

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Obor č. 7: Zemědělství, potravinářství, lesní a vodní hospodářství**

**Mohou dusičnany změnit reakci zemědělských  
plodin na nedostatek vody?**

**Daniela Zábojová  
Jihomoravský kraj**

**Brno 2022**

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 7: Zemědělství, potravinářství, lesní a vodní hospodářství

**Mohou dusičnany změnit reakci zemědělských plodin  
na nedostatek vody?**

**Can nitrates change the response of agricultural crops  
to water deficiency?**

**Autoři:** Daniela Zábojová

**Škola:** Gymnázium Brno-Řečkovice, příspěvková organizace, Terezy  
Novákové 2, 621 00 Brno

**Kraj:** Jihomoravský kraj

**Konzultant:** doc. RNDr. Vít Gloser, Ph.D.

Mgr. Lenka Bučková

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracovala samostatně a použila jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Brně dne 7.2.2022 .....

Daniela Zábojová

## Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat doc. RNDr. Vítu Gloserovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za trpělivost, za čas strávený nad pečlivými revizemi, které mi pomohly problematice lépe porozumět, a především za možnost vypracovat svoji Středoškolskou odbornou činnost na Ústavu experimentální biologie Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity.

Rovněž bych chtěla poděkovat Mgr. Lence Bučkové za užitečné rady, připomínky a za pomoc při tvorbě formální stránky práce.

V neposlední řadě mé poděkování patří Bc. Alžbětě Floriánové a Bc. Kateřině Máčkové za pomoc v experimentální části práce, podporu a ochotu mi s čímkoliv pomoci.



## **Anotace**

Tato práce se zabývá nadbytkem dusičnanů v rostlinách a jejich reakcí na nedostatek vody. Pro porovnání jsem si vybrala ředkev setou (*Raphanus sativus*) a brukev řepku (*Brassica napus*), které jsem rozdělila do tří variant dle obsahu nitrátů v roztoku, kterým byly během kultivace zalévány. Následným rozborem a měřením bylo zjištěno, jaký druh byl maximálně zásoben dusíkem a zdali množství dostupného dusíku mělo vliv na funkci průduchů. V další části experimentu byly rostliny vystaveny suchu a byly pozorovány změny v chování průduchů. Z nasbíraných dat vyplývá, že vysoká koncentrace dusičnanů může být pro rostlinu výhodou i nevýhodou. Při vysychání může velké množství přijatého dusíku oddálit nástup rychlé smrti, a tudíž rostlině umožní déle čekat na vodu.

## **Klíčová slova**

dusík; dusičnany; minerální výživa; sucho; vodní stres

## **Annotation**

This work deals with the excess of nitrate in plants and their response to water deficit. For comparison, I chose the radish (*Raphanus sativus*) and the rapeseed (*Brassica napus*), which I divided into three variants according to the content of nitrates in the solution, which were watered during the cultivation. Subsequent analysis and measurement revealed which species was maximally supplied with nitrogen and whether the amount of available nitrogen affected the function of the stomata. In the next part of the experiment, the plants were exposed to drought and changes in the behaviour of stomata were observed. The collected data show that a high concentration of nitrates can be an advantage and a disadvantage for the plant. During desiccation, a large amount of nitrogen uptake can delay the onset of rapid death, so it allows the plant to wait longer for water.

## **Keywords**

nitrogen; nitrates; mineral nutrition; drought; water stress

## SEZNAM ZKRATEK

ABA	kyselina abcisová
ADP	adenosindifosfát
ATP	adenosintrifosfát
LA	listová plocha
pH	vodíkový exponent
WP	vodní potenciál
$\Psi_w$	vodní potenciál

## Obsah

Úvod.....	7
1 Cíle práce .....	8
2 Teoretická část .....	9
2.1 Minerální výživa rostlin .....	9
2.1.1 Příjem a transport minerálních živin .....	10
2.1.2 Faktory ovlivňující příjem živin .....	13
2.1.3 Dostupnost živin .....	14
2.2 Dusík .....	15
2.2.1 Deficit dusíku .....	16
2.2.2 Nadbytek dusíku .....	16
2.3 Význam vody pro rostliny .....	17
2.3.1 Nedostatek vody jako významný stresový faktor .....	17
2.3.2 Stres vlivem nedostatku vody .....	17
2.3.3 Transpirace .....	18
2.3.4 Vztah mezi příjmem živin a vody .....	19
3 Materiál a metody .....	20
3.1 Rostlinný materiál .....	20
3.1.1 Kultivace rostlin .....	20
3.2 Měření vlhkosti substrátu .....	22
3.3 Stanovení rychlosti transpirace .....	22
3.4 Měření vodního potenciálu listů .....	22
3.5 Extrakce nitrátových iontů z biomasy .....	24
3.6 Kolorimetrické stanovení nitrátů .....	25
4 Výsledky .....	26
4.1 Porovnání reakcí druhů na varianty výživy .....	26
4.1.1 Velikost listové plochy mezi jednotlivými variantami výživy .....	26
4.1.2 Změny vodního provozu rostlin .....	26
Rychlost transpirace mezi jednotlivými variantami výživy .....	26
Změny vodního potenciálu jednotlivých variant výživy .....	27
4.1.3 Obsah nitrátů v rostlinných pletivech .....	28
4.2 Reakce jednotlivých variant na nedostatek vody .....	29
Diskuse .....	31
Závěry .....	33
5 Použitá literatura .....	34
6 Seznam obrázků a tabulek .....	36

# ÚVOD

Dusík je nepostradatelnou minerální složkou pro vegetativní a reprodukční vývoj plodin, který je v půdě přirozeně dostupný. Nehledě na to, jeho množství nemusí na rostlinu vždy působit kladně. Může dojít k situaci, kdy už rostlina není schopna množství přijatého dusík zredukovat, a tudíž jeho hladina začne být pro rostlinu toxická a vést k smrti (Vaněk, 2012).

Nedostatek dusíku se v zemědělství řeší hnojivy. Nadměrné hnojení může sice vést ke zlepšení výnosu rostliny, ale ovšem může ohrozit nejen naše zdraví, ale i životní prostředí. Jsou redukovány obsahy dusičnanů v produktech určených ke konzumaci.

Zemědělské podniky se i přes nedostatek obhospodařované půdy snaží vytěžit co největší zisk co nejrychlejším a nejjednodušším způsobem. Je známo, že Čína živí až 22 % světové populace, avšak vlastní pouze 9 % orné půdy. Zvláště zde se neúměrná aplikace dusíkatých hnojiv od 80. let 20. století stala typickou, kde rovněž z tohoto důvodu dochází k znečištění podzemní a pitné vody (Peng et al. 2009; Zhang a Zhang, 1996). Navzdory tomu, že je průmyslová výroba dusíku dokonce i ekologicky a ekonomicky náročná, činí celková výroba dusíkatých hnojiv více než 110 milionů tun ročně (Taiz a Ziegler, 2014).

Jedním z nejvíce ohrožujících faktorů pro rostlinnou výrobu je stres z nedostatku vody. Snížení výnosu plodin hrozí v suchých a polosuchých oblastech, kde se pokouší této situaci uniknout právě přehnojováním za účelem zvýšené produkce. Voda je nezbytná pro téměř všechny biochemické procesy v půdě živých organismů včetně rostlin, a tudíž i dočasné sucho může způsobit značné ztráty na úrodě.

Smyslem této práce je zjistit, jak rostliny ovlivňuje supraoptimální nitrátová výživa ve vybraných znacích spojených s využitím vody a jaké jsou mezidruhové rozdíly. Dalším záměrem je ukázat, jak rostliny reagují na zvyšující se nedostatek vody a jak může být jejich reakce ovlivněna zvýšenou dostupností nitrátu v kultivačním substrátu.



# 1 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce bylo zjistit, jestli rostliny reagují na supraoptimální nitrátovou výživu ve vybraných znacích spojených s využitím vody a jestli se tato reakce může mezi druhy lišit. Na základě vystavení rostlin postupnému vysychání bylo dalším cílem ukázat, jak rostliny reagují na zvyšující se nedostatek vody a jak může být jejich reakce ovlivněna zvýšenou dostupností nitrátu v kultivačním substrátu.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Minerální výživa rostlin

Minerální výživa je nezbytnou složkou pro růst a vývin rostlin. Rostlinná hmota je totiž tvořena kromě organických látek získávaných při fotosyntéze také asimilací dalších minerálních prvků, jako např. z dusíku, fosforu nebo vápníku (Procházka et al., 1998). Hlavním zdrojem živin je půda. V půdě jsou nevíce přítomny ve formě vázané neboli jsou součástí hornin, a tudíž je rostliny nemohou využít přímo. Vlivem procesů zvětrávání se z hornin prvky postupně uvolňují do půdního roztoku. V půdě se často vyskytují ve výměnném stavu. To znamená, že se živiny jako ionty (převážně kationty) iontově vážou na povrch půdních koloidů a jsou schopny se snadno uvolnit výměnou za jiné kationty. Nejlepší formou výskytu prvků v půdě je výskyt živin rozpuštěných v půdním roztoku. V této formě může rostlina živiny snadno přijímat a využít (Luštinec a Žárský, 2003).

Minerální živiny tvoří zdaleka tak velkou část hmotnosti rostliny jako uhlík, vodík a kyslík, ale řada z nich je pro správné fungování rostlin nutná (Procházka et al., 1998).

Některé prvky jsou pro rostliny nezbytné (esenciální) a ty splňují jednu z těchto podmínek:

- Rostlina není schopna bez esenciálního prvku ukončit svůj životní cyklus.
- Funkce prvku v rostlině nejde nahradit jiným prvkem.
- Daný prvek musí být přímou součástí metabolismu.

Esenciální živiny můžeme podle množství v biomase dělit na makrobiogenní a mikrobiogenní (Tab 1). Mezi makroživiny (makrobiogenní prvky) řadíme C, O, H, N, P, S, K, Mg a Ca. Rostliny jich ve svém těle obsahují větší množství, řádově v desetinách až desítkách procent. Mezi mikroživiny (mikrobiogenní prvky) patří zejména Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl a Ni. Existují i prvky, jež nejsou přímou součástí metabolismu, ale zato se zapojují do některých méně významných funkcí. Ty se řadí do kategorie prospěšné (benefiční) prvky. Tam se nachází Na, Si, Co, I a V (Masarovičová, Repčák et al., 2002).

Tab. 1: Obvyklé množství biogenních prvků v rostlinách (upraveno podle Epstein, 1972).

