

Univerzita Palackého v Olomouci  
Přírodovědecká fakulta  
Katedra ekologie a životního prostředí



**Změny vybraných chemických  
parametrů v toku Sitka po odlesnění  
povodí**

Kateřina Jurníková

Diplomová práce

předložená

na Katedře ekologie a životního prostředí  
Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci

jako součást požadavků  
na získání titulu Mgr. v oboru  
Hydrobiologie

Vedoucí práce: RNDr. Petr Hekera, Ph.D.

Olomouc 2021



### Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením RNDr. Petra Hekery, Ph.D. a jen s použitím citovaných literárních pramenů.

V Olomouci 5. 5. 2021

.....  
podpis

Jurníková K (2021) : Změny vybraných chemických parametrů v toku Sitka po odlesnění povodí. Diplomová práce, Katedra ekologie a životního prostředí, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 32 s, česky.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá vlivem odlesnění porostu na chemismus vody v toku. V posledních letech jsou smrkové porosty v České republice decimovány kůrovcovou kalamitou. Náhlé zvýšení rozlohy odlesňovaných ploch a pasek pak může ovlivnit chemismus vody v tocích. Cílem práce bylo zjistit, zda po odlesnění částí zájmových povodí došlo ke změně v chemismu vody a zda dochází ke změnám sezónní dynamiky vybraných parametrů na tocích Teplička a Sitka (Nízký Jeseník). Odběr vzorků probíhal jednou měsíčně v průběhu roku 2020 a u vzorků byly sledovány parametry pH, konduktivita,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Fe a Ca. Naměřené hodnoty z toku Sitka byly dále porovnávány s daty z předchozích let, která byla sledována Povodím Moravy. Z výsledků vyplývá, že odlesněno bylo v letech 2016-2018 23,7 % zájmového území na toku Teplička a na toku Sitka 12,7 %. Zvětšil se však počet holin nad 1 ha. Po průtoku odlesněným povodím došlo ke změně pH, na toku Teplička klesá a na toku Sitka stoupá. Z analýzy trendu v průběhu let však vyplývá, že dlouhodobě se pH na toku Sitka snižuje. Po průtoku odlesněným územím došlo také ke změnám konduktivity a celkového množství Fe a Ca. Dlouhodobá změna pH není obvyklá ani u odlesnění nad 1/3 plochy porostu, natož u menší plochy. I odlesnění menší rozlohy tedy může prokazatelně změnit chemismus vody v toku. Pro komplexnější výsledky je třeba dalšího a dlouhodobějšího monitoringu.

**Klíčová slova:** chemismus toku, odlesnění, povodí

Jurníková K (2021): Changes in selected chemical parameters in the Sitka stream after deforestation of river basin. Diploma Thesis, Department of Ecology and Environmental Sciences, Faculty of Science, Palacky University of Olomouc, 32 pp, in Czech.

## **Abstract**

Spruce woods are devastated by bark beetle calamity in Czech Republic in recent years. Sudden increase of deforested area can affect stream water chemistry. The aims of this study were answer this questions: Are there changes in water chemistry after deforestation of study areas? (1) Is there difference in seasonal dynamics of selected parameters in stream water? (2) Study areas were forested watersheds of Teplička and Sitka rivers (Nížký Jeseník) I sampled once a month during 2020. I analyzed these parameters: pH, conductivity,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Fe and Ca. Measured data from Sitka were also compared with older data by state-owned institution Povodí Moravy. Results show, that deforestation of study areas were in 2016-2018 23,7 % for Teplička and 12,7 % for Sitka. Number of clearing over 1 ha increased. Parameter pH increased after flowing through study area of Teplička and decreased for Sitka. However, the analysis of trend show that pH decreases over a long period in Sitka. There are also changes in conductivity, Fe and Ca after flowing through study areas. Long-term change in pH is not usual even for deforestation over 1/3 area. Even deforestation of small area can provably change stream water chemistry. We would need more and long-term monitoring for more complex results.

**Key words:** stream water chemistry, deforestation, river basin

## Obsah

Úvod.....	1
Teoretická část .....	3
Faktory ovlivňující chemismus toku v nenarušeném povodí.....	3
Buffer zóna.....	4
Regenerace porostu po odlesnění.....	5
Odlesnění do 1/3 porostu .....	5
Odlesnění nad 1/3 porostu.....	7
Metodika .....	11
Vybrané toky .....	11
Odběr vzorků.....	11
Chemická analýza vzorků .....	13
Statistická analýza.....	13
Výsledky .....	14
Srovnání zájmových toků.....	14
Změny po průtoku odlesněným povodím .....	15
Analýza trendu na toku Sitka v průběhu let.....	18
Diskuse.....	21
Srovnání zájmových toků.....	22
Změny po průtoku odlesněným povodím .....	22
Analýza trendu na toku Sitka v průběhu let.....	23
Závěr .....	25
Literatura .....	26
Přílohy .....	31

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1: Plocha odlesnění zájmových území .....	14
Tabulka 2: Četnosti velikostí a průměrná velikost holin na zájmovém území .....	14
Tabulka 3: Kendall trend test .....	18

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Odběrná místa na toku Sitka.....	12
Obrázek 2: Odběrová místa na toku Teplička.....	12
Obrázek 3: Srovnání vybraných parametrů v tocích za rok 2020.....	15
Obrázek 4: Srovnání pH na jednotlivých odběrových místech.....	16
Obrázek 5: Srovnání konduktivity na jednotlivých odběrových místech .....	16
Obrázek 6: Srovnání obsahu železa na jednotlivých odběrových místech .....	17
Obrázek 7: Srovnání obsahu vápníku na jednotlivých odběrových místech .....	17
Obrázek 8: Porovnání hodnot pH na toku Sitka mezi lety.....	18
Obrázek 9: Porovnání hodnot vápníku na toku Sitka mezi lety .....	19
Obrázek 10: Porovnání hodnot dusičnanů na toku Sitka mezi lety .....	19
Obrázek 11: Porovnání hodnot konduktivity na toku Sitka mezi lety .....	20



### **Poděkování**

Děkuji především svému vedoucímu RNDr. Petru Hekerovi, Ph.D. za věnovaný čas a cenné rady. Také děkuji svým blízkým, kteří mne podporovali a absolvovali mnohdy náročné terénní odběry.

## Úvod

Klimatická změna s sebou nese mnoho důsledků. V České republice v posledních letech nejvíce pocítujeme zvyšování teploty a změnu rozložení srážek v průběhu roku. Oba tyto faktory vedou mimo jiné k oslabení lesních porostů. Ty jsou v České republice stále z 50 % tvořeny smrkem ztepilým (*Picea abies*, H. Karst.), ačkoli jeho přirozené rozšíření na našem území tvoří pouze 11 % (Modlinger a Trgala 2019). Smrk ztepilý je díky svým fyziologickým charakteristikám (např. struktura koruny a kořenového systému) v kombinaci s nedostatkem půdní vláhy oslaben a je náchylnější k napadení lýkožroutem smrkovým (*Ips typographus*, Linnaeus) a jeho příbuznými druhy. Vývoj tohoto hmyzu se navíc díky teplejším vegetačním sezónám zrychluje a lýkožrout je tak schopen za jednu sezónu založit více generací. Z těchto důvodů se zhruba od roku 2015 potýkáme s tzv. kůrovcovou kalamitou, která vede k plošnému odumírání smrkových porostů. Ještě dříve se kůrovcová kalamita projevila na Šumavě. Aktuálně jsou nejvíce zasaženými regiony severní Morava, Slezsko a Vysočina (Modlinger a Trgala 2019). Nahodilá těžba, tedy neplánované odlesnění převážně kůrovcových lokalit, tvořila za rok 2019 v našich lesích 95 % z celkového množství těžeb (Zpráva o stavu lesa 2020). V roce 2016 tvořila nahodilá těžba pouze 53 % (Zpráva o stavu lesa 2019). V našich lesích tak stále vznikají rozsáhlé holiny, které se mnohdy z personálních důvodů a nedostatku sazenic nedaří zalesnit v řádném termínu. Vedle sebe tak nalezneme paseky různé rozlohy s různě starými sazenicemi nebo ještě nezalesněné plochy.

Odlesnění je narušením prostředí a má mnoho možných dopadů jak na les, tak na toky protékající daným územím. Tyto změny prostředí tedy mimo jiné ovlivňují chemismus místních toků a jejich hydrologický režim (Bormann a Likens 1981). S kůrovcovou kalamitou se na našem území stále potýkáme, její dopad na vodní prostředí však není znám, a to i přesto, že jen státní podnik Lesy České republiky spravuje 38,5 tisíc km vodních toků a bystřin (Hubalová *et al.* 2019).

