

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra pedologie a ochrany půd



Adsorpce léčiv obsažených v půdě rostlinami

Diplomová práce

Autor práce: Bc. Barbara Vyskočilová

Obor studia: Hodnocení a ochrana půdy

Vedoucí práce: prof. Ing. Radka Kodešová, CSc.

Konzultant práce: Ing. Aleš Klement, Ph.D.

© 2019 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Adsorpce léčiv obsažených v půdě rostlinami" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 12. 4. 2019

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala prof. Ing. Radce Kodešové, CSc. za její odborné vedení diplomové práce, rady a trpělivost. Dále bych ráda poděkovala Ing. Aleši Klementovi, Ph.D. za jeho výborné vedení experimentu a ochotu. V neposlední řadě bych také chtěla poděkovat své rodině a přátelům, že mi umožnili bezstarostně studovat.

Adsorpce léčiv obsažených v půdě rostlinami

Souhrn

V poslední době je kontaminace životního prostředí léčivými látkami uznávána jako potenciální hrozba. Léčiva, která se do půdy mohou dostat po aplikaci přečištěných odpadních vod a čistírenských kalů, mohou být vstřebávána kořeny rostlin, odkud se pak šíří do dalších částí rostlin a představují riziko pro lidské zdraví, hlavně pokud jde o potravinářské plodiny.

Tato práce sledovala vstřebávání tří léčiv (atenololu, carbamazepinu a sulfamethoxazolu) ze tří typů půd do rostlin rožky seté, kozlíčku polního a špenátu setého. Rostliny byly zavlažovány vodou kontaminovanou jedním léčivem, nebo jejich směsí a následně byly vyhodnoceny jejich koncentrace v různých částech rostlin. Přestože je carbamazepin v půdě velmi stabilní, ve všech rostlinách byly naměřeny vysoké koncentrace nejen této látky ale i jeho metabolitů. Zatímco v kořenech rostlin byly jeho koncentrace obdobné jako u ostatních léčiv, v listech carbamazepin a jeho metabolity, především carbamazepin-10,11-epoxid, dosahovaly dominantních hodnot hlavně u kozlíčku a špenátu. Naopak v listech rožky seté byly zaznamenány velmi nízké hodnoty metabolitů carbamazepinu, což ukazuje na malou schopnost této rostliny léčivo metabolizovat. Atenolol a jeho metabolity byly také detekovány u všech rostlin, kde převážně v kořenech dosahoval nejvyšších koncentrací metabolit atenololu - kyselina atenololová. Sulfamethoxazol je v půdě rychle degradován, přesto byl, i s jeho metabolity, v rostlinných tkáních naměřen. Vstřebávání léčiv do rostlin a jejich následná metabolizace závisela převážně na druhu rostliny, dále na typu půdy a jejich vlastnostech.

Klíčová slova: léčiva, půda, rostliny, kořeny, metabolity, přestup kontaminantu do rostlin

Uptake of pharmaceuticals present in soil by plants

Summary

Lately the contamination of the environment by pharmaceuticals is considered as a potential threat. Pharmaceuticals, which can occur in soil due to an application of treated waste water and biosolid, are uptaken by plant roots, from where pharmaceuticals are transferred into other plant parts and represent a risk for a human health, especially if the plants are consumed directly by humans.

This work focused on the uptake of three pharmaceuticals (atenolol, carbamazepine and sulfamethoxazole) from three types of soils by three species of plants (arugula, lamb's lettuce and spinach). Plants were irrigated with water contaminated by a single pharmaceutical or mixture of all pharmaceuticals and next their concentrations in different parts of the plants were evaluated. Despite that carbamazepine is very stable in soils, high concentrations of this compound as well as of its metabolites were measured in all plants. While the concentrations of carbamazepine in roots were similar to the concentrations of the remaining two pharmaceuticals and their metabolites, the concentrations of carbamazepine and its metabolites, primarily carbamazepine-10,11-epoxide, in leaves were dominant, especially in leaves of lamb's lettuce and spinach. On the other hand, the very low concentrations of carbamazepine metabolites were found in leaves of arugula, which indicates a very low efficiency of this plant to metabolize carbamazepine. Atenolol and its metabolite were evaluated in all plant species. The highest concentrations of its metabolite atenolol acid were measured in roots. Despite that sulfamethoxazole quickly dissipates from soils, it and its metabolites were found in all plants. Uptake of pharmaceuticals and their metabolites by plants depended especially on the plant species, soil type and their properties.

Keywords: soils, pharmaceuticals, roots, metabolites, root-uptake

Obsah

1. Úvod	1
2. Hypotéza a cíl práce	2
3. Literární rešerše	3
3.1. Zdroje léčiv v životním prostředí	3
3.1.1 Statková hnojiva	3
3.1.2 Potencionální výskyt léčiv v odpadních vodách	5
3.2 Chování léčiv v půdě	8
3.2.1 Sorpce a degradace léčiv	8
3.3 Vstup léčiv do rostlin	11
3.3.1 Mechanismy příjmu kontaminantů rostlinami	11
3.3.2 Pěstování rostlin v hydroponické kultuře	12
3.3.3 Pěstování rostlin v půdě	12
4. Metodika	13
4.1 Charakteristika vybraných rostlin	13
4.1.1 Roketa setá	13
4.1.2 Kozlíček polní	13
4.1.3 Špenát setý	14
4.2. Charakteristika vybraných půd	14
4.2.1 Černozem modální	14
4.2.2 Kambizem modální	14
4.2.3 Regozem modální	14
4.3 Fyzikální a chemické vlastnosti půd	15
4.3.1 pH půdy	15
4.3.2 Obsah uhličitánů	15
4.3.3 Půdní organický uhlík	15
4.3.4 Půdní salinita	15
4.3.5 Kationtová výměnná kapacita	15
4.3.6 Výměnná a hydrolytická acidita	16
4.4 Léčiva	17
4.4.1 Atenolol	17
4.3.2 Carbamazepin	19
4.3.3 Sulfamethoxazol	21
4.5 Experimentální část	23
4.5.1 Design experimentu	23
4.5.2 Metodika odběrů vzorků	24
5. Výsledky	27
5.1 Hmotnosti lyofilizovaných listů a kořenů rostlin	27
5.2 Koncentrace a procentuální zastoupení léčiv v jednotlivých částech rostlin	30
5.3 Koncentrace léčiv v půdách po pěstování rostlin zavlažovaných léčivou	36
6. Diskuze	40
7. Závěr	42
8. Přehled literatury a použitých zdrojů	43
9. Samostatné přílohy	I

1. Úvod

Kontaminace životního prostředí léčivy již byla v posledních letech dokázána v řadě různých studií (Thiele-Bruhn, 2003; Fent et al., 2006). V povrchových i podzemních vodách se nachází mnoho farmaceutických preparátů, prostředků osobní hygieny a péče, a také nedovolených drog (Dodgen et al., 2013), odtud se tyto látky dostávají do životního prostředí. Farmaceutické výrobky jsou v současné době hojně vyráběny a využívány pro lidské i veterinární potřeby (Zhang et al., 2016). Většina těchto látek je vstřebávána a tělem metabolizována, procento farmaceutických látek však nezměněné projde lidským či zvířecím tělem a je vylučováno močí. Toto je jeden ze způsobů, kterým se zbytky léčiv dostávají do odpadních vod. Jako další pravděpodobné zdroje tohoto znečištění jsou septiky, hnojení čistírenskými kaly, špatně zabezpečené skládky, unikající kanalizace nebo hospodářská zvířata, kterým jsou často podávána různá antibiotika i růstové hormony (Greenhagen et al., 2014). Farmaceutika v odpadní vodě byla detekována rovněž poblíž drůbežárny, kde jsou drůbeži ke krmivu přidávána růstová antibiotika (Topal, 2015).

Používání přečištěných odpadních vod a čistírenských kalů přináší mnoho ekonomických a environmentálních přínosů, zvláště v oblastech, kde panuje dlouhodobé sucho a je zde nedostatek pitné a závlahové vody (Wu et al., 2015). Při zavlažování zemědělských rostlin touto zpracovanou odpadní vodou, mohou kontaminující látky vstupovat do rostlin, kde se translokují do různých rostlinných částí, metabolizují se anebo se jich část hromadí v nezměněné podobě (Wu et al., 2013). Tyto kontaminující látky se následně, při požití plodin člověkem, mohou dostat do lidského těla.

Mobilita léčiv v půdě je ovlivněna dvěma hlavními mechanismy – sorpcí a degradací. Sorpce je schopnost půdy poutat ionty a celé molekuly sloučenin z půdního roztoku na půdní částice. Sorbovaná látka je tak chráněna před dalším vyplavením do půdního roztoku. Sorpce je ovlivňována chemickými vlastnostmi léčiv, teplotou, vlhkostí, iontovou silou

a fyzikálně-chemickými vlastnostmi půdy jako jsou zrnitost, obsah jílu, prachu a písku, obsah organického uhlíku, salinita, pH půdy či acidita (Kurwadkal et al., 2011; Kodešová et al., 2015; Kodešová et al., 2016). Degradace organických látek může probíhat pomocí fyzikálních, chemických a biologických vlivů. V půdě je nejčastějším degradačním vlivem činnost organických mikroorganismů (Hajšlová and Kocourek, 2007). Čím jsou podmínky pro život organických mikroorganismů vhodnější, tím rychleji degradace organických látek probíhá.

2. Hypotéza a cíl práce

Hypotéza: Přestup léčiv, vyskytujících se v půdě, do rostlin závisí na chemických vlastnostech léčiv, fyziologických vlastnostech rostlin a půdních podmínkách. Koncentraci látky v rostlinách je možné predikovat na základě znalosti půdních podmínek a charakteristik látky.

Cílem této práce je proto vyhodnotit:

- vstřebávání vybraných léčiv třemi druhy listové zeleniny, které byly pěstovány ve třech půdních typech
- zhodnotit vliv půdního prostředí na rostliny
- zhodnotit vliv léčiv na růst rostlin
- zhodnotit vstřebávání a distribuci léčiv v rostlinách
- vyhodnotit vznik metabolitů léčiv v těle rostlin
- zjistit vliv léčiva aplikovaného samostatně a ve směsi
- zhodnotit vliv půdy na vstřebávání léčiv do rostlin.

3. Literární rešerše

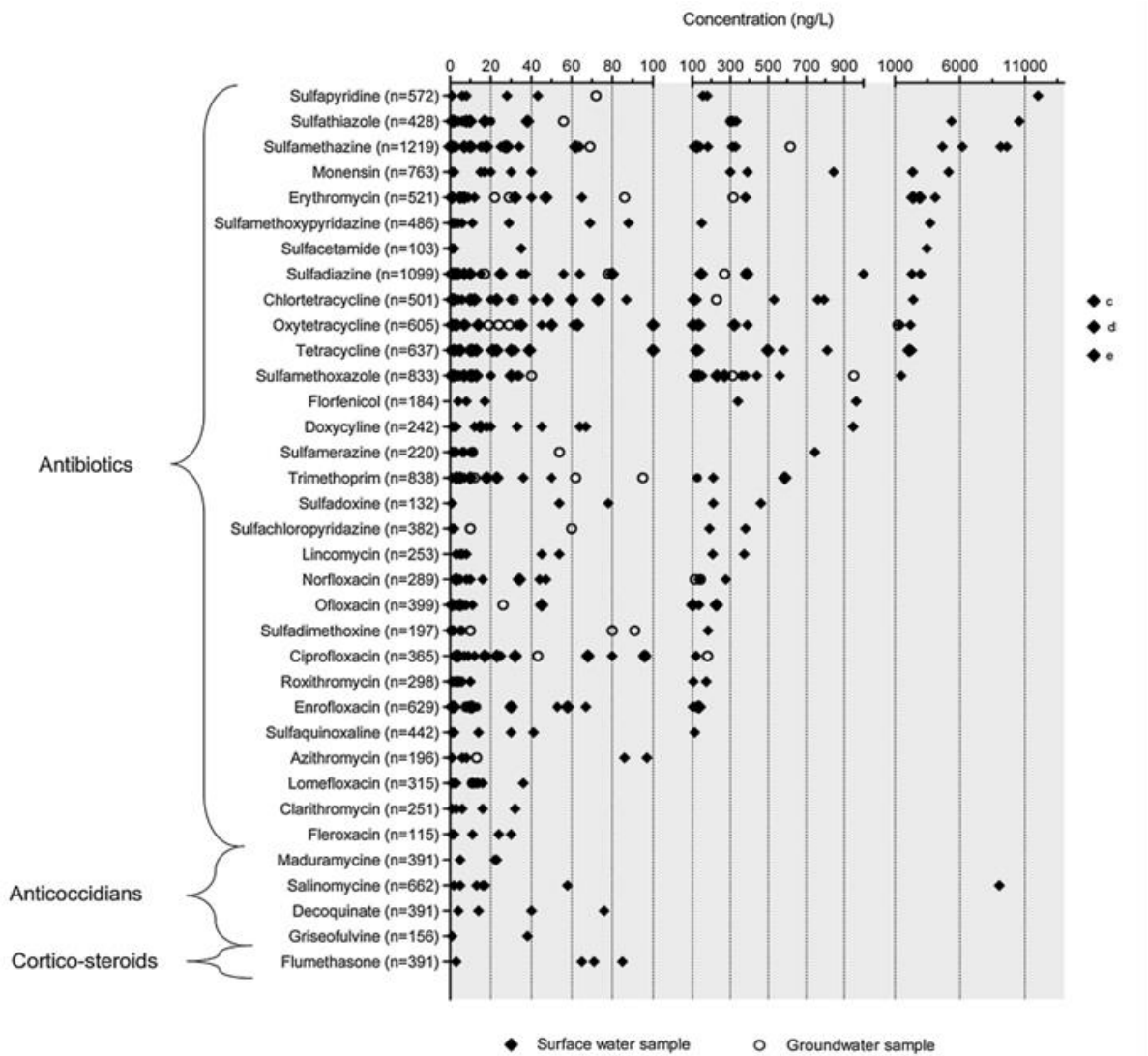
3.1. Zdroje léčiv v životním prostředí

Stále zvyšující se výroba a užíváním humánních i veterinárních léčiv a přípravků osobní péče vede ke zvyšování jejich koncentrace v životním prostředí. Tyto látky nejsou zcela eliminovány v těle organismů a mohou se vylučovat do odpadních vod a následně se dostávat do životního prostředí. Zde mohou způsobovat značné problémy pro ostatní organismy. Jedním ze zdrojů znečištění životního prostředí léčiv jsou statková hnojiva, kam se tyto látky dostávají močí a výkaly hospodářských zvířat. Dalším výrazným zdrojem kontaminace životního prostředí jsou odpadní vody, které mohou kontaminovat jak povrchové, tak podzemní vody a také čistírenské kaly používané jako hnojivo. Mnohé studie z posledních let dokazují vysoké koncentrace chemických látek, včetně farmaceutik a přípravků osobní péče, v již přečištěných odpadních vodách v čistírnách odpadních vod, které jsou pak vypouštěny do vodotečí (Gros et al., 2010; Kim et al., 2007).

3.1.1 Statková hnojiva

Antibiotika a jiná léčiva jsou hojně využívána k léčebným účelům infekčních onemocnění u lidí a zvířat. Ve veterinární praxi se také užívají ke zvýšení účinnosti krmiva a k podpoře růstu zvířat. Rezidua těchto léčiv jsou ve vysoké koncentraci vylučována zvířaty. Do půdy se mohou dostat přímo močí a výkaly zvířat, nebo použitím statkových hnojiv na zemědělské půdy a následným vyplavováním reziduálních léčiv. To může následně ohrožovat kvalitu povrchových i podzemních vod. Léčiva se do prostředí mohou dostat také přímým vyřazením nespotřebovaného živočišného krmiva a jeho vyplavením během napájení či deště.

Jelikož je vodovodní voda vyráběna z vody přírodní, Charuaud et al., (2018) analyzovali studie zabývající se výskytem veterinárních léčiv v povrchových a podzemních vodách z let 2007 až 2017. Veterinární léčiva byla v povrchových i podzemních vodách velice rozšířená, a to v hodnotách 1 ng.l^{-1} až $255 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$ (Obrázek 1). Jejich výskyt v přírodě nejvíce ovlivňuje prodej a využití. Nejprodávanějšími léčivami jsou tetracyklinová antibiotika, následována penicilinem, makrolidovými antibiotiky a sulfonamidy. Prodej těchto léčiv se mezi lety 2007 a 2017 stále snižoval. Ve studiích bylo zjištěno, že veterinární léčiva mohou být degradována, přeměňována biodegradací, hydrolýzou či fotolýzou. Zvláště u povrchových vod převládá proces fotodegradace. V kohoutkové vodě byla veterinární léčiva detekována do koncentrace 100 ng.l^{-1} , což nevede k akutní toxicitě a vlivu na lidský organismus, nejsou však známy jejich reakce s mikroprvky (pesticidy, biocidy, rezidua lidských léčiv) nacházejícími se v pitné vodě.



vodách (2007 – 2017) (n vzorků > 100) (Charuaud et al., 2018)

n = počet vzorků, ve kterých bylo léčivo vyhledáno

c - hodnota mimo stupnici - Chlortetracycline: 44 $\mu\text{g.l}^{-1}$

d - hodnota mimo stupnici - Oxytetracycline: 68 $\mu\text{g.l}^{-1}$

e - hodnota mimo stupnici - Tetracycline: 255 $\mu\text{g.l}^{-1}$

Obrázek 1. Rozsahy koncentrací (ng.l^{-1}) veterinárních léčiv nejčastěji vyhledávaných v přírodních vodách (2007 – 2017) (n > 100) (Charuaud et al., 2018)

Kivits et al., (2017) zkoumali přítomnost antibiotik ve vztahu ke stáří podzemních vod v oblasti Nizozemska, kde probíhá jeden z nejintenzivnějších chovů hospodářských zvířat. Vodu odebírali z deseti víceúrovňových vrtů, kam umístili celkem čtyřicet šest filtrů. Antibiotika byla nalezena v deseti vrtech a celkem třiceti jedním filtru. Nejčastěji detekovaným antibiotikem byl sulfamethazine, a to v koncentraci v rozmezí 0,3 až 12,5 ng.l^{-1} , protože je jedním z velmi často využívaných veterinárních antibiotik. Nejvyšší zjištěná koncentrace byla u sulfamethoxazolu, který byl naměřen v hodnotě až 18 ng.l^{-1} , avšak druhá nejvyšší hodnota tohoto antibiotika byla 3,3 ng.l^{-1} . Dále byl detekován také lincomycin, sulfadiazin,

ciprofloxacin a chloramfenikol. Léčiva byla detekována v podzemní vodě až do hloubky 23 m a do stáří vody 40 let.

Vliv zbytků a metabolitů z antibiotik obsažených ve statkových hnojivech ve své práci zkoumal Ahmed et al., (2015). Pěstovali tři druhy zeleniny – okurku setou, rajče jedlé a lociku setou, které zalévali roztoky vody s šesti antibiotiky (tetracyklin, oxytetracyklin, chlortetracyklin, sulfamethazin, sulfamethoxazol a sulfadimethoxin) o koncentracích 5, 10 a 20 mg.kg⁻¹ půdy. Všechna antibiotika měla negativní vliv na rostlinný růst. V částech rostlin, které neslouží k potravě, kořeny a listy u rajčat a okurky, byly detekovány vysoké koncentrace tetracyklinů a sulfonamidů. Zatímco v plodech zeleniny byly naměřeny zanedbatelné koncentrace léčiv.

Antimikrobiální znečištění ve statkových hnojivech představuje jeden z významných zdrojů šíření organických sloučenin do životního prostředí. Karci and Balcioglu, (2009) zjišťovali antimikrobiální sloučeniny v osmi statkových hnojivech na devíti zemědělských půdách v Turecku. Ve své studii analyzovali tetracykliny, sulfonamidy a fluorochinolony. Ve všech vzorcích zemědělské půdy a hnoje byla detekována vždy minimálně jedna antimikrobiální sloučenina až do koncentrací 0,5 a 35,5 mg.kg⁻¹. Nejvyšší koncentrace těchto sloučenin byla detekována z čerstvého drůbežího hnoje. To nám dokazuje, že je možná kontaminace zemědělské půdy statkovými hnojivy. Také zjistili, že kontaminace půdy tetracykliny je závislá na obsahu kovů v půdách a hnojivech, avšak kontaminace půdy sulfonamidy je závislá na obsahu organického uhlíku. To potvrzuje, že kontaminace půdy antimikrobiálními látkami je závislá na vlastnostech půdy a hnojiva.

3.1.2 Potencionální výskyt léčiv v odpadních vodách

Farmaceutické sloučeniny se po požití a aplikaci vyloučí z těla v nezměněném stavu nebo jako metabolizované sloučeniny, a tak se dostanou do komunální kanalizace. Čistírný odpadních vod (ČOV) v dnešní době nedokáže zcela eliminovat tyto látky z čištěných odpadních vod. Farmaceutika jsou tedy přítomna v již přečištěných odpadních vodách i čistírenském kalu často používaném jako hnojivo. Následným zavlažováním zemědělských půd vyčištěnými odpadními vodami a hnojením zemědělských půd čistírenskými kaly se farmaceutické sloučeniny zavádějí do životního prostředí (Malchi et al., 2014).

Farmaceutické výrobky mohou kontaminovat půdu, a tím následně i povrchové a podzemní vody. Spotřeba humánních i veterinárních léčiv stále stoupá, a tím se zvyšuje jejich koncentrace v životním prostředí. Mobilita farmak v půdě je závislá na půdních a farmaceutických vlastnostech (Kodešová et al., 2016).

Loos et al., (2009) se ve své studii věnoval perzistentním organickým sloučeninám v povrchových vodách. Z analyzovaných 122 vzorků bylo pouze 11 vzorků, které byly jen velmi málo kontaminovány. Ve zbylých vzorcích byl carbamazepin detekován v 95 %, což ho řadí mezi jednu z nejčastěji se vyskytujících znečišťujících látek. Sulfamethoxazol byl zjištěn v 75 % vzorků. Nejvyšší koncentrace dosahovala u carbamazepinu 11561 ng.l⁻¹ a u sulfamethoxazolu 4072 ng.l⁻¹, což jsou znatelně vyšší hodnoty, než byly naměřeny v podzemních vodách v jejich následující studii.