Prvek	Chemická značka	Relativní atomová hmotnost	Obsah v sušině ( $\mu\text{mol g}^{-1}$ , $\mu\text{g g}^{-1}$ nebo %)		Počet atomů ve vztahu k molybdenu
			$\mu\text{mol g}^{-1}$	$\mu\text{g g}^{-1}$	
<i>Mikroživiny</i>					
molybden	Mo	95,95	0,001	0,1	1
měď	Cu	63,54	0,10	6	100
zinek	Zn	65,38	0,30	20	300
mangan	Mn	54,94	1,0	50	1 000
železo	Fe	55,85	2,0	100	2 000
bor	B	10,82	2,0	20	2 000
chlor	Cl	35,46	3,0	100	3 000
<i>Makroživiny</i>					
síra	S	32,07	30	0,1	30 000
fosfor	P	30,98	60	0,2	60 000
hořčík	Mg	24,32	80	0,2	80 000
vápník	Ca	40,08	125	0,5	125 000
draslík	K	39,10	250	1,0	250 000
dusík	N	14,01	1 000	1,5	1 000 000
kyslík	O	16,00	30 000	45	3 000 000
uhlík	C	12,01	40 000	45	4 000 000
vodík	H	1,01	60 000	6	60 000 000

### 2.1.1 Příjem a transport minerálních živin

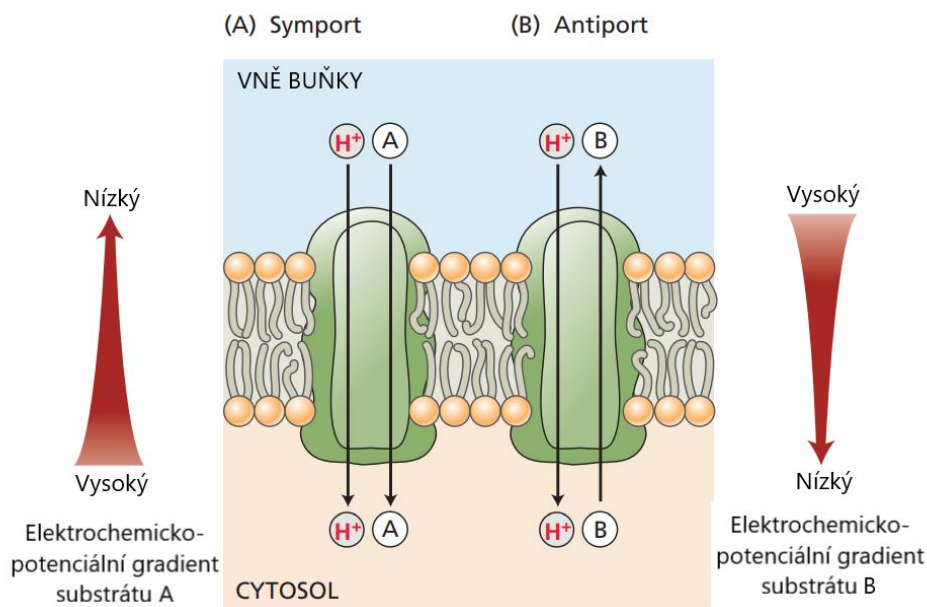
Rostliny získávají živiny ve formě iontů převážně z půdního roztoku za pomoci kořenového vlášení. Odtud se distribuují mezi další orgány. Za půdní roztok považujeme veškerou volnou vodu v půdě s ionty rozpuštěných živin podle odpovídajících aktuálních přírodních podmínek. Množství iontů bývá poměrně malé, jelikož většina živin je často uložena (imobilizována) v živé či odumřelé biomase, odkud se může při procesech mineralizace (působením mikroorganismů) uvolňovat a vázat se na anorganické či organické výměnné komplexy v půdě (Procházka et al., 1998).

Kořeny však mohou přijímat jen živiny nacházející se v jejich těsné blízkosti – v rhizosféře. Živiny se tam mohou dostat třemi mechanismy: 1. pohybem půdního roztoku (tzv. hmotovým tokem), 2. difuzí nebo 3. prorůstáním kořenů půdou. Hmotový tok a rovněž i přísun živin ke kořenům, je závislý na obsahu jednotlivých iontů v půdním roztoku a na transpiraci rostlin, které posouvají půdní roztok k povrchu kořenů. Důsledkem odčerpání vody kořeny se snižuje vlhkost v jejich okolí, a tudíž se voda musí doplnit z ostatních půdních zón. Prísun živin v době vegetace není rovnoměrný, což může vést k nedostatku některých živin v rhizosféře během určitých fází růstu. Na krátkou vzdálenost v okolí kořenů se uplatňuje pro transport iontů taky proces difuze, kdy se dostávají ionty z oblastí půdy s vyšší koncentrací prvků do ochuzené části rhizosféry. Závisí na půdních podmínkách (pH, sorpční kapacita aj.), na celkovém množství některých živin v půdě a na jejich vlastnostech, hlavně na rozpustnosti a rychlosti uvolňování se do půdy. Prokořeňování půdního profilu v průběhu vegetace

rostliny je také důležitým mechanismem, který umožňuje kořenům čerpat živiny i z hlubších půdních horizontů.

Kromě svého prodloužení kořeny umí zvětšit množství kořenového vlášení, a tedy pomocí větší plochy i zvětšit jejich příjmovou kapacitu. Rostliny jsou schopny růst kořenů citlivě regulovat v závislosti na podmínkách v půdě i celkové potřebě rostliny. Rovněž za účelem zvětšení dostupnosti živin umí zvyšovat sekreci organických látek. Tím pádem je zvýšen i výskyt a aktivita mikroorganismů, včetně mykorrhizy, které příjem minerálních živin usnadňují (Vaněk, 2012).

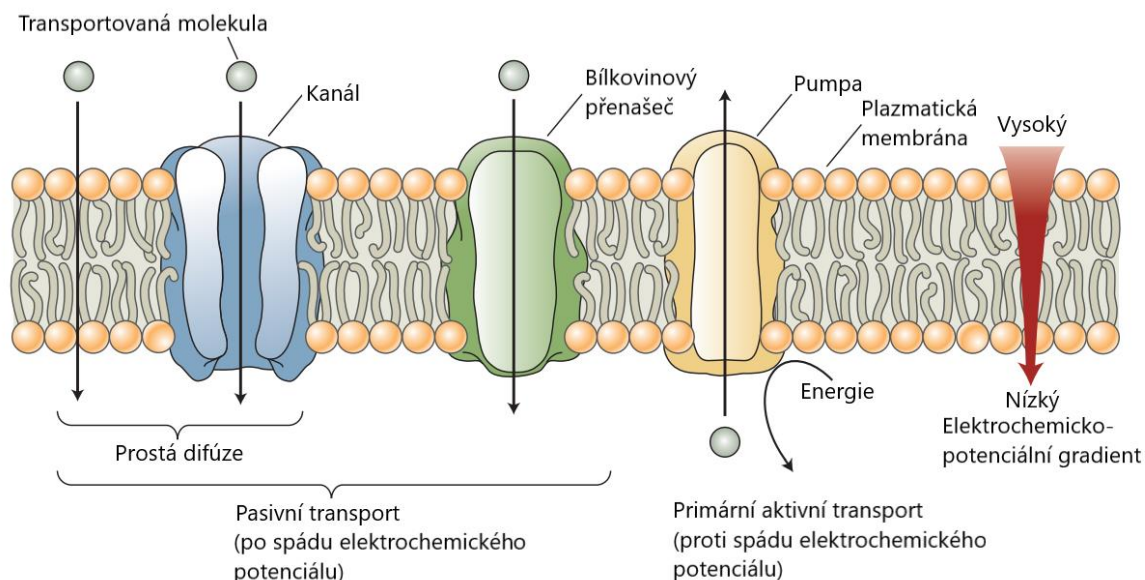
Ionty se k povrchu kořene dostávají zejména procesy difuze a hromadného toku, jak bylo zmíněno výše. Do kořenových buněk se dostávají různými transportními mechanismy. K aktivnímu primárnímu transportu slouží specializované transportní proteiny – protonové pumpy. Protonové pumpy mají schopnost štěpit ATP (tzv. ATP-áza) a pomocí uvolněné energii přepravit přes membránu  $H^+$ . Díky „pumpování“  $H^+$  přes membránu za spotřeby metabolické energie mohou být přijímány kationty (např.  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) proti spádu koncentračního gradientu (elektrochemického potenciálu), rozdílu v koncentracích částic mezi dvěma prostředími, neboli z nižší koncentrace do vyšší (Hejnák et al., 2007). Sekundární transport vykonávají bílkovinné přenašeče. Každý z nich vykazuje specifickou afinitu pro jisté látky, takže mají možnost vázat a transmembránově přenášet pouze ty ionty, které jsou pro ně příbuzné. Přesto ke své aktivaci potřebují energii, kterou získávají pomocí ATP, které se ATP-ázou štěpí na ADP a anorganický P. Bílkovinné přenašeče však mohou transportovat ionty stejným směrem současně. Tento způsob se nazývá symport. Jestliže se současný pohyb vykonává v protisměru, mluvíme o antiportu (Masarovičová, Repčák et al., 2002).



Obr. 1: Příklady sekundárního aktivního transportu (A – např. cukr; B – např.  $Na^+$ ) (upraveno podle Taiz a Zeiger, 2014)

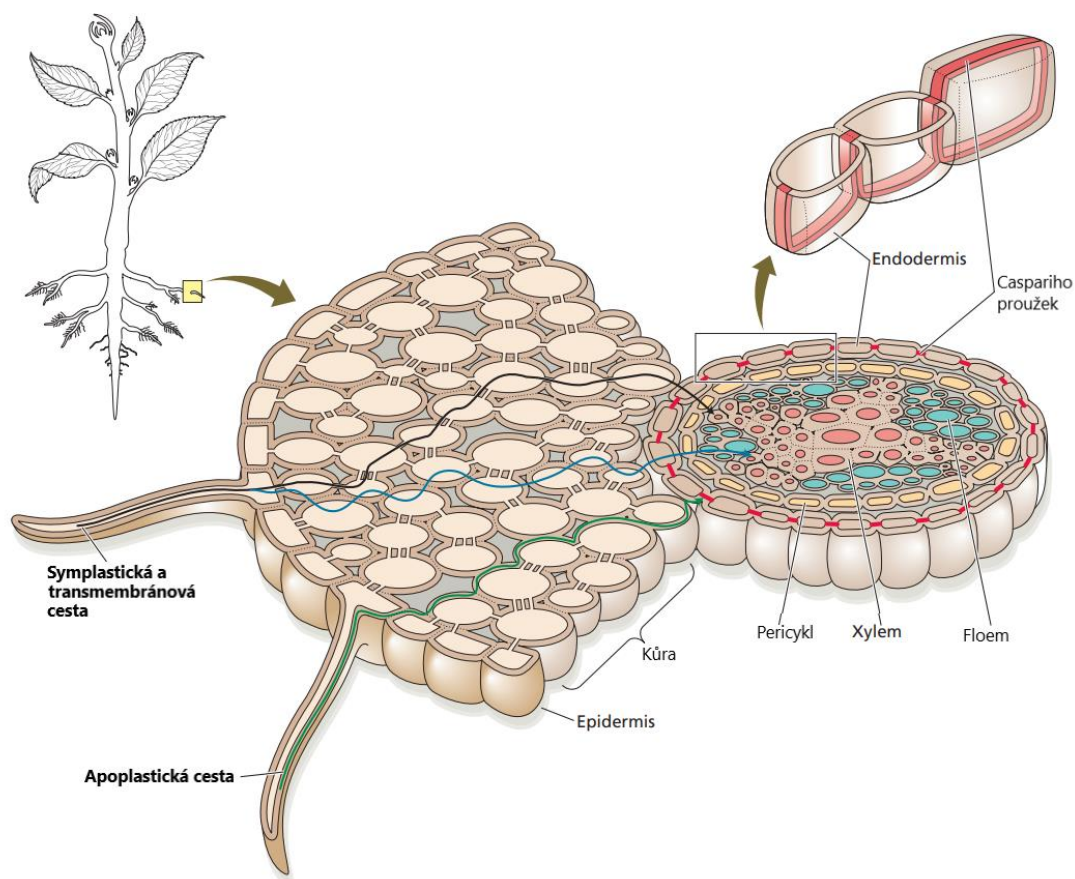
Existuje ovšem i transport pasivní. Ten na rozdíl od aktivního nevyžaduje přímo metabolickou energii a probíhá po spádu elektrochemického potenciálu na membráně. Malé volné ionty a molekuly s hydrofobní povahou se do cytosolu mohou dostat cestou prosté difúze. Tyto látky jsou většinou ale

transportovány také regulovaně přes iontové kanály nebo póry. Póry, tzv. poriny, jsou integrální bílkoviny hydrofobně přemostující biomembránu. Kromě kanálů existuje i způsob přenosu iontů membránou přes přenašeče. Na rozdíl od kanálů se v případě přenašečů tvoří mezi transportním proteinem a iontem vazba, za membránou jsou ionty uvolněny a přenašeč se opět vrací zpět na původní stranu membrány (Hejnák et al., 2007).



