

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ  
KATEDRA APLIKOVANÉ EKOLOGIE



**OVĚŘENÍ VHODNOSTI RŮZNÝCH FILTRAČNÍCH  
MATERIÁLŮ PRO ČIŠTĚNÍ ŠEDÝCH VOD  
ZASAKOVACÍM PÁSEM**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Vedoucí práce: prof. RNDr. Dana Komínková, Ph.D.  
Bakalant: Radim Hladký

2021

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Radim Hladký

Krajinářství  
Vodní hospodářství

Název práce

**Ověření vhodnosti různých filtračních materiálů pro čištění šedých vod zasakovacím pásem**

Název anglicky

**Verification of suitability of various filter materials for grey water purification in infiltration trench**

---

### Cíle práce

Cílem práce je na základě experimentální práce ověřit a vyhodnotit vhodnost různých filtračních materiálů využitých ve filtračním loži zasakovacího pásu pro čištění šedých vod za účelem jejich znovuvyužití.

### Metodika

S využitím batch testů a experimentálního fyzikálního modelu zasakovacího pásu budou ověřeny různé filtrační materiály a jejich kombinace pro čištění šedých vod. Vyhodnocení vhodnosti zvolených filtračních materiálů (netříděný biochar, antuka, mykorhíza) proběhne na základě kvalitativních charakteristik šedé vody a platných norem pro její opětovné využití.

**Doporučený rozsah práce**

50

**Klíčová slova**

šedé vody; čištění; biochar; antuka; mykorhiza; zasakovací pás

---

**Doporučené zdroje informací**

Barron, N.J., Deletic, A., Jung, J., Fowdar, H., Chen, Y., Hatt, B.E., 2019. Dual-mode stormwater-greywater biofilters: the impact of alternating water sources on treatment performance. *Water Research* 159. P. 521-537.

Boyjoo, Y., Pareek, V.K., Ang, M., 2013: A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water Sci Technol* 67(7). P. 1403–1424.

Jung, J., Fowdar, H., Henry, R., Deletic, A., McCarthy, D. T. 2019: Biofilters as effective pathogen barriers for greywater reuse. *Ecological Engineering*, 138. P.79– 87.

Leal, L.H., 2010: Removal of micropollutants from grey water: combining biological and physical/chemical processes. Wageningen University, Wageningen. 200s. ( disertační práce). „nepublikováno“. Dep.wur.nl.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2020/21 LS – FŽP

**Vedoucí práce**

prof. RNDr. Dana Komínková, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra aplikované ekologie

**Konzultant**

ing. Jaroslav Vacula

Elektronicky schváleno dne 2. 2. 2021

**prof. Ing. Jan Vymazal, CSc.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

**prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.**

Děkan

V Praze dne 19. 03. 2021

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „Ověření vhodnosti různých filtračních materiálů pro čištění šedých vod zasakovacím pásem“ vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze, dne 29.3.2021

Radim Hladký

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl upřímně poděkovat prof. RNDr. Daně Komínkové, Ph.D. a Ing. Jaroslavu Vaculovi, a to především za vynaložený čas, cenné odborné rady a ochotu pomoci, při tvorbě mé bakalářské práce. Chtěl bych také vyjádřit vděk svým nejbližším za soustavnou podporu během dosavadního studia i za trpělivost, kterou se mnou během této doby měli a nadále mají.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá ověřením vhodnosti aditiva antuky, mykorhizy či biouhlu, ve filtrační loži zasakovacího pásu pro čištění šedých vod za účelem jejich znovuvyužití. Samotný experiment probíhal po dobu 30 dní, přičemž každé aditivum bylo testováno pěti shodnými fyzikálními modely zasakovacích pásů. Šedá voda byla dávkována jednou denně a odběr vzorků na odtoku filtrů pro následnou analýzu koncentrací celkového organického uhlíku (TOC), anorganického uhlíku (IC), celkového uhlíku (TC), celkového dusíku (TN), nekovů (fluoridů, chloridů, dusitanů, dusičnanů, bromidů, fosforečnanů a síranů) a tenzidů (aniontové a neiontové), probíhal téměř denně. Pro zpracování a vyhodnocení výsledků byl použit software RStudio a Microsoft Excel. Všechna aditiva byla prokazatelně účinná při odstraňování koncentrací TOC (postupně účinnost antuky, mykorhizy a biouhlu: 34 %; 40 %; respektive 60 %), TN (48 %; 34 %; respektive 59 %) a fosforečnanů (86 %; 74 %; respektive 75 %). V ostatních parametrech aditiva nevykazovala výrazné benefity, či dokonce vedla ke snížení účinnosti filtrů. S ohledem na testované parametry, pro které nejsou v České republice stanoveny přípustné limity, lze samotnou šedou vodu i ošetřenou vodu, využívat jako užitkovou vodu.

## **Klíčová slova**

Antuka, mykorhiza, biouhel, filtrace, úprava šedé vody

## **Abstract**

The bachelor's thesis deals with the verification of the suitability of the additive clay, mycorrhiza, or biochar in the filter bed of the infiltration trench for the purification of gray waters for their reuse. The experiment was run for 30 days, with each additive being tested by five identical physical models of the infiltration trenches. Gray water was dosed once a day and sampling at the filter outlet for subsequent analysis of concentrations of total organic carbon (TOC), inorganic carbon (IC), total carbon (TC), total nitrogen (TN), non-metals (fluorides, chlorides, nitrites, nitrates, bromides, phosphates, and sulfates) and tensides (anionic and nonionic), took place almost daily. To process and evaluate the results was used software RStudio and Microsoft Excel. All additives were shown to be effective in removing concentrations of TOC (efficiencies of clay, mycorrhiza and biochar: 34 %; 40 %; respectively 60 %), TN (48 %; 34 %; respectively 59 %) and phosphates (86 %; 74 %; respectively 75 %). In other parameters, the additive did not show significant benefits or even led to a reduction in the effectiveness of the filters. Concerning the tested parameters, for which no permissible limits are set in the Czech Republic, the gray water itself and the treated water can be used as service water.

## **Key words**

Clay, mycorrhiza, biochar, filtration, grey water treatment

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce .....	2
3. Šedá voda .....	3
3.1 Složení šedé vody .....	3
3.1.1 Světlá šedá voda.....	4
3.1.2 Tmavá šedá voda.....	4
3.2 Rizika spjatá se znovuvyužitím šedé vody .....	5
4. Požadavky na kvalitu užitkové (bílé) vody.....	6
5. Přehled obdobných experimentů .....	9
5.1 Filtry obsahující biouhel.....	9
5.2 Filtry obsahující antuku.....	15
5.3 Filtry obsahující písek.....	16
5.4 Filtry obsahující kompost.....	19
6. Metodika.....	21
6.1 Design fyzikálního modelu zasakovacího pásu.....	21
6.2 Filtrační materiály .....	22
6.3 Syntetická šedá voda.....	23
6.4 Vlastní experiment.....	24
6.5 Chemická analýza šedé vody .....	25
6.6 Statistické vyhodnocení dat .....	26
7. Výsledky .....	27
7.1 Celkový organický uhlík (TOC) .....	30
7.2 Anorganický uhlík (IC) .....	34
7.3 Celkový uhlík (TC).....	38
7.4 Celkový dusík (TN) .....	42
7.5 Fluoridy (F <sup>-</sup> ) .....	46
7.6 Chloridy (Cl <sup>-</sup> ).....	50
7.7 Dusitany (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ).....	54



7.8	Dusičnany ( $\text{NO}_3^-$ ) .....	58
7.9	Bromidy ( $\text{Br}^-$ ).....	62
7.10	Fosforečnany ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).....	65
7.11	Sírany ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) .....	69
7.12	Tenzidy.....	72
8.	Diskuse.....	75
8.1	Formy uhlíku (TOC, TC a IC) a celkový dusík (TN).....	75
8.2	Anionty ( $\text{F}^-$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{Br}^-$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ ).....	76
8.3	Tenzidy.....	79
9.	Závěr .....	80
10.	Seznam literatury .....	82
10.1	Odborné publikace .....	82
10.2	Legislativní zdroje.....	86
10.3	Internetové zdroje.....	86
10.4	Ostatní zdroje .....	88

## 1. Úvod

Neustále probíhající celosvětové klimatické změny, rychle rostoucí světová populace (*CzechGlobe, 2021*), zvýšené urbanistické, zemědělské a průmyslové požadavky, či měnící se stravovací návyky vedou k nedostatku vody (*Bigas & kol., 2012*). V roce 2020 přibližně 4 miliardy lidí žilo v oblastech trpících nedostatkem vody minimálně po dobu jednoho měsíce v roce (*Bisselink & kol., 2020*), přičemž *Mekonnen & Hoekstra (2016)* k podobnému číslu došli již v roce 2016. Odhady pro rok 2050 hovoří až o 5,7 miliardách lidí žijících v postižených oblastech (*UNESCO WWAP, 2018*).

Situace s nedostatkem vody ústí v nutnost ji chránit a hledat její alternativní zdroje. Jednou z cest je opětovné využívání šedých vod, což jsou veškeré odpadní vody z domácností, vyjma vody z toalet (*Otterpohl & kol., 1999; Eriksson & kol., 2002; Boyjoo & kol., 2013*). Šedé vody představují přibližně 50–80 % z celkové produkce odpadní vody domácností (*Wichmann & Otterpohl, 2009; Vuppaladiyam & kol., 2019*) a lze je znovu využít pro splachování toalet, závlahy, případně praní prádla (*Eriksson & kol., 2002*). I přesto, že šedá voda neobsahuje produkty lidského metabolismu (výkaly a moč), vyžaduje ze zdravotních a ekologických důvodů předúpravu, a to i pro závlahu (*Eriksson & kol., 2002*).

Zemědělství je odpovědné přibližně za 70 % celosvětové spotřeby pitné vody (*UNESCO WWAP, 2008*), proto využití šedé vody, jakožto alternativního zdroje pro závlahy v zemědělském odvětví, jenž vyloženě nevyžaduje vodu kvalitativně odpovídající pitné vodě, se jeví jako vhodný způsob recyklace vody (*Toze, 2006*). V některých rozvojových zemích může na zemědělství připadat dokonce více jak 90 % celkové spotřeby pitné vody (*UNESCO WWAP, 2008*). Šedá voda je potenciálně příznivým zdrojem živin pro rostliny (*WHO, 2006a*), avšak je třeba brát zřetel na možnou přítomnost patogenů či chemických kontaminantů a zvážit dopady na salinitu a strukturu půdy (*Toze, 2006*). Ačkoliv se v některých státech šedá voda běžně používá pro závlahy bez jakékoliv předúpravy (*Boyjoo & kol., 2013*), jinde kvalitativní požadavky na užitkovou vodu mohou být stanovovány normami či nařízeními. Pro splnění těchto požadavků je nutná úprava šedé vody a jednou z cest je úprava šedé vody pomocí zasakovacích pásů, tzn. filtrací.

## **2. Cíle práce**

Cílem práce je na základě experimentální práce ověřit a vyhodnotit vhodnost různých filtračních materiálů využitých ve filtrační loži zasakovacího pásu pro čištění šedých vod za účelem jejich znovuvyužití.

### 3. Šedá voda

Šedou vodu, pojmenovanou dle jejího typického zbarvení (*Plotěný & Bartoník, 2012*), lze dle připravované normy *FprEN 16941-2* charakterizovat jako splaškovou odpadní vodu z domácnostní neobsahující fekálie a moč. Jedná se tedy o odpadní vodu odtékající především z koupelen (umyvadel, sprch, van), kuchyní (dřezů, myček) a praček (*Eriksson & kol., 2002; Boyjoo & kol., 2013*). Splašková odpadní voda z toalet není zahrnuta, neboť zahrnuje produkty lidského metabolismu (*Seenirajan & kol., 2018*). Šedá voda běžně neobsahuje vysoké koncentrace takovýchto produktů, nelze je však zcela vyloučit a do vody se mohou dostat například při sprchování dětí či praním fekálně znečištěného prádla (*Ottoson & Stenström, 2003*). Recyklací šedé vody vzniká tzv. užitková (bílá) voda. Po splnění požadavků na kvalitu užitkové vody, viz kapitola 5, lze bílou vodu využít například pro splachování toalet a pisoárů, závlahu, případně jako vodu pro praní prádla (*Eriksson & kol., 2002*). Šedá voda může být dokonce příznivým zdrojem živin pro rostliny při využití na závlahy, přičemž k vhodnosti tohoto způsobu využití přispívá nízký obsah patogenů ve srovnání s vodou odpadní (*WHO, 2006a*). Především v oblastech s nedostatkem vody se využití šedé vody pro závlahy dostává do podvědomí lidí a začíná se hojně využívat (*Leas & kol., 2014*). Dalšími možnostmi využití šedé vody je mytí oken a automobilů, či například do fontán (*Okun, 1997*).

#### 3.1 Složení šedé vody

*Morel & Diener (2006), Boyjoo & kol. (2013)* a také *Boano & kol. (2020)* uvádějí, že se složení šedé vody do určité míry může lišit a závisí na zvycích a životním stylu konkrétní domácnosti, počtu členů, pohlaví a věku členů takovéto domácnosti, ročním období a stejně tak i její množství. Nejvíce se do složení promítnou užívané prostředky osobní hygieny, prací prostředky, čisticí prostředky a jiné chemikálie.

Běžně se v šedé vodě vyskytují vysoké koncentrace organických látek a živin, avšak v porovnání se splaškovými odpadními vodami jsou tyto koncentrace nižší (*Eriksson & kol., 2002*). Tento fakt lze připsat tomu, že šedá voda neobsahuje moč, výkaly a toaletní papír (*Li & kol., 2008*). V souvislosti s organickým znečištěním především z kuchyní (syrové maso a nevařené potraviny) se v šedé vodě může také vyskytovat několik druhů mikroorganismů (*Eriksson & kol., 2002*).

*Molaei (2014)* uvádí, že se v šedé vodě nachází také minerální prvky, jako je mangan (Mn), měď (Cu), nikl (Ni), zinek (Zn), železo (Fe) či hliník (Al). *Jenkins & Russel (1994)* uvádějí výskyt těžkých kovů, jako je kadmium (Cd), chrom (Cr),

nikl (Ni) a jiné. Původcem těžkých kovů v šedé vodě jsou především prací prostředky (*Aonghusa & Gray, 2002*).

V šedé vodě nelze vyloučit ani výskyt farmaceutik (*Toze, 2006*) a studie zabývající se španělskou šedou vodou, kterou provedl *Muñoz & kol. (2009)* či *Martínez-Alcalá & kol. (2018)*, obsah farmaceutik potvrzují. *Khan & kol. (2020)* uvádí, že osud farmaceutik ve vodním prostředí, a především ekotoxikologické účinky, nejsou dostatečně prozkoumány a chybí údaje pro jeho pochopení. Některé další látky (např. dioxin) poté mohou ve vodním prostředí negativně působit na vodní živočichy, konkrétně jejich chování, rozmnožování a schopnost udržování stabilního vnitřního prostředí živočicha, např. tělesné teploty (*Jedličková & kol., 2010*).

### **3.1.1 Světlá šedá voda**

Světlá šedá voda pochází z koupelen, tedy z umyvadel, van a sprch (*Kettnerová, 2018*). Severočeské vodovody a kanalizace (SčVK, ©2021) uvádějí, že spotřeba pitné vody pro osobní hygienu činí 34,8 % z celkové spotřeby, což je největší podíl v porovnání s ostatními odvětvími spotřeby vody, čemuž odpovídají i data uvedená společností ASIO (*Plotěný, 2019*). Hovoří o 34 % z celkové produkce odpadní vody domácnosti produkované právě v koupelnách. Zároveň vodu z koupelen lze považovat za nejméně znečištěný typ šedé vody, kde se mezi polutanty řadí především zubní pasty, mýdla, šampony, barvy na vlasy, čisticí prostředky a další výrobky pro péči o tělo. Tato šedá voda také obsahuje vousy, vlasy, kůži, tuky a různá (textilní) vlákna. V omezené míře se mohou vyskytovat také fekálie a s nimi spojené bakterie a viry (*Morel & Diener, 2006; Seenirajan & kol., 2018*).

### **3.1.2 Tmavá šedá voda**

Za tmavou šedou vodu označujeme jak šedou vodu z kuchyní, tedy z dřezů a myček, tak vodu z praček (*Kettnerová, 2018*).

Nejméně vhodná šedá voda pro recyklaci pochází z kuchyní, neboť obsahuje čisticí prostředky (včetně čističů odpadů), vysoký podíl tuků a olejů, zbytky potravin a v případě myček nádobí také může vykazovat vysoký obsah solí (*Morel & Diener, 2006*). Zmiňované fakty vedou k vysokému obsahu živin a nerozpuštěných látek podporujících růst mikroorganismů (*Plotěný, 2011*).

Voda z praček obsahuje především vysoké koncentrace pracích prostředků (obsahujících sodík, fosfor, tenzidy, dusík, bělidla), vlákna z tkanin a jiné nerozpuštěné látky, případně fekální kontaminaci s přidruženými bakteriemi a viry,

např. z praní plen (*Morel & Diener, 2006; Plotěný, 2011*), i zvýšené koncentrace těžkých kovů pocházejících z pracích prostředků (*Aonghusa & Gray, 2002*).

### **3.2 Rizika spjatá se znovuvyužitím šedé vody**

Za klíčové riziko lze považovat riziko šíření nemocí prostřednictvím užitkové vody. Existuje totiž riziko, že se mikroorganismy obsažené ve vodě budou šířit ve formě aerosolů, které vznikají při splachování toalet (*Christova-Boal & kol., 1996*) či zavlažování (*Eriksson & kol., 2002*). Jako způsob potlačení tohoto rizika se nabízí dezinfekce (*Christova-Boal & kol., 1996*), případně zavlažovat způsobem, při kterém nedochází k tvorbě a šíření aerosolů (příkladem může být závlaha podmokem, bodová závlaha nebo zalévání bez postřiku). Shodné riziko vyvstává i při kontaktu úst s vodou, případně jejím požití (*Eriksson & kol., 2002*). Vystavení člověka vodě, jenž obsahuje minerální prvky a těžké kovy může způsobit fyzické či psychické problémy (*Molaei, 2014*).

Dalším rizikem jsou možné negativní dopady na životní prostředí způsobené především zvýšenou koncentrací povrchově aktivních látek. Nadměrná koncentrace povrchově aktivních látek v užitkové vodě užívané pro zavlažování se může projevit chlorózou rostlin, snížením hydraulické vodivosti a případně vytvářet či rozšiřovat vodoodpudivé půdní oblasti vlivem akumulace tenzidů, měnit strukturu půdy a v důsledku zmiňovaného znečišťovat životní prostředí (*Bubenheim & kol., 1997; Shafran & kol., 2005; Wiel-Shafran & kol., 2006*). Snížení nadměrné koncentrace tenzidů v užitkové vodě je tedy, v případě zamýšleného využití pro závlahu, nutností (*Bubenheim & kol., 1997; Hernández & kol., 2011*). *Al-Hamaiedeh & Bino (2010)* doporučují občasné závlahy pitnou (čistou) vodou, neboť omezuje akumulaci organických látek a solí v půdě (*Gross & kol., 2005*). Existuje také potenciální riziko, že kontaminanty vyplavené z filtračního média budou mít negativní vliv na půdu, rostliny, či člověka. Příkladem takového média může být biouhel, kde takto vyplavené kontaminanty mohou mít fyto toxické účinky na plodiny a snižovat jejich růst či výnosy (*Mosa & kol., 2016*), přičemž v důsledku bioakumulace (růstu koncentrace) kontaminantů v konzumovaných částech rostlin mohou vstoupit do potravního řetězce člověka, a tím negativně ovlivňovat jeho zdraví (*Gwenzi & kol., 2017*). Lze tedy konstatovat potenciální ohrožení půdy, rostlin, živočichů a člověka obecně v důsledku nedostatečného odstranění patogenů z šedé vody (*Umweltbundesamt, 2018*).

## 4. Požadavky na kvalitu užitkové (bílé) vody

V první řadě je nutné charakterizovat požadavky, které musí užitková voda splňovat na základě plánovaného užití a s ním spojené možnosti vzniku aerosolů (Eriksson & kol., 2002). Jedná se o fyzikální parametry, obsah chemických sloučenin a mikroorganismů. Dalším vstupujícím faktorem je fakt, že kvalita vody při skladování se prvních 24 hodin zlepšuje, ovšem při skladování delším než 48 hodin dochází k vyčerpání obsahu rozpuštěného kyslíku ve vodě (Eriksson & kol., 2002), což vede k ovlivnění či úplnému zániku aerobních bakterií a nárůstu vláknitých anaerobních bakterií. V důsledku sníženého obsahu živých bakterií se případně snižuje i účinnost biologického čištění odpadní vody (Theobald, 2013) a voda obsahující nízké koncentrace rozpuštěného kyslíku může mít při vypouštění do recipientu nepříznivý vliv na mnoho forem života ve vodním prostředí, tedy ryby, bezobratlé živočichy, bakterie a rostliny (Fondriest Environmental, 2013). Samotná technologie úpravy šedé vody poté musí být taková, aby se dokázala vyrovnat s výkyvy průtoků či koncentrací znečišťujících látek vlivem denního, případně dlouhodobějšího cyklu chodu domácnosti a voda přesto dosahovala odpovídajících požadavků. Přičemž malé čistírny odpadních vod jsou choulostivé především na krátkodobé výkyvy koncentrací (Eriksson & kol., 2009). Nutno také zdůraznit, že není nezbytně nutné, aby kvalita užitkové vody dosahovala kvalit vody pitné, neboť slouží jinému účelu (Ghunmi & kol., 2011; Boyjoo & kol., 2013).

Mnoho států má však na užitkovou vodu definované požadavky platnými normami či nařízeními. V České republice ovšem v současné době neexistuje legislativa upravující konkrétní hygienické požadavky na kvalitu či složení užitkové vody pro zavlažování a splachování toalet (Frank Bold Advokáti, 2020). Lze tedy vycházet z připravované evropské normy *FprEN 16941-2* stanovující, mimo jiné, požadavky na kvalitu užitkové vody, viz Tab. 4.1. Požadavky na kvalitu vody ve zmiňovaném návrhu evropské normy jsou převzaty z britské normy *BS 8525:2010*.

Parametr	Tlakové mytí, zahradní rozstřikovač a mytí vozidel	Bezroštíkové aplikace		
		Splachování toalety	Zavlažování zahrady <sup>A)</sup>	Praní prádla
<i>Escherichia coli</i> (CFU/100ml)	Nedetekováno	250	250	250
<i>Intestinal enterococci</i> (CFU/100ml)	Nedetekováno	100	100	100
<i>Legionella pneumophila</i> (CFU/100ml)	10	Nelze aplikovat	Nelze aplikovat	Nelze aplikovat
Celkové koliformní bakterie <sup>B)</sup> (CFU/100ml)	10	1000	1000	1000
pH	5 - 9,5	5 - 9,5	5 - 9,5	5 - 9,5
Zákal (NTU)	<10 NTU pro všechna využití (<1 NTU v případě, že proběhla UV dezinfekce)			
Usaditelné pevné látky	Vizuálně čisté, bez plovoucích nečistot			
Barva	Neobjektivní pro všechna užití			
Zbytkový chlor <sup>C)</sup> [mg/l]	<2	<2	<2	<2
Zbytkový brom <sup>C)</sup> [mg/l]	<2	<2	<2	<2
<p>A) Pokud ošetřené šedé vody mají být použity v zelinářských zahradách pro plodiny určené ke konzumaci, pak informace týkající se přípravy těchto plodin by měly být poskytovány pro uživatele v předávací dokumentaci systému.</p> <p>B) Celkové koliformní bakterie jsou ukazatelem provozního parametru pro interpretaci. Bakteriologické orientační hodnoty uvedené pro upravené šedé vody odrážejí potřebu kontrolovat kvalitu vyčištěné vody pro dodávky a užití.</p> <p>C) Testování na zbytkový chlor a brom je nutné pouze tehdy, jsou-li použity dezinfekční prostředky.</p>				

Tab. 4.1: Vybrané požadavky na kvalitu upravené šedé vody dle připravované normy *FprEN 16941-2*

Existuje také příručka Světové zdravotnické organizace WHO-EM/CEH/125/E (*WHO, 2006b*), která je přehledem hospodaření s šedou vodou s ohledem na zdravotní aspekty. Tato příručka také stanovuje požadavky na kvalitu šedé vody pro opětovné použití dle typu využití (rozdílňuje 2 typy závlah a splachování toalety), viz Tab. 4.2.



	Zavlažování okrasných rostlin, ovocných stromů a pícein	Zavlažování zeleniny, u níž je předpokládána konzumace bez tepelné úpravy	Splachování toalety
BSK <sub>5</sub> <sup>A)</sup> (mg/l)	≤ 240	≤ 20	≤ 10
Počet vzorků	vzorek / měsíc	2 vzorky / měsíc	vzorek / týden
TSS <sup>B)</sup> (mg/l)	≤ 140	≤ 20	≤ 10
Počet vzorků	vzorek / měsíc	2 vzorky / měsíc	vzorek / týden
Koliformní fekální bakterie (CFU/100ml)	≤ 1000	≤ 200	≤ 10
Počet vzorků	2 vzorky / měsíc	vzorek / 2 týdny	vzorek / týden
A) Biochemická spotřeba kyslíku za 5 dní B) Celkové nerozpuštěné látky			

Tab. 4.2: Příпустné limity pro opětovné použití šedé vody dle *WHO (2006b)*

## 5. Přehled obdobných experimentů

Ve světě bylo provedeno několik experimentů, které zkoumají účinnost filtračních materiálů pro čištění šedých vod. V souvislosti s touto prací je vhodné vyzdvihnout několik experimentů, které používaly stejné materiály, tedy biouhel a antuku, (mykorhiza nebyla doposud předmětem experimentů v souvislosti s šedou vodou), okrajově ve stručnosti poté písek a kompost (zemina, jakožto filtrační médium taktéž nebyla příliš zkoumána).

### 5.1 Filtry obsahující biouhel

*Thompson & kol. (2020)* porovnával pět typů biouhlu, viz Tab. 5.1, rozdrčených na 45 $\mu$ m pro úpravu šedé vody šesti různých šarží získaných v průběhu jednoho roku. Pro zajištění reprezentativnosti šarží bylo odebráno 60 kontrolních vzorků šedé vody během 20 měsíců. Biouhel FD-TLUD Wood byl ve všech případech vyhodnocen jako nejúčinnější při odstraňování rozpuštěného organického uhlíku (DOC), přičemž jeho použitím bylo docíleno odstranění přibližně 50 % DOC z šedé vody, zatímco ostatní typy biouhlu dosahovaly přibližně 25 % (tedy poloviny) odstranění DOC. Biouhel FD-TLUD Wood také dosáhl 80 % odstranění UVA<sub>254</sub> (způsob měření organických látek ve vodě pomocí ultrafialového záření (*Real Tech Inc., 2017*)). Zároveň byla testována expozice 2, 4 a 8 hodin pro všech 5 typů biouhlu a z dosažených výsledků vyplývá, že pro snížení DOC jsou první dvě hodiny expozic stěžejní a delší expozice nepřináší zásadní zlepšení. Autor se také v experimentu zabýval odstraňováním chloru a amoniaku pomocí biouhlu v návaznosti na typ předúpravy šedé vody.

Typ biouhlu	Surovina	Způsob výroby
FD-TLUD Wood	Směs pelet tvrdého a měkkého dřeva	Pyrolyzace <sup>A)</sup> metodou FD-TLUD při 850 °C
Full-Scale Wood	Dřevní štěpky	Pyrolyzace <sup>A)</sup> při 400 až 1200 °C
800 C Furnance Wood	Borovicové pelety	Pyrolyzace <sup>A)</sup> po dobu 2 h při 800 °C
900 C Furnance Wood	Borovicové pelety	Pyrolyzace <sup>A)</sup> po dobu 2 h při 900 °C
Bone	Hovězí kosti	Pyrolyzace <sup>A)</sup> po dobu 8 h při 700 °C

A) Vypalování suroviny bez přístupu vzduchu při dané teplotě po určitou dobu

Tab. 5.1: Typy biouhlu (*Thompson & kol., 2020*)

Také *Sidibe (2014)* se zabýval filtry obsahujícími biouhel, aktivní uhlí či borovicovou kůru. Během svého experimentu filtroval nejprve 10 týdnů syntetickou

(uměle vytvořenou) šedou vodu, posléze 10 týdnů syntetickou šedou vodu s příměsí odpadní vody. Denní dávka vody činila 45 ml a kolona obsahující filtrační materiál měla průměr 4,3 cm a výšku 65 cm. U filtru obsahujícího biouhel i kůru docházelo v průběhu experimentu ke kontinuálnímu zvyšování odstraněné chemické spotřeby kyslíku (CHSK), nejlépe si však vedl filtr obsahující aktivní uhlí. Zvyšování odstraňovaného CHSK autor připisuje stimulaci biodegradace (odbourávání) dusíku v takovémto filtru, protože docházelo k navýšení množství dusíku ve vypouštěné vodě z filtru. Také *Jefferson & kol. (2001)* zjistil, že vyvážení dusíku a fosforu, případně přidání mikroživin do šedé vody, může v ideálním případě podpořit biologické čištění šedé vody. *Sidibe (2014)* ve svém experimentu nadále pozoroval i jiné parametry, které jsou shrnuty v Tab. 5.2.

Parametr	Biouhel	Hodnota šedé vody, nebo statistické porovnání filtračních materiálů s biouhlem
CHSK [%]	Průměrná účinnost odstranění 90 %	Koncentrace CHSK v šedé vodě činila 4630,5 ± 232,8 mg/l
pH	8,13 ± 0,15	8,04 ± 0,23
Elektrická konduktivita [mS/cm]	4,1 ± 1,2	Elektrická konduktivita šedé vody činila 5,82 ± 0,36
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg/l]	0,8	23,85
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg/l]	152 ± 16,5	1,18
<i>Salmonella spp</i> <sup>A)</sup>	Snížení log <sub>10</sub> <sup>D)</sup> 2,72 ± 0,74	Kůra si vedla srovnatelně, aktivní uhlí významně hůře
<i>E. faecalis</i> <sup>B)</sup>	Snížení log <sub>10</sub> <sup>D)</sup> 1,51 ± 0,73	Nebyl pozorován významný rozdíl
Bakteriofágy <sup>C)</sup>	Snížení log <sub>10</sub> <sup>D)</sup> 1,47	Aktivní uhlí si vedlo srovnatelně, kůra významně hůře
<p>A) Skupina bakterií se schopností způsobit onemocnění sídlící ve střevním traktu lidí (<i>FSAI, 2011</i>)            B) Bakterie patřící do skupiny mléčného kvašení s potenciálem způsobit vážné zdravotní problémy (<i>Elges, 2017</i>)            C) Fekální indikátor mikrobiální kvality vody (<i>ALS Environmental, 2021</i>)            D) Redukce Log<sub>10</sub> = Log<sub>10</sub> (koncentrace umělé šedé vody) - Log<sub>10</sub> (koncentrace na výtoky filtru)</p>		

Tab. 5.2: Přehled vybraných parametrů (*Sidibe, 2014*)

Obdobnými parametry určujícími kvalitu ošetřené vody jako *Sidibe (2014)*, se pro křemenný štěrk, smrkové dřevní štěpky či právě biouhel vyráběný z dřevin neznámého složení při teplotě přibližně 700 °C, zabýval *Kaetzl & kol. (2018)*. V jeho experimentu byly využity kolony o průměru 5 cm, v nichž se nacházely, vyjma spodní

a svrchní vrstvy štěrku, 3 vrstvy filtračního materiálu se snižující se frakcí (od spodu: 11/16 mm, 8/11 mm a 5/8 mm). Odběr vzorků probíhal 1x týdně. Teoretická průměrná doba zadržení (HRT) ve filtru s biouhlem činila 17,8h a zároveň byl biouhel vyhodnocen jako neúčinnější v odstraňování celkového organického uhlíku a chemické spotřeby kyslíku v porovnání s ostatními testovanými materiály. V odstranění fosforu a celkového dusíku mezi jednotlivými materiály nebyly pozorovány statisticky významné rozdíly a míry odstranění byly velmi nízké díky anaerobním podmínkám. Biouhel také nejvíce a nejstabilněji snižoval zákal s průměrným snížením o 93 %, což autor připisuje vysoké specifické ploše biouhlu. Více viz Tab. 5.3.

Parametr	Šedá voda	Biouhel	Dřevní štěpka	Křemenný štěrk
Chemická spotřeba kyslíku [mg/l]	372 ± 120	48 ± 19	114 ± 29	102 ± 29
Celkový organický uhlík [mg/l]	137 ± 45	31 ± 9.1	50 ± 14	48 ± 14
Celkový dusík [mg/l]	70 ± 12.4	61 ± 10	64 ± 11	62 ± 11
Celkový fosfor [mg/l]	2.6 ± 0.5	2.3 ± 0.3	2.3 ± 0.3	2.2 ± 0.4
pH	7,8 ± 0,2	7,8 ± 0.3	7,8 ± 0.3	8 ± 0.2
Elektrická konduktivita [μS/cm]	1178 ± 166	1148 ± 154	1177 ± 168	1177 ± 171
Zákal [FNU]	260 ± 92	14 ± 8,2	20 ± 6,0	26 ± 15,9
<i>E. coli</i> <sup>A)</sup> [log <sub>10</sub> MPN/ml]	4,93 ± 0,39	3.96 ± 0.43	4.13 ± 0.35	4.15 ± 0.38
Enterococci <sup>B)</sup> [log <sub>10</sub> MPN/ml]	4,29 ± 0,28	3.28 ± 0.34	3.47 ± 0.32	3.47 ± 0.38
A) Bakterie střevního původu, jakožto zdroj infekcí a jiných zdravotních problémů (ČistáVoda s.r.o., ©2021) B) Bakterie žijící ve střevním traktu poukazují na fekální znečištění. Způsobují onemocnění kůže, očí, uší a dýchacích cest (US EPA,2021)				

Tab. 5.3: Přehled vybraných parametrů kvality šedé vody před a po filtraci vybranými materiály (Kaetzl & kol., 2018)

Experiment zaměřený kromě biouhlu i na filtralite 0,8/1,5 mm (keramické filtrační médium určené pro úpravu vody vyráběné vypálením a následným drcením a prosetím) v porovnání s výsledky dosaženými biofiltrem A02 GWTP, provedl Moges & kol. (2015), kde použil skutečnou šedou vodu ze studentských kolejí. Byla využita kolona průměru 14 cm a byla naplněna filtračním materiálem mocnosti 60 cm. Experiment probíhal přes půl roku a vzorky byly odebírány 1x za 14 dní. Autoři

experimentu sledovali, že biouhel dosahoval více než pětinasobného snížení dusíku vůči šedé vodě, ovšem při odstraňování fosforu měl o 23 % nižší účinnost než filtralite. Z experimentu také vyplývá, že filtr obsahující biouhel, na rozdíl od filtralitu, vykazoval dobrý fyzický vzhled vody a dosáhl dobré účinnosti při odstraňování organického znečištění. Experiment se také zabýval jinými parametry (CHSK, elektrická vodivost, zákal, ..), vybrané parametry viz Tab. 5.4.

Parametr	Šedá voda	Biouhel	Filtralite
Chemická spotřeba kyslíku [mg/l]	309,91 ± 38,88	10,99 ± 5,51	20,63 ± 5,79
Celkový dusík [mg/l]	17,76 ± 2,18	3,41 ± 0,92	6,38 ± 1,26
Celkový fosfor [mg/l]	1,50 ± 0,14	0,22 ± 0,03	0,15 ± 0,17
pH	6,95 ± 0,16	7,66 ± 0,13	7,46 ± 0,18
Elektrická vodivost [ $\mu$ S/cm]	276 ± 32,09	311 ± 43,76	279 ± 31,97
Zákal [NTU]	102,61 ± 55,43	0,87 ± 0,23	1,76 ± 2,67
<i>E. coli</i> [MPN/ml]	8,51E + 05	1,46E + 02	5,29E + 01
Amoniakální dusík [mg/l]	7,61 ± 1,59	2,17 ± 0,72	2,91 ± 0,79

Tab. 5.4: Přehled vybraných parametrů šedé vody před a po filtraci (*Moges & kol., 2015*)

V dalším podobném experimentu, který v kolonách o průměru 4,3 cm a hloubky filtračního materiálu 50 cm po dobu 65 dní při dávkování syntetické šedé vody 2x denně během pracovních dní (první dávka činila 42 ml a druhá 21 ml, se *Berger (2012)* zabýval biouhlem a aktivním uhlím jakožto filtračním médiem a zjistil, že průměrná doba zadržení vody ve filtru s biouhlem činila 108 hodin, zatímco pro aktivní uhlí 119 hodin. Bylo pozorováno, že hodnoty pH na odtoku v průběhu experimentu klesaly (z původních 8,7 až na 7,9 v poslední den experimentu, pro aktivní uhlí z 8,4 na 7). Hodnoty elektrické vodivosti pro biouhel po 13 dnech (počáteční hodnota činila 0,61 mS/cm) začaly překračovat hodnoty šedé vody na vstupu (1,8 mS/cm) a ustálily se na poměrně stabilních 2,1 mS/cm, zatímco elektrická vodivost na výstupu filtru s aktivním uhlím zůstala stabilně pod hodnotami šedé vody. Účinnost biouhlu při odstraňování CHSK dosahovala stabilních 99,1 % a pro MBAS (aniontových povrchově aktivních látek) stabilních 99,3 % a filtr obsahující aktivní uhlí si v obou případech vedl obdobně. Průměrná účinnost odstraňování celkového dusíku činila 90,94 %, bylo ovšem pozorováno, že mezi 19. a 50. dnem došlo k zvýšení koncentrace amoniakálního dusíku ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) na výstupu, kdy došlo k poklesu účinnosti na minimum, přibližně o 70 % (96,6 %s vyšší

vyrovnaností pro aktivní uhlí). Účinnost odstraňování fosforu a fosfátů se od počátku experimentu neustále zvyšovala (z 70 % pro celkový fosfor a 62 % pro fosfáty) na poměrně stabilních 90-95 % pro celkový fosfor a 90 % pro fosfáty. Průměrná účinnost odstraňování celkového fosforu a fosfátů pro biouhel činila 89 % a 86 %, zatímco pro aktivní uhlí 78 % a 70 %. Zároveň během experimentu nebylo pozorováno žádné ucpávání filtrů a doba zdržení na konci experimentu byla nižší než na začátku díky vytvoření preferenčních cest toku. Ovšem ani vytvoření preferenčních cest nevedlo k pozorovatelnému negativnímu vlivu na účinnost filtrů. Vybrané parametry shrnuty v Tab. 5.5.