Loos et al., (2010) ve své studii zjišťoval znečištění podzemních vod farmaceutiky a pesticidy na 164 místech v 23 evropských zemích. Zjistil, že ve srovnání s povrchovou vodou z daných řek byla podzemní voda obecně méně znečištěna. Znečištění dosahovalo 25 % oproti vodám povrchovým. Nejvíce infiltrovanou farmaceutickou sloučeninou byl ve studii zjištěn carbamazepin. Ten byl detekován u 42 % vzorků s maximální koncentrací 390 ng.l⁻¹. Tím se potvrdil jeho perzistentní charakter. Druhou nejčastěji infiltrovanou farmaceutickou sloučeninou do podzemních vod byl sulfamethoxazol. Ten byl detekován u 24 % vzorků, ale ve výrazně nižší maximální koncentraci 38 ng.l⁻¹.

Přítomnost léčiv v životním prostředí v České Republice zkoumali Fedorova et al., (2014a) nebo Golovko et al., (2014). Golovko et al., (2014) zjišťovala sezónní změny v koncentraci léčiv ve vzorcích přítoků a odtoků odpadních vod po dobu dvanácti měsíců v ČOV v Českých Budějovicích.

Tabulka 1. Medián, minimum, maximum koncentrace na přítoku a odtoku z ČOV, účinnost odstranění cílových látek měřených v odpadní vodě (n = 272, březen 2011 – únor 2012) (Golovko et al., 2014)

Compounds	Influent			Effluent			Removal efficiency (%)
	Median (µg L ⁻¹)	Min (µg L ⁻¹)	Max (µg L ⁻¹)	Median (µg L ⁻¹)	Min (µg L ⁻¹)	Max (µg L ⁻¹)	
<i>Antibiotics (ATB)</i>							
Norfloxacin	0.55	0.13	1.33	0.083	0.020	0.25	86
Levofloxacin	0.022	0.005	0.069	0.006	0.004	0.018	75
Ciprofloxacin	0.41	0.08	0.86	0.065	0.008	0.19	86
Azithromycin	0.14	0.014	0.51	0.050	0.008	0.22	69
Erythromycin	0.077	0.02	0.30	0.11	0.030	0.35	-30
Clarithromycin	1.48	0.31	3.09	0.93	0.21	2.31	40
Trimethoprim	0.32	0.12	0.53	0.25	0.083	0.44	20
Sulfapyridine	0.20	0.018	0.66	0.055	0.014	0.20	70
Sulfamethoxazole	0.22	0.043	0.49	0.090	0.031	0.26	58
Sulfasalazine	0.10	0.029	0.73	0.050	0.017	0.83	44
<i>Psychiatric drugs</i>							
Carbamazepine	0.46	0.21	0.71	0.51	0.22	0.73	-12
Oxazepam	0.056	0.024	0.077	0.062	0.026	0.094	-17
Memantine	0.006	0.004	0.058	0.006	0.005	0.010	1
<i>Antidepressants</i>							
Mirtazapine	0.048	0.023	0.17	0.034	0.013	0.068	32
Citalopram	0.083	0.027	0.18	0.073	0.03	0.12	18
Sertraline	0.012	0.007	0.027	0.003	0.003	0.006	81
Venlafaxine	0.29	0.12	0.80	0.28	0.12	1.11	1
<i>Antihistamine</i>							
Fexofenadine	0.18	0.068	0.40	0.17	0.064	0.25	11
Meclozine	0.093	0.031	0.21	<LOQ	<LOQ	<LOQ	100
<i>Lipid regulators</i>							
Rosuvastatin	0.19	0.062	0.46	0.054	0.008	0.32	68
Atorvastatin	0.30	0.070	0.75	0.013	0.004	0.24	93

Kromě meklozinu, který byl detekován pouze v přítokových vzorcích, byly všechny ostatní látky nalezeny jak u přítoku, tak u výtoku z ČOV. Průměrná koncentrace léčiv u přítoku byla 6 ng.l⁻¹ – 1480 ng.l⁻¹, která byla naměřena u clarithromycinu. Vysoké koncentrace clarithromycinu mohou být způsobeny ošetřenou nemocniční vodou, která je napojena na studovanou ČOV. Účinnost odstranění se pohybovala u antibiotik od 86 % až do - 30 %. Například u sulfamethoxazolu se jednalo o 58 %. U antidepresiv a psychiatrických léčiv se účinnost odstranění pohybovala od 32 % až po - 12 %, která byla naměřena u carbamazepinu, a - 17 % u oxazepamu. Výjimku tvoří sertralin s účinností 81 %. Negativní hodnoty účinnosti odstranění mohou být způsobeny dekonjugací konjugovaných metabolitů, či změnou adsorpce částic během procesu čištění. Byla zjištěna celkově vyšší koncentrace farmaceutik v zimním

období. To může být způsobeno jejich vyšší spotřebou a zároveň nízkou okolní teplotou, a tím méně účinným odstraněním v procesu čištění na čistírnách odpadních vod. Fedorova et al., (2014a) ve své studii zjišťovala koncentraci léčiv v řekách České republiky. Všechna odběrná místa byla umístěna na nejdůležitějších monitorovacích profilech kvality vody Českého hydrometeorologického institutu, jednalo se o monitorovací místa v blízkosti větších měst, v oblasti s koncentrovaným průmyslem, či na hranicích státu. Koncentrace sloučenin byla v rozmezí 465 až 6 447 ng/POCIS, přičemž carbamazepin, který byl naměřen v koncentraci 196 - 2 690 ng/POCIS, a tramadol, který byl naměřen v koncentraci 160 – 2 250 ng/POCIS, byly detekovány ve všech odběrných místech v nejvyšší koncentraci. Na všech místech byl detekován také citalopram (18 – 429 ng/POCIS), venlafaxin (34 – 605 ng/POCIS) a oxazepam (9,1 – 276 ng/POCIS). Studie dokázala, že vyšší koncentrace farmak v odpadních vodách se vyskytuje u velmi obydlených oblastí, které mají nízké ředící faktory s tokem řek, naopak nejnižší koncentrace léčiv byly naměřeny v místě s minimálním vstupem od obcí a průmyslu.

Stabilitě prostředků osobní péče na přítoku a odtoku z čistírny odpadních vod se ve své práci věnovala Fedorova et al., (2014b). Sledovali 124 látek prostředků osobní péče, které uchovávaly dlouhodobě (až 120 dnů) zmrazením, nebo krátkodobě (po dobu 7 dnů) v lednici. Poté analyzovali časové trendy látek – konstantní koncentrace po celou dobu pokusu, klesající koncentrace s časem pokusu, nebo ztráta sloučeniny ze vzorku po zmrazení. Pro 40 sloučenin (atenolol, carbamazepin, diklofenak,...) nebyly sledovány žádné časové trendy, zůstaly stabilní na přítoku i odtoku z ČOV a vykazovaly ztráty koncentrace 10 – 20 % při zamrazení na 120 dní. Další skupina látek (doxycyklin, risperidon,...) vykazovala klesající koncentrace s časem. Sulfamethazin byl stabilní po dobu 60 dní skladování, při skladování na 120 dní však klesla jeho koncentrace 85 % u vzorků z odtoku a o 100 % u vzorků z přítoku. Obecně však bylo zjištěno celkové snížení koncentrace organických sloučenin na odtoku oproti přítoku do čistírny.

Lindberg et al., (2014) analyzoval vzorky ze sedmi druhů odpadních vod, z nichž se jedna nacházela v areálu nemocnice. Zjistil zvýšenou koncentraci léčiv v odpadních vodách, a to především antibiotik, analgetik, protizánětlivých látek a hypertenzních látek. V odpadních vodách z areálu nemocnice pak zjistil koncentrace vyšší než v dalších vzorcích.

Výskyt léčiv v odpadní vodě při vstupu a výstupu z čistírny odpadních vod zkoumali Vieno et al., (2005). Léčiva sledovali během tří ročních období - v zimě, na jaře a v létě. V zimním období se snížila eliminace léčiv v čistírně odpadních vod v průměru o 25 % při srovnání s jarem a létem. Koncentrace všech léčiv ve výtokové vodě byla v zimním období 3 - 5krát vyšší než v ostatních obdobích, což znamenalo zvýšenou koncentraci léčiv v řece. To ukazuje, že při nízkých teplotách se může výrazně zvýšit riziko kontaminace životního prostředí léčivy, které se mohou následně dostat do pitné vody. Současně to také může ukazovat na skutečnost, že účinnost čistíren odpadních vod se zvyšuje současně se zvyšující se teplotou čistícího procesu, což souvisí s vyšší rychlostí chemických, biochemických i biologických reakcí při vyšší teplotě, jakými jsou například srážení a fermentace vlivem mikroorganismů.

Dalším zdrojem možné kontaminace zemědělských půd je aplikace čistírenských kalů. Ty jsou zdrojem živin a organických látek pro lepší růst rostlin (Gottschall et al., 2012). Lapen et al., (2008) ve své studii dokázal, že se tyto farmaceutika rychle pohybují přes půdní makropóry do drenážní vody během několika minut od aplikace. Maximální koncentrace

carbamazepinu, 1136 ng.l^{-1} , byla detekována tři hodiny po aplikaci kalu na zemědělskou půdu. Zatímco maximální koncentrace atenololu, 267 ng.l^{-1} , byla pozorována již jednu hodinu po aplikaci. Koncentrace sulfamethoxazolu v drenážní vodě překročila hranici detekce od první do páté hodiny po aplikaci. Martin et al., (2012) hodnotili výskyt 16 farmaceutik v odpadních vodách a čistírenském kalu. 12 léčiv bylo detekováno v odpadních vodách s nejvyšší koncentrací $32 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$. Všechny tyto látky, kromě diklofenaku, byly také nalezeny v čistírenských kalech s nejvyšší koncentrací 2206 ng.g^{-1} u ibuprofenu. Nejvyšších koncentrací dosahovaly protizánětlivé látky, např. ibuprofen a kyselina salicylová s koncentrací $32 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$ a $27,2 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$, respektive $4,04 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$ a $1,00 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$ u vypouštěné vody. Také kofein dosahoval vysokých koncentrací až $8,97 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$ při přítoku a $0,94 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$ při odtoku.

Výskytem léčiv ve stabilizovaný kalech se zabývala také Ivanová et al., (2018). Ti zkoumali výskyt 93 léčiv, drog a jejich metabolitů v čistírnách odpadních vod na Slovensku. Nejčastěji se vyskytovaly psychoaktivní léčiva (27 sloučenin). Citalopram, v průměrné koncentraci 499 ng.g^{-1} a nejvyšší koncentraci 826 ng.g^{-1} , a sertalin, v průměrné koncentraci 546 ng.g^{-1} a nejvyšší koncentraci 1109 ng.g^{-1} , byly přítomny v kalech ze všech ČOV. Dále se v kalech vyskytovala antibiotika (15 sloučenin), kde azithromycin vykazoval nejvyšší koncentrace ve všech vzorcích, a to v průměru 153 ng.g^{-1} a nejvyšší hodnota byla 336 ng.g^{-1} . U antihistaminik (6 sloučenin) naměřili nejvyšší koncentrace fexofenadin, průměrně 2341 ng.g^{-1} a maximálně 5597 ng.g^{-1} , což jsou nejvyšší naměřené koncentrace ze všech analyzovaných 93 léčiv. Kardiovaskulární léčiva (14 sloučenin) patří k jedním z nejpoužívanějších léčiv. Předpokládá se však, že některá tyto léčiva se absorbují do kalů, či se s kaly spojí po aerobních a anaerobních úpravách. Nejvyšší koncentrace dosahoval telmisartan s hodnotami 1170 ng.g^{-1} v průměru a 3370 ng.g^{-1} v maximu. Pokud by nedošlo k další degradaci léčiv mezi produkcí léčiv a aplikací kalů, bylo odhadnuto roční zatížení půdy na Slovensku léčivy na 120 kg.rok^{-1} v případě fexofenadinu.

3.2 Chování léčiv v půdě

Jak již bylo uvedeno, chování léčiv v půdním prostředí je řízeno dvěma hlavními mechanismy, a to sorpcí a degradací.

3.2.1 Sorpce a degradace léčiv

Sorpce je proces, kdy se chemické látky váží na půdní částice. Pokud se látka naváže na povrch půdní částice, jedná se o adsorpci. Když chemická látka pronikne do vnitřku půdní částice, jedná se o absorpci. Chemická látka je nazývána sorbát, zatímco látka pevná, na kterou se chemická látka váže, se nazývá sorbent. V případě sorbátu může jít o látku plynnou nebo molekuly pevné látky rozpuštěné v kapalině (Schwarzenbach et al., 2003). Sorpce je dynamický proces. Rovnovážný stav mezi koncentrací látky rozpuštěné v roztoku a koncentrací látky nasorbované na pevnou fázi popisuje adsorpční izoterma, jejíž průběh lze popsat pomocí Freundlichovy rovnice.

$$s = k_F \cdot c^n$$

kde k_F ($\text{cm}^{3/n} \mu\text{g}^{1-1/n} \text{g}^{-1}$) je Freundlichův sorpční koeficient a $1/n$ je exponent, c je koncentrace látky rozpuštěné v půdním roztoku ($\mu\text{g cm}^{-3}$), s je koncentrace látky nasorbované na pevné částice ($\mu\text{g g}^{-1}$).

Sorpce vybraných léčiv v půdách a sedimentech se zabývala již řada studií. Sorpci sedmi léčiv (trimethoprimu, sulfamethoxazolu, clindamycinu, clarithromycinu, atenololu, metoprololu a carbamazepinu) ve třinácti půdních vzorcích zkoumali například Kodešová et al., (2015). Půdní pH se pohybovalo v rozmezí 5,3 – 8,71. Sorpční koeficient sulfamethoxazolu, který se nacházel hlavně v aniontové formě, pozitivně koreloval s hydrolytickou a výměnnou aciditou. Naopak negativně závisel na pH půdy a nasycení sorpčního komplexu. Sulfamethoxazol měl jednu z nejnižších sorpcí na půdní částice, což bylo způsobeno elektrostatickým odpuzováním mezi záporně nabitými ionty léčiva a záporně nabitými půdními částicemi. V případě atenololu, který byl v kationtové formě, sorpční koeficient pozitivně koreloval nejvíce s nasyceností bazickými kationty a kationtovou výměnnou kapacitou, dále také se salinitou, obsahem jílu a obsahem organického uhlíku, a naopak negativně koreloval s měrnou hmotností částic a obsahem písku. Podobně v případě clindamycinu, clarithromycinu, metoprololu a trimethoprimu, které byly rovněž převážně v kationtové formě, sorpční koeficienty pozitivně korelovaly s nasyceností bazickými kationty. Sorpce těchto látek byla tedy řízena převážně výměnou kationtů. U carbamazepinu, který zůstal neutrální, byl sorpční koeficient kladně ovlivněn převážně obsahem organického uhlíku, také kationtovou výměnnou kapacitou a nasyceností bazickými kationty. Naopak negativně koreloval s měrnou hmotností částic a obsahem písku. Nejvýznamnějším faktorem, který ovlivnil vazbu carbamazepinu na půdní částice byly vodíkové můstky a Van der Waalsovy síly. Klement et al. (2018) studovali sorpci citalopramu, irbesartanu a fexofenadinu v sedmi různých půdách. Citalopram byl v neutrální a kationtové formě, irbesartan ve formě kationtové, aniontové a neutrální, a fexofenadin v kationtové, zwitterionové a aniontové formě. Nejvyšší sorpce byla naměřena pro citalopram v kationtové formě, který se elektrostaticky pojil k záporně nabitému povrchu půdních částic. Jeho sorpční koeficient kladně koreloval s nasyceností bazickými kationty. Následovala sorpce fexofenadinu a irbesartanu. Sorpční koeficient fexofenadinu, ve zwitterionové formě, pozitivně koreloval s nasyceností sorpčního komplexu. Sorpční koeficient irbesartanu, v aniontové a neutrální formě, podobně jako u sulfamethoxazolu, pozitivně koreloval s hydrolytickou aciditou.

Intenzita sorpce látek aplikovaných ve směsích se může odlišovat od intenzity sorpce zjištěné při aplikaci pouze jedné látky. Kočárek et al., (2016) ve svém experimentu hodnotili sorpci 4 léčiv (atenololu, trimethoprimu, carbamazepinu a sulfamethoxazolu), které byly na půdní vzorky odebrané z různých půdních horizontů tří typů půd šedozemě, hnědozemě a kambizemě aplikované ve směsi. U všech tří typů půd klesala sorpce carbamazepinu a sulfamethoxazolu spolu s rostoucí hloubkou půdy, což je odůvodněno klesajícím obsahem půdní organické hmoty. U atenololu byl opět prokázán pozitivní vztah mezi sorpcí a nasyceností bazickými kationty, který u šedozemě a hnědozemě stoupal s hloubkou. Při aplikaci směsi všech léčiv byla sorpce carbamazepinu nižší než při jeho samostatné aplikaci, což bylo způsobeno

konkurencí s ostatními látkami. Na druhou stranu sorpce sulfamethoxazolu vzrostla, pravděpodobně díky tomu, že se atenolol a trimethoprim nasorboval na půdní částice, a tím snížil odpuzování negativně nabitých molekul sulfamethoxazolu od negativně nabitého povrchu půdních částic. Dalším důvodem mohla být sorpce sulfamethoxazolu na půdu pomocí kationtových můstků. Sorpci atenololu, carbamazepinu a sulfamethoxazolu ve své práci hodnotili také Fér et al. (2018). Léčiva aplikovali v roztoku samostatně, či ve směsi léčiv. Experiment prováděli na vzorku půdy z iluviálního Bt horizontu hnědozemě, z kterého připravili vždy tři vzorky půdy – celé agregáty, agregáty, z kterých byly odstraněny jílové povlaky a samostatné jílové povlaky. U atenololu byla sorpce na jílové povlaky vyšší než na vnitřní část agregátů, což bylo způsobeno negativním nábojem jílových částic a kladným nábojem molekul léčiva. Sorpce sulfamethoxazolu, který má negativní náboj, byla sorpce naopak vyšší na vzorcích z vnitřní části agregátů. Sorpce carbamazepinu, který byl v neutrální formě, se sorpce na různé části agregátů příliš nelišila. Sorpce atenololu při samostatné aplikaci a ve směsi s ostatními léčivy se nelišila. Sorpce sulfamethoxazolu se při aplikaci ve směsi zvýšila, což mohlo být opět způsobeno sorpcí kladně nabitého atenololu na negativně nabité částice půdy, čímž se snížil odpor mezi půdou a negativně nabitými ionty sulfamethoxazolu, jak bylo také diskutováno v práci Kočárek et al., (2016). Také sorpce carbamazepinu vzrostla při aplikaci ve směsi. To mohlo být způsobeno ionizací molekul díky interakci typu dipól – indukovaný dipól mezi nepolárními a polárními molekulami roztoku.

Degradace je změna chemické struktury molekul léčiv. To má vliv na jejich fyzikální i chemické vlastnosti. V půdě převažuje mikrobiální degradace. Při úplné sterilizaci půdy se degradace snižuje, což značí velký vliv přítomnosti mikrobiální aktivity. Xu et al. (2009) ve své studii zjišťoval degradaci šesti přípravků osobní péče a léčiv, ibuprofenu, kyseliny klobifrové, naproxenu, diklofenaku, triclosanu a bisfenolu A, na čtyřech vzorcích sterilních a nesterilních půd. Všechny látky měly v zemědělských půdách nízkou až střední perzistenci, poločas rozpadu byl v rozmezí 0,81 dnů, pro bisfenol A, který byl také z více jak 95 % úplně degradován, až 20,44 dnů pro diklofenak. Během 45 dnů inkubace byly koncentrace ibuprofenu a diklofenaku pod detenčními limity. Ve sterilních půdách byl proces degradace značně nižší, u ibuprofenu až 34,5 krát, což je způsobeno nepřítomností mikroorganismů v půdě. Degradace je tedy obecně ovlivněna mikrobiální aktivitou, obsahem kyslíku v půdě, typem půdy, pH, obsahem siřičitanů a dusičnanů, teplotou a vlastnostmi léčiv. Degradací 7 léčiv v půdě se zabývali také Kodešová et al., (2016). V této své studii využili stejná léčiva jako v předchozí studii (Kodešová et al., 2015). Poločas rozpadu sulfamethoxazolu se pohyboval mezi 4,7 až 15,1 dnů. Vyšší hodnoty byly naměřeny v kambizemích a půdách vzniklých na písku a štěrkopísku. Poločas rozpadu pozitivně souvisel s hydrolytickou a výměnnou aciditou, naopak negativně souvisel s pH půdy, což je způsobeno tím, že s nižším pH klesá záporně nabitých iontů a sulfamethoxazol přechází do neutrální formy. Tím se snižuje vzájemné odpuzování mezi záporně nabitými ionty látky a záporně nabitými částicemi půdy. Sulfamethoxazol je poté méně biologicky dostupný, a tím klesá jeho poločas rozpadu. Poločas rozpadu atenololu se pohyboval v rozmezí 2,8 až 10,3 dnů. Vyšší hodnoty byly opět naměřeny v kambizemích a půdách vzniklých na písku a štěrkopísku. Mezi vlastnostmi půdy a poločasem rozpadu atenololu nebyly nalezeny žádné užší závislosti. Poločas rozpadu atenololu byl nejnižší ze všech sedmi zkoumaných léčiv, takže potenciální kontaminace podzemních vod atenololem je velice nepravděpodobná. Naopak obsah carbamazepinu v půdě, který je jeden z nejméně perzistentních

léčiv v životním prostředí, se během experimentu výrazněji nesnížil. Vztahy mezi poločasem rozpadu a půdními vlastnostmi tedy nebylo možné zhodnotit. Díky své nízké sorpční afinitě a vysoké perzistenci je carbamazepin velice mobilní sloučeninou, která se velice často vyskytuje v podzemních vodách.