Obr. 2: Typy membránových proteinů (upraveno podle Taiz a Zeiger, 2014)

Pro transport v kořeni se ionty dostávají radiálním směrem do xylemu společně s vodou. Ionty z rhizodermis putují přes plasmodesmy symplastickou cestou, anebo cestou apoplastickou přes volné prostory buněčných stěn a intercelulár. Nicméně pokud transportují apoplastem, hlavní bariérou jsou ligninové tzv. Caspariho proužky na buněčných stěnách endodermis. Zde musí přes plazmatickou membránu vstoupit do buňky a dále pokračovat symplastem. Propustnost plasmodesmat je závislá na druhu rostliny, stáří nebo typu pletiva apod. (Hejnák et al., 2007). Dále roztok živin pokračuje do prostoru vodivých pletiv (střední válec kořene), zejména cév a cévic dřeva. Díky transpiračnímu proudu mají minerální ionty možnost se dále pohybovat xylémem do nadzemní části rostliny, kde se navazující difúzí a aktivním transportem dostávají do dalších orgánů, hlavně do listů, v nichž se cévní svazky větví. Ionty živin se mohou také přemísťovat prostřednictvím transportního systému lýka (floemu). Přes sítkovice zásobují orgány, ve kterých je iontů nedostatek a tok vody pomocí transpirace je tam omezený – například mladé listy nebo plody (Luštinec a Žárský, 2003).



Obr. 3: Radiální pohyb látek kořenem (upraveno podle Taiz a Zeiger, 2014)

Živiny lze také rozdělit do tří skupin dle pohyblivosti v rostlinách, a to na dobře pohyblivé, středně pohyblivé a špatně pohyblivé. N, P, S, Na, Mg, K a Cl se jak ve floému, tak v xylému transportují velice dobře. Pozorovatelný důsledek jejich snadného přemísťování je jejich postupný úbytek ve starších listech spodní části rostliny. To souvisí se snadnou recyklací těchto živin ze stárnoucích do rostoucích orgánů. Zhoršený pohyb, převážně v akropetálním<sup>1</sup> směru se vyskytuje u Fe, Mn, Zn, Cu, Mo a občas i u Mg. Velmi obtížně se v rostlině přemísťují zejména Ca a B. Kvůli tomu rostlina většinou není schopna tyto ionty přemístit, a tak využít jejich zásoby v nově rostoucích buněčných strukturách (Vaněk, 2012).

### 2.1.2 Faktory ovlivňující příjem živin

Na to, v jakém množství rostlina živiny přijímá, působí několik vnitřních a vnějších faktorů. Charakteristickým vnitřním faktorem je příjmová rostlinná kapacita, jež je dána geneticky. Ta je ovlivněna uspořádáním a rozvojem kořenového systému jednotlivých druhů a rostlin, jelikož čím bohatší je kořenový systém, tím intenzivněji jsou živiny přijímány. Také závisí např. na množství a složení exsudátů<sup>2</sup>, jež mají výrazný vliv na počet mikroorganismů a jejich aktivitu v rhizosféře, na biologické hodnotě rostliny, celkovém metabolismu, na výšce asimilačního efektu nebo na výskytu a

<sup>1</sup> akropetální = směr ze spodu nahoru (Vaněk, 2012)

<sup>2</sup> exsudáty = chemické látky vylučované na povrch rostlin při poranění či napadení patogenem (Taiz a Zeiger, 2014)

rozvoji mykorhizy<sup>3</sup>, kdy se zvětšuje povrch kořenů, a tak i příjem. Rostliny se dokážou přizpůsobit specifickým stanovištím dle nadmořské výšky, vlhkostních podmínek nebo půdních vlastností, kde dlouhodobě rostou (Vaněk, 2012).

Klimatické a povětrnostní podmínky řadíme do faktorů vnějších. Ty také významně ovlivňují příjem živin, a tudíž tvorbu biomasy a v zemědělství kvalitu produkce. Klimatická oblast i sezónní průběh počasí velmi výrazně ovlivňuje růst a vývoj rostlin. Zejména změny ve vlhkosti půdy a teploty mají významný dopad na příjem minerálních živin. Pokud je vlhkost dostatečná a teplota vyšší (cca nad 10 °C), obvykle je příjem živin intenzivnější, zejména u draslíku, fosforu a dusíku. Zisk iontů však s nárůstem biomasy nemusí nutně korespondovat, protože rostliny mohou často využívat. I přes to má na tvorbu biomasy největší vliv množství záření (Vaněk, 2012).

Složení půdního roztoku se rovněž významně podílí na dostupnosti živin a na celkovém růstu rostliny. Pro rostlinnou výživu jsou využitelné živiny, které jsou rozpustné a jež jsou v pevné fázi půdy sorpčně vázány a mohou průběžně doplňovat koncentraci v půdním roztoku. Jejich rozpustnost je ovlivněna půdními vlastnostmi, kupříkladu hodnotou pH, zrnitostí, pórovitostí či sorpčními schopnostmi. Rozhodující je však celková koncentrace a zastoupení jednotlivých iontů. Poměry v zastoupení jednotlivých iontů významně působí na využití živin rostlinou. Jestliže je koncentrace určitého iontu v půdě výrazně vyšší, rostlina má sice dostatek živin, ale hrozí možnost negativního dopadu na příjem ostatních iontů. Zejména v důsledku velkého obsazení vazebných míst na částicích půdy i na kořenech dominujícím iontem nezůstává místo pro další potřebné živiny. Ty se pak můžou při vyšších srážkách či záливce dostat do hlubších půdních horizontů, ba dokonce se úplně vyplavit. Naopak pokud je obsah potřebné živiny nižší, její transport do rhizosféry se zpomaluje, a tudíž i příjem se výrazně sníží. V zemědělské praxi potřebné množství živin v půdě udržujeme hnojením a agrotechnickými zásahy za účelem zajištění předpokladů harmonické výživy rostlin (Vaněk, 2012).

### 2.1.3 Dostupnost živin

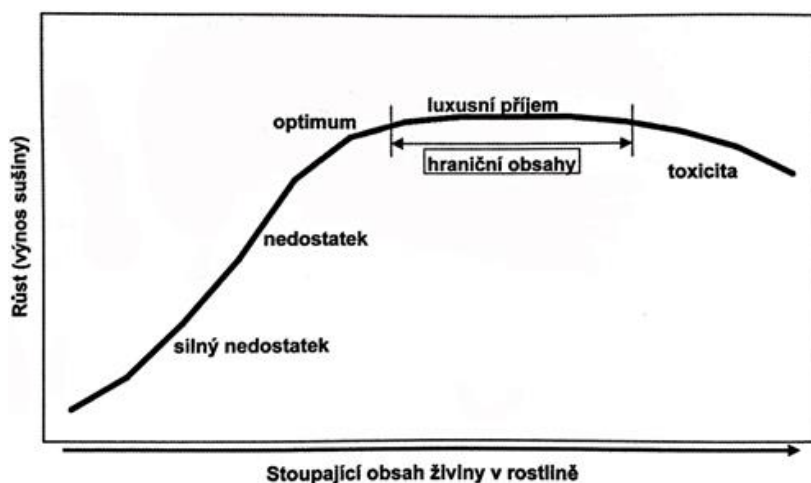
Deficience živin v prostředí vede k nízkému obsahu živin v rostlinách. V takové situaci je v rostlině výrazně omezován její metabolismus, a tudíž snižena i produkce biomasy. Klesá totiž rychlost tvorby významných složek biomasy – sacharidů, bílkovin, lipidů i některých hormonů a dalších látek. Také je ovlivněn její růst, produkce a dochází k deformaci listů, stonků a plodů. Nedostatek živin se často projevuje i na změně barvy listů a plodů. V případě výrazného nedostatku může dojít dokonce k přerušení vegetačního cyklu (Vaněk, 2012). Při mírném přidavku minerálních hnojiv se jejich výnos opět zvyšuje (Nátr, 2002).

Větší množství dostupných živin podporuje rychlost růstu rostliny (Obr 4.). V blízkosti fyziologického optima se přijímané živiny už významně nepodílí na přírůstku sušiny rostlin, ale mohou se hromadit v pletivech částečně jako zásoby (Vaněk, 2012). Jakmile je hranice únosného obsahu překročena, nastane výrazné snížení příjmu jiných živin, narušení procesů metabolismu nebo

---

<sup>3</sup> mykorhiza = symbiotické spojení některých hub a kořenů rostlin. Usnadňuje příjem minerálních živin kořeny (Taiz a Zeiger, 2014)

signalizace buněk, jež se nachází uvnitř rostlin ve vysoké koncentraci a omezí se růst rostliny. Značný nadbytek některých živin může na rostlinu působit toxicky (Vaněk, 2012).



Obr. 4: Schématické znázornění vlivu obsahu živin na růstu rostliny (upraveno podle Mengel, 1984)

Pro rostlinu je nejlepší hodnota dostupnosti živiny poblíž optima. V této oblasti se totiž v pletivech ještě výrazně nehromadí nevyužité živiny a rostlina obsahuje ideální poměr všech živin pro svůj růst (Vaněk, 2012). Vymezení tohoto minimálního obsahu živin pro maximální výnos je stále obtížné, ale většinou se udává jako množství odpovídající 90 % maximálního výnosu (Nátr, 2002).

Rozmezí fáze luxusního příjmu se u živin odlišuje, např. u bóru je oblast luxusního příjmu velmi krátká, zato molybden má schopnost se hromadit v poměrně vysokých koncentracích bez negativních následků (Vaněk, 2012).

## 2.2 Dusík

Dusík je makrobiogenní živina, kterou rostlina získává převážně v anorganické formě dusičnanového aniontu ( $\text{NO}_3^-$ ) a kationtu amonného ( $\text{NH}_4^+$ ). Je významnou složkou například chlorofylu, aminokyselin, amidů či bílkovin (15 – 18,9 %). Rostlina si ho také ukládá do zásob, aby byla schopna překlenout období, kdy je příjem N menší než jeho potřeba pro růst. Příjem těchto iontů závisí hlavně na rostlinném druhu a na vnějších podmínkách. Určitý vliv má i pH prostředí. Pokud je oblast kyselejší, rostlina přijímá spíše  $\text{NO}_3^-$ . V neutrální až zásadité oblasti je buď vyšší příjem  $\text{NH}_4^+$ , anebo je to vyrovnané (Pavlíková et al., 2008). Celkový příjem  $\text{NH}_4^+$  z půdy je u rostlin většinou malý. Důvodem jsou heterotrofní (mikro)organismy, které využívají amonný iont přednostně (Nátr, 2002).

Množství nitrátu v půdě závisí hlavně na podmínkách prostředí. Jedním z nejvýznamnějších faktorů jsou množství záření a fotoperioda. V zimním období, v předjaří či na podzim, kdy jsou dny kratší, rostliny hromadí přebytečné množství dusíku, jelikož nejsou schopny všechny využít k produkci pletiv. Taktéž i kvůli nedostatečné intenzitě slunečního záření se omezuje aktivita enzymů



podílejících se na následující redukci nitrátů v rostlinách. Roli hraje také teplota externího prostředí. Se snižující teplotou se zpomaluje příjem a využití  $\text{NO}_3$  (Vaněk, 2012).

### 2.2.1 Deficit dusíku

Při nedostatku dusíku dochází k inhibici růstu, zejména v důsledku zpomalení tvorby stavebních a funkčních proteinů i dalších dusíkatých látek. Na poklesu tvorby biomasy se následně podílí také omezená rychlost fotosyntézy kvůli snížené tvorbě proteinů v listech a chlorofylu. Růst kořenů je naopak při nedostatku živin ve srovnání s nadzemní částí rychlejší.

Projev deficiencie dusíku u rostlin je sice individuální, ale jedním z hlavních znaků je menší vzrůst (Vaněk, 2012). Důsledkem nahromadění přebytečných sacharidů mohou stonky dokonce i dřevnatět (Taiz a Zeiger, 2014). Nedostatek N je zpozorovatelný i na světlejší barvě rostlin, hlavně listů, které jsou nažloutlé. Chloróza listů je způsobena poklesem syntézy chlorofylu. Dříve žloutnou starší listy, jež rychleji stárnou a opadají. Dusík z nich totiž rostlina přemísťuje do rostoucích částí (Vaněk, 2012).