Dosavadní výzkumy zabývající se tématem vlivu odlesnění na vodní tok se týkají hlavně malých povodí do 50 ha a jejich jednorázové holoseči a převážná většina z nich pochází ze Severní Ameriky. Mnoho studií však naznačuje, že dopad na vodní tok je velice individuální (např. Likens *et al.* 1998, Martin *et al.* 2000, Oda *et al.* 2018) a závisí na místních, klimatických, geologických a biologických

podmínkách. V případě odlesňování v důsledku kůrovcové kalamity se však jedná o větší povodí a větší plochy odlesnění, ke kterému navíc dochází postupně již několik let. Změny chemismu toku bývají nejvýraznější zejména v prvních 3 letech po odlesnění (Likens *et al.* 1970), nicméně vzhledem k dlouhodobějšímu trvání odlesnění by tyto změny mohly trvat déle. Vzhledem k závislosti změn chemismu toku na ostatních faktorech, ale nemůžeme změny spolehlivě předvídat.

Pro svou diplomovou práci jsem si stanovila tyto hypotézy: Ve studovaném povodí došlo po odlesnění ke změně v chemismu vody (1). Po odlesnění dochází ke změnám sezónní dynamiky jednotlivých prvků (2).

## **Teoretická část**

S výzkumem vlivu odlesnění povodí na tok se začalo již na počátku minulého století. V první polovině 20. století se studie zabývaly hlavně vlivem na hydrometrii toku (Hibbert 1965). Až Gorham (1961) ve své práci upozornil na důležitost biologických procesů a jejich vlivu na chemismus toků. V 60. letech došlo k zahájení „*Hubbard Brook Ecosystem Study*“ rozsáhlého výzkumu, jehož cílem je pochopit biochemické vztahy a toky energie v ekosystému malých zalesněných povodí a také vliv odlesnění na tok. Výzkumy zde probíhají dodnes a lze říci, že se jedná o jednu z nejznámějších, nejkompexnějších a nejdéle trvajících prací v oblasti odlesňování povodí a změn chemismu toku (Campbell *et al.* 2020). Hubbard Brook Ecosystem Study probíhá na území experimentálního lesa Hubbard Brook ve státě New Hampshire v USA. Jedná se o temperátní oblast s kontinentálním klimatem, s převažujícími listnatými lesy, ve vyšších polohách také s jehličnany (Burton *et al.* 1973). Podloží tvoří metamorfované a vyvěřelé horniny a z půd dominují podzoly (Bormann a Likens 1967). Oblast je tedy velmi podobná našim klimatickým podmínkám.

Vlivem odlesnění na chemismus toku se vědci zabývají až do dnešní doby. A to nejen z hlediska porozumění biochemickým procesům po disturbanci, ale i z hospodářského hlediska. Mnoho studií je zaměřeno na hledání šetrné míry odlesnění, ať už z hlediska rozsahu nebo typu těžby (např. Brown a Binkley 1994, Arthur *et al.* 1998, Swank *et al.* 2001, Palviainen *et al.* 2014, Yurtseven *et al.* 2017).

Limity dosavadních výzkumů spočívají hlavně ve velké variabilitě výsledků. Odpověď na odlesnění je ve většině případů specifická pro konkrétní lokalitu, neboť na výsledný chemismus vody má kromě disturbance vliv celá řada faktorů. Většina prací také pracuje s malými povodími do 50 ha, protože v nich lze nejlépe odfiltrovat vnější vlivy.

### **Faktory ovlivňující chemismus toku v nenarušeném povodí**

Chemismus vody je ovlivňován klimatem, geologickými poměry ale i geografickými a biologickými poměry dané oblasti. Z dostupné literatury určil Feller (2005) 5 klíčových faktorů, které určují chemické složení vody v tocích. Jsou jimi: zvětrávání hornin (1), srážky a klima oblasti (2), biologické procesy v půdě (3),

fyzikální a chemické reakce v půdě (4) a biologické, chemické a fyzikální procesy v samotné vodě a hyporeálu (5).

Zvětrávání hornin ovlivňuje koncentrace  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$  a Si v tocích (Feller 2005). Rozsah vlivu pak záleží na typu půdy a podloží. Obecně je vliv zvětrávání hornin výraznější v oblastech s vývojově mladšími půdami než v oblastech s vývojově staršími půdami. Vyplavování závisí také na typu podloží například u hrubozrnných vyvřelých hornin dochází k zanedbatelnému vyplavování látek, zatímco ve vápencových oblastech lze očekávat vody bohaté na  $Ca^+$  a  $Mg^{2+}$  (Feller 2005).

Ze srážek se do toku dostává hlavně  $H^+$ , zvýšení okyselení vody pak může být příčinou zvýšení koncentrací mnohých iontů ve vodě (Feller 2005). U nás již překonaným problémem jsou pak kyselé deště, ze kterých se do vod mohou dostat  $SO_4^-$  a  $NO^x$ , které rovněž způsobují snížení pH.

Biologické procesy zahrnují příjem živin rostlinami, chemické transformace indukované organismy a produkci chemických látek organismy. Příjem rostlin z půdy, a tím pádem částečně i z toku, odebírá hlavně makrobiogenní prvky důležité pro růst rostlin. Příjem rostlin závisí na ročním období - v zimě, v období vegetačního klidu, je nižší. Chemické transformace (např. dekompozice mikroorganismy nebo vyluhování látek z opadu) jsou pak zdrojem především N,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , P,  $H^+$ ,  $Mg^{2+}$  (Feller 2005).

Z chemických a fyzikálních reakcí v půdě a ve vodě lze vyzdvihnout pH indukované reakce. Změny v koncentracích  $H^+$  ovlivňují rozpustnost mnoha chemických sloučenin a formu, ve které se nachází a účinnost většiny dalších reakcí.

## **Buffer zóna**

Významným faktorem ovlivňujícím množství látek vyplavovaných do toku je přítomnost pásu příbřežní vegetace. Ta zde plní funkci v anglické literatuře označované jako „*buffer zone*“ nebo také „*stream buffer*“. Buffer zónu v tomto případě chápeme jako ochranné pásmo kolem toku, které má příznivý vliv na složení vody v toku. Dochází v ní k filtraci a vytváření komplexů s půdními částicemi chemických sloučenin vyluhovaných z okolního prostředí, dále brání zvýšenému splachu částic půdy z okolí, zpomalení odtoku a v neposlední řadě v ní dochází k biochemickým procesům zlepšujícím chemické složení vody, např. denitrifikace (Feller 2005, Boggs *et al.* 2016). V neposlední řadě má také vliv na teplotu vody a je

významným zdrojem alochtonního organického materiálu v toku (Burton a Likens 1973).

Pozitivní vlastnosti buffer zóny jsou nezpochybnitelné, nicméně rozsah jejího vlivu po odlesnění je obtížně měřitelný. Záleží na sklonu svahu, vlastnostech půdy ale i na vegetačním složení (Belt *et al.* 1992, Castelle *et al.* 1994). Nad ideální šířkou buffer zóny panují pochyby. Obecně lze říci, že čím je širší, tím lépe. Clinton (2011) uvádí, že šířka 10 m je dostačující pro zachování hodnot chemických a fyzikálních faktorů na stejných hladinách jako před odlesněním. Nicméně mezi jím zkoumanými šířkami buffer zóny 10 m a 30 m už nebyl statisticky významný rozdíl, je tedy možné, že obecná poučka „čím širší, tím lepší“ má své limity. Z rešeršní práce od autorů Castelle *et al.* (1994) vyplývá, že pro zachování chemických a fyzikálních parametrů v toku je vhodná šířka 15-30 m v závislosti na dalších podmínkách (sklonu svahu, vlastnostech půdy a druhu vegetace).

### **Regenerace porostu po odlesnění**

Rychlost regenerace porostu po odlesnění je klíčovou vlastností pro znovuoobnovení koloběhu látek, zpevnění obnažené půdy a hlavně snížení dopadů odlesnění na tok. Zvláště pionýrské druhy dřevin jsou v tomto případě důležité. Jsou rychle rostoucí, relativně krátkověké, a hlavně ekonomicky bezcenné, nicméně jejich vliv na ekologické procesy je významný, zvláště pak v dnešní době, kdy nejsme schopni neprodleně zalesnit odlesněné plochy po kůrovcové kalamitě. Pionýrské dřeviny zabraňují vyplavování živin do toku, díky transpiraci snižují odtok a také chrání půdu před erozí (Marks a Bormann 1972). Rychlé znovuoobnovení porostu značí rychlejší návrat změn chemismu a hydrometrických vlastností do hodnot před odlesněním (Stednick 1996, Feller 2005).

### **Odlesnění do 1/3 porostu**

Do této kategorie jsem zahrnula holoseče do 1/3 původní plochy a výběrný způsob těžby. Na toto téma není mnoho publikací, neboť vliv je obecně malý, a tudíž hůře prokazatelný. Většina prací se zabývala holosečí, neboť u výběrného způsobu lze předpokládat, že jeho vliv na tok bude nevýznamný.