3.3 Vstup léčiv do rostlin

Podíl zemědělských plodin zavlažovaných přečištěnými odpadními vodami stále roste, a to zejména v aridních a semiaridních oblastech. I přes stále zlepšující se technologie čištění odpadních vod, není v dnešní době možné odstranit všechna léčiva, přípravky osobní péče a hygieny, které tyto vody obsahují. Díky jejich vstřebávání kořeny rostlin se poté mohou přenést do potravin, jako je zelenina, a dostat se tak do lidského těla, kde mohou představovat riziko pro lidské zdraví.

3.3.1 Mechanismy příjmu kontaminantů rostlinami

Rozsah příjmu kontaminantů rostlinami se nejčastěji hodnotí za použití bioakumulačního faktoru, což je poměr změřené koncentrace látky v rostlinné tkáni a koncentrace látky v růstovém médiu (Wu et al., 2015). Průnik organických sloučenin do rostlin je závislý především na molekulové hmotnosti kontaminantu (MW), rozdělovacím koeficientu oktanol-voda ($\log K_{ow}$) a na vodíkových můstcích (akceptor a donor H-vazby). Vyšší propustnost a větší vstřebávání organických sloučenin je pravděpodobnější, když její $\log K_{ow}$ je < 3 , MW je $< 300 \text{ g mol}^{-1}$, donory H-vazby jsou < 3 a akceptory H-vazby jsou < 6 (Kumar and Gupta, 2016).

Rostliny vstřebávají vodu a látky svými kořeny. Následně jsou tyto látky transpiračním tokem transportovány do vyšších částí rostlin. Silnější transpirace zvyšuje akumulaci sloučenin v rostlinách (Collins et al., 2006). Mnoho prostředků osobní péče jsou ionizované a závislé na pH půdy. Tento stav sloučenin ovlivňuje interakci mezi sloučeninou a rostlinou, jako je například adsorpce na povrch kořenů, interakce s buněčnou membránou a vázání sloučenin do jednotlivých částí rostlin. Díky transportu vody s látkami do listů rostlin, kde se voda vypaří, a kontaminanty zůstanou, pak tyto sloučeniny mohou mít koncentraci v rostlinách až stonásobně vyšší než je koncentrace v půdě. (Trapp, 2009). Vstřebávání slabě kyselých sloučenin vzrůstá, pokud je pH vnějšího roztoku nižší a nachází se tak v půdě v neutrálním stavu. Difúze nedisociované molekuly přes buněčnou membránu je pak vyšší. Kvůli vyššímu pH uvnitř apoplastu však dochází k disociaci a anion je odpuzován od buněčných stěn a rostlinných buněk, čímž se molekuly hromadí uvnitř buňky. Pozitivně nabitě sloučeniny, se váží na buněčné stěny, které mají záporný náboj, a tím je snížena jejich translokace v rostlině (Goldstein et al., 2014). Wu et al., (2013) ve své studii dokázal, že pohyb vody v rostlinách je závislý na transpiraci rostlin a hraje důležitou roli při následné distribuci sloučenin po rostlině po vychytání těchto sloučenin kořenem. Sledoval akumulaci 20 léčiv a přípravků osobní péče na čtyřech druzích zeleniny - hlávkovém salátu, špenátu, okurce a paprice. Triclokarban, fluoxetin, triclosan a diazepam se nejvíce nahromadily v kořenech rostlin, zatímco

meprobamát, primidon, carbamazepin, dilantin a diuron se translokovaly do stonků a listů rostlin. V listech hlávkového salátu, které se konzumují, bylo zjištěno 13 kontaminantů v koncentracích 0,2 – 29 ng g⁻¹ a v listech špenátu 12 kontaminantů v koncentraci 0,04 – 34 ng g⁻¹ při aplikování mixu léčiv v koncentraci 0,5 µg L⁻¹. V kořenech rostlin pěstovaných v roztocích s kontaminanty o koncentraci 5 µg L⁻¹ byly v kořenech detekovány všechny kontaminující látky.

3.3.2 Pěstování rostlin v hydroponické kultuře

Při hydroponickém pěstování jsou rostliny pěstovány bez půdy pouze v živném roztoku. Hydroponické studie nejsou ovlivněny sorpcí a degradací v půdě, vykazují tak vysoký potenciál pro příjem kontaminujících látek rostlinami. Organické sloučeniny, jsou-li především v kořenech rostlin, například triclocarban, fluoxetin nebo diazepam, tak znamenají potenciální nebezpečí pro lidi při konzumaci kořenové zeleniny. Sloučeniny, které mají vysoký potenciál translokace, například carbamazepin, byly detekovány spíše v listech a plodech (Wu et al., 2015). Shenker et al., (2011) ve svém experimentu zjišťoval příjem carbamazepinu v rostlinách okurky. Potvrdil, že je carbamazepin přemisťován transpirací rostlin, proto je akumulován na konci transpiračního toku rostlinami, což jsou především starší listy.

Příjem látek rostlinou není při hydroponii ovlivněn půdními vlastnostmi, které jsou mnohdy složité a mohou měnit vlastnosti farmaceutických sloučenin. Je tedy potřeba být velmi opatrný při předpovídání příjmu organických sloučenin rostlinami na základě hydroponických experimentů (Wu et al., 2015).

3.3.3 Pěstování rostlin v půdě

Wu et al., (2015) rovněž zkoumal vstřebávání látek rostlinami pěstovanými v půdě. Ve srovnání s experimenty v hydroponickém prostředí vykazoval bioakumulační faktor vyšší hodnoty, to značí interakci farmaceutických sloučenin s půdou a jejich degradaci v půdě, což významně snižuje biologickou dostupnost těchto látek. V půdním experimentu Shenker et al., (2011) zjistili mnohem nižší bioakumulaci carbamazepinu v listech okurky, než tomu bylo při hydroponickém pěstování. Dále zjistil, že množství kontaminantu vstřebané rostlinami bylo ovlivněno dostupností carbamazepinu v půdním roztoku, což bylo ovlivněno půdními vlastnostmi, především obsahem organické hmoty v půdě. Bioakumulační faktor vypočtený pro listy byl asi čtyřicetkrát vyšší než pro plody. V kořenech byla koncentrace carbamazepinu také nízká. To podporuje předpoklad, že carbamazepin je translokován pomocí transpirace rostliny, protože transpirace přes listy je větší než přes plod. Zvýšené koncentrace carbamazepinu v rostlinách, především listech, byla potvrzena i jinými studiemi (Wu et al., 2013, Montemurro et al., 2017).

Vstup léčivých prostředků a přípravků osobní péče do rostlin, konkrétně sóji, ve svém experimentu zkoumal také Wu et al., (2010). Zkoumal jak příjem látek z čistírenských kalů, tak ze závlahy odpadními vodami. Zjistil, že léčivé přípravky jsou v rostlinách koncentrovány převážně v kořenech, odkud jsou translokovány do nadzemních částí.

4. Metodika

Z uvedeného vyplývá, že vstřebávání léčiv obsažených v půdním roztoku, je možné a závisí na řadě faktorů týkajících se fyziologie rostliny a chování (tj. sorpci a degradaci) léčiv v půdním prostředí. Cílem této práce bylo objasnit některé z nich. Pro tuto studii byly vybrány tři rozdílné listové zeleniny - roseta setá, kozlíček polní a špenát setý. Chování léčiv v půdách závisí na půdních vlastnostech, proto byly vybrány tři rozdílné půdní typy černozem modální, kambizem modální a regozem modální. Z povrchových horizontů byly odebrány půdní vzorky, ve kterých pak byly rostliny pěstovány. Sorpce léčiv a jejich transfer do rostlin a translokace v rostlinách závisí na formě jejich molekul. Proto byl vybrán atenolol (kationt), sulfamethoxazol (neutrální molekula nebo aniont) a carbamazepin (neutrální molekula). Protože studie Kočárka et al., (2016) a Féra et al., (2018) ukázaly, že se sorpce v půdě těchto látek mění, když jsou aplikovány ve směsi, byla tato léčiva aplikována jak samostatně, tak ve směsi všech tří látek.

4.1 Charakteristika vybraných rostlin

4.1.1 Roketa setá

Roketa setá (*Eruca sativa*) je jednoletá bylina, patřící do čeledi brukvovité (*Brassicaceae*). Jedná se o listovou zeleninu, s výbornou přizpůsobivostí na skleníkové i otevřené pěstování. Dorůstá do výšky až 60 (někdy 100) cm. Nejčastěji se sklízí malé rostliny ve věku 6 – 8 týdnů, které se konzumují celé. Roste na skalnatých svazích a místech ovlivněných člověkem, např. v zanedbaných zahradách. Je velmi odolná vůči suchu a snáší i teploty do $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, i když preferuje teplá a suchá místa. Obsahuje velké množství vitamínu C, alkaloidů a vysoké množství mastných kyselin, především kyseliny erukové. Tang et al., (2018) ve své studii pěstovali rosetu setou na historicky kontaminovaných sádkách arzenem. Zjistili, že narostlá rukola nahromadila ve svých tkáních vysoké koncentrace arzenu ($100 - 200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Ve srovnání s jinou listovou zeleninou představuje rukola riziko akumulace arzenu ve svých tkáních z kontaminovaných půd.

4.1.2 Kozlíček polní

Kozlíček polní (*Valerianella locusta*) je jednoletá bylina z čeledi zimolezovité (*Caprifoliaceae*), užívána jako listová zelenina. Dorůstá výšky až 45 cm. Je nenáročný na kvalitu půdy, vyskytuje se na mezích, náspech, převážně na lehčích půdách. Obsahuje vitamín C, dále potom provitamín A, vitamíny skupiny B, fosfor, vápník a železo. García-Valcárcel et al., (2016) sledovali vychytávání a translokaci tří azolových sloučenin v kozlíčku polním v živném roztoku. Všechny azoly byly zjištěny i v listech rostlin, což značí jejich translokaci uvnitř rostliny. Dále zjistili, že translokace azolových sloučenin je závislá na jejich fyzikálních a chemických vlastnostech a především na hydrofobnosti azolů.

To by mohlo vést k potencionálnímu riziku pro člověka, ačkoli zjištěné koncentrace azolů byly zanedbatelné.

4.1.3 Špenát setý

Špenát setý (*Spinacia oleracea*) je jednoletá rostlina z čeledi laskavcovité (*Amaranthaceae*). Je to hojně využívaná listová zelenina. Dorůstá výšky až 100 cm, vyžaduje půdy s neutrálním pH, především hlinitopísčité a půdy vododržné. Obsahuje vysoké koncentrace karotenoidů, dále také lutein, velké množství draslíku, železa, vápníku a vitamínu K. Dotaniya et al., (2018) pěstovali rostliny špenátu pro zjištění příjmu potencionálně rizikových prvků do rostlinných tkání. Do půdy aplikovali chróm, kadmium a zinek. Výsledky ukázaly, že aplikace všech tří kovů do půdy zvyšuje jejich koncentraci v rostlinných tkáních, i když se tyto látky navzájem ovlivňovaly.

4.2. Charakteristika vybraných půd

4.2.1 Černozem modální

Jedná se o hlubokohumózní půdy s černickým horizontem. Vyvinuté jsou na karbonátových sedimentech. Obsahují 2 – 4,5 % humusu v orničním horizontu. Sorpčně jsou to půdy nasycené. Nacházejí se v sušších a teplejších oblastech, na spraších, písčitých spraších a slínech. V našem případě jde o černozem převážně ze spraší s kalcickým horizontem.

4.2.2 Kambizem modální

Kambizem spadá do skupiny kambisolů. Obsahuje kambický hnědý horizont, který se vyvinul převážně v souvrství svahovin magmatických, metamorfických a zpevněných sedimentárních hornin. Tyto půdy najdeme hlavně ve svažitých podmínkách pahorkatin, vrchovin, hornatin a v menší míře i na rovinném reliéfu. Vyskytují se ve velkém rozmezí klimatických i vegetačních podmínek. Jedná se o půdu z lehčích středních až středně těžkých substrátů. V našem případě se jedná o kambizem na pararule.

4.2.3 Regozem modální

Patří do skupiny regosolů. Jedná se o půdu vzniklou na nezpevněných sedimentech, hlavně na písčích a štěrkopísčích. Jsou to půdy vyvinuté ze sypkých sedimentů, hlavně z písků, v rovinných částech, kde minerálně chudý substrát či krátká doba pedogeneze zabraňuje nápadnějšímu vývoji profilu. Jedná se o půdu ze středně těžkých substrátů bez karbonátů. Námí použita regozem byla vzniklá na písku.

Charakteristika půdních typů převzata z publikace Němeček et al. (2008)

4.3 Fyzikální a chemické vlastnosti půd

Byly stanoveny následující fyzikální a chemické vlastnosti půd.

4.3.1 pH půdy

Půdní pH je měřítkem aktivity ionizovaného vodíku (H^+) v půdním roztoku. Jedná se o jedno z nejinformativnějších měřítek pro stanovení charakteristik půdy. Vypovídá nejen o tom, zda je půda kyselá, neutrální či zásaditá, ale také o dostupnosti živin a toxicitě jiných prvků, které jsou na pH závislé (Thomas, 1996). Stupnice pH je v rozsahu od 0 do 14. Půdy s nízkým pH jsou ovlivněny solemi, což způsobuje jejich kyselost. Vyšší pH mají půdy, které jsou ovlivněny přítomností karbonátů a jsou tedy zásadité (Pansu and Gautheyrou, 2006).

4.3.2 Obsah uhličitánů

Přítomnost uhličitánů v půdě zásadně ovlivňuje její ostatní vlastnosti. Jsou významnou minerální složkou půdy. Vyskytují se převážně ve formách $CaCO_3$, méně poté ve formě $MgCO_3$, Na_2CO_3 nebo $FeCO_3$. Obsah uhličitánů lze zjistit rychlým testem za pomoci 10 % roztoku kyseliny chlorovodíkové. V případě přítomnosti uhličitánů ve vzorku začne vzorek šumět, to je způsobeno vznikajícím plynem CO_2 při této reakci (Valla et al., 2007).

4.3.3 Půdní organický uhlík

Uhlík vyskytující se v půdě se dělí na organický a anorganický. Organický uhlík je tvořen ze zbytků těl živočichů a rostlin, humusu, fosilní organické hmoty a mikroorganismy. Tvoří přirozené úložiště uhlíku, na které je vázán tok energie v přírodě. Oxidovatelný uhlík je výraznou součástí půdní organické hmoty. Anorganický uhlík je v půdě ve formě uhličitánů a hydrogenuhličitánů (Pansu and Gautheyrou, 2006).

4.3.4 Půdní salinita

Jedná se o zvýšené množství rozpustných solí v půdě, čímž dochází k jejímu zasolení. Salinita je velmi důležitá při určování půdní úrodnosti. Rozpustnost solí roste s teplotou, nejčastěji je zasolení způsobeno solemi $NaCl$ a KCl (Pansu and Gautheyrou, 2006). Na území České republiky se půdy se zvýšenou koncentrací solí vyskytují pouze výjimečně, a to na jižní Moravě.

4.3.5 Kationtová výměnná kapacita

Charakterizuje schopnost půdy celkově poutat kationty. Přebytek H^+ iontů je adsorbován na místech výměny půdních částic a organických látek v půdě. Půdní minerály jsou negativně

nabité a přitahují tak kationty prvků Ca, K, Na, Mg, aj. Jde o reverzní proces, při kterém mohou být kationty zadrženy v půdě a sloužit tak pro růst rostlin. Sílu kationtové výměnné kapacity ovlivňuje pH půdy a přítomnost Ca (Estefan et al., 2013).

4.3.6 Výměnná a hydrolytická acidita

Výměnná acidita je půdní reakce, kterou můžeme považovat za rozklad výměnných míst půdy. Hydrolýza jílu způsobuje rozklad jejich vrstev a tím se uvolňují Al^{3+} do půdního roztoku. Tím ubývá výměnných kationtů na půdních částicích a jejich místa zaplní Al^{3+} , což způsobuje pokles půdního pH. Kyselý déšť, který je způsoben sopečnou činností a spalováním fosilních paliv, způsobuje okyselování půdy, a tím urychluje její degradaci. Výměnná acidita je tedy množství protonů fixovaných na výměnný komplex půdních částic, které se po setkání s neutrálními solemi stanou pohyblivými (Pansu and Gautheyru, 2006).

Hydrolytická acidita udává množství kyselých kationtů. Udává schopnost půdy měnit reakci roztoků hydrolyticky štěpitelných solí (Valla et al., 2007).

4.3.7 Zrnitostní složení půdy

Jednou z hlavních a nejdůležitějších vlastností půdy je její zrnitostní složení. To ovlivňuje půdní chemické, fyzikální a biologické vlastnosti. Důležitou úlohu hraje půdní zrnitost také při obsahu a pohybu vody v půdě. Zrnitost určuje zařazení půdy do určitého půdního druhu. Zrnitostní rozbor půdy nám určí procentuální zastoupení částic různých velikostí – jemnozeme s velikostí částic do 2 mm (jíl, prach a písek) a částic větších (šterk a kamení) (Pansu and Gautheyrou, 2006).

Tabulka 2. Vlastnosti půd, které byly v experimentu použity: obsah organického uhlíku (Cox), půdní reakce (pH H₂O/pH KCl), obsah uhličitanu vápenatého (CaCO₃), salinita, výměnná acidita (Va), hydrolytická acidita (Ha), kationtová výměnná kapacita (KVK), nasycenost bazickými kationty (S=KVK-HA), stupeň nasycení sorpčního komplexu bazickými kationty (V), procentuální zastoupení velikostí částic a specifická hmotnost půdy (ρ_z)

Typ půdy	Černozem modální	Kambizem modální	Regozem modální
Lokalita	Praha - Suchdol	Humpolec	Semice
Cox (%)	1,74	1,57	0,46
pH H ₂ O	8,21	6,0	5,62
pH KCL	7,19	4,7	4,32
CaCO ₃ (%)	4,17	0,19	0,05
Salinita ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	125,37	69,75	33,97
Va (mmol/100g)	0,072	0,176	0,302
Ha (mmol/100g)	0,45	4,99	2,55
KVK (mmol/100g)	23,49	18,81	4,7
S (mmol/100g)	23,04	13,83	2,14
V (%)	98,08	73,49	45,64
částice < 0,01 mm (%)	49,06	34,63	7,74
částice 0,01 - 0,05 mm (%)	37,03	20,91	1,78
částice 0,05 - 0,1 mm (%)	3,01	10,41	8,35
částice 0,1 - 2 mm (%)	10,9	36,11	80,07
ρ_z (g·cm ⁻³)	2,54	2,57	2,62

4.4 Léčiva

V této práci se hodnotilo vstřebávání tří léčiv (atenololu, carbamazepinu a sulfamethoxazolu) do rostlin. Tato léčiva se vyskytují v odpadních vodách a čistírenských kalech, takže je kontaminace životního prostředí těmito léčivy pravděpodobná (Golovko et al., 2014, Loos et al., 2015). Léčiva byla použita ve vyšších koncentracích, než se nacházejí v odpadních vodách, aby se usnadnila jejich detekce v rostlinných tkáních.

4.4.1 Atenolol

Atenolol (Tabulka 3) je kardioselektivní beta-blokátor, patřící do skupiny sympatolytik. Blokuje beta-receptory a tak tlumí nežádoucí stresové reakce na orgány. Snižuje se tím krevní tlak, zpomaluje srdeční činnost a snižuje se riziko závažných poruch srdečního rytmu. Užívá se při poruchách oběhového systému, onemocnění srdečních tepen, zvýšeném krevním tlaku, poruchách srdečního rytmu se zvýšenou tepovou frekvencí. Podává se ve formě bílé pevné látky. Při nesprávném použití může atenolol způsobit přílišné snížení krevního tlaku, slabost a kolapsy. Může také zpomalit srdeční akci, a tím až následné srdeční selhání.

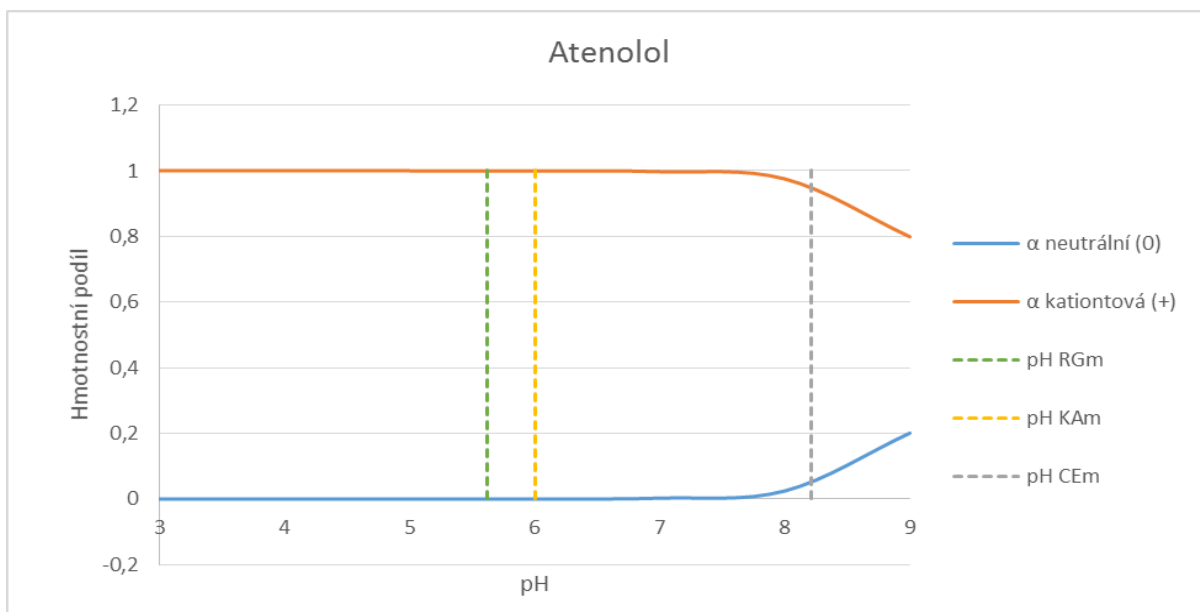
Tabulka 3. Vlastnosti, strukturní vzorec atenololu a charakteristika chování v testovaných půdách, tj. Freundlichůvy koeficienty (k_F a n) a poločas rozpadu (DT_{50}) (Kodešová et al., 2015, 2016)

Léčivo	Atenolol		
CAS číslo	29122-68-7		
Využití	Beta blokátor (hypertenze)		
Molekulová hmotnost ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	266.34		
Log Kow	0.16		
pKa	9.6		
Čistota	98 %		
Sumární vzorec	$\text{C}_{14}\text{H}_{22}\text{N}_2\text{O}_3$		
Strukturní vzorec			
Půdní typ	CEm	KAm	RGm
k_F ($\text{cm}^{3/n} \text{g}^{1-1/n} \text{g}^{-1}$)	16,24	5,36	2,11
DT_{50} (dnů)	3,7	9,0	7,7
n	1,17		

Atenolol se dle pH roztoku nachází buď v neutrální, nebo kationtové formě (která je převažující). Hmotnostní frakce α (kationtová a neutrální), (Obrázek 2), byla vypočtena podle následujících rovnic (1.1 a 1.2):

$$\alpha_{\text{neutrální}} = 1/(1+10^{(\text{pKa}-\text{pH})}) \quad (1.1)$$

$$\alpha_{\text{kationtová}} = 1/(1+10^{(\text{pH}-\text{pKa})}) \quad (1.2)$$



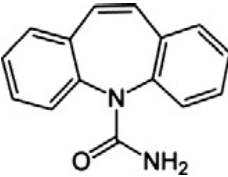
Obrázek 2. Hmotnostní podíl (α) neutrální a kationtové a formy atenololu a pH testovaných půd

4.3.2 Carbamazepin

Carbamazepin (Tabulka 4) patří do skupiny iminostilbenů. Je to blokátor sodíkových kanálů, na které se naváže při jejich neaktivní konformaci a zabraňuje tak jejich opakovanému aktivování. Užívá se k léčbě epilepsie, neuralií trigeminu – bolesti trojklanného nervu, mánií a bipolární poruchy, k léčbě diabetické neuropatie, migrény, aj. Mezi nežádoucí účinky patří nevolnost a ospalost, závažné kožní vyrážky nebo zmatenost.