Parametr	Šedá voda	Biouhel	Aktivní uhlí
		%	%
Chemická spotřeba kyslíku [mg/l]	1389 ± 100	99,1 ± 0,3	99,2 ± 0,3
Celkový dusík [mg/l]	95 ± 6	90,94 ± 8,81	96,6 ± 4,4
Celkový fosfor [mg/l]	3,6 ± 0,1	89,3 ± 6,5	78,4 ± 9,1
pH	8,5 ± 0,1	8,1 ± 0,3	8,1 ± 0,3
Elektrická vodivost [μS/cm]	1800 ± 40	1842 ± 478	1378 ± 412

Tab. 5.5: Přehled vybraných parametrů kvality šedé vody a účinnost čištění vybranými materiály (Berger, 2012)

Potenciál biouhlu a písku pro čištění šedých bod, jako filtračního média s různými typy biofilmů (společenstvo organismů vázané k povrchu), se zaměřením na absorpci a biologickou degradaci farmaceutik zkoumal *Dalahmeh & kol. (2018)* po dobu 22 týdnů. Autor vyhodnotil biouhel jako účinné médium pro odstraňování karbamazepinu (farmaceutikum), přičemž průměrná účinnost odstranění činila 90 % se směrodatnou odchylkou -11 % a + 10 %, metoprololu (farmaceutikum) s průměrnou účinností 99 ± 1 %, chemické spotřeby kyslíku (CHSK) s průměrnou účinností 95 ± 3 % a celkového dusíku s průměrnou účinností 52 ± 29 %. Zároveň byl biouhel vyhodnocen jako ne příliš účinné médium pro odstraňování fosforu (P). Z experimentu také vyplývá, že průměrná účinnost pro odstranění kofeinu dosahuje 96 až 99 % a pro odstranění ranitidinu (farmaceutikum) 98 až 99 %. Biouhlem, aktivním uhlím, kůrou či směsí kůry s aktivním uhlím, jakožto filtračními médii pro odstranění patogenů a indikátorových organismů ze syntetické šedé vody se po dobu 78 dnů zabýval také *Molaei (2014)*. Využil při tom kolony o průměru 4,3 cm a mocnost filtračního lože zkoumaného materiálu činila 50 cm. Ze získaných dat vyplývá, že průměrná doba zdržení ve filtru s biouhlem byla 90 hodin, kůra

vykazovala obdobnou dobu a aktivní uhlí dvounásobnou. Hodnoty pH byly konstantní a držely se těsně pod hodnotou 9. Snížení *Salmonely spp.* bylo větší než 99 %, *Enterococcus faecalis* a Bakteriofág  $\phi X174$  nesly při snižování téměř shodný zhoršující se charakter (od vysokých 99,99 % během prvního týdne, přes 99 % během týdne druhého až po 90 %, nebo méně, během následujících týdnů) a pro Bakteriofág MS2 se charakter také zhoršoval (od 99,9 % během prvního týdne, až po 90 % během posledních devíti týdnů). Autor experimentu došel závěru, že filtry obsahující biouhel či aktivní uhlí, si při odstraňování patogenů a indikátorových organismů vedly lépe než filtry obsahující kůru nebo směs materiálů. Také Reddy & Dastgheibi (2014) se zabývali biouhlem, jakožto filtračním médiem, ovšem pro čištění dešťových vod. Výsledky týkající se účinnosti lze do jisté míry převzít a aplikovat na šedou vodu. Autoři experimentu zjistili, že biouhel dokáže v průměru snížit TSS o 89 %, koncentraci dusičnanů o 86 %, fosfátů o 47 %. Biouhel dokázal také snížit průměrné koncentrace těžkých kovů ve výtokové vodě, konkrétně kadmia o 18 %, pro chrom snížení činilo 19 %, měď 65 %, olovo 75 %, nikl 17 % a pro zinek voda na výtoku vykazovala snížení o 24 %. Došlo také ke zjišťování účinnosti v odstraňování polyaromatických uhlovodíků (PAU), konkrétně fenantren ( $C_{14}H_{10}$ ) byl zcela odstraněn, naftalen ( $C_{10}H_8$ ) byl odstraněn z 76 % a benzo(a)pyren (BaP,  $C_{20}H_{12}$ ) nebyl odstraněn vůbec. Účinnost v odstraňování *E.coli* dosahovala 27 %.

Ovšem i přes uspokojivé výsledky v některých parametrech filtrace s využitím biouhlu dle Thompson & kol. (2020) sama o sobě nedokáže splnit kvalitativní požadavky na užitkovou vodu a je nutno využívat více způsobů úpravy šedé vody, což podporuje i Sidibe (2014), dle kterého je obtížné najít jediný filtr, který účinně dokáže snížit všechny chemikálie a mikroorganismy přítomné v šedé vodě.

Tab. 5.6 je poté přehledem zmiňovaných vybraných experimentů zabývajících se biouhlem a v nich dosažených účinností při odstraňování vybraných parametrů z šedé vody. Berger (2012), Sidibe (2014), Moges & kol. (2015), Dalahneh & kol. (2018) a Kaetzi & kol. (2018) ve svých experimentech dosáhli obdobných účinností při odstraňování CHSK, případně i při odstraňování zákalu, zatímco v ostatních parametrech se rozcházeli.

Parametr	Berger, 2012	Sidibe, 2014	Moges & kol., 2015	Dalahneh & kol., 2018	Kaetzi & kol., 2018
Chemická spotřeba kyslíku [%]	99,1 ± 0,3	90	96,45	95 ± 3	87,10
Celkový organický uhlík [%]	-	-	-	-	77,37
Celkový dusík [%]	90,94 ± 8,81	-	43,52	52 ± 29	12,86
Celkový fosfor [%]	89,3 ± 6,5	-	57,00	-	11,54
Zákal [%]	-	-	99,15	-	94,62
Elektrická konduktivita [%]	2,28	29,55	-12,68	-	-

Tab. 5.6: Účinnosti odstraňování vybraných parametrů pomocí biouhlu

## 5.2 Filtry obsahující antuku

Ošetřováním šedé vody pomocí čtyřkomorových filtrů s horizontálním průtokem se zabýval *Ushijima & kol. (2013)*. Jako filtrační médium v komorách sloužily drcené cihly různých frakcí či Kanuma (usušená vulkanická hornina s malou objemovou hmotností, která má vysokou schopnost zadržovat vlhkost (*Bonsaischule Wenddorf, 2021*)). Dno každé ze 4 komor filtru mělo sklon 1:20 v podélném směru a v jednotlivých komorách filtru se nacházel testovaný filtrační materiál mocnosti 10 cm (viz Tab. 5.7). Šířka komor 14,5 cm a délka 94 cm. Syntetická šedá voda byla dávkována 3x denně, přičemž celkový objem denní dávky a koncentrace znečišťujících látek v ní obsažená byla zvolena pro každý filtr individuálně (*Ushijima & kol., 2013*). Filtry 4 až 6 při odstraňování BSK<sub>7</sub> a BSK<sub>14</sub> dosahovaly míry účinnosti 87-91 %. Drcené cihly také dokázaly snížit *E. coli* přibližně o 99,999 % a *Bakteriofág MS2* o 99,9 %. Výsledné účinnosti odstraňování CHSK a suspendovaných pevných látek (nerozpuštěných pevných látek, od TSS se liší především metodou stanovení) jsou shrnuty v Tab. 5.8 a nejlépe si v obou případech vedl 5. a 6. filtr. Při odstraňování CHSK dosahovaly více jak 80 % a pro suspendované látky více jak 90 %.

Označení filtru	Filtrační materiál	Frakce filtračního materiálu [mm]	Zatížení filtru [l/den]	Délka výzkumu [týdny]
Filtr 1	Kanuma	4/11	60	6
Filtr 2	Drcené cihly	4/11	60	6
Filtr 3	Drcené cihly	1/4	60	5

Tab. 5.7: Filtrační materiály (*Ushijima & kol., 2013*)



Označení filtru	Filtrační materiál	Frakce filtračního materiálu [mm]	Zatížení filtru [l/den]	Délka výzkumu [týdny]
Filtr 4	Drcené cihly	1/4	30	8
Filtr 5	Drcené cihly	1. komora 1/4, 2-4. komora 4/11	30	8
Filtr 6	Drcené cihly	1/4	15	8

Tab. 5.7: Filtrační materiály (Ushijima & kol., 2013)

Parametr	Šedá voda	Filtr 1	Filtr 2	Filtr 3	Filtr 4	Filtr 5	Filtr 6
	mg/l	% <sup>A)</sup>					
Chemická spotřeba kyslíku	200 až 1000	53	56	75	78	82	83
Suspendované pevné látky	40 až 250	63	59	82	89	95	96

A) Jedná se o pouhý odhad z grafu (pro filtry 1, 2, 3 a 5 ve 4. týdnu experimentu, pro filtry 4 a 6 ve 2. týdnu experimentu)

Tab. 5.8: Kvalita šedé vody a účinnost odstranění CHSK a suspendovaných látek (Ushijima & kol., 2013)

### 5.3 Filtry obsahující písek

Během experimentu zabývajících se vlivem hydraulického zatížení pískového filtru při různé velikosti zrna na odstranění organické hmoty z šedé vody *Abudi (2011)* zjistil, že se účinnost odstraňování BSK<sub>5</sub> zvyšuje z 51 % při hydraulickém zatížení 680 l/h/m<sup>2</sup> s klesajícím hydraulickým zatížením na 83 % při 212 l/h/m<sup>2</sup>. Zároveň účinnost odstraňování BSK<sub>5</sub> a CHSK se zvyšuje se stoupající teplotou vody (pro BSK<sub>5</sub> z 64 % při 18 °C na 78 % při 32 °C). Nelze zanedbat také vliv doby kontaktu ošetřované vody s filtračním médiem (EBCT, jakožto objem filtračního média dělený průtokem) na účinnost odstranění CHSK (41 % při EBCT 48 minut a 76 % při EBCT 9 minut). Při odstraňování *E.coli* bylo dosaženo účinnosti více jak 81 %. Vliv průměru zrna má vliv na účinnost odstranění zákalu, kde při efektivní průměr zrna 0,35 mm a pórovitosti 39 % dosahoval písek účinnosti 89 %, zatímco při průměru zrna 0,75 mm a pórovitosti 43 % pouze 81 %. Pískem, borovou kůrou, polyuretanovou pěnou a aktivním dřevěným uhlím (Tab. 5.9) se také po dobu více jak 113 dní zabýval *Dalahmeh & kol. (2012)*, který zjistil, že při průměrné době pobytu šedé vody 4 hodiny ve filtru obsahujícím písek se účinnost odstraňování BSK<sub>5</sub> pohybovala mezi 60 % a 85 %, odhad účinnosti při snížení MBAS (nebo-li snižování aktivních látek methylenové modři, čili aniontových povrchově aktivních látek detekovatelných metodami kolorimetrické, či barevné reakce) činil přibližně 96 % snížení. Průměrná

redukce fosfátů (PO<sub>4</sub>-P) činila 83 %. Nejvýraznější snížení pH vykazovala borová kůra a ostatní testované materiály vykazovaly podobné hodnoty jako šedá voda na vtoku do filtrů. Pro experiment byly využity kolony o průměru 20 cm, jenž byly naplněny filtračním materiálem o mocnosti 60 cm a před zahájením samotného experimentu byly filtry po dobu 75 dní proplachovány 0,33 litry pitné vody denně. Poté zmiňovaných 113 dní byla dávkována šedá voda o teplotě 25 °C třikrát denně (v dávkách 0,7, 0,1 a 0,2 l).

Parametr	Šedá voda	Písek	Aktivní uhlí	Kůra	Pěna
CHSK [%]	890 ± 130	72 ± 2	94 ± 2	74 ± 12	37 ± 9
BSK <sub>5</sub> [%]	425 ± 56	75 ± 6	97 ± 3	98 ± 2	37 ± 13
Celkový organický uhlík [%]	304	75 ± 2	97 ± 0	74 ± 4	46 ± 16
Celkový dusík [%]	75 ± 10	5 ± 7	98 ± 1	19 ± 9	13 ± 1
Celkový fosfor [%]	4,2 ± 0,2	78 ± 7	91 ± 8	97 ± 2	36 ± 34
pH	7,8 ± 0,3	7,7 ± 0,3	7,8 ± 0,4	6,1 ± 0,4	7,7 ± 0,2
Elektrická konduktivita [mS/cm]	2,0 ± 0,1	2,2 ± 0,1	1,7 ± 0,3	1,8 ± 0,4	2,1 ± 0,1
MBAS [%]	30 ± 10 <sup>A)</sup>	96 ± 1	> 99 ± 0	> 99 ± 0	73 ± 9
Průměrná doba pobytu stopovače (NaCl) [h]		4 ± 0	16 ± 1	43 ± 4	<0,5 ± 0
A) Koncentrace polutantu v šedé vodě [mg/l], u jednotlivých filtračních materiálů nadále uvedena účinnost odstranění [%]					

Tab. 5.9: Přehled vybraných parametrů šedé vody před a po filtraci a účinnost odstranění vybraných polutantů (*Dalahmeh & kol., 2012*)

Další experiment zaměřený, mimo jiné, na 3 různé mocnosti filtračního materiálu (50, 60 a 75 cm), kterým byl právě písek, provedli *El-Taweel & Ali (2000)* a došli k závěru, že každý z testovaných pískových filtrů je schopen významně snížit zákal a obsah organické hmoty, ovšem nižší účinnosti dosahuje při odstraňování zelených řas (od 57 do 74 %). Všechny mocnosti filtračního lože také dosahovaly účinnosti 93 % při odstraňování koliformních bakterií, v případě celkového počtu bakterií byla účinnost při teplotě prostředí 22 °C v závislosti na mocnosti proměnná (pro mocnost 50 cm činila 71 %, pro 60 cm 99 % a pro 75 cm 96 %) a při 37 °C pro všechny mocnosti dosahovala více jak 90 %. Výkonem šterkového (frakce 2-4 mm) a pískového (frakce 1-2 mm) filtru, případně jejich kombinací se zabýval *Abdel-Shafya & kol. (2014)*. Rozlišoval způsob toku ošetřované vody filtrem (SFDF – pískový filtr s průtokem dolů, SFHF – pískový filtr s horizontálním průtokem,

GFDF – štěrkový filtr s průtokem dolů a GFUF – štěrkový filtr s průtokem vzhůru a GFSG – štěrkový filtr následovaný pískovým filtrem). Dosáhl obdobných účinností při odstraňování CHSK či BSK<sub>5</sub> ve filtrech obsahujících písek jako výše zmiňovaný *Dalahmeh & kol. (2012)*. Hydraulické zatížení filtrů SFDF, GFDF a GFUF během experimentu bylo 17 386,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d při mocnosti filtračních materiálů 1 m a u filtrů SFHF a GFSF 86,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/d, při mocnosti 0,3 m. Z výsledků vyplývá, že oba pískové filtry, případně kombinovaný filtr, dosáhly více jak 70 % snížení CHSK, zatímco štěrkový GFDF dosáhl 41 % a GFUF 57 %. Při odstraňování BSK<sub>5</sub> byly filtry obsahující písek výrazně účinnější, dosahovali přibližně 80 % s tím, že horizontální tok se jevil jako účinnější o 5,2 % a i v ostatních parametrech si písek jako filtrační medium, či kombinace písku a štěrku, vedla lépe než samotný štěrk, viz Tab. 5.10.

Parametr	Šedá voda	SFDF	SFHF	GFDF	GFUF	GFSG
	mg/l	%	%	%	%	%
CHSK	190,8 ± 57	74	79,0	41	57	78
BSK <sub>5</sub>	90,5 ± 44	76	81,2	46	59	82
TSS	41,4 ± 18	82	78,3	54	64	82
Oleje a tuky	51 ± 15	51	60,8	34,3	41	82,9
TKN <sup>A)</sup>	16,7 ± 6	41	52,1	22,2	28	58,1
Amoniak	14,9 ± 6	55	66,4	39,6	46	61,1
Fosfát	9 ± 3	52	55,6	38,9	46	50,0
Detergenty <sup>B)</sup>	11 ± 3	49	54,5	36,4	46	48,2

A) Celkový dusík podle Kjeldahla (celková koncentrace organ. dusíku a amoniaku)  
B) Chemické látky určené k čištění, směs tenzidů a dalších látek (*Šmidrkal, 1999*)

Tab. 5.10: Účinnosti odstraňování vybraných parametrů (*Abdel-Shafy & kol., 2014*)

*Hedegaard & Albrechtsen (2014)* provedli experiment zabývající se potenciálem filtračního písku ze tří různých vodáren při mikrobiálním odstraňování pesticidů z pitné vody. Došli k závěru, že pomocí písku lze dosáhnout poklesu MCPP (kyseliny methylchlorfenoxypionové, jakožto poměrně rozšířeného pesticidu používaného pro hubení širokolistých plevelů) o 42-85 % původní koncentrace, bentazonu na 15-35 %, glyfosátu na 7-14 % a p-nitrofenolu na 1-3 %.

Tab. 5.11 je poté přehledem zmiňovaných experimentů zabývajících se pískem a v nich dosažených účinností při odstraňování vybraných parametrů z šedé vody. Jediným shodným parametrem, kterým se *Dalahmeh & kol. (2012)*, *Abdel-Shafya & kol. (2014)* i *Abudi (2011)* zabývali je BSK<sub>5</sub> a dosáhli obdobných účinností.

Parametr	Dalahmeh & kol., 2012	Abdel-Shafya & kol., 2014		Abudi, 2011
		SFDF	SFHF	
CHSK [%]	72 ± 2	74	79,0	-
BSK <sub>5</sub> [%]	75 ± 6	76	81,2	51 až 83 <sup>A)</sup>
Celkový organický uhlík [%]	75 ± 2	-	-	-
Celkový dusík [%]	5 ± 7	-	-	-
Celkový fosfor [%]	78 ± 7	-	-	-
Elektrická konduktivita [%]	10,91	-	-	-
A) V závislosti na hydraulickém zatížení filtru				

Tab. 5.11: Účinnosti odstraňování vybraných parametrů pomocí písku

#### 5.4 Filtry obsahující kompost

Experiment zaměřený na čištění šedé vody s příměsí dešťových vod z ropných plošin, což mělo za následek kolísavý charakter koncentrací polutantů v šedé vodě v závislosti na ředění dešťovou vodou (četnosti a intenzitě srážek), pomocí umělých mokřadů (půdorysný rozměr 2,16 x 1 m a hloubka 1 m) obsahujících štěrk či kompost, provedl *Aslam & kol. (2007)*. Zjistil, že průměrná účinnost kompostu při odstraňování TSS dosahovala 60,5 % s tím, že v čase nesla zvyšující se úroveň, což korespondovalo se zvyšující se koncentrací v šedé vodě na vtoku. Průměrná účinnost při odstraňování CHSK činila 52,5 %, pro BSK<sub>5</sub> dosahovala průměrná účinnost 56 % a nesla zvyšující se charakter v čase, což lze připsat zakořenění rostlin a tím k nárůstu provzdušňování, ovlivnění tvorby biofilmu a ve výsledku rychlejší aerobní i anaerobní degradaci organických sloučenin heterotrofními organismy. Z experimentu také vyplívá, že došlo k absorpci těžkých kovů, pravděpodobně díky rostlinám (konkrétně pro železo 48 %, měď 56 % a zinek 61 %) a ve všech výše zmiňovaných parametrech byl kompost účinnější nežli štěrk, viz Tab. 5.12.

Parametr	Šedá voda	Kompost	Štěrk
	mg/l	%	%
CHSK	256	52,5	47,5
BSK <sub>5</sub>	135	56	45
TSS	215	60,5	48,5

Tab. 5.12: Kvalita šedé vody před filtrací a účinnosti odstraňování vybraných parametrů pomocí kompostu (*Aslam & kol., 2007*)

Parametr	Šedá voda	Kompost	Štěrk
	mg/l	%	%
Železo	8	48	37
Měď	4	56	41
Zinek	4	61	45

Tab. 5.12: Kvalita šedé vody před filtrací a účinnosti odstraňování vybraných parametrů pomocí kompostu (*Aslam & kol., 2007*)

## 6. Metodika

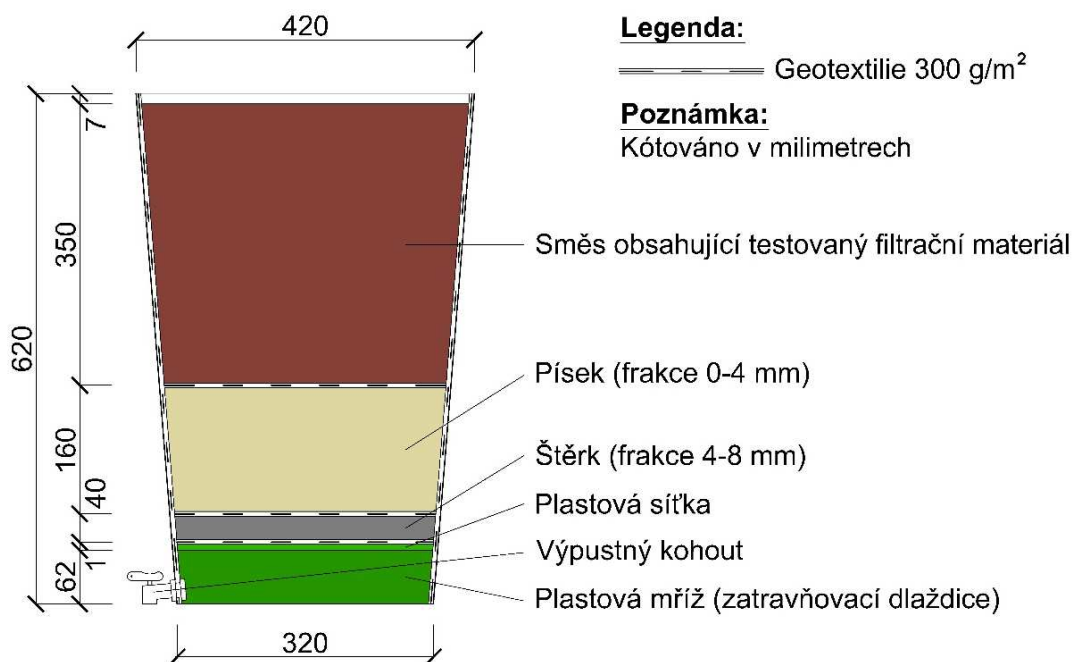
Metodiku práce lze rozdělit do několika dílčích částí, které shrnují následující podkapitoly. Jedná se zejména o přípravu fyzikálních modelů zasakovacích pásů, jejich realizaci, přípravu šedé vody, samotnou experimentální práci včetně dávkování šedé vody či odběru vzorků, chemickou analýzu odebraných vzorků a v poslední řadě o statistické vyhodnocení dat.

### 6.1 Design fyzikálního modelu zasakovacího pásu

Testování účinnosti různých filtračních materiálů probíhalo s využitím fyzikálních modelů zasakovacího pásu, které byly umístěny na experimentální ploše ČZU v Praze Suchdole. Fyzikální modely byly vystaveny povětrnostním vlivům tak, jak je to běžné u zasakovacích filtrů.

Fyzikální modely byly vytvořeny z plastových barelů o výšce 62 cm, horním průměru 42 cm a spodním průměru 32 cm. Vnitřní obvodová plocha barelu byla vyložena geotextilií za účelem zabránění tvorby preferenčních cest toku šedé vody filtrem při obvodové stěně. Geotextilie byla využita i mezi jednotlivými vrstvami filtračních materiálů pro zabránění zanášení níže položených vrstev materiálem z vrstev vyšších. Vnější stěna barelů byla obalena černou neprůsvitnou fólií pro omezení průniku světla, a tím došlo k zabránění nadměrného růstu řas produkujících kyslík, což by mohlo vést ke zkreslení výsledků. Ve spodní části barelu byl nainstalován plastový výpustný kohout, který sloužil pro odběr vzorků šedé vody na výtok filtru.

Následně byly barely naplněny vrstvami filtračních materiálů, nejdříve štěrk, písek a nejsvrchnější vrstva byla tvořená technogenní půdou (písek, ornice, kompost) s aditivem, který se lišil pro jednotlivé treatmenty (viz Obr. 6.1). Současně byla zhotovena i pětice tzv. defaultních barelů, jenž neobsahovaly žádné aditivum a napomáhaly vyhodnocení účinnosti testovaných filtračních materiálů na základě porovnávání naměřených hodnot (s aditivem x bez aditiva). Každá skupina treatmentů obsahovala 5 barelů, aby získané výsledky měly statistickou relevanci.



Obr. 6.1: Fyzikální model (Radim Hladký, 2020)

## 6.2 Filtrační materiály

Byla testována trojice filtračních materiálů (antuka, biouhel a mykorhiza) plus defaultní (kontrolní) skladba filtračního lože bez přidaného aditiva ve svrchní vrstvě. Testovaný materiál se vždy nacházel ve svrchní části filtru v kombinaci s pískem, kompostem a zeminou, přičemž poměr jednotlivých složek vyjadřuje Tab. 6.1.

Testovaný filtrační materiál (aditivum)	Objemový poměr
	Písek : Kompost : Zemina : Testovaný filtrační materiál
Bez aditiva	5 : 3 : 2 : 0
Mykorhiza	4 : 3 : 2 : 1
Antuka	4 : 3 : 2 : 1
Biouhel	10 : 5 : 4 : 1

Tab. 6.1: Objemový poměr materiálů ve svrchním filtračním loži

Všechny použité filtrační materiály byly zakoupeny v obchodě a jsou shrnuty v Tab. 6.2 Parametry, jako je například objemová hmotnost, hustota částic či celková pórovitost, nebyly během experimentu stanoveny. Filtry byly před zahájením aplikace šedé vody ponechány působení povětrnostních vlivů v řádu měsíců, lze tedy předpokládat, že před zahájením samotných experimentů došlo k proplachu filtračních materiálů dešťovou vodou.

Filtrační materiál	Frakce (mm)	Poznámka
Štěrk	0-8	Zásypový a podsypový štěrtek
Písek	0-4	Betonářský písek
Kompost	-	Organické hnojivo
Zemina	-	-
Mykorhiza	-	Organické hnojivo
Antuka	0-2	Drť z mletých pálených cihel
Biouhel	>2	Zuhelnatělé dřevo

Tab. 6.2: Filtrační materiály

### 6.3 Syntetická šedá voda

Šedá voda byla vytvářena uměle smícháním řady přípravků osobní hygieny a pracího prostředku, viz Tab. 6.3. Výběr konkrétních přípravků a jejich množství proběhl na základě průzkumu provedeného internetovým dotazníkem. Jako zástupce šampónu sloužil produkt Head & Shoulders Classic Clean, mýdlo na ruce zastupoval produkt Dove Original Caring Hand Wash, tělové mléko Nivea Body Milk, zubní pastu Colgate Cavity Protection, deodorant Nivea Fresh Natural roll-on a prací prostředek Ariel Mountain Spring. Šedá voda byla připravována v IBC kontejneru, jehož



Obr. 6.2: Průběh experimentu, v pozadí IBC kontejner (Radim Hladký, 2020)

objem činil 1000 l (Obr. 6.2), smícháním zmiňovaných kontaminantů odpovídajícím množstvím kohoutkové vody. V rámci současně probíhajících experimentů byla šedá voda připravována ve větším množství než pro tento samotný experiment, ovšem tabulka níže uvádí množství kontaminantů odpovídající jednomu barelu/filtru při dané saturaci (saturace uvedena v Tab. 6.4.). Odběr vzorků šedé vody z kontejneru probíhal vždy ráno před zahájením aplikace šedé vody do filtrů a následně v odpoledních hodinách po dokončení aplikace daného dne tak, aby bylo možné sledovat změny v chemickém složení šedé vody v IBC kontejneru.



Kontaminant	Množství kontaminantu dle filtračního materiálu a saturace filtru [g]			
	Default a mykorhiza		Antuka a biouhel	
	30 %	70 %	30 %	70 %
Šampón	0,48	1,11	0,52	1,21
Mýdlo na ruce	4,28	9,98	4,67	10,89
Tělové mléko	0,07	0,15	0,07	0,17
Zubní pasta	0,21	0,50	0,23	0,55
Deodorant	0,07	0,15	0,07	0,17
Prací prostředek	0,99	2,31	1,08	2,52

Tab. 6.3: Složení šedé vody a množství mikropolutantů dávkovaných do jednoho barelu

#### 6.4 Vlastní experiment

Pro každý filtrační materiál byla připravena pětice plastových barelů, do kterých byla syntetická šedá voda aplikována pomocí čerpadla a zahradní hadice s rozstřikovačem, případně kbelíkem, či kombinací kbelíku a zahradní hadice. Experiment probíhal v 5 etapách (viz Tab. 6.4) a byly testovány 2 rozdílná hydraulická zatížení, resp. 2 různé saturace filtru vodou (viz Tab. 6.5). Maximální (100 %) saturace byla zjištěna před započítáním experimentů, a to tak, že jeden barel z každé skupiny, byl postupně plněn kohoutkovou vodou, tak aby bylo možné postupné zasakování vody, přidávání vody pokračovalo, do té doby, než se hladina vody ustálila těsně nad povrchem filtračního lože a dále se již nezasakovala. Průběh experimentu v průběhu 1. etapy zachycuje Obr. 6.3.



Obr. 6.3: Průběh experimentu 7. den (Radim Hladký, 2020)

Etapa	Saturace [%]	Kontaminace šedou vodou [den]	Odběr vzorků na výtoku filtrů [den]	Proplach kohoutkovou vodou [den]
1	70	2. až 8.	3. až 9.	1. a 9.
2	70	1. až 5., 8.	2. až 5., 8., 9.	9.
3	30	1. až 3.	2. až 4.	4.
4	30	1. až 3.	2. až 4.	4.
5	70	1. až 5.	1. až 6.	6.

Tab. 6.4: Etapy experimentu

Testovaný filtrační materiál	Saturace jednoho filtru [l]		
	100 %	70 %	30 %
Bez aditiva	22	15,4	6,6
Mykorhiza	22	15,4	6,6
Antuka	24	16,8	7,2
Biouhel	24	16,8	7,2

Tab. 6.5: Saturace filtrů

## 6.5 Chemická analýza šedé vody

Výsledná kvalita ošetřené šedé vody a účinnost jednotlivých typů filtrů byla stanovena na základě sledování vybraných chemických ukazatelů – základní anionty ( $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $Br^-$ ,  $PO_4^{3-}$ ,  $SO_4^{3-}$ ), jednotlivé formy uhlíku (TC, TOC, IC), celkový dusík (TN) a tenzidy.

Uhlík a celkový dusík byl stanoven na Analyzátoru SKALAR Formacs<sup>HT</sup> TOC/TN (Skalar Analytical B. V., NL), základní anionty byly stanoveny s využitím iontové chromatografie na přístroji Metrohm 883 Basic IC Plus (Metrohm AG, CH) a měření anionaktivních tenzidů proběhlo pomocí kyvetového testu LCK 332 (Hach Lange GmbH, DE) na spektrometru DR3900 (Hach Company, USA). Detekční limity jednotlivých parametrů shrnuje Tab. 6.6.

Prostředek stanovení koncentrace	Parametr	Detekční limit [mg/l]
Analyzátor SKALAR Formacs <sup>HT</sup> TOC/TN	TOC, IC, TC, TN	0,05 <sup>A)</sup>
Metrohm 883 Basic IC Plus	F <sup>-</sup>	0,02
	Cl <sup>-</sup>	0,25
	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,01
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,25
	Br <sup>-</sup>	0,02
	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,01
	SO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,25
Kyvetový test pro stanovení anionaktivních tenzidů LCK 332	Aniontové a neiontové tenzidy	0,05 až 2
A) Lze dosáhnout nižších detekčních limitů v závislosti na laboratorních podmínkách		

Tab. 6.6: Detekční limity jednotlivých parametrů

## 6.6 Statistické vyhodnocení dat

Část analýzy dat proběhla v softwaru RStudio verze 1.1.463, ve kterém bylo využito Shapiro-Wilkova testu normality následovaného Tukeyho HSD testem a v případě nesplnění podmínek Shapiro-Wilkova testu (P hodnota musí být menší než 0,05) byl využit Kruskal-Wallisův test následovaný Dunnyho testem. V případě, že koncentrace daného parametru byla pod detekčním limitem (tzn. nebyly naměřeny žádné hodnoty), pro účely statistické analýzy při hledání signifikantních rozdílů (na hladině významnosti 0,05) byla uvažována koncentrace rovna detekčnímu limitu daného parametru, avšak lze předpokládat i nižší koncentrace. Zbylá část analýzy dat proběhla pomocí základních funkcí softwaru Microsoft Excel verze 2012 (build 13530.20440).

## 7. Výsledky

Základní přehled koncentrací polutantů v šedé vodě, ošetřené šedé vodě na odtocích jednotlivých skupin fyzikálních modelů (tedy v šedé vodě, která prošla úpravou, respektive filtrací pomocí testovaných filtračních materiálů) a pro ucelenost i ve vodě pitné (není však potřebné, a ani nepanuje takovýto předpoklad, dosáhnout kvalitou ošetřené vody na kvalitu vody pitné, jak již nastínila 5. kapitola) znázorňuje Tab. 7.1. Přehledem účinností jednotlivých filtračních materiálů při odstraňování daných parametrů je uvedeno v Tab. 7.2 a podrobněji, případně slovně, jsou poté jednotlivé parametry rozebrány v následujících podkapitolách.