Vliv na hydrologický režim je při odlesnění do 1/3 porostu malý. Při tomto typu odlesnění dochází pouze k mírnému, nicméně statisticky významnému zvýšení objemu odtoku. Objem odtoku se na své původní hodnoty vrací až po čtyřech letech

po odlesnění, a to po osídlení ploch pionýrskými dřevinami, čímž dochází ke zvýšení transpirace (Martin *et al.* 2000). Další změnou je také dřívější odtok vody po zimě z tání sněhu. Množství vody však zůstává stejné jako v předchozích letech. Tento jev byl způsoben především větším přístupem slunečních paprsků do porostu (Martin *et al.* 2000). K obdobným výsledkům došly také další studie. Odtok zůstává zvýšený bezprostředně 3-4 roky po zásahu, poté se vlivem zarůstání odlesněných ploch pozvolna vrací k hodnotám před odlesněním (Baker 1986, Shimizu *et al.* 1994). Nicméně jak Baker (1986), tak Shimizu *et al.* (1994) dále uvádějí, že vztah mezi mírou odlesnění a zvýšením odtoku není úplně jasný. Odtok podle nich hodně závisí na celkovém množství srážek v daném roce, takže tento ukazatel nemusí být směrodatný. Při výběrné těžbě 11 ani 18 % porostu nedošlo ke statisticky významnému zvýšení ročního odtoku (Özyuvaci *et al.* 2004, Serengil *et al.* 2007, Gökbülak *et al.* 2016). Ke zvýšení odtoku došlo pouze sezónně, v zimě, kdy byla nízká transpirace a také v měsíci bezprostředně po odlesnění. Odtok se však velmi rychle vrátil na hodnoty před odlesněním vlivem rychlé regenerace vegetace (Özyuvaci *et al.* 2004). Z rešeršní práce Hibbert (1965) pracující se vzorkem 39 experimentů vyplývá, že při odlesnění menším než 20 % dochází pouze k zanedbatelným změnám v odtokových poměrech. Rozdíly se pak projevují na základě míry odlesnění. Méně odlesněné zkoumané oblasti se vyznačují menšími změnami a rychlejším návratem do původního stavu.

Také vliv na fyzikální a chemické vlastnosti není důkladně popsán. Z fyzikálních vlastností vody byly významné změny popsány pouze v několika pracích. Burton a Likens (1973) uvádí, že při holoseči do 30 % původního porostu dochází ke změně teploty vody. U teploty vody je však naprosto klíčové, zda došlo k odstranění přibřežní vegetace, což je případ zmíněné práce. Brown a Krygier (1970) uvádí, že v odlesnění menším než 30 % stále převažuje vliv klimatu nad vlivem odstranění porostu, v jeho experimentu také nebyla odstraněna přibřežní vegetace.

Jediné další prokazatelné změny v chemismu vykazují dusičnany. I menší odlesnění totiž narušuje cyklus dusíku. Hodnoty  $\text{NO}_3^-$  se po odlesnění statisticky významně zvyšují a zůstávají zvýšené i několik dalších let (Martin *et al.* 2000, Oda *et al.* 2018). Doba návratu k hodnotám před zásahem je variabilní podle místních podmínek a podle srovnávací studie se pohybuje kolem 3-9 let (Oda *et al.* 2018). Další chemické ukazatele se mohou zvýšit hned po zásahu, ale nejvýše do

roka se zase vrací zpět na své původní hodnoty. I tyto jednotlivé odpovědi jsou však specifické pro dané podmínky (klimatické i geografické). Jedná se o tyto zkoumané ionty:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  a  $\text{H}^+$  (Likens *et al.* 1998, Martin *et al.* 2000, Wang *et al.* 2005).

Obecně se autoři shodují, že zásahy pod 20-30% odlesnění nemají výrazný vliv na hydrologii a chemismus vody (Hibbert 1965, Baker 1986, Wang *et al.* 2005, Siemion *et al.* 2011, Yurtseven *et al.* 2017). Nejšetřnějším zásahem je výběrná těžba porostu, v ostatních případech pak záleží na okolních klimatických, geografických a geologických podmínkách, nicméně ekosystém se vrací k původním hodnotám před odlesněním většinou nejpozději do dvou let po zásahu (s výjimkou  $\text{NO}_3^-$ ).

### **Odlesnění nad 1/3 porostu**

Obecně převažují studie zabývající se velkoplošným odlesněním, neboť tak lze lépe dosáhnout měřitelných odpovědí. V textu níže píší převážně o celkovém odlesnění, tedy odlesnění 100 % porostu, pokud se jedná o odlesnění menší plochy, jsou zmíněny konkrétní případy.

Při odlesnění porostu dochází ke zvýšení hydrometrických charakteristik toku. Dochází ke zvýšení ročního objemu odtoku vody. Hornbeck *et al.* (1970) uvádí zvýšení o 39 % v prvním roce po zásahu. Zvýšení ročního objemu odtoku uvádí také Arthur *et al.* (1998) a Martin *et al.* (2000). Martin *et al.* (2000), jehož studie porovnávala více experimentů, však uvádí, že změny ročního objemu odtoku nebyly statisticky významné. Změny odtoku jsou velmi variabilní a závislé na srážkách, a jak již bylo výše zmíněno, evapotranspiraci. Hned druhý rok po odlesnění byl objem odtoku ve výše zmiňované studii o polovinu menší než v prvním roce. Za tuto poměrně rychlou změnu může regenerace porostu a jeho transpirace. Rychlost regenerace porostu je v tomto případě klíčová a výrazně snižuje dobu zvýšení odtoku (Hibbert 1965, Baker 1986, Feller 2005). Při delší regeneraci porostu však může zvýšení odtoku přetrvávat i více let, dle uvedených studií 9 a více let (Arthur *et al.* 1998) a 14 a více let (Martin *et al.* 2000). Hibbert (1965), jehož rešeršní práce srovnává 39 předchozích experimentů zabývajících se odtokem, upozorňuje, že důsledky odlesnění na vodní režim toku jsou velmi variabilní a ve většině případů nepredikovatelné.

Z fyzikálních faktorů byla při tomto typu odlesnění zkoumána teplota, turbidita a konduktivita. Dochází ke zvýšení maximální denní teploty (Likens *et al.*



1970). Zvýšení v letních měsících může nastat i o 10 °C (Brown a Krygier 1970, Swift a Messer 1971). Odlesnění také způsobuje větší rozdíly mezi maximální a minimální denní teplotou (Brown a Krygier 1970, Swift a Messer 1971). Chybějící porost nebrání přímému vyzařování tepla, voda se tedy v noci rychleji ochlazuje. Změny se, tak jako u většiny faktorů, vytrácí spolu s postupnou regenerací porostu a jsou individuální a závislé na přítomnosti/nepřítomnosti břehové vegetace. Změny turbidity byly předmětem pouze malého množství studií. Poměrně podrobně se jí zabývali pouze Likens *et al.* (1970) v experimentálním lese Hubbard Brook. Zvýšení turbidity je patrné především po větších srážkách či bouřích, nicméně je statisticky nevýznamné (Likens *et al.* 1970, Patric a Reinhart 1971). Dalším zkoumaným parametrem je konduktivita, která může sloužit jako orientační odhad koncentrací iontů ve vodě. Její zvýšení po odlesnění potvrzují všechny studie, které se jí zabývaly (Likens *et al.* 1970, Patric a Reinhart 1971, Arthur *et al.* 1998, Neal *et al.* 2003). V jednom případě dokonce uvádí ztrojnásobení původních hodnot (Patric a Reinhart 1971).

Změna chemických faktorů vody po holosečné těžbě je nejlépe prozkoumanou oblastí. Důležitý faktor ovlivňující mnohé další chemické parametry je pH. Bylo pozorováno snížení hodnot pH nebo faktor nejevil žádné změny v hodnotách. Neal *et al.* (2003) prokázal slabé snížení pH ze 4,7 na 4,5. Tento experiment probíhal ve Walesu v jehličnatém porostu při celkové holoseči, kde pokácené stromy ponechali na místě. Tato studie naznačuje, že hodnoty pH se navrátily do hodnot před zásahem až po snížení koncentrace dusičnanů ve vodě, tedy po pěti letech od zásahu. Stejný vzorec však nebyl pozorován v žádné další práci. Nicméně Likens *et al.* (1970) naznačuje, že narušení cyklu dusíku, a tedy i větší vyplavování dusičnanů, může být hlavní příčinou zvýšeného vyplavování živin a tím pádem ovlivňovat i pH. Likens *et al.* (1970) prokázal snížení pH z 5,1 na 4,3 v průběhu tří let po zásahu, a to po kompletní holoseči smíšeného lesa. V tomto případě však byla oblast ošetřována herbicidy pro zabránění regenerace porostu. Při 50% odlesnění povodí došlo k mírnému snížení pH a to o 7 %, tedy obdobně jako v experimentu od autorů Neal *et al.* (2003) (Tremblay *et al.* 2009). U dalších experimentů se neprokázala významná změna pH (Arthur *et al.* 1998, Fukazawa *et al.* 2006, Löfgren *et al.* 2009). V těchto experimentech byl zachován přibřežní porost, tedy výše zmíněná buffer zóna, který může významně snížit vliv těžby na tok.

