

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA EKOLOGIE

Thorium v životním prostředí - jeho vliv na růst a vývoj rostlin

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. et Mgr. Petr Soudek, Ph.D.

Vypracovala: Andrea Lněničková

Praha 2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Andrea Lněničková, DiS.

Aplikovaná ekologie

Název práce

Thorium v životním prostředí – jeho vliv na růst a vývoj rostlin

Název anglicky

Thorium in the environment – its effect on plant growth and development

Cíle práce

Thorium patří mezi radioaktivní kovy, které má využití v jaderném průmyslu. Při jeho získávání a zpracování může docházet ke kontaminaci životního prostředí. Tento kontaminant se může stát součástí potravního řetězce, proto je tak důležité znát jeho mobilitu v živých organismech. Využití rostlin navíc může představovat způsob jak tuto látku z prostředí odstranit pomocí metodik zvaných fyto Remediacce. Rostliny totiž mohou přijímat a akumulovat thórium z půdy nebo vody a tím ho odstraňovat. Cílem práce tedy bude stanovit schopnost modelové rostliny *Arabidopsis thaliana* thórium akumulovat.

Metodika

Cílem práce bude vypracovat literární řešerši a provést některé laboratorní experimenty. Bude sledována akumulace thoria v rostlinách *Arabidopsis thaliana*. Rostliny budou kultivovány na Hoaglandově hydroponickém médiu, za podmínek umělého osvětlení a laboratorní teploty. Rostliny budou po sklizni vysušeny a mineralizovány. Hodnoty obsahu thoria v rostlinách budou stanoveny pomocí ICP-OES. Bude také testována míra oxidativního stresu, který může tento kontaminant vyvolat. K tomu bude sloužit, jakožto antioxidační marker, obsah chlorofylů a karotenoidů.

Doporučený rozsah práce

min. 30 str. textu

Klíčová slova

thorium, fyto Remediacce, oxidační stres, *Arabidopsis thaliana*

Doporučené zdroje informací

- A. Hrdinová, Z. Lhotáková, J. Albrechtová: Significance of Thorium Uptake by Plants for Phytoremediation. *Chemické Listy* 113(6), 357-363, 2019
- K. Mazari, P. Landá, S. Pferostová, K. Müller, R. Vaňková, P. Soudek, T. Vaněk: Thorium impact on tobacco root transcriptome. *Journal of Hazardous Materials* 325, 163–169, 2017
- P. Soudek, A. Hrdinová, I.M. Rodriguez Valseca, Z. Lhotáková, M. Mihaljevič, Š. Petrová, M. Kofroňová, K. Mořková, J. Albrechtová, T. Vaněk: Thorium as an environment stressor for growth of *Nicotiana glutinosa* plants., *Environmental and Experimental Botany* 164, 84-100, 2019
- P. Soudek, D. Kufner, Š. Petrová, M. Mihaljevič, T. Vaněk: Composition of hydroponic medium affects thorium uptake by tobacco plants., *Chemosphere* 92(9), 1090-1098, 2013

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FŽP

Vedoucí práce

Mgr. RNDr. Petr Soudek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra aplikované ekologie

Elektronicky schváleno dne 20. 3. 2024

prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2024

prof. RNDr. Michael Komárek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2024

Abstrakt

Výskyt toxických kovů je neodmyslitelně spjat se Zemí. Přirozený zdroj kovů v přírodě je z matečné horniny, kdy se geologickými procesy, zahrnujícími erozi a zvětrávání půdy, kovy uvolňují. Nepřirozené zdroje toxických kovů, označované jako antropogenní, jsou těžba, doprava, průmysl, spalování a zemědělské aktivity.

Některé kovy jsou pro fyziologické a biochemické funkce rostlin a zvířat nezbytné. Mezi tzv. esenciální kovy patří zinek, mangan, hořčík, nikl, měď, kobalt, molybden, železo, selen a chrom. Prospěšnost nebo škodlivost těžkých kovů na buňky/organismus udává výše jejich koncentrace. Neesenciální těžké kovy jsou pro lidi, zvířata a rostliny toxické i v malých dávkách.

Nejvýznamnější akumulace toxických kovů je zejména v půdě a vodě. Zvyšující se koncentrace toxických kovů v půdě a vodě a jejich vliv na živé organismy vede k hledání metod, jak životní prostředí toxických kovů zbavit.

Jedna z metod budoucnosti v odstraňování kovů je fytořemediace. Pro fytořemediaci je potřeba zvolit vhodné druhy rostlin, které těžké kovy akumulují. Oproti jiným způsobům odstranění toxických kovů z prostředí je fytořemediace více šetrnější a levnější. Samozřejmě má své limity i negativní stránky. Mezi které patří časová náročnost, neúplné odstranění kontaminantu z prostředí či problém s výběrem vhodného druhu rostliny, aby byla fytořemediace účinná. U většiny druhů fytořemediace je ještě třeba vzniklou biomasu odstranit za speciálních podmínek.

Pro tuto práci byla použita modelová rostlina huseníček rolní (*Arabidopsis thaliana*). Pro své vlastnosti byl huseníček ideální volbou pro stanovení celého genomu, který umožnil řadu výzkumů i v působení thoria na rostliny. Na třech genotypech huseníčku rolního byla pozorována schopnost akumulace rostlin v médiích s třemi různými složkami – bez fosfátů (-P), dle Hoaglanda (HM) a bez fosfátů s přidaným nano-hydroxyapatitem (nanoP). Pozorované byly i vlivy thoria na rostliny a jeho souvislost se vznikem oxidačního stresu u rostlin.

Klíčová slova: thorium, fytořemediace, huseníček rolní, *Arabidopsis thaliana*, oxidační stres

Abstract

The occurrence of toxic metals is intrinsically linked to the Earth. The natural source of metals in nature is from the parent rock, where geological processes involving soil erosion and weathering release the metals. Non-natural sources of toxic metals, referred to as anthropogenic, are mining, transport, industry, combustion and agricultural activities.

Some metals are essential for the physiological and biochemical functions of plants and animals. The so-called essential metals include zinc, manganese, magnesium, nickel, copper, cobalt, molybdenum, iron, selenium and chromium. The benefit or harm of heavy metals on the cells/organism is determined by their concentration. Non-essential heavy metals are toxic to humans, animals and plants even in small doses.

The most significant accumulation of toxic metals is mainly in soil and water. The increasing concentration of toxic metals in soil and water and their effect on living organisms leads to the search for methods to rid the environment of toxic metals.

One of the methods of the future in metal removal is phytoremediation. For phytoremediation, it is necessary to choose suitable plant species that accumulate heavy metals. Compared to other methods of removing toxic metals from the environment, phytoremediation is more gentle and cheaper. Of course, it has its limits and negative sides. These include time-consuming, incomplete removal of the contaminant from the environment or the problem of choosing a suitable plant species to make phytoremediation effective. In most types of phytoremediation, the resulting biomass still needs to be removed under special conditions.

The model plant *Arabidopsis thaliana* (*Arabidopsis thaliana*) was used for this work. Due to its characteristics, the *Arabidopsis* was an ideal choice for the determination of the entire genome, which enabled a number of investigations also into the effect of thorium on plants. The ability of plants to accumulate in media with three different components - without phosphates (-P), according to Hoagland (HM) and without phosphates with added nano-hydroxyapatite (nanoP) was observed on three genotypes of the field caterpillar. The effects of thorium on plants and its connection with the occurrence of oxidative stress in plants were also observed.

Key words: thorium, phytoremediation, *Arabidopsis thaliana*, oxidative stress

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. et Mgr. Petrem Soudkem, Ph.D. na základě uvedených literárních pramenů.

V Praze, 13. 3. 2024

Podpis:

Na tomto místě bych chtěla nejvíce poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce RNDr. et Mgr. Petru Soudkovi, Ph.D. za jeho čas při konzultacích, odbornou přípravu, velkou pomoc a trpělivost při zpracování práce. Především děkuji za lidský přístup a přívětivost po celou dobu spolupráce.

Ráda bych poděkovala mé rodině za trpělivost a podporu po celou dobu.

Zvlášť bych chtěla poděkovat dvěma jezinkám, Mírcě a Marcele. Děkuji vám, že jste tu vždy, když vás potřebuji, za trpělivost, podporu, a především za to, že jste takové můry, jaké jste.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Cíle práce.....	11
3	Toxické kovy.....	12
3.1	Příjem toxických kovů rostlinami.....	13
3.2	Thorium.....	14
3.2.1	Toxicita.....	15
3.2.2	Příjem thoria rostlinami.....	16
4	Fytoremediace.....	18
4.1	Typy fytoremediace vhodné pro toxické kovy.....	18
4.1.1	Fytoextrakce.....	18
4.1.2	Rhizofiltrace.....	19
4.1.3	Fytovolatilizace.....	19
4.1.4	Fytostabilizace.....	19
4.2	Způsoby zvýšení účinnosti fytoremediace.....	19
4.2.1	Bakterie.....	19
4.2.2	Chelatační činidla.....	20
4.2.3	Aplikace nanočástic.....	20
5	Oxidační stres.....	21
5.1	Enzymatické antioxidanty.....	21
5.2	Neenzymatické antioxidanty.....	21
5.3	Rostlinné pigmenty jako nespecifické indikátory stresu.....	22
5.3.1	Chlorofyly.....	22
5.3.2	Karotenoidy.....	23
5.3.3	Antokyany.....	23
5.4	Xantofylový cyklus.....	24
6	Výživa rostlin.....	25
6.1	Makronutrienty.....	25

6.1.1	Dusík	25
6.1.2	Fosfor	26
6.1.3	Vápník	26
6.1.4	Draslík	26
6.1.5	Síra	26
6.1.6	Hořčík	26
6.2	Mikronutrienty	27
6.2.1	Železo	27
6.2.2	Měď	27
6.2.3	Zinek	27
6.2.4	Molybden	27
6.2.5	Mangan	28
6.2.6	Bor	28
6.2.7	Chlor	28
7	Huseníček rolní	29
8	Metodika	31
8.1	Design experimentu	31
8.2	Stanovení obsahu prvků	31
8.3	Stanovení fotosyntetických pigmentů	32
9	Výsledky	33
9.1	Obsah thoria	33
9.2	Obsah nutrientů	34
9.3	Obsah rostlinných pigmentů	41
10	Diskuse	44
11	Závěr	46
12	Zdroje	47
12.1	Zdroje literatury	47
12.2	Zdroje obrázků	54

13	Seznam grafů, tabulek a obrázků	56
13.1	Seznam grafů.....	56
13.2	Seznam tabulek	56
13.3	Seznam obrázků	56
14	Seznam zkratk	57
15	Přílohy	58
15.1	Složení Hoaglandova média.....	58
15.2	Naměřené hodnoty	59

1 ÚVOD

S rozvojem industrializace a antropogenních činností dochází k vyššímu výskytu toxických kovů v přírodě – v půdě, ve vodě. Zvýšená akumulace toxických kovů má negativní vliv na vše živé, včetně člověka. Stále se zvyšující znečištění a kontaminace životního prostředí vede k potřebě hledání možností, jak negativní vlivy snížit.

Thorium, jenž se přirozeně vyskytuje v životním prostředí, získává díky svým vlastnostem na oblibě pro budoucí využití v jaderné energetice. Zvyšující se poptávka po thoriu povede ke zvýšené kontaminaci tímto kovem v prostředí, například pomocí prachových částic vzniklých při těžbě nebo využíváním fosilních paliv.

Odstraňování toxických kovů z prostředí je velmi nákladné, což vede k hledání dalších metod. Fytoremediace se řadí mezi nadějně metody, jenž levně a šetrně k životnímu prostředí akumulují toxické kovy z kontaminovaného prostředí pomocí rostlin. Pro fytoremediaci jsou vhodné druhy rostlin se schopností akumulace vysokých množství těžkých kovů. Zvláštní skupinou těchto rostlin jsou tzv. hyperakumulátory, jejich schopnost zakoncentrovat těžké kovy ve svých pletivech je pro využití ve fytoremediaci žádoucí.

Při expozici rostlin toxickými kovy dochází k tvorbě reaktivních forem kyslíku, čímž vznikne nerovnováha způsobující oxidační stres. Některé rostliny mají schopnost toxické kovy akumulovat, aniž by k rozvoji oxidačního stresu došlo.

Provedené experimenty měly za cíl popsat schopnosti rostlin akumulovat thorium z hydroponických roztoků. Jako modelová rostlina byl zvolen huseníček rolní (*Arabidopsis thaliana*). Možný oxidativní stres rostlin v přítomnosti thoria byl popsán pomocí změny obsahu a složení fotosyntetických pigmentů.

2 CÍLE PRÁCE

Hlavním cílem práce je otestování vhodnosti genotypů huseníčku rolního (*Arabidopsis thaliana*) pro využití při fytoremediaci toxických kovů z životního prostředí. Dalším cílem práce je pozorování působení thoria na rostliny a možný rozvoj oxidačního stresu u rostlin, stanovením rostlinných pigmentů.

3 TOXICKÉ KOVY

Toxické kovy jsou kovy, které při určitých koncentracích negativně působí nebo způsobují poškození. Mezi toxické kovy patří arsen, thorium, kadmium, olovo a některé další těžké kovy. Některé toxické kovy mohou být zároveň v nízkých koncentracích pro živé organismy esenciálními. Esenciální kovy jsou pro fyziologické a biochemické funkce rostlin a zvířat nezbytné. Mezi esenciální kovy patří zinek, mangan, hořčík, nikl, měď, kobalt, molybden, železo, selen a chrom. Prospěšnost nebo škodlivost toxických kovů na buňky/organismus udává právě výše jejich koncentrace (WHO, 1983). Neesenciální toxické kovy jsou pro lidi, zvířata a rostliny toxické i v malých dávkách. Mezi neesenciální těžké kovy se řadí rtuť, uran, olovo, kadmium a astat (Ali et al., 2019).

Nepřirozené zdroje těžkých kovů, můžeme též označit jako antropogenní, jsou těžba, doprava, průmysl, spalování paliv a zemědělské aktivity, zahrnující hnojení a používání pesticidů (Oladoye, 2022, Mahdi, 2022). Také některé další druhy lidské činnosti mohou vést ke zvýšení výskytu konkrétního toxického kovu v životním prostředí, např. používání insekticidů výskyt arsenu a automobilový průmysl výskyt olova (Vhahangwele a Mugeru, 2015).

Nejvýznamnější akumulace toxických kovů je zejména v půdě a vodě. Ionty toxických kovů, které jsou rozpuštěné ve vodě, nebo se vyskytují v půdě, se mohou dostat do potravního řetězce, se akumulují v ekosystému, v tělech rostlin, živočichů a lidí (Hossain et al., 2008). Kovy se mohou vyskytovat samostatně, ale převažuje forma chemických komplexů, které jsou pro příjem rostlinami nebo zvířaty dostupnější. Chemické formy těžkých kovů jsou oxidy, hydroxidy, silikáty, sulfidy, fosfáty atd. (Derakhshan Nejad et al., 2018).

Toxický vliv kovů na člověka je různý dle druhu samotného těžkého kovu. Chrom může způsobit některé druhy rakovin – kostí, ledvin, štítné žlázy (Deng et al., 2019), kadmium může způsobit rakovinu slinivky břišní, ledvin, jater, plic, ale i ischemickou chorobu srdeční a nemoc Itai-Itai. Olovo může způsobit selhání ledvin a má vliv na poškození nervového a kardiovaskulárního systému. U dětí může olovo ovlivnit šedou hmotu mozkovou a inteligenci (Singh a Kalamdhad, 2011).

3.1 PŘÍJEM TOXICKÝCH KOVŮ ROSTLINAMI

Vzestup a rozvoj industrializace, mechanizace a zemědělství vede ke znatelnému zvýšení znečištění kovy. Každý kov má specifické fyzikálně-chemické vlastnosti způsobující konkrétní toxikologické účinky (Ali et al., 2019). Monitorování zdrojů a vstupů znečištění toxickými kovy je nezbytné pro prevenci a sledování průběhu čištění, které je pro každý druh znečištění rozdílné dle právních předpisů pro ochranu životního prostředí a lidského zdraví (Oladoye, 2022). Mechanismus ovlivnění organismů toxickými kovy je různorodý. Působení může být přímé a nepřímé, na fyziologii a biochemii, např. na syntézu pigmentů, fotosyntézu, klíčení semen, délka kořene či výška rostliny (Maharajan et al., 2007, Siddiqui et al., 2011).

V půdě nebo vodě se mohou toxické kovy vyskytovat v mnoha formách. Pro příjem rostlinou, je zapotřebí, aby byly toxické kovy ve formě volných iontů nebo rozpustných sloučenin, ze kterých rostlina získá kov pomocí chelátů a H^+ . Příjem kovů probíhá stejně jako příjem živin, tedy kořeny či listy. Způsob vstupu kovu do rostliny se liší dle druhu kovu a rostliny. Na příjem těžkých kovů rostlinou mají vliv i faktory půdy jako je textura, redoxní potenciál nebo pH (Alves et al., 2022).

Vstup toxických kovů do buňky rostlin je možný cestou apoplastickou nebo symplastickou pomocí kovových transportérů. Apoplastická cesta je pro látky snadněji propustná, nespotřebovává energii, látky se šíří difúzí. Překážkou na této cestě je endodermis v rostlinných buňkách. Oproti tomu je symplastická cesta aktivní děj, potřebuje energii, látky musí projít přes plazmatickou membránu pomocí přenašečů (Mertens et al., 2022).

V rostlině je kov nejčastěji ukládán v kořeni, ale může být pomocí xylému transportován do nadzemních částí. Podle schopnosti akumulovat toxické kovy, můžeme rozdělit rostliny na metal exkludery, jenž jsou schopny bránit příjmu toxických kovů, a metal non-exkludery. Mezi metal non-exkludery patří metal indikátory, které koncentrací kovů v rostlinných pletivech reflektují koncentraci kovu v půdě, a pak hyperakumulátory, což jsou rostliny schopné akumulovat vysoké koncentrace toxických kovů v nadzemní části. V rostlinách se těžké kovy ukládají do míst, kde mohou způsobit co nejmenší poškození – epidermis, trichomy, vakuoly. Vakuoly jsou primárním úložištěm toxických kovů, zabírají až 90 % objemu epidermálních a parenchymálních buněk (Bartoloti et al., 2022, Shah a Daverey, 2020).

3.2 THORIUM

Thorium nese název dle boha Thora, který mu dal jeho objevitel Berzelius v roce 1828. Radioaktivitu tohoto prvku objevili koncem 19. století dva vědci, v Německu Schmidt a ve Francii Marie Curie (Fry a Thoennessen, 2013).