Parametr	Čistá voda	Šedá voda	Bez aditiva	Antuka	Mykorhiza	Biouhel
Celkový organický uhlík [mg/l]	2,58 ± 1,45	47,37 ± 10,49	38,40 ± 19,34	30,99 ± 13,64	28,09 ± 15,65	18,89 ± 7,35
Anorganický uhlík [mg/l]	16,40 ± 1,21	19,20 ± 3,23	81,25 ± 17,91	83,79 ± 16,30	64,99 ± 21,47	69,92 ± 13,70
Celkový uhlík [mg/l]	18,26 ± 3,44	66,56 ± 12,71	119,65 ± 35,10	114,79 ± 26,85	93,08 ± 34,40	88,81 ± 19,92
Celkový dusík [mg/l]	3,78 ± 1,06	4,46 ± 0,67	3,17 ± 1,02	2,32 ± 0,62	2,94 ± 1,17	1,83 ± 0,43
Fluoridy (F <sup>-</sup> ) [mg/l]	0,05 ± 0,01	0,14 ± 0,06	0,36 ± 0,27	0,66 ± 0,32	0,42 ± 0,31	0,41 ± 0,28
Chloridy (Cl <sup>-</sup> ) [mg/l]	24,85 ± 0,17	31,63 ± 0,88	30,91 ± 5,41	29,88 ± 3,52	29,05 ± 2,69	29,40 ± 4,69
Dusitany (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) [mg/l]	-A)	0,15 + 0,22 - 0,15	0,02 + 0,06 - 0,02	0,01 + 0,03 - 0,01	0,03 + 0,07 - 0,03	0,01 + 0,02 - 0,01
Dusičnany (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) [mg/l]	17,55 ± 0,34	13,26 ± 5,09	1,71 + 2,67 - 1,71	0,90 ± 0,85	3,99 + 6,17 - 3,99	1,74 + 1,75 - 1,74
Bromidy (Br <sup>-</sup> ) [mg/l]	0,04 ± 0,01	0,13 ± 0,03	0,02 + 0,03 - 0,02	0,06 ± 0,06	0,05 + 0,10 - 0,05	0,07 ± 0,07
Fosforečnany (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) [mg/l]	-A)	1,85 ± 0,12	0,59 + 0,86 - 0,59	0,25 + 0,37 - 0,25	0,48 + 0,52 - 0,48	0,46 + 0,69 - 0,46
Sírany (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [mg/l]	36,65 ± 0,28	45,37 ± 6,51	52,96 ± 24,70	46,52 ± 20,34	50,70 ± 18,00	50,81 ± 17,57
A) Koncentrace pod detekčním limitem přístroje Metrohm 883 Basic IC Plus (pro NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> i PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> detekční limit činní 0,01 mg/l)						

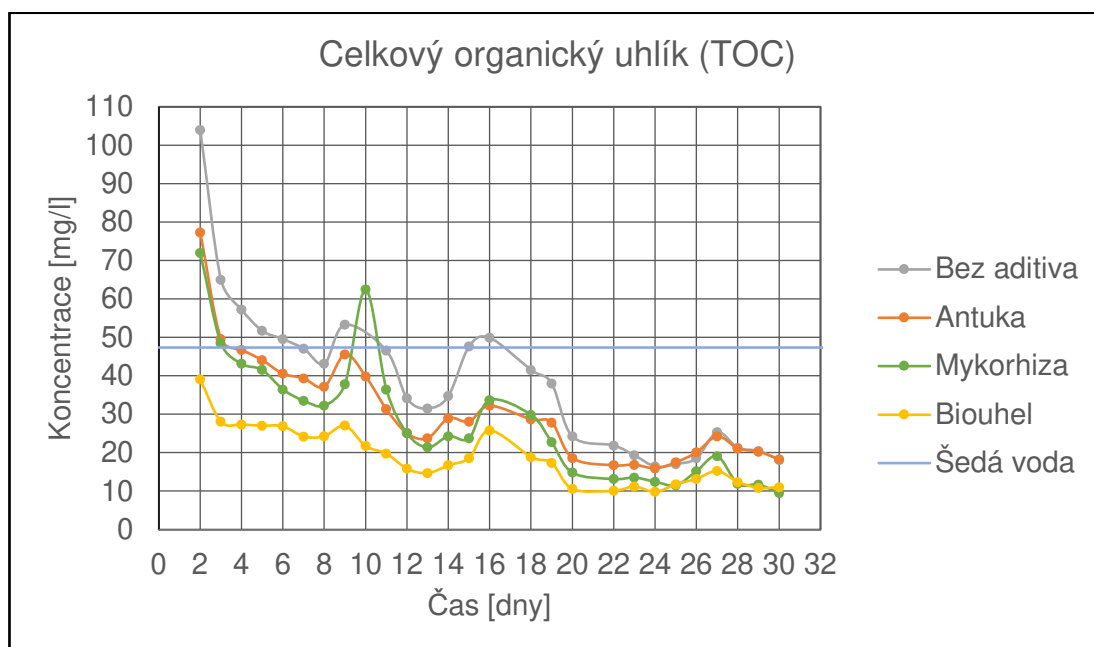
Tab. 7.1: Naměřené koncentrace (průměr ± směrodatná odchylka) polutantů v pitné, šedé a ošetřené šedé vodě

Parametr	Bez aditiva	Antuka	Mykorhiza	Biouhel
Celkový organický uhlík [%]	18,9 ± 40,84	34,57 ± 28,79	40,70 ± 33,04	60,11 ± 15,52
Anorganický uhlík [%]	-323,20 ± 93,29	-336,43 ± 84,91	-238,49 ± 111,84	-264,16 ± 71,35
Celkový uhlík [%]	-79,76 ± 52,74	-72,46 ± 40,34	-39,85 ± 51,68	-33,43 ± 29,92
Celkový dusík [%]	28,95 ± 22,81	48,07 ± 13,94	34,10 ± 26,27	59,04 ± 9,55
Fluoridy (F <sup>-</sup> ) [%]	-148,92 ± 190,36	-361,26 ± 226,37	-190,61 ± 214,53	-173,85 ± 200,21
Chloridy (Cl <sup>-</sup> ) [%]	2,28 ± 17,11	5,53 ± 11,14	8,14 ± 8,49	10,75 ± 23,31
Dusitany (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) [%]	85,41 + 14,59 - 41,33	91,36 + 8,64 - 22,73	76,45 + 23,55 - 50,20	90,43 + 9,57 - 14,78
Dusičnany (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) [%]	87,12 + 12,88 - 20,15	93,20 ± 6,41	69,94 + 30,06 - 46,55	87,37 + 12,63 - 13,17
Bromidy (Br <sup>-</sup> ) [%]	82,43 + 17,57 - 25,97	52,14 ± 46,93	59,45 + 40,55 - 71,92	46,60 ± 52,51
Fosforečnany (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) [%]	68,09 + 31,91 - 46,20	86,36 + 13,64 - 20,08	74,17 + 25,83 - 28,25	76,05 + 23,95 - 36,54
Sírany (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) [%]	-16,74 ± 54,45	-2,54 ± 44,84	-11,75 ± 39,68	-7,52 ± 43,84

Tab. 7.2: Účinnost (průměr ± směrodatná odchylka) jednotlivých typů filtrů při odstraňování uhlíku, dusíku a základních aniontů

## 7.1 Celkový organický uhlík (TOC)

V průběhu experimentu všechny skupiny fyzikálních modelů (nadále pouze “skupiny filtrů“, nebo “skupiny“) na výtoku vykazovaly klesající trend koncentrace celkového organického uhlíku, ovšem během první etapy (1. až 10. den), vyjma filtrů obsahujících biouhel, koncentrace na výtoku filtrů dosahovaly vyšších hodnot, nežli samotná šedá voda ( $43,37 \pm 10,49$  mg/l). Koncentrace celkového organického uhlíku na výtoku filtrů se ustálila od 20. dne a v průběhu celého experimentu činila pro skupinu bez aditiva  $38,40 \pm 19,34$  mg/l, skupinu obsahující antuku  $30,99 \pm 13,64$  mg/l, mykorhizu  $28,09 \pm 15,65$  mg/l a biouhel  $18,89 \pm 7,35$  mg/l. Graf 7.1. poté zobrazuje koncentrace celkového organického uhlíku na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



Graf 7.1: Průběh koncentrace celkového organického uhlíku

Pitná voda, šedá voda a ošetřená šedá voda na odtoku jednotlivých skupin filtrů byla v průběhu experimentu celkem 6x podrobena statistické analýze s cílem nalézt signifikantní rozdíly (na hladině významnosti 0,05, přičemž tato hladina platí i pro veškeré následující signifikantní rozdíly) koncentrací měřených parametrů mezi, již zmiňovanými, jednotlivými skupinami filtrů, šedou a pitnou vodou. Pro tuto statistickou analýzu byly vzorky odebírány z každého filtru individuálně, a to během celkově 9. dne (1. etapa), 16. dne (2. etapa), 19. dne (3. etapa), 24. dne (4. etapa), 26. a 28. dne (5. etapa). Skupina bez aditiva, skupina obsahující antuku, vyjma druhé etapy, a samotná šedá voda během celého experimentu vykazovala signifikantně

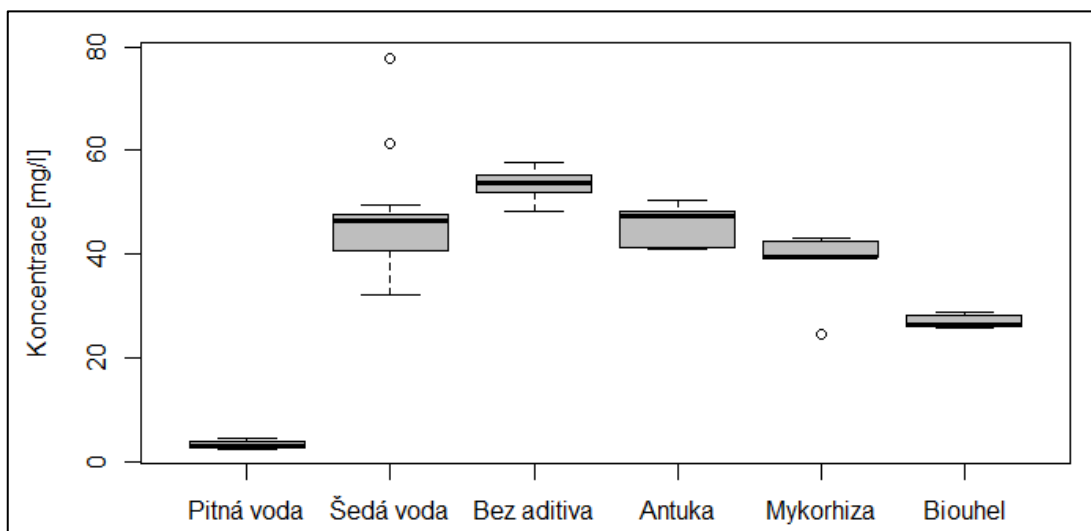
vyšší koncentrace nežli voda pitná. Nadále skupina obsahující biouhel po celou dobu experimentu a skupina s mykorhizou od 3. etapy vykazovaly signifikantně nižší koncentrace nežli šedá voda. V poslední řadě skupina s biouhlem do 2. etapy a skupina s mykorhizou během 1. etapy vykazovaly signifikantně nižší koncentrace nežli skupina bez aditiva, viz Tab. 7.3. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.2. až Graf 7.7).

Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda	▲	▲	▲	▲	▲	▲												
Bez aditiva	▲	▲	▲	▲	▲	▲												
Antuka	▲		▲	▲	▲	▲												
Mykorhiza									▼	▼	▼	▼	▲					
Biouhel							▼	▼	▼	▼	▼	▼	▲	▲				
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza																		
Biouhel																		

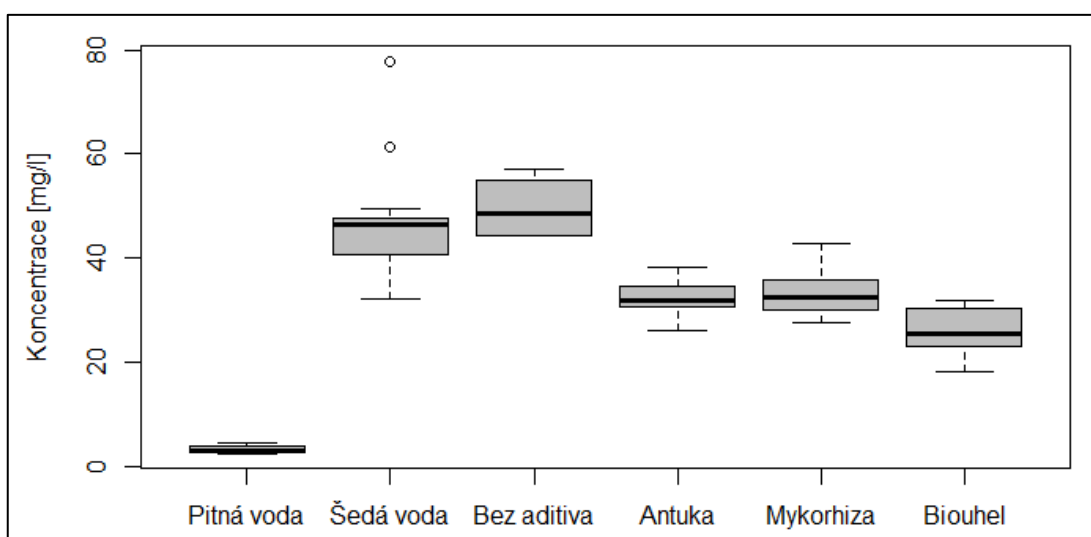
A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

Tab. 7.3: Signifikantní rozdíly v koncentracích celkového organického uhlíku

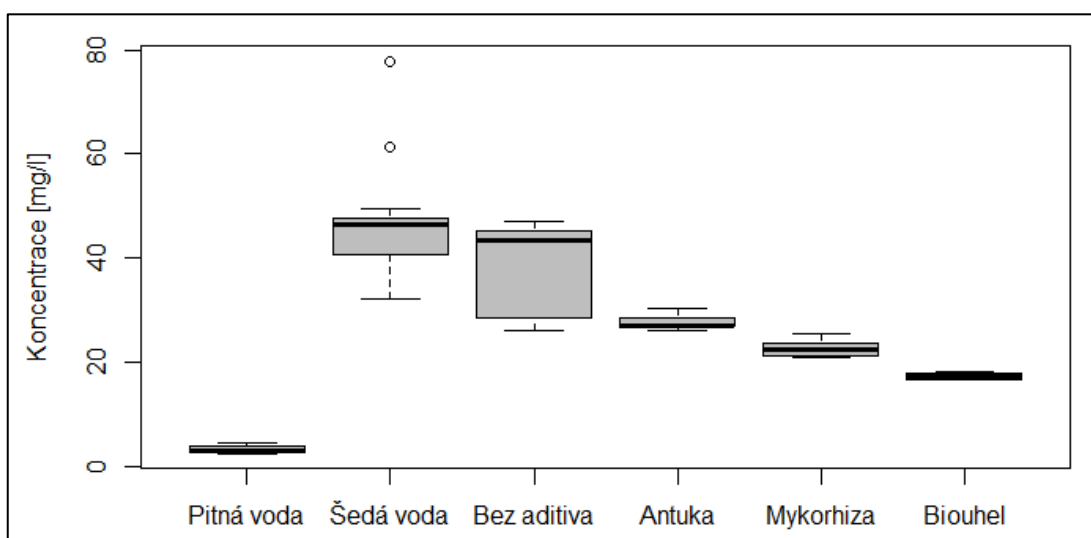




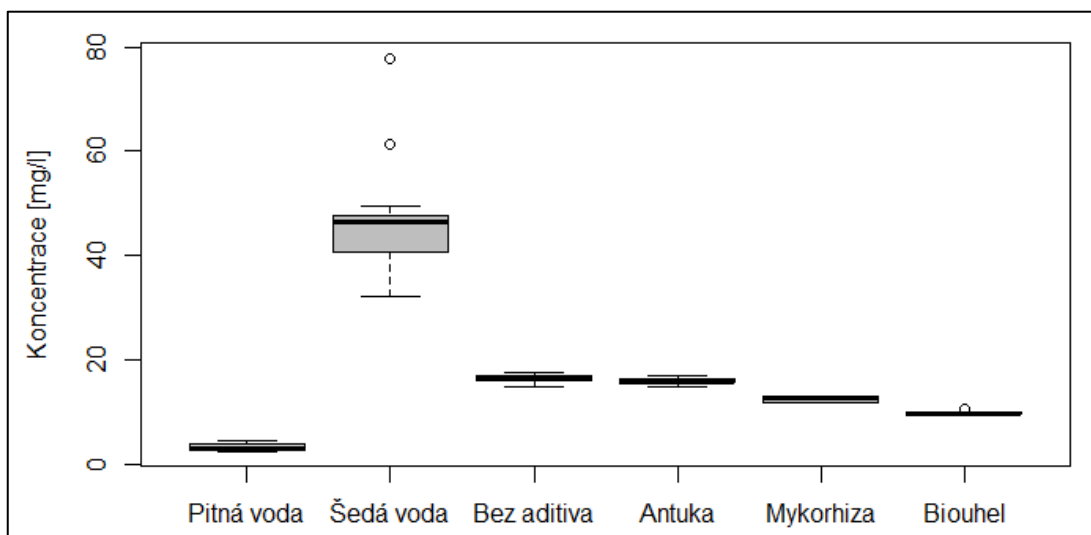
Graf 7.2: Průběh koncentrací celkového organického uhlíku – 9. den



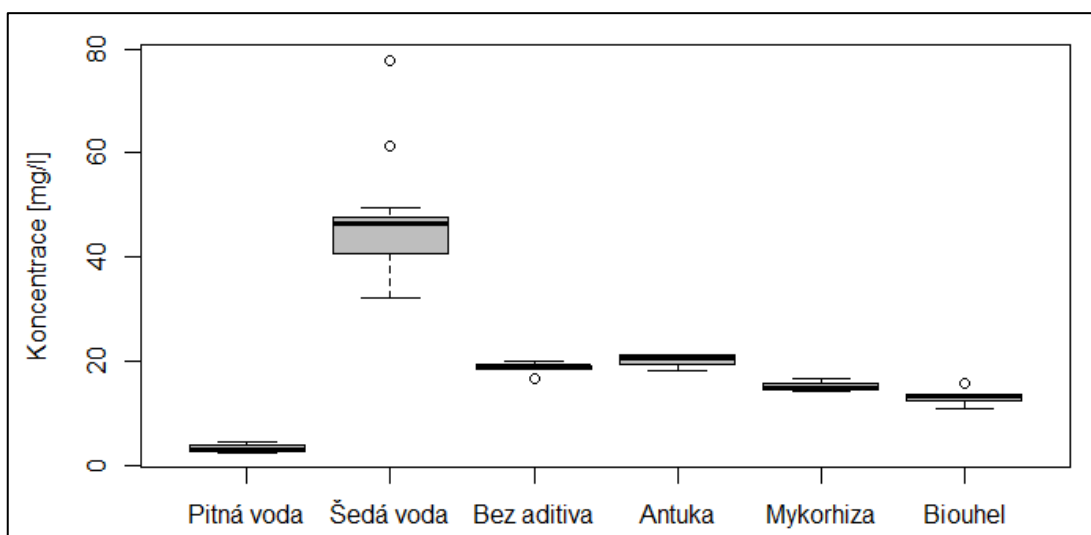
Graf 7.3: Průběh koncentrací celkového organického uhlíku – 16. den



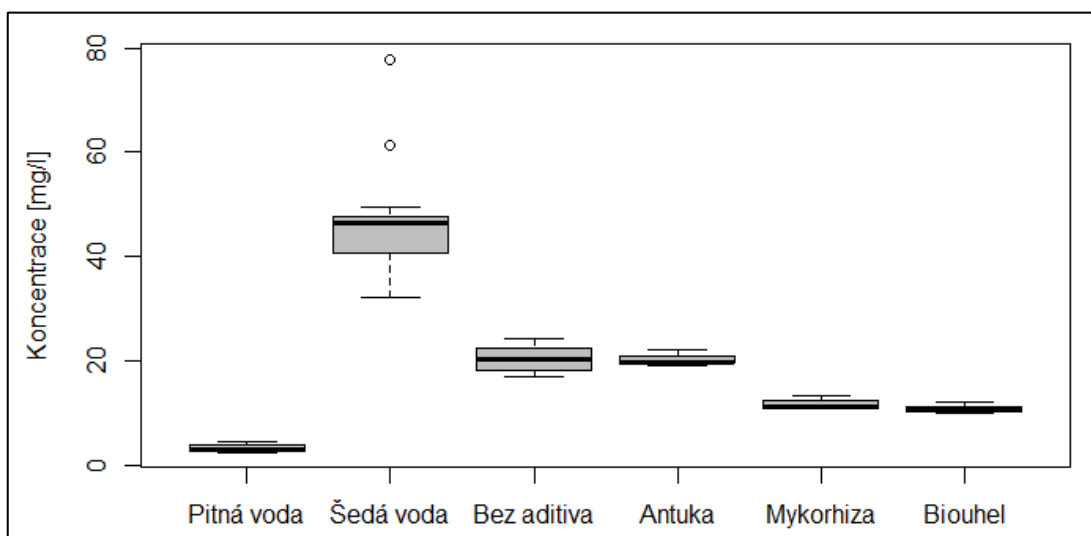
Graf 7.4: Průběh koncentrací celkového organického uhlíku – 19. den



Graf 7.5: Průběh koncentrací celkového organického uhlíku – 24. den



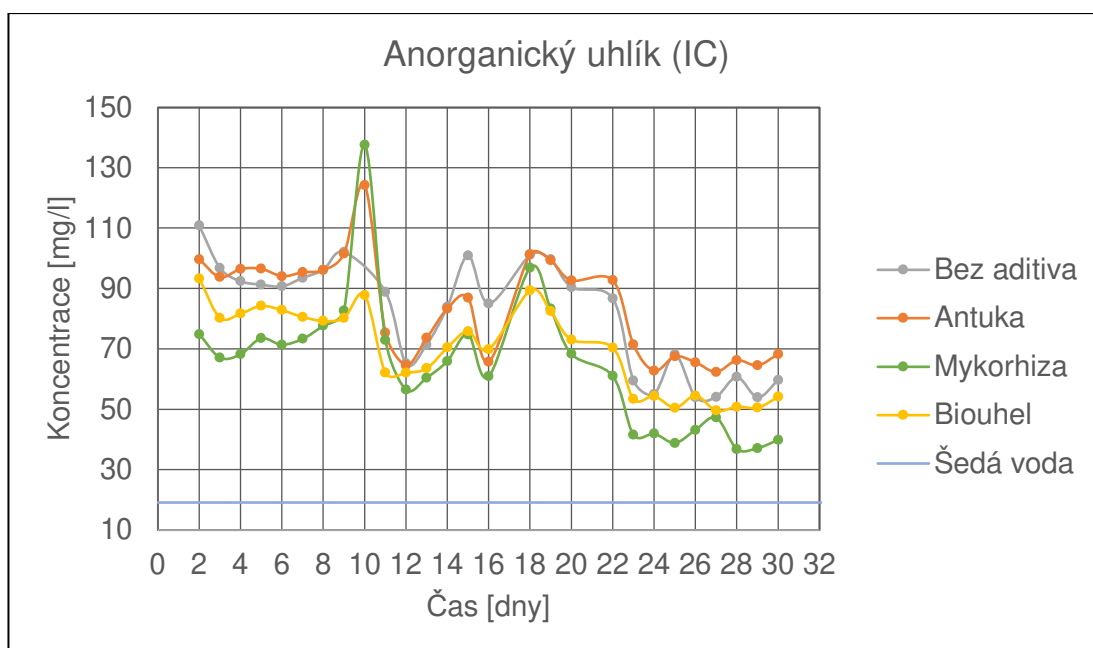
Graf 7.6: Průběh koncentrací celkového organického uhlíku – 26. den



Graf 7.7: Průběh koncentrací celkového organického uhlíku – 28. den

## 7.2 Anorganický uhlík (IC)

Koncentrace anorganického uhlíku po celou dobu na výtoku filtrů dosahovala vyšších hodnot nežli šedá voda ( $19,20 \pm 3,23$  mg/l), avšak všechny filtry na výtoku vykazovaly klesající trend koncentrace. Koncentrace poté od 23. dne nevykazovala výrazné výkyvy u žádné skupiny a v průběhu celého experimentu činila pro skupinu bez aditiva  $81,25 \pm 17,91$  mg/l, skupinu obsahující antuku  $83,79 \pm 16,30$  mg/l, mykorrhizu  $64,99 \pm 21,47$  mg/l a biouhel  $69,92 \pm 13,70$  mg/l. Graf 7.8. poté zobrazuje koncentrace anorganického uhlíku na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



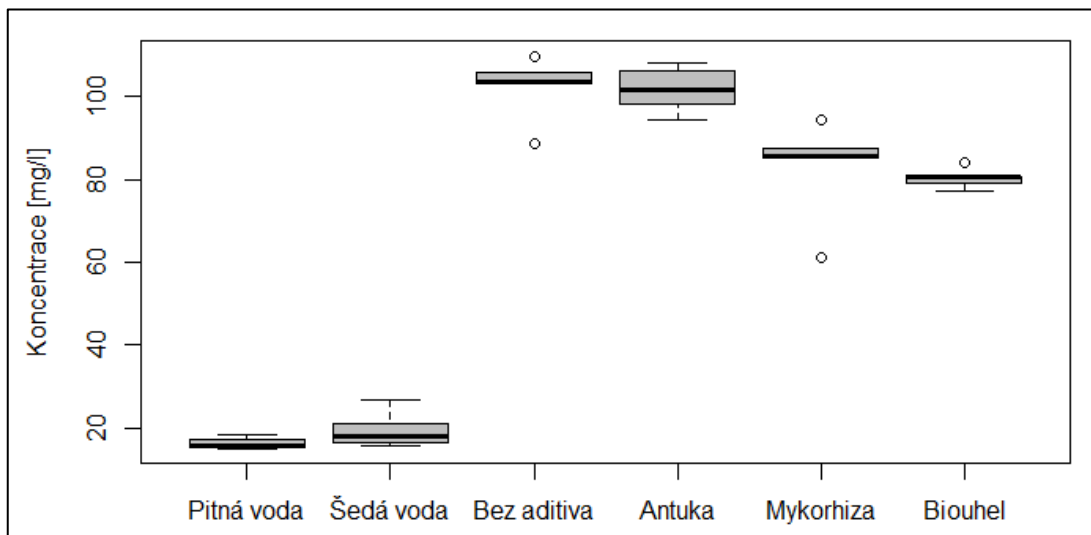
Graf 7.8: Průběh koncentrace anorganického uhlíku

Všechny skupiny na výtoku filtrů během celého experimentu vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace anorganického uhlíku, oproti pitné a šedé vodě, přičemž výjimku tvořila pouze skupina obsahující biouhel v průběhu 1. etapy a mykorrhizu během 2., 3. a 5. (28. den) etapy, kdy nevykazovaly signifikantní rozdíl vůči šedé vodě. Mykorrhiza také během 4. a 5. (26. den) etapy vykazovala signifikantně nižší koncentrace nežli skupina bez aditiva, skupina obsahující antuku či biouhel, přičemž antuka vykazovala signifikantně vyšší koncentrace anorganického uhlíku vůči skupině bez aditiva, či skupině obsahující biouhel, viz Tab. 7.4. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.9 až Graf 7.14).

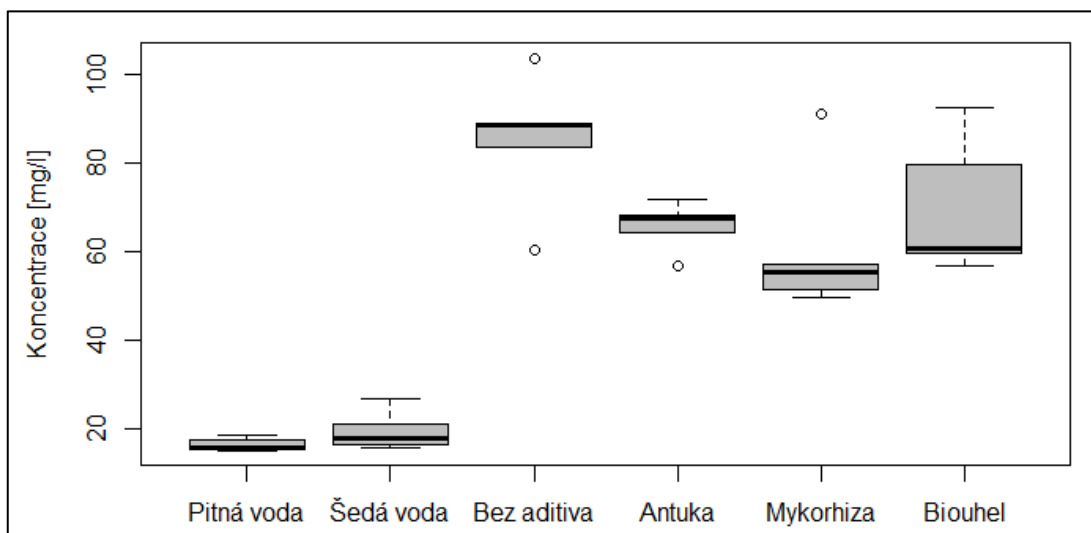
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda																		
Bez aditiva	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲						
Antuka	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲					▲	
Mykorhiza	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲			▲	▲					▼	▼	
Biouhel	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲	▲	▲	▲						
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza				▼	▼													
Biouhel					▼					▲	▲							

A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

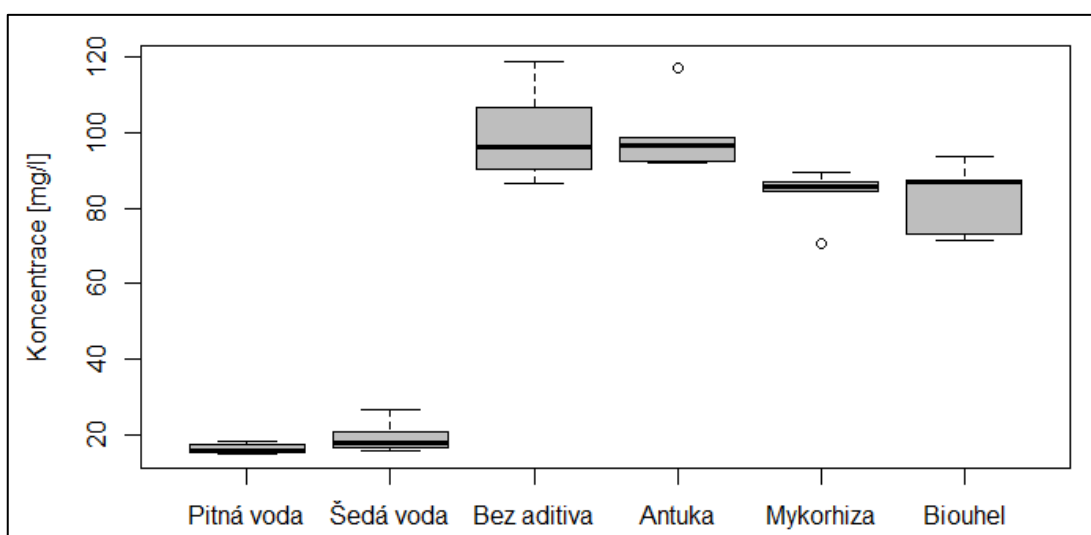
Tab. 7.4: Signifikantní rozdíly v koncentracích anorganického uhlíku



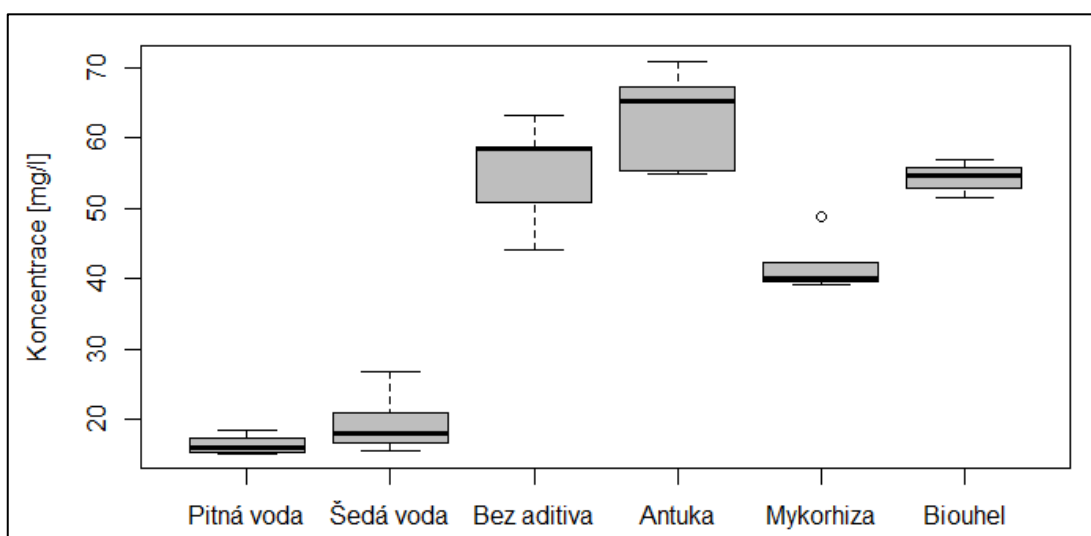
Graf 7.9: Průběh koncentrací anorganického uhlíku – 9. den



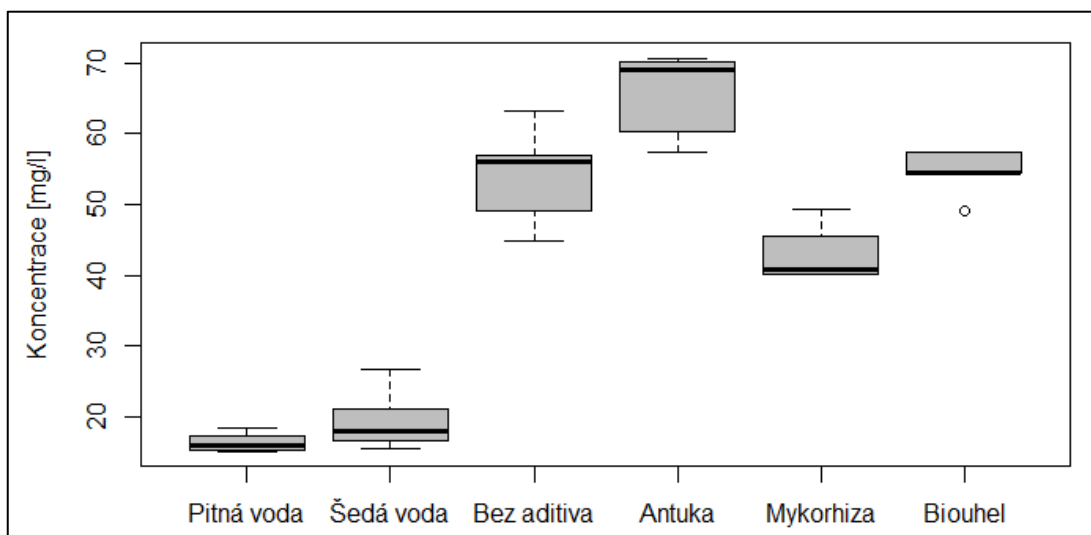
Graf 7.10: Průběh koncentrací anorganického uhlíku – 16. den



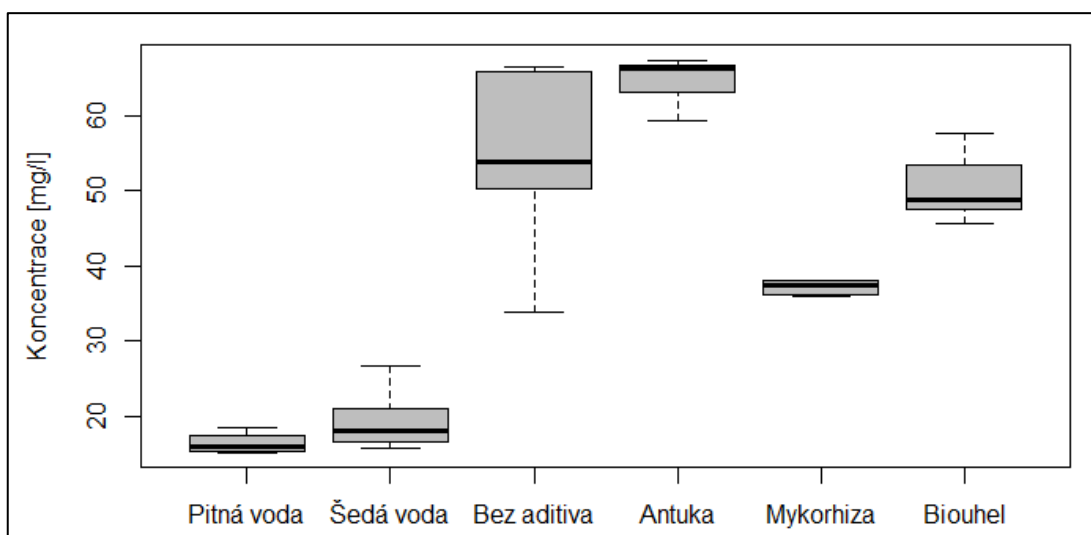
Graf 7.11: Průběh koncentrací anorganického uhlíku – 19. den



Graf 7.12: Průběh koncentrací anorganického uhlíku – 24. den



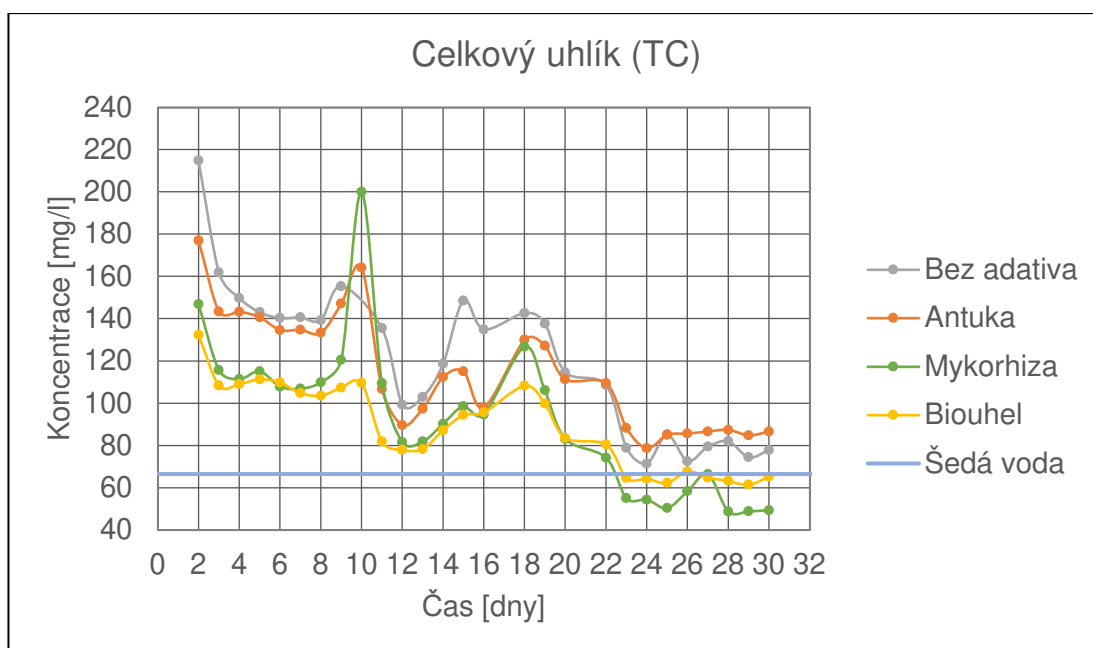
Graf 7.13: Průběh koncentrací anorganického uhlíku – 26. den



Graf 7.14: Průběh koncentrací anorganického uhlíku – 28. den

### 7.3 Celkový uhlík (TC)

Koncentrace celkového uhlíku na výtoku filtrů nesla klesající trend (viz Graf 7.15), avšak dosahovala vyšších hodnot než šedá voda ( $66,56 \pm 12,71$  mg/l) až do 23. dne, od kterého skupina obsahující mykorhizu a biouhel vykazovala i nižší hodnoty. Taktéž lze konstatovat, že koncentrace celkového uhlíku od 23. dne nevykazovala výrazné výkyvy u žádné skupiny a v průběhu celého experimentu činila pro skupinu bez aditiva  $119,65 \pm 35,10$  mg/l, skupinu obsahující antuku  $114,79 \pm 26,85$  mg/l, mykorhizu  $93,08 \pm 34,40$  mg/l a biouhel  $88,81 \pm 19,92$  mg/l.