Po odlesnění dochází k narušení cyklu dusíku v ekosystému. V půdě dochází ke kumulaci  $\text{NH}_4^+$ , který by byl za normálních podmínek asimilován mykorhizou a využit stromy. Zvýšené množství  $\text{NH}_4^+$  tedy využijí nitrifikační bakterie, jejichž množství se navíc ještě znásobí, aby pojmuly všechny dostupný  $\text{NH}_4^+$ . Časem se navíc začnou rozkládat odumřelé kořeny, čímž se do půdy uvolňuje další dusík. Dusičnany vzniklé nitrifikací nejsou v půdě nijak silně vázány, a tak jsou vyplavovány do toku. Zvýšení množství dusičnanů v toku lze považovat za typický důsledek odlesnění. Na jejich zvýšení se shodují všechny studie, které jejich přítomnost v toku zkoumaly (Likens *et al.* 1970, Arthur *et al.* 1998, Dahlgren 1998, Neal *et al.* 2003, Löfgren *et al.* 2009, Tremblay *et al.* 2009, Siemon *et al.* 2011, Palviainen *et al.* 2014, Boggs *et al.* 2016). Oda *et al.* (2018) ve své metaanalýze, která zahrnuje 22 předchozích studií převážně holosečí, uvádí, že hodnoty dusičnanů se zvýšily u všech zahrnutých prací a doba návratu k původním hodnotám se pohybovala mezi 6-10 lety. Vrcholu ve vyplavování je dosaženo zpravidla minimálně 6 měsíců po odlesnění (Boggs *et al.* 2016). V této prodlevě dochází k již výše zmíněné kumulaci amoniaku v půdě, rozkladu kořenů, a hlavně pomnožení bakterií schopných nitrifikace. Oda *et al.* (2018) uvádí průměrné zpoždění maximálních vyplavovaných hodnot 1,8 roku. Rozmezí jednoho roku až dvou roků bylo pozorováno také v další studiích (Neal *et al.* 2003, Arthur *et al.* 1998, Siemon *et al.* 2011). V podmínkách porostu s dobrou výmladkovou schopností lze pozorovat nižší zvýšení dusičnanů, neboť dusík je zde stále přijímán stromy (Dahlgren 1998). K nižšímu vyplavování napomáhá také příbřežní zóna, ve které hojně dochází k denitrifikaci (Feller 2005).

Celkový fosfor na rozdíl od předchozích parametrů většinou zůstává nezměněn. Brown a Binkely (1994) ve své rešeršní práci srovnávající 17 studií uvádí, že většinou dochází pouze k malým, statisticky nevýznamným změnám v jeho koncentracích. Hlavně studie z našeho století však poukazují i na statisticky významné zvýšení celkového fosforu (Löfgren *et al.* 2009, Palviainen *et al.* 2014, Boggs *et al.* 2016). Signifikantní zvýšení  $\text{PO}_4^{3-}$  pak prokázala pouze jedna práce (Tremblay *et al.* 2009). Změny celkového fosforu jsou tedy variabilní dle místních podmínek. Fosfor je navíc v půdě mnohem lépe vázán než dusík, proto dochází k jeho vyplavování v mnohem menší míře.

Hliník se ve vodě vyskytuje v podobě komplexů nebo jako kationt  $\text{Al}^{3+}$ , který je významný svou toxicitou. Hliník se lépe uvolňuje při nízkém pH. Zvýšení koncentrací hliníku bylo tedy prokázáno v pracích, ve kterých došlo ke snížení pH (Likens *et al.* 1970, Neal *et al.* 2003). Zvýšení zaznamenal i Siemon *et al.* (2011), v jejich práci však neměřili pH.

Vápník se do toku dostává převážně vyplavováním z podloží a rozkladem organické hmoty zanechané na místě po odlesnění (Feller 2005). Jeho zvýšení pozorovali autoři hned v několika studiích (Likens *et al.* 1970, Arthur *et al.* 1998, Siemon *et al.* 2011). Jeho zvýšení bylo signifikantní první rok po odlesnění, další rok už se vápník vrátil na původní hodnoty (Likens *et al.* 1970, Arthur *et al.* 1998). Stejně jako u dalších prvku znamená snižující se pH zvyšující se množství  $\text{Ca}^{2+}$  (Feller 2005).

Další kationty a anionty se mohou vyplavovat v důsledku snížení pH po odlesnění. Snížení pH může vést ke zvýšení již výše zmíněného  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  a  $\text{K}^+$  (Likens *et al.* 1970, Arthur *et al.* 1998, Feller 2005). Dále může díky snížení pH dojít k redukci  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Mn}^{3+}$  na  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Mn}^{2+}$ , které se mohou taktéž vyplavovat do toku (Neal *et al.* 2003, Feller 2005).

Pro odlesnění nad 1/3 porostu lze říci, že odlesnění zvyšuje koncentrace dusičnanů v toku. Změny v ostatních parametrech jsou velmi variabilní a záleží na lokálních podmínkách prostředí. Dlouhodobé výsledky z Hubbard Brook ukazují, že vrchol vyplavování prvků do toku nastává druhý rok po odlesnění a poté již jejich koncentrace klesají (Likens 2004).

## Metodika

### Vybrané toky

Pro svou práci jsem si vybrala dvě sousedící povodí, která byla v posledních 5 letech kvůli kůrovcové kalamitě a suchu ve větší míře odlesňována (data z ÚHÚL). Jedná se o toky Sitka a Teplička, které jsou levostrannými přítoky toku Oskava, která se dále vlévá do řeky Moravy. Hlavním předmětem zájmu je tok Sitka, neboť pro tento tok jsem získala data chemických analýz z předchozích let od Povodí Moravy. Teplička představuje kontrolní povodí. Bohužel jsem v okolí nenalezla jiné zalesněné povodí, které by bylo svými podmínkami podobné povodí Sitky, ale nebylo by vůbec odlesňováno.

Tok Sitka pramení mezi obcemi Rýžoviště a Stránské v okrese Bruntál v Nížkém Jeseníku. Jeho celková délka je 35,1 km s plochou povodí 66,4 km<sup>2</sup> (Štefáček 2008). Zájmovým územím je v tomto případě asi 9 km dlouhý úsek povodí mezi obcí Huzová a Šternberk Horní Žleb, ve kterém tok protéká úzkým zalesněným údolím. Podloží tvoří převážně droby a břidlice.

Tok Teplička pramení pod obcí Kněžpole v okrese Bruntál v Nížkém Jeseníku. Délka toku je 26 km s plochou povodí 60,4 km<sup>2</sup> (Štefáček 2008). Zájmovým územím je oblast od pramene po Pasecký Žleb. Stejně jako v případě Sitky protéká tok úzkým zalesněným údolím a v podloží převažují droby a břidlice.

### Odběr vzorků

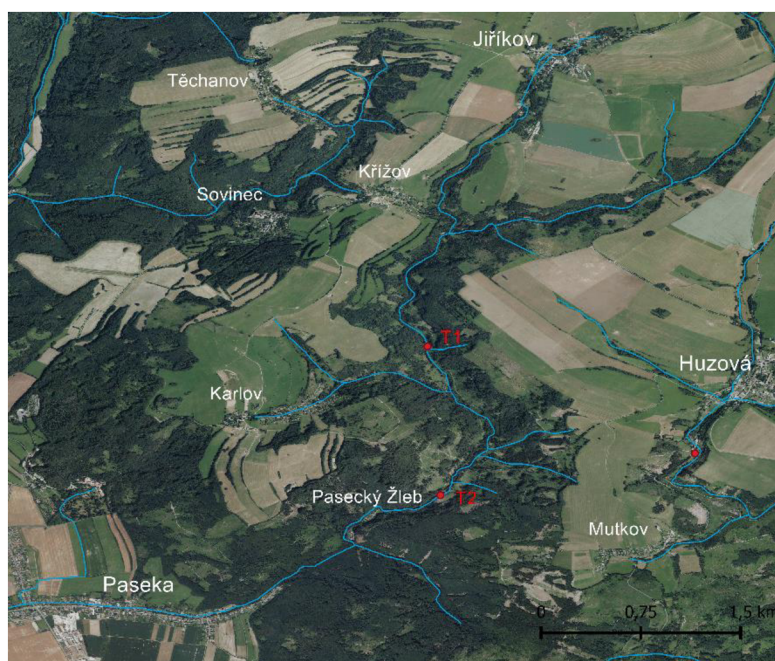
Odběr vzorků probíhal jednou měsíčně během kalendářního roku 2020. Kvůli pandemii koronaviru a restrikcím však některé analýzy nebylo možné provést, a proto březnový odběr vůbec neproběhl a za duben a listopad mám pouze data některých parametrů. Vzorky jsem odebírala na třech místech na Sitce (obr. 1) a dvou na Tepličce (obr. 2).