### 2.2.2 Nadbytek dusíku

Nadbytek dusíku je už méně běžný a jeho vliv záleží na druhu rostliny a růstové fázi rostliny. V humusovém půdním horizontu se v částech s vyšší koncentrací dusíku zmenšuje růst hlavního a vedlejších kořenů, a proto méně přijímají živiny a vodu. V následujících fázích růstu se dusík shromažďuje v rostlinách ve formě nitrátů. Ty se mohou akumulovat v pletivech do relativně vysokých koncentrací, aniž by to bylo pro rostlinu toxické. Vytváří totiž přirozenou zásobu dusíku pro pozdější spotřebu a zabudování do organických sloučenin při intenzivním růstu. Množství nitrátů se zvyšuje zejména při menším množství světla.

Přebytek dusíku je většinou obtížně pozorovatelný bez chemické analýzy biomasy. Jestliže jsou podmínky k růstu uspokojivé, je podpořen růst vegetativních orgánů (převážně listů, stonků a výhonů). Vzhledově bývají rostliny sytě zelené a v některých případech až enormně vyvinuté, ale zato déle dozrávají. Při značném nadbytku dochází k poškození listů, na kterých se postupně od okrajů projevuje nekróza vedoucí k definitivnímu odumření. Konkrétně u brukve řepky (*Brassica napus*) můžeme pozorovat bohatě větvené a vyšší stonky s velkými vlnitými listy.

Velká pravděpodobnost působení nadměrného množství dusíku je zejména v oborech zahradnictví a květinářství, z důvodu pěstování v umělých substrátech s omezeným množstvím zeminy. V přirozených a běžných podmínkách jsou tyto případy vzácné. Nadbytek dusíku můžeme nalézt jen na lokálních místech, kde došlo k přehnojení. K tomu někdy může docházet záměrně s cílem zajistit maximální růst rostlin, avšak bez informací o skutečné potřebě rostlin a dostupnosti dusíku v substrátu. Kromě ekonomických ztrát spojených s malým využitím použitého dusíku přehnojování může působit další návazné problémy. Zejména se jedná o vyplavení nitrátu do povrchových vod a snížení jejich kvality (Vaněk, 2012).

Dalším problémem je vysoká koncentrace nitrátů v biomase zeleniny a dalších rostlin pro potravinářský průmysl. Ty jsou vyšším obsahem nitrátů kvalitativně znehodnoceny, protože mohou konzumentům ohrožovat zdraví. Konzumace těchto plodin může vést k methemoglobinemii,

onemocněním, kdy játra redukuje dusičnany na dusitany. Dusitany se spojují s hemoglobinem, jenž pak není schopen vázat kyslík, a tudíž ho nemůže přenést do tkání. U lidí a některých zvířat je možnost také převádět dusičnany na silně karcinogenní nitrosaminy nebo na oxid dusnatý, což je silná signální molekula zapojená do mnoha fyziologické procesů, jako je rozšíření krevních cév (Taiz a Ziegler, 2014). Proto v některých zemích, včetně České republiky, je omezován obsah dusičnanů v produktech určených k lidské spotřebě, což vede i k ekonomickým ztrátám. Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb. ve znění pozdějších předpisů stanovuje mezní limit dusičnanů v pitné vodě 50 mg/l. O obsahu dusičnanů v potravinách a potravinových surovinách se zmiňovala Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 53/2002 Sb. Tato vyhláška však byla v roce 2004 zrušena a v současné době není maximální množství určeno (Anon., 2004; Anon., 2002).

## **2.3 Význam vody pro rostliny**

### **2.3.1 Nedostatek vody jako významný stresový faktor**

Voda je důležitým rozpouštědlem anorganických a organických látek. Díky ní se mohou molekuly a ionty pohybovat v celé rostlině. V rostlinných orgánech se její obsah pohybuje v rozmezí 60 až 90 %, konkrétně třeba u měkkých pletiv se v listech či kořenech podíl vody pohybuje na hranici 80–90 %. Méně je už v semenech, tam nalezneme jenom 5 až 15 % (Luštinec a Žárský, 2003).

Některé suchozemské rostliny obsahují vyšší množství vody. Tyto rostliny se nazývají homoiohydriky. Vyvinuly se ze zelených řas s vakuolizovanými buňkami, což způsobilo ztrátu schopnosti buněk snášet vysušení. Důsledkem toho je nalezneme ve vlhkých půdách a na trvale zamokřených stanovištích. Naopak v rostlinách poikilohydriky vakuoly nejsou, tudíž se mohou vyskytovat na místech se střídáním sucha a vlhka. Čím méně vody v rostlině je, tím více se tlumí životní procesy, zejména fotosyntéza a dýchání. Po zajištění potřebného množství vody se metabolická aktivita opět obnoví a rostliny jsou tak schopny růst dál. Vztah mezi aktivitou rostliny a obsahem vody v pletivech je velmi druhově specifický, ale při poklesu obsahu vody pod 50 % už většina rostlin nezvratně odumírá (Larcher, 1988).

Voda se výrazně podílí na biochemických reakcích v metabolismu rostlin, díky ní může také probíhat transport látek, jenž prodlužuje růst buněk. Největší množství vody je potřebné pro transpiraci (výpar vody z listů), která není pouze následkem současně probíhajícího příjmu CO<sub>2</sub> průduchy, ale také pomáhá udržovat fyziologickou teplotu listu (Procházka et al., 1998; Penka, 1985).

### **2.3.2 Stres vlivem nedostatku vody**

Mírný vodní deficit vody je pro rostliny neškodný, ale při jeho zvýšení (70–80 %) se dostávají rostliny do vysokého stresu, který výrazně ovlivňuje její životní funkce a orgány. Chemický signál během nedostatku vody rostlinou přenáší nejpravděpodobněji fytohormon kyselina abscisová (ABA), tvořící v kořenových špičkách a v dospělých listech (Masarovičová, Repčák et al., 2002).

ABA má za úkol spouštět uzavírání průduchů. Z kořenů putuje xylémem do listů, kde se váže na receptor v plazmatické membráně svěřacích buněk. Vazbou se změní vlastnosti plazmalemy a toky

iontů. Kationty draslíku, regulující otevírací a zavírací mechanismus průduchů, se transportují ven z těchto buněk, což umožňuje průduchu svou štěrbinu uzavřít (Hejnák et al., 2007).

Rostlina má schopnost přijímat vodu jen dokud je její vodní potenciál nižší než vodní potenciál zdroje vody. Již po několika minutách až hodinách deficitu se v rostlinných buňkách mění zastoupení proteinů. Například se zvyšuje produkce minimálně 20 stresových proteinů (ostatní ještě neznámé), zvaných dehydriny. Dehydriny zatím nejsou dostatečně prozkoumány, ale určitě víme to, že díky nim rostlina lépe odolává vodnímu stresu (Masarovičová, Repčák et al., 2002).

Množství vody v rostlině můžeme určit několika způsoby. Nejjednodušším způsobem je zvážit čerstvou hmotnost rostliny nebo její části ( $M_v$ ) a poté to samé udělat i po vysušení váženého vzorku ( $M_s$ ). Obsah vody vypočítáme podle následujícího vzorce:

$$V (\%) = \frac{M_v - M_s}{M_v} \times 100 \quad (1)$$

Důležitým faktorem je i vodní potenciál ( $\Psi_w$ ), určující aktivitu vody v systému vzhledem k volné energii chemicky čisté vody. Je vyjádřen buď v energetických jednotkách ( $J \cdot kg^{-1}$ ), anebo v tlakových jednotkách, a to v pascálech (Hejnák et al., 2007).

V důsledku nedostatku vody v pletivech se v rostlině významně mění celá řada procesů. Nejprve dochází ke zpomalení růstu buněk, který zpozorujeme už při mírném poklesu vodního potenciálu o 0,1–0,2 MPa. Vizuálně můžeme nedostatek vody poznat na mladých rostoucích listech, které omezí nejen svůj růst, ale i velikost listové plochy. Dojde v nich k pozastavení transpirace a výměně plynů s okolím, neboť se vlivem zvýšené koncentrace ABA uzavírají průduchy. Jestliže turgor buněk klesne na hodnotu 0,3–0,4 MPa sníží se tvorba cytokininů, a tudíž dojde k poklesu rychlosti procesu dělení buněk. Rostlina proto přestává růst. Při nulovém turgoru se v listech začnou hromadit nevyužité asimiláty, neboť jsou ovlivněny všechny metabolické procesy, včetně růstu. Většina asimilátů se pak transportuje do kořenů, jež díky nim začnou rychleji prorůstat do hlubších částí půdy, kde se nachází doposud nevyužité zdroje vody. Tento proces probíhá až po zastavení růstu listů a následném zpomalení fotosyntézy. V případě dalšího poklesu hodnoty vodního potenciálu o 0,2–0,8 MPa, se vlivem zvýšení koncentrace iontů ve vakuolách i dalších signálních mechanismů mění aktivita enzymů. Zrychlí se hydrolýza škrobu anebo naopak se zpomalí asimilace dusičnanů. Důsledkem poklesů hodnot vodního potenciálu listy začnou rychleji stárnout a tím pádem i opadat. Je tomu tak kvůli nadměrné produkci ethylenu a eventuálně kyseliny jasmínové. Déle trvající silný nedostatek vody má destruktivní dopad především na membrány a orgány, což vede k odumírání jednotlivých buněk, a později i celé rostliny (Masarovičová, Repčák et al., 2002).

### 2.3.3 Transpirace

Transpirační proud umožňuje plynulý transport vody z kořenů do listů, odkud uniká ve formě vodní páry do atmosféry. Největší část vody se z listů odpařuje řízeně přes průduchy (stomata), které slouží za běžných podmínek k výměně plynů s okolím. Jejich otevírací a zavírací mechanismus je hlavním faktorem pro řízení výdeje vody rostlinou. Prostřednictvím této tzv. stomatální transpirace se z rostliny odchází asi 90 % vody. Zbýlých deset procent prochází přes epidermální buňky kryté

kutikulou (tzv. kutikulární transpirace) (Hejnák et al., 2007). Transpiraci můžeme rozdělit do 4 etap. První etapou je pohyb půdního roztoku do xylému kořene. Druhá patří transportu xylémem do listů za pomoci vodivých pletiv. Ve třetí fázi voda proniká listovými pletivy (mezofylem) a odpařuje se v mezibuněčných prostorech a ve čtvrté se difuzí přes mezibuněčné prostory a průduchy dostává do atmosféry (Luštinec a Žárský, 2003).

Rychlost celého procesu je ovlivněna řadou faktorů. Jako první skupinou jsou fyzikální podmínky prostředí – zejména teplota a vlhkost vzduchu. Množství záření a koncentrace CO<sub>2</sub> v atmosféře pak ovlivňují otevřenost průduchů rostliny, stejně jako fyziologický stav rostliny, zejména množství vody v pletivech a aktivita fotosyntézy. V neposlední řadě je rychlost transpirace ovlivněna odlišnostmi v morfologicko-anatomických vlastnostech listů. Všechny listy jsou do sebe odlišné např. v anatomické stavbě, rozložení stomat, trichomů nebo v celkové ploše listů. (Hejnák et al., 2007).

### **2.3.4 Vztah mezi příjmem živin a vody**

Dostupnost vody má vliv na příjem uhlíku, růst rostliny i rychlost transpirace, a tudíž ovlivňuje i potřebu minerálních živin v rostlině. Rychlejší transpirace je výhodná pro zrychlení hromadného toku vody v půdě, ve kterém jsou živiny rozpuštěné. Tím se živiny snadněji dostávají do blízkosti kořenů, jelikož je proces difuze značně pomalejší. Proto je příjem většího množství vody značnou výhodou. Jak jsem již zmiňovala, minerální ionty putují do nadzemních částí rostliny transpiračním proudem. A s vyšším příjmem vody se i rychleji transportují do ostatních orgánů rostliny. To znamená, že se s vyšší rychlostí transpirace, se zrychlí i transport iontů v rostlině. Mechanismus otevírání a zavírání průduchů je totiž spojen se změnami množství iontů ve svěracích buňkách, konkrétně u K<sup>+</sup> a Cl<sup>-</sup> (Nátr, 2002).