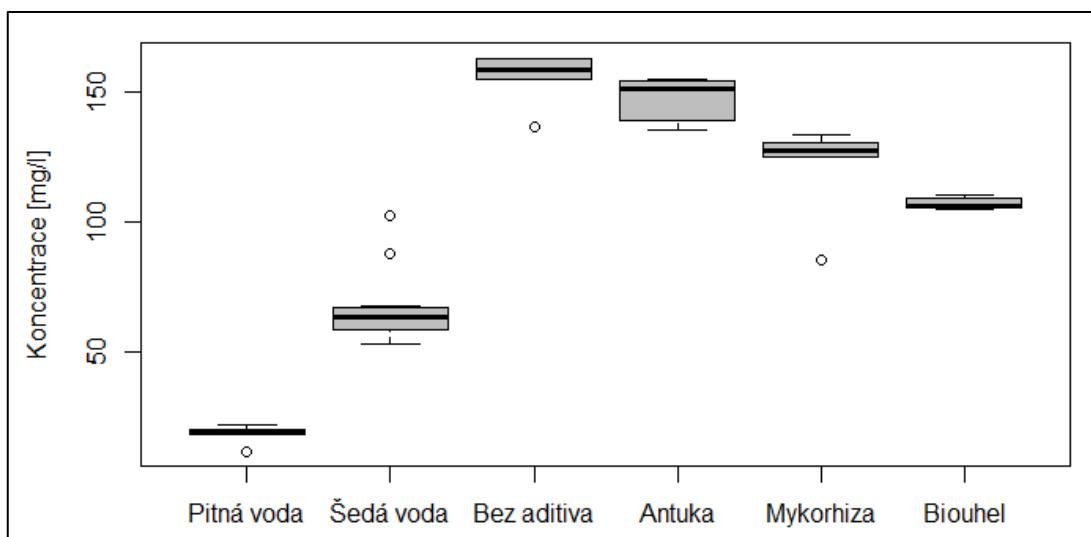
Graf 7.15: Průběh koncentrace celkového uhlíku

Všechny skupiny na výtoku filtrů během celého experimentu vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace celkového uhlíku nežli pitná voda, vyjma skupiny obsahující mykorhizu během 24. a 28. dne. Mykorhiza také vykazovala signifikantně nižší koncentrace během 4. a 5. etapy vůči skupině obsahující antuku a 28. den i vůči skupině bez aditiva, přičemž mykorhiza vykazovala během 1. etapy dokonce signifikantně vyšší koncentrace nežli šedá voda. Signifikantně vyšší koncentrace celkového uhlíku vůči šedé vodě také vykazovala skupina bez aditiva během 1. až 3. etapy a skupina obsahující antuku během 1., 3. a 4. etapy, viz Tab. 7.5. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.16 až Graf 7.21).

Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda	▲	▲	▲	▲	▲	▲												
Bez aditiva	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲									
Antuka	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲		▲	▲								
Mykorhiza	▲	▲	▲		▲		▲											▼
Biouhel	▲	▲	▲	▲	▲	▲												
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza				▼	▼	▼												
Biouhel																		

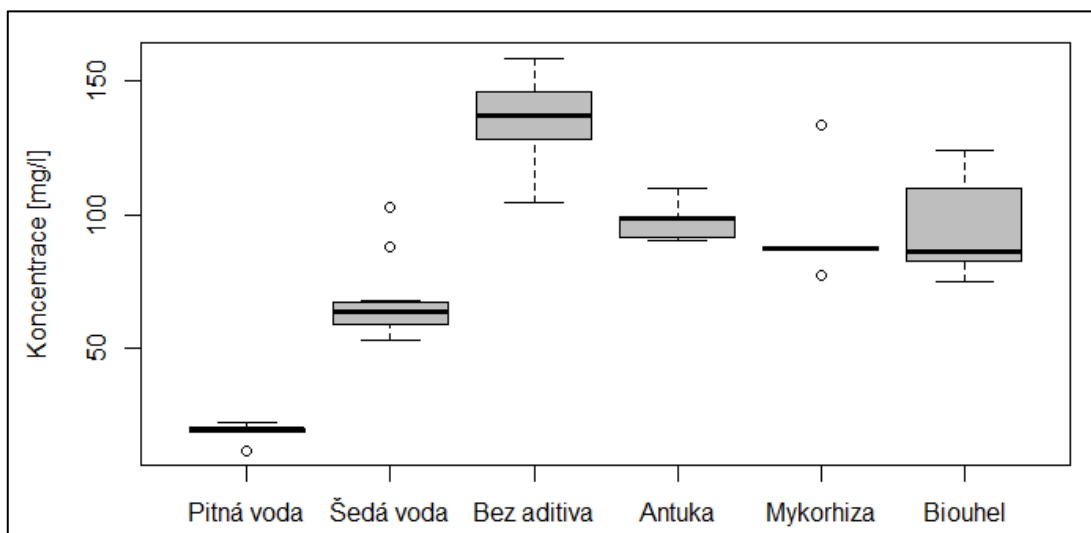
A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

Tab. 7.5: Signifikantní rozdíly v koncentracích celkového uhlíku

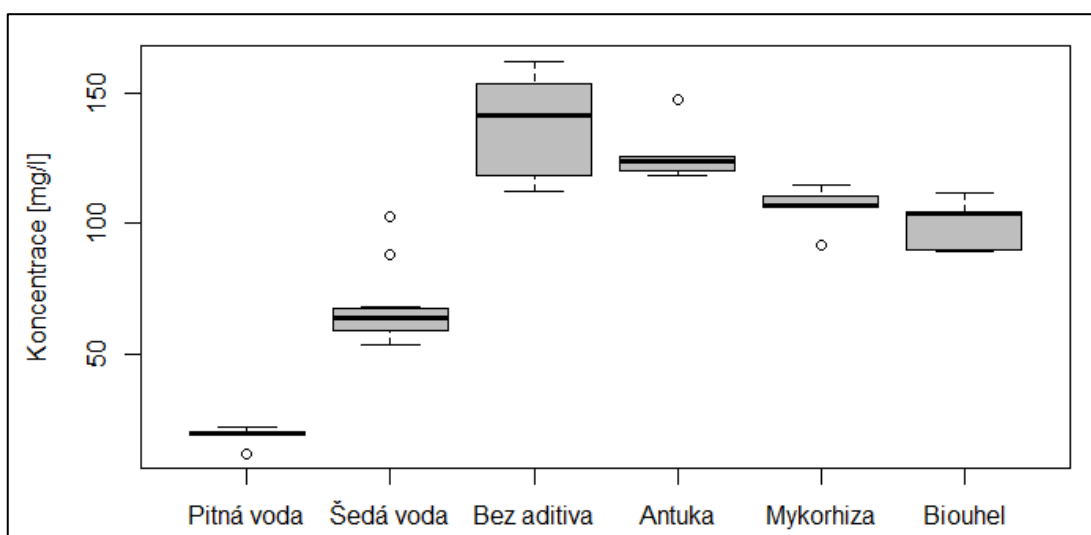


Graf 7.16: Průběh koncentrací celkového uhlíku – 9. den

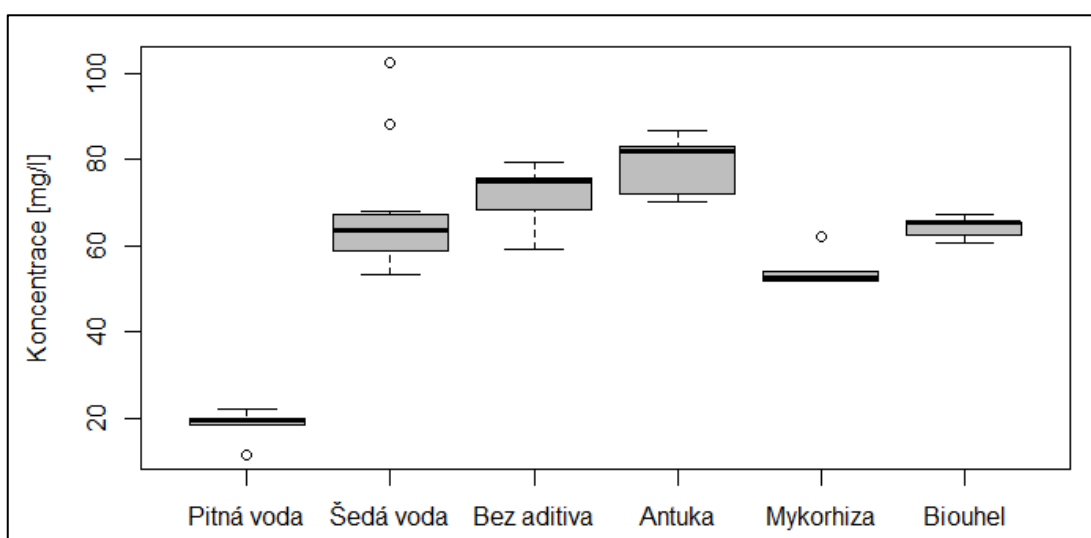




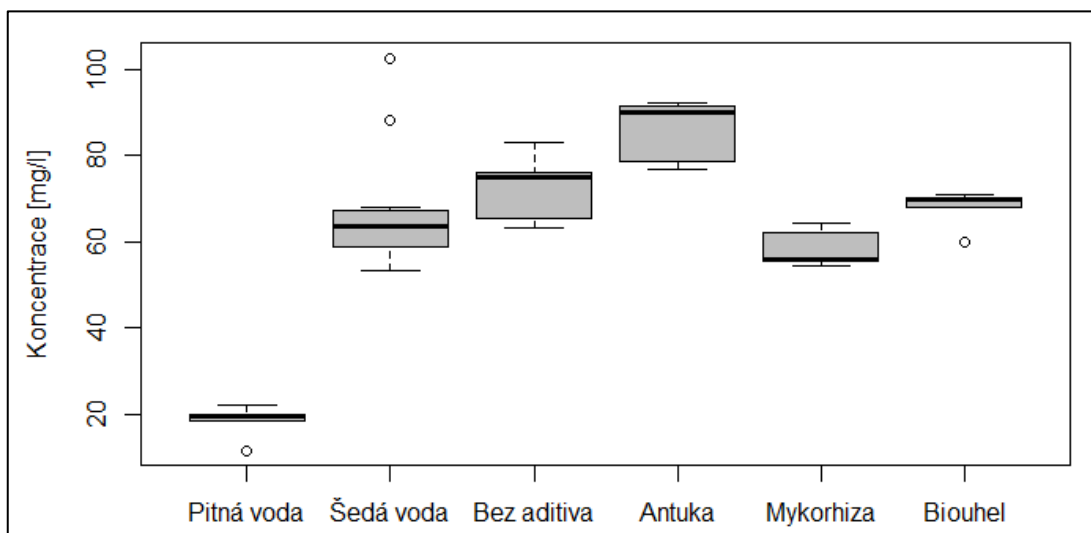
Graf 7.17: Průběh koncentrací celkového uhlíku – 16. den



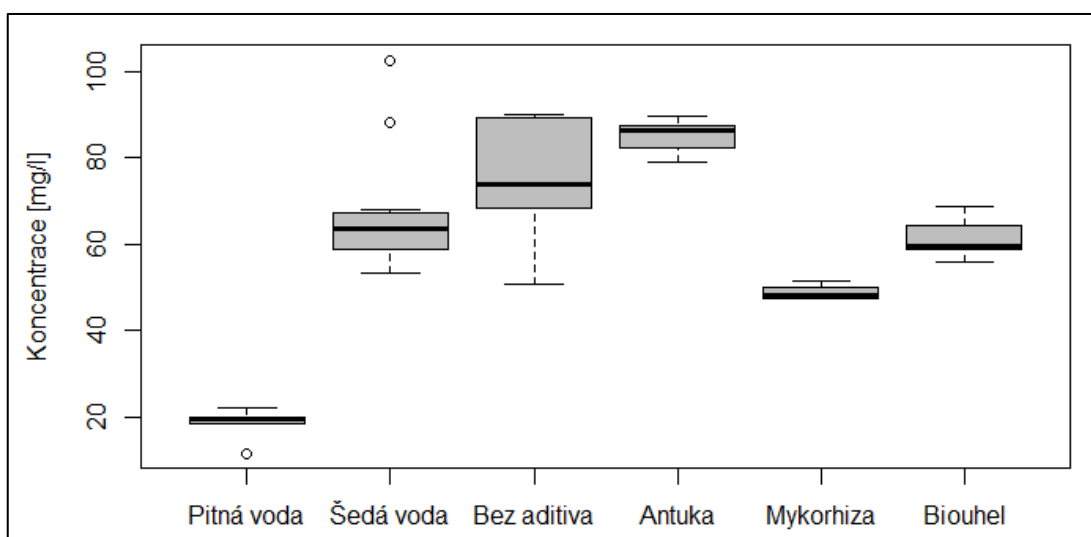
Graf 7.18: Průběh koncentrací celkového uhlíku – 19. den



Graf 7.19: Průběh koncentrací celkového uhlíku – 24. den



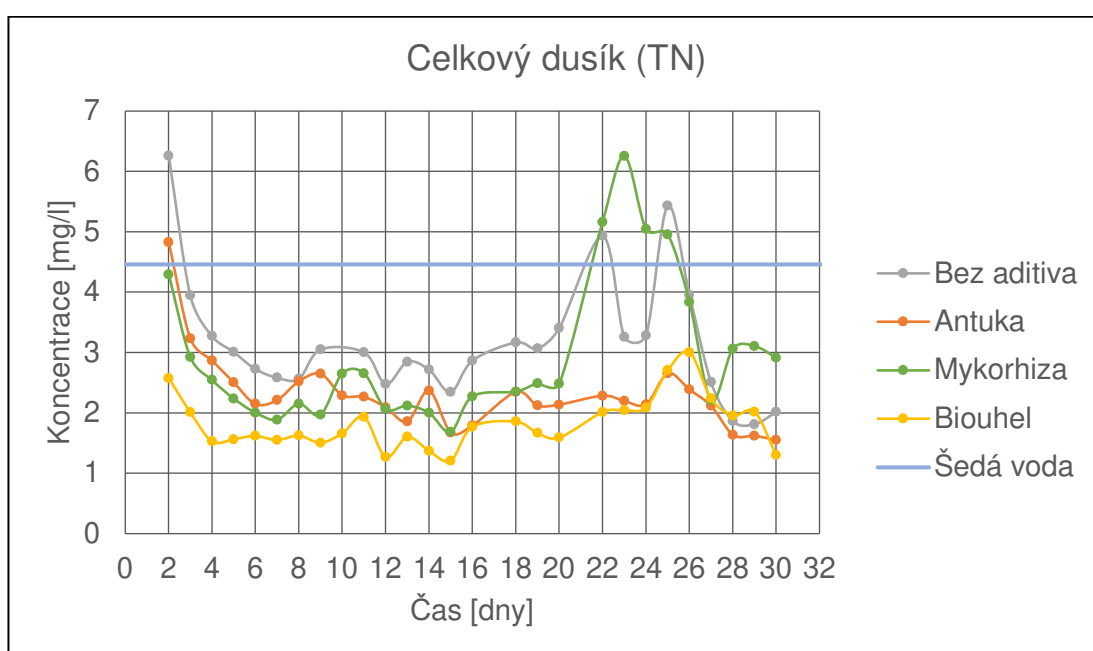
Graf 7.20: Průběh koncentrací celkového uhlíku – 26. den



Graf 7.21: Průběh koncentrací celkového uhlíku – 28. den

## 7.4 Celkový dusík (TN)

Koncentrace celkového dusíku na výtoku filtrů, vyjma 1. dne, dosahovala nižších hodnot, nežli šedá voda ( $4,46 \pm 0,67$  mg/l, vyjma 21. až 26. dne, kde koncentrace na výtoku ze skupiny bez aditiva a skupiny s antukou překročila koncentrace v šedé vodě). V průběhu celého experimentu koncentrace celkového dusíku na výtoku činila pro skupinu filtrů bez aditiva  $3,17 \pm 1,02$  mg/l, skupinu obsahující antuku  $2,32 \pm 0,62$  mg/l, mykorhizu  $2,94 \pm 1,17$  mg/l a biouhel  $1,83 \pm 0,43$  mg/l. Graf 7.22 poté zobrazuje koncentrace celkového dusíku na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



Graf 7.22: Průběh koncentrace celkového dusíku

Skupina bez aditiva na výtoku 28. den vykazovala signifikantně nižší koncentrace celkového dusíku, nežli pitná a šedá voda. Skupina obsahující antuku vykazovala signifikantně nižší koncentrace vůči pitné vodě 16., 24. a 28. den a vůči šedé vodě po celou dobu experimentu. Během 4. etapy vykazovala také signifikantně nižší koncentrace vůči skupině obsahující mykorhizu. Skupina obsahující mykorhizu vykazovala signifikantně nižší koncentrace během 1. etapy vůči pitné vodě, respektive během 1. až 3. etapy vůči šedé vodě a během 4. etapy signifikantně vyšší koncentrace nežli skupina obsahující antuku. Skupina s obsahem biouhlu během 1. až 4. etapy vykazovala signifikantně nižší koncentrace celkového dusíku vůči vodě pitné, respektive po celou dobu (vyjma 26. dne) vůči šedé vodě, viz Tab. 7.6.

Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.23 až Graf 7.28).

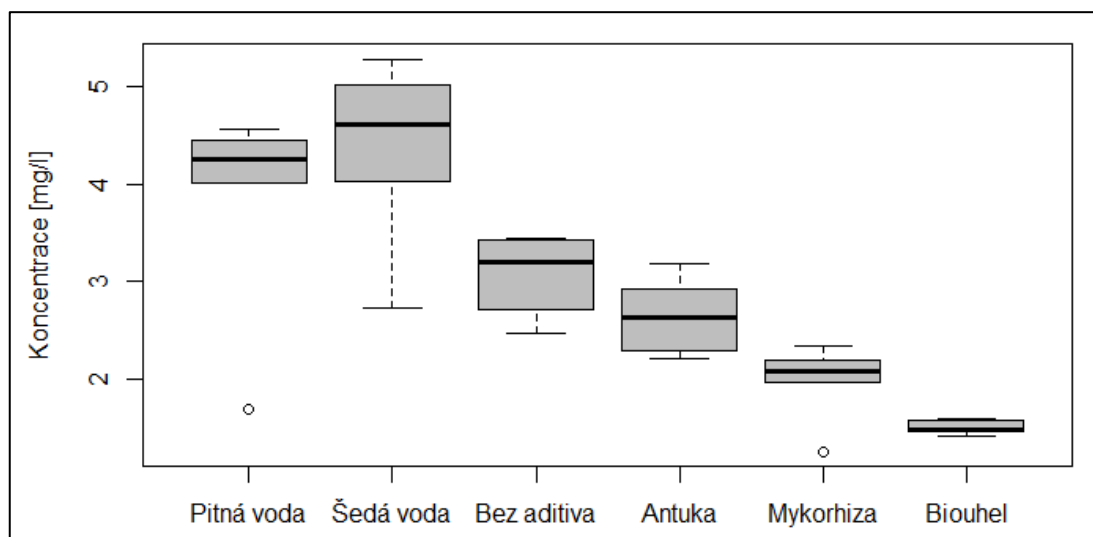
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda																		
Bez aditiva						▼						▼						
Antuka		▼		▼		▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼						
Mykorhiza	▼						▼	▼	▼									
Biouhel	▼	▼	▼	▼			▼	▼	▼	▼		▼						
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza				▲														
Biouhel										▼								

Legenda:  
▲ – signifikantně vyšší koncentrace  
▼ – signifikantně nižší koncentrace

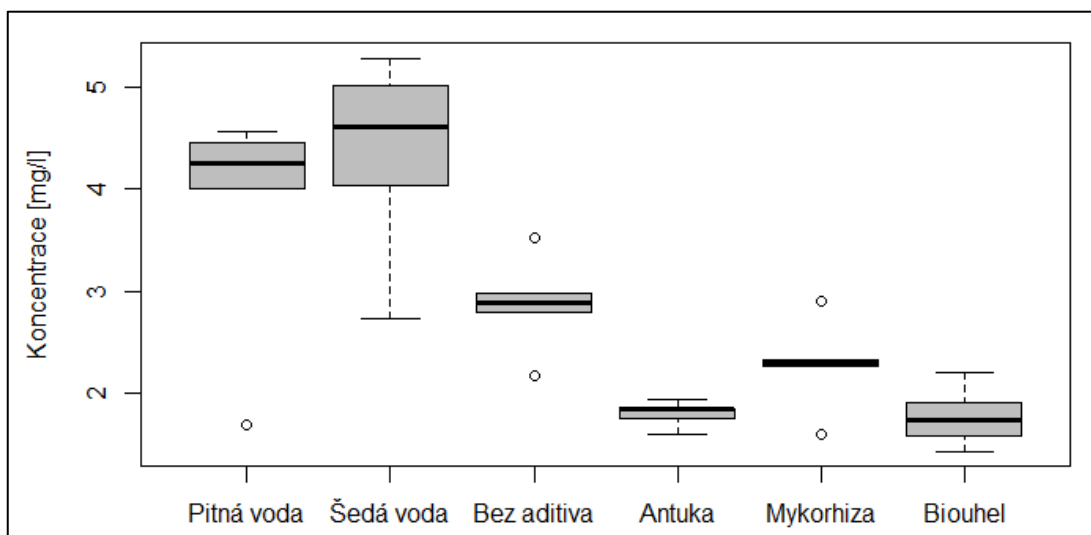
Pozn.: Hladina významnosti 0.05

A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

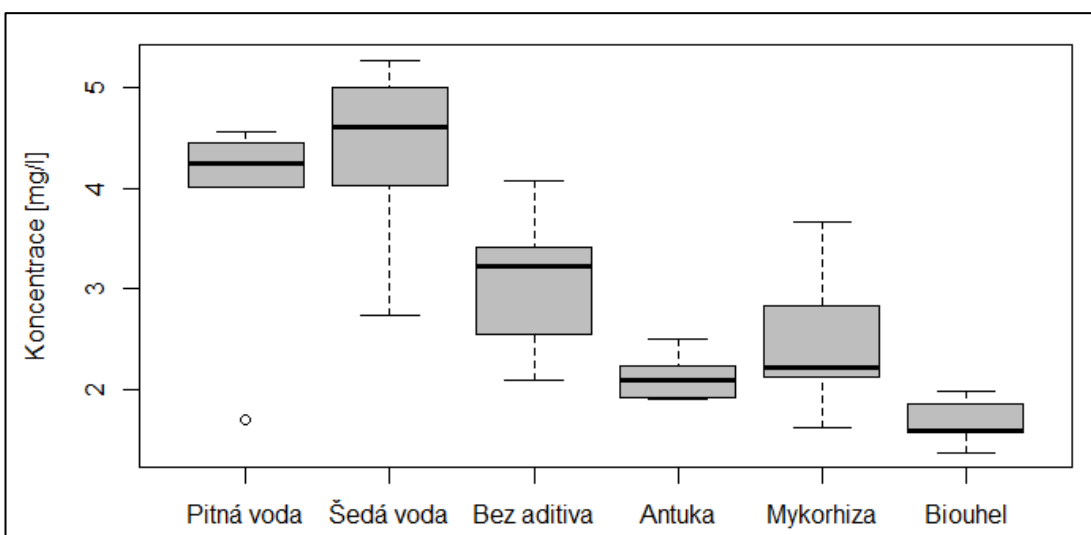
Tab. 7.6: Signifikantní rozdíly v koncentracích celkového dusíku



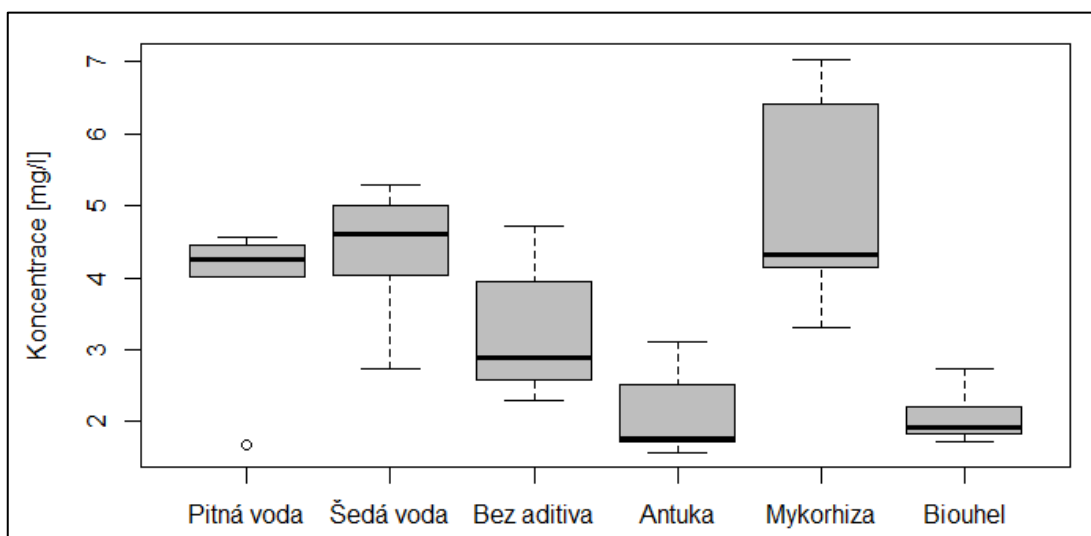
Graf 7.23: Průběh koncentrací celkového dusíku – 9. den



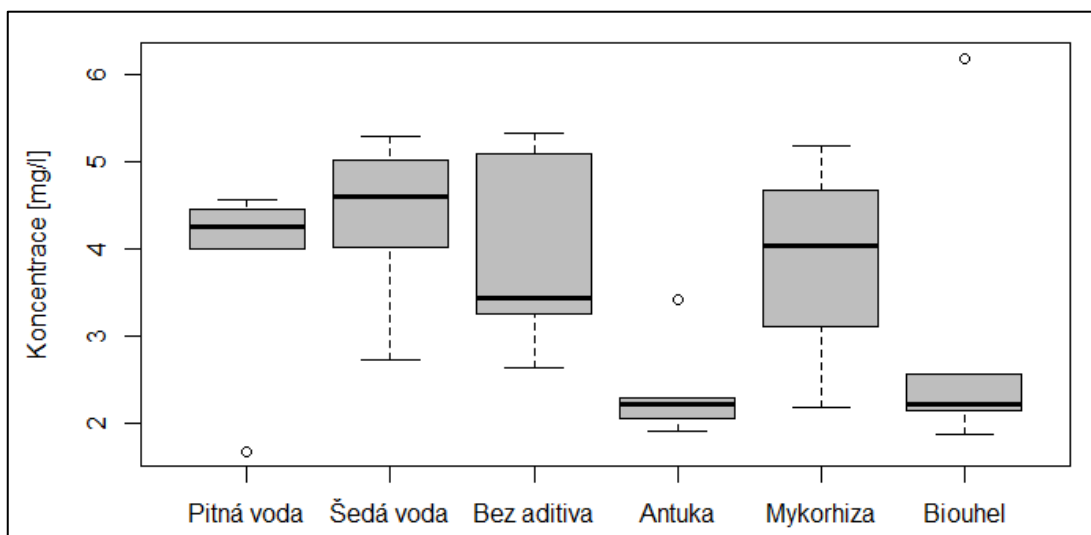
Graf 7.24: Průběh koncentrací celkového dusíku – 16. den



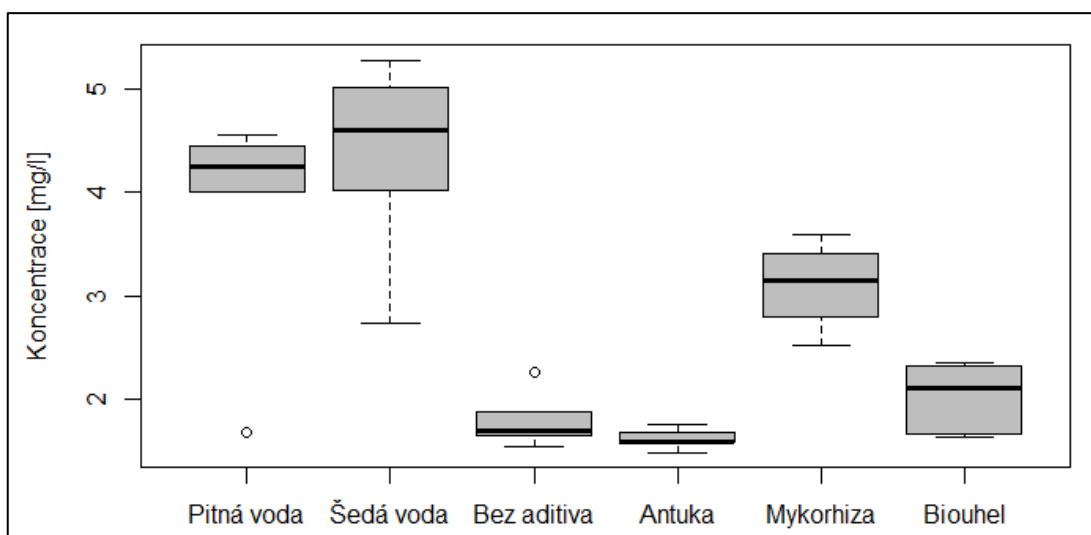
Graf 7.25: Průběh koncentrací celkového dusíku – 19. den



Graf 7.26: Průběh koncentrací celkového dusíku – 24. den



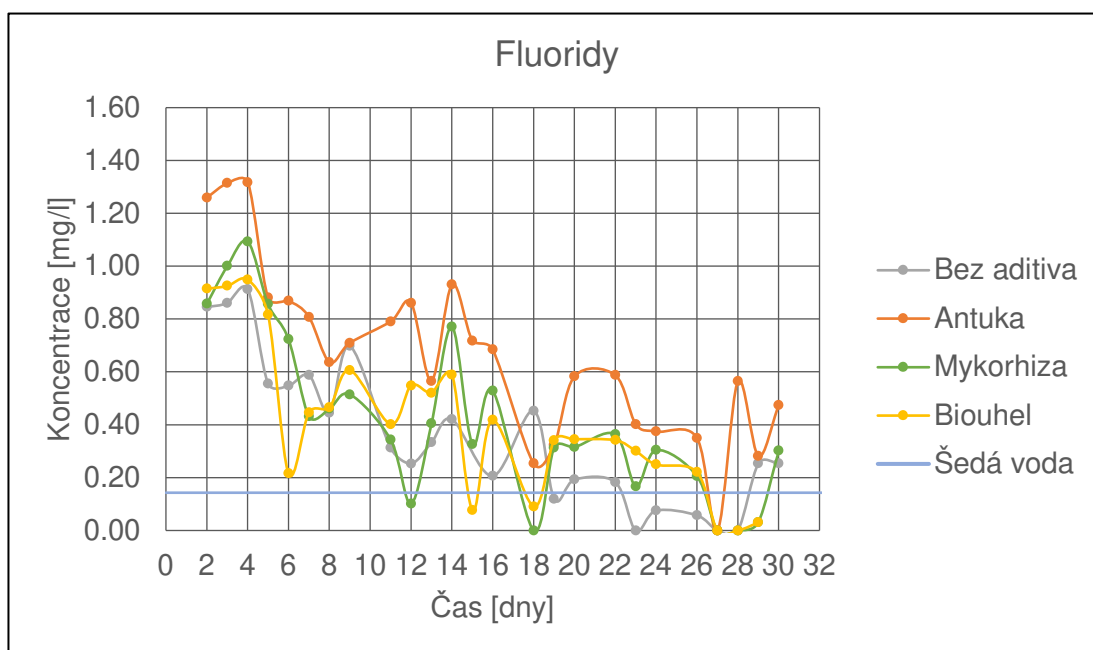
Graf 7.27: Průběh koncentrací celkového dusíku – 26. den



Graf 7.28: Průběh koncentrací celkového dusíku – 28. den

## 7.5 Fluoridy (F<sup>-</sup>)

Koncentrace fluoridů na výtoku filtrů nesla během experimentu klesající trend, vesměs však dosahovala vyšších hodnot proti šedé vodě ( $0,14 \pm 0,06$  mg/l). V průběhu celého experimentu koncentrace fluoridů na výtoku činila  $0,36 \pm 0,27$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku  $0,66 \pm 0,32$  mg/l, mykorhizu  $0,42 \pm 0,31$  mg/l a biouhel  $0,41 \pm 0,28$  mg/l. Graf 7.29 poté zobrazuje koncentrace fluoridů na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



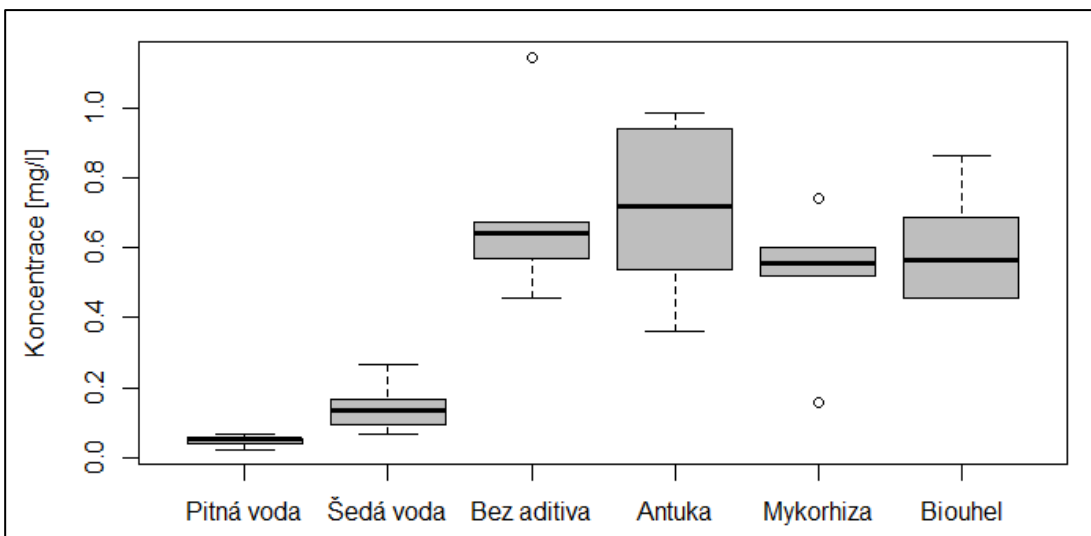
Graf 7.29: Průběh koncentrace fluoridů

Všechny skupiny na výtoku filtrů do 5. etapy (do 26. dne) vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace fluoridů nežli pitná voda, vyjma skupiny bez aditiva 16., 19. a 26. den. Všechny skupiny také během 1. a 4. etapy vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace nežli šedá voda, vyjma skupiny bez aditiva během 4. etapy. Skupina obsahující antuku signifikantně vyšší koncentraci fluoridů vykazovala i 28. den. Antuka také v průběhu 4. etapy vykazovala signifikantně vyšší koncentrace fluoridů vůči skupině bez aditiva, viz Tab. 7.7 a Graf 7.30 až Graf 7.35.

Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda																		
Bez aditiva	▲			▲			▲											
Antuka	▲	▲	▲	▲	▲		▲			▲		▲				▲		
Mykorhiza	▲	▲	▲	▲	▲		▲			▲								
Biouhel	▲	▲	▲	▲	▲		▲			▲								
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza																		
Biouhel																		

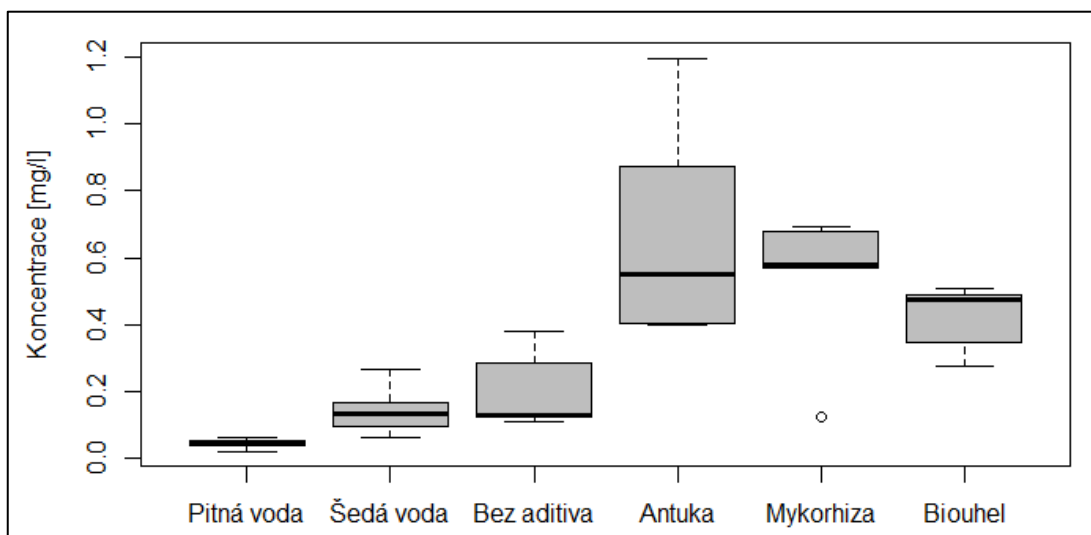
A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

Tab. 7.7: Signifikantní rozdíly v koncentracích fluoridů

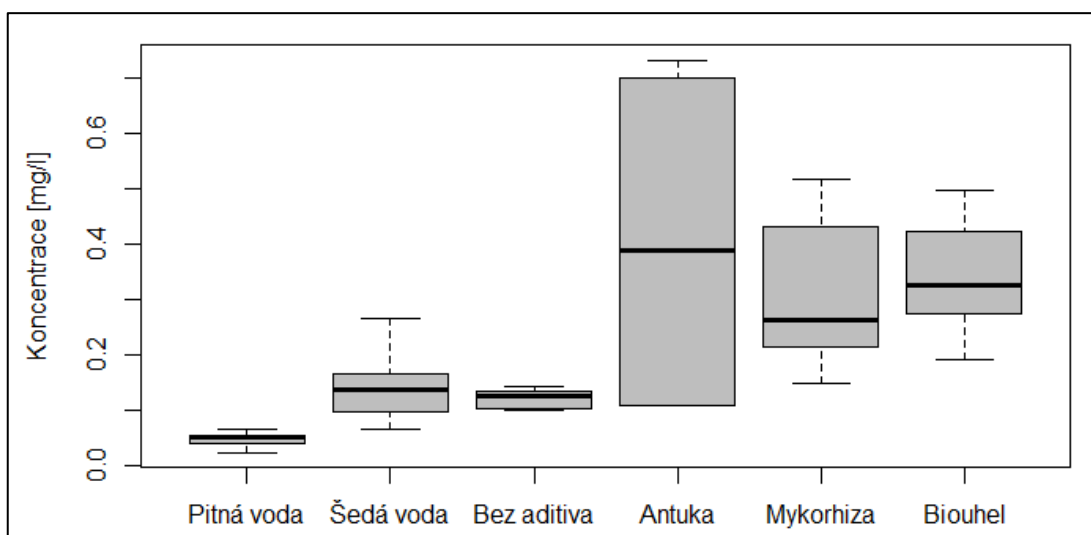


Graf 7.30: Průběh koncentrací fluoridů – 9. den

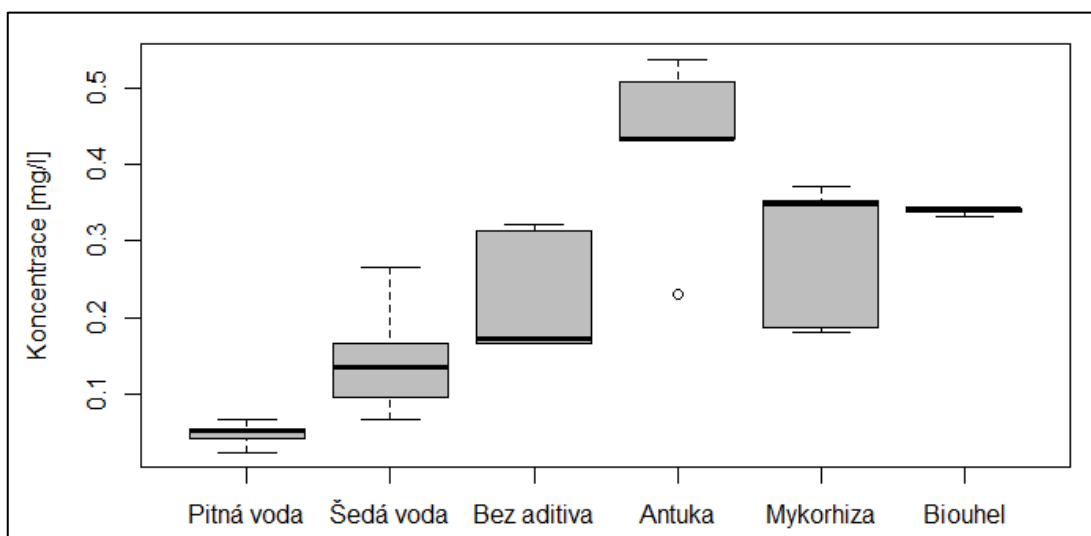




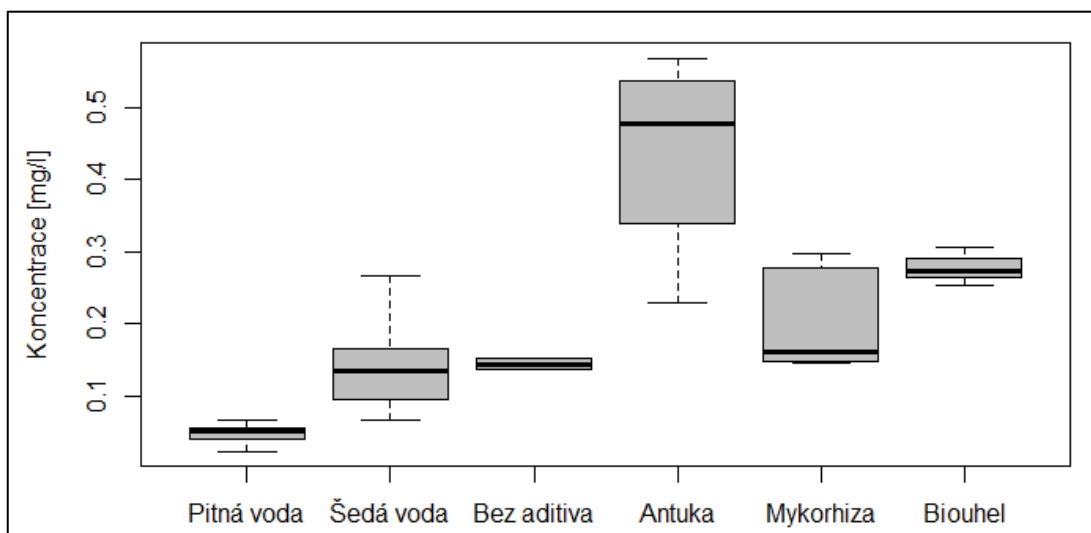
Graf 7.31: Průběh koncentrací fluoridů – 16. den



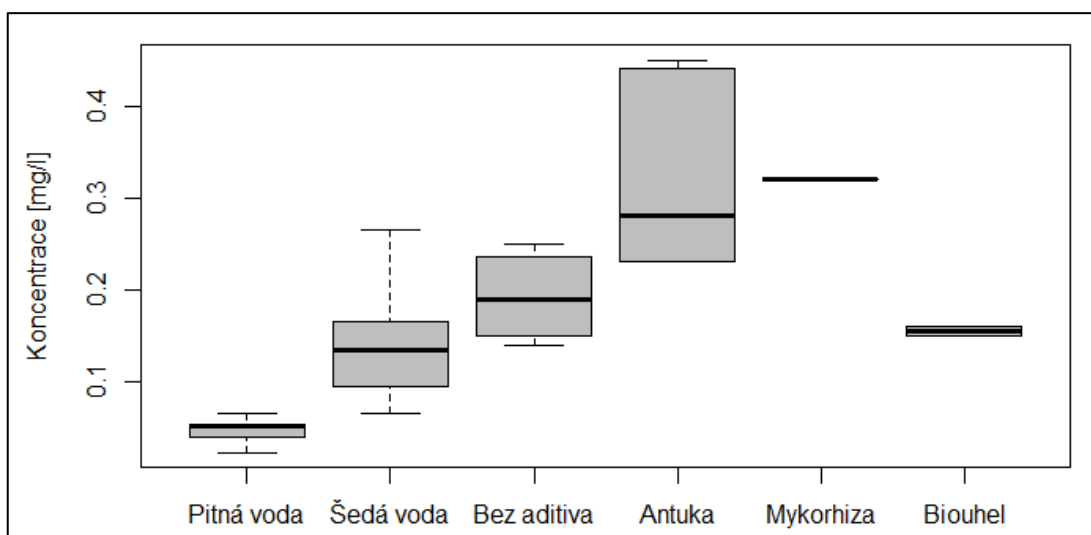
Graf 7.32: Průběh koncentrací fluoridů – 19. den



Graf 7.33: Průběh koncentrací fluoridů – 24. den



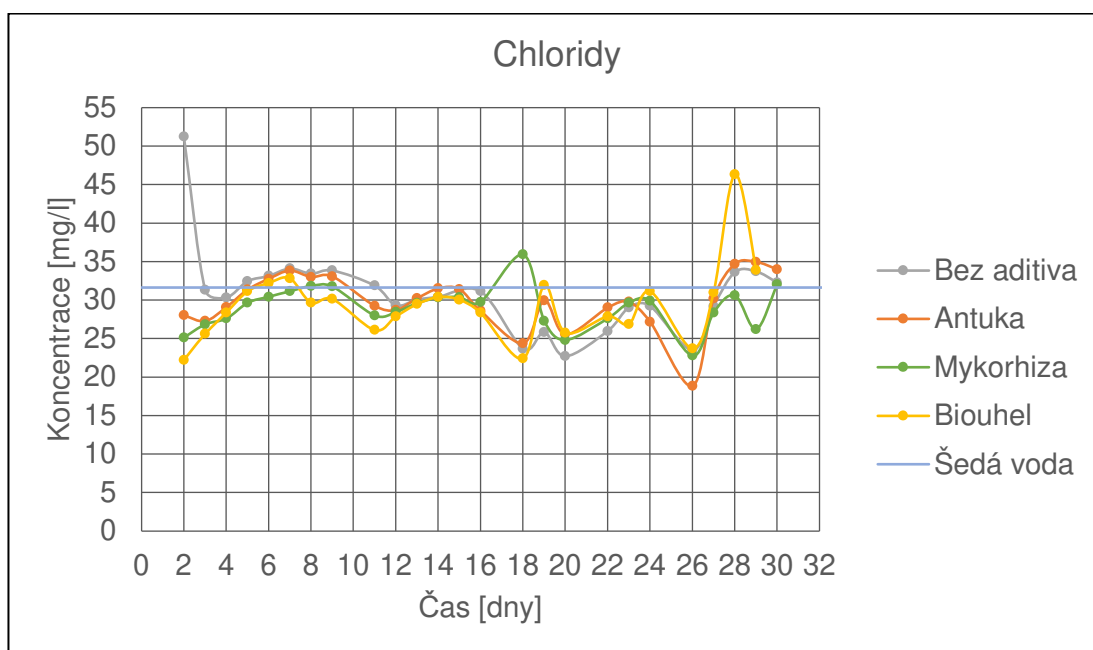
Graf 7.34: Průběh koncentrací fluoridů – 26. den



Graf 7.35: Průběh koncentrací fluoridů – 28. den

## 7.6 Chloridy (Cl<sup>-</sup>)

Koncentrace chloridů na výtoku filtrů nesla drobné výkyvy, avšak celkově se během celého experimentu přibližovala průměrné koncentraci v šedé vodě ( $31,63 \pm 0,88$  mg/l). V průběhu celého experimentu koncentrace chloridů na výtoku činila  $30,91 \pm 5,41$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku  $29,88 \pm 3,52$  mg/l, mykorhizu  $29,05 \pm 2,69$  mg/l a biouhel  $29,40 \pm 4,69$  mg/l. Graf 7.36 poté zobrazuje koncentrace chloridů na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



Graf 7.36: Průběh koncentrace chloridů

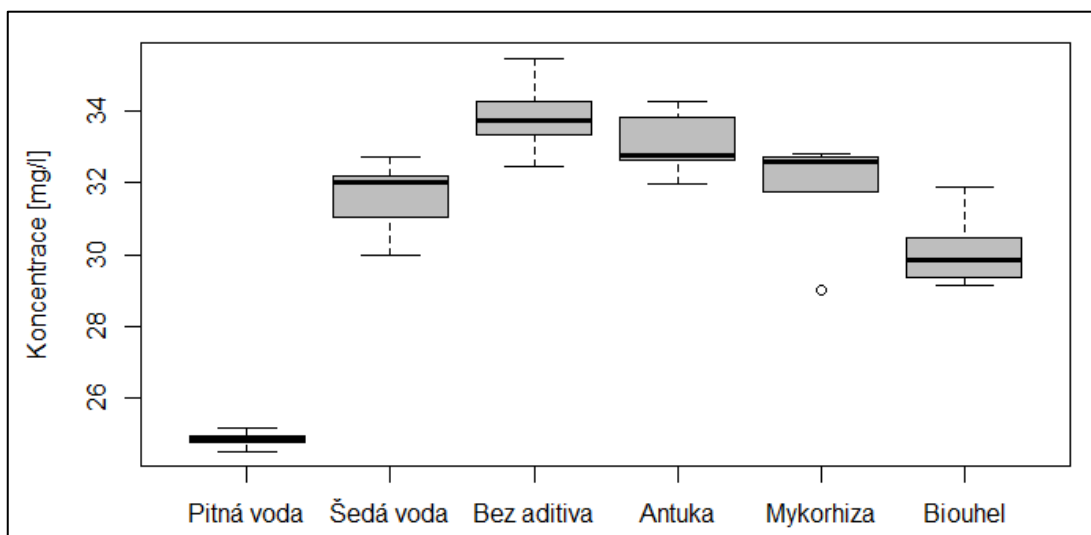
Šedá voda od 1. do 5. etapy (do 26. dne) vykazovala signifikantně vyšší koncentrace nežli pitná voda. Také během 1., 2. a 5. (28. den) etapy všechny skupiny filtrů na výtoku vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace vůči pitné vodě, avšak během 3., 4. a 5. (26. den) etapy signifikantní rozdíl nebyl nalezen, vyjma skupiny bez aditiva a skupiny obsahující mykorhizu v průběhu 4. etapy, kdy opět tyto skupiny vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace. V průběhu 1. etapy signifikantně vyšší koncentrace vůči šedé vodě vykazovala pouze skupina bez aditiva, přičemž v průběhu 3. etapy tato skupina jako jediná vykazovala signifikantně nižší koncentrace. Během 2. a 4. etapy signifikantně nižší koncentrace vykazovala skupina obsahující antuku či biouhel. V průběhu 5. etapy (26. den) vykazovaly všechny skupiny signifikantně nižší koncentrace nežli šedá voda, což se záhy změnilo a 28. den skupiny vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace, vyjma skupiny obsahující mykorhizu, která nevykazovala statisticky významný rozdíl. Signifikantní

rozdíly mezi skupinami filtrů byly nalezeny 4, a to během 1. etapy, kdy biouhel vykazoval nižší koncentrace vůči skupině obsahující antuku, během 1. a 2. etapy, kdy vykazoval nižší koncentrace vůči skupině bez aditiva. V poslední řadě skupina obsahující mykorhizu v průběhu 1. etapy vykazovala nižší koncentrace chloridů vůči skupině bez aditiva, viz Tab. 7.8. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.37 až Graf 7.42).

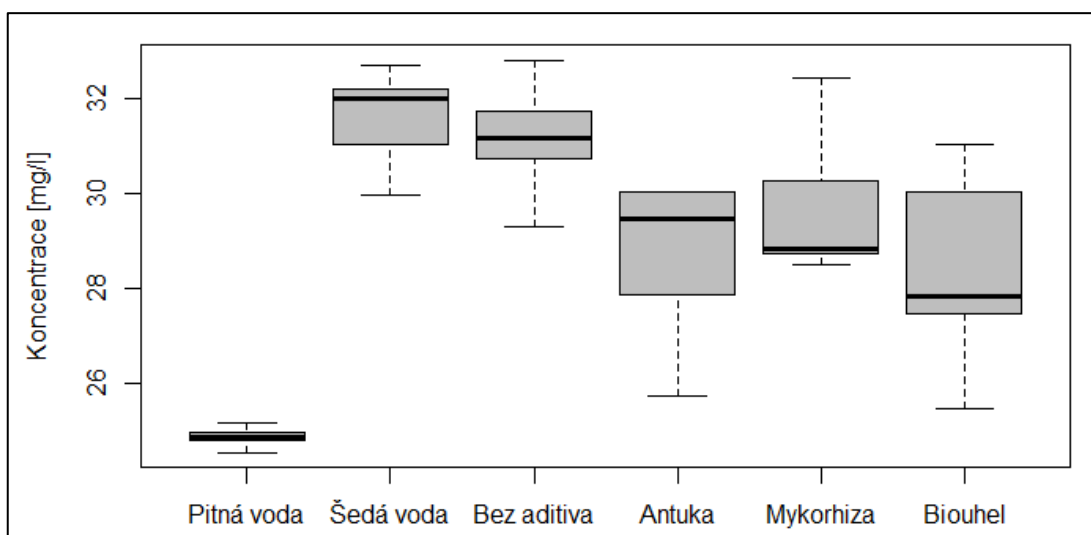
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda	▲	▲	▲	▲	▲	▲												
Bez aditiva	▲	▲		▲			▲		▼		▼	▼						
Antuka	▲	▲						▼		▼	▼	▼						
Mykorhiza	▲	▲		▲							▼	▼	▼					
Biouhel	▲	▲						▼		▼	▼	▼	▼	▼				
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza																		
Biouhel	▼																	

A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

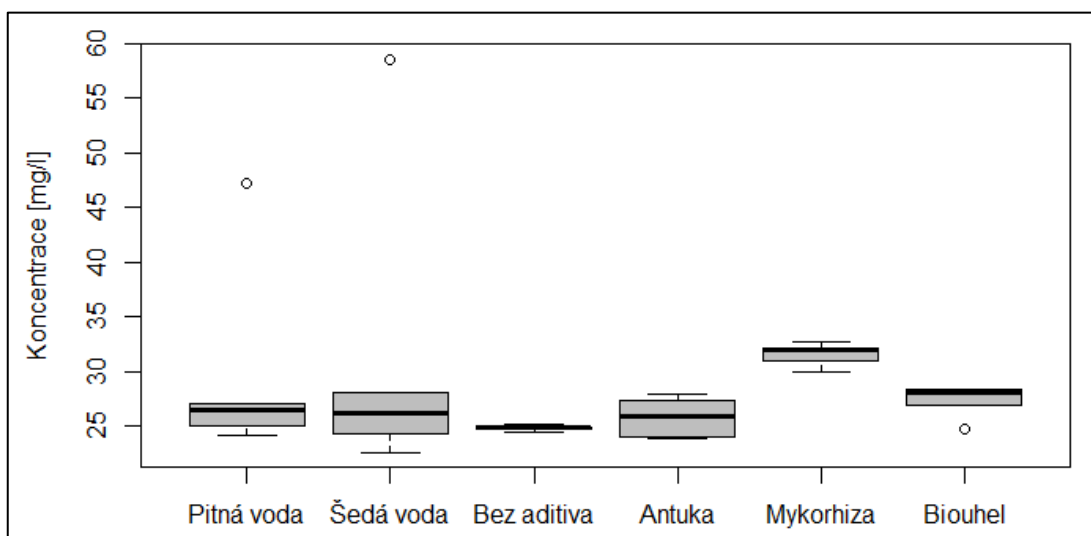
Tab. 7.8: Signifikantní rozdíly v koncentracích chloridů



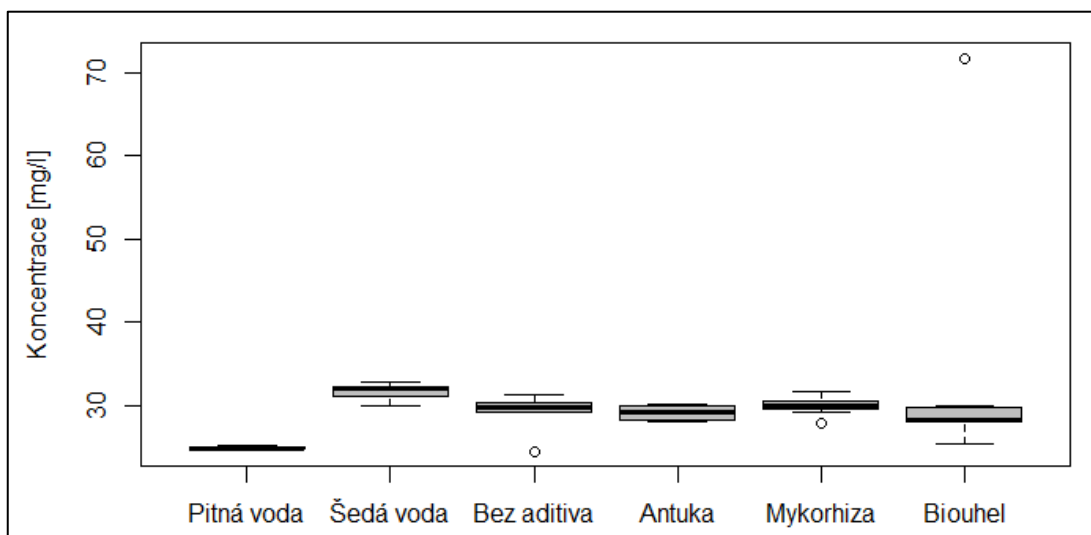
Graf 7.37: Průběh koncentrací chloridů – 9. den



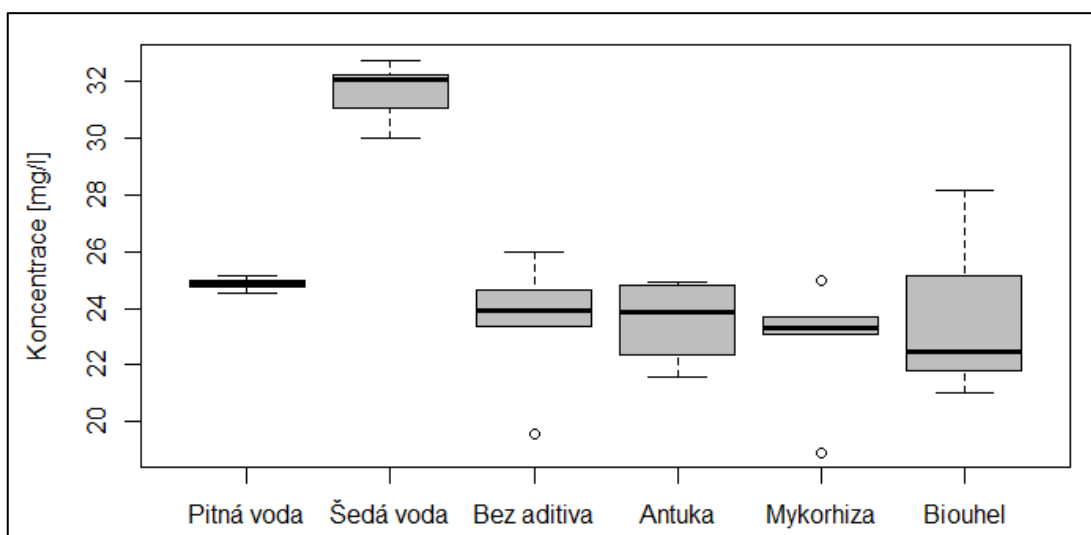
Graf 7.38: Průběh koncentrací chloridů – 16. den



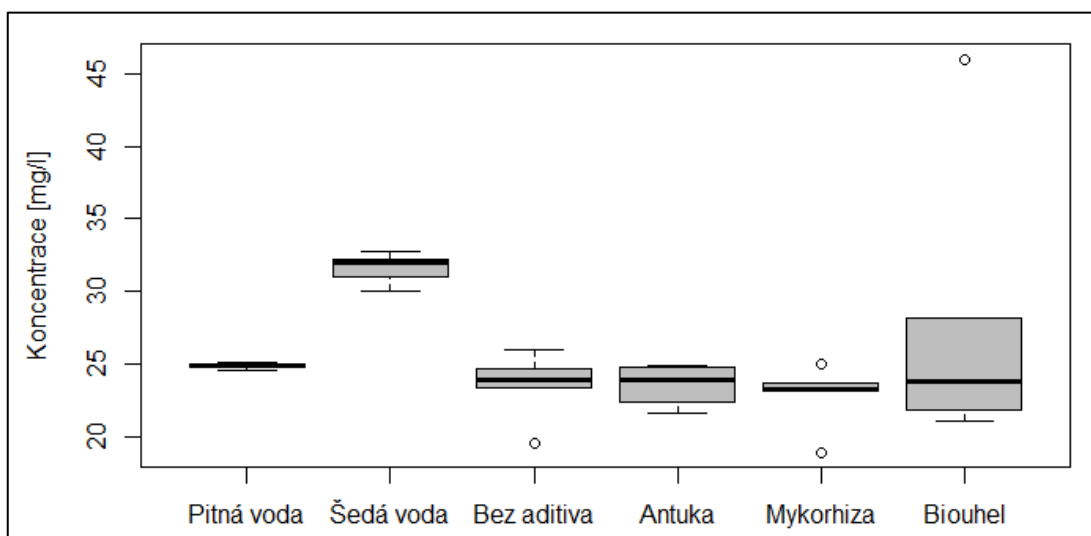
Graf 7.39: Průběh koncentrací chloridů – 19. den



Graf 7.40: Průběh koncentrací chloridů – 24. den



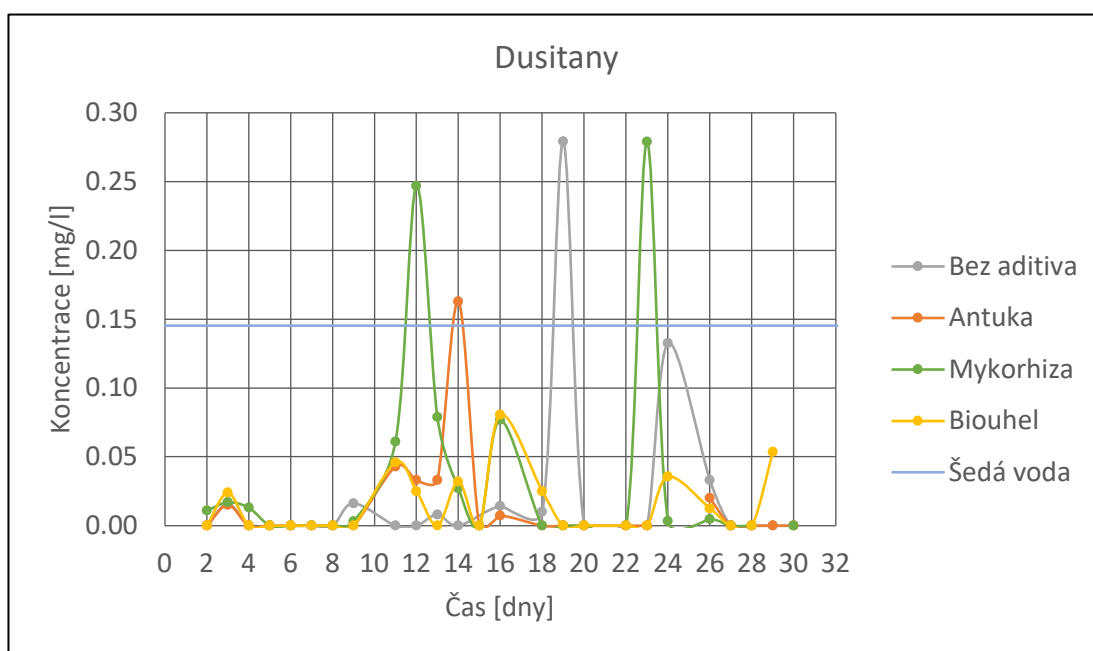
Graf 7.41: Průběh koncentrací chloridů – 26. den



Graf 7.42: Průběh koncentrací chloridů – 28. den

## 7.7 Dusitany ( $\text{NO}_2^-$ )

Koncentrace dusitanů na výtoku filtrů byla konstantně nižší nežli koncentrace v šedé vodě ( $0,15 \pm 0,22$  mg/l) a přibližovala se spodní detekovatelné hranici. Nejkonstantnějších výsledků dosahovala skupina filtrů s biouhlem. V průběhu celého experimentu koncentrace dusitanů na výtoku činila  $0,02 \pm 0,06$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku  $0,01 \pm 0,03$  mg/l, mykorhizu  $0,03 \pm 0,07$  mg/l a biouhel  $0,01 \pm 0,02$  mg/l. Graf 7.43 poté zobrazuje koncentrace dusitanů na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



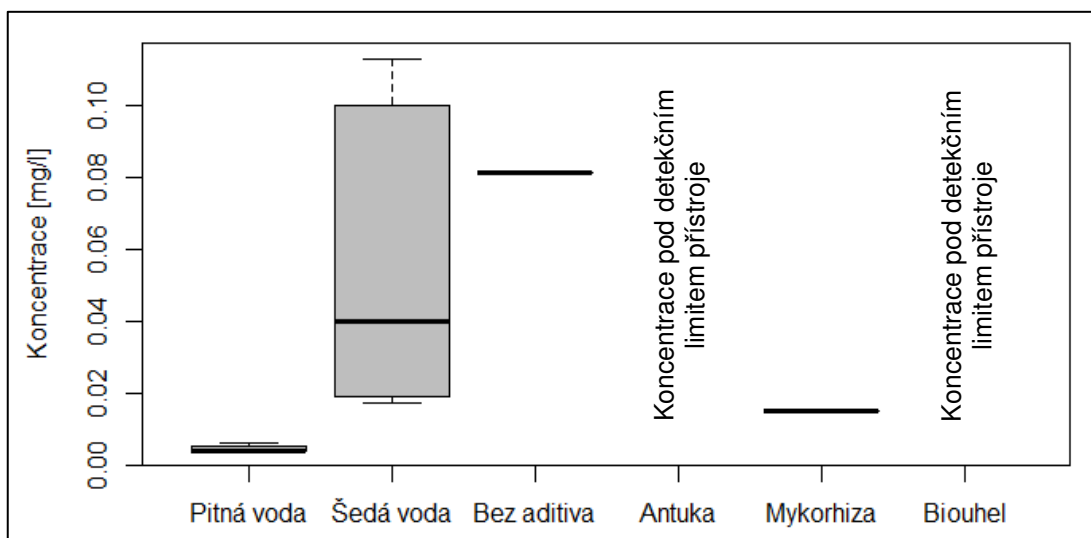
Graf 7.43: Průběh koncentrace dusitanů

Signifikantní rozdíl v případě koncentrací dusitanů byl nalezen pouze během 3. etapy, kdy skupina bez aditiva vykazovala signifikantně vyšší koncentrace vůči pitné i šedé vodě a také ostatním skupinám filtrů (antuka, mykorhiza i biouhel), viz Tab. 7.9. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.44 až Graf 7.49).

Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda																		
Bez aditiva			▲						▲									
Antuka															▼			
Mykorhiza															▼			
Biouhel															▼			
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza																		
Biouhel																		

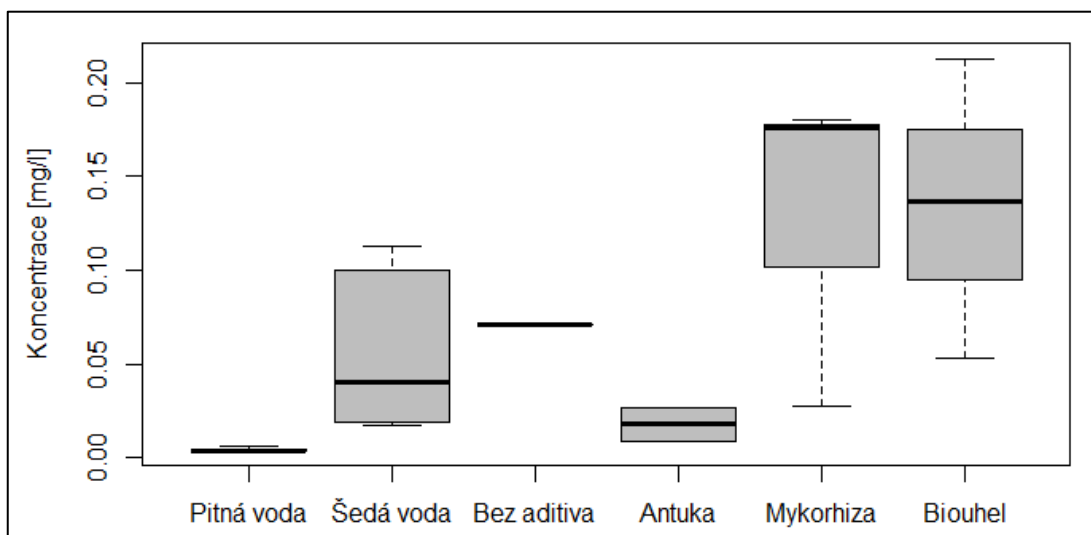
A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

Tab. 7.9: Signifikantní rozdíly v koncentracích dusitanů

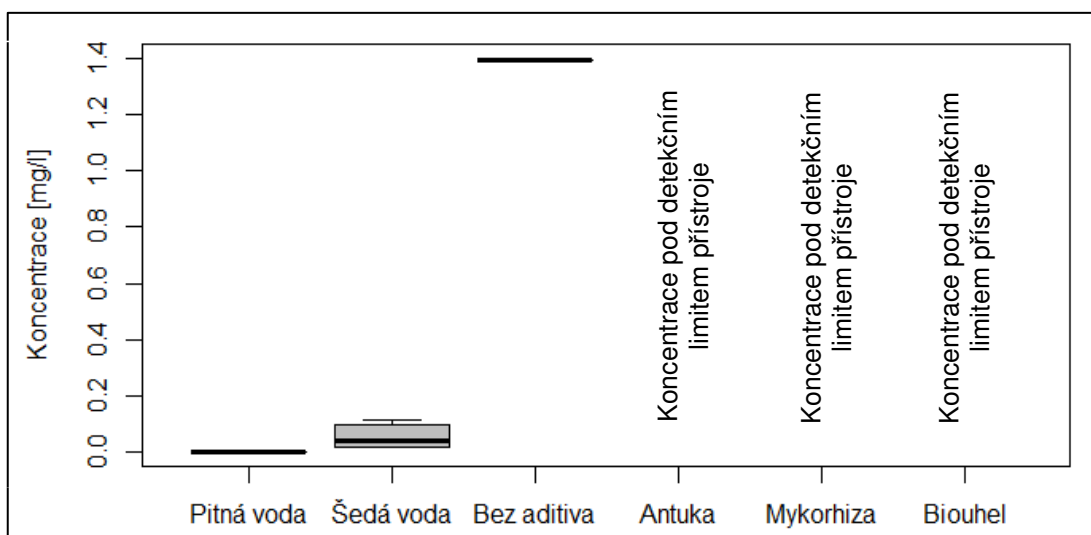


Graf 7.44: Průběh koncentrací dusitanů – 9. den

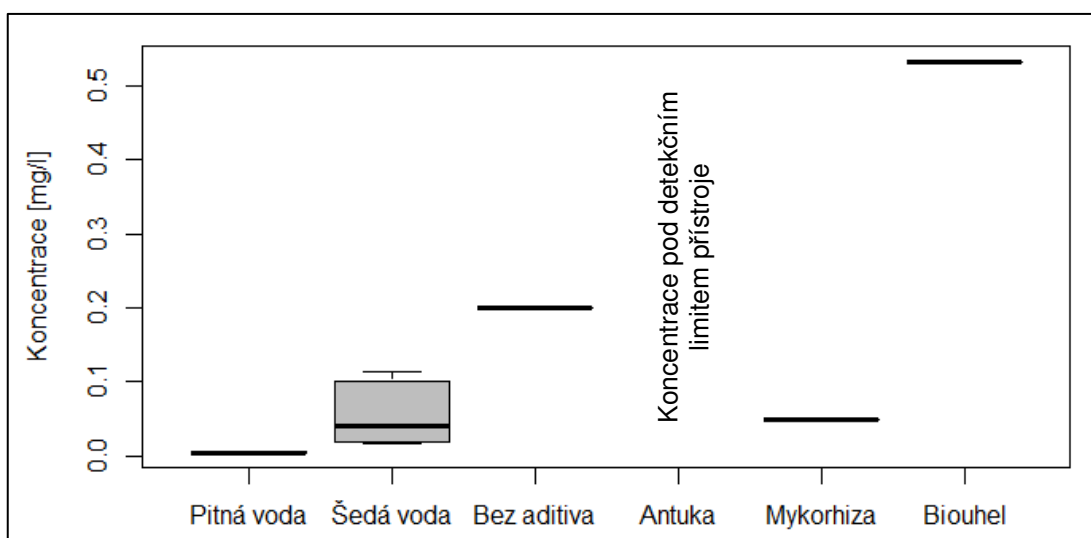




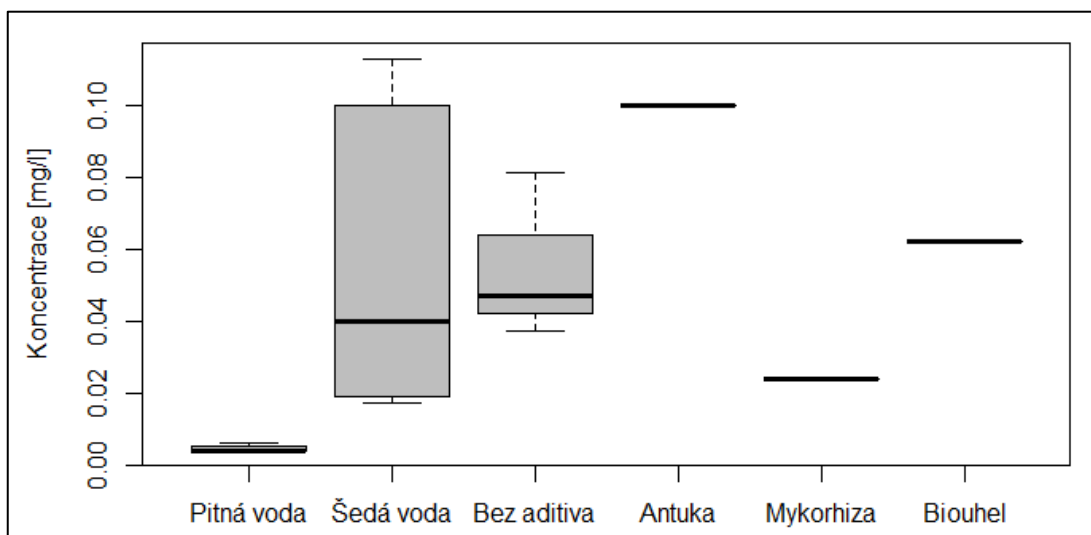
Graf 7.45: Průběh koncentrací dusitanů – 16. den



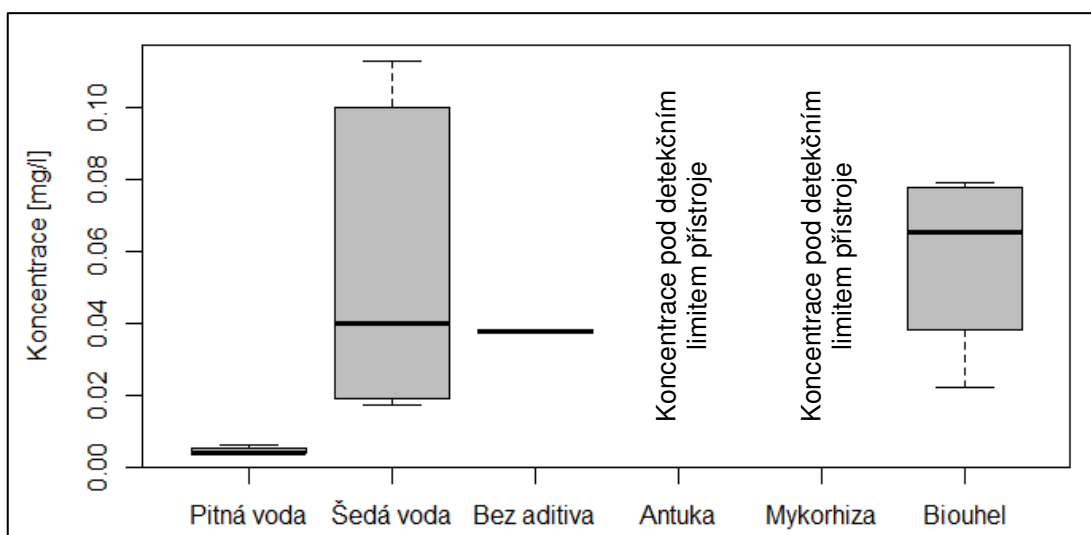
Graf 7.46: Průběh koncentrací dusitanů – 19. den



Graf 7.47: Průběh koncentrací dusitanů – 24. den



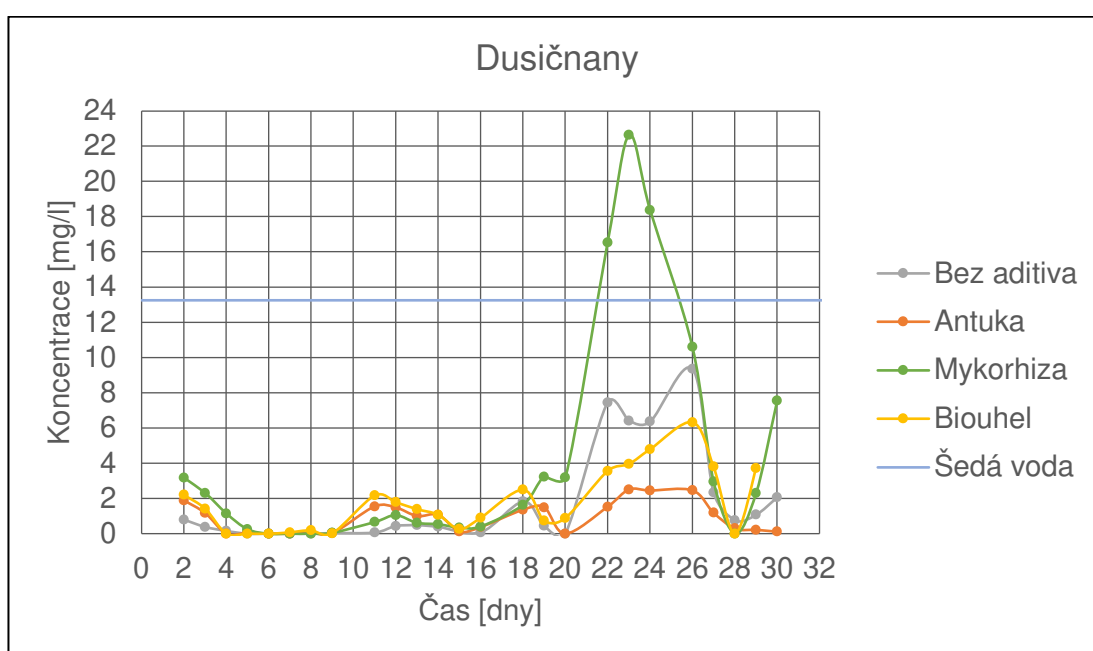
Graf 7.48: Průběh koncentrací dusitanů – 26. den



Graf 7.49: Průběh koncentrací dusitanů – 28. den

## 7.8 Dusičnany ( $\text{NO}_3^-$ )

Koncentrace dusičnanů na výtoku filtrů byla po celou dobu experimentu nižší nežli koncentrace v šedé vodě ( $13,26 \pm 5,09$  mg/l), vyjma skupiny filtrů obsahující mykorhizu, kde došlo k překročení této koncentrace mezi 21. a 25. dnem experimentu (v průběhu 4. a 5. etapy). V průběhu celého experimentu koncentrace dusičnanů na výtoku činila  $1,71 \pm 2,67$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku  $0,90 \pm 0,85$  mg/l, mykorhizu  $3,99 \pm 6,17$  mg/l a biouhel  $1,74 \pm 1,75$  mg/l. Graf 7.50 poté zobrazuje koncentrace dusičnanů na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



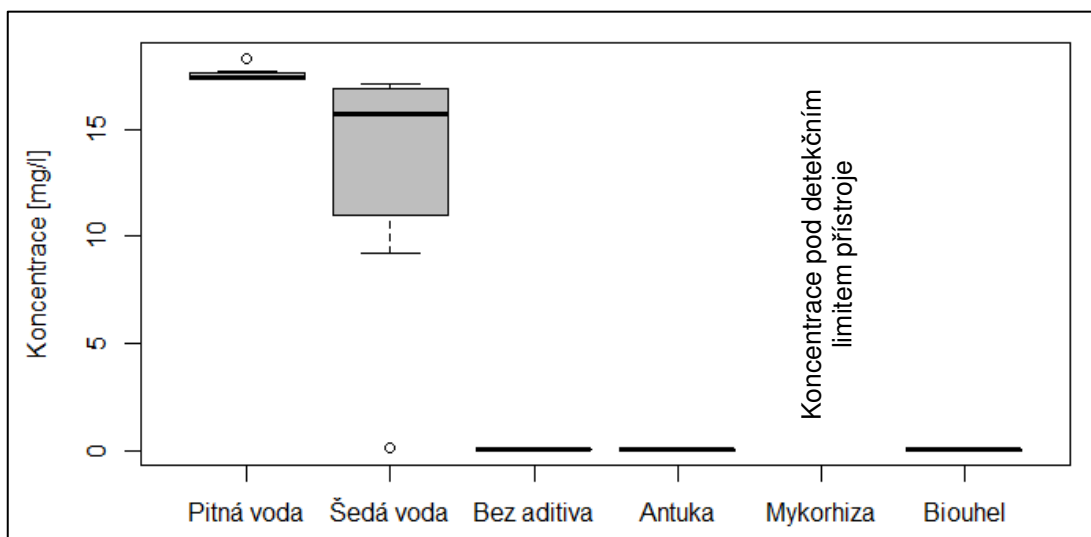
Graf 7.50: Průběh koncentrace dusičnanů

Všechny skupiny na výtoku filtrů během celého experimentu vykazovaly signifikantně nižší koncentrace dusičnanů nežli pitná voda, vyjma skupiny obsahující mykorhizu od 4. etapy do konce experimentu, kde signifikantní rozdíl nebyl nalezen. Vůči šedé vodě signifikantně nižší koncentrace vykazovala pouze skupina bez aditiva během 2., 3. a 5. (28. den) etapy a skupina obsahující antuku během 4. a 5. (26. den) etapy, u ostatních skupin statisticky významný rozdíl nebyl nalezen. Nadále během 4. etapy skupina bez aditiva a skupina obsahující antuku či biouhel, vykazovaly signifikantně nižší koncentrace dusičnanů vůči skupině obsahující mykorhizu, viz Tab. 7.10. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.51 až Graf 7.56).

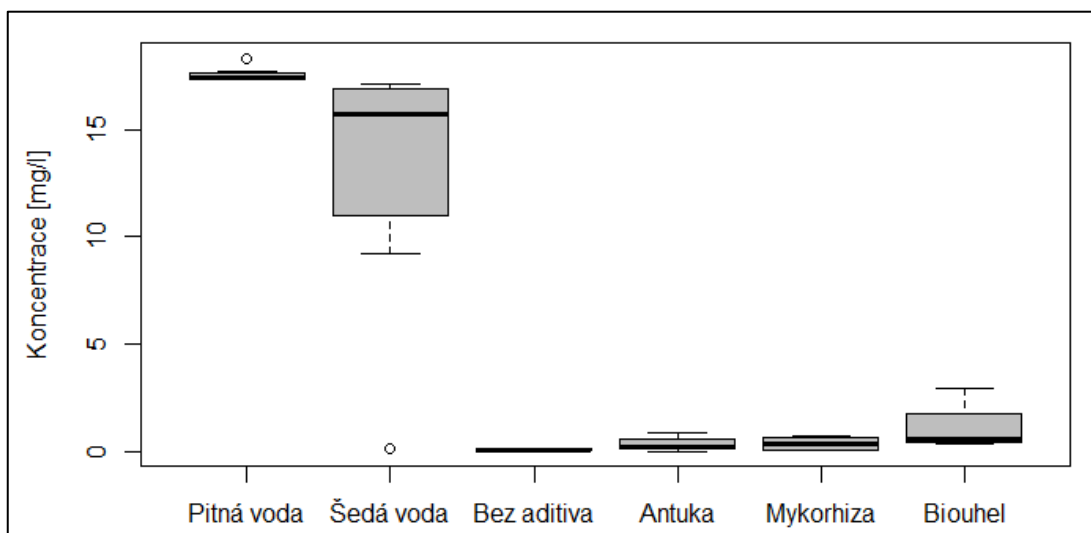
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda																		
Bez aditiva	▼	▼	▼	▼	▼	▼		▼	▼			▼						
Antuka	▼	▼	▼	▼	▼	▼				▼	▼							
Mykorhiza	▼	▼	▼													▲		
Biouhel	▼	▼	▼	▼	▼	▼												
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza				▲														
Biouhel										▼								

A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

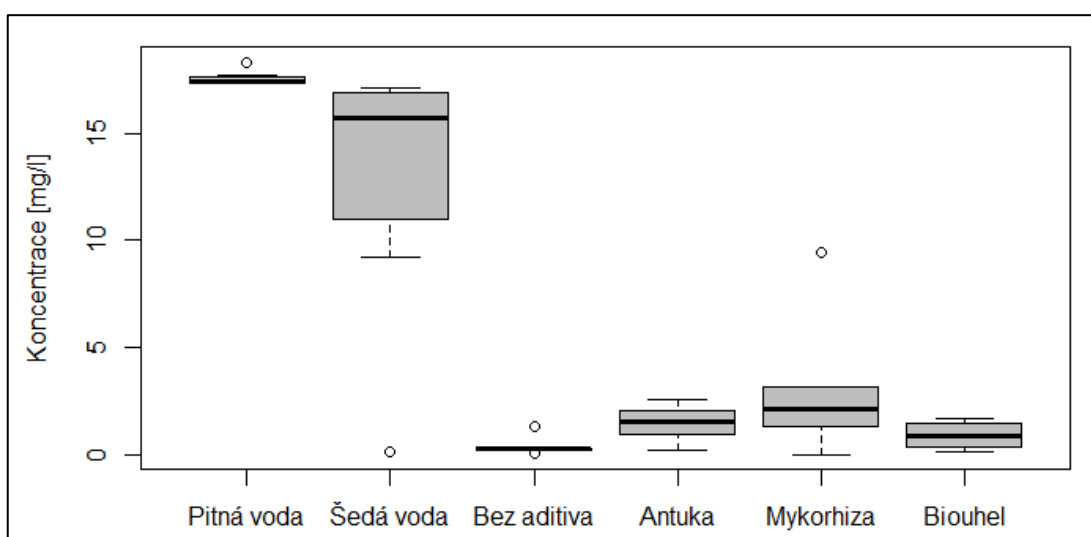
Tab. 7.10: Signifikantní rozdíly v koncentracích dusičnanů



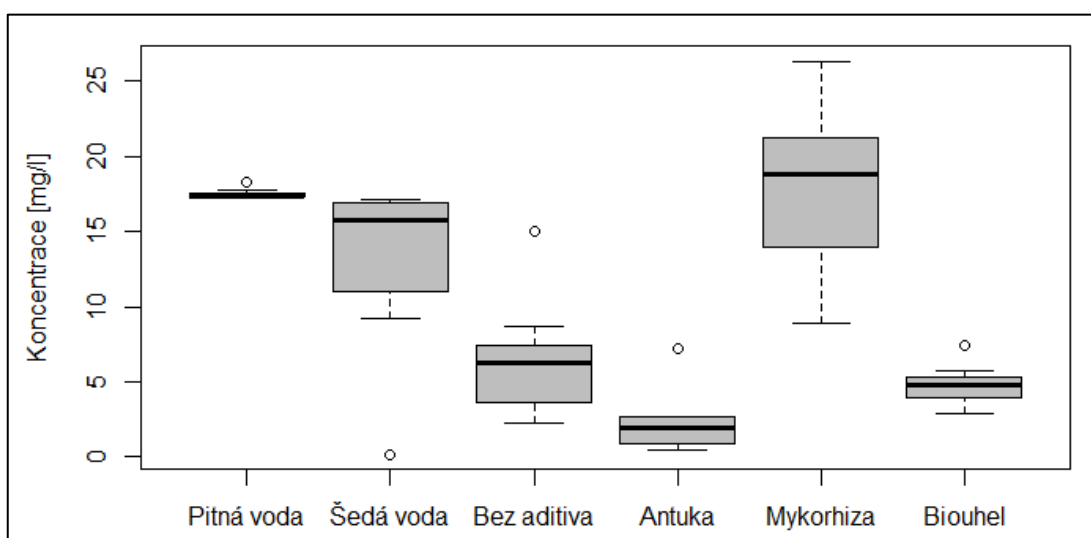
Graf 7.51: Průběh koncentrací dusičnanů – 9. den



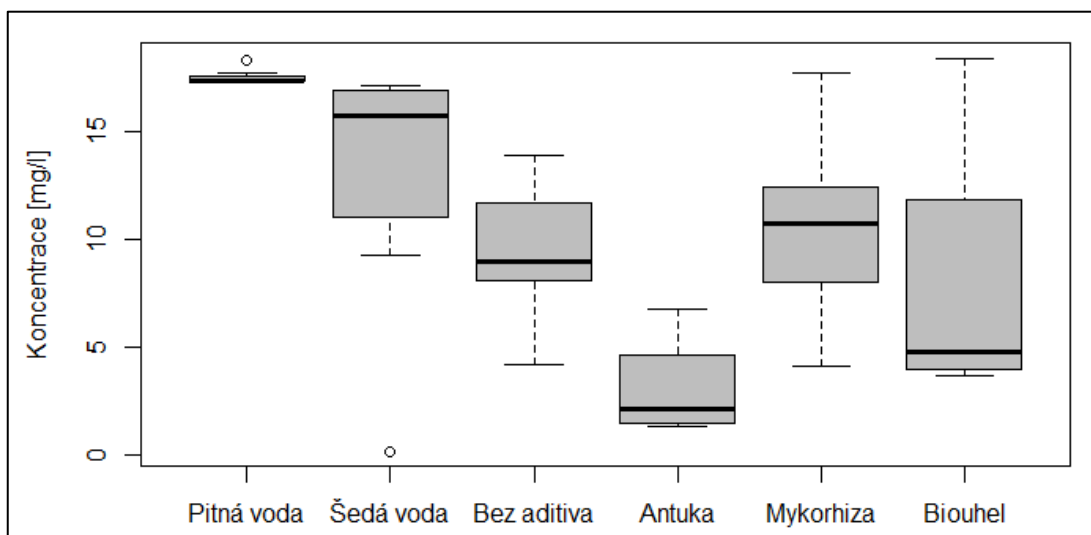
Graf 7.52: Průběh koncentrací dusičnanů – 16. den



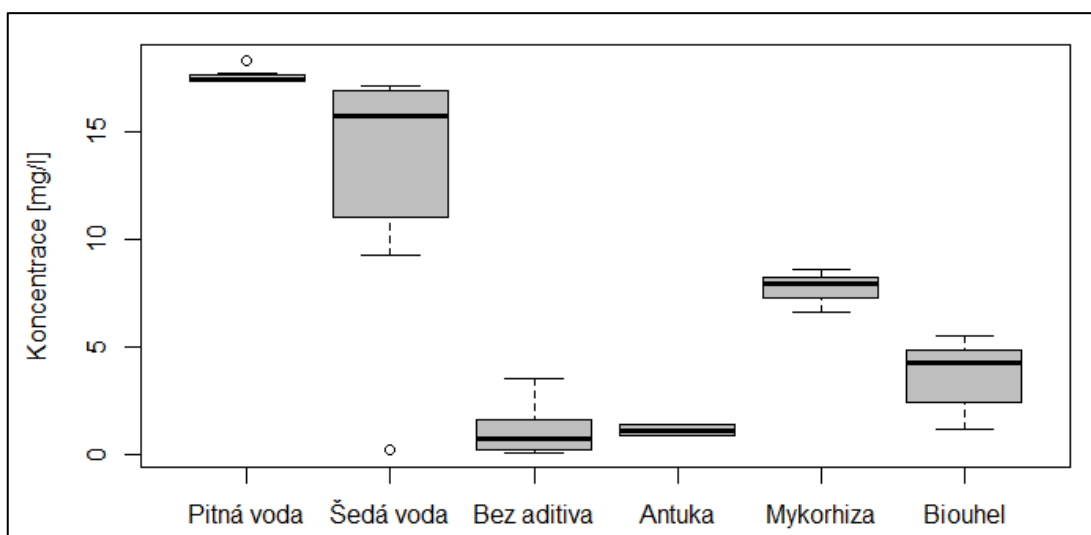
Graf 7.53: Průběh koncentrací dusičnanů – 19. den



Graf 7.54: Průběh koncentrací dusičnanů – 24. den



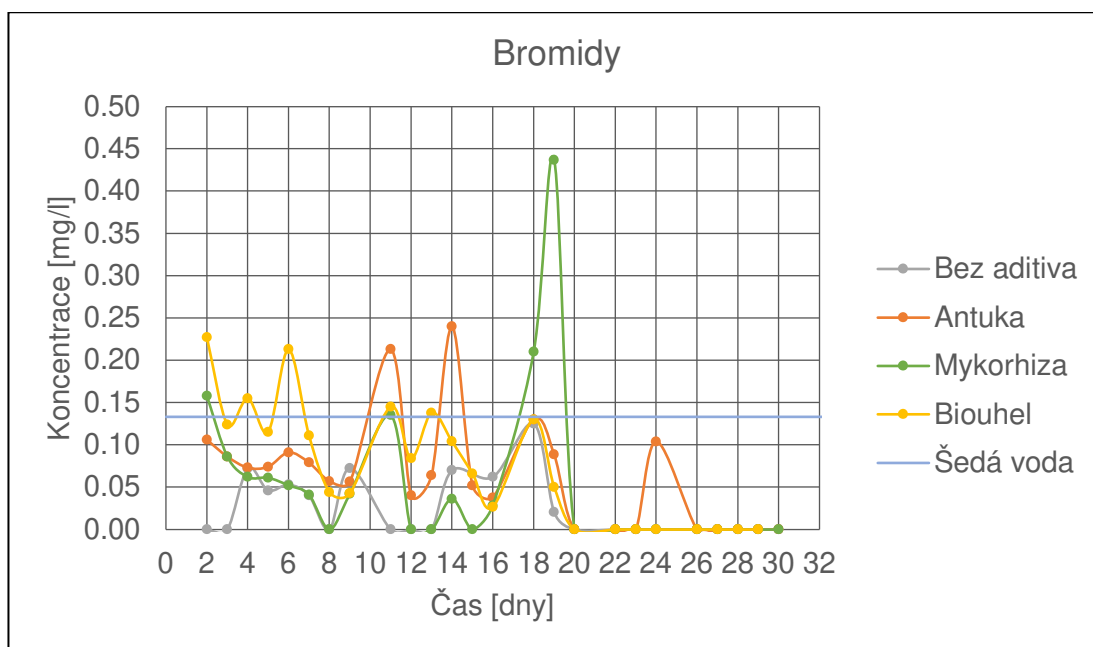
Graf 7.55: Průběh koncentrací dusičnanů – 26. den



Graf 7.56: Průběh koncentrací dusičnanů – 28. den

## 7.9 Bromidy (Br)

Koncentrace bromidů na výtoku filtrů během experimentu nesla kolísavý charakter a všechny skupiny, vyjma skupiny bez aditiva, v průběhu experimentu dosáhly při výkyvu dokonce i vyšších koncentrací nežli obsahuje samotná šedá voda ( $0,13 \pm 0,03$  mg/l), avšak průměrná koncentrace za celé období poté byla pro všechny skupiny filtrů nižší. Nejkonstantnějších výsledků dosahovala skupina bez aditiva. V průběhu celého experimentu koncentrace bromidů na výtoku činila  $0,02 \pm 0,03$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku  $0,06 \pm 0,06$  mg/l, mykorhizu  $0,05 \pm 0,10$  mg/l a biouhel  $0,07 \pm 0,07$  mg/l. Graf 7.57 poté zobrazuje koncentrace bromidů na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



Graf 7.57: Průběh koncentrace bromidů

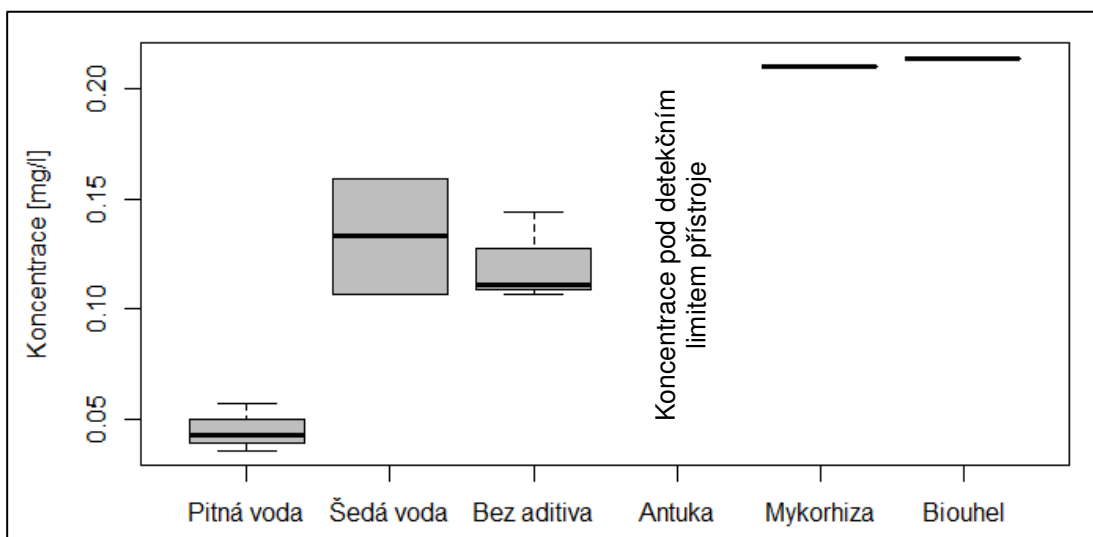
V průběhu 1. etapy šedá voda a skupiny na výtoku filtrů, vyjma skupiny obsahující antuku (jejíž koncentrace byly pod detekční mezí bromidů), vykazovaly signifikantně vyšší koncentrace bromidů nežli pitná voda. Signifikantně vyšší koncentrace vykazovala šedá voda i během 4. a 5. etapy. Signifikantně nižší koncentrace vůči šedé vodě v průběhu 1. etapy vykazovala pouze skupina obsahující antuku, během 2. a 3. etapy žádná skupina a od 4. etapy do konce experimentu všechny skupiny. V průběhu 1. etapy antuka či skupina bez aditiva, vykazovaly signifikantně nižší koncentrace nežli skupina obsahující mykorhizu či biouhel, a antuka dokonce vykazovala signifikantně nižší koncentrace bromidů nežli skupina

bez aditiva, viz Tab. 7.11. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.58 až Graf 7.62).

Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda					Šedá voda					Bez aditiva							
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda	▲			▲	▲	▲												
Bez aditiva	▲									▼	▼	▼						
Antuka							▼			▼	▼	▼	▼					
Mykorhiza	▲									▼	▼	▼	▲					
Biouhel	▲									▼	▼	▼	▲					
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl										Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05							
	Antuka					Mykorhiza												
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza	▲																	
Biouhel	▲																	

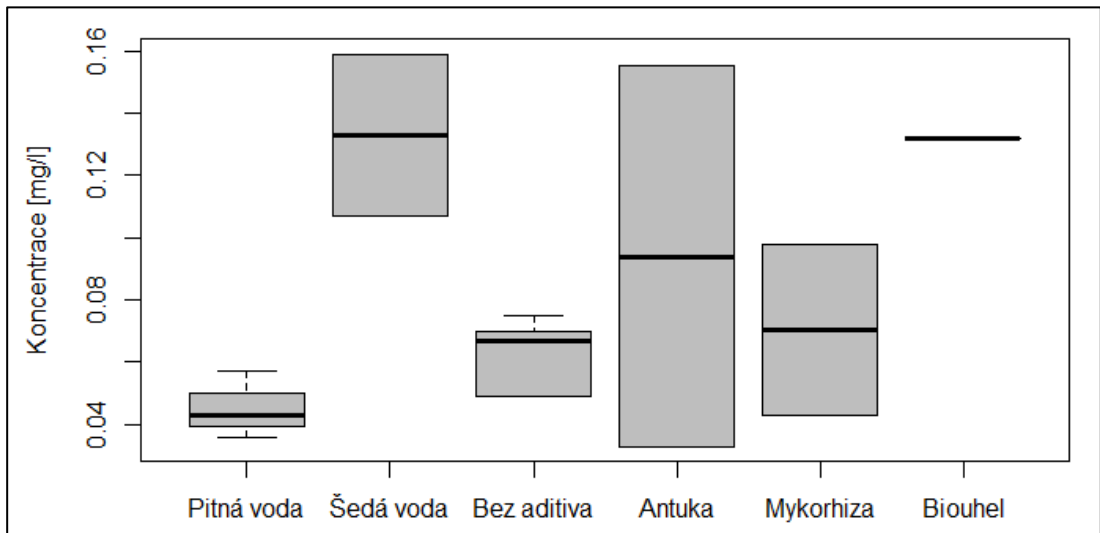
A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

Tab. 7.11: Signifikantní rozdíly v koncentracích bromidů

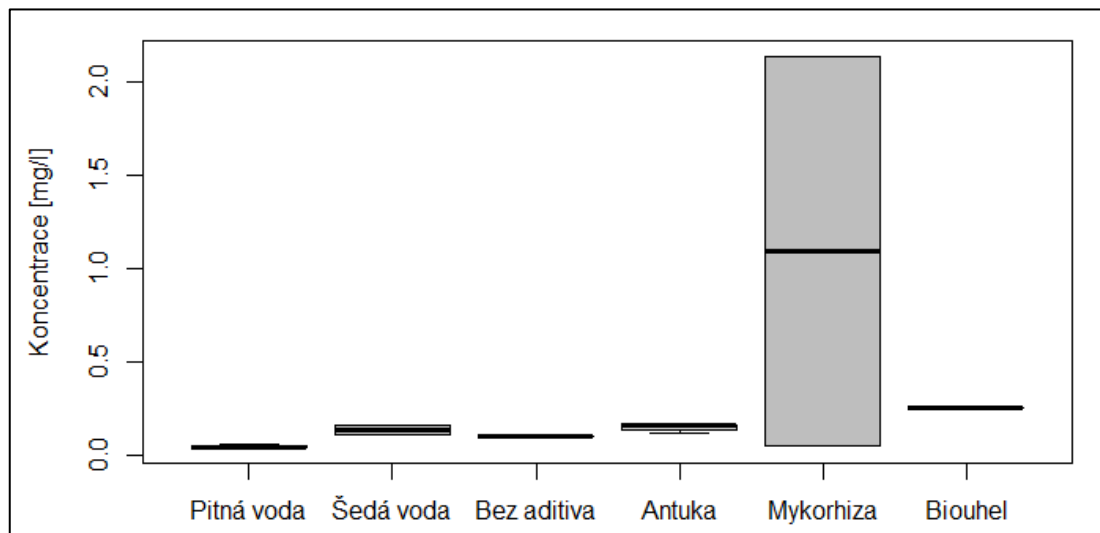


Graf 7.58: Průběh koncentrací bromidů – 9. den

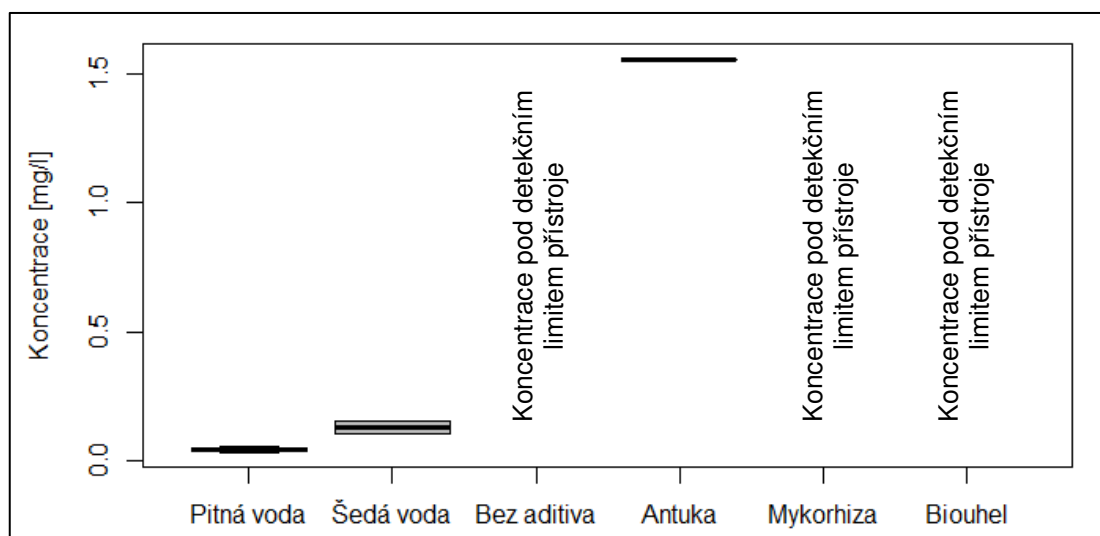




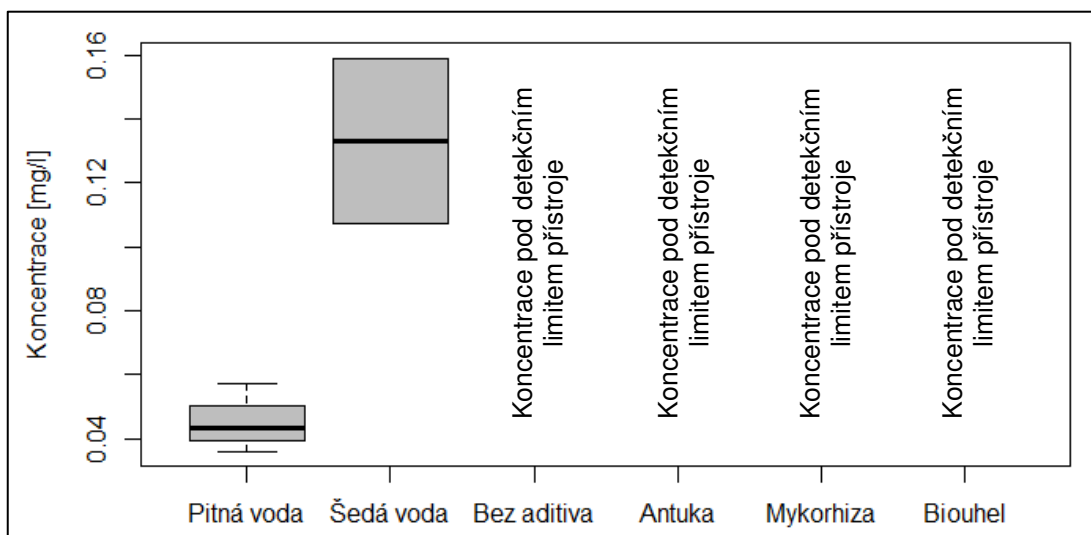
Graf 7.59: Průběh koncentrací bromidů – 16. den



Graf 7.60: Průběh koncentrací bromidů – 19. den



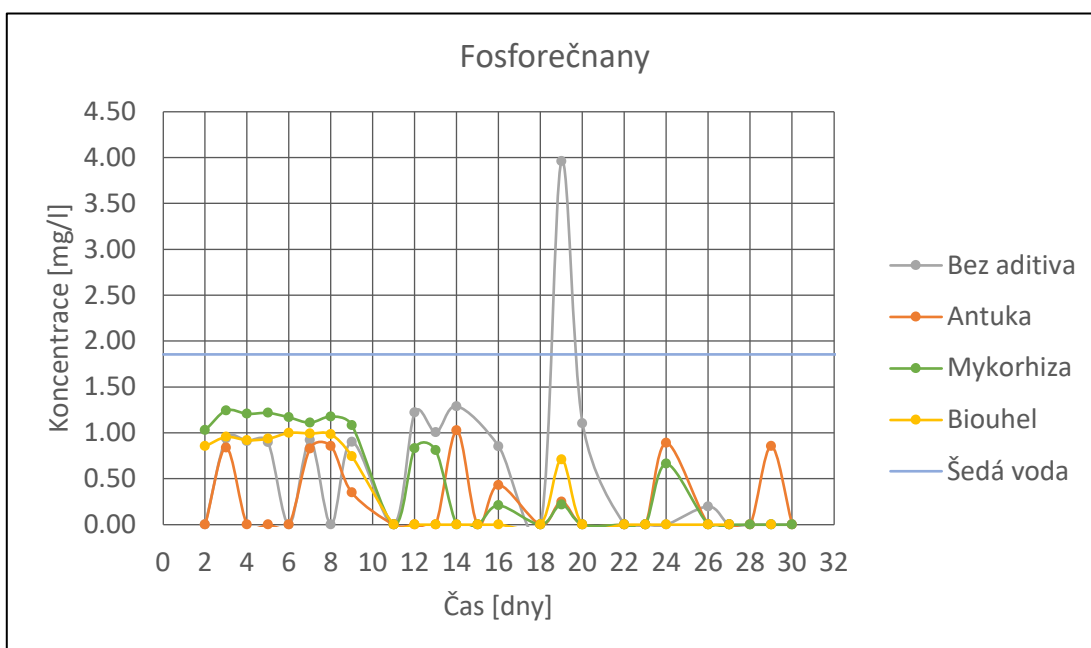
Graf 7.61: Průběh koncentrací bromidů – 24. den



Graf 7.62: Průběh koncentrací bromidů – 26. a 28. den

### 7.10 Fosforečnaný ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Koncentrace fosforečnanů na výtoku všech filtrů během experimentu konstantně dosahovala nižších hodnot, nežli šedá voda ( $1,85 \pm 0,12$  mg/l), viz graf 7.63. Výjimka nastala pouze 19. den ve skupině filtrů bez aditiva, kde došlo k výrazné odchylce od standardu a koncentrace fosforečnanů na výtoku filtrů překročila průměrnou koncentraci v šedé vodě. V průběhu celého experimentu koncentrace fosforečnanů na výtoku činila  $0,59 \pm 0,86$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro antuku  $0,25 \pm 0,37$  mg/l, mykorhizu  $0,48 \pm 0,52$  mg/l a biouhel  $0,46 \pm 0,69$  mg/l.