Thorium je bílý kov, se schopností samovznícení, řazený mezi radioaktivní prvky, patří mezi aktinoidy. Ve vodě nerozpustný. Vyskytuje se přirozeně ve vodě i v půdě, rozpuštěný je vždy ve sloučenině, jedná o silný kationt. Thorium má více izotopů než uran, v přírodě jich je šest, všechny jsou radioaktivní. V přírodě se nejvíce vyskytuje izotop ^{232}Th (Zararsiz, 1997, Shtangeeva, 2005).



Obrázek 1 Thorium

Ve vodě se thorium vyskytuje především díky erozi hornin a lidské činnosti. Koncentrace thoria ve vodě je relativně nízká, komplexy vytváří s organickými a anorganickými sloučeninami, v pevné nebo rozpustné fázi (Langmuir, 1980). V horninách se thorium vyskytuje v rozmezí $2\text{-}12\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, průměrná hodnota je $6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Nejvyšší koncentrace thoria je v monazitových pískách, thoranitu a thoritu. Monazitové písky jsou nejpodstatnějším zdrojem thoria. Z písků se thorium získává loužením (Kabala-Pendias, 2000, Fu et al., 2022).

U živých organismů se hodnota thoria pohybuje v řádech o mnoho nižších, než je koncentrace v okolí. U člověka jsou nejvyšší koncentrace thoria v oblastech, kde jsou uloženy odpady z jaderných elektráren a podloží s thoriem (Glover, 2001, Kabala-Pendias, 2000).

Mezi vlastnosti thoria patří vysoká tepelná odolnost, která se dá využít v leteckém a automobilovém průmyslu, jako příměs do kovových slitin nebo u žáruvzdorných materiálů. Nejvýznamnější využití thoria bude pravděpodobně v energetickém průmyslu, kde má více výhod než uran. Thorium vykazuje nulové emise uhlíku a menší množství jaderného odpadu. Izotop thoria ^{232}Th má dlouhý poločas rozpadu, který není vhodný pro energetický průmysl. Aby se vhodným stal, je třeba izotop ^{232}Th převést na štěpitelnou formu v podobě ^{233}U (Kabala-Pendias, 2000, Kazimi, 1999).

3.2.1 TOXICITA

Všechny živé organismy na Zemi jsou a budou vystaveny nízké koncentraci thoria, jenž se přirozeně vyskytuje v prostředí. Thorium jako alfa částicový zářič s dlouhým poločasem rozpadu, vykazuje radiologickou toxicitu, podílejí se na vzniku řady onemocnění (Yadav et al., 2018). Thorium se může do organismu dostat prostřednictvím proniknutí při poranění, vdechnutím nebo požitím ve vodě či potravinách. Se způsobem vniknutí thoria do organismu, jsou spojená i vznikající rizika a onemocnění spojená s umístěním zdroje. Například při vdechování částic thoria může dojít k rakovině plic (Hughart, 1999, Howell, 2011).

Akumulace thoria v organismu byla prokázána v mnoha studiích. Szymańska et al., popsali akumulaci izotopu ^{232}Th u různých druhů organismů, včetně hub. Kochhann et al., už v roce 2009 prokázali akumulaci thoria u sumce stříbrného. Kumar et al., v rámci studie u zaměstnanců, kteří jsou při práci vystaveni prachu obsahující thorium, popsal zvýšenou hladinu thoria v krvi, a to v rozmezí 370-3000 ng/l. Kromě zvýšené koncentrace thoria v krvi, měli zaměstnanci další poškození a onemocnění. Zahrnující chromozomální aberace lymfocytů nebo pneumoconiózu (Leiterer et al., 2010). Fukumoto popsal poškození DNA a jádra buněk intracelulárním ukládáním thoria (Fukumoto, 2014).

Thorium se v těle pohybuje pomocí transportního systému železa, což má zřejmě souvislost s podobností iontů thoria a železa a jejich hydrolyzního chování. S tím souvisí i možná spojitost s ukládáním thoria v játrech a kostech (Agbo et al., 2018).

3.2.2 PŘÍJEM THORIA ROSTLINAMI

Příjem thoria rostlinami probíhá z rhizosféry a je ovlivněn řadou faktorů, zahrnujících vlastnosti půdy, druh rostliny, přítomnost fosfátu, koncentraci thoria nebo dostupnost thoria pro rostliny. Přirozenou bariérou transportu látek v rostlinách jsou kořeny, zabraňují přenosu kovů do nadzemních částí rostliny. To může být příčinou několikanásobně vyšší koncentrace v kořenech rostlin, oproti hodnotám v listech. V hydroponickém médiu bývá thorium a další živiny pro vstřebávání kořeny dostupnější, než běžně v půdě (Shtangeeva a Ayrault, 2004, Vandenhove et al., 2007).

Vliv pH na příjem thoria u rostlin je důležitý faktor. Hodnota pH ovlivňuje dostupnost thoria pro rostliny. Stoupající pH umožňuje přeměnu kationtů thoria na hydroxidy thoria, jenž jsou oproti volným kationtům vznikajícím za nízkého pH, pro rostlinu nedostupné. Ovlivnění pH mohou způsobit samy rostliny, pomocí kořenů mohou uvolňovat různé exudáty do půdy a pomocí nich získávat živiny a látky (Hrdinová a kol., 2019).

Významnou roli o dostupnosti thoria pro vstřebání rostlinami popsal v roce 2013 Soudek et al., jenž v roce 2015 ve svém experimentu potvrdil Wang et al. Při pokusu na rostlinách tabáku (*Nicotiana tabacum*) byla prokázána nejvyšší koncentrace thoria u rostlin, jenž byly pěstované v médiu bez přítomnosti fosfátových iontů. Thorium s fosfátovými ionty vytváří nerozpustné komplexy. Zvýšená akumulace thoria v rostlinách byla také za přítomnosti kyseliny citrónové nebo kyseliny vinné. Zmíněné kyseliny mají chelatační účinky, které umožní lepší dostupnost thoria pro rostlinu (Soudek et al., 2013).

Shtangeeva v roce 2010 publikovala data, které popisovaly rozdílnou schopnost příjmu uranu a thoria rostlinami v závislosti na rozdílných chemických vlastnostech testovaných sloučenin. Pro pěstování pšenice a žita byly v pokusu stanovené stejné podmínky včetně doby sklizně. I přes to byla koncentrace uranu i thoria vyšší u kořenů žita. Píščito-hlinitá půda oproti půdě hlinité nevykazovala statisticky významné hodnoty. Poměr kovů v půdě a v kořenech rostlin u hlinité půdy byl statisticky významný. Poměr mezi vlastnostmi půdy a vstřebání rostlinami udává přenosový faktor, jenž popisuje očekávané množství kontaminantu vstupující do rostlin z půdy (Chen et al., 2005).

U sazenic exponovaných thoriem byla sledována změna v koncentraci vápníku, sodíku a draslíku. Oproti kontrole, pěstované bez přidaného thoria, měly sazenice s přidaným thoriem nižší hodnoty obsahu vápníku. Také rovnováha mezi draslíkem a sodíkem je u sazenic vystavených působení thoria změněna. Při přítomnosti thoria v rostlinách dochází

ke zvýšení obsahu sodíku, který může mít negativní vliv na vývoj rostliny a způsobit oxidační stres (Shtangeeva et al., 2005, Hrdinová a kol., 2019).

U rostlin vystavených působení thoria došlo ke změnám průměru kořene, vzniku abnormální kořenné struktury a zvrásnění epidermis, při expozici 20-40 $\mu\text{mol/l}$ thoria. Ještě vyšší expozice thoria vedla ke zmenšení buněk i změně buněčné stěny rostlin. Nízká koncentrace thoria působila inhibičně na vznik postranních kořenů, způsobila změnu struktury membrán rostlinných buněk a také ovlivňuje některé metabolické dráhy (Doose et al., 2021). Toxicita thoria v rostlinách inhibuje expresi nukleotidů, jak v kořenech, tak v listech (Fu, 2022). Tvar kořenového systému má vliv na citlivost nebo toleranci rostliny vůči kovům. Rostliny, které jsou na těžké kovy citlivé a vyšší množství kovů jim škodí, si vytvořily modifikaci kořenového systému, kdy se kořeny vyhýbají místu s kontaminanty, kořeny vyrostou do míst, kde je polutantů méně nebo žádný. U hyperakumulátorů se kořenový systém v přítomnosti kovů rozvíjí a zvyšuje růst (Khare et al., 2017, Tognacchini et al., 2020).

Fu et al. provedl pokusy, kdy u jedné skupiny rostlin bylo použito médium s nízkým obsahem fosfátů, kde thorium výrazně snížilo počet buněk v kořeni již v průběhu profáze, metafáze a anafáze, oproti kontrolní skupině. U fosfátového kultivačního média byly buňky thoriem ovlivněny především v profázi a metafázi mitózy, oproti kontrolní skupině. Toxické účinky thoria pomocí inhibice exprese nukleotidů, jak v kořenech, tak i v listech, zapříčinily abnormální metabolismus nukleotidů v sazenicích (Fu et al., 2022). Peng se svým týmem proved v roce 2017 sérii pokusů, při kterých pozoroval působení thoria na buňky řas. S prodlužujícím se časem expozice řas thoriem docházelo ke snižování chlorofylu. Snižování chlorofylu skoro o 60 % oproti kontrole, došlo při expozici trvající 96 hodin. Pokus prokázal spojitost, že thorium negativně působí na fotosyntetické aktivity řas (Peng et al., 2017).

4 FYTOREMEDIACE

Mezi jednu z metod vhodných pro odstraňování (nejen) toxických kovů patří fytoremediace, jež je založená na zapojení rostlin do extrakce a akumulace látek z půdy a vody, bez nepříznivých účinků pro rostliny. Ne každá rostlina je svými vlastnostmi pro fytoremediaci vhodná. Rostliny vhodné pro fytoremediaci musí mít toleranci k toxickým látkám, velký nárůst biomasy a vysokou rychlost růstu (Shah a Daverey, 2020).

Specifickými rostlinami, které nejsou výrazně postiženy negativními vlivy vysokých koncentrací kovů v rostlinách, jsou hyperakumulátory a indikátory, které patří mezi metal non-exkludery. Jedná se o skupiny rostlin žijících v prostředí s nadbytkem toxických kovů, kdy se rostliny na vyšší hodnoty kovů adaptovaly. Označení rostlin pojmem hyperakumulátory zavedl v 80. letech 20. století Brooks. Mezi prvně popsané hyperakumulátory patří penízecká rolní (*Thlaspi arvense*) a violka žlutá (*Viola lutea*). Přibližně 25 % všech hyperakumulátorů patří do čeledi brukvovitých (*Brassicaceae*) (Gerhardt et al., 2017, Shah a Daverey, 2020). K roku 2018 bylo evidováno na 721 druhů rostlin zastoupených v 52 čeledích, jež jsou považovány za hyperakumulátory (Reeves et al., 2018).

Do skupiny indikátorů patří rostliny, které akumulují toxické kovy, ale nikoliv do nadbytku. Hodnota toxického kovu v rostlinách a půdě je velice podobná. U hyperakumulátorů je koncentrace toxických kovů v rostlinách několikanásobně vyšší, než je koncentrace kovu v půdě (Naser et al., 2018).

Většina rostlin akumuluje pouze jeden druh toxického kovu. Ale například rod *Thlaspi* obsahuje několik druhů, které akumulují více než jeden typ toxických látek. Penízecká modravá (*T. caerulescens*) může akumulovat na takto vysoké koncentrace i tři druhy kovů – zinek, nikl a kadmium (Tlustoš a kol., 2006).

4.1 TYPY FYTOREMEDIACE VHODNÉ PRO TOXICKÉ KOVY

4.1.1 FYTOEXTRAKCE

Při fytoextrakci rostliny využívají mechanismus absorpce, translokace a akumulace. Tato metoda se jeví jako nejvhodnější a neúčinnější pro odstraňování toxických kovů z prostředí (Jacob et al., 2018, Ali et al., 2013). Pro fytoextrakci je potřeba hyperakumulující rostliny s rozsáhlým kořenovým systémem (Li et al., 2010).

4.1.2 RHIZOFILTRACE

Škodliviny z prostředí jsou odstraněny pomocí kořenů nebo oddenků rostlin především ve vodním prostředí. Používá se především u odstraňování kovů a radionuklidů, které jsou hromaděné v kořenech nebo na jejich povrchu (Javed et al., 2019). Rostliny pro tuto metodu potřebují husté a dlouhé kořeny s vysokým povrchem, a s dobrou schopností akumulace těžkých kovů. K docílení vhodného stavu kořenového systému rostlin pro rhizofiltraci, se používá pěstování rostlin nejprve v čisté vodě, aby kořeny měly vhodné podmínky pro svůj rozvoj, než jsou rostliny použité pro kontaminované prostředí (Wuana a Okieimen, 2011).

4.1.3 FYTOVOLATILIZACE

Dochází k přeměně některých kontaminantů, především organických sloučenin, kdy jsou rostlinou přijímány a následně po přeměně na méně toxické formy, uvolňovány do atmosféry. Z toxických kovů se tato metoda týká arsenu, selenu a rtuti. Rostliny po fytovolatilizaci není nutné odstraňovat (Mahar et al., 2016, Vangronsveld et al., 2009).

4.1.4 FYTOSTABILIZACE

Rostliny tolerující vysoké koncentrace toxických kovů mají schopnost imobilizovat kovy v půdě a snížit dostupnost kovů pro další organismy. Rostlina kovy může vysrážet, sekvestrovat nebo adsorbovat (Gerhardt et al., 2017, Marques et al., 2009). Vhodně vybrané rostliny pro fytostabilizaci zvyšují ochranu přírody a snižují možnost kontaminace podzemních vod. Oproti ostatním metodám fytořemediace, má fytostabilizace výhodu, že rostliny nemusí být při použití fytostabilizace likvidovány (Wuana a Okieimen, 2011).

4.2 ZPŮSOBY ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI FYTOREMEDIACE

4.2.1 BAKTERIE

V rhizosféře, v níž dochází k interakci mezi půdou, mikroorganismy a kořeny rostlin, se nachází velké množství půdních bakterií, které podle četných výzkumů mohou velmi pozitivně zlepšit a zvýšit fytořemediační schopnosti. Bakterie mají geny, díky kterým jsou schopné prospívat i v prostředí s vysokou koncentrací toxických kovů. Bakterie žijící v blízkosti kořenů mohou ovlivňovat transport a dostupnost kovů pro rostlinu, a tím zvýšit možnosti fytořemediace. Rostliny, kooperující s těmito bakteriemi, jsou odolnější vůči vyšším koncentracím toxických kovů (Glick, 2012, Novo et al., 2018, Tang, 2023).

4.2.2 CHELATAČNÍ ČINIDLA

Chelatační činidla zvyšují rozpustnost a dostupnost toxických kovů v půdě, zvyšují schopnost akumulace kovů rostlinou, urychlují procesy čištění. Reagují s toxickými kovy za vzniku komplexů. Mezi nejpoužívanější syntetické chelatační činidla patří ethylendiamintetraacetát (EDTA), kyselina nitrilotrioctová (NTA) a kyselina ethylendiamindijantarová (EDDS). Populární přírodní chemické chelátory jsou kyselina citronová a kyselina fulvová (Li et al., 2021, Gavrilescu, 2022).

4.2.3 APLIKACE NANOČÁSTIC

Nanočástice se podílí na zvyšování klíčivosti a rostlinné biomasy, také mají vliv na délku kořenů. Nanočástice působí i na propustnost buněčné stěny a akumulaci toxických kovů. Například nanočástice nulového železa mohou být pro své vlastnosti použité pro dekontaminaci půdy od těžkých kovů (Gavrilescu, 2022, Kristanti, 2023).

5 OXIDAČNÍ STRES

Při stresových reakcích rostlin dochází ke zvýšení produkce reaktivních forem kyslíku – ROS. Reaktivní formy kyslíku vznikají v buněčných organelách, především v mitochondriích, chloroplastech a peroxisomech. Mezi ROS patří peroxid vodíku, hydroxylový a superoxidový radikál. Jedná se o aktivované nebo částečně redukované deriváty kyslíku, které jsou oproti molekulárnímu kyslíku toxické a reaktivní (Chapman et al., 2018).

Na vzniku oxidačního stresu se může podílet řada faktorů – sucho, teplo, chlad, chemické látky, ozáření, soli apod. Při stresu dochází ke změnám, jenž závisí na délce a intenzitě působení, ale také na stavu rostliny a její adaptace. Volné radikály způsobují poškození lipidů a proteinů, které může vést až k buněčné smrti. Na udržení fyziologické hladiny volných radikálů a snížení oxidačního stresu se účastní mechanismy, zahrnující enzymatické a neenzymatické antioxidanty (Chapman et al., 2019).

5.1 ENZYMATICKÉ ANTIOXIDANTY

Na odstraňování peroxylových radikálů, detoxikaci peroxidů oxidací a na snižování oxidačního stresu se podílí glutathionperoxidáza (Tan et al., 2023). Glutathionreduktáza je antioxidant podílející se na udržení poměru GSH/GSSG a NADP⁺/NADPH, také reguluje volné radikály (Day a Aasim, 2020, Ni et al., 2018). Askorbátperoxidáza reguluje reaktivní formy kyslíku redukcí peroxidu na vodu. Aktivita askorbátperoxidázy se při stresu zvyšuje (Khanna et al., 2023).

5.2 NEENZYMATICKÉ ANTIOXIDANTY

Mezi silné neenzymatické antioxidanty patří karotenoidy, redukovaný glutation (GSH), aminokyseliny, tokoferol, flavonoidy a kyselina askorbová. Kyselina askorbová vychytává reaktivní formy kyslíku pomocí oxidace a má vliv na regeneraci tokoferolu, který se podílí na udržení integrity buněčné membrány (Khanna et al., 2023). GSH snižuje volné radikály především v chloroplastech, které jsou na oxidační stres citlivé, protože může vést k poškození fotosyntetického aparátu (Tan, 2023). Na snížení oxidačního stresu se podílí karoteny a xantofyly, které reagují s peroxylovými radikály (Tan, 2023). Fytomelatonin snižuje oxidační stres a poškození stresem, aktivněji a více vychytává volné radikály oproti glutationu. Při metabolismu fytomelatoninu vznikají prekurzorové

molekuly, které působí jako antioxidanty (Khan et al., 2020, Tan et al., 2007). Vyšší hodnota fyto-melatoninu vykazuje vyšší antioxidační možnosti a nižší poškození oxidačním stresem (Wang et al., 2017).