Carbamazepin je nacházen v odpadních vodách a v čistírenském kalu, tím se často dostává do životního prostředí a může tak způsobovat riziko pro lidské zdraví.

Tabulka 4. Vlastnosti, strukturální vzorec carbamazepinu a charakteristika chování v testovaných půdách, tj. Freundlichůvy koeficienty (k_F a n) a poločas rozpadu (DT_{50}) (Kodešová et al., 2015, 2016)

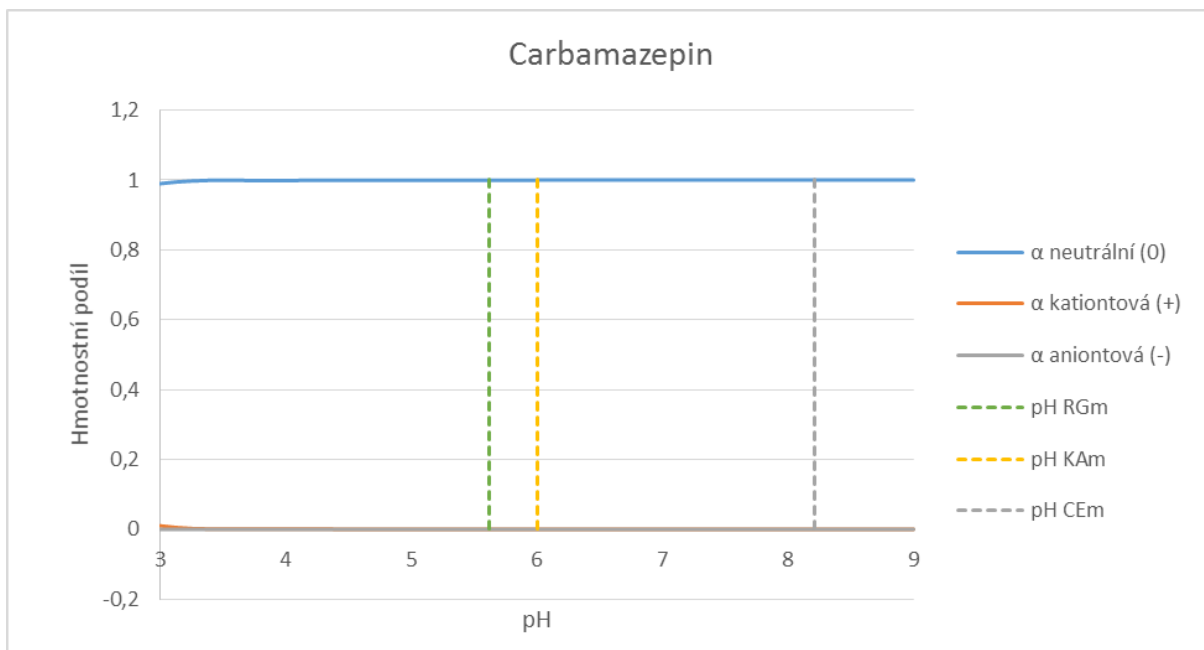
Léčivo	Carbamazepin		
CAS číslo	298-46-4		
Využití	Antikonvulzivum, analgetikum		
Molekulová hmotnost ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	236.27		
Log Kow	2.25		
pKa ₁ pKa ₂	1.0 13.9		
Čistota	97 %		
Sumární vzorec	$\text{C}_{15}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}$		
Strukturální vzorec			
Půdní typ	CEm	KAm	RGm
k_F ($\text{cm}^{3/n} \text{g}^{1-1/n} \text{g}^{-1}$)	3,86	2,97	0,71
DT_{50} (dnů)	> 1000	> 1000	> 1000
n	1,13		

Carbamazepin se dle pH roztoku nachází buď v neutrální (převážně), aniontové nebo kationtové formě. Hmotnostní frakce α (kationtová, neutrální a aniontová), (Obrázek 3), byla vypočtena podle následujících rovnic (1.3, 1.4 a 1.5):

$$\alpha_{\text{neutrální}} = 1 / (1 + 10^{(pK_{a1} - pH)} + 10^{(pH - pK_{a2})}) \quad (1.3)$$

$$\alpha_{\text{kationtová}} = 1 / (1 + 10^{(pH - pK_{a1})} + 10^{(2pH - pK_{a1} - pK_{a2})}) \quad (1.4)$$

$$\alpha_{\text{aniontová}} = 1 / (1 + 10^{(pK_{a2} - pH)} + 10^{(pK_{a1} + pK_{a2} - 2pH)}) \quad (1.5)$$

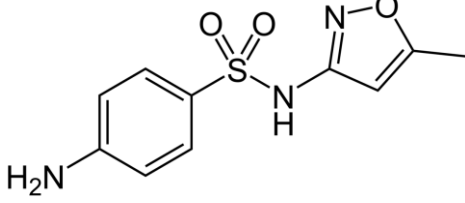


Obrázek 3. Hmotnostní podíl (α) neutrální, kationtové a aniontové formy carbamazepinu a pH testovaných půd

4.3.3 Sulfamethoxazol

Sulfamethoxazol (Tabulka 5) je antibiotikum používané při bakteriálních infekcích. Jedná se o bakteriostatikum a sulfoamid. Zabraňuje syntéze kyseliny listové v bakteriích, ty poté musejí syntetizovat svou vlastní kyselinu listovou. Kyselina listová je základním metabolitem pro růst a replikaci bakterií. Zablokování její produkce tedy inhibují metabolické procesy pro růst bakterií. Používá se při zánětu močových cest, bronchitidě a prostatitidě. Je účinný proti gramnegativním i grampozitivním bakteriím. Mezi nežádoucí účinky patří nevolnost, zvracení, ztráta chuti k jídlu a kožní vyrážky.

Tabulka 5. Vlastnosti, strukturální vzorec sulfamethoxazolu a charakteristika chování v testovaných půdách, tj. Freundlichůvy koeficienty (k_F a n) a poločas rozpadu (DT_{50}) (Kodešová et al., 2015, 2016)

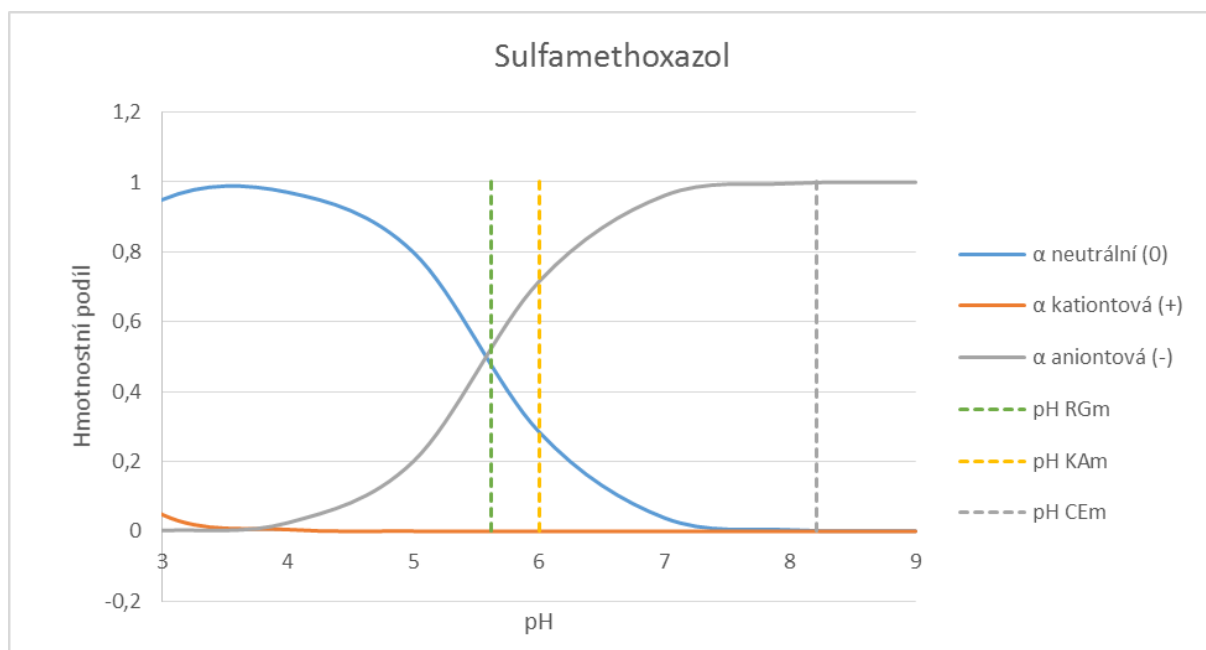
Léčivo	Sulfamethoxazol		
CAS číslo	723-46-6		
Využití	Antibiotikum (i veterinární užití)		
Molekulová hmotnost (g.mol ⁻¹)	253.28		
Log Kow	0.89		
pKa ₁ pKa ₂	1.7 5.6		
Čistota	98 %		
Sumární vzorec	C ₁₀ H ₁₁ N ₃ O ₃ S		
Strukturální vzorec			
Půdní typ	CEm	KAm	RGm
k_F (cm ^{3/n} g ^{1-1/n} g ⁻¹)	0,88	4,01	1,39
DT ₅₀ (dnů)	5,0	15,0	8,0
n	1,65		

Sulfamethoxazol se dle pH roztoku nachází buď v neutrální, aniontové nebo kationtové formě. Hmotnostní frakce α (kationtová, neutrální a aniontová), (Obrázek 4), byla vypočtena podle následujících rovnic (1.3, 1.4 a 1.5):

$$\alpha_{\text{neutrální}} = 1 / (1 + 10^{(pKa_1 - pH)} + 10^{(pH - pKa_2)}) \quad (1.3)$$

$$\alpha_{\text{kationtová}} = 1 / (1 + 10^{(pH - pKa_1)} + 10^{(2pH - pKa_1 - pKa_2)}) \quad (1.4)$$

$$\alpha_{\text{aniontová}} = 1 / (1 + 10^{(pKa_2 - pH)} + 10^{(pKa_1 + pKa_2 - 2pH)}) \quad (1.5)$$



Obrázek 4. Hmotnostní podíl (α) neutrální, kationtové a aniontové formy sulfamethoxazolu a pH testovaných půd

4.5 Experimentální část

4.5.1 Design experimentu

Semena se nechala nejprve vyklíčit na zahradnickém substrátu a po vyklíčení byla zasazena do kontejnerů s půdou, a to pro každou půdu s každou rostlinou v pěti opakováních (Obrázek 5). Pokus byl prováděn za skleníkových podmínek při teplotě vzduchu mezi 20 až 24 °C a vlhkostí vzduchu mezi 30 a 40 %. Rostliny byly vystaveny pouze přirozenému světlu. Zprvu byly rostliny zalévány čistou vodou, a to po dobu 16 dnů u roketky a špenátu a 23 dnů u kozlíčku. Následně byly rostliny zavlažovány vodou s přidaným jedním léčivem nebo směsí všech tří léčiv (Tabulka 6, Obrázek 8), a to roseta setá a špenát setý po dobu 26 dnů a kozlíček polní po dobu 20 dnů. Delší doba pěstování rosety a špenátu byla způsobena jejich pomalejším růstem a nedostatečným množstvím rostlinných tkání po třech týdnech. V jednotlivých půdách bylo pěstováno pět rostlin od každého druhu, které byly zalévány čistou vodou a posloužily jako kontrolní vzorky. Povrchy půd byly po celou dobu experimentu pokryty křemenným štěrkem o velikosti částic 1 až 4 mm ve vrstvě 5 mm, aby se zabránilo odpařování a vzájemné možné kontaminaci vzorků (Obrázek 6 a Obrázek 7).

Tabulka 6. Koncentrace léčiv a jejich směsí v zavlažovacích roztocích

	Koncentrace léčiv a jejich směsí v zavlažovacích roztocích									
	Roketa setá, špenát setý					Kozlíček polní				
	1. roztok	2. roztok	3. roztok	4. roztok	5. roztok	Celková zálivka (ml)	1. roztok	2. roztok	3. roztok	Celková zálivka (ml)
Zálivka (ml)	150	350	400	400	150	1450	450	400	300	1150
Léčivo	Koncentrace léčiv (mg/l)					Celkově aplikované množství léčiv (mg)	Koncentrace léčiv (mg/l)			Celkově aplikované množství léčiv (mg)
Atenolol	1,30	1,10	1,20	1,10	1,50	6,20	1,20	1,10	1,50	3,80
Carbamazepin	0,65	0,68	0,64	0,66	0,66	3,29	0,64	0,66	0,66	1,96
Sulfamethoxazol	1,00	1,00	0,78	1,10	0,95	4,83	0,78	1,10	0,95	2,83
Atenolol ve směsi	0,80	0,89	0,87	0,88	0,94	4,38	0,87	0,88	0,94	2,69
Carbamazepin ve směsi	0,53	0,58	0,58	0,48	0,55	2,72	0,58	0,48	0,55	1,61
Sulfamethoxazol ve směsi	0,77	0,85	0,88	0,74	0,85	4,09	0,88	0,74	0,85	2,47

4.5.2 Metodika odběrů vzorků

Po sklizni byly rostliny zbaveny zbytků půdy a rozděleny na jednotlivé části – kořen a listy. Kořeny byly propláchnuty v destilované vodě. Následně byly vzorky vysušeny lyofilizací a zváženy (všech 5 replik dohromady) v suchém stavu. Lyofilizované vzorky byly poté v třecí misce s tloučkem nadrceny na jemný prášek. Mezi jednotlivými vzorky byla miska důkladně omyta metanolem, opláchnuta destilovanou vodou a následně vysušena. Vzorky půdy, v které byly rostliny pěstovány, byly také zváženy, vysušeny, následně opět zváženy a prosety přes 2 mm síto. Poté byly měřeny koncentrace léčiv a jejich metabolitů v kořenech a listech rostlin i v půdě pomocí ultrazvukové extrakce. 2 g vzorku lyofilizované půdy byly umístěny do 10 ml autosamplerové lahvičky a následně byly vzorky extrahovány se 4 ml extrakční směsí 1 (acetonitril / voda v poměru 1 / 1, okyselené 0,1 % kyselinou mravenčí) a následným přidáním 4 ml extrakční směsí 2 (acetonitril / 2-propanol / H₂O v poměru 3 / 3 / 4, okyselené 0,1 % kyselinou mravenčí) v ultrazvukové lázni (DT 255, Bandelin electronic, Sonorex digitec, Berlín, Německo) po dobu 15 minut. Následně byly vzorky filtrovány přes filtr stříkačky (0,45 µm, regenerovaná celulóza, Labicom, Olomouc, Česká republika).

U extrakce rostlinných vzorků bylo dáno 0,1 g lyofilizovaného vzorku do Eppendorf zkumavky s bezpečnostním závitkem, byl přidán 1 ml extrakční směsí 1 a nerezová kulička. Vzorky byly následně třepány při 1 800 min⁻¹ po dobu 5 minut (TissueLyser II, Quiagen, Německo). Poté byly vzorky centrifugovány při 10 000 min⁻¹ po dobu dalších 5 minut (Mini spin centrifugace, Eppendorf). Supernatant byl poté filtrován přes injekční stříkačku (0,45 µm, regenerovaná celulóza) k vyčištění Eppendorfové zkumavky. Byl odebrán alikvot 100 µl a umístěn do autosamplerové lahvičky pro LC-MS analýzu.

Vzorky byly analyzovány v laboratořích Fakulty rybářství a ochrany vod Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích se sídlem ve Vodňanech. Kromě vlastních účinných látek byly měřeny také jejich metabolity: kyselina atenololová, carbamazepin-10,11-epoxid, oxcarbamazepin, trans-10,11-dihydro carbamazepin, 10,11-dihydro carbamazepin, N1-Acetylsulfamethoxazol a N4-Acetylsulfamethoxazol.



Obrázek 5. Rostliny roketky seté a špenátu setého pěstované v černozemi modální, kambizemi modální a regozemi podální



Obrázek 6. Rostliny kozlíčku polního pěstované v černozemi modální, kambizemi modální a regozemi modální



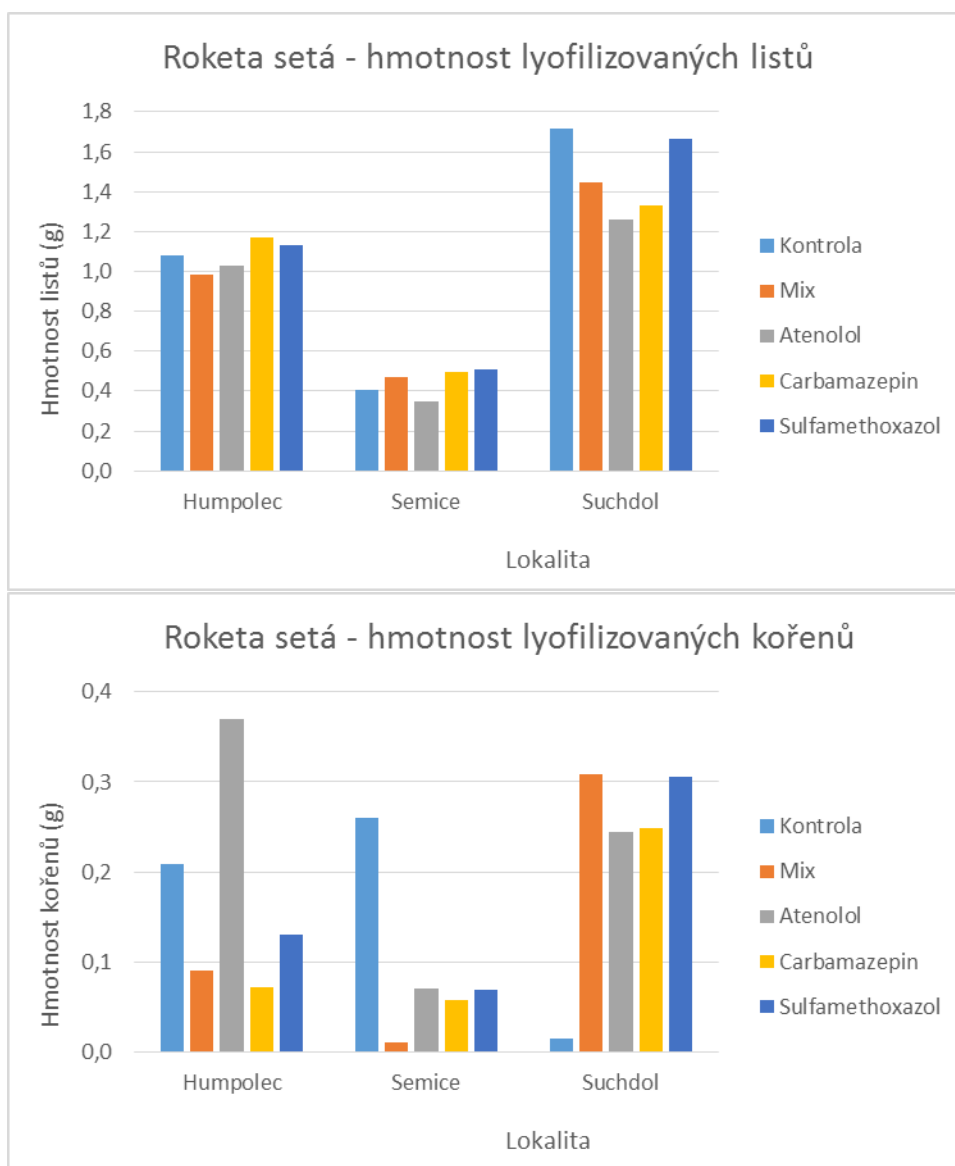
Obrázek 7. Rostliny roketky seté a špenátu setého