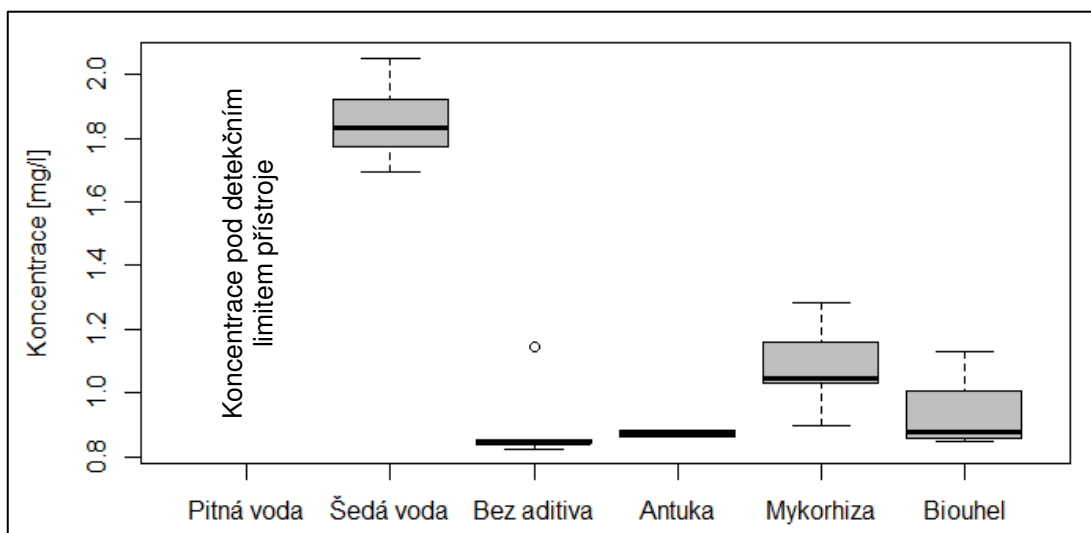
Graf 7.63: Průběh koncentrace fosforečnanů

Šedá voda vykazovala během 2., 4. a 5. etapy signifikantně vyšší koncentrace fosforečnanů nežli pitná voda (koncentrace v pitné vodě se nacházela pod detekčním limitem), přičemž během 2. etapy signifikantně vyšší koncentrace vykazovaly i skupiny filtrů, vyjma skupiny obsahující biouhel. Signifikantně nižší koncentrace vůči šedé vodě během 1. etapy vykazovala pouze skupina bez aditiva, zatímco během 2., 4. a 5. etapy nižší koncentrace vykazovaly všechny skupiny filtrů (během 4. a 5. etapy koncentrace fosforečnanů na výtoku filtrů byly pod detekčním limitem), viz Tab. 7.12. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.64 až Graf 7.69).

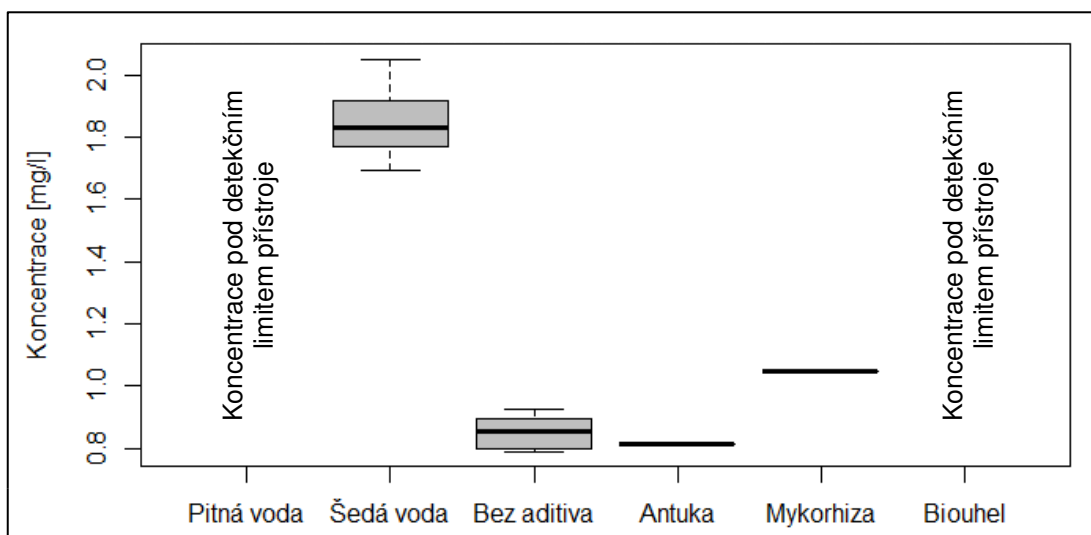
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda		▲		▲	▲	▲												
Bez aditiva		▲					▼	▼		▼	▼	▼						
Antuka		▲						▼		▼	▼	▼						
Mykorhiza		▲						▼		▼	▼	▼						
Biouhel								▼		▼	▼	▼						
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Antuka						Mykorhiza						Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza																		
Biouhel																		

A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

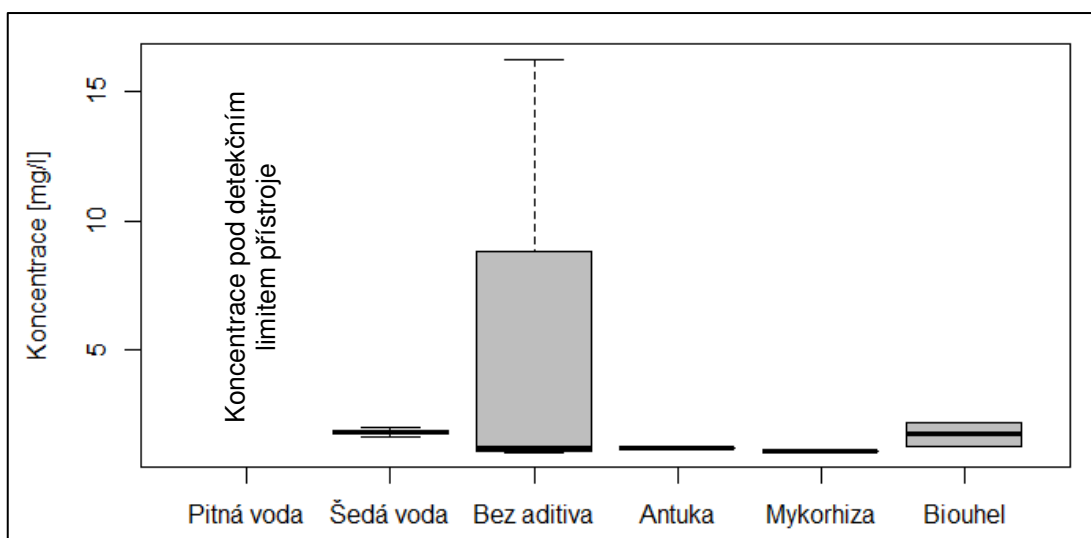
Tab. 7.12: Signifikantní rozdíly v koncentracích fosforečnanů



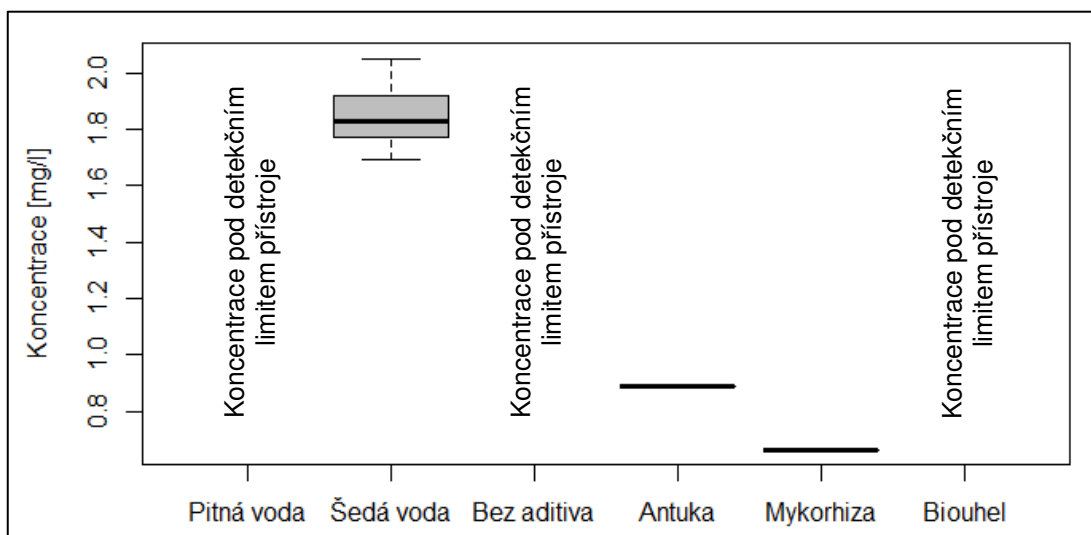
Graf 7.64: Průběh koncentrací fosforečnanů – 9. den



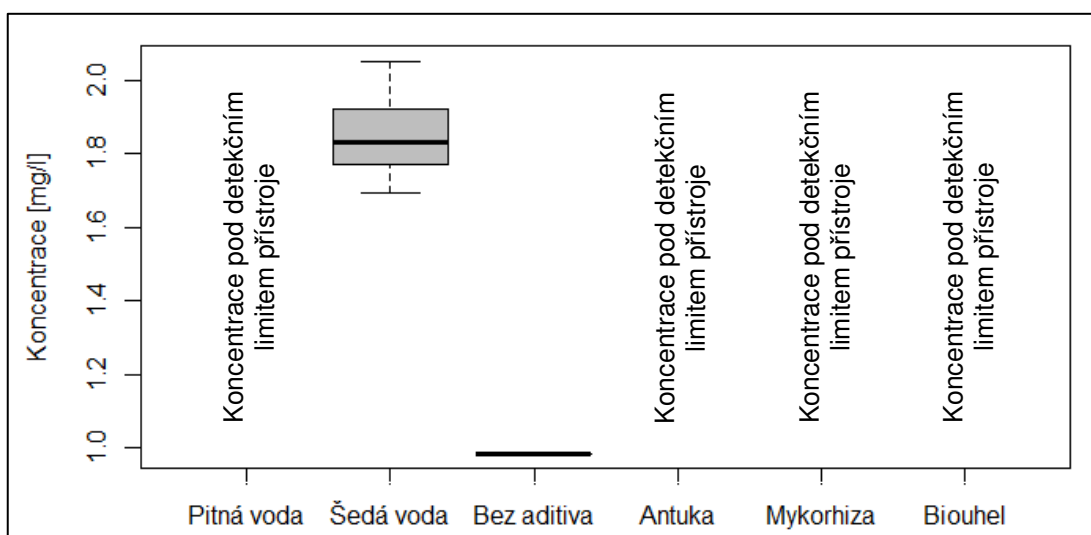
Graf 7.65: Průběh koncentrací fosforečnanů – 16. den



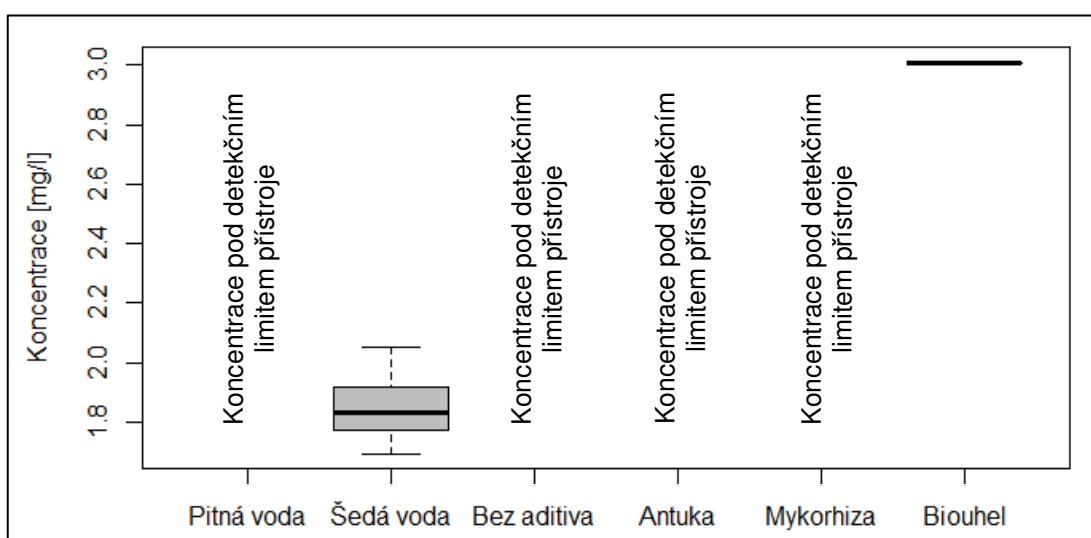
Graf 7.66: Průběh koncentrací fosforečnanů – 19. den



Graf 7.67: Průběh koncentrací fosforečnanů – 24. den



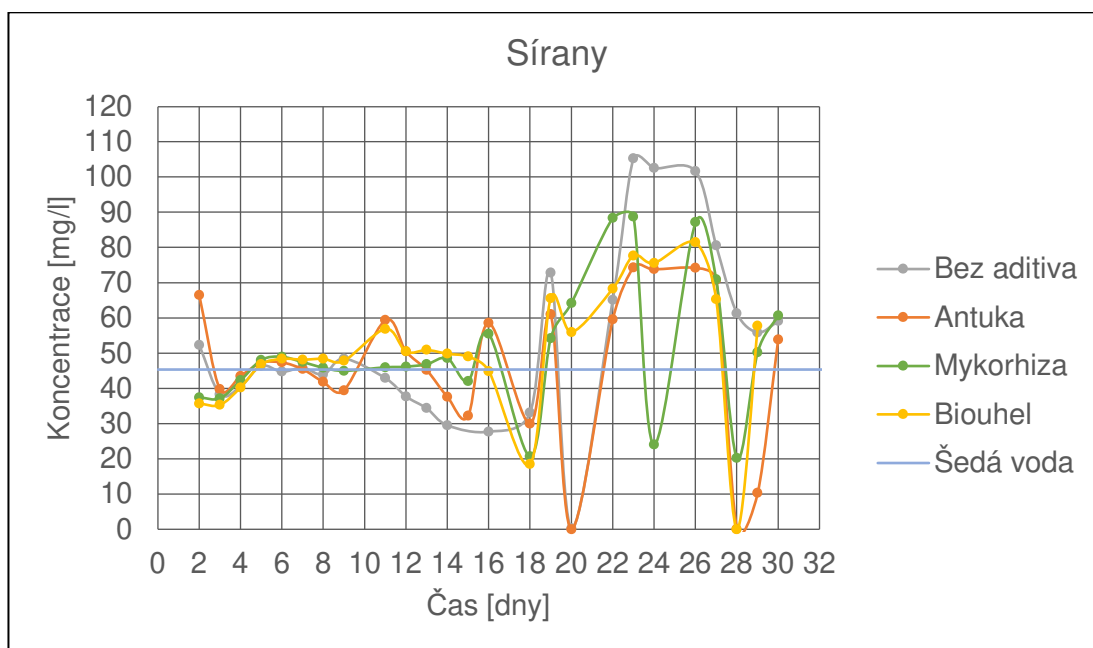
Graf 7.68: Průběh koncentrací fosforečnanů – 26. den



Graf 7.69: Průběh koncentrací fosforečnanů – 28. den

## 7.11 Sírany (SO<sub>4</sub><sup>3-</sup>)

Koncentrace síranů na výtoku všech filtrů se pohybovala blízko koncentrace v samotné šedé (45,37 ± 6,51 mg/l) až do 16. dne, kdy začala u všech skupin výrazně kolísat. V průběhu celého experimentu koncentrace síranů na výtoku činila 52,96 ± 24,70 mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku 46,52 ± 20,34 mg/l, mykorhizu 50,70 ± 18,00 mg/l a biouhel 50,81 ± 17,57 mg/l. Graf 7.70. poté zobrazuje koncentrace síranů na výtoku filtrů v průběhu experimentu.



Graf 7.70: Průběh koncentrace síranů

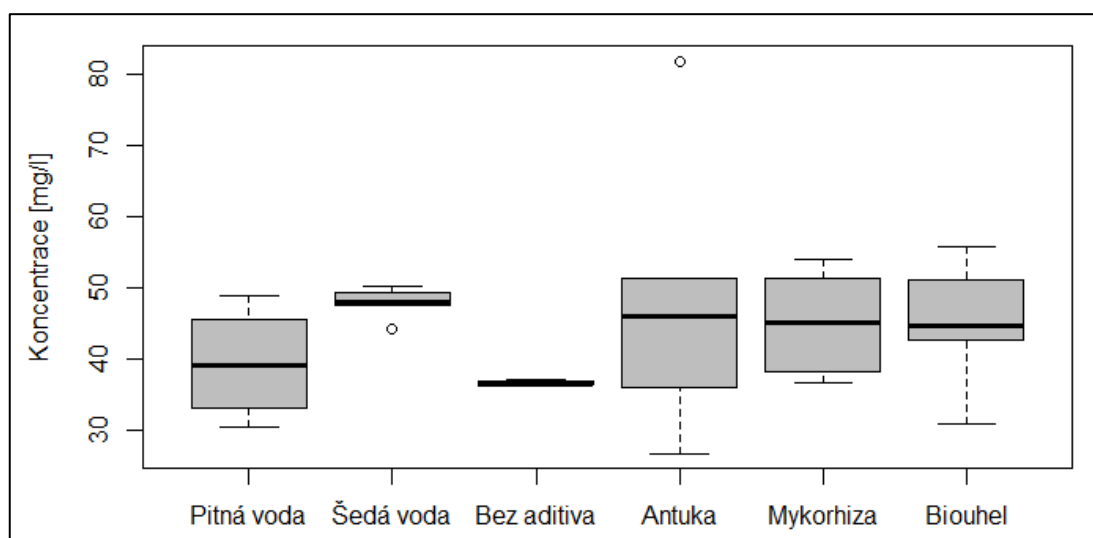
Během 2. a 5. (28. den) etapy vykazovala skupina obsahující antuku či mykorhizu, signifikantně vyšší koncentrace síranů nežli pitná voda, přičemž během 3. až 5. (26. den) vykazovaly všechny skupiny signifikantně vyšší koncentrace, vyjma 4. etapy, kdy skupina obsahující mykorhizu nevykazovala statisticky významný rozdíl. Vůči šedé vodě vykazovala signifikantně vyšší koncentrace v průběhu 4. etapy pouze skupina bez aditiva a v průběhu 5. etapy (26. den) skupina bez aditiva či skupina obsahující antuku, což se v průběhu 5. etapy (28. den) otočilo, a tyto dvě skupiny jako jediné vykazovaly signifikantně nižší koncentrace síranů nežli šedá voda. V průběhu 2. etapy vykazovala také skupina bez aditiva signifikantně nižší koncentrace než skupina obsahující antuku, a v průběhu 2. a 5. etapy (28. den) nežli skupina obsahující mykorhizu či biouhel, ovšem v průběhu 4. etapy koncentrace byla signifikantně vyšší vůči skupině obsahující mykorhizu. Také antuka během 5. etapy (28. den) vykazovala signifikantně nižší koncentrace síranů nežli mykorhiza

či biouhel, viz Tab. 7.13. Jednotlivé etapy jsou poté zobrazeny v příslušných krabicových grafech (Graf 7.71 až Graf 7.76).

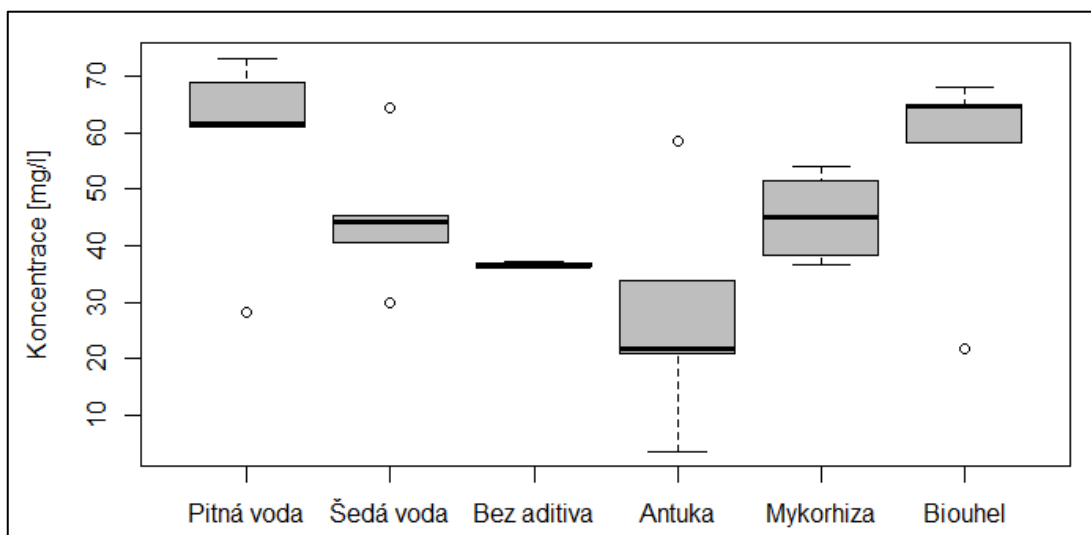
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl																	
	Pitná voda						Šedá voda						Bez aditiva					
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>
Šedá voda																		
Bez aditiva			▲	▲	▲					▲	▲	▼						
Antuka		▲	▲	▲	▲						▲	▼		▲				
Mykorhiza		▲	▲		▲	▲								▲		▼		▲
Biouhel			▲	▲	▲	▲												▲
Předmět statistické analýzy ↓	Předmět statistické analýzy vůči kterému je uváděn signifikantní rozdíl												Legenda: ▲ – signifikantně vyšší koncentrace ▼ – signifikantně nižší koncentrace  Pozn.: Hladina významnosti 0.05					
	Antuka						Mykorhiza											
Etapa →	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>	1	2	3	4	5 <sup>A)</sup>	5 <sup>B)</sup>						
Mykorhiza						▲												
Biouhel						▲												

A) 5. etapa 2. den, B) 5. etapa 5. den

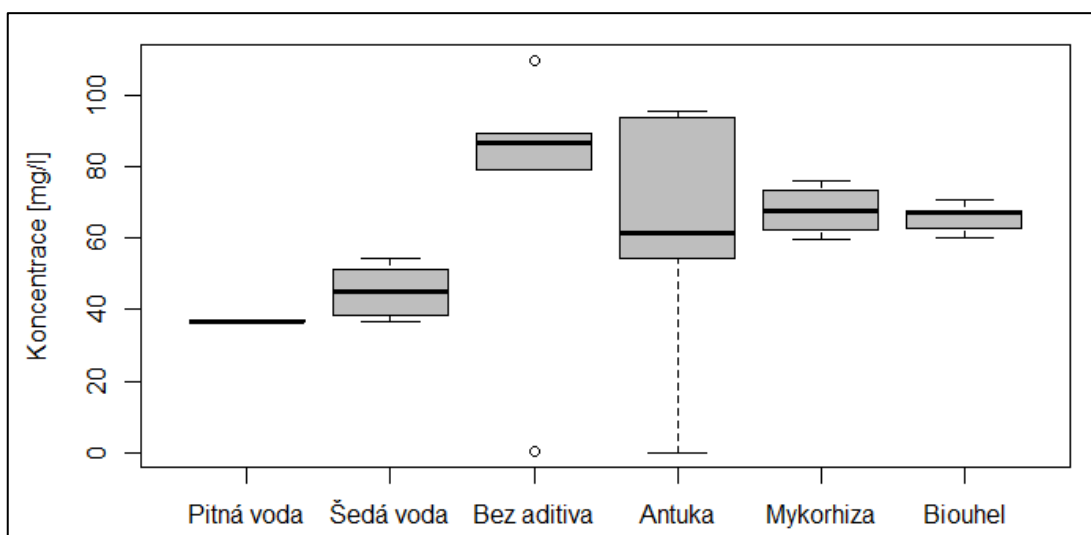
Tab. 7.13: Signifikantní rozdíly v koncentracích síranů



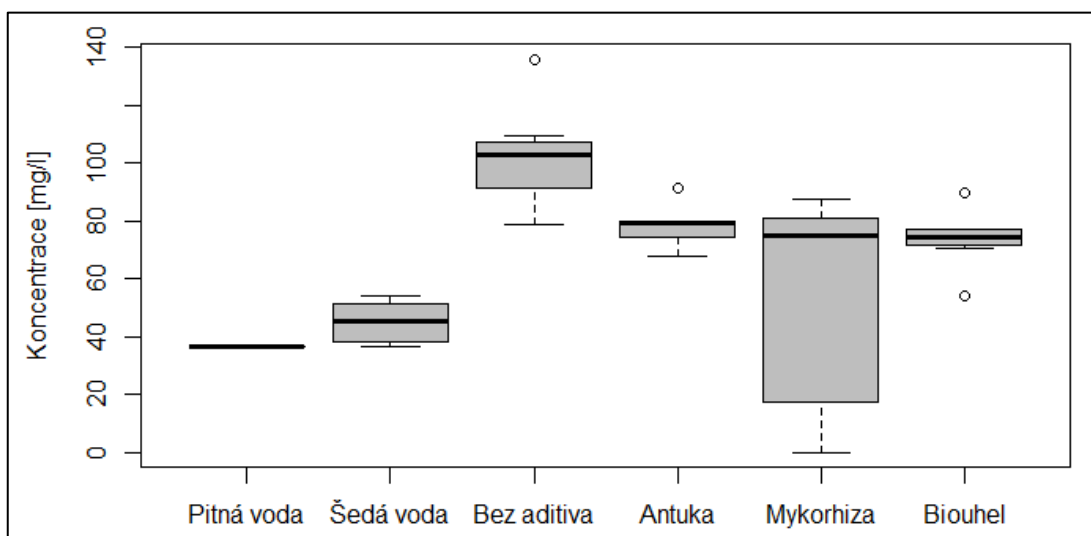
Graf 7.71: Průběh koncentrací síranů – 9. den



Graf 7.72: Průběh koncentrací síranů – 16. den

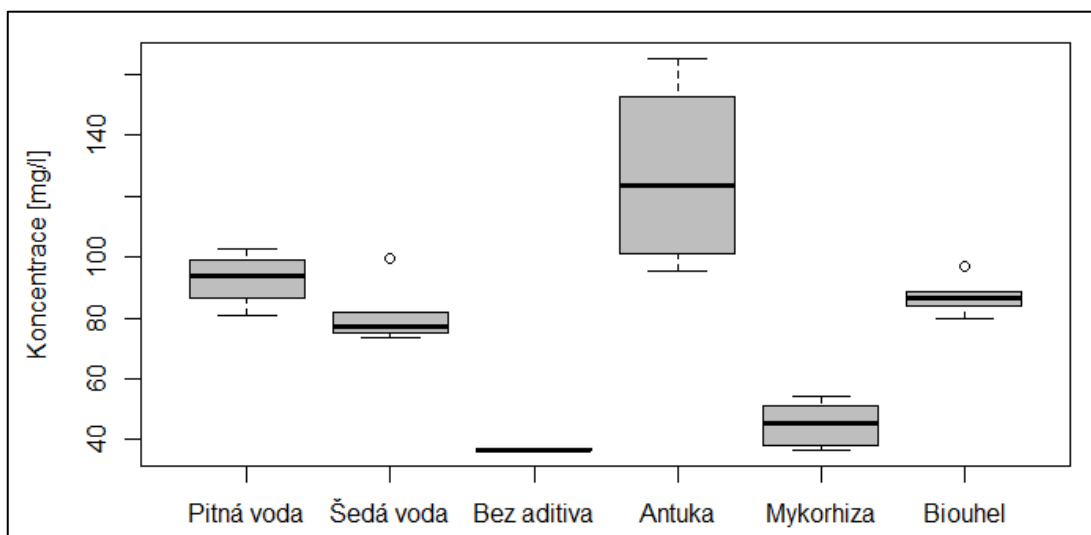


Graf 7.73: Průběh koncentrací síranů – 19. den

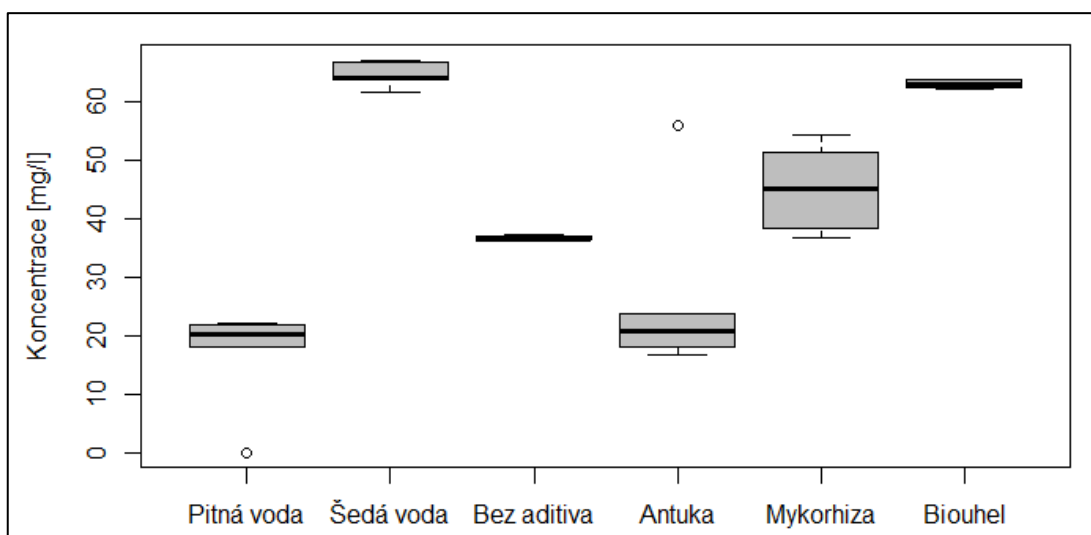


Graf 7.74: Průběh koncentrací síranů – 24. den





Graf 7.75: Průběh koncentrací síranů – 26. den



Graf 7.76: Průběh koncentrací síranů – 28. den

## 7.12 Tenzidy

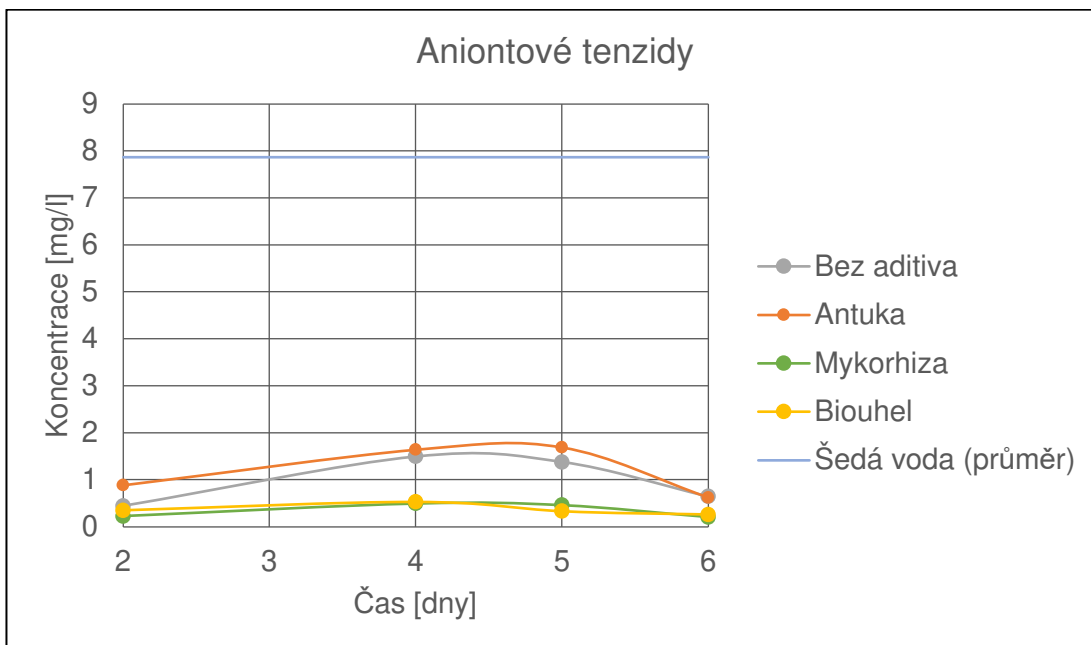
V průběhu 1. etapy proběhlo měření koncentrace tenzidů na výtoku filtrů jednotlivých skupin ve vybraných dnech (aniontové tenzidy celkově 2., 4., 5. a 6. den experimentu a neiontové tenzidy 2., 4. a 6. den). Nadále v daných dnech proběhlo měření koncentrace tenzidů v šedé vodě ráno, při zahájení experimentální práce daného dne a posléze na konci dne, po ukončení experimentální práce daného dne (viz Tab. 7.14.: Koncentrace tenzidů).