5.3 ROSTLINNÉ PIGMENTY JAKO NESPECIFICKÉ INDIKÁTORY STRESU

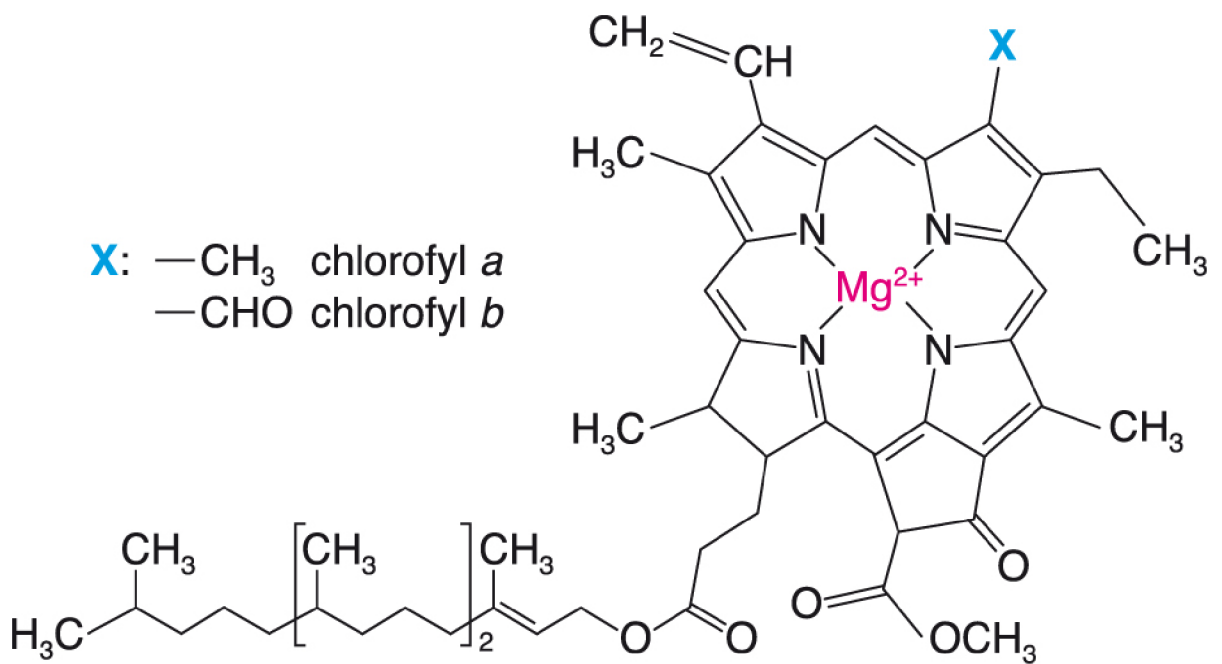
Pigmenty jsou látky schopné absorbovat záření a způsobovat zbarvení. Podle umístění barviva v buňce se pigmenty dělí na dvě skupiny, plastidové a vakuolární. Plastidová barviva vznikají a akumulují se v plastidech. Mezi tyto pigmenty patří oba chlorofyly, beta-karoten a xantofyly. U vakuolárních pigmentů probíhá jejich syntéza v cytoplasmě, uloženy jsou ve vakuolách. Mezi vakuolární barviva se řadí flavonoidy, tedy i antokyany (Bortolotiet al., 2022).

Stanovení fotosyntetických pigmentů může sloužit ke zhodnocení stavu rostlin, jako nespecifický indikátor. Při působení stresu na rostliny dochází ke změnám na biochemické úrovni, které se dají analyzovat a tím, zjistit rozsah poškození a změn (Buchanan et al., 2015).

5.3.1 CHLOROFYLY

Jedná se o pigmenty, které se nacházejí v chloroplastech a zprostředkovávají fotosyntézu, jedná se tedy o pigmenty světlosběrné. Druhů chlorofylů je více, nejvýznamnější jsou chlorofyl a a chlorofyl b. Chlorofyly jsou nerozpustné ve vodě, rozpustné v tucích a jsou velmi citlivé na působení světla, enzymů a tepla (Khanna et al., 2023).

Základ chemické stavby chlorofylů tvoří porfyrový kruh. Chlorofyly a a b se od sebe liší substituentem na třetím uhlíku. Zásadou odlišného substituentu dochází u chlorofylů absorpci světla o různých vlnových délkách. Chlorofyly se v přírodě obvykle vyskytují v poměru 3:1 (chlorofyl a : chlorofylu b). Zmíněný poměr chlorofylů se v rostlinách mění vlivem stresu. Stanovení poměru se dá využít jako indikátor míry stresu u rostlin (Bortoloti et al., 2022).



Obrázek 2 Strukturální vzorec chlorofylu

5.3.2 KAROTENOIDY

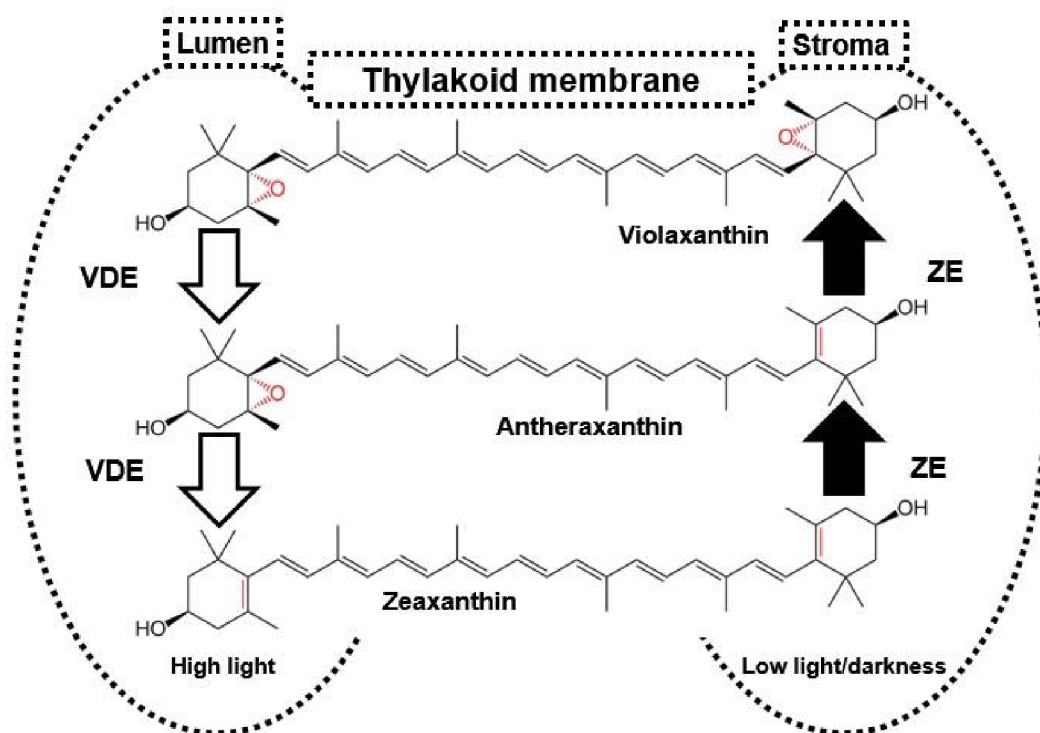
Karotenoidy můžeme rozdělit na dvě základní skupiny, karoteny a xantofyly. Jedná se o pigmenty především žluté, oranžové a červené barvy, vyskytující se především v chromoplastech. Společně s chlorofyly se karotenoidy podílejí na fotosyntéze. Rostlina díky karotenoidům využívá širší spektrum světla, protože karotenoidy pro záchyt energie používají jiné vlnové délky než chlorofyly. Karotenoidy jsou v rostlinách zastoupeny v menší míře než chlorofyly, přibližně v poměru 5:1 (chlorofyly:karotenoidy). Důležitou rolí karotenoidů je antioxidační činnost zabráňující peroxidaci lipidů, vychytáváním hydroxylových radikálů (Buchanan et al., 2015, Bortoloti et al., 2022).

5.3.3 ANTOKYANY

Jedná se o rozmanitou skupinu pigmentů, zahrnující oranžovou, červenou, modrou a fialovou barvu. Antokyany obsahují cukernou složku a jsou rozpustné ve vodě. Pro rostlinu jsou nepostradatelné z důvodů lákání opylovačů, ale i na ochranu rostliny před stresem. Díky svým vlastnostem mají schopnost vychytávat radikály (Bortoloti et al., 2022, Khanna et al., 2023).

5.4 XANTOFYLOVÝ CYKLUS

V případech, kdy rostlina není vystavena nadbytku světla, obsahuje více violaxanthinu, který se v případě potřeby přemění na zeaxantin. Touto přeměnou xantofylů dojde k přeměně energie, ze světelné na tepelnou. Karotenoidy se podílí na snížení excitovaného stavu chlorofylu a, prostřednictvím přenesení nadbytečné energie na zeaxanthin. Energie je tolik, že nemůže být využita pro tvorbu ATP. Tímto mechanismem nedojde ke vzniku reaktivních forem kyslíku a poškození fotosyntetického aparátu (Demmig-Adams, 1996, Buchanan, et al., 2015).



Obrázek 3 Xantofylový cyklus

6 VÝŽIVA ROSTLIN

Rostliny pro svůj růst a vývoj potřebují živiny, mezi které patří základní minerální prvky. Minerální zdroje můžeme rozdělit na dvě základní skupiny, na mikronutrienty a makronutrienty. Rostliny jako přisedlé organismy, musejí umět kompenzovat změny prostředí. Nadbytek nebo nedostatek potřebných látek vede k fyziologickým nebo metabolickým změnám, které projevují rostliny pomocí specifických signálů (Bouain et al., 2019, Manon et al., 2022).

6.1 MAKRONUTRIENTY

Makronutrienty neboli makroživiny, jsou chemické látky potřebné pro správný růst rostlin. Mezi makronutrienty patří draslík, fosfor, vápník, hořčík, síra a dusík (Imran et al., 2011).

6.1.1 DUSÍK

Popsání a pojmenování dusíku, téměř jako většiny makro a mikronutrientů, bylo uskutečněno v 18. století. Prvek objevil a popsal Daniel Rutherford, jméno vybral Jean-Antoine Chaptal. Dusík má významnou roli ve vývoji rostlin. Jedná se o hlavní prvek bílkovin a enzymů, je potřebný pro růst, vývoj listů a produkci semen (Datnoff et al., 2007).

Hnojivo je látka, jenž do půdy vnáší živiny potřebné pro výživu a růst rostlin, ale také pro zúrodnění půdy. Mezi nejdéle používané hnojivo lze považovat močovinu. Močovina i další dusíkatá hnojiva značně kontaminují podzemní vody. Do půdy se dusík přidává ve formě dusíkatých hnojiv (Prost et al., 2005).

Vyšší koncentrace těchto chemických látek má nepopíratelně negativní vliv na živé organismy, včetně člověka. Při nadbytku dusíku může dojít k nadměrnému růstu s vyšším rizikem vzniku chorob. U lidí může nadmíra dusíku z dusíkatých hnojiv způsobit řadu onemocnění – alergie, karcinomy, srdeční onemocnění a dokonce methemoglobinémii (Prost et al., 2005, Datnoff et al., 2007).

Hnojení, které se používá v ekologickém hospodaření, vykazuje mnohem šetrnější přístup v rámci znečišťování prostředí. Pro zdroj živin se používají především kompostované materiály. Při ekologickém hospodaření nevznikají chemická rezidua, což je pro kvalitu prostředí podstatné, ale v porovnání s klasickým způsobem hospodaření není výnosnost plodin tak vysoká (Agarwal et al., 2012).

6.1.2 FOSFOR

První zmínky o fosforu byly o celé století dříve, než byl prvek v druhé polovině 18. století popsán. První zmínky jsou od Henninga Branda, avšak teprve Antoine Lavoisier prvek uznal jako nový (Tripathi et al., 2014). Fosfor zaujímá významnou roli ve výživě rostlin a má vliv na vývoj kořenového systému (Shane and Lambers., 2005). Fosfor je nedílnou součástí proteinů a nukleotidů, a nezbytný pro ribonukleovou kyselinu. Také snižuje rozvoj listových chorob a rzi (Lipa et al., 2007). Rostliny s nedostatkem fosforu mají nekrotické skvrny na listech. Nadbytek fosforu je výjimečný, avšak pokud nastane, může docházet k blokaci příjmu zinku a mědi rostlinou (Ciceri et al., 2015).

6.1.3 VÁPNIK

Vápník se řadí mezi prvky, které objevil nebo izoloval Humphry Davy (Enghag, 2008). Rostliny potřebují vápník pro správnou funkci a odolnost buněčné stěny. Vápníkové můstky jsou podstatné pro pevnost buněčné stěny a pro odolnost proti chorobám. To je dáno vlastnostmi pektinů, jež mají vliv na velikost pórů. Kromě toho má vápník vliv na růst rostliny a tvorbu kořenů. Zvýšená hodnota vápníku téměř růst rostlin nepoškozuje. U nedostatku vápníku jsou rostliny více náchylné k vadnutí, u listů dochází k chloróze vedoucí často k nekróze (White et al., 2003, Sze, 2000).

6.1.4 DRASLÍK

První popsání draslíku bylo zaznamenáno v první polovině 19. století. O jeho objev a izolaci se zasloužil Humphry Davy (Ciceri et al., 2015). Draslík je ve výživě rostlin prospěšný pro správný vegetativní růst. Nedostatek draslíku vede k vyšší míře náchylnosti vůči chorobám a listy rostlin působí chloroticky (Amtmann et al., 2008). Nadbytečným množstvím draslíku zvyšuje příjem železa, manganu a zinku z půdy (Cakmak, 2005).

6.1.5 SÍRA

Síra je v rostlinách nezbytná pro syntézu bílkovin a růst rostlin. Podílí se na růstu kořenů, využití vitamínů a zlepšuje stavbu semen. Nadbytek síry se u rostlin téměř nevyskytuje. Při nedostatku je patrná chloróza listů a nekrotické skvrny. Podobné příznaky jsou i u nedostatku dusíku. Nedostatek síry způsobuje načervenalé zbarvení spodní strany listů (Khan, 2011).

6.1.6 HOŘČÍK

Popsání osmého nejhojnějšího prvku v zemské kůře provedl Josef Black, úspěšně izolování hořčíku v roce 1808 uskutečnil Humphry Davy. Hlavní úlohou hořčíku u rostlin je působení na vývoj rostlin. Při nedostatku hořčíku u rostlin vzniká chloróza až nekróza

listů. Nedostatek může mít negativní vliv na růst a vývoj rostlin (Huber et al., 2013, Hänsch, 2009).

6.2 MIKRONUTRIENTY

Mikronutrienty potřebují rostliny pro zdravý vývoj v malém množství. Mezi minoritní prvky patří železo, měď, zinek, bor, molybden, chlór a mangan (Imran, 2011).

6.2.1 ŽELEZO

Hlavním zdrojem železa je půda. Železo je přechodný kov, který se podílí na tvorbě chlorofylu. Při jeho nedostatku dochází k chloróze listů, jenž se může rozvinout do úplného vybělení listů a vzniku nekrotických skvrn. První projevy nedostatku železa jsou patrné u mladších listů. Nadměrný příjem železa u rostlin vzniká při nedostatku zinku. Z tohoto důvodu mohou být první příznaky nadbytku železa spojené s nedostatkem zinku. Rostliny s vysokým obsahem železa mají tmavé listy a zakrnělý růst (Kim, 2007).

6.2.2 MĚĎ

Propojení mědi a člověka sahá do několika tisíc let před naším letopočtem. Měď rostliny potřebují ve velmi malém množství. Jedná se o velmi cennou látku, především pro reprodukční růst a správný kořenový metabolismus (Karakurt et al., 2010). Při nedostatku mědi mají listy zvlněné okraje a chlorózu. Při nadbytku mědi dochází ke sníženému růstu a zakrnění rostlin, ovlivněné jsou i kořeny, které jsou hustší (Uchida, 2000).

6.2.3 ZINEK

Andreas Marggraf v první polovině 18. století označil zinek za nový kov. Zinek je pro rostlinu velice potřebný v řadě buněčných procesů, také se podílí na přeměnách sacharidů. Rostlina jej získává kořeny v podobě iontů, které jsou poté transportovány do xylému (Krämer et al., 2007). Nedostatek zinku vede ke snížení integrity buněčné membrány, mající vliv na příjem sodíku. Na listech je nedostatek zinku poznat podle nových žlutých listů. Nadmíra zinku způsobuje zakrnělý růst, chlorózu a může mít vliv na koncentraci fosforu s hořčíkem rostlinách (Broadley et al., 2007, Enghag, 2008).

6.2.4 MOLYBDEN

Koncem 18. století popsal Carl Wilhelm Scheele lesklý stříbrný kov, molybden, jenž poté izoloval Peter Jacob Hjelm. Nedostatek molybdenu nemůže téměř vzniknout, protože rostliny potřebují velmi malé množství pro správný vývoj a v půdě je obsah molybdenu dostatečný. Pokud by k nedostatku molybdenu došlo, projevil by se v podobě mírné chlorózy a vzniku skvrn na listech. Molybden je součástí enzymů podílejících se na

metabolismu dusíku. Zvýšená koncentrace molybdenu způsobí oranžové zbarvení listů (Kaiser et al., 2005, Enghag, 2008).

6.2.5 MANGAN

Objev manganu proběhl v první polovině 18. století, jeho úspěšné izolování provedl v roce 1774 Johan Gottlieb Gahn. Mangan se účastní mnoha procesů v rostlinách. Podílí se na fotosyntéze a aktivaci antioxidantních enzymů, i na metabolismu dusíku. Také je součástí enzymů, které mohou zpomalit tvorbu nukleotidů a mastných kyselin. Při nedostatku manganu vzniká slabá chloróza, v kombinaci se stresem mohou na listech vznikat tmavé skvrny (Yang et al., 2008).

6.2.6 BOR

Bor byl poprvé popsán ve Francii, kde jej popsali dva vědci, Louis-Jacques Thénard a Louis-Josef Gay-Lussac, a zároveň Humphry Davy ve Velké Británii (Ozalp, 2008). Zdrojem boru v přírodě je především borax. V rostlinách je bor součástí mechanismu správného využití živin a hospodaření sacharidů. Nedostatek boru se na rostlinách projeví ve formě mírné chlorózy listů. Vysoká koncentrace boru může být přirozeně v půdě a nepřirozeně prostřednictvím těžby nebo používáním některých hnojiv. Toxicita boru může způsobovat poruchy růstu rostlin (Gupta et al., 1985, Enghag, 2008, Princi, 2016).