Výzkum v posledních letech také ukázal, že některé živiny, například nitráty, mohou ovlivňovat rychlost transportu vody v rostlině. Mechanismem tohoto jevu je vliv dusičnanů na otevřenost pórů pro vodu – akvaporínů – na membránách buněk (Gloser et al. 2007).

## 3 MATERIÁL A METODY

### 3.1 Rostlinný materiál

Pro experiment byly použity dva druhy rostlin běžně používaných v zemědělství a to brukev řepka (*Brassica napus*) a ředkev setá (*Raphanus sativus*). Tyto jednoleté až dvouleté byliny z čeledi brukvovitých jsou velice významnými hospodářskými plodinami. Brukev vyžaduje vysoké množství dusíku v období intenzivního růstu. Její vysoký příjem živin právě vede k rychlému růstu a tvorbě biomasy. Naproti tomu ředkev vzhledem k její krátké vegetační době nevyžaduje velké množství živin, a tudíž s dusíkem hospodáří efektivněji (Vaněk, 2012; Vaněk et al., 2016).

#### 3.1.1 Kultivace rostlin

Semena rostlin byla po nabobtnání vyseta na filtrační papír. Po 8-14 dnech byly mladé rostliny jednotlivě přesazeny do plastových květináčů s čistě anorganickým substrátem a následně rozděleny do tří variant dle obsahu nitrátů ve dvakrát koncentrovaném Hoaglandově roztoku, kterým rostliny byly zalévány jednou až dvakrát týdně podle potřeby.

Tab. 2: Složení modifikovaného Hoaglandova živného roztoku (Gloser, ústní sdělení)

Živiny	Varianta 4 mM [mmol/l]	Varianta 8 mM [mmol/l]	Varianta 16 mM [mmol/l]
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1,207	2,413	4,826
$\text{KNO}_3$	1,587	3,175	6,35
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0,1905	0,1905	0,1905
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,27	0,27	0,27
$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,002	0,002	0,002
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,00085	0,00085	0,00085
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,00015	0,00015	0,00015
$\text{H}_3\text{BO}_3$	0,02	0,02	0,02
$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,00025	0,00025	0,00025
$\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{FeN}_2\text{NaO}_8$ (Chelatonát železito-sodný)	0,0405	0,0405	0,0405
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,1	0,9	0,9
$\text{K}_2\text{SO}_4$	0,04	0,16	0,16
$\text{CaCl}_2$	0,06000	0,24	0,24



Obr. 5: Příprava Hoaglandova živného roztoku (foto Alžběta Floriánová, 2021)

Pro každé zalití bylo použito 100 ml roztoku. Tři různé varianty roztoku se lišily pouze koncentrací nitrátových iontů (optimální – kontrolní 4mM, supraoptimální 8mM a extrémní 16mM) (viz Tab. 2). Po dobu 4-5 týdnů byly rostliny umístěny ve skleníku při teplotě 18-25 °C, vlhkosti 45-60 %. Nejméně pět dnů před prvním destruktivním odběrem byly rostliny přemístěny do řízeného prostředí – klimaboxu (teplota den/noc 24/16 °C, fotoperioda 14 h, vlhkost vzduchu 60 %). Po jejich aklimaci byl proveden první odběr rostlin. Potom bylo u zbývajících rostlin zastaveno zalévání a rostliny postupně vysychaly 6-9 dnů. V tomto období byly provedeny další dva destruktivní odběry a související měření stejně jako v prvním odběru. V následujících částech experimentu byla měřena vlhkost substrátu, rychlost transpirace, hodnota vodního potenciálu a bylo stanoveno množství nitrátových iontů v biomase.



Obr. 6: Kultivace rostlin ve skleníku (foto Daniela Zábojová, 2021)

### 3.2 Měření vlhkosti substrátu

Vlhkost půdy byla měřena pomocí půdního senzoru: ML3 Theta Probe Soil Moisture Sensor, který byl napojený na HH2 meter (Delta-T Devices, Cambridge, UK).



Obr. 7: Měřič vlhkosti půdy HH2 a připojené čidlo ThetaProbe (<https://delta-t.co.uk/product/ml3/#>)

Odezva čidla (mV) byla přepočítaná pomocí předem provedené kalibrace na hodnoty obsahu vody v substrátu (gramy vody na gram suchého substrátu).

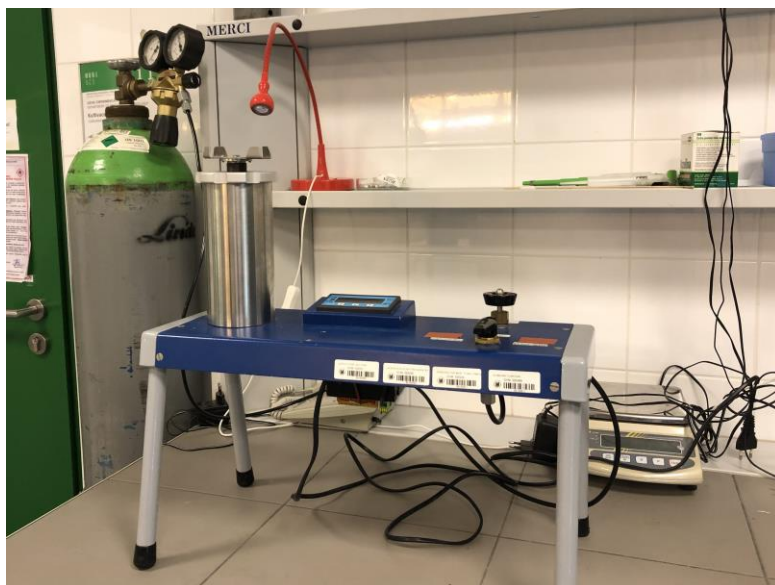
### 3.3 Stanovení rychlosti transpirace

Při odběru byla transpirace měřena prostřednictvím gravimetrie. Kontejnery se substrátem každé z měřených rostlin byly v ranních hodinách (začátek měření v mezi 7. a 9. h) zváženy a zabaleny do plastového sáčku, aby se minimalizovaly ztráty vody výparem mimo listy. Ihned po zabalení byly rostliny umístěny zpět do boxu. Po 1-3 hodinách bylo provedeno opětovné vážení. Zjištěný úbytek hmotnosti byl zaznamenán společně s obsahem vody v půdě měřeného pomocí čidla Theta Probe.

Rovněž bylo potřeba znát velikost listové plochy. Od rostliny byly odděleny všechny listy, které byly následně vyskládány do průsvitného obalu a oskenovány. Analýza obrazu byla dokončena softwarem ImageJ, jenž listovou plochu změřil. Rychlost transpirace byla následně vypočítaná z průměrné změny hmotnosti (g) za 1 h na 1 m<sup>2</sup> listové plochy.

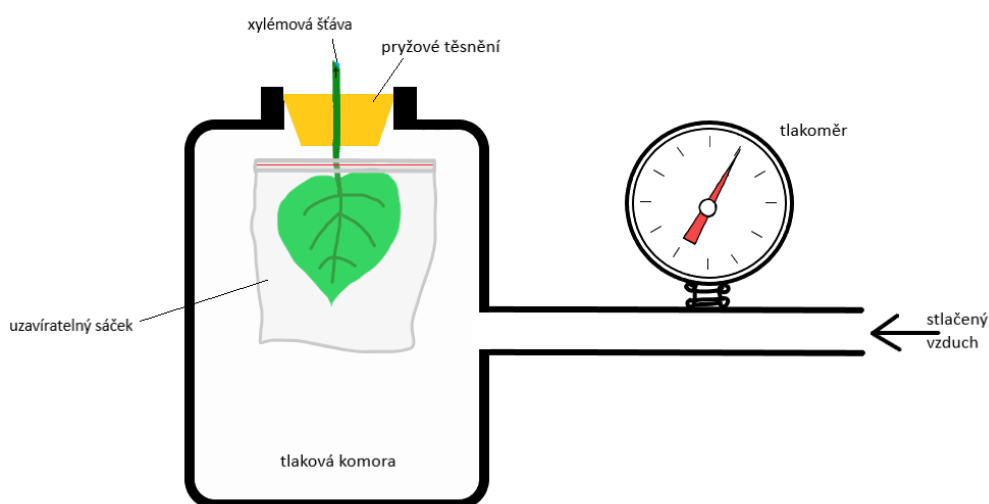
### 3.4 Měření vodního potenciálu listů

K měření vodního potenciálu listů byla použita tlaková metoda. Měření bylo prováděno za pomoci tlakové komory (Model 3005 Plant water status console, Soil Moisture Equipment Corp., Santa Barbara, USA).



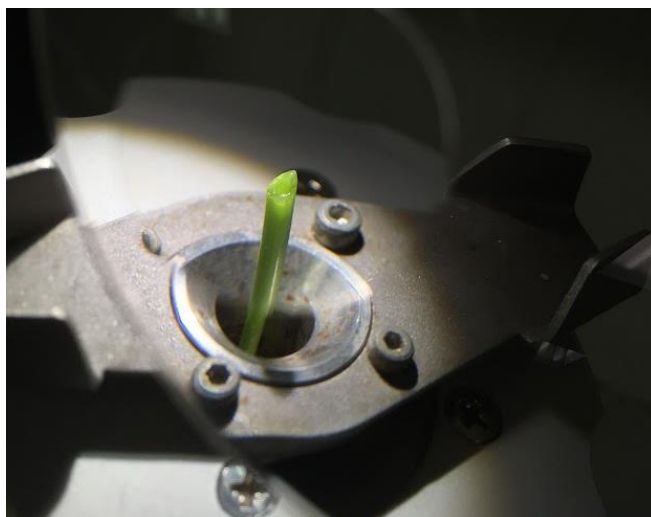
Obr. 8: Tlaková komora pro měření vodního potenciálu (foto Daniela Zábojová, 2021)

Z rostliny byl před měřením žiletkou odříznutý nejmladší plně vyvinutý list. Řez řapíku byl vždy proveden tak, aby jeho plocha byla přibližně pod úhlem  $45^\circ$ . Uříznutý list byl zasunut do uzavíratelného plastového sáčku a vyčnívající řapík byl uchycen do těsnění ve víku tlakové komory. Upevněný list byl vložen do tlakové komory, kde byl pomalu postupně zvyšován tlak. Za pomoci lupy byl pozorován okamžik, kdy byla kapka xylémové šťávy vytlačena z řapíku, byla zaznamenána hodnota dosaženého tlaku, který byl roven vodnímu potenciálu měřeného listu. Tento proces musel probíhat co nejrychleji z důvodu rychle měnícího se potenciálu listu po odříznutí.



Obr. 9: Technika měření vodního potenciálu prostřednictvím tlakové komory (Daniela Zábojová, 2021)





Obr. 10: Xylémová šťáva vytlačena z řapíku listu (foto Alžběta Floriánová, 2021)

### 3.5 Extrakce nitrátových iontů z biomasy

Z rostliny byl odejmut nejmladší plně vyvinutý list, který byl dále rozřezán na identické kousky o velikosti přibližně  $1 \text{ mm}^2$ . Množství materiálu pohybující se okolo  $100 \text{ mg}$  bylo naváženo do mikrozkušavky o objemu  $1,5 \text{ ml}$ . Vzorek byl po následném přidání  $1 \text{ ml}$  horké vody vortexován a následně umístěn na  $30$  minut do topného bloku vyhřátého na  $95^\circ\text{C}$ . Po zchladnutí byly mikrozkušavky s obsahem centrifugovány za účelem oddělení získaného extraktu od biomasy. Poté bylo přepipetováno co největší množství čistého roztoku do mikrozkušavky a uloženo v mrazničce pro pozdější kolorimetrické stanovení nitrátů. Stejný proces byl uskutečněn i u kořenového systému, kde byla vybrána co nejrepresentativnější část.