Na toku Sitka jsem zvolila první odběrné místo (S1) na horním konci zalesněného údolí. Tedy pod obcí Huzová, kterou Sitka protéká, a to z důvodu odfiltrování vstupních hodnot z blízké obce a okolních pastvin na GPS souřadnicích 49.8123625N, 17.2915078E. Druhé odběrné místo (S2) se nachází přibližně v polovině údolí na souřadnicích 49.7971550N, 17.3085881E. Třetí odběrné místo (S3) se nachází v blízkosti kamenolomu Horní Žleb na souřadnicích

49.7641683N, 17.3174581E. Toto místo je zároveň odběrovým místem Povodí Moravy, ze kterého jsem měla k dispozici data chemických analýz z let 2007, 2008, 2010, 2013, 2016 a 2019. Na toku Teplička jsem si zvolila první odběrné (T1) místo přibližně v polovině zájmové části toku na souřadnicích 49.8235303N, 17.2635858E. Druhé odběrné místo (T2) se nachází nad místní částí obce Paseka, Pasecký Žleb na souřadnicích 49.8080003N, 17.2649325E.



Obrázek 1: Odběrná místa na toku Sitka



Obrázek 2: Odběrová místa na toku Teplička

Vzorky jsem odebírala do plastových vzorkovnic a do analýzy, která probíhala druhý den, jsem je uchovávala v lednici. Na místě, přímo z toku, jsem měřila pouze pH a to pomocí pHmetru Voltcraft PH-100 AT. Ostatní parametry jsem měřila v laboratoři.

## **Chemická analýza vzorků**

Sledované chemické parametry jsem vybírala převážně na základě dostupné literatury a jejich výsledků (Liknes *et al.* 1970, Arthur *et al.* 1998, Feller 2005). Parametry měřenými v laboratoři jsou konduktivita,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , obsah železa, hliníku a vápníku. Kromě železa, hliníku a vápníku byly parametry zjišťovány do 24 hodin od odebrání vzorku. Zmíněné prvky byly měřeny až souhrnně. Do měření byly vzorky zakonzervovány kyselinou dusičnou (Horáková *et al.* 1989).

Konduktivitu jsem měřila konduktometrem typu DiST 3 (Hanna Instruments, Inc.). Měřila jsem ji v odebraných vzorcích v laboratoři při 25 °C ve shodě s postupem použitým Povodím Moravy. Dusičnany jsem stanovovala spektrofotometricky za využití spektrofotometru typu Hach Lange DR 2800 za využití činidla NitraVer 5. Tato metoda je založena na redukci dusičnanů kadmíem na dusitany, při které vzniká diazoniová sůl. Ta dále reaguje s kyselinou salicylovou za vzniku žlutě zabarveného produktu, jehož intenzita se následně měří. Množství fosforečnanů ve vzorku jsem stanovovala za využití spektrofotometru typu Hach Lange DR 2800 za využití činidla PhosVer 3. Tato metoda je založena na reakci ortofosfátů s molybdenem v kyselém prostředí za vzniku komplexu. Ten je redukován kyselinou askorbovou za vzniku modrého zabarvení. Obsah železa, hliníku a vápníku byl měřen pomocí atomového spektrometru GBC AVANTA  $\Sigma$  v plamenové verzi na plameni acetylen - vzduch (železo) a acetylen - oxid dusný (vápník a hliník).

## **Statistická analýza**

Pro statistickou analýzu a grafické výstupy jsem použila program R Studio. Rozdíly v chemických parametrech mezi toky jsem porovnávala pomocí dvouvýběrového t-testu. Pro analýzu možného trendu na toku Sitka v průběhu let jsem použila Seasonall Kendall test for trend (Hirsch *et al.* 1982). Tento test porovná sezóny, v mém případě jednotlivé měsíce, za několik let a určuje, zda mezi nimi meziročně dochází k nějakému vývoji.

## Výsledky

### Srovnání zájmových toků

Plocha odlesnění zájmových území v jednotlivých časových úsecích je zobrazena v tab. 1. K největšímu odlesňování docházelo mezi lety 2016-2018, kdy kůrovcová kalamita v Nízkém Jeseníku vrcholila (Zpráva o stavu lesa 2019). Data z let 2019 a 2020 bohužel zatím nejsou dostupná, nicméně z výroční zprávy za rok 2019 (Zpráva o stavu lesa 2020) lze usuzovat, že situace byla podobná jako v předchozím roce. V roce 2020 už v zájmovém území nedocházelo k výraznějšímu kácení, jako tomu bylo v předcházejících letech (vlastní pozorování).

*Tabulka 1: Plocha odlesnění zájmových území  
(data: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů-ÚHÚL)*

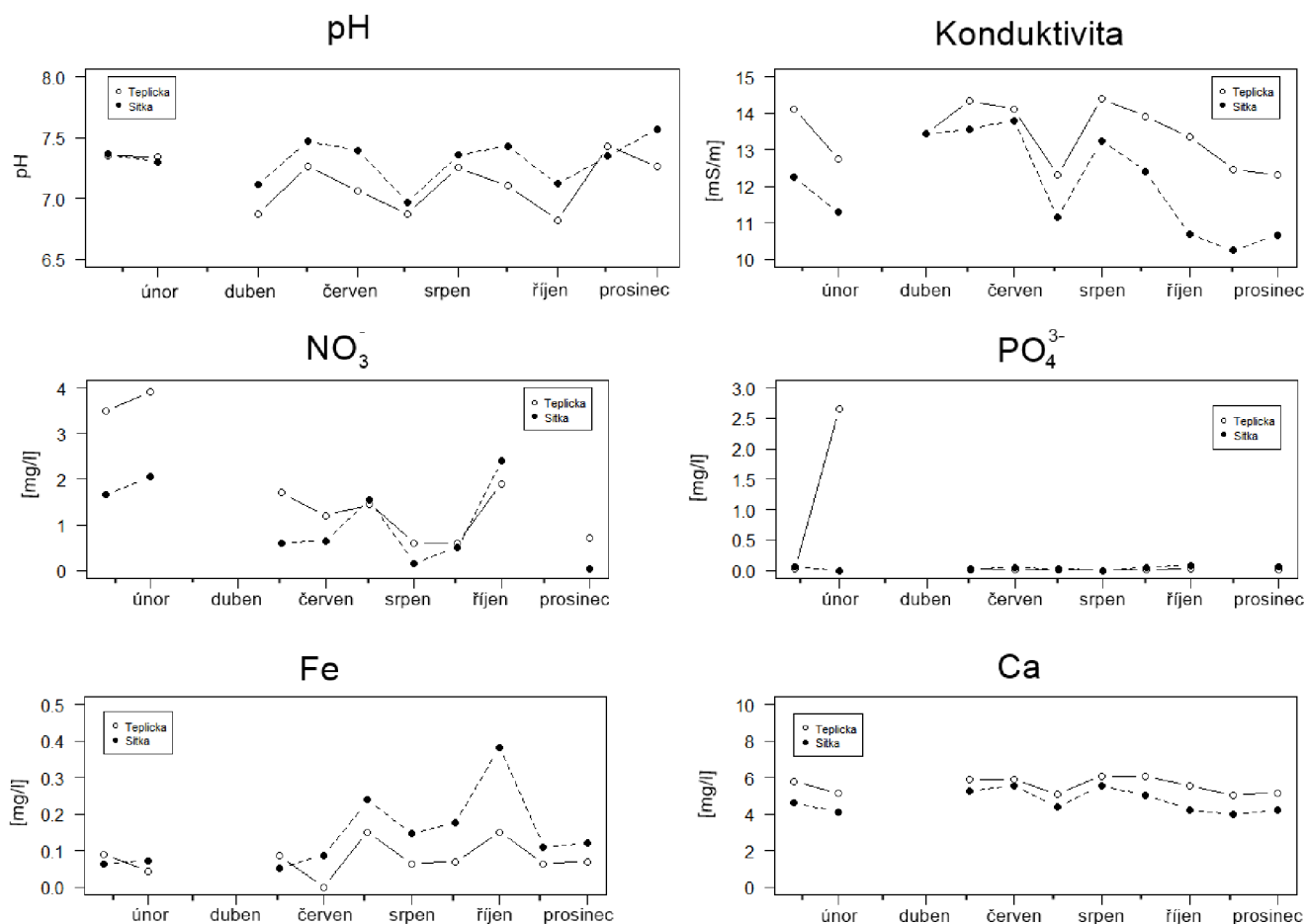
	Plocha odlesnění [ha]		Plocha odlesnění [%]	
	Teplička	Sitka	Teplička	Sitka
2003-2006	6,76	0,19	1,3	0,02
2006-2009	22,64	18,87	4,4	1,6
2009-2012	3,31	14,96	0,7	1,2
2012-2014	4,88	9,84	1,0	0,8
2014-2016	11,57	54,75	2,3	4,6
2016-2018	120,43	153,00	23,7	12,7
Celková plocha území [ha]	509	1 203		

Také na velikosti holin je patrný postupný nárůst. V letech 2016-2018 sice stále početně převládají holiny od 0,01 do 1 ha, zvyšuje se ale také početnost holin větších jak 1 ha a průměrná velikost holin (tab. 2).

