in wetlands. In: Westlake, D.F., Květ, J., Szczepanski, A. (Eds.), *The Production Ecology of Wetlands*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 78–168.
- Larcher, W. (1988): *Fyziologická ekologie rostlin*. Academia, Praha. 368 pp.
- Lawrence, B. A., Fahey, T. J., Zedler, J. B. (2012). Root dynamics of *Carex stricta*-dominated tussock meadows. *Plant and soil*, 364(1), 325-339.
- Lawrence, B. A., Fahey, T. J., Zedler, J. B. (2013). Root dynamics of *Carex stricta*-dominated tussock meadows. *Plant and soil*, 364, 325-339.
-

-
- Leyser, O. a Fitter, A. (1998). Roots are branching out in patches. *Trends in plant science*, 3(6), 203-204.
- Li, L., Han, W., Thevs, N., Jia, X., Ji, C., Jin, D., He, P., Schmitt, A.O., Cirella, G.T., Zerbe, S. (2014). A comparison of the functional traits of common reed (*Phragmites australis*) in Northern China: aquatic vs. terrestrial ecotypes. *PLoS One* 9 (2). [https:// doi.org/10.1371/journal.pone.0089063](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089063).
- Liao, C. T. a Lin, C. H. (2001). Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part B, Life Sciences*, 25(3), 148-157.
- Mitsch, W. J., a Gosselink, J. G. (2015). *Wetlands*. 5th edition. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- Moog, P. R. a Brüggemann, W. (1998). Flooding tolerance of *Carex* species. II. Root gas-exchange capacity. *Planta*, 207(2), 199-206.
- Moog, P. R., Janiesch, P. (1990). Root growth and morphology of *Carex* species as influenced by oxygen deficiency. *Functional Ecology*, 201-208.
- Moulisova, L., Čížková, H., Dušek, J., Kazda, M. (2023). Root and rhizome traits of the common reed (*Phragmites australis*) in a constructed wetland for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 186, 106832.
- Nešpor, M. (2015). Podzemní biomasa ostřice štíhlé (*Carex acuta*) v travinném mokřadu. Diplomová práce, Jihočeská univerzita, Fakulta zemědělská.
- Novotná, J. (2020). Úloha rostlin v bilanci skleníkových plynů z ostřicového slatiniště. Disertační práce, Jihočeská univerzita, Fakulta zemědělská.
- Parr, W.T. (1990). Factors affecting reed (*Phragmites australis*) growth in UK reed bed treatment systems. In: Cooper, P.F., Findlater, B.C. (Eds.): *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*. Pergamon Press, Oxford, U.K, pp. 67- 76.
- Picek, T., Čížková, H., Dušek, J. (2007). Greenhouse gas emissions from a constructed wetland—plants as important sources of carbon. *Ecological engineering*, 31(2), 98-106.
- Podlešáková, K., Tarkowská, D., Pěničák, A., Oklešťková, J., Turečková, V., Floková, K., Tarkowski, P. (2012). Nové trendy v analýze fytohormonů. *Chem Listy*, 106, 373-9.
- Prach, K., 2008. Vegetation changes in a wet meadow complex during the past half-century. *Folia Geobot.* 43, 119–130.
-

-
- Prach, K., 1993. Vegetation changes in a wet meadow complex south-bohemia, Czech Republic. *Folia Geobot. Phytotax.* 28, 1–13.
- Prach, K., Soukupova, L., 2002. Alterations in the wet meadows vegetation pattern. In: Květ, J., Jeník, J., Soukupova, L. (Eds.), *Freshwater Wetlands and their Sustainable Future. A Case Study of the Třeboň Basin Biosphere Reserve*. CRC Press, Boca Raton, pp. 243–254.
- Ponnamperuma, F.N. (1984). Effects of flooding on soils. In: Kozłowski TT, ed. *Flooding and plant growth*, pp 9–45. Academic press, New York, USA.
- Reddy, K. a DeLaune, R. (2008). *Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. - CRC Press. Boca Raton.
- Sauter, M. (2013). Root responses to flooding. *Current Opinion in Plant Biology*, 16(3), 282-286.
- Soukupová, L. (1994). Allocation plasticity and modular structure in clonal graminoids in response to waterlogging. *Folia Geobotanica*, 29(2), 227-236.
- Soukupová, L. (2002). Life strategy of graminoid populations in the wet meadows. *Freshwater Wetlands and their Sustainable Future. A Case Study of the Třeboň Basin Biosphere Reserve*, 255-267.
- Steed, J. E., DeWald, L. E., Kolb, T. E. (2002). Physiological and growth responses of riparian sedge transplants to groundwater depth. *International Journal of Plant Sciences*, 163(6), 925-936.
- Van Noordwijk, M. a Brouwer, G. (1991). Review of quantitative root length data in agriculture. In *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*, Vol. 24, pp. 515-525.
- Visser, E. J. W., Voesenek, L. A. C. J., Vartapetian, B. B., Jackson, M. (2003). Flooding and plant growth. *Annals of Botany*, 91(2), 107-109.
- Vítková, J., Dušek, J., Stellner, S., Moulisová, L., Čížková, H. (2017). Effect of hummock-forming vegetation on methane emissions from a temperate sedge-grass marsh. *Wetlands*, 37, 675-686.
- Votrubová, O. a Pecháčková, A. (1996). Effect of nitrogen over-supply on root structure of common reed. *Folia Geobotanica*, 31, 119-125.
- Vymazal, J. (1995). Čištění odpadních vod v kořenových čistírnách. Třeboň: ENVI s. r. o., 146 s.
-

-
- Vymazal, J. (2004). Removal of phosphorus in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow in the Czech Republic. *Biogeochemical Investigations of Terrestrial, Freshwater, and Wetland Ecosystems across the Globe*, 657-670.
- Vymazal, J. a Kröpfelová, L. (2005). Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecological engineering*, 25(5), 606-621.
- Więclaw, H. (2017). Within-species variation among populations of the *Carex flava* complex as a function of habitat conditions. *Plant Ecology & Diversity*, 10(5- 6), 443-451.
- Więclaw, H., Bosiacka, B., Hrivnák, R., Dajdok, Z., Mesterházy, A., Koopman, J. (2022). Morphological variability of *Carex buekii* (Cyperaceae) as a function of soil conditions: a case study of the Central European populations. *Scientific reports*, 12(1), 1-12.
- Yan, H., Liu, R., Liu, Z., Wang, X., Luo, W., Sheng, L. (2015). Growth and physiological responses to water depths in *Carex schmidtii* Meinsh. *PloS one*, 10(5), e0128176.
- Zhang, D., Tong, S., Qi, Q., Zhang, M., An, Y., Wang, X., Lu, X. (2019). Effects of drought and re-flooding on growth and photosynthesis of *Carex schmidtii* Meinsh: Implication for tussock restoration. *Ecological Indicators*, 103, 134- 144.
-