Obr. 11: Centrifugace vzorků (foto Alžběta Floriánová, 2021)

### 3.6 Kolorimetrické stanovení nitrátů

Způsob kolorimetrie je pro stanovení nitrátů ve vzorcích vhodný, jelikož je k dispozici pouze malé množství vzorku a jejich analýza bude přesná. Nejprve byla nachystána reakční činidla A a B. Činidlo A bylo složeno z 5 g kyseliny salicylové ( $C_6H_4(OH)COOH$ ) rozpuštěné v 96%  $H_2SO_4$  v celkovém objemu 100 ml. Činidlo B o objemu 500 ml obsahovalo 40 g rozpuštěné NaOH v destilované vodě. Následně byla připravena kalibrační řada 8mM roztoku  $NaNO_3$  ředěná na 0 – 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1,0 – 2,0 – 4,0 – 6,0 mM do 50ml odměrek. Poté byla provedena reakce v mikrozkuvkách o objemu 1,5 ml. Poté byla provedena reakce s námi odebranými vzorky.



Obr. 12: Kalibrační řada (vlevo), kalibrované vzorky v mikrozkuvkách (vpravo) (foto Alžběta Floriánová, 2021)

K 10  $\mu$ l vzorku nebo standardu (destilovaná voda) bylo přidáno 40  $\mu$ l činidla A. Mikrozkuvka byla následně vortexována, na zhruba 20 sekund centrifugována a ve tmě inkubována 20 minut při pokojové teplotě. Po uplynulé době byl vzorek doplněn 1 ml činidla B, opět vortexován a nechán vychladnout na pokojovou teplotu. Absorbance vzorků byla dále měřena na dvoupaprskovém UV-VIS spektrofotometru SPECORD 205 při 410 nm.

## 4 VÝSLEDKY

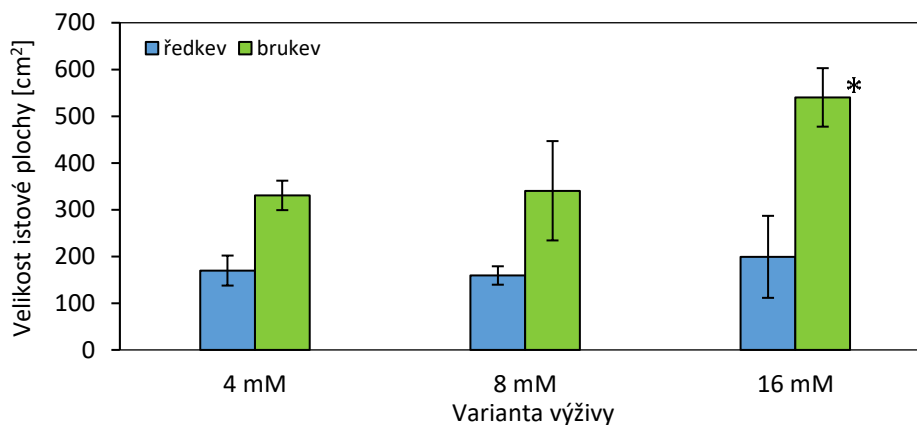
### 4.1 Porovnání reakcí druhů na varianty výživy

První část výsledků ukazuje důsledky rozdílné dostupnosti dusičnanů na růst rostlin a parametry vodního provozu rostlin dobře zásobených vodou.

Výsledky zjištěné při prvním destruktivním odběru byly pro lepší přehlednost zpracovány ve formě sloupcových grafů a rozděleny podle druhu rostliny a dle množství dusičnanů v substrátu (optimální – kontrolní 4mM, supraoptimální 8mM a extrémní 16mM). Rovněž byla u všech průměrných hodnot vypočítána směrodatná odchylka jako míra variability naměřených dat. Statistická průkaznost rozdílů mezi variantami výživy a byla testována pomocí t-testu (srovnání dvou souborů hodnot se shodným rozptylem). Sloupce označené „\*“ jsou od nižších koncentrací statisticky průkazně rozdílné na hladině 0,05.

#### 4.1.1 Velikost listové plochy mezi jednotlivými variantami výživy

Obr. 13 zobrazuje rozdíly ve velikosti listové plochy mezi jednotlivými variantami výživy. U brukve bylo prokázáno, že nejvyšší použitá koncentrace dusičnanů vedla k průkaznému zvětšení listové plochy oproti ostatním variantám, konkrétně listová plocha (LA) stoupla na 163,42 % kontroly. Ředkev ukázala podobný trend – LA stoupla na 117,32 % kontroly, avšak z důvodu velké variability dat nebyl zjištěn statisticky průkazný rozdíl.



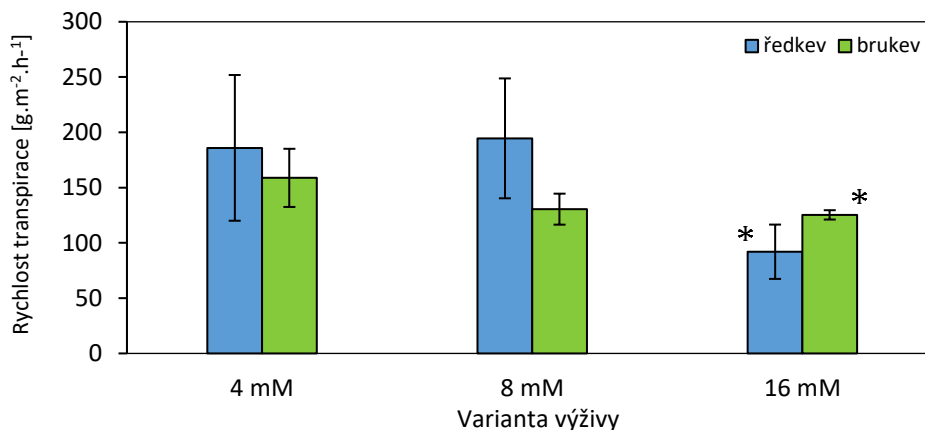
Obr. 13: Velikost LA mezi jednotlivými variantami výživy ředkve seté (*Raphanus sativus*) a brukve řepky (*Brassica napus*). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku.

#### 4.1.2 Změny vodního provozu rostlin

##### Rychlost transpirace mezi jednotlivými variantami výživy

Změny rychlosti transpirace a vodního potenciálu jsou základními parametry pro zjištění reakce rostliny na specifickou výživu. Z obr. 14 o závislosti rychlosti transpirace na variantě výživy je

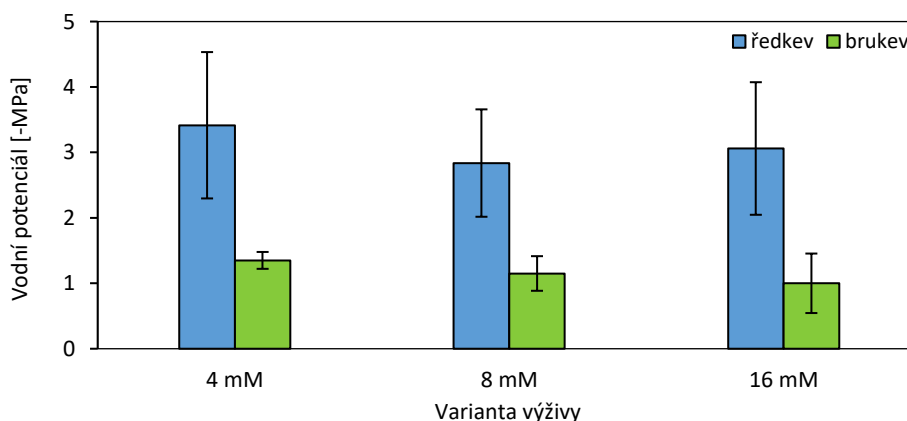
patrné, že vysoká koncentrace nitrátů rychlost výměny plynů průkazně ovlivnila. Jako u obr. 14 není mezi 8mM a 4mM variantou značný rozdíl. Rychlost transpirace varianty 16mM ředkve klesla na 49,47 % kontroly a u 16mM brukve klesla na 78,92 % kontroly.



Obr. 14: Rychlosti transpirace mezi jednotlivými variantami výživy ředkve seté (*Raphanus sativus*) a brukve řepky (*Brassica napus*). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku.

### Změny vodního potenciálu jednotlivých variant výživy

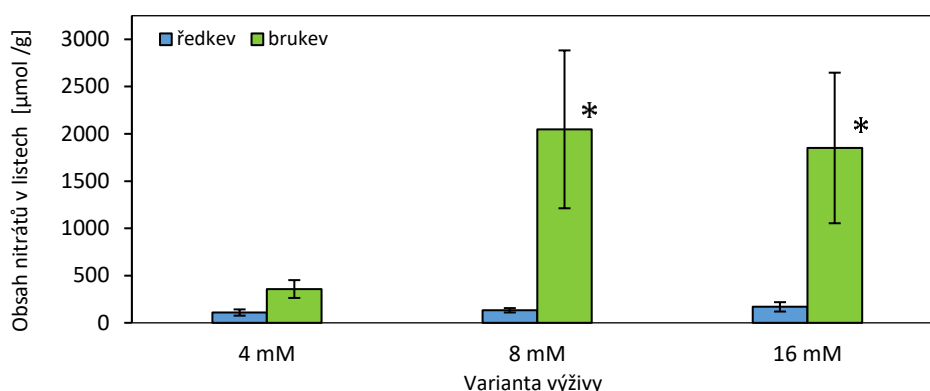
Diference v hodnotách vodního potenciálu jednotlivých variant (Obr. 15) nejsou výrazné. Ředkev i brukve si hodnoty udržely poměrně stabilní. Nebyl zde pozorován žádný trend, a rozdíly mezi variantami nebyly statisticky významné. Rostliny ředkve si udržovaly ve všech variantách negativnější vodní potenciál než brukve.



Obr. 15: Hodnoty vodního potenciálu mezi jednotlivými variantami výživy (*Raphanus sativus*) a brukve řepky (*Brassica napus*). Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku.

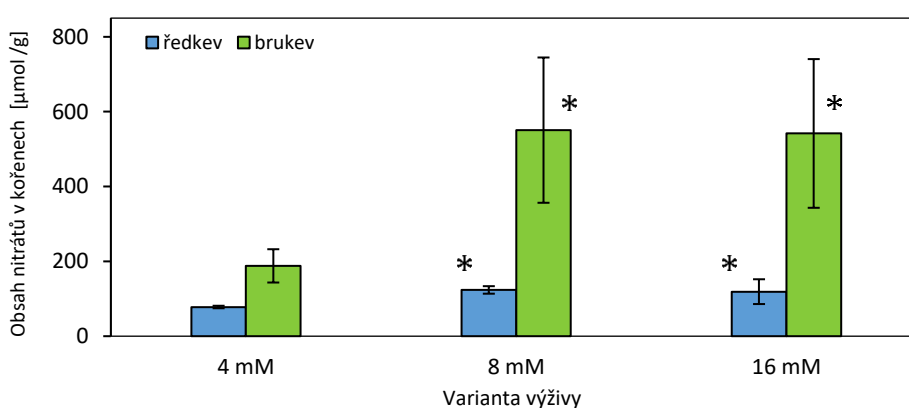
### 4.1.3 Obsah nitrátů v rostlinných pletivech

Obsah nitrátů v listech (Obr. 16) je u supraoptimální 8mM a extrémní 16mM varianty výživy brukve určitě vyšší oproti kontrole. U 8mM varianty stoupl na 572,67 % kontroly, ale u 16mM varianty jen na 517,61 % kontroly. U ředkve byl také pozorovaný trend nárůstu obsahu. U 8mM varianty vzrostl obsah na 121,78 % kontroly a u 16mM varianty na 155,2 % kontroly. Zjištěné rozdíly mezi variantami ředkve však nebyly statisticky významné.