*Tabulka 2: Četnosti velikostí a průměrná velikost holin na zájmovém území (data: ÚHÚL)*

	Teplička				Sitka			
	<0,01 ha	0,01-1 ha	>1 ha	prům. vel. [ha]	<0,01 ha	0,01-1 ha	>1 ha	prům. vel. [ha]
2003-2006	9	19	0	0,024	9	41	2	0,034
2006-2009	34	48	4	0,026	17	47	3	0,028
2009-2014	7	24	0	0,026	12	89	1	0,024
2014-2016	0	35	0	0,033	0	83	11	0,058
2016-2018	1	144	26	0,072	2	169	42	0,074

Zájmové toky se od sebe statisticky významně neliší v hodnotách pH,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  a Fe (obr. 3). Průkazný rozdíl je pouze v hodnotách konduktivity ( $p=0,0098$ ) a koncentraci Ca ( $p=0,0015$ ). Z grafů je však patrné, že rozdíly jsou také v pH a Fe. Kvůli pandemii však u všech sledovaných parametrů chybí data za březen. U Fe a Ca chybí data také za duben a u  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{PO}_4^{3-}$  chybí data za duben a listopad.

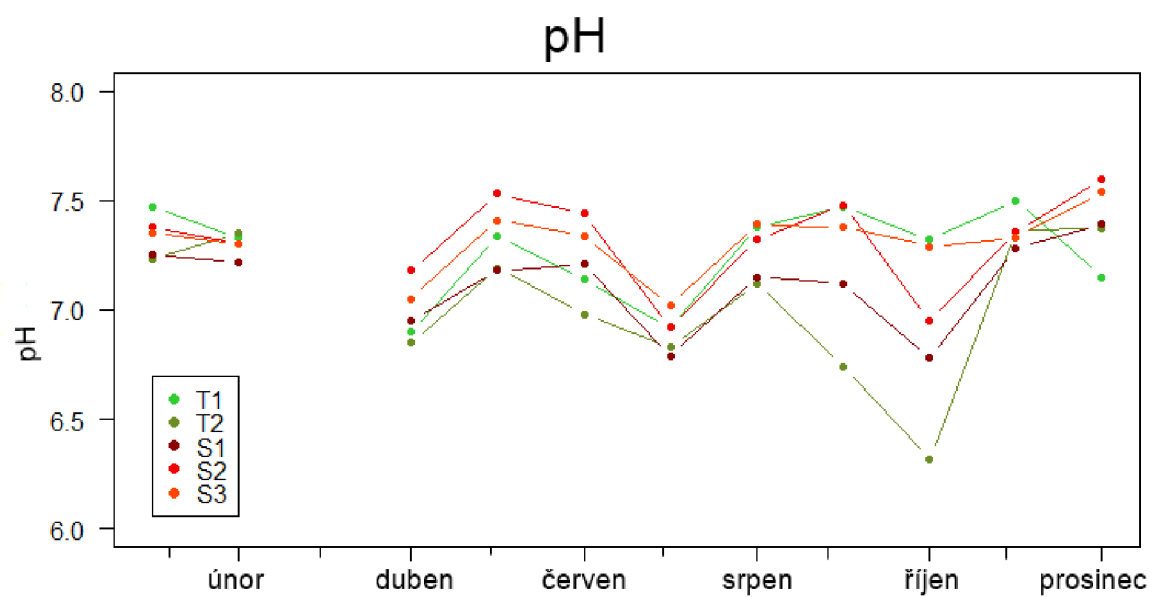


Obrázek 3: Srovnání vybraných parametrů v tocích za rok 2020

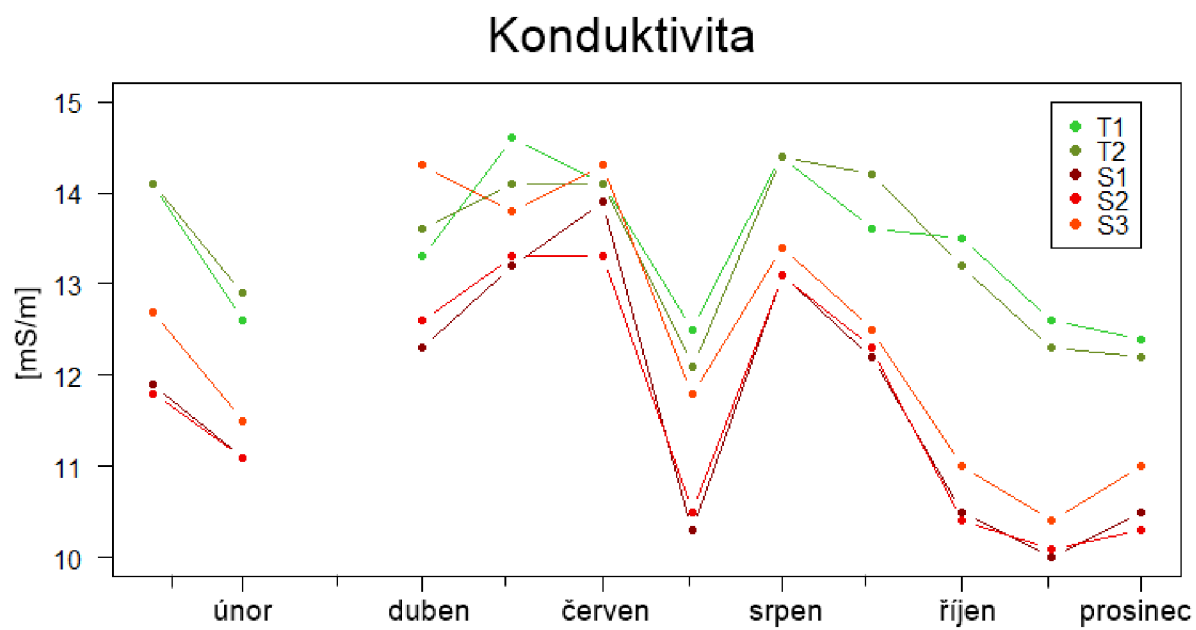
### Změny po průtoku odlesněným povodím

U parametru pH lze pozorovat, že na toku Teplička hodnoty mezi odběrovými místy klesají, zatímco na toku Sitka hodnoty po průtoku odlesněným povodím stoupají (obr. 4). Konduktivita na Tepličce nevykazuje žádný trend, na Sitce je patrné její mírné zvýšení, ale až na posledním odběrném místě S3 (obr. 5). U železa není na toku Teplička patrná žádná větší změna, zatímco na toku Sitka dochází po průtoku povodím ke snížení hodnot (obr. 6). U vápníku jsou patrné jen velmi malé změny po průtoku povodím Sitky (obr. 7) Ostatní nezmíněné parametry se po průtoku povodím nemění.