Obrázek 8: rozvržení experimentu ve skleníku

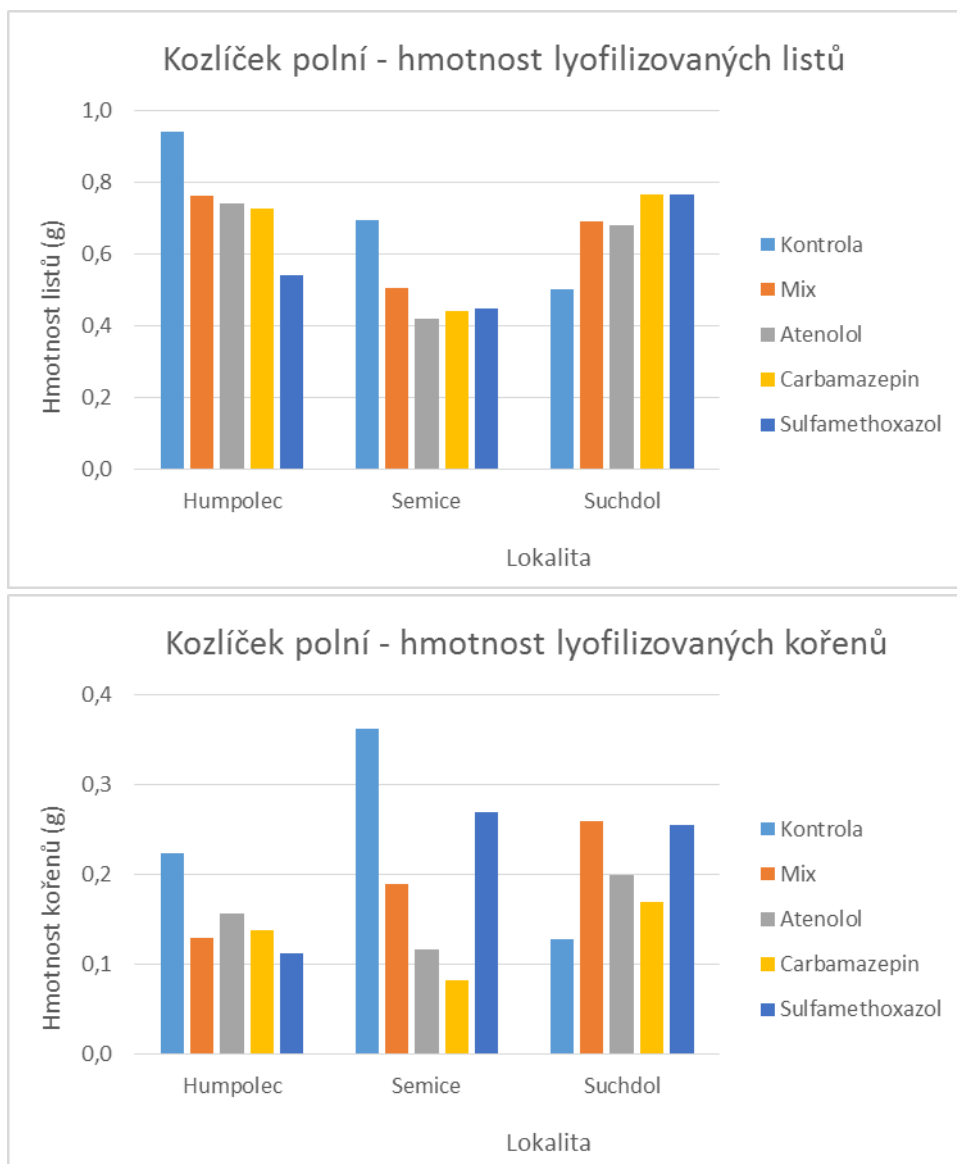
5. Výsledky

5.1 Hmotnosti lyofilizovaných listů a kořenů rostlin



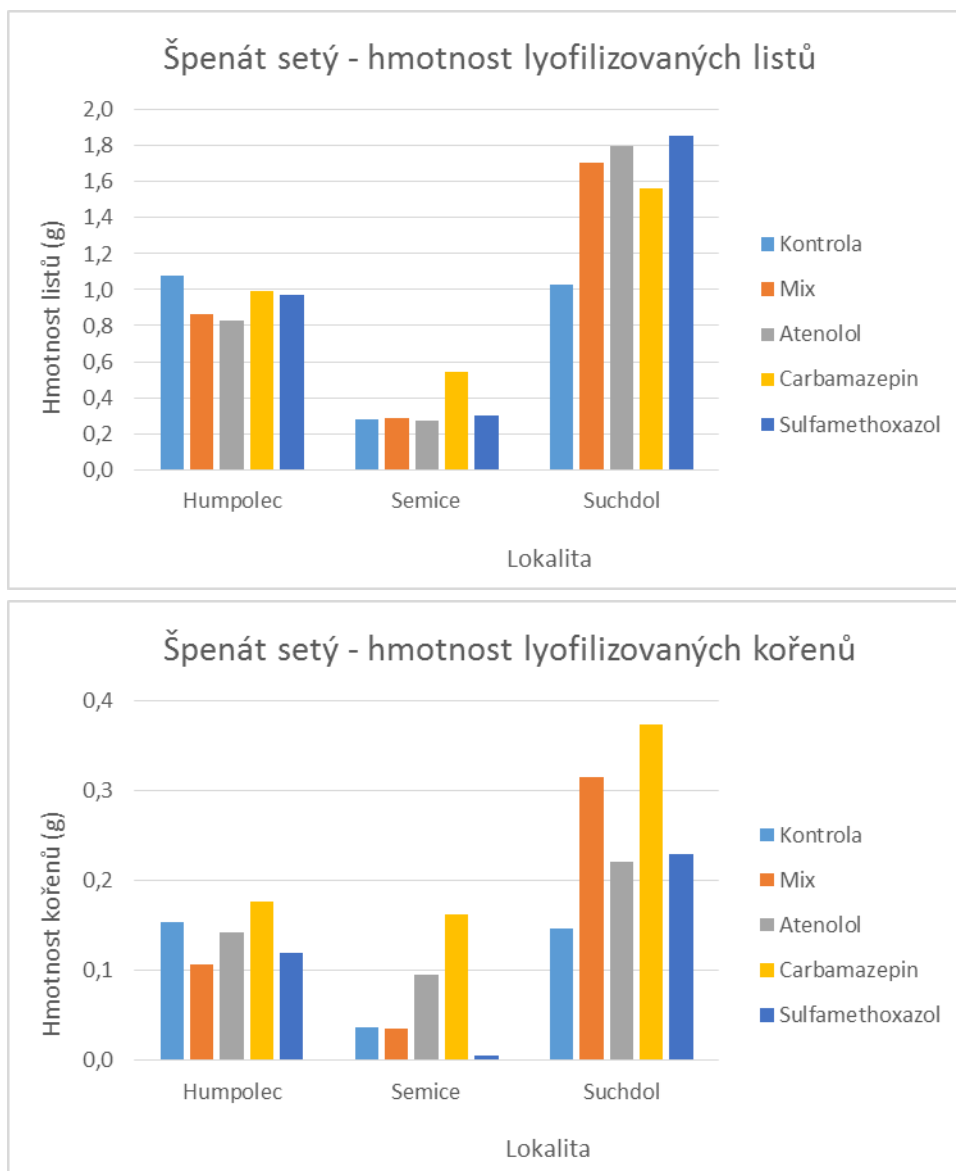
Obrázek 9. Hmotnosti lyofilizovaných listů a kořenů roketky seté v jednotlivých půdách při zalévání čistou vodou, jedním léčivem nebo mixem všech tří léčiv

Na Obrázku 9 jsou graficky znázorněny hmotnosti vysušených listů a kořenů rostlin roketky seté. Je patrné, že hmotnost listů roketky je v každé půdě při každé záливce vyšší než hmotnost kořenů. Celkově největší hmotnost listů a kořenů je u roketky pěstované v půdě z Prahy – Suchdol, tedy v černozemi modální, kde nejtěžší biomasa listů, hned za kontrolními vzorky (1,72 g), byla navážena u rostlin zaléváných roztokem sulfamethoxazolu, a to 1,67 g. Největší hmotnost kořenů pak byla navážena u rostlin pěstovaných v půdě z Humpolce – tedy kambizemi modální, při zalévání roztokem atenololu, 0,37 g. Naopak celkovou nejnižší hmotnost mají rostliny pěstované v rogozemi modální z oblasti Semic.



Obrázek 10. Hmotnosti lyofilizovaných listů a kořenů kozlíčku polního v jednotlivých půdách při zalévání čistou vodou, jedním léčivem nebo mixem všech tří léčiv

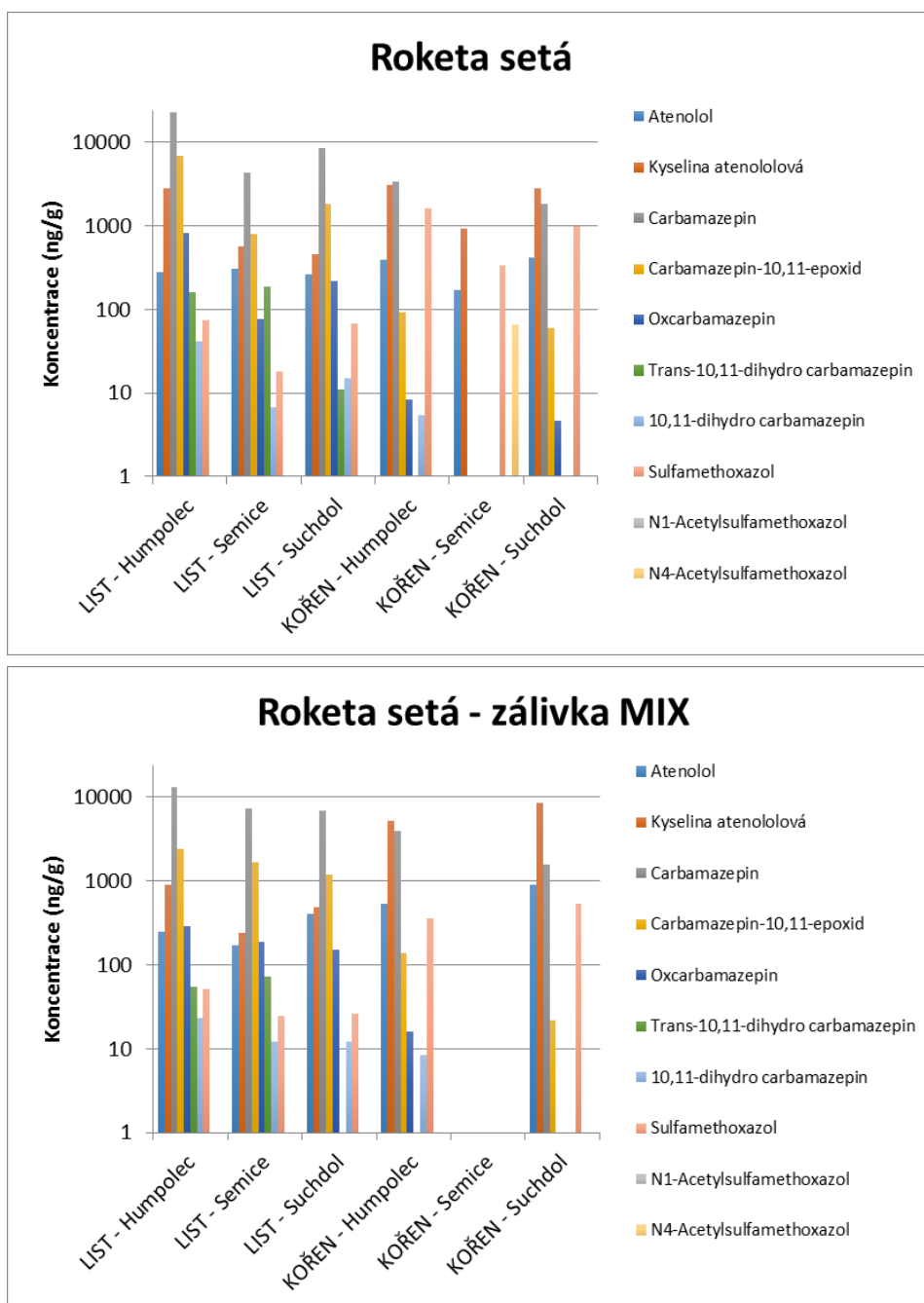
V porovnání s roketou byla hmotnost vysušených listů kozlíčku polního celkově nižší (Obrázek 10). Nejvyšší hodnoty vykazovaly rostliny pěstované v půdě kambizemi modální (Humpolec), zalévané čistou vodou (0,94 g), následované hmotou z rostlin pěstovaných v černozemi modální (Suchdol) zalévaných vodou s obsahem carbamazepinu a sulfamethoxazolu o stejné váze 0,77 g. U kořenů měla nejvyšší hmotnost biomasa z rostlin pěstovaných v regozemi modální (Semice), které byly zalévány čistou vodou (0,36 g) a s příměsí sulfamethoxazolu (0,27 g).



Obrázek 11. Hmotnosti lyofilizovaných listů a kořenů špenátu setého v jednotlivých půdách při zalévání čistou vodou, jedním léčivem nebo mixem všech tří léčiv

Vysušená listová hmota špenátu setého (Obrázek 11), s maximální hodnotou 1,86 g u rostlin pěstovaných v černozemi a zalévaných roztokem sulfamethoxazolu, následovaly rostliny pěstované ve stejné půdě zalévané roztokem atenololu (1,80 g), dosahovala nejvyšší hmotnosti ze vší tří pěstovaných rostlin. Naopak nejnižší hmotnost měly listy rostlin pěstovaných v regozemi a zavlažovaných roztokem atenololu (0,27 g) a vzorky kontrolní zalévané čistou vodou (0,28 g). U kořenů špenátu dosahovaly největších hmotností také kořeny pěstované v černozemi, ale zalévané roztokem vody s carbamazepinem (0,37 g) následované hmotností kořenů zavlažovaných roztokem s mixem všech tří léčiv (0,32 g).

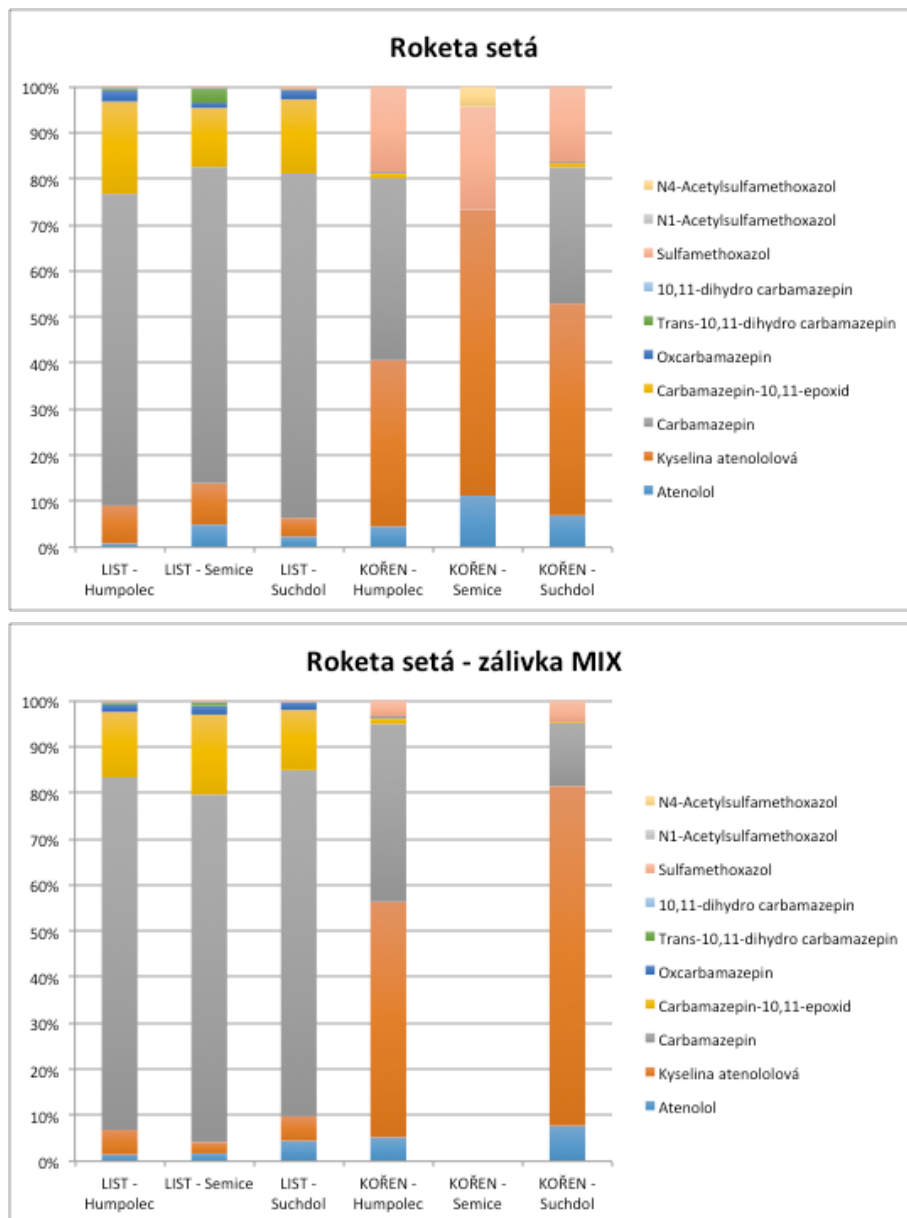
5.2 Koncentrace a procentuální zastoupení léčiv v jednotlivých částech rostlin.



Obrázek 12. Koncentrace léčiv a jejich metabolitů v kořenech a listech roketky seté v jednotlivých typech půd

Z Obrázku 12 můžeme vidět, že nejvyšších koncentrací, a to 23 000 ng.g-1, dosáhl carbamazepin v listu rostliny pěstované v kambizemi modální z Humpolce. V těchto rostlinách byly naměřeny celkově nejvyšší koncentrace léčiv. V listech se také vyskytoval carbamazepin-10,11-epoxid, a to v koncentracích až 6800 ng.g-1 v kambizemi modální. Dále je patrné, že v rostlinách zalévaných mixem léčiv byla v kořenech naměřena vyšší koncentrace kyseliny atenololové oproti kořenům rostlin, které byly zalévány pouze atenololem. Nejvyšší

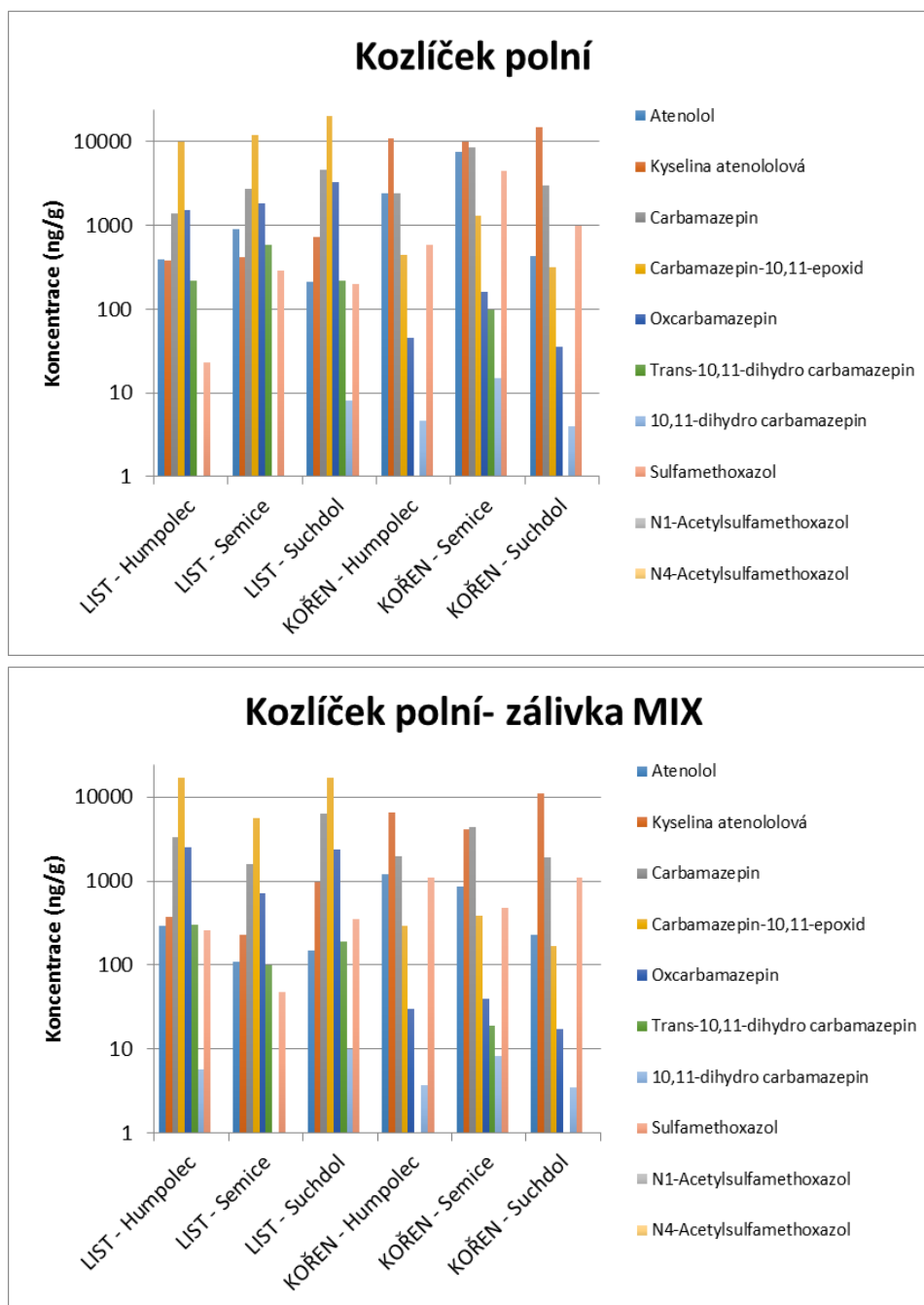
koncentrace dosahovala $8600 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ a byla naměřena v rostlině pěstované v černozemi modální. Totéž se týká také koncentrace carbamazepinu, který dosahoval až $4000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ v kambizemi modální.