Obr. 16: Obsah nitrátů v listech jednotlivých variant výživy ředkve seté (*Raphanus sativus*) a brukve řepky (*Brassica napus*). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku.

Obsah nitrátů v kořenech všech variant reagoval podobně (Obr. 17) jak bylo zjištěno u listů. U 8mM varianty brukve obsah nitrátů v kořenech procentuálně vzrostl na 292,98 % kontroly, u vysoce zásobené (16mM) varianty na 288,29 % kontroly. Obsah nitrátů u 8mM ředkve stoupl na 158,51 % kontroly a u 16mM varianty na 152,6 % kontroly. Všechny tyto rozdíly byly v případě kořenů statisticky průkazné.

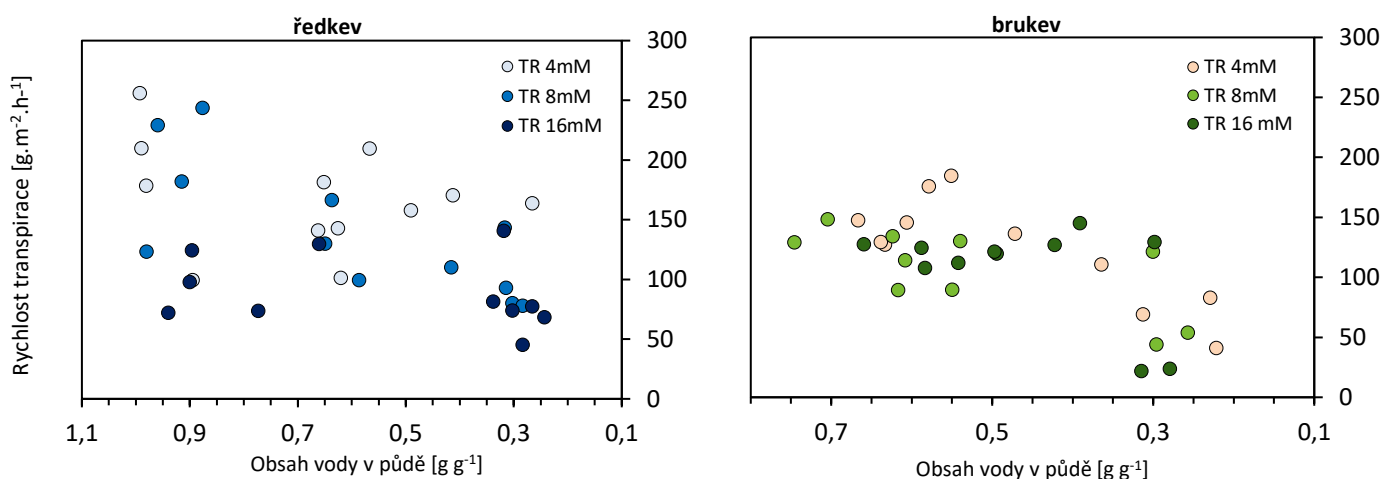


Obr. 17: Obsah nitrátů v kořenech jednotlivých variant výživy ředkve seté (*Raphanus sativus*) a brukve řepky (*Brassica napus*). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku.

## 4.2 Reakce jednotlivých variant na nedostatek vody

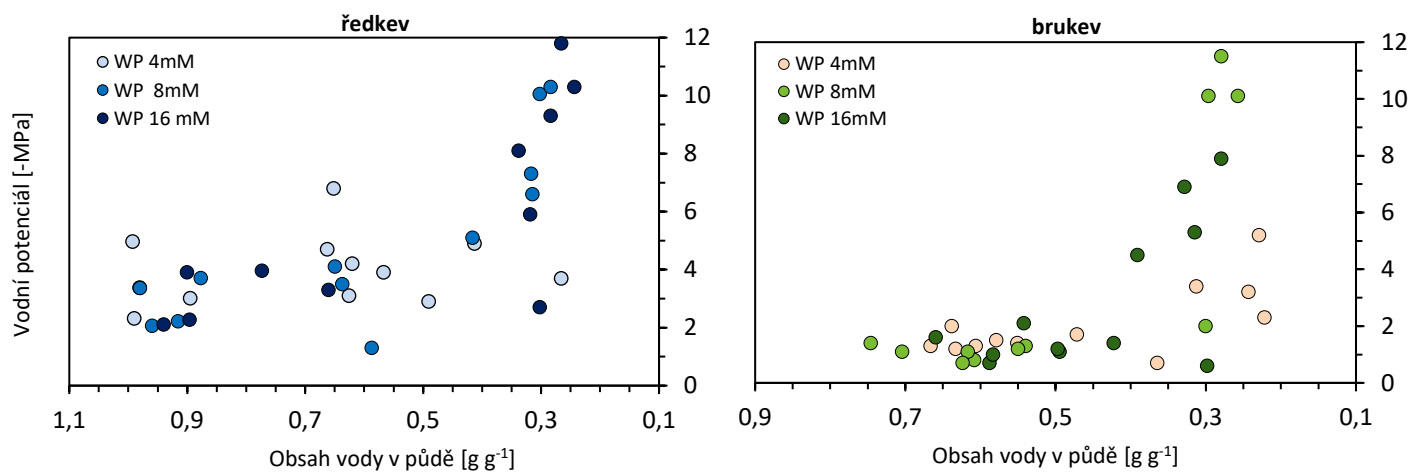
V druhé části experimentu byly rostliny vystaveny postupnému vysychání. Protože rostliny vysychaly různou rychlostí bylo potřebné a účelné ukázat změny jejich fyziologických funkcí v závislosti na aktuálním množství vody v půdě. Proto jsou v druhé části výsledky prezentovány ve formě bodových grafů, kde každý bod představuje jedno nezávislé měření jedné rostliny. Byly opět sledovány hodnoty rychlosti transpirace a vodního potenciálu. Maximální rychlost transpirace se u obou druhů výrazně odlišovala (Obr. 18). Brukev dosahovala maximálně 150 až 170  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  zatímco ředkev dosahovala až 260  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . S ubývající vodou v substrátu rychlost transpirace ředkve klesala průběžně a postupně. U brukve byla rychlost transpirace delší dobu poměrně stálá avšak po překročení jisté hranice obsahu vody v substrátu ( $0,3\text{--}0,4 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) prudce klesla.

Rovněž je zřejmé, že rozdílné koncentrace dostupných nitrátů výrazně neovlivnily rychlost transpirace brukve. V případě ředkve bylo zřejmé, že rostliny pěstované v menších koncentracích nitrátů transpirovaly rychleji než rostliny v nejvyšší koncentraci, a to v poměrně velkém rozsahu množství dostupné vody.



Obr. 18: Vliv dostupnosti vody na rychlost transpirace u ředkve seté (*Raphanus sativus*) a brukve řepky (*Brassica napus*) na vlhkosti půdy

Hodnoty vodních potenciálů sledovaných druhů (Obr. 19) podle očekávání s poklesem dostupnosti vody postupně nabývaly zápornějších hodnot. Je zřejmé, že vyšší koncentrace dostupných nitrátů vedly u obou druhů k velmi prudkému poklesu vodního potenciálu ve srovnání s kontrolou. Hranice obsahu vody v půdě, kde k poklesu došlo se podobně jako u transpirace opět pohybuje okolo  $0,3\text{--}0,4 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ . Velké rozdíly mezi hodnotami jednotlivých variant výživy může najít na počátku vysychání u ředkve. Naproti tomu u brukve jsou na počátku vysychání hodnoty všech variant velmi podobné.



Obr. 19: Vliv dostupnosti vody na vodní potenciál ředkve seté (*Raphanus sativus*) a brukve řepky (*Brassica napus*) na vlhkosti půdy

## DISKUSE

Vysoká koncentrace nitrátů určitě ovlivnila velikost listové plochy (Obr. 13). Intenzita vzrůstu závisí na druhu rostliny, a tudíž na její spotřebě dusičnanů. Výsledky námi vybraných kontrastních druhů nám potvrdily, že vysoká koncentrace dusičnanů vede ke vzrůstu listové plochy. Dusičnany jsou důležité jak zdroj dusíku – stavební materiál pro biomasy, ale také stimulují tvorbu hormonů odpovědných za zrychlení dělivého růstu buněk (cytokininy) a v neposlední řadě mohou pomáhat při prodlužovacím růstu buněk (tedy expanzi listové plochy) jako osmotikum zvětšující turgor. Tato poslední možnost je docela dobře podpořena zjištěnými výsledky obsahu  $\text{NO}_3$  v listech, který byl ve variantě 16mM extrémně zvýšená a to především u brukve, kde růst listové plochy reagoval nejvíce.

Překvapivý byl vliv koncentrace dusičnanů na rychlost transpirace (Obr. 14). Transpirace varianty s nejvyšším množstvím dusičnanů v substrátu je nižší než u ostatních variant. Jedním z vysvětlení může být možný regulační účinek nitrátových iontů na otevřenost průduchů. V tomto případě je působení vysvětlováno sníženým množstvím xylémového cytokininu nebo zvýšením pH xylémové šťávy by mohly zvýšit citlivost průduchů na xylémovou ABA (Wilkinson et al., 2007). ABA nemusí pocházet z kořenů. Je pravděpodobnost, že může být biosyntetizována ve výhoncích a až poté vyvolat uzavírání průduchů. Jinou možností může být vliv zrychleného růstu listů (Christmann et al., 2007). Pokud velký obsah nitrátu zrychlil prodlužovací růstu buněk, plocha listů by se výrazně zvětšila i přesto, že celkový počet průduchů na list zůstal stejný jako v jiných variantách. Tento mechanismus pak mohl vést k nižší vypočtené transpiraci na jednotku plochy, protože míst, kde dochází výparu vody z listu – průduchových štěrbin – bylo na jednotku plochy méně. Poslední hypotézou je, že rostlina méně transpiruje, neboť spoří s vodou, za účelem přípravy na náhlé změny v okolí. V našem případě se jednalo o druhou část experimentu, kdy rostliny byly vystaveny vysychání.

Ze srovnání výsledků hodnot vodního potenciálu za neomezeného množství vody (Obr. 15) bylo patrné, že rozdíly v množství nitrátových iontů v biomase nijak neovlivnily hodnotu vodního potenciálu rostlin.

Dále bylo zjištěno, že kvůli vysoké dostupnosti dusičnanů v substrátu bylo zejména u brukve výrazně shromažďováno velké množství nitrátu, jež nebyly využity k růstu v pletivech listů (Obr. 16) i kořenů (Obr. 17). Maximální množství přijímaného dusíku bylo zřejmě dosaženo u 8mM varianty, jelikož u rostlin 16mM varianty s vyšší koncentrací nitrátů v substrátu hladina dusíku klesla. Podle Dinga et al. (2018) u rostlin kukuřice dodávka vysokého obsahu dusičnanů významně zvýšila jejich příjem, a tudíž i rychlost příjmu vody kořeny. Gorska et al. (2008) zjistili, že nárůst absorpce vody kořeny souvisel s vysokým příivodem dusičnanů v okurce a rajčeti. Další analýza prokázala, že zvýšená hydraulická vodivost kořenů byla důsledkem změny v hydraulické vodivosti buněk, jež byla měřena pomocí sondy buněčného tlaku. Hydraulická vodivost buněk se totiž u okurky po inhibici příjmu dusičnanů snížila.

Důležitou součástí práce bylo také zjistit, jestli dostupnost dusičnanů v médiu může ovlivnit reakci rostlin na nedostatek vody a jestli jsou také reakce druhově závislé. Při vysychání půdy bylo zjištěno, že vysoká koncentrace dusičnanů může být pro rostlinu jak nevýhodou, tak i výhodou.