Skupina	Aniontové tenszidy [mg/l]				Neiontové tenszidy [mg/l]			
	Den							
	2	4	5	6	2	4	5	6
Šedá voda (začátek dne)	8.02 <sup>A)</sup>	7.60 <sup>A)</sup>	-	-	5.86 <sup>A)</sup>	5.48 <sup>A)</sup>	-	-
Šedá voda (konec dne)	7.43 <sup>A)</sup>	8.41 <sup>A)</sup>	-	-	5.05 <sup>A)</sup>	4.17 <sup>A)</sup>	-	-
Bez aditiva	0.44	1.50	1.38	0.65	3.17 <sup>A)</sup>	2.08 <sup>A)</sup>	-	2.45 <sup>A)</sup>
Antuka	0.88	1.64	1.69	0.62	3.74 <sup>A)</sup>	3.10 <sup>A)</sup>	-	2.01 <sup>A)</sup>
Mykorhiza	0.23	0.50	0.46	0.21	3.13 <sup>A)</sup>	1.64	-	2.18 <sup>A)</sup>
Biouhel	0.35	0.53	0.33	0.26	3.2 <sup>A)</sup>	2.78 <sup>A)</sup>	-	2.61 <sup>A)</sup>

A) Mez stanovení kyvetovým testem LCK 332 dle výrobce činní 0,05 – 2 mg/l

Tab. 7.14: Koncentrace tenszidů

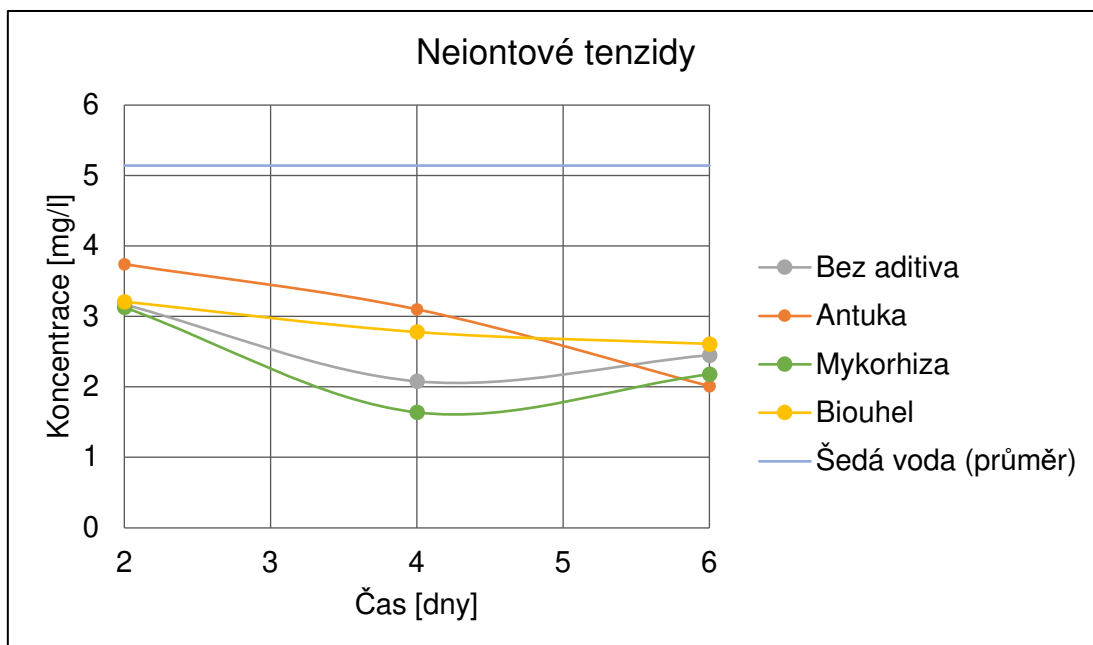
Koncentrace aniontových tenszidů se pohybovala od 0 do 2 mg/l (viz Graf 7.77: Průběh koncentrace aniontových tenszidů), přičemž průměrná koncentrace v samotné šedé vodě činila  $7,87 \pm 0,38$  mg/l. Průměrná koncentrace aniontových tenszidů na výtoku činila  $0,99 \pm 0,45$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku  $1,21 \pm 0,47$  mg/l, mykorhizu  $0,35 \pm 0,13$  mg/l a biouhel  $0,37 \pm 0,10$  mg/l.



Graf 7.77: Průběh koncentrace aniontových tenszidů

Koncentrace neiontových tenszidů se pohybovala od 1 do 4 mg/l (viz Graf 7.78: Průběh koncentrace neiontových tenszidů), přičemž průměrná koncentrace v samotné šedé vodě činila  $5,14 \pm 0,63$  mg/l. Průměrná koncentrace neiontových tenszidů

na výtoku činila  $2,57 \pm 0,45$  mg/l pro skupinu bez aditiva, pro skupinu obsahující antuku  $2,95 \pm 0,71$  mg/l, mykorhizu  $2,32 \pm 0,62$  mg/l a biouhel  $2,87 \pm 0,25$  mg/l.



Graf 7.78: Průběh koncentrace neiontových tenzidů

## 8. Diskuse

Pro úpravu šedé vody je dnes nejpoužívanější a nejznámějším filtračním materiálem pravděpodobně písek, ovšem biouhel se také postupně dostává do podvědomí odborné veřejnosti a existuje mnoho studií, zabývajících se jeho účinnostmi při odstraňování koncentrací polutantů z šedé vody. Využití materiálů jako je antuka, nebo mykorhiza, jakožto filtračních médií, není však příliš rozšířené a může být příhodné těmto materiálům v budoucnu věnovat více pozornosti, neboť v mnoha ohledech jsou srovnatelné s biouhlem či ho dokonce předčí.

### 8.1 Formy uhlíku (TOC, TC a IC) a celkový dusík (TN)

Při odstraňování koncentrace celkového organického uhlíku z šedé vody se nejúčinněji jevil biouhel s průměrnou účinností  $60,11 \pm 15,52$  %, což je přibližně o 17 % nižší účinnost, než které pro biouhel dosáhl *Kaetzl & kol. (2018)*. Od 20. dne experimentu, kdy se účinnost odstraňování TOC ustálila pro všechny filtry, pravděpodobně díky vyplavení organických sloučenin z filtračních materiálů, respektive filtrů, byla účinnost srovnatelná s mykorhizou ( $40,70 \pm 33,04$  %) a oba materiály dosahovaly účinnosti přibližně 70 %, zatímco antuka ( $34,57 \pm 28,79$  %) či filtr bez aditiva ( $18,94 \pm 40,84$ ) dosahovali účinnosti přibližně 60 %. Filtr bez aditiva, jenž obsahoval také písek (viz Tab. 6.1), dosahoval výrazně nižší účinnosti, přibližně o 56 %, než během experimentu obsahující pouze písek, jenž provedl *Dalahmeh & kol. (2012)*. Při vyhodnocování účinnosti biologického čištění pomocí parametru TOC je však nutno dbát obezřetnosti, neboť hodnoty TOC nepředstavují skutečnou koncentraci organických látek, ale jedná se pouze o kyslíkové ekvivalenty (*Pitter, 2015*).

Při snižování koncentrací celkového uhlíku nebyl žádný z testovaných filtračních materiálů účinný a všechny materiály vykazovaly záporné účinnosti (tzn. znečišťovaly ošetřovanou šedou vodu). Biouhel dosahoval nejnižší průměrné záporné účinnosti, tzn. nejméně znečišťoval ošetřenou šedou vodu, se svými  $-33,43 \pm 29,92$  %, následovaný mykorhizou, antukou a skupinou filtrů bez aditiva ( $-39,85 \pm 51,68$  %;  $-72,46 \pm 40,34$  %; respektive  $-79,76 \pm 52,74$  %). Záporné účinnosti napovídají, že docházelo k vyplavování sloučenin obsahujících uhlík z filtračních materiálů. I v případě celkového uhlíku došlo od 23. dne k ustálení účinnosti odstraňování TC pro všechny filtry (biouhel přibližně 5 %, mykorhiza 20 %, antuka -30 % a skupina filtrů bez aditiva -15 %), pravděpodobně z obdobného důvodu, jako v případě celkového organického uhlíku, tedy vyplavení sloučenin obsahujících uhlík z filtračních materiálů, respektive filtrů.

V případě odstraňování koncentrací anorganického uhlíku byla situace obdobná, jako v případě celkového uhlíku. Nejlépe si vedla mykorhiza, která dosahovala nejmenší průměrné záporné účinnosti se svými  $-238,49 \pm 111,84$  %, následovaná biouhlem, skupinou filtrů bez aditiva a antukou ( $-264,16 \pm 71,35$  %;  $-323,20 \pm 93,29$  %; respektive  $-336,43 \pm 84,91$  %). Záporné účinnosti napovídají, že docházelo k uvolňování organických sloučenin z filtračních materiálů. Také i účinnost odstraňování anorganického uhlíku se ustálila od 24. dne pro všechny filtry (mykorhiza přibližně  $-125$  %, biouhel  $-170$  %, skupina filtrů bez aditiva  $-220$  % a antuka  $-240$  %), pravděpodobně také díky vyplavení sloučenin, tentokrát obsahujících anorganický uhlík. Zajímavým faktem je, že ke zmiňovanému ustalování účinností při odstraňování TOC, TC i IC docházelo během 3. až 4. etapy experimentu, tedy během snížené saturace filtrů (30 %), ovšem během 5. etapy (saturace opět 70 %) se účinnost výrazně neproměnila, což napovídá tomu, že mezi saturací a účinností nebyla souvislost a došlo v tomto období pouze k již zmiňovanému vyplavení kontaminantů.

Koncentrace celkového dusíku neúčinněji a nejkonstantněji odstraňoval biouhel s průměrnou účinností  $59,04 \pm 9,55$  %, následovaný antukou ( $48,07 \pm 13,94$  %), mykorhizou ( $34,10 \pm 26,27$  %) a skupinou filtrů bez aditiva ( $28,95 \pm 22,81$  %). Účinnost odstraňování TN biouhlem se jevila přibližně o 32 % nižší, než které pro biouhel dosáhl *Berger (2012)* a filtr bez aditiva, jenž obsahoval také písek (viz Tab. 6.1), dosahoval přibližně o 24 % vyšší účinnosti než během experimentu obsahující pouze písek, jenž provedl *Dalahmeh & kol. (2012)*. Od 20. dne nastalo výrazné zhoršení účinnosti pro skupinu filtrů bez aditiva a skupinu obsahující mykorhizu (až na přibližně  $-20$  %; respektive  $-40$  %), přičemž účinnost od 26. dne opět navázala na průběh, který sledovala do 20. dne. Výrazně nižší výkyv nastal i pro ostatní materiály, což napovídá myšlence, že odstraňování celkového dusíku významně ovlivňovala saturace filtrů a při snížení saturace klesá také účinnost odstraňování.

## 8.2 Anionty ( $F^-$ , $Cl^-$ , $NO_2^-$ , $NO_3^-$ , $Br^-$ , $PO_4^{3-}$ , $SO_4^{3-}$ )

Filtrační materiály nebyly účinné ani při odstraňování koncentrací fluoridů z šedé vody. Nejnižší průměrné záporné účinnosti dosahovala skupina filtrů bez aditiva s průměrnou zápornou účinností  $-148,92 \pm 190,36$  % následovaná biouhlem, mykorhizou a antukou ( $-185,26 \pm 196,21$  %;  $-190,61 \pm 214,53$  %; respektive  $-361,26 \pm 226,37$  %). Záporné účinnosti lze teoreticky připsat přírodním

zdrojům fluoru ve filtračních materiálech, konkrétně např. křemíku, který se vyskytuje především v písku, případně štěrku (*Shaw Resources, 2021*), který také skladba filtru obsahovala (viz podkapitola 6.1), nacházel. Křemík totiž tvoří sloučeniny s fluorem (*Sen & Roesky, 2018*), přičemž se tyto sloučeniny při styku s vodou rozkládají. Toto tvrzení podporuje i nejnižší dosažená účinnost odstraňování fluoridů pomocí antuky, protože jíl prokazatelně obsahuje křemík (*Bažíková, 2018*). Změnou saturace filtrů nedošlo k výraznému ovlivnění účinnosti při odstraňování fluoridů.

Koncentraci chloridů nejúčinněji odstraňovala mykorhiza, následovaná biouhlem, skupinou s antukou a skupinou filtrů bez aditiva (průměrná účinnost  $8,14 \pm 8,49 \%$ ;  $7,03 \pm 14,84 \%$ ;  $5,53 \pm 11,14 \%$ ; respektive  $2,28 \pm 17,11 \%$ ). Snížení saturace filtrů na 30 % nemělo výrazný vliv na účinnost odstraňování chloridů, avšak po návratu k původní saturaci 70 % účinnost pro všechny filtry významně stoupla a následně, o 2 dny později, se výrazně propadla, vyjma mykorhizy (viz koncentrace znázorňující Graf 7.36 a Tab. 7.8). Lze tedy usuzovat, že zvýšení saturace může dočasně výrazně ovlivnit účinnost filtrů při odstraňování chloridů v negativním smyslu (snížení účinnosti).

Koncentrace dusitanů nejúčinněji a nejkonstantněji odstraňovala antuka s průměrnou účinností  $91,36 \pm 22,73 \%$ , následovaná biouhlem, skupinou filtrů bez aditiva a mykorhizou ( $90,43 \pm 14,78 \%$ ;  $85,41 \pm 41,33 \%$ ;  $76,45 \pm 50,20 \%$ ). Při pohledu na Graf 7.43 lze zaznamenat ojedinělé výkyvy koncentrací v jednotlivých dnech, bez ohledu na saturaci, které lze vysvětlit tvorbou preferenčních cest toku ve filtru, podpořených nevhodnou manipulací daný den jedním, případně vícero filtry ze skupiny, čímž došlo k negativnímu ovlivnění výsledků. Druhým možným vysvětlením je náhodná kontaminace odebraných vzorků ošetřené vody šedou vodou.

Pomocí testovaných filtračních materiálů bylo dosaženo také poměrně vysoké účinnosti při odstraňování koncentrací dusičnanů, nejúčinnější se jevila antuka, následovaná skupinou filtrů bez aditiva, biouhlem a mykorhizou (průměrná účinnost  $93,20 \pm 6,41 \%$ ;  $87,12 \pm 20,15 \%$ ;  $86,85 \pm 13,19 \%$ ; respektive  $69,94 \pm 46,55 \%$ ). Přičemž do snížení saturace filtrů na 30 % si filtry držely konstantě vysoké účinnosti (nad 80 %, mykorhiza nad 75 %), ovšem po snížení saturace docházelo k postupnému snižování účinností až na přibližně 81 % pro antuku, 52 % pro biouhel, 29 % pro skupina bez aditiva a -71 % pro mykorhizu. Nižší účinnost filtrů obsahujících mykorhizu vůči filtrům bez aditiva potvrzuje schopnost mykorhizy zachytávat vzdušný dusík z půdního prostředí (*Symbiom, 2021*), který byl v tomto případě pravděpodobně

předáván do ošetřované šedé vody a takto ošetřená voda dosahovala tedy nejvyšších koncentrací na výtoky filtrů. Účinnost se po navrácení k původní saturaci filtrů 70 % (pro mykorhizu dříve, ještě při saturaci 30 %) začala navracet k původním hodnotám, což napovídá myšlence, že odstraňování dusičnanů významně ovlivňovala saturace filtrů a při snížení saturace poklesá také účinnost odstraňování. Obdobný průběh bylo možné sledovat také při odstraňování celkového dusíku z šedé vody.

Koncentrace bromidů nejlépe dokázala snížit skupina filtrů bez aditiva, následovaná mykorhizou, antukou a biouhlem (průměrná účinnost  $82,43 \pm 25,97$  %;  $59,45 \pm 71,92$  %;  $52,14 \pm 46,93$  %; respektive  $44,38 \pm 52,43$  %). Do snížení saturace na 30 % byla účinnost rozkolísaná, po snížení saturace na 30 % se účinnost filtrů ustálila na 100 %, respektive koncentrace se nacházeli pod detekčním limitem, vyjma antuky (kde 24. den poklesla účinnost na 20 % a poté následující den se opět navrátila na původní hodnoty) a po opětovném zvýšení saturace účinnost zůstala stále 100 %. Výkyv během 24. dne u antuky lze vysvětlit tvorbou preferenčních cest toku ve filtru, a to pravděpodobně díky neopatrné manipulaci s filtrem, případně vícero filtry ze skupiny, či náhodnou kontaminací odebraných vzorků ošetřené vody šedou vodou.

Nejvyšší účinnosti při odstraňování fosforečnanů dosahovala antuka, následovaná biouhlem, mykorhizou a skupinou filtrů bez aditiva ( $86,36 \pm 20,08$  %;  $75,05 \pm 36,96$  %;  $74,17 \pm 28,25$  %; respektive  $68,09 \pm 46,20$  %). Výsledek pro biouhel či písek lze částečně porovnat s účinnostmi, který dosáhli během svých experimentů jiní autoři při odstraňování celkového fosforu. Celkový fosfor však není naprosto shodný ukazatel jako fosforečnany, neboť se jedná o koncentrace fosforu stanovené jinou metodou (*Dabkowski & White, 2015*), avšak koncentrace fosforečnanů a fosforů lze mezi sebou přepočítávat (*Pitter, 2015*), tedy účinnosti lze jednoduše porovnat. Účinnost při odstraňování celkového fosforu pomocí biouhlu, mimo jiné, zjišťoval *Berger (2012)*, *Moges & kol. (2015)*, či *Kaetzi & kol. (2018)* a dosáhli 89 %, 57 %, respektive pouhých 11 %. Písek poté testoval *Dalahmeh & kol. (2012)* a dosáhl účinnosti při odstraňování celkového fosforu  $78 \pm 7$  %. Lze tedy konstatovat, že *Berger (2012)*, *Moges & kol. (2015)* i *Dalahmeh & kol. (2012)* dosáhli obdobných účinností.

Ani koncentrace síranů nedokázali filtrační materiál účinně snižovat, koncentrace na výtoky filtrů byly totiž vyšší než v samotné šedé vodě. Antuka dosahovala nejnižší průměrné záporné účinnosti se svými  $-2,54 \pm 44,84$  %,

následovaná mykorhizou, biouhlem a skupinou filtrů bez aditiva ( $-11,75 \pm 39,68 \%$ ;  $-12,00 \pm 38,74 \%$ ; respektive  $-16,74 \pm 54,45 \%$ ). Protože síra je poměrně rozšířeným prvkem v půdě (Prasad & Shivay, 2018), záporné účinnosti lze vysvětlit jejím výluhem.

### 8.3 Tenzidy

Aniontové tenzidy nejúčinněji odstraňovala mykorhiza, následovaná biouhlem, skupinou filtrů bez aditiva a antukou (průměrná účinnosti  $95,55 \pm 1,37 \%$ ,  $95,33 \pm 0,99 \%$ ;  $87,38 \pm 5,25 \%$ ; respektive  $84,65 \pm 4,79 \%$ ).

Neiontové tenzidy nejlépe odstraňovala také mykorhiza, následovaná skupinou filtrů bez aditiva, biouhlem a antukou (průměrná účinnost  $54,93 \pm 11,98 \%$ ;  $50,06 \pm 8,80 \%$ ;  $44,29 \pm 4,82 \%$ ; respektive  $42,61 \pm 13,89 \%$ ).



## 9. Závěr

V rámci bakalářské práce byly v experimentálních podmínkách s využitím fyzikálních modelů zasakovacích pásů testovány různé materiály (antuka, mykorhiza a biouhel), jako aditiva do filtračních loží. Vliv těchto aditiv na účinnost čištění šedých vod byl testován ve srovnání se systémem bez aditiv. Všechny testované materiály účinně snižovaly koncentrace celkového organického uhlíku a vedly si lépe nežli skupina filtrů bez aditiva. Nejlépe si vedl biouhel, který dokázal odstranit 60 % TOC, následovaný mykorhizou se svými 40 % a antukou s 34 %. Materiály byly také účinné v případě redukce celkového dusíku a také si vedly lépe než skupina filtrů bez aditiva, biouhel opět dosahoval nejvyšší odstranění TN (průměrná účinnost 59 %), následovaný antukou (48 %) a mykorhizou (34 %). Účinnost testovaných materiálů byla také zjištěna při odstraňování fosforečnanů a opět testované materiály zvýšily účinnost vůči skupině filtrů bez aditiva. Fosforečnany nejlépe odstraňovala antuka (86 %), následovaná biouhlem a mykorhizou (75 %, respektive 74 %).

Odstraňování dusitanů bylo poměrně účinné pro všechny testované materiály (nad 76 %), avšak lepších výsledků, nežli skupina bez aditiva (85 %) dosáhla pouze antuka a biouhel (o 6 %; respektive o 5%). Aditivum mykorhizy vedlo ke snížení účinnosti (o 9 %). Dusičnany byly také odstraňovány s vysokou účinností (nad 86 %), ovšem vyšší účinnosti, nežli skupina bez aditiva (87 %), dosáhla pouze antuka (o 6 %) a biouhel, následovaný mykorhizou dosahoval nižší účinnosti vůči skupině filtrů bez aditiva (o 1 %, respektive o 19 %). I bromidy nejúčinněji odstraňovala skupina bez aditiva (82 %) a přidáním aditiva došlo ke snížení účinnosti (až o 38 % pro biouhel). Také při odstraňování tenzidů nevykazovaly testované materiály razantní rozdíl vůči skupině filtrů bez aditiva, neboť mykorhiza či biouhel dosahovaly 95 % odstranění aniontových tenzidů, tedy přibližně o 8 % více, než skupina filtrů bez aditiva a přidání antuky vedlo ke snížení účinnosti (o 3 %). Odstranění neiontových tenzidů dokázala zvýšit pouze mykorhiza (o 4 %), a to vůči skupině filtrů bez aditiva, a přidání biouhlu či antuky vedlo ke snížení účinnosti (o 6 %, respektive 8 %).

Ačkoliv v případě celkového uhlíku došlo přidáním aditiva ke zvýšení účinnosti, stále účinnost dosahovala záporných hodnot a materiály nedokázaly účinně odstraňovat celkový uhlík. Obdobná situace nastala i pro anorganický uhlík, kde biouhel a mykorhiza dokázaly vůči skupině filtrů bez aditiva účinnost zvýšit, avšak i přesto ošetřená voda vykazovala zvýšené koncentrace vůči šedé vodě. Také v případě fluoridů se situace opakovala a přidáním aditiva došlo ke zhoršení

účinnosti, která i pro skupinu filtrů bez aditiva dosahovala záporných hodnot. Účinnost odstraňování chloridů či síranů byla záporná, ačkoliv přidání testovaných materiálů jí dokázalo zvýšit.

Lze konstatovat, že s ohledem na testované parametry lze teoreticky šedou i ošetřenou vodu využít jako užitkovou vodu, neboť připravovaná evropská norma *FprEN 16941-2*, ani příručka Světové zdravotnické organizace (*WHO, 2006b*), nestanovují přípustné limity parametrů sledovaných v této práci (viz Tab. 4.1, Tab. 4.2 a kapitola 7). Ovšem šedá voda by pravděpodobně nevyhověla parametrům, jež výše zmiňovaná norma či příručka stanovují, u ošetřené vody nelze předpovídat.

I přes uspokojivé výsledky u některých parametrů, filtrace testovanými materiály sama o sobě pravděpodobně nedokáže splnit kvalitativní požadavky na užitkovou vodu, lze se tedy ztotožnit s obdobným tvrzením, které pro biouhel učinil *Thompson & kol. (2020)*. Pro získání uceleného přehledu o schopnostech těchto filtračních materiálů a utvrzení v relevantnosti získaných dat touto prací, je třeba provést další výzkum, který se bude daným tématem zabývat po delší dobu a sledovat více kvalitativních parametrů vody. Vzhledem k vystavení fyzikálních modelů povětrnostním vlivům by relevantnosti dalšího výzkumu prospělo zahrnutí informací o čase, množství srážek a složení dešťové vody.

## 10. Seznam literatury

### 10.1 Odborné publikace

- Abdel-Shafy, H.I., El-Khateeb, M.A., Shehata, M., 2014: Greywater treatment using different designs of sand filters. *Desalination and Water Treatment* 52, 5237–5242.
- Abudi, N.Z., 2011: The effect of sand filter characteristics on removal efficiency of organic matter from grey water. *Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences* 4(2), 143–155.
- Al-Hamaiedeh, H., Bino, M., 2010: Effect of treated grey water reuse in irrigation on soil and plants. *Desalination* 256, 115–119.
- Aonghusa, C.N., Gray, N.F., 2002: Laundry detergents as a source of heavy metals in Irish domestic wastewater. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering* 37, 1–6.
- Aslam, M.M., Malik, M., Baig, M.A., Qazi, I.A., Iqbal, J., 2007: Treatment performances of compost-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for refinery wastewater treatment in Pakistan. *Ecological Engineering* 30, 34–42.
- Barron, N.J., Deletic, A., Jung, J., Fowdar, H., Chen, Y., Hatt, B.E., 2019: Dual-mode stormwater-greywater biofilters: The impact of alternating water sources on treatment performance. *Water Research* 159, 521–537.
- Boano, F., Caruso, A., Costamagna, E., Ridolfi, L., Fiore, S., Demichelis, F., Galvão, A., Piseiro, J., Rizzo, A., Masi, F., 2020: A review of nature-based solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of the Total Environment* 711.
- Boyjoo, Y., Pareek, V.K., Ang, M., 2013: A review of greywater characteristics and treatment processes. *Water Science and Technology* 67, 1403–1424.
- Bubenheim, D., Wignarajah, K., Berry, W., Wydeven, T., 1997: Phytotoxic effects of gray water due to surfactants. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 122, 792–796.
- Dabkowski, B., White, M., 2015: Understanding the Different Phosphorus Tests. *Hach* 1–4.

- Dalahmeh, S., Ahrens, L., Gros, M., Wiberg, K., Pell, M., 2018: Potential of biochar filters for onsite sewage treatment: Adsorption and biological degradation of pharmaceuticals in laboratory filters with active, inactive and no biofilm. *Science of the Total Environment* 612, 192–201.
- Dalahmeh, S.S., Pell, M., Vinnerås, B., Hylander, L.D., Öborn, I., Jönsson, H., 2012: Efficiency of bark, activated charcoal, foam and sand filters in reducing pollutants from greywater. *Water, Air, and Soil Pollution* 223, 3657–3671.
- El-Taweel, G.E., Ali, G.H., 2000: Evaluation of roughing and slow sand filters for water treatment. *Water, Air, and Soil Pollution* 120, 21–28.
- Eriksson, E., Andersen, H.R., Madsen, T.S., Ledin, A., 2009: Greywater pollution variability and loadings. *Ecological Engineering* 35, 661–669.
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., Ledin, A., 2002: Characteristics of grey wastewater. *Urban Water* 4, 85–104.
- Ghunmi, L.A., Zeeman, G., Fayyad, M., Van Lier, J.B., 2011: Grey water treatment systems: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 41, 657–698.
- Gross, A., Azulai, N., Oron, G., Arnold, M., Nejidat, A., Ronen, Z., 2005: Environmental impact and health risks associated with greywater irrigation: A case study. *Water Science and Technology* 52, 161–169.
- Gwenzi, W., Chaukura, N., Noubactep, C., Mukome, F.N.D., 2017: Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. *Journal of Environmental Management* 197, 732–749.
- Hedegaard, M.J., Albrechtsen, H.J., 2014: Microbial pesticide removal in rapid sand filters for drinking water treatment - Potential and kinetics. *Water Research* 48, 71–81.
- Hernández Leal, L., Temmink, H., Zeeman, G., Buisman, C.J.N., 2011: Characterization and anaerobic biodegradability of grey water. *Desalination* 270, 111–115.
- Christova-Boal, D., Eden, R.E., McFarlane, S., 1996: An investigation into greywater reuse for urban residential properties. *Desalination* 106, 391–397.

- Jedličková, B., Hilscherová, K., Bláha, L., 2010: Látky narušující hormonální rovnováhu organismů a celková toxicita odpadní vody - Roční studie na ČOV v Brně Modřicích. *Vodní hospodářství* 1, 3-6.
- Jefferson, B., Burgess, J.E., Pichon, A., Harkness, J., Judd, S.J., 2001: Nutrient addition to enhance biological treatment of greywater. *Water Research* 35, 2702–2710.
- Jenkins, D., Russell, L.L., 1994: Heavy metals contribution of household washing products to municipal wastewater. *Water Environment Research* 66, 805–813.
- Kaetzi, K., Lübken, M., Gehring, T., Wichern, M., 2018: Efficient low-cost anaerobic treatment of wastewater using biochar and woodchip filters. *Water* 10(7), 818.
- Khan, H.K., Rehman, M.Y.A., Malik, R.N., 2020: Fate and toxicity of pharmaceuticals in water environment: An insight on their occurrence in South Asia. *Journal of Environmental Management* 271.
- Leas, E.C., Dare, A., Al-Delaimy, W.K., 2014: Is gray water the key to unlocking water for resource-poor areas of the middle east, north africa, and other arid regions of the world?. *Ambio* 43, 707–717.
- Li, F., Behrendt, J., Wichmann, K., Otterpohl, R., 2008: Resources and nutrients oriented greywater treatment for non-notable reuses. *Water Science and Technology* 57, 1901–1907.
- Li, F., Wichmann, K., Otterpohl, R., 2009: Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment* 407, 3439–3449.
- Martínez-Alcalá, I., Pellicer-Martínez, F., Fernández-López, C., 2018: Pharmaceutical grey water footprint: Accounting, influence of wastewater treatment plants and implications of the reuse. *Water Research* 135, 278–287.
- Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y., 2016: Sustainability: Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances* 2.
- Moges, M.E., Eregno, F.E., Heistad, A., 2015: Performance of biochar and filterlite as polishing step for on-site greywater treatment plant. *Management of Environmental Quality: An International Journal* 26(4), 607–625.

- Mosa, A., El-Banna, M.F., Gao, B., 2016: Biochar filters reduced the toxic effects of nickel on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) grown in nutrient film technique hydroponic system. *Chemosphere* 149, 254–262.
- Muñoz, I., Rodríguez, A., Rosal, R., Fernández-Alba, A.R., 2009: Life Cycle Assessment of urban wastewater reuse with ozonation as tertiary treatment. A focus on toxicity-related impacts. *Science of the Total Environment* 407, 1245–1256.
- Okun, D.A., 1997: Distributing reclaimed water through dual systems. *Journal AWWA* 89, 52–64.
- Otterpohl, R., Albold, A., Oldenburg, M., 1999: Source control in urban sanitation and waste management: ten systems with reuse of resources. *Water Science and Technology* 39(5), 153–160.
- Ottoson, J., Stenström, T.A., 2003: Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *Water Research* 37, 645–655.
- Pitter, P., 2015: *Hydrochemie 5. vydání. VŠCHT Praha, Praha. 792 s.*
- Prasad, R., Shivay, Y.S., 2018: Sulphur in Soil, Plant and Human Nutrition. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences* 88, 429–434.
- Reddy, K.R., Xie, T., Dastgheibi, S., 2014: Evaluation of biochar as a potential filter media for the removal of mixed contaminants from urban storm water runoff. *Journal of Environmental Engineering* 140(12), 04014043.
- Seenirajan, M., Sasikumar, S., Antony, E., 2018: Design of Grey Water Treatment Units. *International Research Journal of Engineering and Technology* 5(5) .
- Sen, S.S., Roesky, H.W., 2018: Silicon-fluorine chemistry: From the preparation of SiF<sub>2</sub> to C-F bond activation using silylenes and its heavier congeners. *Chemical Communications* 54, 5046–5057.
- Shafran, A.W., Gross, A., Ronen, Z., Weisbrod, N., Adar, E., 2005: Effects of surfactants originating from reuse of greywater on capillary rise in the soil. *Water Science and Technology* 52, 157–166.
- Šmidrkal, J., 1999: Tenzidy a detergenty dnes. *Chemické listy* 93, 421-427.

- Thompson, K.A., Valencia, E.W., Scott Summers, R., Cook, S.M., 2020: Sorption, coagulation, and biodegradation for graywater treatment. *Water Science and Technology* 81, 2152–2162.
- Toze, S., 2006: Reuse of effluent water - Benefits and risks. *Agricultural Water Management* 80, 147–159.
- Ushijima, K., Ito, K., Ito, R., Funamizu, N., 2013: Greywater treatment by slanted soil system. *Ecological Engineering* 50, 62–68.
- Vuppaladadiyam, A.K., Merayo, N., Prinsen, P., Luque, R., Blanco, A., Zhao, M., 2019: A review on greywater reuse: quality, risks, barriers and global scenarios. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 18, 77–99.
- WHO, 2006a: Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater - Volume 1: Policy and regulatory aspects. World Health Organization 1.
- Wiel-Shafran, A., Ronen, Z., Weisbrod, N., Adar, E., Gross, A., 2006: Potential changes in soil properties following irrigation with surfactant-rich greywater. *Ecological Engineering* 26, 348–354.

## 10.2 Legislativní zdroje

- BS 8525:2010: Greywater systems – Part 1: Code of practice. BSI Group Headquarters, Londýn, 2010. 54 s.
- FprEN 16941-2: On-site non-potable water systems – Part 2: Systems for the use of treated greywater. CEN-CENELEC Management Centre, Brusel, 2017. 31 s.

## 10.3 Internetové zdroje

- ALS Environmental Ltd., ©2021: Bacteriophage in Water (online) [cit. 2021.03.07], dostupné z <[https://www.alsenvironmental.co.uk/media-uk/pdf/datasheets/micro-lp/als\\_micro\\_bp\\_v2\\_2016.pdf](https://www.alsenvironmental.co.uk/media-uk/pdf/datasheets/micro-lp/als_micro_bp_v2_2016.pdf)>.
- Bažíková, L., 2018: Přehled mechanických vlastností nepálené hlíny (online) [cit. 2021.02.13], dostupné z <<https://stavba.tzb-info.cz/hruba-stavba/18379-prehled-mechanickych-vlastnosti-nepalene-hliny>>.
- Bonsaischule Wenddorf, ©2021: Kanuma - Japanese Bonsail Soil - Azaleas (online) [cit. 2021.03.04], dostupné z <<https://www.superflybonsai.com/products/japanese-bonsai-kanuma-soil>>.

- CzechGlobe, ©2021: Dopady změny klimatu - Extrémní jevy (online) [cit. 2021.03.04], dostupné z <<https://www.klimatickazmena.cz/cs/vse-o-klimaticke-zmene/dopady-zmeny-klimatu-extremni-jevy/>>.
- ČistáVoda s.r.o., ©2021: Baktérie ve vodě (online) [cit. 2021.03.10], dostupné z <<https://www.cistavoda.cz/bakterie-ve-vode/>>.
- Elges, J., 2017: 5 facts about Enterococcus faecalis (online) [cit. 2021.03.10], dostupné z <<https://www.biocote.com/5-facts-about-enterococcus-faecalis/>>.
- Fondriest Environmental Inc., 2013: Dissolved Oxygen (online) [cit. 2021.02.22], dostupné z <<https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>>.
- Frank Bold Advokáti, 2020: Šedá voda pomůže bojovat se suchem a sníží náklady (online) [cit. 2021.03.02], dostupné z <<https://www.fbadvokati.cz/cs/clanky/7373-seda-voda-pomuze-bojovat-se-suchem-a-snizi-naklady>>.
- FSAI, 2011: Salmonella species (online) [cit. 2021.02.16], dostupné z <<https://www.fsai.ie/salmonellaspecies.html>>.
- Plotěný, K., 2011: Dělení vod, bílé a šedé vody – nové poznatky a možnosti využití (online) [cit. 2021.03.05], dostupné z <<https://www.asio.cz/cz/55.deleni-vod-bile-a-sede-vody-nove-poznatky-a-moznosti-vyuziti>>.
- Plotěný, K., 2019: Recyklace šedých vod a jejich využití (online) [cit. 2021.03.05], dostupné z <<https://www.asio.cz/cz/999.recyklace-sedych-vod-a-jejich-vyuziti>>.
- Plotěný, K., Bartoník, A., 2012: Čištění šedých vod a možnost využití energie z nich (online) [cit. 2021.03.05], dostupné z <<https://www.asio.cz/cz/153.cisteni-sedych-vod-a-moznost-vyuziti-energie-z-nich>>.
- Real Tech Inc., 2017: What is UV254? (online) [cit. 2021.02.23], dostupné z <<https://realtechwater.com/blog-post/what-is-uv254/>>.
- SčVK, ©2021: Spotřeba vody (online) [cit. 2021.03.05], dostupné z <<https://www.scvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/spotreba-vody/>>.
- Shaw Resources, ©2021: What Is Silica Sand & How Is It Different From Regular Sand? (online) [cit. 2021.03.16], dostupné z <<https://shawresources.ca/what-is-silica-sand/>>.



Symbiom, ©2021: Houby pomohou nakrmit rostliny (online) [cit. 2021.03.16], dostupné z <<https://www.symbiom.cz/cs/m-25-houby-pomohou-nakrmit-rostliny>>.

Theobald, 2013: What are process controls for dissolved oxygen during biological treatment? (online) [cit. 2021.02.22], dostupné z <<https://www.watertechonline.com/wastewater/article/15543520/what-are-process-controls-for-dissolved-oxygen-during-biological-treatment>>.

Umweltbundesamt, 2018: Questions and Answers on Water Reuse (online) [cit. 2021.03.05], dostupné z <<https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/water/questions-answers-on-water-reuse>>.

UNESCO WWAP, 2008: Agriculture is the largest consumer of freshwater (online) [cit. 2021.03.06], dostupné z <<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact2-agricultural-use/>>.

US EPA, ©2021: Indicators: Enterococci (online) [cit. 2021.03.01], dostupné z <<https://www.epa.gov/national-aquatic-resource-surveys/indicators-enterococci>>.

#### **10.4 Ostatní zdroje**

Berger, C., 2012: Biochar and activated carbon filters for greywater treatment: comparison of organic matter and nutrient removal. 45 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. SLU Swedish University of Agricultural Sciences.

Bigas H., Morris T., Sandford, B., Adeel, Z., 2012: The Global Water Crisis: Addressing an Urgent Security Issue. Foreword by Gro Harlem Brundtland. United Nations University, Hamilton, 176 s.

Bisselink, B., Bernhard, J., Gelati, E., Adamovic, M., Guenther, S., Mentaschi, L., Feyen, L., De Roo, A., 2020: Climate change and Europe's water resources. Office of the European Union, Lucemburk, 35 s.

Kettnerová M., 2018: Případová studie využití srážkových a šedých vod v budově základní školy. 89 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. ČVUT DSpace.

Morel, A., Diener, S., 2006: Greywater management in low and middle-income countries : review of different treatment systems for households or

neighbourhoods. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf, 107 s.

Sidibe, M., 2014: Comparative study of bark, bio-char, activated charcoal filters for upgrading grey-water. 35 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. SLU Swedish University of Agricultural Sciences.

WHO, 2006b: Overview of greywater management health considerations. Regional Office for the Eastern Mediterranean, Káhira, 49 s.

WWAP 2018: The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions. UNESCO, Paříž, 154 s.