Obrázek 13. Procentuální zastoupení jednotlivých léčiv a jejich metabolitů v listech a kořenech rokety seté v jednotlivých půdních typech

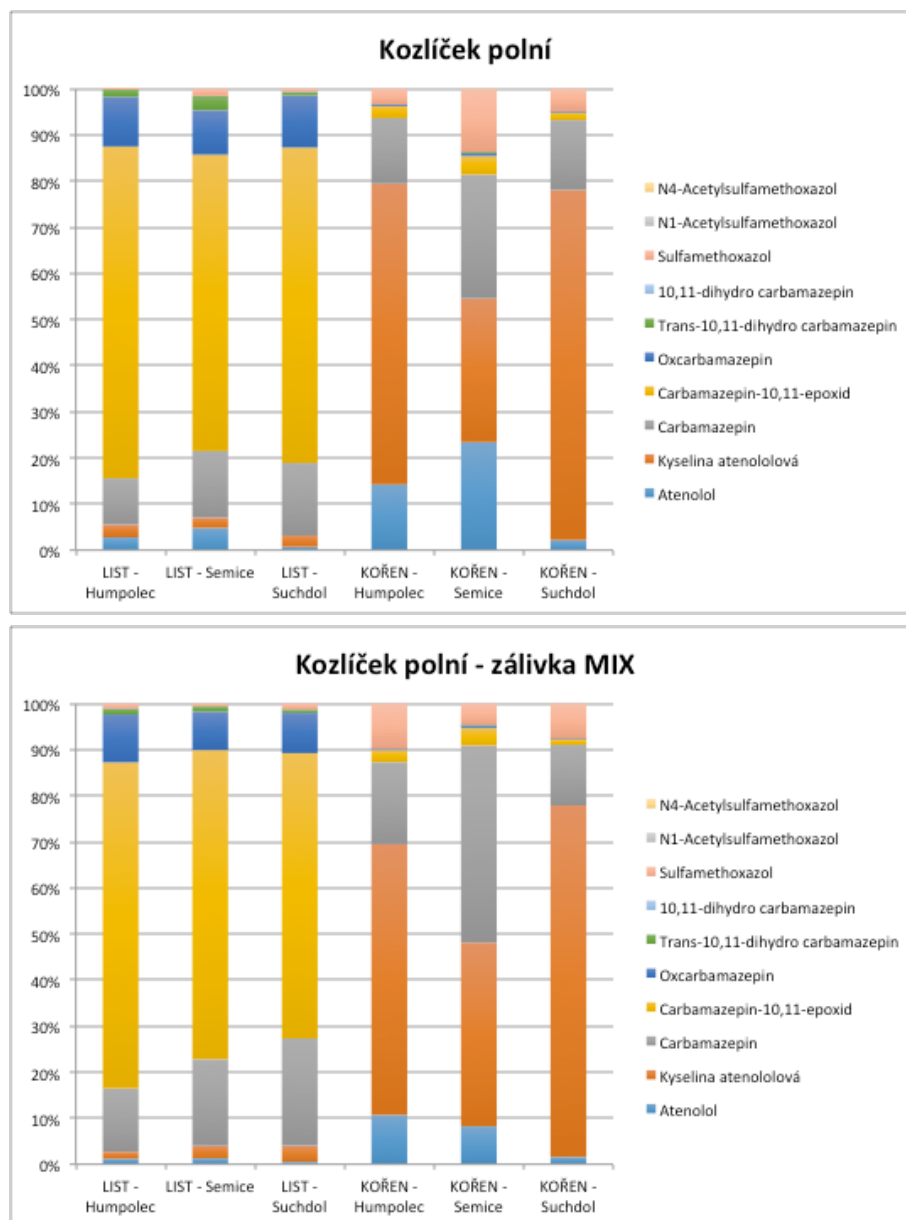
Z Obrázku 13 je patrné, že obsah léčiv a metabolitů v jednotlivých částech rokety seté je značně odlišný. Zatímco v kořenech této rostliny má největší podíl kyselina atenololová, v listech převažuje carbamazepin a kyselina atenololová zde byla analyzována pouze v malých koncentracích. V kořenech rostlin pěstovaných v regozemi ze Semic byl carbamazepin a jeho metabolity pod hranici kvantifikace, takže se koncentrace nepodařilo naměřit. Carbamazepin-10,11-epoxid nebyl v kořenech rokety téměř vůbec přítomen, zatímco v listech byl zaznamenán. Metabolit trans-10,11-dihydro carbamazepin byl nalezen hlavně v listech

rokety pěstované v regozemi modální. Sulfamethoxazol byl detekován nejvíce v kořenech rostliny a do listů se translokoval pouze v malých koncentracích. Rostliny zalévány zálivkou MIX, kde byly smíchány všechna léčiva, v kořenech rostlin zaujímal nejvyšší procentuální zastoupení opět kyselina atenololová. Vzorky kořenů z regozemě modální nebylo možné analyzovat pro jejich nedostatečné množství kořenů. Oproti rostlinám rokety zalévanými zálivkami s jednotlivými léčivy, se v jejich listech nevyskytovalo tak vysoké zastoupení sulfamethoxazolu. V listech těchto rostlin zaujímal nejvyšší procentuální zastoupení carbamazepin. Opět se zde translokoval carbamazepin-10,11-epoxid, který se v kořenech nevyskytoval.



Obrázek 14. Koncentrace léčiv a jejich metabolitů v kořenech a listech kozlíčku polního v jednotlivých typech půd

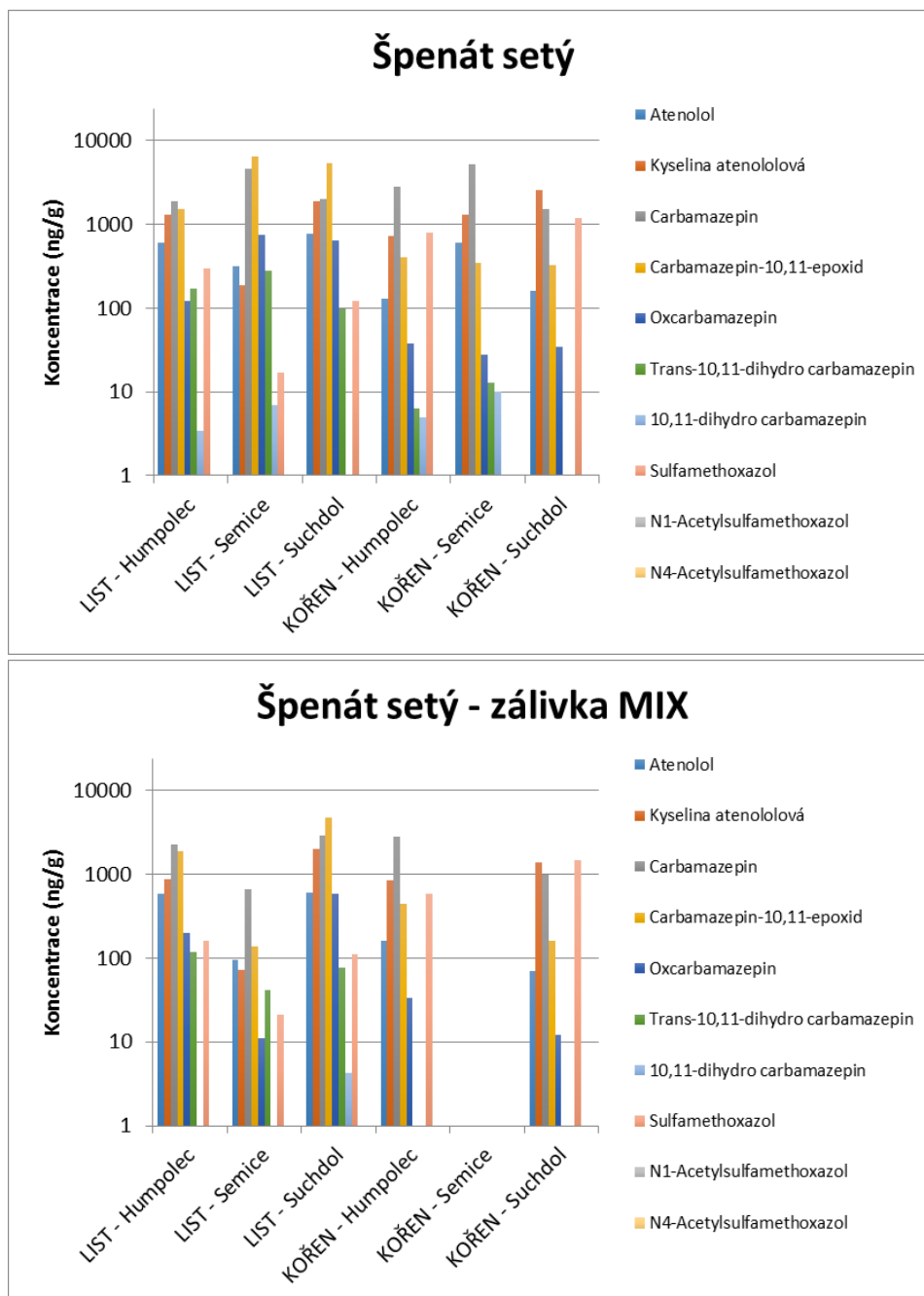
Na Obrázku 14 jsou graficky znázorněny koncentrace jednotlivých léčiv v kořenech a listech kozlíčku polního. Nejvyšších koncentrací, až 20 000 ng.g⁻¹, dosahuje carbamazepin-10, 11-epoxid, který je zastoupen v listech rostlin. Nejvyšší koncentrace byla naměřena v rostlinách pěstovaných v černozemi modální. V kořenech kozlíčku má nejvyšší koncentrace kyselina atenololová, a to až 15 000 ng.g⁻¹ v rostlinách z černozemě. V kořenech rostlin pěstovaných v regozemi modální dosahoval, oproti ostatním půdám, vysokých koncentrací také carbamazepin, sulfamethoxazol a atenolol. Metabolity sulfamethoxazolu byly ve všech částech rostlin pod hranicí kvantifikace.



Obrázek 15. Procentuální zastoupení jednotlivých léčiv a jejich metabolitů v listech a kořenech kozlíčku polního v jednotlivých půdních typech

Na Obrázku 15 je vidět procentuální zastoupení léčiv v listech a kořenech kozlíčku polního. V kořenech bylo analyzováno o poznání více atenololu, především v rostlinách

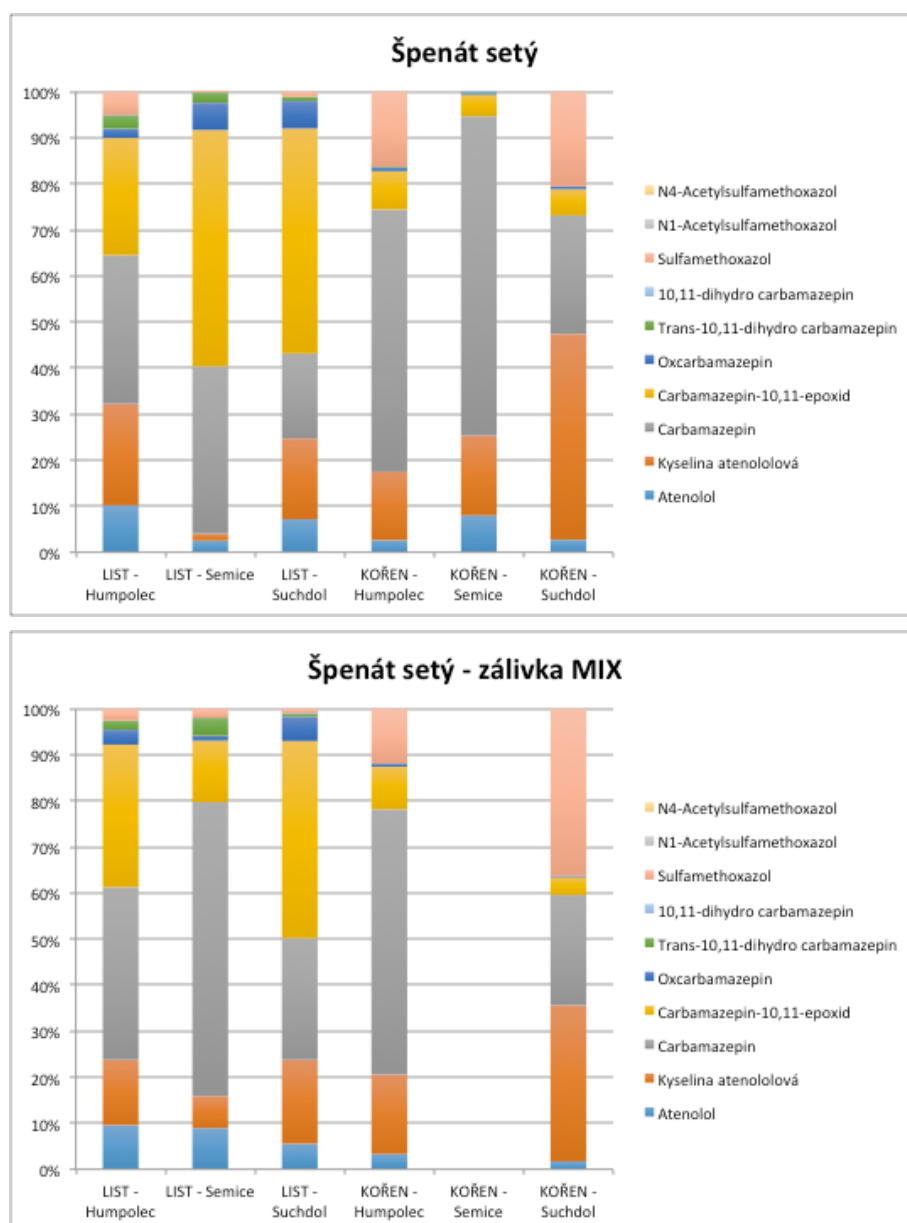
pěstovaných v kambizemi a regozemi, než tomu bylo u rostlin roketý seté. Stále je však v kořenech nejvíce zastoupena kyselina atenololová. Oproti rostlinám roketý seté, kde bylo nejvíce carbamazepinu, byl v listech procentuálně nejvíce zastoupen carbamazepin-10, 11-epoxid. Bylo zde naměřeno také více oxcarbamazepinu. U rostlin zalévaných mixem léčiv byly výsledky podobné jako u rostlin, zalévanými samostatnými léčivy. V kořenech se méně projevil atenolol, ale byl zde více detekován carbamazepin.



Obrázek 16. Koncentrace léčiv a jejich metabolitů v kořenech a listech špenátu setého v jednotlivých typech půd

Naměřené koncentrace léčiv (Obrázek 16) byly v rostlinách špenátu celkově nižší než ve všech ostatních druzích rostlin. V kořenech měl nejvyšší koncentrace carbamazepin,

až 5200 ng.g⁻¹, kromě rostlin pěstovaných v černozemi, kde byla nejvíce zastoupena kyselina atenololová, 2 600 ng.g⁻¹. V kořenech z regozemě nebyl analyzován žádný sulfamethoxazol ani jeho metabolity. V listech rostlin pěstovaných v regozemi a černozemi nejvyšších koncentrací dosahoval carbamazepin-10,11-epoxid, nejvíce 6 500 ng.g⁻¹, druhým nejkoncentrovanějším léčivem byl carbamazepin. V rostlinách z kambizemě byl nejkoncentrovanější carbamazepin. V rostlinách zavlažovaných mixem léčiv je vidět, že v listech rostlin pěstovaných v půdě ze Semic, kde je regozem modální, nedosahoval nejvyšších koncentrací carbamazepin-10,11-epoxid, jako tomu bylo u závlivky se samostatným léčivem, ale nejkoncentrovanější zde byl carbamazepin. V kořenu rostlin pěstovaných v černozemi převažoval sulfamethoxazol nad kyselinou atenololovou.

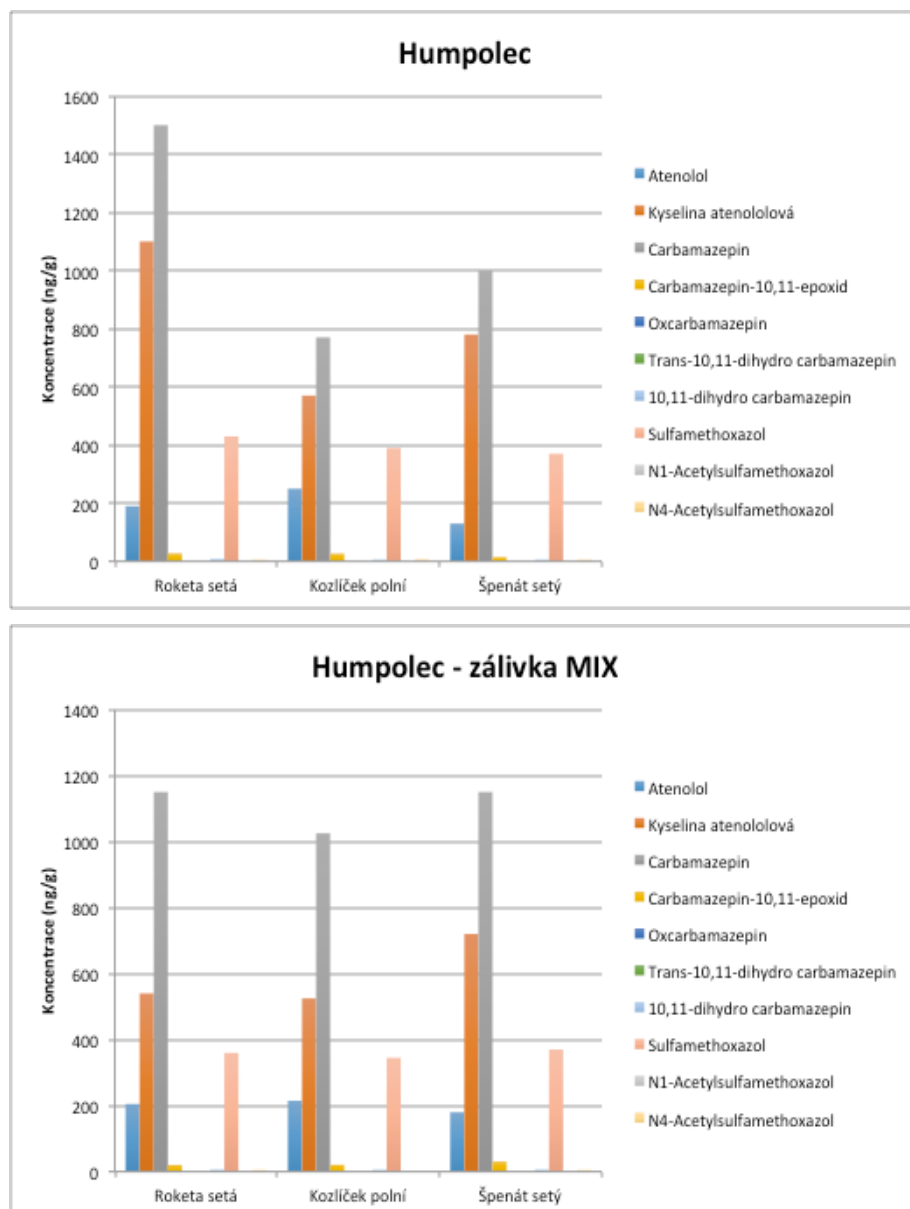


Obrázek 17. Procentuální zastoupení jednotlivých léčiv a jejich metabolitů v listech a kořenech špenátu setého v jednotlivých půdních typech

V kořenech špenátu setého (Obrázek 17) bylo naměřeno podstatně méně kyseliny atenololové oproti roketě seté i kozlíčku polnímu. Bylo zde však analyzováno velké množství carbamazepinu. Oproti kozlíčku polnímu bylo v kořenech špenátu nalezeno také více sulfamethoxazolu. V listech špenátu je nejvíce zastoupen carbamazepin a jeho metabolit carbamazepin-10,11-epoxid. Oproti roketě a kozlíčku je zde také vyšší množství kyseliny atenololové. V listech rostlin pěstovaných v černozemi a regozemi je zastoupen také oxcarbamazepin a trans-10,11-dihydro carbamazepin. V rostlinách zalévaných mixem léčiv se v kořenech více projevil sulfamethoxazol, především v rostlinách z černozemě. V listech bylo, oproti zálivce se samostatnými léčivy, analyzováno více atenololu a také carbamazepinu. Nebylo zde nalezeno tak vysoké množství oxcarbamazepinu. V kořenech rostlin pěstovaných v regozemi nebylo možné analyzovat léčiva z důvodu nedostatečné kořenné hmoty.