Rychlost transpirace (Obr. 18) u brukve po překročení určité hranice obsahu vody v půdě prudce klesla, což znamená, že se v tuto chvíli uzavřou průduchy, a to je známka vysoké míry stresu. Rostlina tak maximálně šetří vodu, ale přestává získávat uhlík z atmosféry a tím pádem i růst. U ředkve je pokles transpirace postupný, tudíž se pomalu uzavírají průduchy. Tato strategie umožňuje rostlině déle využívat zásoby vody dostupné v substrátu. Díky tomu může čekat delší dobu na zvýšení dostupnosti vody (např. déšť) a prodloužit tak dobu přežití. Naproti tomu strategie brukve je zřejmě jiná. Rostliny jsou schopny udržovat poměrně stálou a vysokou rychlost výměny plynů (měřenou jako transpirace) i za významně snížené dostupnosti vody (až na třetinu maximálního obsahu) a zachovávat si tak poměrně rychlý růst. Rizikem této strategie rychlého růstu je také rychlé vyčerpání zásob vody v substrátu. V přírodních podmínkách s dostatkem srážek nebo při pravidelném zavlažování jsou tyto zemědělské plodiny velmi produktivní, avšak delší perioda sucha může znamenat vážné ohrožení přežití těchto rostlin. Možné důsledky zvýšené dostupnosti dusičnanů na transpiraci rostliny ukázali ve své práci například Wilkinson et al. (2007). Prokázali, že inhibice růstu a brzké zavírání průduchů během vodního stresu souvisí s redistribucí ABA na základě pH hlavně u rostlin zásobených vysokým obsahem dusičnanů, což je například námi sledovaná brukev. Zatímco se pH při stresu zvyšuje, v listovém apoplastu se aktivuje ABA, což vede k následnému uzavření průduchů (Zhang et al., 2006).

Ze srovnání hodnot vodního potenciálu při vysychání (Obr. 19) jsme zjistili, že nižší koncentrace reagují na nedostatek vody pomaleji, a proto hodnoty dosahují do kladnějších hodnot než u ostatních variant.

## ZÁVĚRY

Ze zjištěných výsledků vyplývá, že za neomezeného množství vody velmi vysoká koncentrace dusičnanů v substrátu může vést ke zpomalení transpirace vlivem zmenšení otevřenosti průduchů. Tyto změny v rychlosti transpirace zřejmě nebyly důsledkem změn ve vodním potenciálu listů, který nebyl různou koncentrací nitrátů ovlivněn. Kvůli vysoké dostupnosti dusičnanů v substrátu bylo výrazné hromadění nitrátu nevyužitých k růstu v pletivech listů i kořenů, zejména u brukve.

Dále bylo potvrzeno, že dostupné množství nitrátů v substrátu zřejmě může ovlivnit reakci rostlin na pokles dostupnosti vody. Rychlost transpirace i vodní potenciál klesají při úbytku dostupné vody pravděpodobně rychleji za vysokých koncentrací dusičnanů v prostředí. Tento efekt bude nutné ještě dále ověřovat, jelikož je reakce závislá na druhu rostliny. S určitostí je možné říct, že supraoptimální koncentrace dusičnanů nepomáhají sledovaným rostlinám překonávat negativní důsledky působení nedostatku vody na fyziologické procesy.

Navazující práce by se mohla podrobněji zabývat reakcí průduchů při vysoké koncentraci dusičnanů v substrátu se zaměřením například na činnost kyseliny abcisové, signalizující poklesy vody, nebo akvaporinů, regulující tok vody přes buněčné membrány.

## 5 POUŽITÁ LITERATURA

DING, L., LU, Z., GAO, L., GUO, S., SHEN, Q. (2018) Is Nitrogen a Key Determinant of Water Transport and Photosynthesis in Higher Plants Upon Drought Stress? *Front. Plant Sci.* 9:1143. doi: 10.3389/fpls.2018.01143

EPSTEIN, E (1972). *Mineral nutrition of plants: principles and perspectives*. New York: Wiley, 1972.

GLOSER, V., docent na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity [ústní sdělení]. Brno, 11.6.2021

GLOSER, V., ZWIENIECKI M., ORIAN S C., HOLBROOK M. (2007), s. 2409-2415. Dynamic changes in root hydraulic properties in response to nitrate availability. *Journal of Experimental Botany.*, roč. 58, č. 7

GORSKA, A., YE, Q., HOLBROOK, N. M., AND ZWIENIECKI, M. A. (2008). Nitrate control of root hydraulic properties in plants: translating local information to whole plant response. *Plant Physiol.* 148, 1159–1167. doi: 10.1104/pp.108.122499

HEJNÁK, V. *Fyziologie rostlin*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2005, s. 27-39, 57-63, 133-134. ISBN 80-213-1341-2.

CHRISTMANN, A., WEILER, E. W., STEUDLE, E., GRILL, E. (2007). s. 52, 167–174. A hydraulic signal in root-to-shoot signalling of water shortage. *Plant J.* doi: 10.1111/j. 1365-313X.2007.03234.x

LARCHER, W. *Fyziologická ekologie rostlin*. Praha: Academia, 1988, s. 258-316.

LUŠTINEC, J., ŽÁRSKÝ, V. *Úvod do fyziologie vyšších rostlin*. Praha: Karolinum, 2003, s. 55, 64-78, 86-87. Učební texty Univerzity Karlovy v Praze. ISBN 80-246-0563-5.

MASAROVIČOVÁ, E., REPČÁK, M. *Fyziológia rastlín*. Bratislava: Vydavateľstvo UK, 2002, s. 11, 47-48, 70-71, 267-270. ISBN 80-223-1615-6.

MENGEL, K. *Ernährung und Stoffwechsel der Pflanze*. 6., überarb. Aufl. Jena: G. Fischer, 1984.

NÁTR, L. *Fotosyntetická produkce a výživa lidstva*. Praha: ISV, 2002, s. 144, 196, 201-203. *Přírodní vědy*. ISBN 80-85866-92-7.

PAVLÍKOVÁ, D., PAVLÍK, M., BALÍK, J. (2008), s. 3-8. Vliv amonného dusíku na metabolismus rostlin. *Agrochémia*, XII, č. 4

PENG, S. B., TANG, Q. Y., AND ZOU, Y. B. (2009), s. 3–8. Current Status and Challenges of Rice Production in China. *Plant Production Science* 12(1).

PENKA, M. *Transpirace a spotřeba vody rostlinami*. Praha: Académia, 1985, s. 26-27.

PROCHÁZKA, S. Fyziologie rostlin. Praha: Academia, 1998, s. 89-106, 52-55, 416. ISBN 80-200-0586-2.

TAIZ, L., ZEIGER, E. Plant Physiology and Development: 6th Revised edition. 6th ed. Sunderland: SINAUER Associates Inc., U.S., 2014, s. 101-103, 126, 355-356. ISBN: 1605352551

VANĚK, V. Výživa zahradních rostlin. Praha: Academia, 2012, s. 25-51, 87-100, 450. ISBN 978-80-200-2147-2.

VANĚK, V., BALÍK, J., PAVLÍK, M., PAVLÍKOVÁ, D., TLUSTOŠ, P., Výživa a hnojení polních plodin. Praha: Profi Press, 2016, s. 187-190. ISBN 978-80-86726.79-3.

Vyhláška č. 252/2004 Sb. ze dne 22. dubna 2004, *kteřou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody* In: ASPI [právní informační systém]. Praha: Wolters Kluwer ČR [vid. 2022-02-01].

Vyhláška č. 53/2002 Sb. ze dne 29. ledna 2002, *kteřou se stanoví chemické požadavky na zdravotní nezávadnost jednotlivých druhů potravin a potravinových surovin, podmínky použití látek přídatných, pomocných a potravních doplňků* In: ASPI [právní informační systém]. Praha: Wolters Kluwer ČR [vid. 2022-02-01].

WILKINSON, S., BACON, M. A., DAVIES, W. J. (2007), s. 58, 1705–1716. Nitrate signalling to stomata and growing leaves: interactions with soil drying, ABA, and xylem sap pH in maize. J. Exp. Bot. doi: 10.1093/jxb/erm021

ZHANG, J., JIA, W., YANG, J., ISMAIL, A. M. (2006), s. 97, 111–119. Role of ABA in integrating plant responses to drought and salt stresses. Field Crops Res. doi: 10.1016/j.fcr.2005.08.018

ZHANG, W. L., TIAN, Z. X., ZHANG N., LI, X. Q., Nitrate pollution of groundwater in northern China, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 59, Issue 3, 1996, s. 223-231. ISSN 0167-8809, [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(96\)01052-3](https://doi.org/10.1016/0167-8809(96)01052-3)

## 6 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1: Příklady sekundárního aktivního transportu (A – např. cukr; B – např. Na <sup>+</sup> ) (upraveno podle Taiz a Zeiger, 2014).....	11
Obr. 2: Typy membránových proteinů (upraveno podle Taiz a Zeiger, 2014).....	12
Obr. 3: Radiální pohyb látek kořenem (upraveno podle Taiz a Zeiger, 2014).....	13
Obr. 4: Schématické znázornění vlivu obsahu živin na růstu rostliny (upraveno podle Mengel, 1984).....	15
Obr. 5: Příprava Hoaglandova živného roztoku (foto Alžběta Floriánová, 2021).....	21
Obr. 6: Kultivace rostlin ve skleníku (foto Daniela Zábojová, 2021).....	21
Obr. 7: Měřič vlhkosti půdy HH2 a připojené čidlo ThetaProbe ( <a href="https://delta-t.co.uk/product/ml3/#">https://delta-t.co.uk/product/ml3/#</a> ).....	22
Obr. 8: Tlaková komora pro měření vodního potenciálu (foto Daniela Zábojová, 2021).....	23
Obr. 9: Technika měření vodního potenciálu prostřednictvím tlakové komory (Daniela Zábojová, 2021).....	23
Obr. 10: Xylémová šťáva vytlačena z řapíku listu (foto Alžběta Floriánová, 2021).....	24
Obr. 11: Centrifugace vzorků (foto Alžběta Floriánová, 2021).....	24
Obr. 12: Kalibrační řada (vlevo), kalibrované vzorky v mikrozkuvkách (vpravo) (foto Alžběta Floriánová, 2021).....	25
Obr. 13: Velikost LA mezi jednotlivými variantami výživy ředkve seté ( <i>Raphanus sativus</i> ) a brukve řepky ( <i>Brassica napus</i> ). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku. ....	26
Obr. 14: Rychlosti transpirace mezi jednotlivými variantami výživy ředkve seté ( <i>Raphanus sativus</i> ) a brukve řepky ( <i>Brassica napus</i> ). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku. ....	27
Obr. 15: Hodnoty vodního potenciálu mezi jednotlivými variantami výživy ( <i>Raphanus sativus</i> ) a brukve řepky ( <i>Brassica napus</i> ). Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku. ....	27
Obr. 16: Obsah nitrátů v listech jednotlivých variant výživy ředkve seté ( <i>Raphanus sativus</i> ) a brukve řepky ( <i>Brassica napus</i> ). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku. ....	28
Obr. 17: Obsah nitrátů v kořenech jednotlivých variant výživy ředkve seté ( <i>Raphanus sativus</i> ) a brukve řepky ( <i>Brassica napus</i> ). Hvězdička označuje statisticky průkazný rozdíl mezi variantou výživy 4mM (kontrola) a dalšími variantami v rámci jednoho druhu. Sloupce ukazují průměrné hodnoty zjištěné v prvním destruktivním odběru, chybové úsečky označují směrodatnou odchylku. ....	28
Obr. 18: Vliv dostupnosti vody na rychlost transpirace u ředkve seté ( <i>Raphanus sativus</i> ) a brukve řepky ( <i>Brassica napus</i> ) na vlhkosti půdy.....	29
Obr. 19: Vliv dostupnosti vody na vodní potenciál ředkve seté ( <i>Raphanus sativus</i> ) a brukve řepky ( <i>Brassica napus</i> ) na vlhkosti půdy.....	30
Tab. 1: Obvyklé množství biogenních prvků v rostlinách (upraveno podle Epstein, 1972).....	10
Tab. 2: Složení modifikovaného Hoaglandova živného roztoku (Gloser, ústní sdělení).....	20