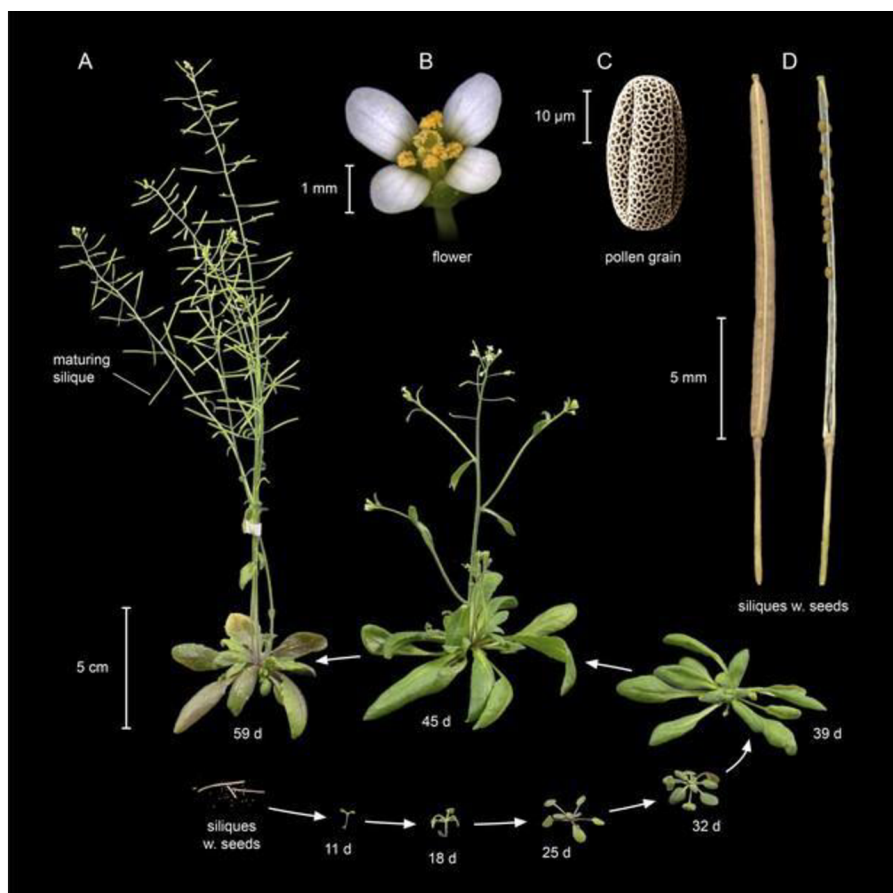
6.2.7 CHLOR

V roce 1774 popsal Carl Wilhelm Scheele chlor, který patří v periodické tabulce prvků do skupiny halogenů. Jeho vlastnosti lépe a přesněji popsal téměř o čtyřicet let později Humphry Davy. Rostliny chlor získávají hlavně z půdy (Siegfried, 1959). Chlor se v rostlinách podílí při využití nutrietů. Při nedostatku chloru vznikají u rostlin jiné tvary listů, vadnutí nebo/a chloróza, která je především u mladých listů. U nadbytku obsahu chloru může u rostlin dojít k zakrnělému růstu (Hänsch, 2009).

7 HUSENÍČEK ROLNÍ

Huseníček rolní (*Arabidopsis thaliana*) je asi nejznámější a nejpoužívanější modelová rostlina popsána již v 16. století. Pokusy s rostlinami *Arabidopsis* probíhaly na konci 20. století dokonce i ve vesmíru, a to v raketoplánu Columbia (Hejný, 2003).

Huseníček rolní je jednoletá nebo ozimá rostlina patřící do čeledi brukvovitých (*Brassicaceae*). Přízemní růžici tvoří lístky o délce 1 až 3 cm. Lodyha je přímá a větvená o délce od 5 do 30 centimetrů. Kvete bílým drobným květem, na bázi žlutě, od dubna do května, již od čtvrtého týdne po vyklíčení. Květy se skládají ze zelenožlutých kališních lístků a bílých korunních lístků, tvoří hrozen charakteristický pro brukvovitou čeleď. Po odkvetení se tvoří šešule se semeny (Hejný, 2003).



Obrázek 4 Huseníček rolní (*Arabidopsis thaliana*)

Huseníček pro svůj růst nepotřebuje mnoho místa, roste na různých místech - podél cest, na skalách a svazích, na polích. V České republice a v Evropě se vyskytuje téměř na celém území, kromě nejsevernějších částí – Skandinávie a evropské části Sibiře (Hejný, 2003).

Roku 1992 byl založen projekt The Arabidopsis Genome Initiative, který si vzal za cíl stanovit genom huseníčku rolního. V roce 2000 došlo k dokončení sekvenování celého genomu, jako u úplně první rostliny (Rhee, 2003).

Stanovením celého genomu došlo k objevení a identifikování kovových transportérů, jenž hrají důležitou roli u schopností rostlin při nakládání s toxickými kovy. U *A. thaliana* byly popsány transportéry měděné (COPT), regulované železem (IRT), makrofágový protein asociovaný s přirozeným odporem (NRAMP), železem a zinkem regulované transportní proteiny (ZIP) a další (Ajeesh Krishna et al., 2020, Maharajan et al., 2022). Jednotlivé druhy transportérů mají specifickou roli při zacházení s toxickými kovy. Některé přenašeče se podílejí na příjmu, transportu a akumulaci těžkých kovů. Pokusy ukázaly, že kovové transportéry mají vliv na zvýšení příjmu a akumulace toxických kovů rostlinou. To ukazuje na možné nové směry pro zlepšení účinků fytoremediace (Chaffai a Koyama, 2011).

8 METODIKA

8.1 DESIGN EXPERIMENTU

Jako rostlinný materiál byly použity semínka huseníčku rolního (*Arabidopsis thaliana* var. Columbia). Kultivace probíhala v 18 hydroponických kontejnerech s růstovými sloty. Růstové sloty byly naplněné agarem, do kterého se po vychladnutí pomocí pipety vysela semínka jednotlivých genotypů. Rostliny byly kultivovány v médiu dle Hoaglanda (složení media je uvedeno v přílohách), které bylo připravené ze zásobních roztoků zředěných destilovanou vodou a ustáleno na pH v rozmezí 6,2-6,3. Do každého kontejneru byly odměřeny 2 litry média. Rostliny byly kultivovány při světelném režimu 8h den a 16h noc. Po vyklíčení bylo třeba rostliny na jednotlivých slotech vyjednotit a protrhat, tak aby zůstala jen jedna v každém slotu.

Po jednoměsíční kultivaci rostlin bylo médium vyměněno. Pro experiment byly vybrány tři genotypy huseníčku. Každý genotyp byl vysázen do 6 hydroponických kontejnerů. Pro experiment byly kontejnery rozdělené do tří skupin, podle obsahu látek v médiu. Jednalo se o Hoaglandovo médium (HM), HM bez $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ s přidaným nano-hydroxyapatitem (nanoP) a HM bez $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (-P). Do jednotlivých kontejnerů bylo aplikováno thorium ve formě roztoku soli $\text{Th}(\text{NO}_3)_4$. V polovině kontejnerů bylo použito medium bez přidání thoria, ty pak sloužily jako kontrola. Po dalších 14 dnech byly rostliny sklizeny.

Rostliny byly rozděleny na kořenovou a nadzemní část. Obě části byly postupně omyty v destilované vodě. Vzorky byly dále zpracovány dle potřeb analýzy do uzavíratelných plastových sáčků, které byly skladované v mrazáku při -80°C do dalšího zpracování. Sušení vzorků proběhlo pomocí lyofilizace na Labcono Free Zone 2.5, (USA).

8.2 STANOVENÍ OBSAHU PRVKŮ

Nadzemní části byly od každé skupiny genotypu rozdělené do tří skupin, kořeny byly pro nízkou hmotnost sjednoceny do jedné. Sušina byla zvážena na analytických vahách a následně převedena do mineralizačních zkumavek. Do každé zkumavky bylo přidáno 5 ml mineralizační směsi kyselin. Směs kyselin se skládala z kyseliny dusičné a kyseliny chloristé, jenž byly v poměru 7:1. Pro lepší průběh mineralizace byly zkumavky umístěny přes noc v digestoři při laboratorní teplotě. Druhý den byly do každé zkumavky přidány další 3 ml mineralizační směsi kyselin. Mineralizace byla uskutečněna pomocí mikrovlnného tlakového rozkladu přístrojem Multiwave PRO, Anton Paar, Rakousko.

Po mineralizaci byly vzorky převedeny do uzavíratelných zkumavek. Objem vzorků byl v jednotlivých zkumavkách doplněn na 10 ml. Vzorky byly skladovány při laboratorní teplotě do data analýzy. Stanovení bylo provedeno na optickém emisním spektrometru s indukčně vázaným plazmatem ICP-OES (iCAP 7000, ThermoScientific, USA).

8.3 STANOVENÍ FOTOSYNTETICKÝCH PIGMENTŮ

Pro stanovení pigmentů byly při zpracování vzorků odebrány listy, které bylo třeba zamrazit pomocí tekutého dusíku. Lyofilizované lístky byly v třecí misce rozdrceny a extrakce proběhla pomocí acetonu. Po odpaření plynným dusíkem byl extrakt uchován v mrazáku do analýzy. V den stanovení byl extrakt rozpuštěn v acetonu. Pro stanovení pigmentů byla použita vysokoúčinná kapalinová chromatografie (HPLC). Pro mobilní fázi byla použita směs acetonitrilu, methanolu a vody v poměru 80:12:10, a směs methanolu a ethylacetátu v poměru 95:5. Stacionární fáze byla zajištěna kolonou Watrex Nucleosil column (120-5-C18, 250×4, 5 μm, (USA)).

Analýza jednoho vzorku trvala přibližně 20 minut, přičemž lineární gradient byl v rozmezí od 2 do 6 minut. Pro stanovení byla použita vlnová délka 445 nm. Pro analytické vyhodnocení byl použit HPLC/UV-VIS spektrofotometr s kalibrací pigmentových standard (Spectrophotometer Hitachi 2000, Hitachi Ltd.). Pro kvantifikování hodnot byl použit program Clarity (DataApex).

9 VÝSLEDKY

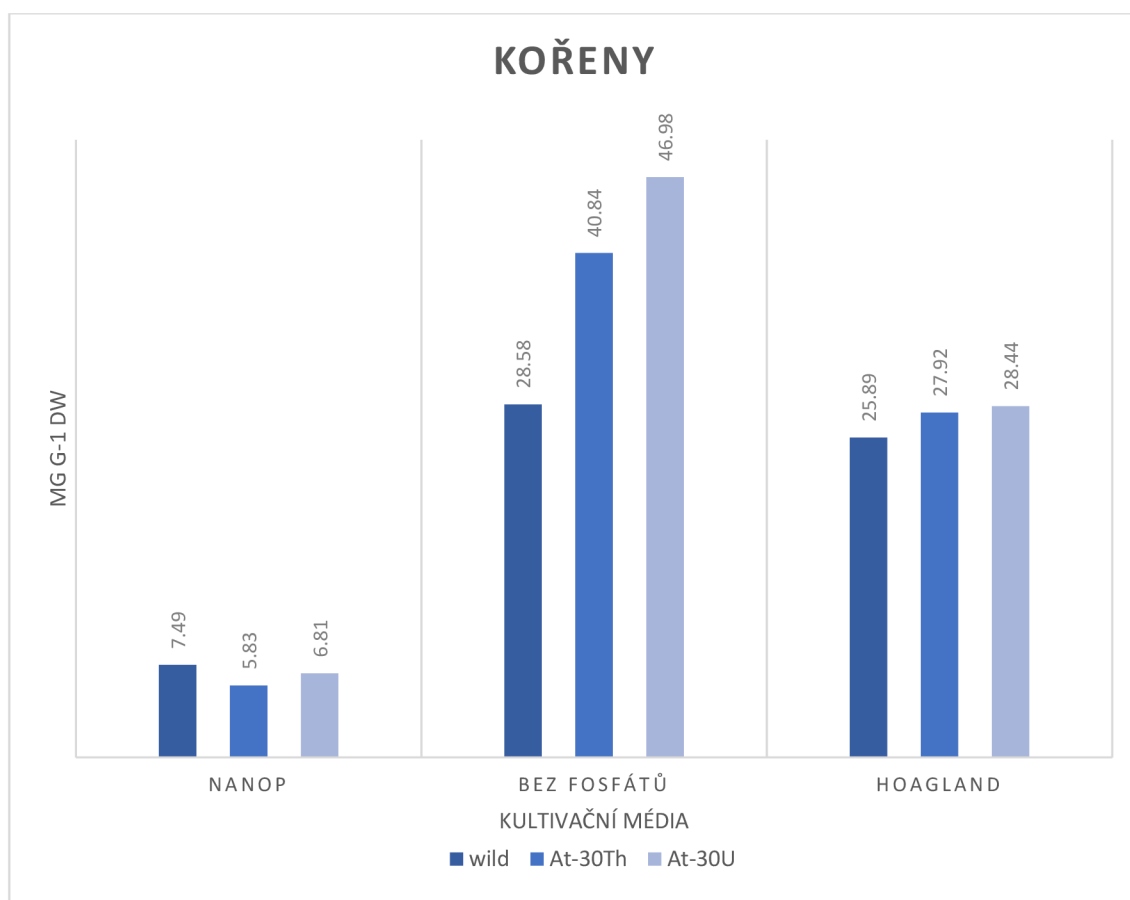
Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulkách v kapitole Přílohy (viz tabulka 2 a 3).

Hodnoty jsou následně zpracovány do grafu pro lepší přehled.

9.1 OBSAH THORIA

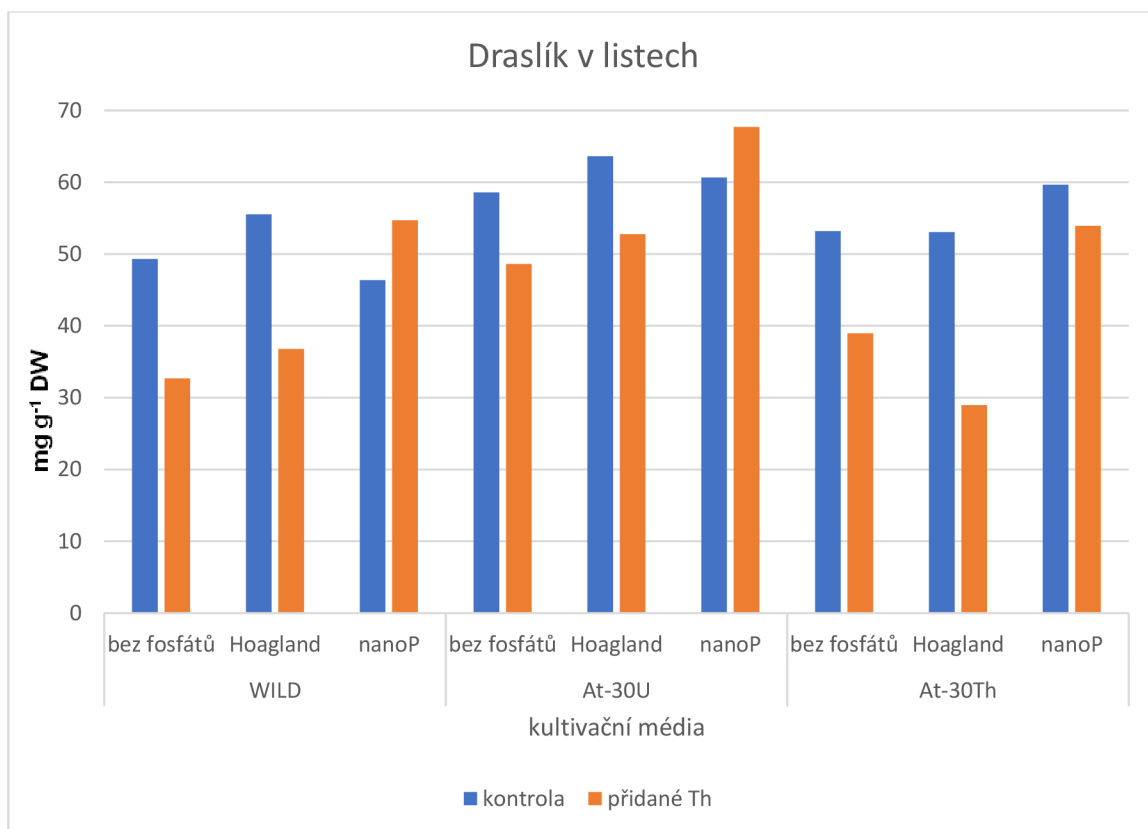
Thorium bylo akumulováno především v kořenech rostlin, v nadzemních částech byly hodnoty velmi nízké a byly na hraně meze detekce. Genotyp huseníčku At-30U, jak je z grafu (Graf 1) patrné, byl schopen akumulovat thorium v největším množství. Nejvýraznější rozdíly v obsahu thoria v kořenech a nejvyšší množství akumulovaného thoria v kořenech je patrné u rostlin, kde bylo použité médium bez fosfátů.

Naopak u média s přidanými nanoP jsou patrné mírné rozdíly a celkový obsah thoria v médiu s přidanými nanoP je, v porovnání s dalšími dvěma médii, velmi nízký. Thorium zřejmě s fosfáty vytváří komplexy pro rostliny málo dostupné. Genotyp At-30Th akumuluje thorium méně, než genotyp At-30U, ale stále jsou tyto hodnoty vyšší než u přírodní formy *Arabidopsis thaliana* var. Columbia (dále jen WILD type).