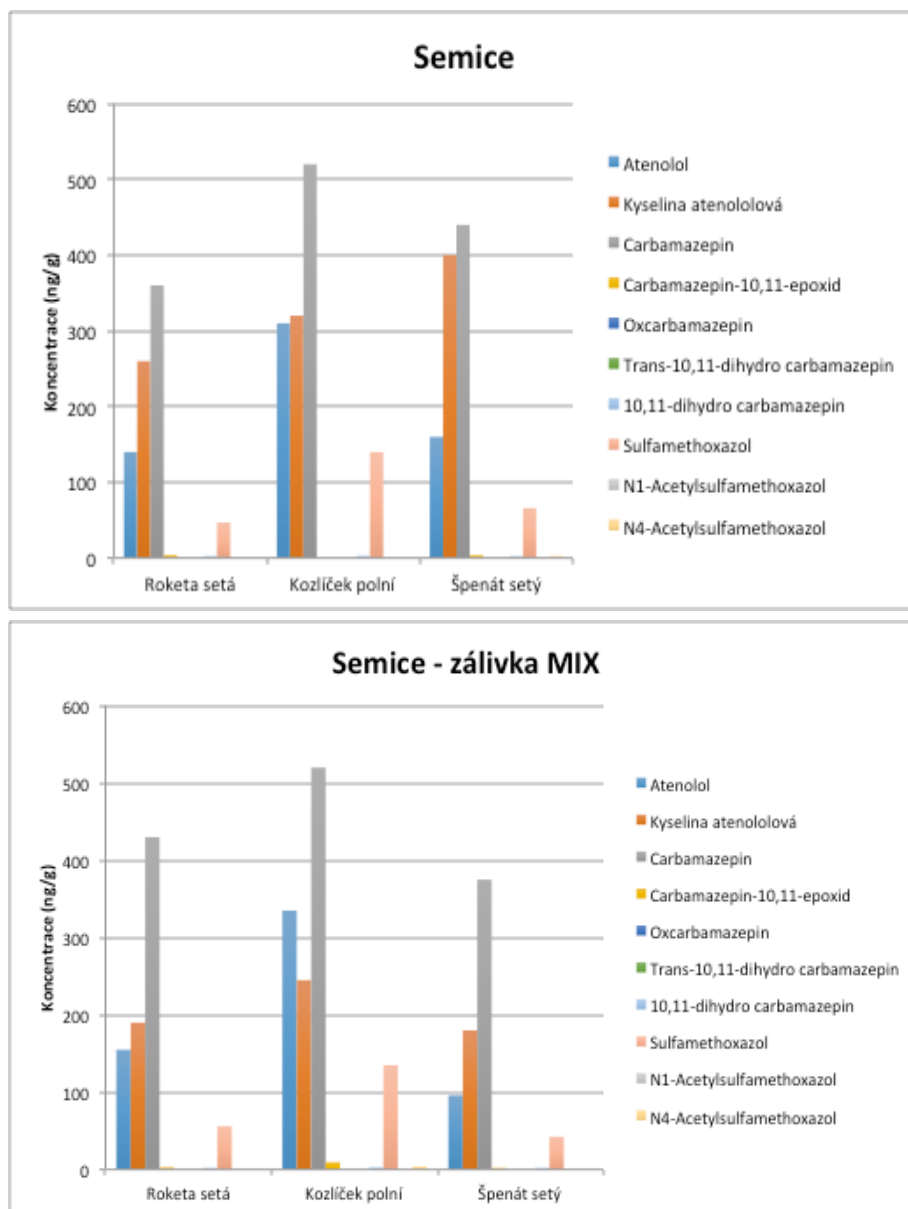
5.3 Koncentrace léčiv v půdách po pěstování rostlin zavlažovaných léčivy

U kontrolního vzorku rostlin, zavlažovaného pouze vodou bez přidání léčiv, nedosahovaly koncentrace žádného léčiva ani jeho metabolitu nad limity kvantifikace.



Obrázek 18. Koncentrace léčiv a jejich metabolitů v kambizemi modální po vypěstování jednotlivých druhů rostlin

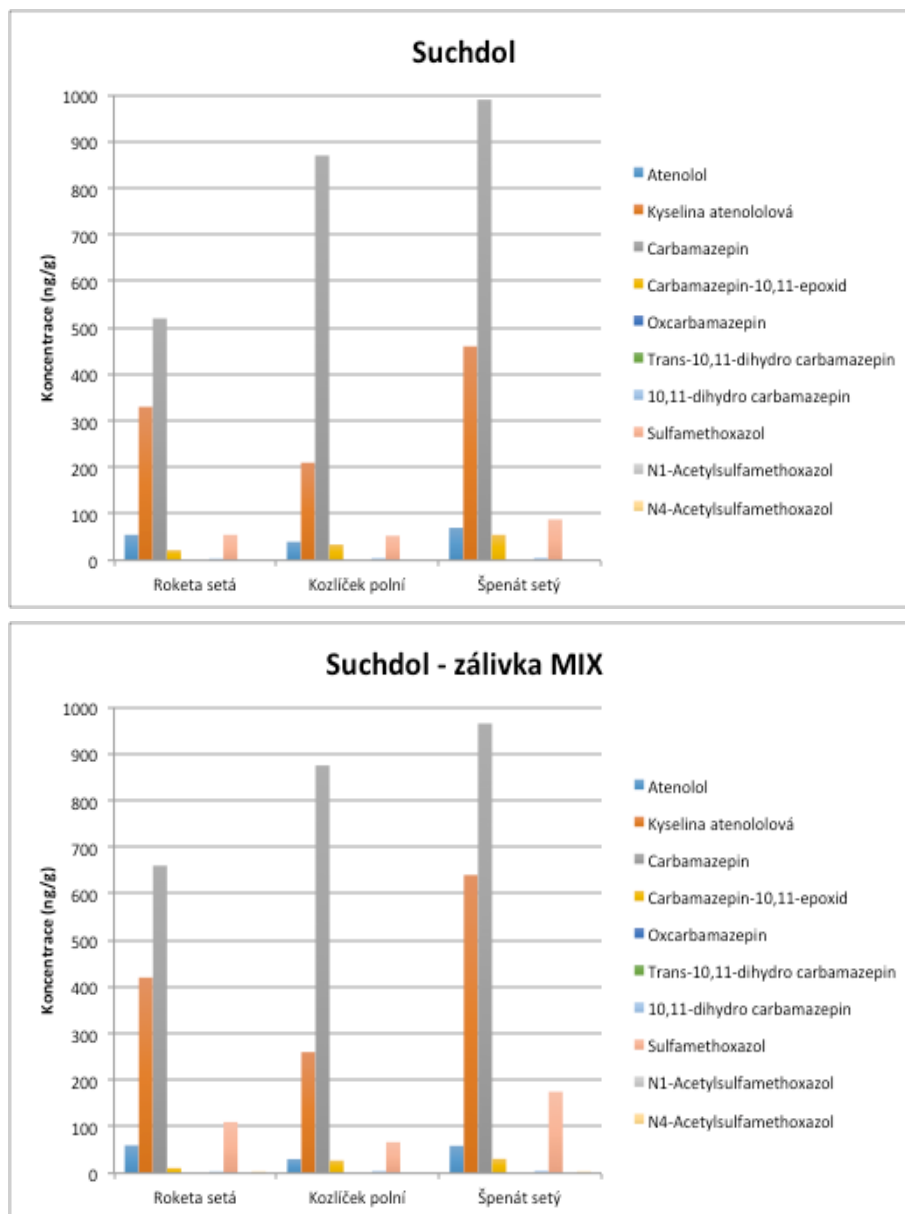
Na Obrázku 18 je znázorněna koncentrace léčiv naměřena po dopěstování rostlin v kambizemi modální z oblasti Humpolce. Nejvyšší koncentrace po všech třech druzích rostlin dosahoval carbamazepin. Po roketě seté byla jeho koncentrace až $1\,500\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. Druhým nejkoncentrovanějším léčivem je kyselina atenololová, která byla nejzastoupenějším léčivem v kořenech roketky, ta měla koncentraci až $1\,100\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. Naopak metabolit carbamazepinu, carbamazepin-10,11-epoxid, který se vyskytoval hlavně listech rostlin, zde dosahuje pouze nízkých koncentrací, což značí, že je z carbamazepinu metabolizován až v rostlinných tkáních. V půdě po zavlažování rostlin mixem léčiv byly významnější koncentrace naměřenou carbamazepinu v koncentraci až $1\,150\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ a kyselině atenololové v koncentraci až $720\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$.



Obrázek 19. Koncentrace léčiv a jejich metabolitů v regozemi modální po vypěstování jednotlivých druhů rostlin

Na Obrázku 19 je graficky znázorněna koncentrace léčiv a jejich metabolitů v regozemi modální z oblasti Semic po vypěstování rostlin. Koncentrace léčiv jsou oproti půdě z Humpolce celkově nižší. I zde dosahuje nejvyšších hodnot carbamazepin, a to 520 ng.g^{-1} , po rostlinách kozlíčku polního. Tato koncentrace je však poloviční oproti jeho hodnotám naměřeným v kambizemi modální. Druhou nejkoncentrovanější látkou je zde kyselina atenololová. Její nejvyšší naměřená hodnota je po rostlinách špenátu setého, 400 ng.g^{-1} . V půdě po kozlíčku polním byla naměřena vysoká hodnota samotného atenololu, který se vyskytoval také v jeho kořenech. Nad hranici kvantifikace byl ještě analyzován sulfamethoxazol. Půda ze zálivkou s mixem léčiv dosahovala obdobných hodnot a léčiv, jako půda se zálivkami samostatných léčiv. Až na kozlíček polní, kde klesla hodnota kyseliny atenololové a zvýšila se koncentrace samotného atenololu.

V kořenech rostlin se v nejvyšších koncentracích vyskytovala kyselina atenololová. Tedy kromě špenátu setého, u kterého byl i v kořenech v nejvyšších koncentracích naměřen carbamazepin.



Obrázek 20. Koncentrace léčiv a jejich metabolitů v černozech modální po vypěstování jednotlivých druhů rostlin

Černoze modální z oblasti Prahy – Suchdol (Obrázek 20) obsahovala opět nejvyšší koncentrace carbamazepinu, až 990 ng.g^{-1} po rostlinách špenátu setého, což značí jeho nižší schopnost vstřebávání této látky kořenovým systémem. Druhou nejkoncentrovanější látkou je, opět jako u předchozích typů půd, kyselina atenololová v nejvyšší koncentraci 460 ng.g^{-1} . Je zde zaznamenáno snížení koncentrace atenololu oproti kambizemi i regozemi. Naopak zde byla naměřena koncentrace 55 ng.g^{-1} u carbamazepin-10,11-epoxidu, což je nejvyšší koncentrace ze všech typů půd. Detekován zde byl také sulfamethoxazol. V zálivce s mixem léčiv dosahoval

nejvyšších koncentrací opět carbamazepin. Vyšších hodnot než při samostatném zavlažování dosahoval sulfamethoxazol, 175 ng.g⁻¹ v rostlinách špenátu, a kyselina atenololová, 640 ng.g⁻¹.

6. Diskuze

Přítomnost léčiv v životním prostředí je v dnešní době intenzivně studována. Jedním z hlavních kontaminantů životního prostředí jsou přečištěné odpadní vody, z kterých zatím nejsou farmaceutika dostatečně efektivně odstraňována a následným zaléváním plodin určených ke konzumaci, se tyto látky mohou dostat až do lidského organismu.

Tato práce zkoumala možné vstřebávání tří léčiv atenololu, carbamazepinu a sulfamethoxazolu z půdy do rostlin. Léčiva byla zvolena na základě jejich výskytu v odpadních vodách (Golovko et al., 2014, Loos et al., 2010, Loos et al., 2015). Testována byla rožka setá, kozlíček polní a špenát polní, protože se jedná o listovou zeleninu, kterou se mohou tato léčiva dostat do lidského těla. Rostliny byly pěstovány ve třech typech půd černozemi modální, kambizemi modální a regozemi modální, aby se zjistilo, jestli je jejich vstřebávání do rostlin ovlivněno půdními vlastnostmi.

Hmotnosti suchých částí rostlin (Obrázek 8 – 10) neukázaly žádnou tendenci ve změně hmotnosti při zavlažování roztokem jednoho léčiva, jejich směsí, či čistou vodou, což je v souladu například s výsledky práce Shenkera et al. (2011). Nárůst rostlinné hmoty byl však velice ovlivněn typem půdy a jejich fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Nejvyšší hmotnosti dosahovaly rostliny rožky seté a kozlíčku pěstované v černozemi modální. Nižších hodnot pak dosahovaly rostliny z kambizemě modální a nejnižší hmotnosti měly rostliny pěstované v regozemi.

Jak již bylo dříve zjištěno, poločas rozpadu léčiv je závislý na půdním typu a půdních vlastnostech (Kodešová et al., 2016). Přestože se atenolol a sulfamethoxazol z půdy rychle odbourává, byla jejich přítomnost zjištěna ve všech rostlinách a jejich částech, které byly analyzovány. Metabolit atenololu, kyselina atenololová, byla látkou s nejvyššími koncentracemi v kořenech rostlin ve všech typech půdy. To bylo nejspíše způsobeno rychlou transformací atenololu v půdě (Kodešová et al., 2016) a jeho následným vstřebáváním do kořenů rostlin. V listech a půdě byly naměřeny nižší koncentrace atenololu a jeho metabolitu než v kořenech. Vyšší koncentrace atenololu v kořenech, oproti listům, je nejspíše způsobena navázáním kladně nabitých iontů atenololu na negativně nabitě buněčné stěny kořenů, čímž dochází ke snížení translokace látky do dalších částí rostlin.

Naměřené koncentrace sulfamethoxazolu byly také vyšší v kořenech rostlin, než v jejich listech, (kromě špenátu setého z oblasti Semic, kde kvůli nedostatku materiálu nemohlo dojít k analýze dat) což se shoduje se studií Wu et al. (2013) nebo Malchi et al. (2014). Nižší obsah sulfamethoxazolu v listech rostlin než v kořenech je dán jeho nízkou mobilitou v rostlinných tkáních způsobenu jeho negativním nábojem. Wu et al. (2013) ve své studii také zjistil, že sulfamethoxazol je rostlinami přijímán méně než atenolol. Toto se v naší studii nepotvrdilo, naopak obsah sulfamethoxazolu byl ve většině případů vyšší než obsah atenololu.

Carbamazepin je v půdách velmi stabilní látka (Kodešová et al., 2016). V kořenech a půdách rostlin dosahovaly jeho koncentrace podobných hodnot jako koncentrace atenololu a sulfamethoxazolu. V listech všech rostlin však dosahovaly koncentrace carbamazepinu nebo jeho metabolitů velmi vysokých koncentrací. To bylo způsobeno jeho výskytem

v neutrální formě, a tím jeho snadným vstřebáváním a následnou translokací díky transpiračnímu toku a následným hromaděním v rostlinných listech (Shenker et al., 2011). Nejvyšší koncentrace carbamazepinu byla naměřena v listech roketky seté, a to 23 µg/g. Naopak metabolitů této látky zde bylo naměřeno výrazně méně, což ukazuje na nízkou schopnost této rostliny metabolizovat carbamazepinu ve svém těle. U kozlíčku polního koncentrace samotného carbamazepinu nedosahovaly tak vysokých hodnot, za to zde byly naměřeny vysoké koncentrace jeho metabolitu carbamazepin-10,11-epoxidu a také relativně vysoké koncentrace oxcarbamazepinu. V případě špenátu byly koncentrace carbamazepinu i jeho metabolitu celkově nižší. Nicméně koncentrace carbamazepinu a carbamazepin-10,11-epoxidu byly podobné a byly rovněž naměřeny nízké koncentrace oxcarbamazepinu. To značí, že do listů těchto rostliny byl carbamazepin translokován a následně zde byl metabolizován, protože v půdě byl tento metabolit přítomen pouze v malých koncentracích. K podobným výsledkům dospěla i studie Malchi et al. (2014). V ní však bylo tvrzeno, že carbamazepin je metabolizován až v listech rostlin, což naše studie nepotvrdila, protože metabolity carbamazepinu byly naměřeny již v kořenech. Vysoké koncentrace carbamazepinu v listech rostlin byly stanoveny také v dalších studiích (Wu et al., 2013, Shenker et al., 2011, Montemurro et al., 2017). Metabolity carbamazepinu oxcarbamazepin a trans-10,11-dihydro carbamazepin byly detekovány pouze v rostlinách, nikoli v půdě. Carbamazepin je jedna z nejčastěji se vyskytujících znečišťujících látek v odpadních povrchových vodách (Loos et al., 2009). Je zároveň látkou, která nepodléhá přílišné sorpci a degradaci v půdě, tím se ve větším množství může dostávat do rostlin a poté dále do lidského těla.

Nižší koncentrace léčiv v půdách (Obrázek 18 – 20, Příloha 5) oproti kořenům rostlin značí potenciál rostlin k vstřebávání a akumulaci léčiv ve svých tkáních. Příjem léčiv rostlinami byl značně ovlivněn sorpcí na půdní částice. Nejvyšší koncentrace léčiv v rostlinách byly naměřeny po pěstování v regozemi modální, která nejméně atenuje sorbuje. Totéž bylo zjištěno pro regozem a carbamazepin. To se shoduje se studií Malchi et al. (2014), kde byly také naměřeny nejvyšší koncentrace carbamazepinu v půdách s nejnižší sorpcí. Naopak nejnižší koncentrace sulfamethoxazolu byly nalezeny v rostlinách pěstovaných v kambizemi modální, která tuto látku nejvíce sorbuje.

Koncentrace léčiv v rostlinách, které byly zalévány roztokem jediného léčiva a těch, které byly zavlažovány jejich směsí, dosahovaly podobných hodnot. V kořenech rostlin bylo naměřeno relativně stejné koncentrace sulfamethoxazolu při zalévání pouze jedním léčivem, tak jeho směsí. U atenololu a carbamazepinu byly naměřeny větší hodnoty u rostlin zalévaných směsí léčiv. Sulfamethoxazol patrně zapříčinil snížení degradace zbylých léčiv v půdě. To je prokázáno jejich vyšším zastoupením v půdě po závlaze směsí léčiv, než po rostlinách zalévaných roztokem pouze jednoho léčiva (Obrázek 18 – 20, Příloha 6). Kočárek et al. (2016) zjistili, že sorpce carbamazepinu na půdní částice klesá, když je ve směsi s atenololem. Naopak Fér et al. (2018) zjistil, že se sorpce carbamazepinu aplikovaným společně s atenololem a sulfamethoxazolem zvyšuje. V případě sulfamethoxazolu jeho sorpce na půdní částice v obou případech stoupala. Na základě výsledků této studie není možné potvrdit, že by závlaha více druhů léčiv najednou měla snižující nebo naopak zvyšující dopad při jejich vstřebávání rostlinami.

7. Závěr

Z mnoha studií vyplývá, že rostliny mohou vstřebávat léčiva obsažená v půdě svými kořeny a následně je šířit dál do dalších částí rostlin. Tato diplomová práce se zabývala příjmem tří léčiv, které byly aplikovány samostatně nebo ve směsi, do tří druhů rostlin ze tří typů půd. Při závlaze směsí léčiv byla zjištěna snížená degradace, a tím vyšší koncentrace v půdě a v rostlinách, u atenololu a carbamazepinu, která byla způsobena přítomností sulfamethoxazolu. Nejvyšší koncentrace léčiv v rostlinách byly naměřeny v regozemi, která má nejnižší sorpční schopnosti. Některá z léčiv byla analyzována převážně v kořenech rostlin (atenolol), některá dosahovala vysokých koncentrací naopak v listech rostlin (carbamazepin). Přestože je carbamazepin považován v půdě za velice stabilní látku, byla zjištěna vysoká míra jeho metabolitu carbamazepin-10,11-epoxidu v rostlinných listech, a to především u kozlíčku polního a špenátu setého. Oproti tomu byla prokázána nízká metabolizační účinnost u roketý seté.

Tato práce dokázala, že rostliny jsou schopné vstřebávat vysoké množství farmaceutik z půdy a následně je metabolizovat. Vlastnosti metabolizovaných léčiv zatím nejsou příliš známy. Tyto látky poté zůstávají v konzumovatelných částech rostlin a především naměřené vysoké koncentrace carbamazepinu a jeho metabolitů v listech rostlin mohou mít negativní dopad na lidský organismus.

8. Přehled literatury a použitých zdrojů

- Ahmed, M. B. M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Vu, N. T., Kim, I. S., Kang, H. M., Lee S. S., Ok, Y. S. 2015. Distribution and accumulative pattern of tetracyclines and sulfonamides in edible vegetables of cucumber, tomato, and lettuce. *Journal of agricultural and food chemistry*. 63(2). 398-405.
- Almasri M. N. and Kaluarachchi J. J. 2004. Assessment and management of long-term nitrate pollution of ground water in agriculture dominated watersheds. *Journal of Hydrology*. 295(1-4). 225-245.
- Collins, C., Fryer, M., Grosso, A. 2006. Plant uptake of non-ionic organic compounds. *Environmental Science and Technology*. 40(1). 45-52.
- Dodgen, L. K., Li, J., Parker, D., Gan, J. J. 2013. Uptake and accumulation of four PPCP/EDCs in two leafy vegetables. *Environmental pollution*. 182. 150-156.
- Dotaniya, M. L., Rajendiran, S., Coumar, M. V., Meena, V. D., Saha, J. K., Kundu, S., Kumar, A., Patra, A. K. 2018. Interactive effect of cadmium and zinc on chromium uptake in spinach grown in Vertisol of Central India. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 15(2). 441-448.
- Estefan, G., Sommer, R., Ryan, J. 2013. *Methods of soil, plant and water analysis*. third edition. A manual for the West Asia and North Africa region. ICARDA. Lebanon. pp. 243.
- Fedorova, G., Randak, T., Golovko, O., Kodes, V., Grabicova, K., Grabic, R. 2014a. A passive sampling method for detecting analgesics, psycholeptics, antidepressants and illicit drugs in aquatic environments in the Czech Republic. *Science of The Total Environment*. 487. 681-687.
- Fedorova, G., Golovko, O., Randak, T., Grabic, R. 2014b. Storage effect on the analysis of pharmaceuticals and personal care products in wastewater. *Chemosphere*. 111. 55-60.
- Fent, K., Weston, A. A., Caminada, D. 2006. *Ecotoxicology of human pharmaceuticals*. *Aquatic Toxicology*. 76(2). 122-159.
- Fér, M., Kodešová, R., Golovko, O., Schmidtová, Z., Klement, A., Nikodem, A., Kočárek, M., Grabic, R. 2018. Sorption of atenolol, sulfamethoxazole and carbamazepine onto soil aggregates from the illuvial horizon of the Haplic Luvisol on loess. *Soil and Water Research*, 13(3). 177-183.