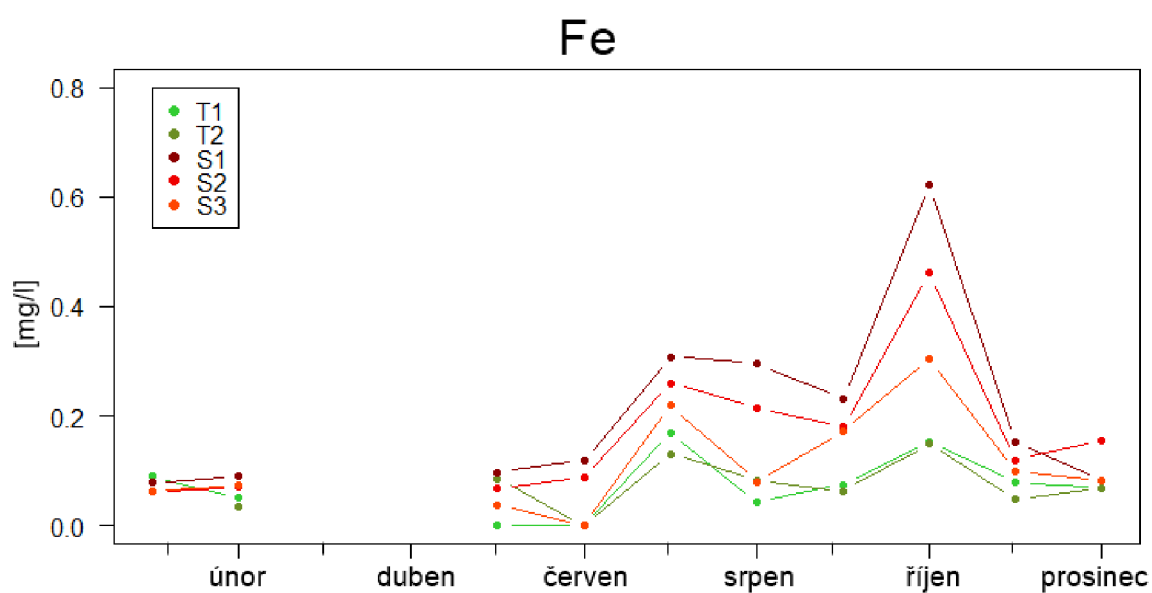




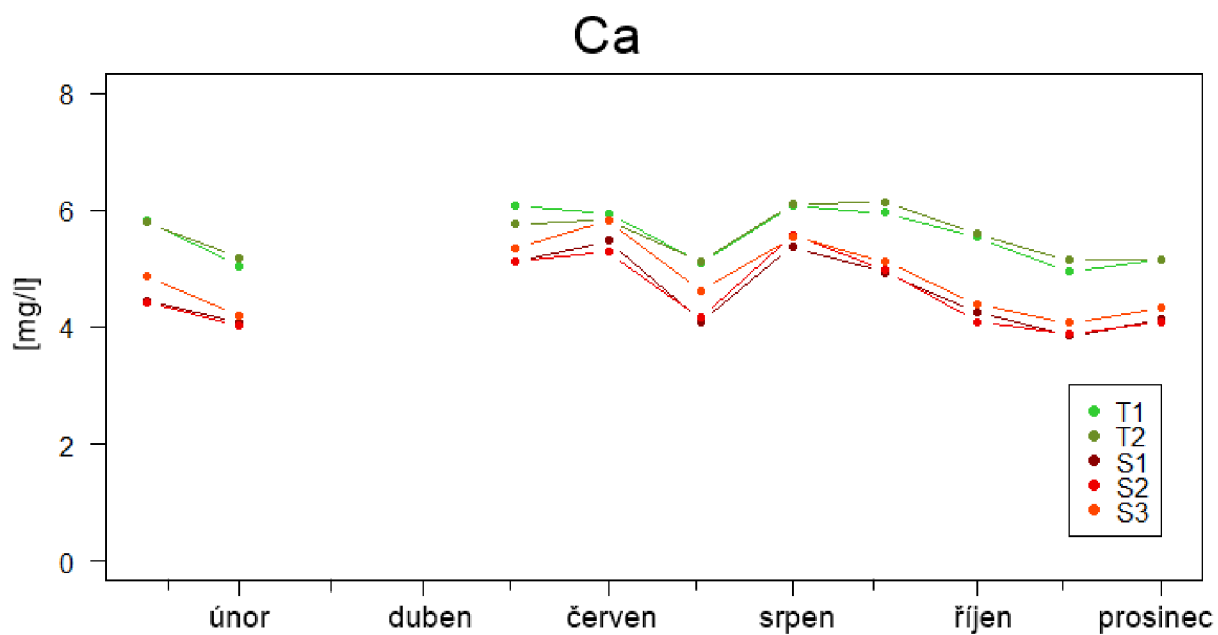
Obrázek 4: Srovnání pH na jednotlivých odběrových místech za rok 2020



Obrázek 5: Srovnání konduktivity na jednotlivých odběrových místech za rok 2020



Obrázek 6: Srovnání obsahu železa na jednotlivých odběrových místech za rok 2020



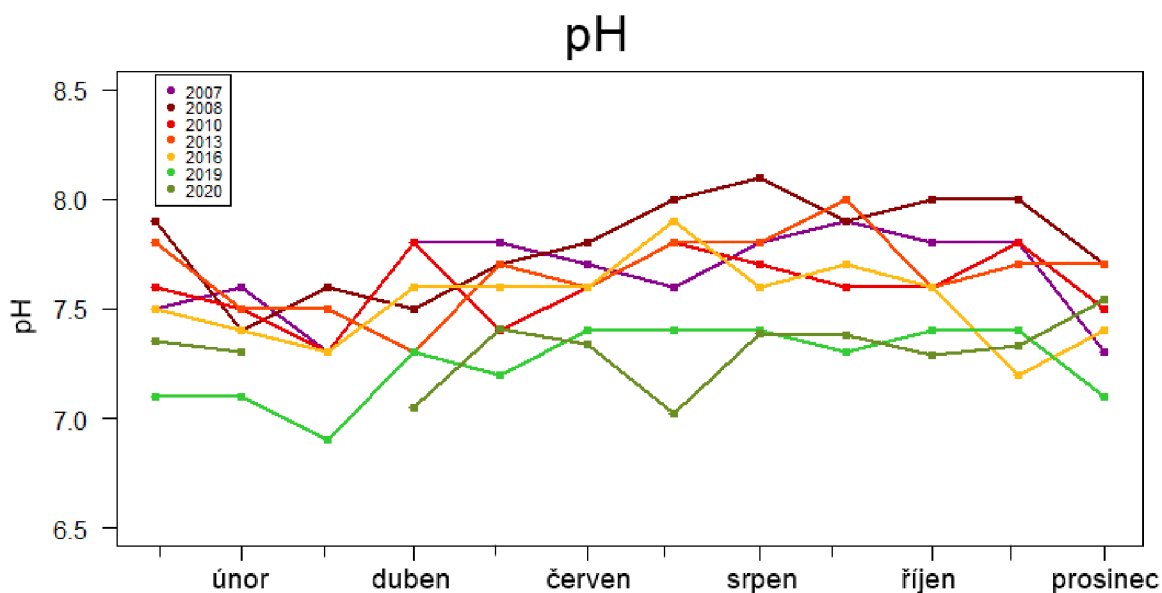
Obrázek 7: Srovnání obsahu vápníku na jednotlivých odběrových místech za rok 2020

## Analýza trendu na toku Sitka v průběhu let

Výsledky statistického testu Seasonall Kendall test for trend jsou zobrazeny v tab. 3. Nulová hypotéza říká, že mezi jednotlivými srovnávanými sezónami (v tomto případě měsíci) v letech není žádný trend a změny v hodnotách chemických parametrů jsou tedy na sobě nezávislé. V případě pH a Ca je p statisticky nevýznamné, u těchto parametrů tedy sledujeme určitý trend. Z hodnoty tau lze vyvodit, že v obou těchto případech je trend klesající. U pH (obr. 8) je tento trend výraznější, projevoval se v 9 z 12 měsíců.

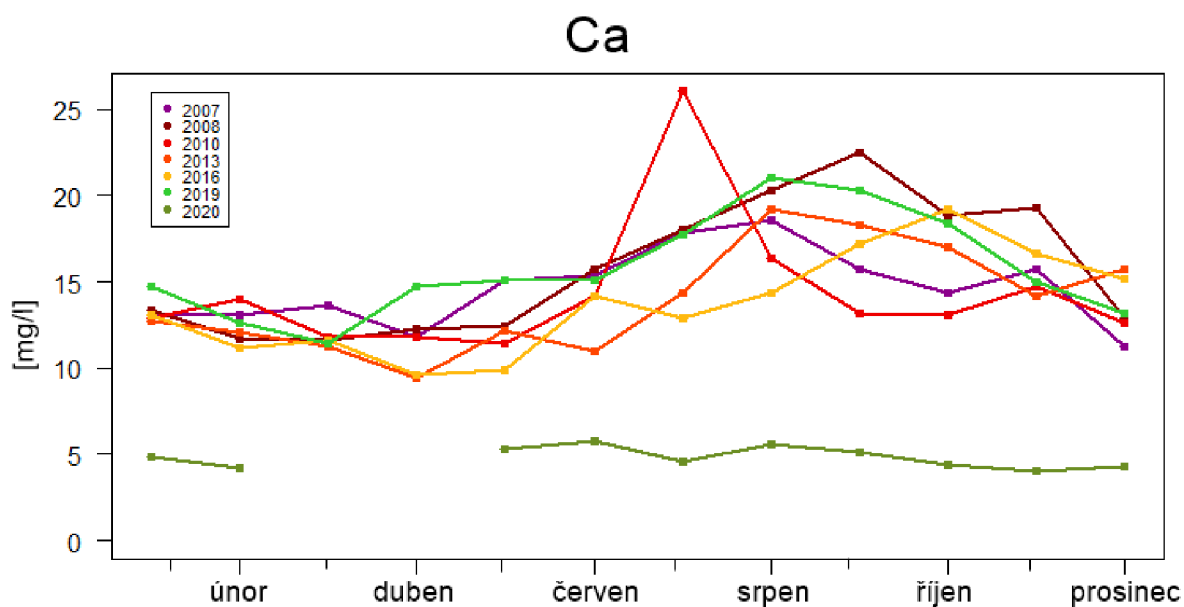
Tabulka 3: Kendall trend test (*tau*=statistický ukazatel, *slope*=medián meziročních rozdílů, *DF*=stupně volnosti, *p*=statistická významnost)

	<b>tau</b>	<b>slope</b>	<b>DF</b>	<b>p</b>
pH	-0,551	-0,0333	11	$1,248 \cdot 10^{-9}$
Konduktivita	-0,119	-0,0613	11	0,215
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,096	0,0095	11	0,438
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,032	0,0003	11	0,761
Fe	0,158	0,0020	11	0,215
Ca	-0,287	-0,2339	11	0,002