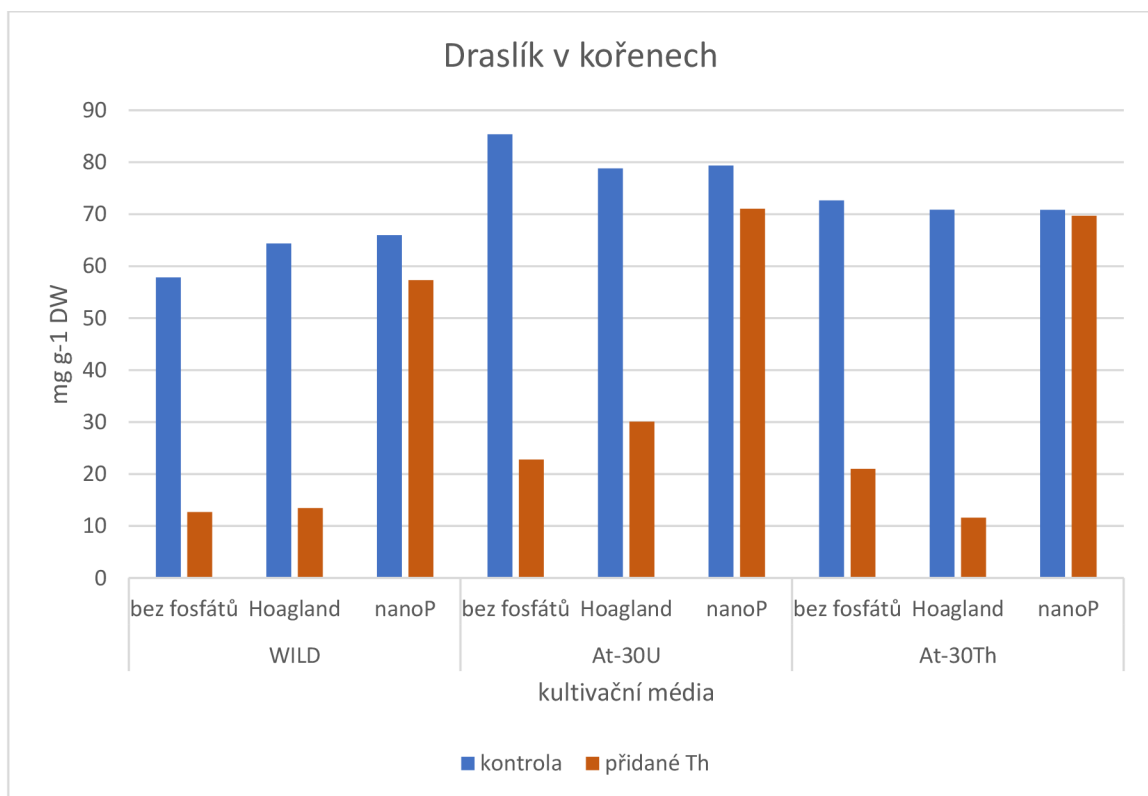


Graf 1 Akumulace thoria v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.

9.2 OBSAH NUTRIENTŮ



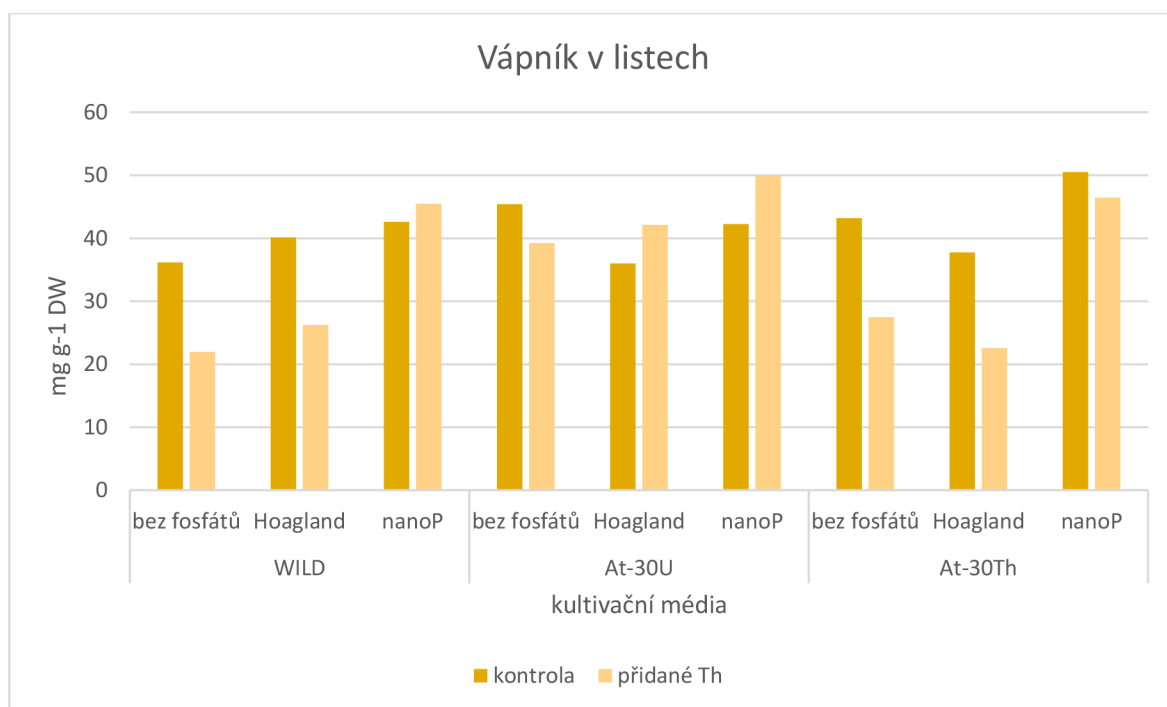
Graf 2 Obsah draslíku v listech testovaných rostlin na různých typech média.



Graf 3 Obsah draslíku v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.

Nejvyšší obsah draslíku v listech byl stanoven pro genotyp At-30U. Přídavek thoria významně snižuje obsah draslík u rostlin kultivovaných na Hoaglandově médiu (HM) na médiu bez fosfátů (-P). Kultivace rostlin s thoriem na médiu nanoP ve většině případech naopak podporuje nárůst obsahu draslíku (Graf 2).

Obsah draslíku v kořenech rostlin kultivovaných na médiu nanoP je prakticky stejný jak v kontrole, tak při kultivaci s thoriem (Graf 3). Stejně jako v listech, tak i v kořenech ovlivňuje thorium obsah draslíku v kořenech rostlin kultivovaných na médiu HM na médiu -P. Obsah draslíku je v kontrolních rostlinách významně vyšší než u rostlin kultivovaných s thoriem.

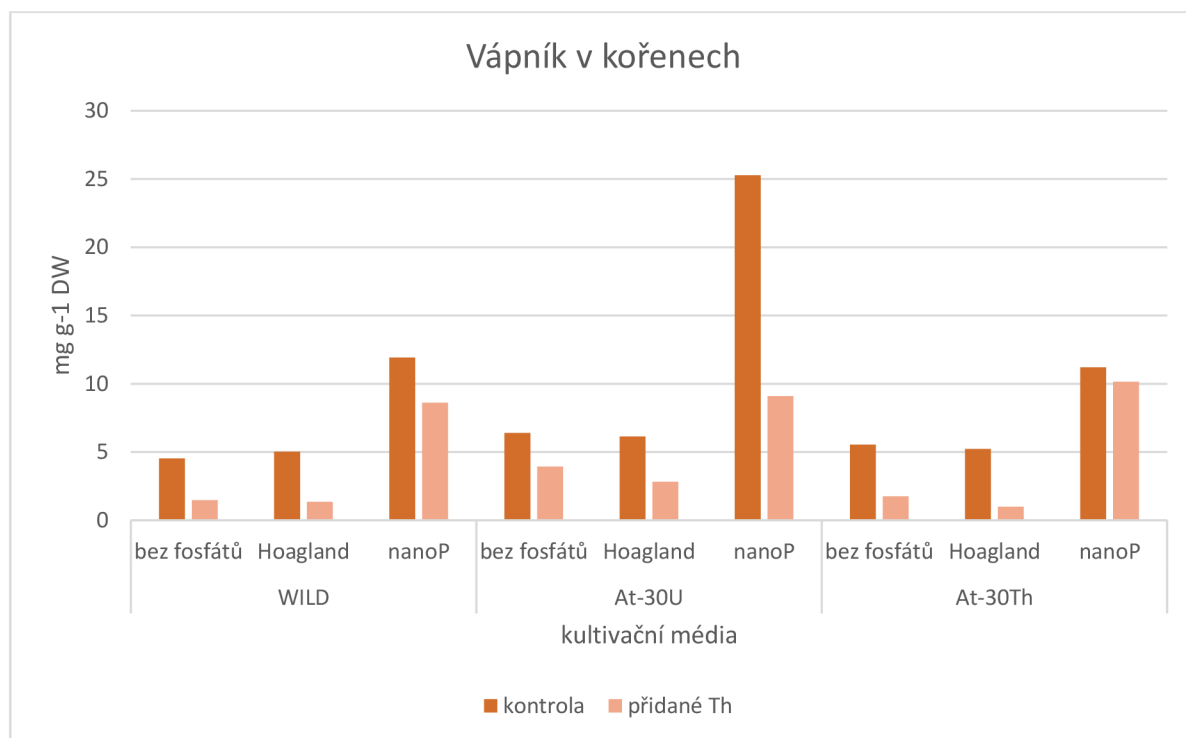


Graf 4 Obsah vápníku v listech testovaných rostlin na různých typech média.

Stejně jako u draslíku, tak i obsah vápníku je v listech silně přítomností thoria a typem média. Přídavek thoria významně snižuje obsah vápníku u rostlin kultivovaných na médiu HM na médiu -P. Nejvyšší obsah vápníku byl stanoven u listů rostlin kultivovaných na médiu nanoP. U genotypy At-30U je vliv složení média na obsah vápníku nejnižší a obsah na různých typech média je srovnatelný (Graf 4).

Hodnota vápníku v kořenech u genotypu At-30U je opět, jako u stanovení listů, vyšší oproti zbývajícím dvou genotypům (Graf 5). U kořenů je ale velmi patrný vliv média s přidanými nanoP na obsahu vápníku v kořenech rostlin. Je to částečně dáno tím, že nano-hydroxyapatit dodává do média další množství vápníku, než je ve standartním

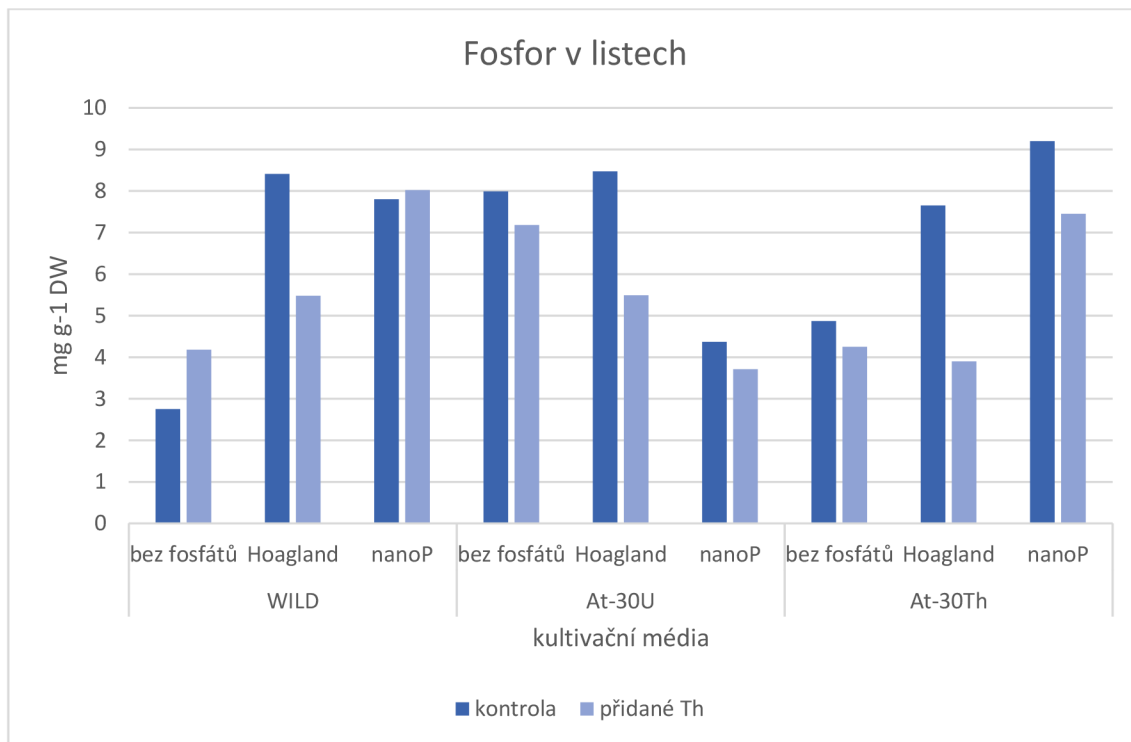
médiu, To se projevuje zvýšenou koncentrací vápníku ve všech kontrolních rostlinách kultivovaných na médiu nanoP (bez thoria) u všech tří genotypů. Stejně jako u listů, je i v kořenech obsah vápníku ovlivněn přítomností thoria. V přítomnosti thoria dochází ke snížení obsahu vápníku v kořenech všech testovaných rostlin na všech třech typech média.



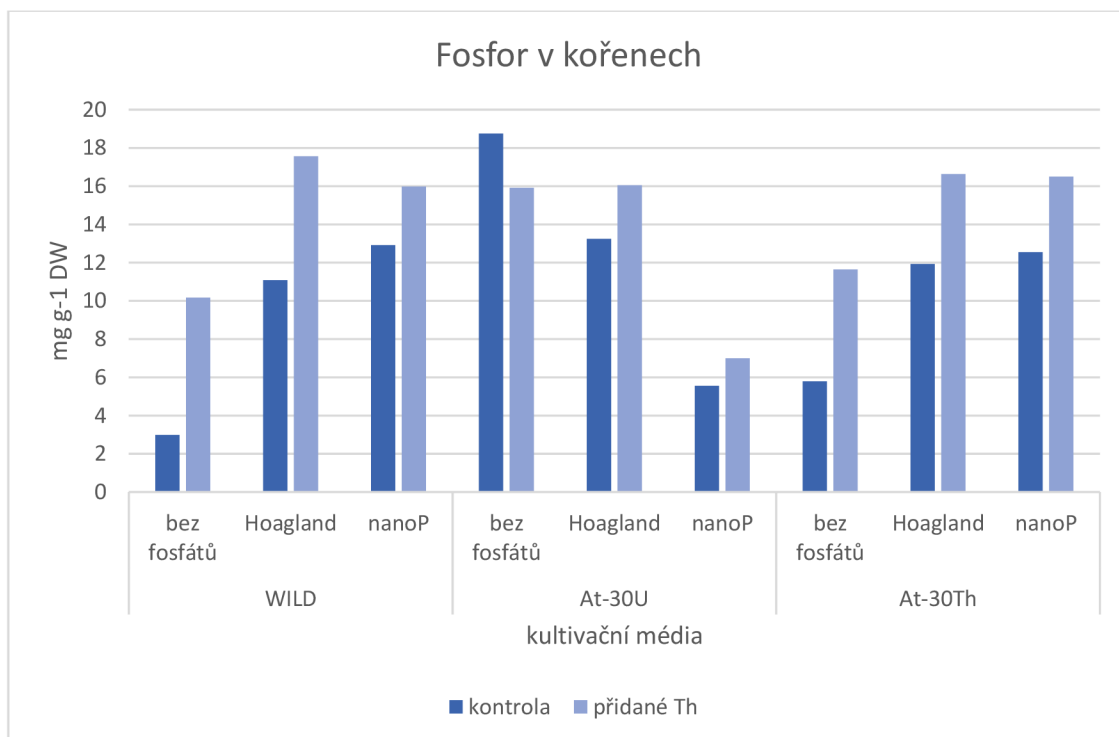
Graf 5 Obsah vápníku v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.

Rozdíly koncentrace fosforu, u kontrol a rostlin vystavených působení thoria, jsou znatelné u všech genotypů v médiu HM (Graf 6). U genotypu At-30Th je obsah fosforu po působení thoria na rostliny o 50 % nižší, než je hodnota fosforu v kontrolních rostlinách. Genotyp At-30U má nejnižší obsah fosforu u rostlin kultivovaných na médiu nanoP. Ostatní genotypy mají na tomto médiu obsah fosforu nejvyšší. Naopak v médiu -P mají genotypy WILD type a At-30Th nízký obsah fosforu, kdežto genotyp At-30U má v médiu -P nejvyšší obsah fosforu. Genotypy WILD type a At-30Th vykazují podobný obsah fosforu ve všech médiích, genotyp At-30U má oproti nim obsah fosforu v médiích -P a nanoP zrcadlově obrácený.

Obsah fosforu v kořenech kopíruje hodnoty stanovené v listech (Graf 7). I u kořenů je patrný rozdíl mezi genotypy WILD type a At-30Th v porovnání s genotypem AT-30U. U všech tří genotypů rostlin byla hodnota fosforu nejvyšší v médiu HM. Což také koresponduje s obsahem fosforu v listech. Ovšem v kořenech jsou hodnoty oproti listům vyšší téměř o dvounásobek.



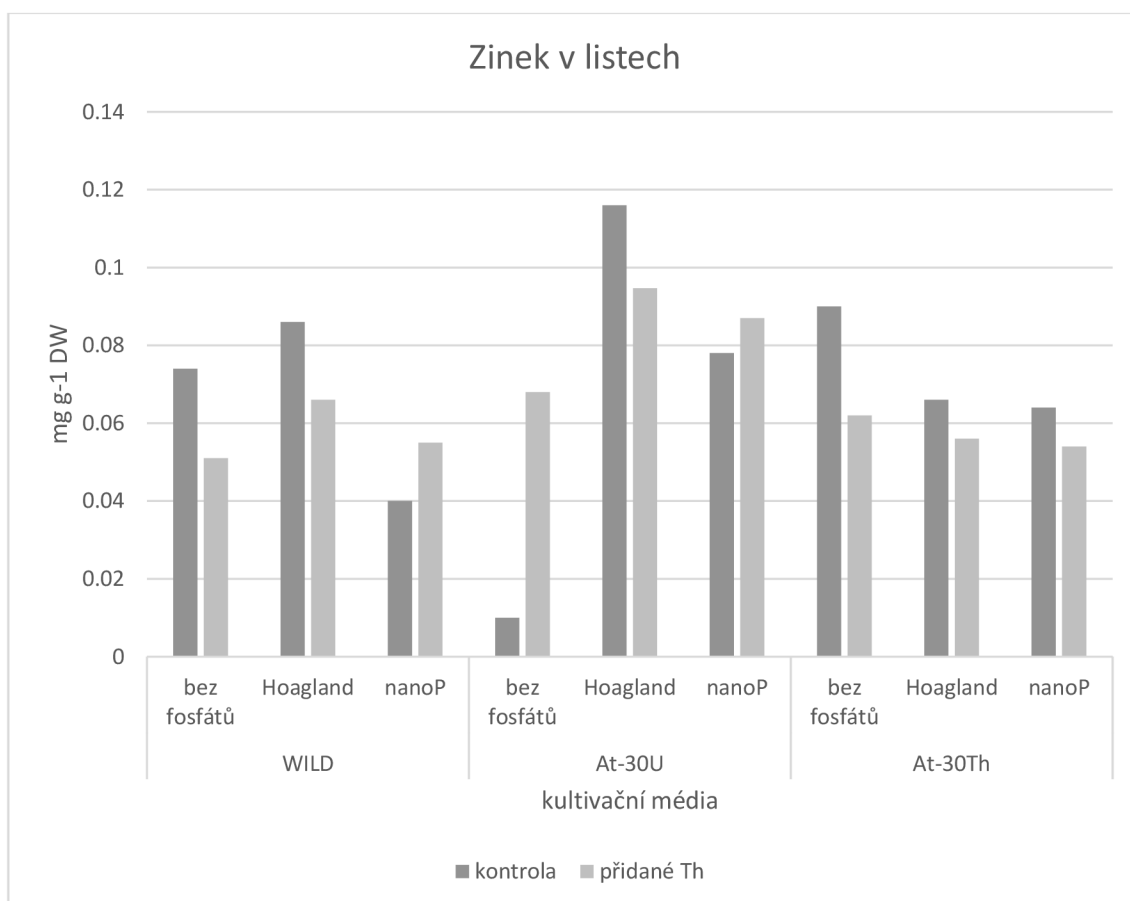
Graf 6 Obsah fosforu v listech testovaných rostlin na různých typech média.