- García-Valcárcel, A. I., Loureiro, I., Escorial, C., Molero, E., Tadeo, J. L. 2016. Uptake of azoles by lamb's lettuce (*Valerianella locusta* L.) grown in hydroponic conditions. *Ecotoxicology and environmental safety*. 124. 138-146.
- Goldstein, M., Shenker, M., Chefetz, B. 2014. Insights into the uptake processes of wastewater-borne pharmaceuticals by vegetables. *Environmental Science and Technology*. 48(10). 5593–5600.
- Golovko, O., Kumar, V., Fedorova, G., Randak, T., Grabic, R. 2014. Seasonal changes in antibiotics, antidepressants/psychiatric drugs, antihistamines and lipid regulators in a wastewater treatment plant. *Chemosphere*. 111. 418 – 426.
- Gottschall, N., Topp, E., Metcalfe, C., Edwards, M., Payne, M., Kleywegt, S., Russell, P., Lapen, D. R. 2012. Pharmaceutical and personal care products in groundwater, subsurface drainage, soil, and wheat grain, following a high single application of municipal biosolids to a field. *Chemosphere*. 87(2). 194–203.
- Greenhagen, A. M., Lenczewski, M. E., Carroll, M. 2014. Natural attenuation of pharmaceuticals and an illicit drug in a laboratory column experiment. *Chemosphere*. 115. 13-19.
- Gros, M., Petrović, M., Ginebreda, A., Barceló, D. 2010. Removal of pharmaceuticals during wastewater treatment and environmental risk assessment using hazard indexes. *Environment International*. 36(1). 15–26.
- Hajšlová, J., Kocourek, V. 2007. *Osud prostředků pro ochranu rostlin v potravním řetězci člověka. Vědecký výbor fyto-sanitární a životního prostředí. Praha.*
- Charuaud, L., Jardé, E., Jaffrézic, A., Thomas, M. F., Le Bot, B. 2018. Veterinary pharmaceutical residues from natural water to tap water: Sales, occurrence and fate. *Journal of hazardous materials*.
- Ivanová, L., Mackuľák, T., Grabic, R., Golovko, O., Koba, O., Staňová, A. V., Szabová, P., Grenčíková, A., Bodík, I. 2018. Pharmaceuticals and illicit drugs – A new threat to the application of sewage sludge in agriculture. *Science of the Total Environment*. 634. 606-615.
- Karci, A., Balcioglu, I. A. 2009. Investigation of the tetracycline, sulfonamide, and fluoroquinolone antimicrobial compounds in animal manure and agricultural soils in Turkey. *Science of the Total Environment*. 407(16). 4652–4664.
- Kim, S. D., Cho, J., Kim, I. S., Vanderford, B. J., Snyder, S. A. 2007. Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters. *Water Research*. 41(5). 1013–21.

- Kivits, T., Broers, H. P., Beeltje, H., van Vliet, M., Griffioen, J. 2018. Presence and fate of veterinary antibiotics in age-dated groundwater in areas with intensive livestock farming. *Environmental pollution*. 241. 988-998.
- Klement, A., Kodešová, R., Bauerová, M., Golovko, O., Kočárek, M., Fér, M., Koba, O., Nikodem, A., Grabic, R. 2018. Sorption of citalopram, irbesartan and fexofenadine in soils: Estimation of sorption coefficients from soil properties. *Chemosphere*. 195. 615-623.
- Koba, O., Golovko, O., Kodešová, R., Klement, A., Grabic, R. 2016. Transformation of atenolol, metoprolol, and carbamazepine in soils: The identification, quantification, and stability of the transformation products and further implications for the environment. *Environmental pollution*. 218. 574-585.
- Kočárek, M., Kodešová, R., Vondráčková, L., Golovko, O., Fér, M., Klement, A., Nikodem, A., Jakšík, O., Grabic, R. 2016. Simultaneous sorption of four ionizable pharmaceuticals in different horizons of three soil types. *Environmental Pollution*. 218. 563-573.
- Kodešová, R., Grabic, R., Kočárek, M., Klement, A., Golovko, O., Fér, M., Nikodem A., Jakšík, O. 2015. Pharmaceuticals' sorptions relative to properties of thirteen different soils. *Science of the total environment*. 511. 435-443.
- Kodešová, R., Kočárek, M., Klement, A., Golovko, O., Koba, O., Fér, M., Nikodem, A., Vondráčková, L., Jakšík, O., Grabic, R. 2016. An analysis of the dissipation of pharmaceuticals under thirteen different soil conditions. *Science of the Total Environment*. 544. 369 – 381.
- Kurwadkar, S. T., Adams, C. D., Meyer, M. T., Kolpin, D. W. 2011. Comparative mobility of sulfonamides and bromide tracer in three soils. *Journal of Environmental Management*. 92(7). 1874-1881.
- Lapen, D. R., Topp, E., Metcalfe, C. D., Li, H., Edwards, M., Gottschall, N., Bolton, P., Curnoe, W., Payne, M., Beck, A. 2008. Pharmaceutical and personal care products in tile drainage following land application of liquid municipal biosolids. *Science of The Total Environment*. 399(1-3). 50–65.
- Lindberg, R. H., Östman, M., Olofsson, U., Grabic, R., Fick, J. 2014. Occurrence and behaviour of 105 active pharmaceutical ingredients in sewage waters of a municipal sewer collection system. *Water Research*. 58. 221-229.
- Liu, F., Ying, G. G., Tao, R., Zhao, J. L., Yang, J. F., Zhao, L. F. 2009. Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities. *Environmental pollution*. 157(5). 1636-1642.

- Loos, R., Gawlik, B. M., Locoro, G., Rimaviciute, E., Contini, S., Bidoglio, G. 2009. EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters. *Environmental Pollution*. 157(2). 561-568.
- Loos, R., Locoro, G., Comero, S., Contini, S., Schwesig, D., Werres, F., Balsaa, P., Gans, O., Weiss, S., Blaha, L., Bolchi, M., Gawlik, B. M. 2010. Pan-European survey on the occurrence of selected polar organic persistent pollutants in ground water. *Water Research*. 44. 4115–4126.
- Malchi, T., Maor, Y., Tadmor, G., Shenker, M., Chefetz, B. 2014. Irrigation of root vegetables with treated wastewater: evaluating uptake of pharmaceuticals and the associated human health risks. *Environmental Science and Technology*. 48(16). 9325–9333
- Martín, J., Camacho-Munoz, D., Santos, J. L., Aparicio, I., Alonso, E. 2012. Occurrence of pharmaceutical compounds in wastewater and sludge from wastewater treatment plants: Removal and ecotoxicological impact of wastewater discharges and sludge disposal. *Journal of Hazardous Materials*. 239, 40– 47.
- Montemurro, N., Postigo, C., Lonigro, A., Perez, S., Barceló, D. 2017. Development and validation of an analytical method based on liquid chromatography–tandem mass spectrometry detection for the simultaneous determination of 13 relevant wastewater-derived contaminants in lettuce. *Analytical and bioanalytical chemistry*. 409(23). 5375-5387.
- Němeček, J., Rohošková, M., Macků, J., Vokoun, J., Vavříček, D., Novák, P., 2008: Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Elektronická verze. ČZU v Praze.
- Pansu, M., Gautheyrou, J. 2006. *Handbook of soil analysis - Mineralogical, organic and inorganic methods*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN: 10 3-540-31210-2.
- Sabourin, L., Duenk, P., Bonte-Gelok, S., Payne, M., Lapen, D.R., Topp, E. 2012. Uptake of pharmaceuticals, hormones and parabens into vegetables grown in soil fertilized with municipal biosolids. *Science of The Total Environment*. 431. 233–236.
- Shenker, M., Harush, D., Ben-Ari, J., Chefetz, B. 2011. Uptake of carbamazepine by cucumber plants – A case study related to irrigation with reclaimed wastewater. *Chemosphere*. 82(6). 905-910.
- Schwarzenbach, R. P., Gschwend, P. M., Imboden, D. M. 2003. *Environmental Organic Chemistry*. Second Edition. John Wiley and Sons, Inc. Hoboken. New Jersey. USA. ISBN: 0-47 1-35750-2.

- Tang, X., Lim, M. P., McBride, M. B. 2018. Arsenic uptake by arugula (*Eruca vesicaria*, L.) cultivars as affected by phosphate availability. *Chemosphere*. 195. 559-566.
- Thiele-Bruhn, S., 2003. Pharmaceutical antibiotic compounds, in soils — a review. 2003. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 166(2). 145–167
- Thomas, G. W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods*. Soil Science Society of America: Madison, WI. 475-490.
- Topal, E. I. A. 2015. Uptake of tetracycline and metabolites in *Phragmites australis* exposed to treated poultry slaughterhouse wastewaters. *Ecological Engineering*. 83. 233-238.
- Trapp, S., 2009. Bioaccumulation of polar and ionizable compounds in plants. *Ecotoxicology Modeling*. 299–353.
- Valla, M., Kozák, J., Němeček, J., Matula, S., Borůvka, L., Drábek, O. 2007. *Pedologické praktikum*. 2. vydání, 2. dotisk. Praha. Česká zemědělská univerzita. 151 s. ISBN 978-80-213-0914-2.
- Vieno, N. M., Tuhkanen, T., Kronberg, L. 2005. Seasonal variation in the occurrence of pharmaceuticals in effluents from a sewage treatment plant and in the recipient water. *Environmental science and technology*. 39(21). 8220-8226.
- Wu, C., Spongberg, A. L., Witter, J. D., Min, F., Czajkowski, K.P. 2010. Uptake of pharmaceutical and personal care products by soybean plants from soils applied with biosolids and irrigated with contaminated water. *Environmental Science and Technology*. 44(16). 6157– 6161.
- Wu, X., Ernst, F., Conkle, J. L., Gan, J. 2013. Comparative uptake and translocation of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) by common vegetables. *Environment international*. 60. 15-22.
- Wu, X., Dodgen, L. K., Conkle, J. L., Gan, J. 2015. Plant uptake of pharmaceutical and personal care products from recycled water and biosolids: a review. *Science of The Total Environment*. 536. 655-666.
- Xu, J., Wu, L., Chang, A.C., 2009. Degradation and adsorption of selected pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in agricultural soils. *Chemosphere*. 77. 1299–1305.
- Zhang, Y., Lv, T., Carvalho, P. N., Arias, C. A., Chen, Z., Brix, H. 2016. Removal of the pharmaceuticals ibuprofen and iohexol by four wetland plant species in hydroponic culture: plant uptake and microbial degradation. *Environmental Science and Pollution Research*. 23(3). 2890-2898.

9. Samostatné přílohy

Příloha 1. Hmotnosti lyofilizovaných částí rostlin (roketý seté, špenátu setého a kozlíčku polní)

Léčivo	Roketa setá					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)
Kontrola	1,08	0,21	0,41	0,26	1,72	0,01
Mix	0,98	0,09	0,47	0,01	1,45	0,31
Atenolol	1,03	0,37	0,35	0,07	1,26	0,24
Carbamazepin	1,17	0,07	0,49	0,06	1,33	0,25
Sulfamethoxazol	1,13	0,13	0,51	0,07	1,67	0,31

Léčivo	Špenát setý					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)
Kontrola	1,08	0,15	0,28	0,04	1,03	0,15
Mix	0,86	0,11	0,29	0,03	1,71	0,32
Atenolol	0,83	0,14	0,27	0,10	1,80	0,22
Carbamazepin	0,99	0,18	0,54	0,16	1,56	0,37
Sulfamethoxazol	0,97	0,12	0,30	0,01	1,86	0,23

Léčivo	Kozlíček polní					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)	Hmotnost LIST - suchý (g)	Hmotnost KÖREN - suchý (g)
Kontrola	0,94	0,22	0,70	0,36	0,50	0,13
Mix	0,76	0,13	0,50	0,19	0,69	0,26
Atenolol	0,74	0,16	0,42	0,12	0,68	0,20
Carbamazepin	0,73	0,14	0,44	0,08	0,77	0,17
Sulfamethoxazol	0,54	0,11	0,45	0,27	0,77	0,26

Příloha 2. Naměřené koncentrace léčiv v kořenech a listech roketý seté při záливce roztokem samostatného léčiva a směsi léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální), (chybějící údaje z lokality Semice se nepodařilo změřit z důvodu nedostatečného množství materiálu)

Léčivo	Roketa setá					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KÖREN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KÖREN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KÖREN (ng/g)
Atenolol	280	390	310	170	260	420
Kyselina atenololová	2800	3100	560	940	460	2800
Carbamazepin	23000	3400	4300	NA	8400	1800
Carbamazepin-10,11-epoxid	6800	92	800	NA	1800	60
Oxcarbamazepin	830	8,40	76	NA	220	4,70
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	160	<0,30	190	NA	11	<0,10
10,11-dihydro carbamazepin	42	5,50	6,70	NA	15	<0,30
Sulfamethoxazol	75	1600	18	340	67	1000
N1-Acetylsulfamethoxazol	<0,1	<0,50	<0,9	<0,2	<0,4	<0,8
N4-Acetylsulfamethoxazol	<0,7	<0,90	<0,7	66	<0,0	<0,6

Léčivo	MIX léčiv - Roketa setá					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KÖREN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KÖREN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KÖREN (ng/g)
Atenolol	250	540	170	NA	410	900
Kyselina atenololová	910	5300	240	NA	490	8600
Carbamazepin	13000	4000	7400	NA	6900	1600
Carbamazepin-10,11-epoxid	2400	140	1700	NA	1200	22
Oxcarbamazepin	290	16	190	NA	150	<0,00
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	55	<0,70	72	NA	<0,90	<0,70
10,11-dihydro carbamazepin	23	8,40	12	NA	12	<0,10
Sulfamethoxazol	52	360	25	NA	26	540
N1-Acetylsulfamethoxazol	<0,8	<0,0	<0,2	NA	<0,4	<0,4
N4-Acetylsulfamethoxazol	<0,6	<0,6	<0,0	NA	<0,9	<0,3

Příloha 3. Naměřené koncentrace léčiv v kořenech a listech kozlíčku polního při záливce roztokem samostatného léčiva a směsi léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální)

Léčivo	Kozlíček polní					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)
Atenolol	390	2400	900	7500	210	430
Kyselina atenololová	380	11000	420	10000	720	15000
Carbamazepin	1400	2400	2700	8600	4600	3000
Carbamazepin-10,11-epoxid	10000	440	12000	1300	20000	320
Oxcarbamazepin	1500	46	1800	160	3300	36
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	220	<8,30	580	98	220	<16,70
10,11-dihydro carbamazepin	<12,90	4,70	<13,80	15	8,20	4,00
Sulfamethoxazol	23	580	290	4400	200	980
N1-Acetylsulfamethoxazol	<167	<1150	<155	<1110	<137	<176
N4-Acetylsulfamethoxazol	<181	<1180	<166	<1140	<115	<191

Léčivo	MIX léčiv - Kozlíček polní					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)
Atenolol	290	1200	110	850	150	230
Kyselina atenololová	370	6600	230	4100	960	11000
Carbamazepin	3300	2000	1600	4400	6400	1900
Carbamazepin-10,11-epoxid	17000	290	5700	390	17000	170
Oxcarbamazepin	2500	30	710	40	2400	17
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	300	<15,00	100	19	190	<16,10
10,11-dihydro carbamazepin	5,60	3,70	<11,10	8,20	10	3,50
Sulfamethoxazol	260	1100	48	480	350	1100
N1-Acetylsulfamethoxazol	<114	<165	<197	<153	<153	<169
N4-Acetylsulfamethoxazol	<153	<178	<1120	<164	<164	<184

Příloha 4. Naměřené koncentrace léčiv v kořenech a listech špenátu setého při záливce roztokem samostatného léčiva a směsi léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální), (chybějící údaje z lokality Semice se nepodařilo změřit z důvodu nedostatečného množství materiálu)

Léčivo	Špenát setý					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)
Atenolol	600	130	320	600	780	160
Kyselina atenololová	1300	730	190	1300	1900	2600
Carbamazepin	1900	2800	4600	5200	2000	1500
Carbamazepin-10,11-epoxid	1500	410	6500	350	5300	330
Oxcarbamazepin	120	38	750	28	650	34
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	170	6,30	280	13	98	<11,30
10,11-dihydro carbamazepin	3,40	4,90	7,00	9,90	<12,60	<12,40
Sulfamethoxazol	300	800	17	NA	120	1200
N1-Acetylsulfamethoxazol	<127	<166	<185	NA	<126	<182
N4-Acetylsulfamethoxazol	<133	<180	<112	NA	<131	<189

Léčivo	MIX léčiv - Špenát setý					
	Humpolec		Semice		Suchdol	
	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)	Koncentrace léčiv - LIST (ng/g)	Koncentrace léčiv - KOŘEN (ng/g)
Atenolol	590	160	94	NA	610	71
Kyselina atenololová	870	840	73	NA	2000	1400
Carbamazepin	2300	2800	670	NA	2900	990
Carbamazepin-10,11-epoxid	1900	450	140	NA	4700	160
Oxcarbamazepin	200	34	11	NA	580	12
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	120	<11,10	41	NA	78	<15,50
10,11-dihydro carbamazepin	<13,00	<15,00	<13,90	NA	4,30	<13,00
Sulfamethoxazol	160	580	21	NA	110	1500
N1-Acetylsulfamethoxazol	<137	<163	<180	NA	<134	<184
N4-Acetylsulfamethoxazol	<115	<164	<160	NA	<111	<111

Příloha 5. Naměřené koncentrace léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální) po dopěstování rockety seté, kozlíčku polního a špenátu setého zalévanými roztokem jednoho druhu léčiva

Léčivo	Koncentrace léčiv v půdě (ng/g)								
	Humpolec			Semice			Suchdol		
	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý
Atenolol	190	250	130	140	310	160	55	40	70
Kyselina atenololová	1100	570	780	260	320	400	330	210	460
Carbamazepin	1500	770	1000	360	520	440	520	870	990
Carbamazepin-10,11-epoxid	28	27	15	4,10	<1,20	3,90	22	34	55
Oxcarbamazepin	<1,20	<1,30	<1,00	<1,70	<1,76	<1,00	<1,59	<1,20	<1,00
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	<1,20	<1,10	<1,40	<1,00	<1,70	<1,10	<1,20	<1,40	<1,20
10,11-dihydro carbamazepin	8,50	4,50	6,00	2,00	3,00	2,50	3,00	5,00	5,60
Sulfamethoxazol	430	390	370	47	140	66	55	53	88
N1-Acetylsulfamethoxazol	<1,93	<1,80	<1,40	<1,96	<1,70	<1,92	<1,60	<1,63	<1,69
N4-Acetylsulfamethoxazol	2,60	7,50	4,80	<1,10	<1,20	2,80	<1,10	<1,20	<1,30

Příloha 6. Naměřené koncentrace léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální) po dopěstování rockety seté, kozlíčku polního a špenátu setého zalévanými roztokem směsí léčiv

Léčivo	Koncentrace léčiv v půdě (ng/g) - MIX závlivka								
	Humpolec			Semice			Suchdol		
	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý
Atenolol	205	215	180	155	335	96	60	30,50	59
Kyselina atenololová	540	525	720	190	245	180	420	260	640
Carbamazepin	1150	1025	1150	430	520	375	660	875	965
Carbamazepin-10,11-epoxid	20,50	21	31	3,15	9,65	1,80	11,50	27,50	31
Oxcarbamazepin	<1,98	<1,39	<1,89	<1,37	<1,37	<1,41	<1,53	<1,47	<1,94
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	<1,90	<1,80	<1,30	<1,60	<1,60	<1,90	<1,70	<1,30	<1,70
10,11-dihydro carbamazepin	6,50	6,10	6,60	2,35	3,00	2,15	3,80	5,10	5,55
Sulfamethoxazol	360	345	370	56	135	42,5	110	67	175
N1-Acetylsulfamethoxazol	<1,64	<1,20	<1,47	<1,92	<1,65	<1,95	<1,00	<1,58	<1,58
N4-Acetylsulfamethoxazol	4,70	<1,30	4,30	<1,80	4,10	<1,80	3,20	<1,10	3,25

Příloha 7. Naměřené koncentrace léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální) po dopěstování rockety seté, kozlíčku polního a špenátu setého čerstvou vodou

Léčivo	Koncentrace léčiv v půdě (ng/g) - kontrolní vzorky								
	Humpolec			Semice			Suchdol		
	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý	Roketa setá	Kozlíček polní	Špenát setý
Atenolol	<1,90	<1,70	<1,80	<1,50	<1,70	<1,50	<1,50	<1,60	<1,70
Kyselina atenololová	<1,60	<1,40	<1,00	<1,30	<1,60	<1,20	<1,00	<1,90	<1,60
Carbamazepin	<1,20	<1,88	<1,00	<1,83	<1,83	<1,93	<1,20	<1,10	<1,10
Carbamazepin-10,11-epoxid	<1,40	<1,57	<1,30	<1,53	<1,53	<1,60	<1,76	<1,68	<1,40
Oxcarbamazepin	<1,98	<1,39	<1,89	<1,37	<1,37	<1,41	<1,53	<1,47	<1,94
Trans-10,11-dihydro carbamazepin	<1,90	<1,80	<1,30	<1,60	<1,60	<1,90	<1,70	<1,30	<1,70
10,11-dihydro carbamazepin	<1,30	<1,94	<1,10	<1,88	<1,88	<1,99	<1,30	<1,10	<1,20
Sulfamethoxazol	<1,40	<1,00	<1,70	<1,40	<1,40	<1,50	<1,00	<1,10	<1,10
N1-Acetylsulfamethoxazol	<1,64	<1,20	<1,47	<1,92	<1,65	<1,95	<1,00	<1,58	<1,58
N4-Acetylsulfamethoxazol	<1,20	<1,30	<1,90	<1,80	<1,20	<1,80	<1,80	<1,10	<1,10

Seznam příloh

- Příloha 1. Hmotnosti lyofilizovaných částí rostlin (rokety seté, špenátu setého a kozlíčku polního).....str. I
- Příloha 2. Naměřené koncentrace léčiv v kořenech a listech rokety seté při záливce roztokem samostatného léčiva a směsi léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální) (chybějící údaje z lokality Semic se nepodařilo změřit z důvodu nedostatečného množství materiálu).....str. I
- Příloha 3. Naměřené koncentrace léčiv v kořenech a listech kozlíčku polního při záливce roztokem samostatného léčiva a směsi léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální).....str. II
- Příloha 4. Naměřené koncentrace léčiv v kořenech a listech špenátu setého při záливce roztokem samostatného léčiva a směsi léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální), (chybějící údaje z lokality Semic se nepodařilo změřit z důvodu nedostatečného množství materiálu).....str. II
- Příloha 5. Naměřené koncentrace léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální) po dopěstování rokety seté, kozlíčku polního a špenátu setého zaléváními roztokem jednoho druhu léčiva.....str. III
- Příloha 6. Naměřené koncentrace léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální) po dopěstování rokety seté, kozlíčku polního a špenátu setého zaléváními roztokem směsí léčiv.....str. III
- Příloha 7. Naměřené koncentrace léčiv ve třech typech půd (černozemi modální, regozemi modální, kambizemi modální) po dopěstování rokety seté, kozlíčku polního a špenátu setého čerstvou vodou.....str. III