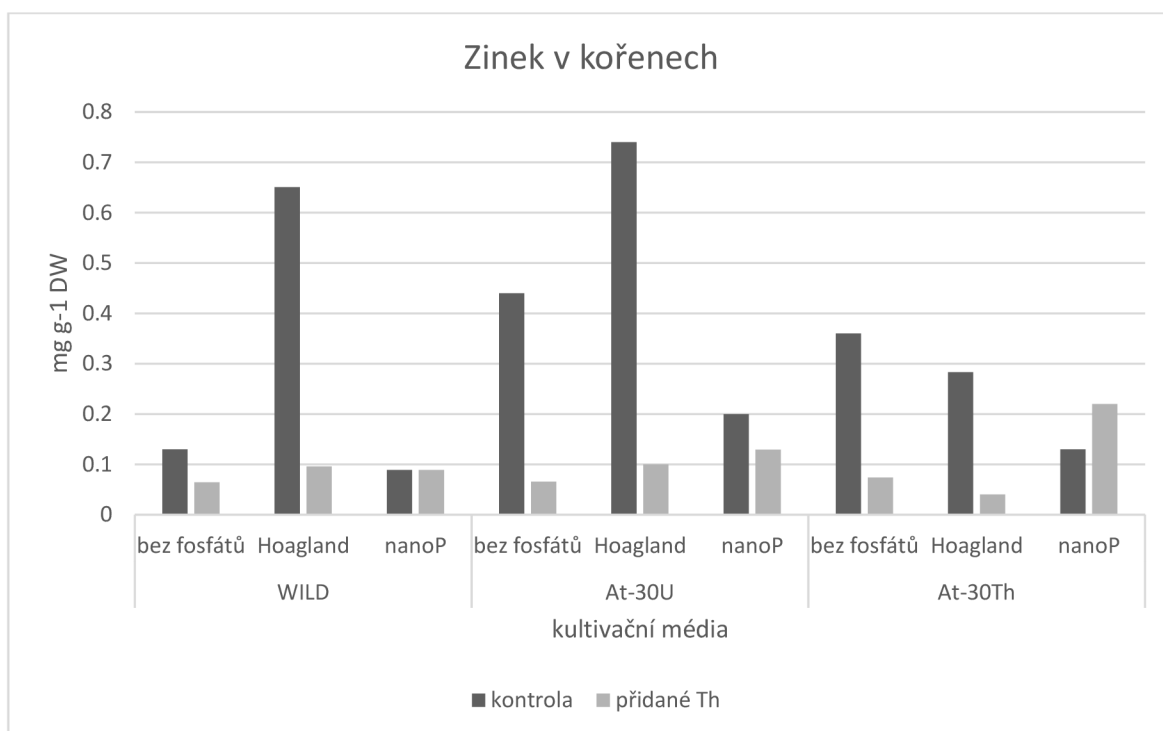
Graf 7 Obsah fosforu v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.

Genotyp At-30Th má ve všech médiích podobný obsah zinku v listech a vždy nižší, než je obsah zinku u kontrol (Graf 8). Nejvyšší obsah zinku mají rostliny genotypu At-30U kultivované na médiu HM. Výrazný rozdíl v obsahu zinku mezi kontrolou a rostlinami kultivovanými s thoriem byl pozorován u genotypu At-30U na médiu -P. Obecně lze říci, že obsah zinku je u rostlin kultivovaných s thoriem nižší než u kontrolních rostlin.

Obsah zinku je v kořenech vyšší než v listech (Graf 9). Kontrolní rostliny obsahovaly vyšší koncentrace zinku (někdy i velmi významně vyšší), než v případě rostlin kultivovaných s thoriem. Tento poměr obsahů zinku v kontrolních a thoriem ošetřených rostlinách je nejvýraznější u všech genotypů kultivovaných na médiu HM. Obsah zinku je oproti kontrole vyšší pouze u genotypu At-30Th kultivované na médiu nanoP. Rostliny na médiu nanoP také vykazují u genotypů nejmenší rozdíly mezi rostlinami ošetřenými a neošetřenými thoriem.



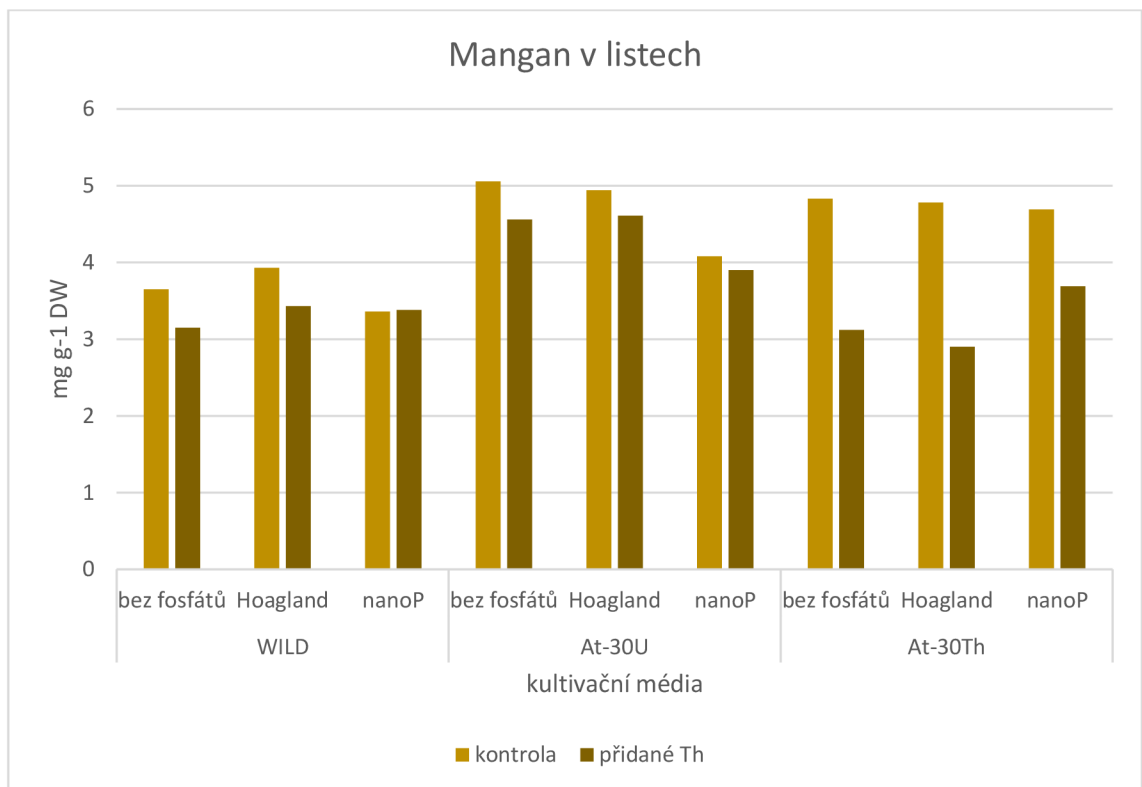
Graf 8 Obsah zinku v listech testovaných rostlin na různých typech média.



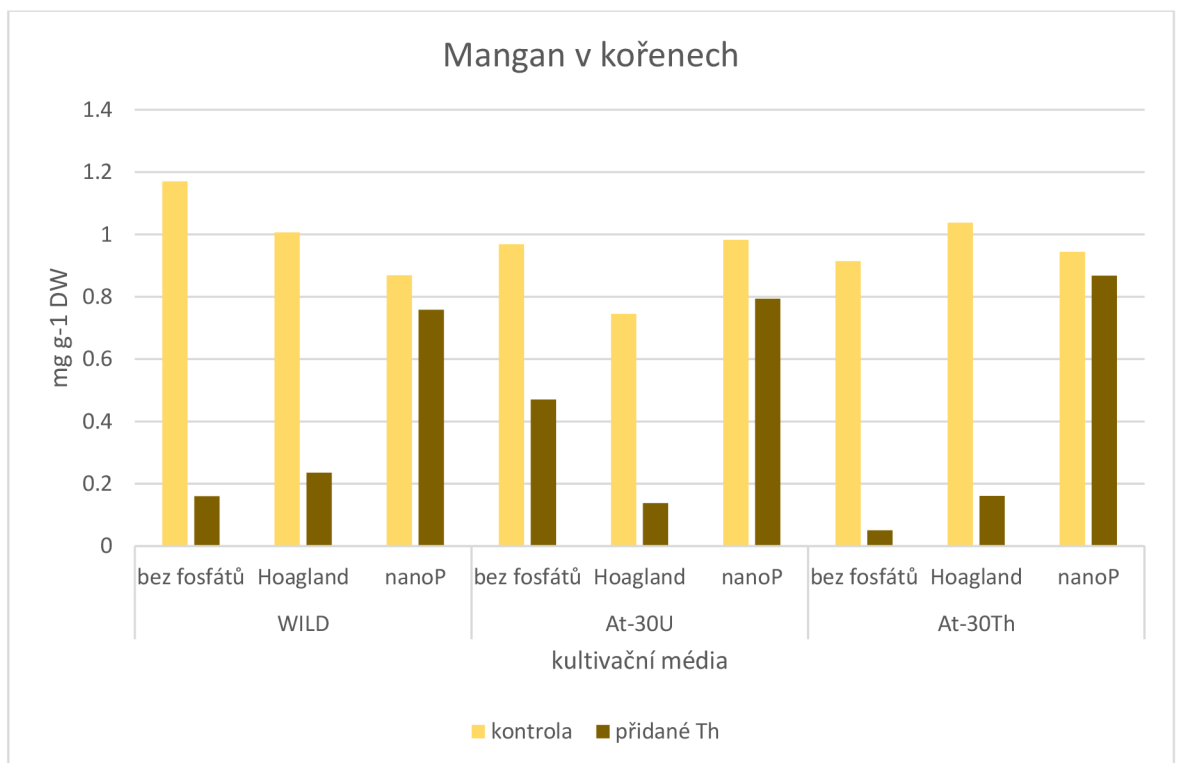
Graf 9 Obsah zinku v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.

Obsah manganu v listech není u genotypů WILD type a At-30U příliš významný, ale i přesto lze pozorovat trend kdy rostliny kultivované s thoriem obsahovaly nižší koncentrace manganu (Graf 10). Genotyp At-30Th vykazuje v případě obsahu manganu v rostlinách kultivovaných s thoriem a bez thoria mnohem větší rozdíly.

Oproti hodnotám manganu v listech, jsou rozdíly v obsahu manganu v kořenech rostlin ošetřených a neošetřených thoriem signifikantně rozdílné (Graf 11). U rostlin kultivovaných na mediu HM a na mediu -P dochází výraznému snížení obsahu manganu v případě kultivace s thoriem u všech tří genotypů. V případě rostlin kultivovaných na mediu nanoP byly rozdíly v obsahu manganu u kontrolních rostlin a rostlin kultivovaných s thoriem minimální.



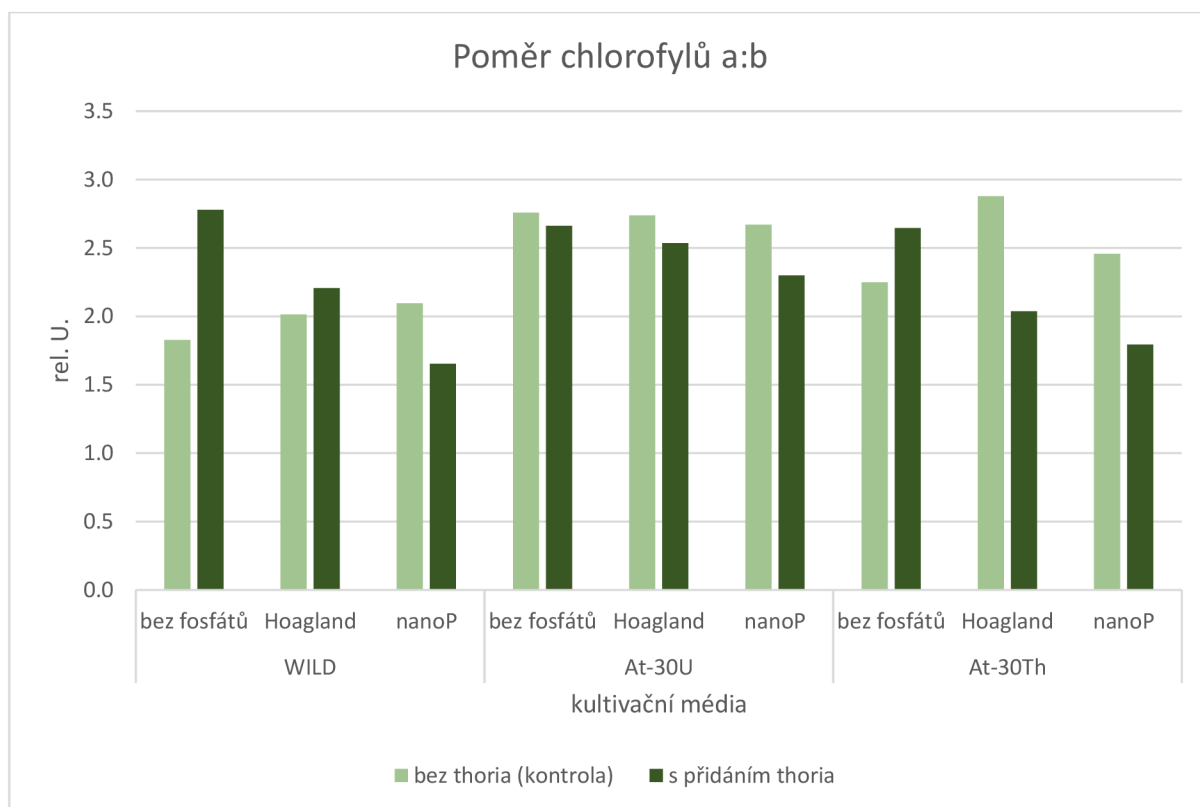
Graf 10 Obsah manganu v listech testovaných rostlin na různých typech média.



Graf 11 Obsah manganu v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.

9.3 OBSAH ROSTLINNÝCH PIGMENTŮ

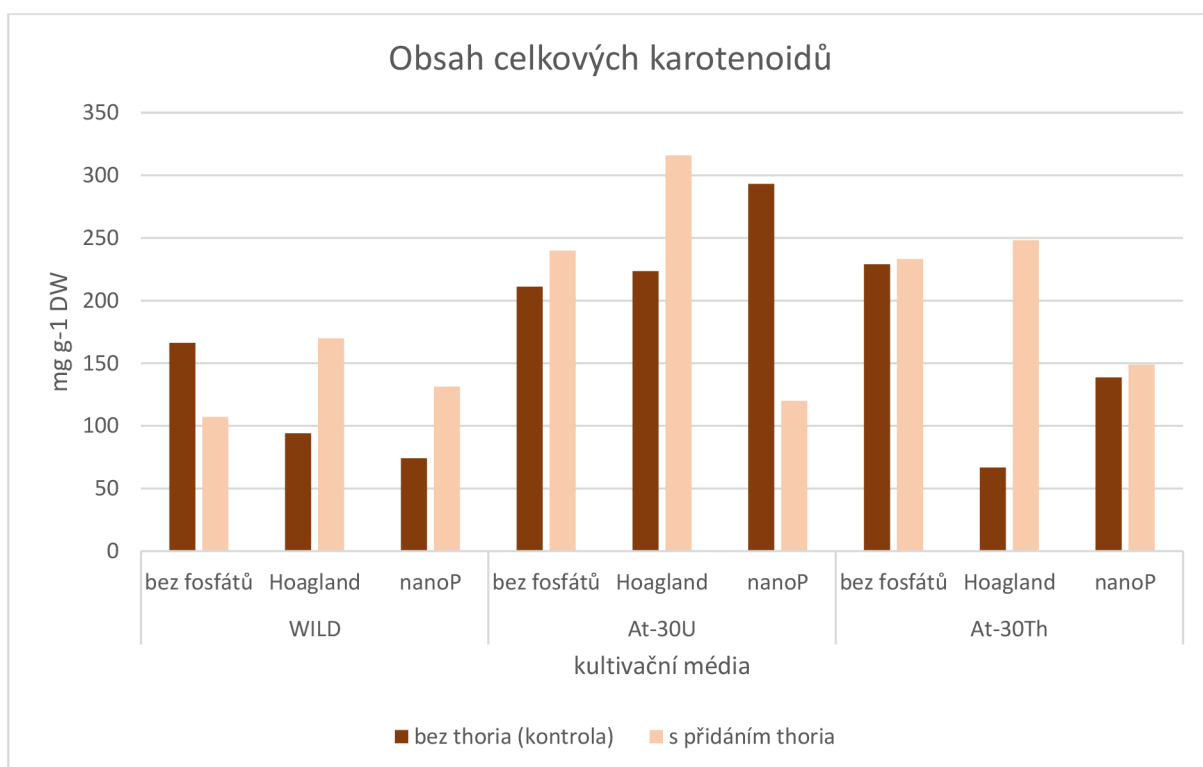
Pokud jsou rostliny vystaveny stresovým podmínkám dochází ke snížení poměru chlorofylů (a/b). Nejméně výrazné změny poměru chlorofylů mezi kontrolou a rostlinami kultivovanými s thoriem jsou u genotypu At-30U (Graf 12). Tento genotyp, kromě malých změn v poměru chlorofylů, vykazuje nejvyšší poměr chlorofylů ve všech médiích. To může ukazovat na schopnost rostlin lépe snášet toxické kovy. Zbývající dva genotypy (WILD type a At-30Th) vykazují vyšší poměr chlorofylů u rostlin kultivovaných s thoriem na médiu -P. Je možné, že působení nízké dávky thoria může u rostlin vést ke vzniku efektu hormeze. Jedná se o efekt, při kterém na organismy působí nízká hladina stresu (zátěže) vedoucí ke zlepšení a rozvoji organismů (Hrdinová a kol., 2018).



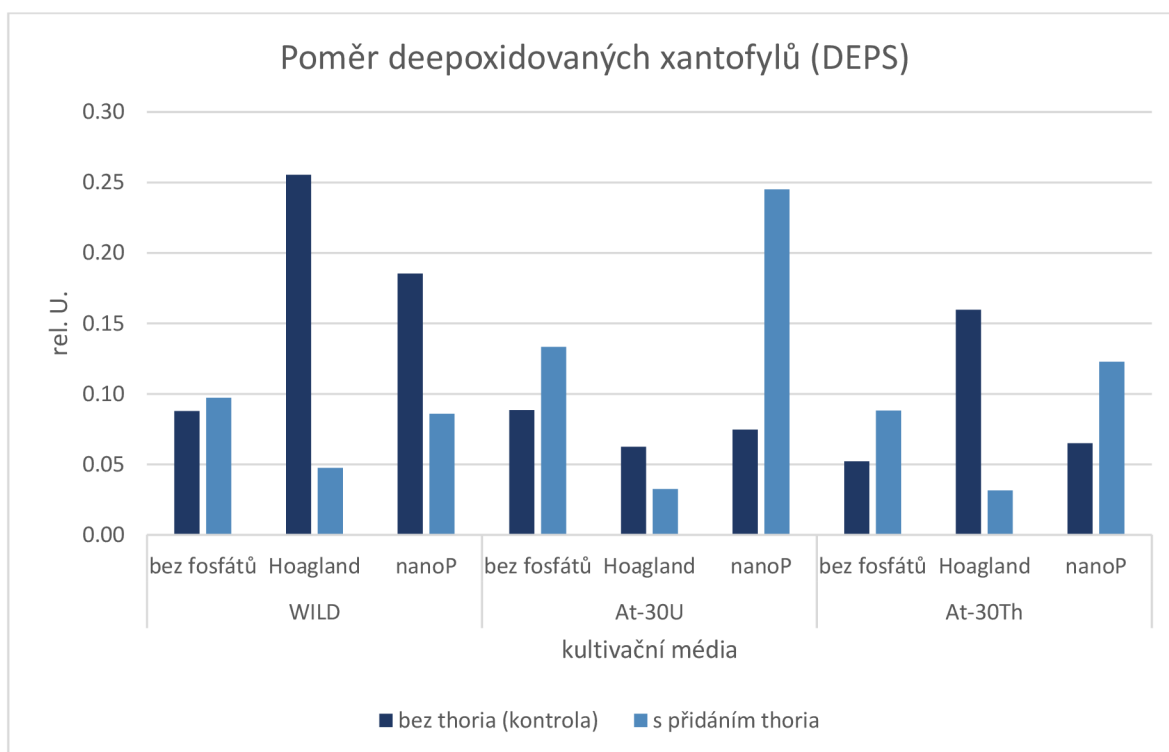
Graf 12 Poměr chlorofylů a/b v listech testovaných rostlin na různých typech média.

Jak bylo popsáno, karotenoidy se podílí na antioxidačních mechanismech rostlin. Celkový obsah karotenoidů může ukázat na snahu rostlin snížit oxidační stres. Avšak nejsou na oxidační stres tak citlivé, jako chlorofyly. Nejnižší obsahy karotenoidů byly

stanoveny u rostlin WILD type, na všech třech typech média, kontrol či rostlin ošetřených thoriem (Graf 13). Obecně vysoký obsah lze pozorovat u genotypu At-30U (s výjimkou rostlin kultivovaných s thoriem na médiu nanoP). Lze pozorovat zvýšené hodnoty obsahu karotenoidů v případě kultivace s thoriem v porovnání s kontrolou. Závislost na typu média lze pozorovat jen stěží.



Graf 13 Celkový obsah karotenoidů v listech testovaných rostlin na různých typech média.



Graf 14 Poměr deepoxidovaných xantofylů v listech testovaných rostlin na různých typech média.

Produkce reaktivních forem kyslíku má vliv na poměr deepoxidace xantofylových barviv ku celkové hodnotě xantofylových barviv (DEPS). Rostlina se pomocí DEPS snaží vykompenzovat vyšší hladinu reaktivních forem kyslíku, které vznikají při stresové zátěži rostlin a vystavení oxidačního stresu. Celkově nejnižší hodnoty DEPS, jak u kontroly, tak s přidáním thoria, jsou naměřeny u rostlin genotypu At-30Th. Nejvýraznější hodnota DEPS byla stanovena u genotypu At-30U kultivovaného v přítomnosti thoria na médiu nanoP. Nejnižší hodnoty byly naměřeny u všech tří genotypů kultivovaných na médiu MH. U tohoto média, byl rozdíl mezi kontrolou a rostlinami s thoriem výrazný, především u genotypů WILD type a At-30Th. U genotypu WILD type je hodnota DEPS u kontrolních rostlin 4x vyšší oproti rostlinám rostoucím v přítomnosti thoria.

10 DISKUSE

Znečištění životního prostředí toxickými kovy nepříznivě ovlivňuje růst rostlin, lidské zdraví, zemědělství a potravinovou bezpečnost. Snaha snížit nebo odstranit toxické kovy z přírody vede k vytváření nových metod, fyzikálních a chemických, a také fytoimediačních. U fytoimediačních metod je třeba provést reálné terénní hodnocení při kterém se stanoví vhodnost rostlinných druhů pro co nejvyšší účinnost (Ghugue et al., 2023).

Dostupnost kontaminantů pro kořeny rostlin je zcela zásadní pro možnost využití fytoimediace. Rozdíl v dostupnosti toxických kovů v půdě a u hydroponie prokázala řada experimentů (Ramaswami et al., 2001). Shtangeeva (2002, 2010) ve svých pracích popsala rozdílné parametry akumulace thoria v půdě a hydroponii. Rostliny, které se v hydroponii jeví jako vhodné pro fytoimediaci, nemusí při použití v půdě obstát. Z těchto důvodů je vhodné používat hydroponii při prvotních pokusech, ale dále s rostlinami pokračovat na pokusech v půdě (Chen et al., 2005, Hrdinová a kol., 2018).

Akumulace toxických kovů především v kořenové části může být několikanásobně vyšší. V případě experimentů s akumulací uranu byla jeho koncentrace v kořenech 30x větší, než v listech (Shahandeh a Hossner, 2002). Hodnota thoria v rostlinách může být ovlivněna dobou, po kterou byla rostlina thoriu vystavena. Při experimentu s pšenicí se ukázalo, že nejvyšší míra akumulace thoria v rostlinách byla dosažena, když bylo thorium k sazenicím přidáno v době klíčení. Thorium se u sazenic vyskytovalo v celé rostlině. U kontrolní skupiny, pěstované bez expozice thoriem, bylo thorium přidáno až po vyklíčení. Obsah thoria u kontrolní skupiny se zvýšil, ale nedosahoval hodnot skupiny první. I při tomto pokusu byla prokázána vyšší koncentrace thoria v kořenech, než v listech (Shtangeeva, 2005). V našem experimentu s huseničkem rolním byla také koncentrace v listech velmi nízká, blízko detekčního limitu. V kořenech byla akumulace thoria výrazně vyšší.

Vlastnosti půdy ovlivňují schopnost vstřebávání toxických kovů, nejen pomocí pH hodnot, ale i složením. Hlinitá půda umožňuje lepší dostupnost kovů pro rostliny, oproti půdě hlinito-písčité (Shtangeeva, 2002). Chemické vlastnosti kovů uranu a thoria při příjmu rostlinami jsou rozdílné. Je to patrné z pokusů, které byly prováděny za stejných podmínek, a přesto jsou obsahy kovů v rostlinách odlišné. Vliv na příjem může mít kromě složení půdy a vlastností kovů, tak rostlinný druh (Suh et al., 2000, Shtangeeva, 2002).

Složení hydroponických medií má přímý účinek na akumulaci thoria rostlinami (Soudek a kol., 2013). Roztoky s nízkým pH zvyšují vstřebávání thoria, naopak vyšší pH vstřebávání inhibuje. Při nízkém pH dochází k uvolňování thoria z málo rozpustných sloučenin. V přítomnosti fosfátů nebo uhličitanů dochází ke snížení příjmu, protože vznikají komplexy, které jsou pro rostlinu nedostupné (Guo et al., 2010). Absorpci může ovlivnit rozdílná přítomnost kationtů. Kationty zinku při experimentu neměly téměř žádný vliv na akumulaci thoria. Podporující funkci při vstřebání zajišťovaly kationty vápníku, které při experimentu akumulaci usnadnily. Naopak kationty železa absorpci inhibovaly (Wang, 2015, Soudek a kol., 2013, Hrdinová a kol., 2018).

Efekt hormoneze způsobený nízkou dávkou thoria vedl ke zlepšení stavu rostlin u pepřovníku (*Pipernigrum L.*) a okurky (*Cucumissativus L.*) (Hrdinová a kol., 2019). Při pokusu byly naměřeny vyšší hodnoty poměru chlorofylů u genotypů WILD type a At-30Th, v médiu bez fosfátů. To by mohlo znamenat, že působení thoria na tyto dva genotypy bez přítomnosti fosfátů, mělo benefiční účinek. Zvýšení chlorofylu u rostlin s přidaným thoriem popsal i Soudek a kol. (2019) při pozorování působení thoria na rostliny tabáku.

Na udržení rovnováhy vzniklých reaktivních forem kyslíku se podílí řada mechanismů, které si rostliny vyvinuly (Chapman et al., 2018). Buněčný obranný systém rostlin používá pro snížení ROS enzymatické a neenzymatické antioxidanty (Khanna et al., 2023). Kromě antioxidantů snižují stresovou zátěž rostlin i pigmenty, především chlorofyly a karotenoidy. I jejich stanovení lze použít jako ukazatele míry stresové zátěže a rozvoje oxidačního stresu u rostlin (Buchanan et al., 2015). Poměr deepoxidace xantofylových barviv ku celkové hodnotě xantofylových barviv (DEPS) je ovlivňován reaktivními formami kyslíku. Hodnota DEPS odráží schopnost rostlin vykompenzovat vyšší hladinu reaktivních forem kyslíku, které vznikají při stresové zátěži rostlin a vystavení oxidačního stresu (Bortoloti et al., 2022).

11 ZÁVĚR

Zvyšující se poptávka po energiích vede k hledání nových alternativ. Jednou z nich je čtenější využívání thoria, především v energetickém průmyslu. S vyšším využíváním thoria dojde i k jeho vyššímu výskytu v životním prostředí, v roli kontaminantu. Škodlivý účinek thoria na živé organismy, i člověka, je prokázán řadou studií. Pro snížení množství thoria v přírodě lze použít několik metod. Velmi perspektivní metoda do budoucna je fytoremediace. Použití huseníčku rolního, a jeho tří genotypů, sloužilo k pozorování působení thoria na rostliny a sledování jeho akumulace rostlinami. Jak jsme prokázali, thorium se akumulovalo výhradně v kořenech a do listů nebylo prakticky vůbec transportováno. Genotyp huseníčku At-30U prokázal nejvyšší schopnost akumulace thoria z tří testovaných genotypů. Použití média bez fosfátů vedlo k výraznější akumulaci thoria v kořenech. A to díky omezení vzniku nerozpustných sloučenin thoria v médiu a tím pádem ke snížené dostupnosti pro rostlinu.

12 ZDROJE

12.1 ZDROJE LITERATURE

AGARWAL, S., RATHORE, J. Understanding the effects of chemical fertilizers. *Journal of Progressive Agriculture*, 2012, 3.1: 89-90.

AJEESH KRISHNA, T. P., MAHARAJAN, T., VICTOR ROCH, G., IGNACIMUTHU, S., ANTONY CEASAR, S. Structure, function, regulation and phylogenetic relationship of ZIP family transporters of plants. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 662.

ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*, 2019, 2019.

ALVES, R.A., YIN, Q., OLIVEIRA, R.S., SILVA, E.F., NOVO, A.B. Plant growth-promoting bacteria in phytoremediation of metal-polluted soils: Current knowledge and future directions. *Science of the Total Environment*, 2022, 156435.

BANAEE, M., BEITSAYAH, A., PROKIĆ, M. D., PETROVIĆ, T., ZEIDI, A., FAGGIO, C. Effects of cadmium chloride and biofertilizer (Bacilar) on biochemical parameters of freshwater fish, *Alburnus mossulensis*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2023, 109614.

BHAT, S. A., BASHIR, O., UL HAQ, A. A., AMIN, T., RAFIQ, A., ALI, M., HELOISA PINÊ AMÉRICO-PINHEIRO, J., SHER, F. Phytoremediation of heavy metals in soil and water: An eco-friendly, sustainable and multidisciplinary approach. *Chemosphere*, 2022, 303: 134788.

BORTOLOTTI, G. A.; BARON, D. Phytoremediation of toxic heavy metals by brassica plants: A biochemical and physiological approach. *Environmental Advances*, 2022, 8: 100204.

BROADLEY, M. R., WHITE, P. J., HAMMOND, J. P., ZELKO, I. Zinc in plants. *New phytologist*, 2007, 173.4: 677-702.

CAKMAK, I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168.4: 521-530.

- CHAFFAI, R., KOYAMA, H. Heavy metal tolerance in *Arabidopsis thaliana*. In: *Advances in botanical research*. Academic Press, 2011. p. 1-49.
- CHEN, S. B.; ZHU, Y. G.; HU, Q. H. Soil to plant transfer of ²³⁸U, ²²⁶Ra and ²³²Th on a uranium mining-impacted soil from southeastern China. *Journal of Environmental radioactivity*, 2005, 82.2: 223-236.
- CICERI, D., MANNING, D. A. C., ALLANORE, A. Historical and technical developments of potassium resources. *Science of the total environment*, 2015, 502: 590-601.
- DATNOFF, L. E., ELMER, W. H., HUBER, D. M. *Mineral nutrition and plant disease*. American Phytopathological Society (APS Press), 2007. ISBN: [9780890543467](#)
- DENG, Y., LI, J., PENG, T., MA, Q., SONG, X., SUN, X., SHEN, Y., FAN, W. Lithospheric structure in the Cathaysia block (South China) and its implication for the Late Mesozoic magmatism, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volume 291, 2019, Pages 24-34
- DERAKHSHAN N., Z.; JUNG, M. C.; KIM, K. Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. *Environmental geochemistry and health*, 2018, 40: 927-953.
- DOOSE, C. et al. Effects of thorium on bacterial, microalgal and micrometazoan community structures in a periphytic biofilm. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 218: 112276.
- ENGHAG, P. *Encyclopedia of the elements: technical data-history-processing-applications*. John Wiley & Sons, 2008. ISBN 3-527-30666-8
- FRY, C.; THOENNESSEN, M. Discovery of actinium, thorium, protactinium, and uranium isotopes. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 2013, 99.3: 345-364.
- FU, Q., LAI, J., LI, C., JI, X., LUO, X. Phytotoxicity mechanism of the natural radionuclide thorium in *Vicia faba*. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127718.
- FUKUMOTO, M. Radiation pathology: from thorotrast to the future beyond radioresistance. *Pathology international*, 2014, 64.6: 251-262.

- GERHARDT, K. E.; GERWING, P. D.; GREENBERG, B. M. Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Science*, 2017, 256: 170-185.
- GHUGE, Sandip A., et al. Comprehensive mechanisms of heavy metal toxicity in plants, detoxification, and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 450: 131039.
- GUPTA, U. C., JAME, Y. W., CAMPBELL, C. A., LEYSHON, A. J., & NICHOLAICHUK, W.. Boron toxicity and deficiency: a review. *Canadian Journal of Soil Science*, 1985, 65.3: 381-409.
- HÄNSCH, R., MENDEL, R. R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current opinion in plant biology*, 2009, 12.3: 259-266.
- HEJNÝ, S., SLAVÍK, B., ed. *Květena České republiky*. 2., nezm. vyd. Praha: Academia, 2003. ISBN 80-200-1090-4.
- HOSSAIN, M. B., JAHIRUDDIN, M., PANAUULLAH, G. M., LOEPPERT, R. H., ISLAM, M. R., DUXBURY, J. M. Spatial variability of arsenic concentration in soils and plants, and its relationship with iron, manganese and phosphorus. *Environmental Pollution*, 2008, 156.3: 739-744.
- HOWELL, R. W. Patient exposures and consequent risks from nuclear medicine procedures. *Health physics*, 2011, 100.3: 313.
- HRDINOVÁ, A., LHOTÁKOVÁ, Z., ALBRECHTOVÁ, J. (2019). Význam příjmu a akumulace thoria rostlinami pro fytoremediace. *Chemické Listy*, 113(6), 357–363. Získáno z <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/3379>
- HUBER, D. M., JONES, J. B. The role of magnesium in plant disease. *Plant and soil*, 2013, 368: 73-85.
- HUGHART, J. L., BASHOR, M. M. *Industrial chemicals and terrorism: human health threat analysis, mitigation and prevention*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1999.
- IMRAN, M.; GURMANI, Zulfiqar Ali. Role of macro and micro nutrients in the plant growth and development. *Science Technology and development*, 2011, 30.3: 36-40.

- KABATA-PENDIAS, A. (2000). Trace Elements in Soils and Plants (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420039900>
- KAISER, B. N., GRIDLEY, K. L., NGAIRE BRADY, J., PHILLIPS, T., TYERMAN, S. D. The role of molybdenum in agricultural plant production. *Annals of botany*, 2005, 96.5: 745-754.
- KARAKURT, H., ASLANTAS, R. Effects of some plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) strains on plant growth and leaf nutrient content of apple. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 2010, 18.1: 101-110.
- KAZIMI, M. S., CZERWINSKI, K. R.; DRISCOLL, M. J.; HEJZLA, P.; MEYER, J. E. On the use of thorium in light water reactors. 1999.
- KHAN, T. A., MAZID, M. Nutritional significance of sulphur in pulse cropping system. *Biology and medicine*, 2011, 3.2: 114-133.
- KHARE, Deepa, et al. Root avoidance of toxic metals requires the GeBP-LIKE 4 transcription factor in Arabidopsis thaliana. *New Phytologist*, 2017, 213.3: 1257-1273.
- KIM, S. A., GUERINOT, M. L. Mining iron: iron uptake and transport in plants. *FEBS letters*, 2007, 581.12: 2273-2280.
- KOCHHANN, D., PAVANATO, M., LLESUY, S., CORREA, L., KONZEN RIFFEL, A., LORO, V., MESKO, M., FLORES, Ě. Bioaccumulation and oxidative stress parameters in silver catfish (*Rhamdia quelen*) exposed to different thorium concentrations. *Chemosphere*, 2009, 77.3: 384-391.
- KRÄMER, U., TALKE, I. N., HANIKENNE, M. Transition metal transport. *FEBS letters*, 2007, 581.12: 2263-2272.
- LANGMUIR D, HERMAN J.S. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochim Cosmochim Acta*. 1980;44(11):1753, ISSN 0016-7037
- LEITERER, A. B., BERARD, P., MENETRIER, F. Thorium and health: state of the art. 2010.
- LIPA, J. Book Review Datnoff LE, Elmer WH, Huber DM (Eds.). 2007. Mineral Nutrition and Plant Disease. APS Press-The American Phytopathological Society, St. Paul, Minnesota, USA 278 pp. ISBN 978-0-89054-346-7. *Journal of Plant Protection Research*, 2008, 48.1: 106.

- MAHARAJAN, T., CEASAR, S. A., AJEESH KRISHNA, T. P. Finger millet (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn): Nutritional importance and nutrient transporters. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2022, 41.1: 1-31.
- MAHARAJAN, T., CHELLASAMY, G., TP, A., CEASAR, S. A., YUN, K. The role of metal transporters in phytoremediation: A closer look at *Arabidopsis*. *Chemosphere*, 2022, 136881.
- MERTENS, A., HOREMANS, N., SAENEN, E., NAUTS, R., CUYPERS, A.. Calcium affects uranium responses in *Arabidopsis thaliana*: From distribution to toxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 185: 101-111.
- NASER, H., RAHMAN, M., SULTANA, S., QUDDUS, M., HOSSAIN, M. (2018). Heavy metal accumulation in leafy vegetables grown in industrial areas under varying levels of pollution. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 43(1), 39–51. <https://doi.org/10.3329/bjar.v43i1.36157>
- OLADOYE, P. O., OLOWE, O. M., ASEMOLOYE, M. D. Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature. *Chemosphere*, 2022, 288: 132555.
- OZALP, M. The investigation of borax pentahydrate influences with double components in varnish applications of wood materials. *Wood Res*, 2008, 53.4: 121-128.
- PENG, C., MA, Y., DING, Y., HE, X., ZHANG, P., LAN, T. Influence of speciation of thorium on toxic effects to green algae *Chlorella pyrenoidosa*. *International journal of molecular sciences*, 2017, 18.4: 795.
- PETTERSSON, H. B. L., HANCOCK, G., JOHNSTON, A., MURRAY, A. S.. Uptake of uranium and thorium series radionuclides by the waterlily, *Nymphaea violacea*. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1993, 19.2: 85-108.
- PRINCI, M. P., LUPINI, A., ARANITI, F., LONGO, C., MAUCERI, A., SUNSERI, F., ABENAVOLI, M. R. Boron toxicity and tolerance in plants: Recent advances and future perspectives. *Plant metal interaction*, 2016, 115-147.
- PROST, I., DHONDT, S., ROTHE, G., VINCENTE, J. Evaluation of the antimicrobial activities of plant oxylipins supports their involvement in defense against pathogens. *Plant physiology*, 2005, 139.4: 1902-1913.

- REEVES, R. D., et al. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements. *New Phytologist*, 2018, 218.2: 407-411.
- RHEE, S. Y., BEAVIS, W., BERARDINI, T. Z., CHEN, G., DIXON, D., DOYLE, A., ... & ZHANG, P. The Arabidopsis Information Resource (TAIR): a model organism database providing a centralized, curated gateway to Arabidopsis biology, research materials and community. *Nucleic acids research*, 2003, 31.1: 224-228.
- SHANE, M. W., LAMBERS, H. Cluster roots: a curiosity in context. *Plant and soil*, 2005, 274: 101-125.
- SHAH, V., DAVEREY, A. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 2020, 18: 100774.
- SHTANGEEVA, I., AYRAULT, S. Phytoextraction of thorium from soil and water media. *Water, air, and soil pollution*, 2004, 154: 19-35.
- SHTANGEEVA, I.; AYRAULT, S.; JAIN, J. Thorium uptake by wheat at different stages of plant growth. *Journal of environmental radioactivity*, 2005, 81.2-3: 283-293.
- SHTANGEEVA, I. Uptake of uranium and thorium by native and cultivated plants. *Journal of environmental radioactivity*, 2010, 101.6: 458-463.
- SIDDIQUI, M. H., AL-WHAIBI, M. H., BASALAH, M. O. Interactive effect of calcium and gibberellin on nickel tolerance in relation to antioxidant systems in *Triticum aestivum* L. *Protoplasma*, 2011, 248: 503-511.
- SIEGFRIED, R. Humphry Davy and the elementary nature of chlorine. *Journal of Chemical Education*, 1959, 36.11: 568.
- SINGH, J., KALAMDHAD, A. S. Effects of heavy metals on soil, plants, human health and aquatic life. *Int J Res Chem Environ*, 2011, 1.2: 15-21.
- SOUDEK, P., KUFNER, D., PETROVÁ, Š., MIHALJEVIČ, M., VANĚK, T. Composition of hydroponic medium affects thorium uptake by tobacco plants. *Chemosphere*, 2013, 92.9: 1090-1098.
- SZE, H., LIANG, F., HWANG, I., CURRAN, A. C. Diversity and regulation of plant Ca^{2+} pumps: insights from expression in yeast. *Annual review of plant biology*, 2000, 51.1: 433-462.

SZYMAŃSKA, K., STRUMIŃSKA-PARULSKA, D., FALANDYSZ, J. Uranium (234U, 238U) and thorium (230Th, 232Th) in mushrooms of genus *Leccinum* and *Leccinellum* and the potential effective ionizing radiation dose assessment for human. *Chemosphere*, 2020, 250: 126242.

TAN, H. L., LIM, Y. C., NG, L. Y., LIM, Y. P. Plant-mediated synthesis of iron nanoparticles for environmental application: Mini review. *Materials Today: Proceedings*, 2023.

TANG, K. H. D. Phytoremediation: Where do we go from here?. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2023, 102721.

TLUSTOŠ, P., SZÁKOVÁ, J., HRUBÝ, J., HARTMAN, I., NAJMANOVÁ, J., NEDĚLNÍK, J., PAVLÍKOVÁ, D., BATYSTA, M. Removal of As, Cd, Pb, and Zn from contaminated soil by high biomass producing plants. *Plant Soil Environ*, 2006, 52.9: 413-423.

TOGNACCHINI, Alice, et al. Root foraging and avoidance in hyperaccumulator and excluder plants: a rhizotron experiment. *Plant and Soil*, 2020, 450: 287-302.

TRIPATHI, D. K., SINGH, V. P., CHAUHAN, D. K., PRASAD, S. M. Role of macronutrients in plant growth and acclimation: recent advances and future prospective. *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes: Volume 2*, 2014, 197-216.

UCHIDA, R. Essential nutrients for plant growth: nutrient functions and deficiency symptoms. *Plant nutrient management in Hawaii's soils*, 2000, 4: 31-55.

VANDENHOVE, H., VAN HEES, M., WANNIJN, J., WOUTERS, K., WANG, L. Can we predict uranium bioavailability based on soil parameters? Part 2: soil solution uranium concentration is not a good bioavailability index. *Environmental Pollution*, 2007, 145.2: 577-586.

VHAHANGWELE, M.; MUGERA, G. W. Journal of Environmental Chemical Engineering the potential of ball-milled South African bentonite clay for attenuation of heavy metals from acidic wastewaters: Simultaneous. *Biochem. Pharmacol.*, 2015, 3: 2416-2425.

WANG, G., QUE, F., XU, ZS., WANG, F., XIONG, AS. Exogenous gibberellin altered morphology, anatomic and transcriptional regulatory networks of hormones in carrot root and shoot. *BMC Plant Biology*, 2015, 15: 1-12.

WHITE, P. J., BROADLEY, M. R. Calcium in plants. *Annals of botany*, 2003, 92.4: 487-511.

WHO, Indoor Air Pollutants. Exposure and Health Effects. *EURO Reports and Studies*, 1983, 78.

YADAV, R., DAS, S. K., ALI, M., PANDEY, B. N., KUMAR, A. Role of calcium ion channels and cytoskeletal proteins in Thorium-232 induced toxicity in normal human liver cells (WRL 68) and its validation in swiss mice. *Chemosphere*, 2022, 288: 132557.

YADAV, R., AGRAWAL, A. K., ALI, M., KUMAR, A., SINGH, B. Thorium-induced anatomical and histopathological changes in liver of Swiss mice. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, 2018, 10: 97-106.

YANG, S. X., DENG, H., LI, M. S. Manganese uptake and accumulation in a woody hyperaccumulator, *Schima superba*. *Plant Soil Environ*, 2008, 54.10: 441-446.

ZARARSIZ, A.; KIRMAZ, R.; ARIKAN, P. Field study on thorium uptake by plants within and around of a thorium ore deposit. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 1997, 222: 257-262.

12.2 ZDROJE OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Thorium (Energy education (online)) [cit. 20. 02. 2023], [Thorium - Energy Education](#)

Obrázek 2: Strukturní vzorec chlorofylů (Biochemie: chemický pohled na biologický svět. 2018)

Obrázek 3: Xantofylový cyklus (ResearchGate, Improvement of plant heat tolerance by modification of xanthophyll cycle activity, autor: Magdalena Trojak, online)[cit. 20.02:2023], [Reactions of the xanthophyll cycle typical for higher plants... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)

Obrázek 4: Huseníček rolní (ElifeSciences, The Natural History of Model Organisms: Planting molecular functions in an ecological context with *Arabidopsis thaliana*, autor:

Ute Krämer, online) [cit. 20. 02. 2023], [The Natural History of Model Organisms: Planting molecular functions in an ecological context with Arabidopsis thaliana | eLife \(elifesciences.org\)](#)

13 SEZNAM GRAFŮ, TABULEK A OBRÁZKŮ

13.1 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Akumulace thoria v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.....	33
Graf 2 Obsah draslíku v listech testovaných rostlin na různých typech média.	34
Graf 3 Obsah draslíku v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.	34
Graf 4 Obsah vápníku v listech testovaných rostlin na různých typech média.	35
Graf 5 Obsah vápníku v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.	36
Graf 6 Obsah fosforu v listech testovaných rostlin na různých typech média.....	37
Graf 7 Obsah fosforu v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.....	37
Graf 8 Obsah zinku v listech testovaných rostlin na různých typech média.	38
Graf 9 Obsah zinku v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.	39
Graf 10 Obsah manganu v listech testovaných rostlin na různých typech média.....	40
Graf 11 Obsah manganu v kořenech testovaných rostlin na různých typech média.	40
Graf 12 Poměr chlorofylů a/b v listech testovaných rostlin na různých typech média...	41
Graf 13 Celkový obsah karotenoidů v listech testovaných rostlin na různých typech média.	42
Graf 14 Poměr deepoxidovaných xantofylů v listech testovaných rostlin na různých typech média.	43

13.2 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Složení Hoaglandova média	58
Tabulka 2 Naměřené hodnoty nutrientů u listů	59
Tabulka 3 Naměřené hodnoty nutrientů u kořenů	59
Tabulka 4 Naměřené hodnoty pigmentů.....	60

13.3 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Thorium	14
Obrázek 2 Strukturní vzorec chlorofylu.....	23
Obrázek 3 Xantofylový cyklus.....	24
Obrázek 4 Huseníček rolní (<i>Arabidopsis thaliana</i>)	29

14 SEZNAM ZKRATEK

DEPS	poměr deepoxidace xantofylových barviv ku celkové hodnotě xantofylových barviv
EDDS	kyselina ethylendiamindijantarová
EDTA	ethylendiamintetraacetát
GSH	redukovaný glutation
GSSG	glutathion disulfid
HM	Hoaglandovo médium
HPLC	vysokoučinná kapalinová chromatografie
NADPH	Nikotinamidadeninukleotidfosfát
nanoP	Hoaglandovo médium bez $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ s přidaným nano-hydroxyapatitem
NTA	kyselina nitrilotrioctová
-P	Hoaglandovo médium bez $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
ROS	reaktivní formy kyslíku

15 PŘÍLOHY

15.1 SLOŽENÍ HOAGLANDOVA MÉDIA

Látka	[c g.l ⁻¹] zásobního roztoku
1M NH ₄ H ₂ PO ₄	115
1M KNO ₃	101,1
1M Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236,1
1M MgSO ₄ ·7H ₂ O	246,5
Citrát železitý	6
	[c mg. l⁻¹]
KI	7,5
H ₃ BO ₃	30
MnSO ₄ ·4H ₂ O	132
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	20
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	2,5
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,25
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0,25
Na ₂ EDTA	373
FeSO ₄ ·7H ₂ O	278
Inositol	1000
Kyselina nikotinová	10
Pyridoxin HCl	10
ThiaminHCl	100

Tabulka 1 Složení Hoaglandova média

15.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Všechny hodnoty uvedené v tabulkách naměřených hodnot nutrientů v listech a kořenech jsou v jednotkách mikrogram na gram sušiny ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$).

	draslík	vápník	fosfor	zinek	mangan
At-30U - nanoP +Th	67,69	49,9	7,18	0,087	3,9
At-30U - -P +Th	48,62	39,22	3,71	0,068	4,56
At-30U - Hoagland +Th	52,75	42,12	5,49	0,38	4,61
At-30U – nanoP	60,64	42,26	7,99	0,078	4,08
At-30U - -P	58,57	45,39	4,37	0,01	5,056
At-30U - Hoagland	63,62	36	8,47	0,116	4,94
At-30Th - nanoP +Th	53,92	46,43	7,45	0,054	3,69
At-30Th - -P +Th	38,96	27,46	4,25	0,062	3,12
At-30Th - Hoagland +Th	28,96	22,55	3,9	0,056	2,9
At-30Th - nanoP	59,65	50,52	9,2	0,064	4,69
At-30Th - -P	53,19	43,2	4,87	0,09	4,83
At-30Th – Hoagland	53,05	37,74	7,65	0,066	4,78
WILD - nanoP +Th	54,69	45,48	8,02	0,055	3,38
WILD - -P +Th	32,68	21,95	4,18	0,051	3,15
WILD - Hoagland +Th	36,78	26,23	5,48	0,066	3,43
WILD - nanoP	46,37	42,6	7,8	0,04	3,36
WILD - -P	49,31	36,15	2,75	0,074	3,65
WILD - Hoagland	55,53	40,11	8,41	0,086	3,93

Tabulka 2 Naměřené hodnoty nutrientů v listech

	draslík	vápník	fosfor	zinek	mangan	thorium
At-30U - nanoP +Th	71,06	9,10	15,91	0,13	0,79	6,81
At-30U - -P +Th	22,80	3,94	7,00	0,07	0,47	46,98
At-30U - Hoagland +Th	30,08	2,82	16,05	0,10	0,14	28,44
At-30U – nanoP	79,36	25,28	18,75	0,20	0,98	
At-30U - -P	85,36	6,40	5,56	0,44	0,97	
At-30U - Hoagland	78,82	6,14	13,25	0,74	0,74	
At-30Th - nanoP +Th	69,68	10,15	16,50	0,22	0,87	5,83
At-30Th - -P +Th	21,01	1,75	11,64	0,07	0,05	40,84
At-30Th - Hoagland +Th	11,62	1,00	16,63	0,04	0,16	27,92
At-30Th - nanoP	70,83	11,21	12,55	0,13	0,94	
At-30Th - -P	72,65	5,54	5,79	0,36	0,91	
At-30Th – Hoagland	70,85	5,23	11,93	0,28	1,04	
WILD - nanoP +Th	57,30	8,61	15,98	0,09	0,76	7,49
WILD - -P +Th	12,69	1,47	10,17	0,06	0,16	28,58
WILD - Hoagland +Th	13,46	1,36	17,56	0,10	0,24	25,89
WILD - nanoP	65,96	11,91	12,92	0,09	0,87	
WILD - -P	57,85	4,53	2,99	0,13	1,17	
WILD - Hoagland	64,37	5,03	11,08	0,65	1,01	

Tabulka 3 Naměřené hodnoty nutrientů v kořenech

	Neoxanthin [mg g ⁻¹ DW]	Violaxanthin [mg g ⁻¹ DW]	Lutein [mg g ⁻¹ DW]	Zeaxanthin [mg g ⁻¹ DW]	chlorofyl a [mg g ⁻¹ DW]	chlorofyl b [mg g ⁻¹ DW]	β-karoteny [mg g ⁻¹ DW]	Poměr chlorofylů a/b [rel. U.]	DEPS [rel. U.]	Karotenoidy celkově [mg g ⁻¹ DW]	Pigmenty xantofylového cyklu [mg g ⁻¹ DW]
At-30U- nanoP +Th	14,33	17,13	49,03	4,91	158,42	68,89	32,50	2,3	0,245	119,84	23,97
At-30U- -P +Th	24,56	65,23	105,63	8,62	414,98	155,91	32,41	2,662	0,133	239,80	77,19
At-30U- Hoagland +Th	24,28	85,07	157,33	2,16	278,65	109,88	45,57	2,536	0,033	315,87	88,69
At-30U- nanoP	34,12	86,08	149,08	6,08	379,31	142,06	15,87	2,670	0,075	293,11	94,04
At-30U- Hoagland	14,32	82,71	90,07	4,66	293,40	107,15	29,84	2,738	0,063	223,44	89,21
At-30U- -P	22,79	49,79	104,71	4,16	253,89	92,07	28,15	2,757	0,088	211,08	55,44
At-30Th- -P	12,65	78,69	113,30	3,22	335,48	149,21	18,68	2,248	0,052	228,90	84,27
At-30Th- Hoagland	16,35	15,71	20,29	2,58	150,49	52,28	10,72	2,879	0,160	66,65	19,30
At-30Th- nanoP	19,23	58,28	41,92	3,49	197,36	80,33	14,44	2,457	0,065	138,57	62,98
At-30Th- -P +Th	17,79	53,74	123,67	4,56	317,56	120,03	32,01	2,646	0,088	233,18	59,71
At-30Th- Hoagland +Th	13,16	48,73	157,65	1,26	203,86	100,06	26,60	2,037	0,031	248,07	50,66
At-30Th- nanoP +Th	16,02	35,94	43,51	4,45	173,04	96,47	47,59	1,794	0,123	148,86	41,74
WILD -P	29,39	60,67	59,65	5,09	210,20	114,99	9,83	1,828	0,088	166,29	67,42
WILD Hoagland	18,85	12,39	40,19	3,96	133,73	66,42	17,73	2,013	0,255	94,02	17,24
WILD nanoP	19,83	11,51	28,67	2,32	96,79	46,18	11,12	2,096	0,185	74,11	14,50
WILD -P +Th	17,77	21,92	47,86	2,16	139,19	50,08	16,89	2,779	0,097	107,04	24,52
WILD Hoagland +Th	19,74	46,93	85,43	2,23	131,82	59,75	15,20	2,206	0,047	169,76	49,39
WILD nanoP +Th	13,29	39,38	51,95	3,30	121,36	73,42	22,49	1,653	0,086	131,30	43,57

Tabulka 4 Naměřené hodnoty pigmentů