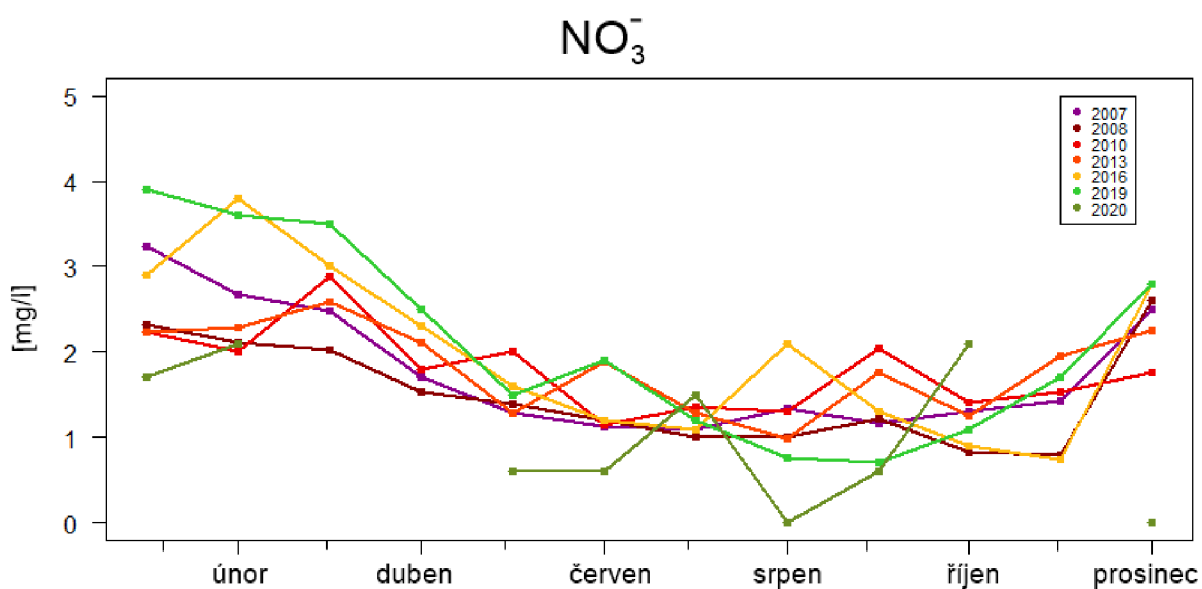


Obrázek 8: Porovnání hodnot pH na toku Sitka mezi lety

V případě Ca je však z grafu (obr. 9) patrné, že trend je způsoben hlavně vychýlenými, výrazně nižšími naměřenými hodnotami z roku 2020. Po opakování testu bez roku 2020 je trend neprůkazný ( $p=0,662$ ).

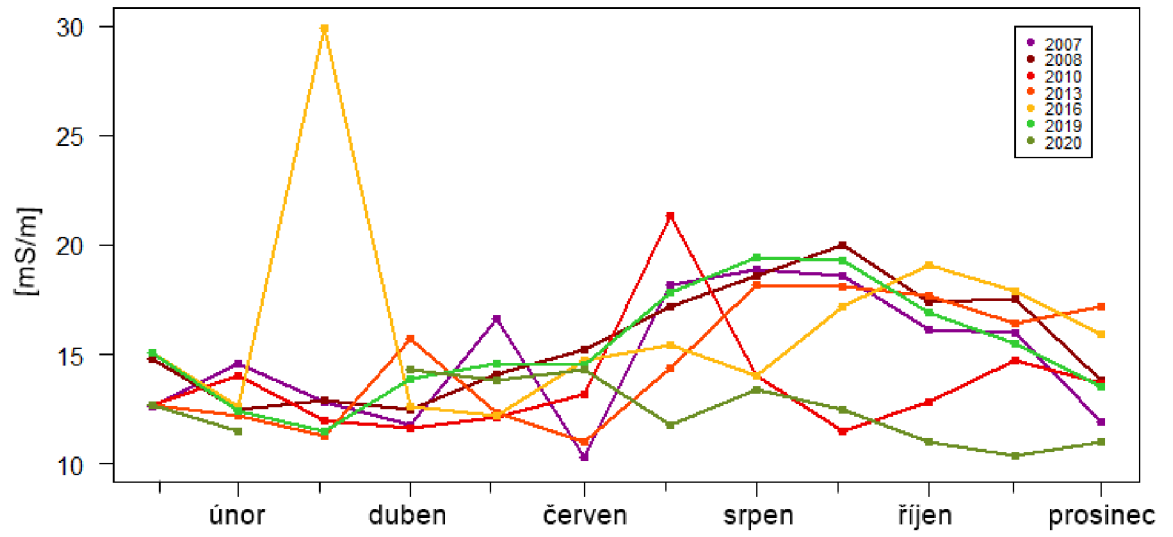


Obrázek 9: Porovnání hodnot vápníku na toku Sitka mezi lety



Obrázek 10: Porovnání hodnot dusičnanů na toku Sitka mezi lety

## Konduktivita



Obrázek 11: Porovnání hodnot konduktivity na toku Sitka mezi lety

## Diskuse

Výsledky práce ukazují, že zájmová údolí byla v posledních letech odlesňována pod 1/3 porostu. Plochy holosečí jsou však v posledních letech větší. Toky se od sebe prokazatelně lišily pouze v parametrech konduktivita a Ca, nicméně z grafu je patrné, že hodnoty Fe a pH v obou tocích se od sebe také lehce odlišují. I přes nízké procento odlesnění došlo po průtoku v obou povodích ke změnám pH, konduktivity, Fe a velmi lehce Ca. Analýza trendů mezi lety pak ukázala, že statisticky významný trend nalezneme jen u hodnot pH a Ca. Hodnoty Al se pohybovaly pod měřitelnou hodnotou, proto nakonec nejsou do práce zahrnuty. Na základě výsledků lze zkonstatovat, že změna proběhla hlavně u parametru pH.

Studie zabývající se změnami v toku po odlesnění pracují obvykle s malými povodími do velikosti 50 ha kvůli lepší prokazatelnosti změn. Má zájmová povodí jsou desetinásobně větší. V takovém případě mohou být změny hůře pozorovatelné. V konečném důsledku navíc odlesnění nebylo tak velké, jak jsem očekávala z vlastního pozorování, a nepřesáhlo hranici 1/3 zmíněnou v teoretické části. Moje práce tedy podporuje předchozí studie, které uvádí, že odlesnění pod 1/3 plochy nemá výrazný vliv na chemismus toku (Wang *et al.* 2005, Siemion *et al.* 2011, Yurtseven *et al.* 2017). Pozitivní vliv na chemismus toku má také buffer zóna a rychlá obnova porostu. Buffer zóna zůstala na většině míst zájmových území zachována, odlesnění v bezprostřední blízkosti toku (do 10 m) se vyskytuje pouze ojediněle. Její přítomnost tak může výrazně ovlivňovat přísun živin do toku (Belt *et al.* 1992, Clinton 2011).

V posledních letech se zvyšuje průměrná velikost holosečí v zájmových územích, lesníci tedy v nejkritičtějších letech 2016-2018 nestíhali zalesňovat holoseče ihned po vykácení a v roce 2020 se také potýkali s nedostatkem pracovních sil, neboť nemalá část sezónních dělníků ze zahraničí kvůli pandemii nemohla přicestovat (Jan Richter, hajný, ústní sdělení). Přírozená obnova právě v tomto případě může sehrát velkou roli. Revegetace, tedy opětovné zarůstání odlesněné plochy, výrazně snižuje erozi půdy, její vysychání a také vyplavování živin (Marks a Bormann 1972). Holoseče větší plochy díky většímu přístupu světla mnohem rychleji regenerují (Shure *et al.* 2006), v tomto případě na ně tedy lze pohlížet i pozitivně a z části tak vysvětlit převážně nezměněný chemismus toků.

## Srovnání zájmových toků

Toky se mezi sebou liší v hodnotách konduktivity, pH, Ca a Fe. Ač se jedná o toky protékající sousedícími údolími se stejným podložím, nelze předpokládat, že jejich složení bude naprosto totožné. Je možné, že se liší již zdroj jejich podzemní vody. Dalším faktorem může být také odlišné využívání povodí, plocha povodí, různá rychlost obnovy porostu anebo sklon svahů. Sitka navíc nad zájmovým územím protéká obcí Huzová, což může chemismus vody v toku ovlivnit. Odlesnění ovlivňuje mnoho procesů v toku i kolem něj. Ovlivnění je pro každý případ specifické, nelze proto ze srovnání dvou sousedních toků vyvozovat větší závěry (Feller 2005).

V grafu srovnání  $\text{PO}_4^{3-}$  se nachází odlehlá hodnota, která je mnohonásobně vyšší než obvyklé hodnoty. Nad odběrným místem se 4 dny před odběrem konala na myslivecké chatě v blízkosti toku soukromá akce spojená s porážkou prasete, je to tedy možná příčina této odlehlé hodnoty. Samozřejmě však nelze vyloučit také metodologickou chybu při odběru a analýze vzorku. Rozdílnost pH lze vysvětlit jiným poměrem zastoupení listnatých a jehličnatých dřevin v povodích. Kyselý smrkový opad a výluhy z něj se mohou dostat až do toku a okyselovat ho. Rozdílná konduktivita poukazuje na rozdílné množství iontů v tocích, přičemž v Tepličce byla vyšší. To také potvrzuje stejnou odlišnost toků v parametru Ca. Zdrojem Ca je v tomto případě pravděpodobně rozklad opadu. Opačný rozdíl, tedy vyšší množství na toku Sitka, je patrný u Fe. Množství Fe je nejvyšší na prvním odběrném místě (S1), je tedy možné, že jeho množství je dáno neznámým zdrojem výše na toku.

## Změny po průtoku odlesněným povodím

Změny po průtoku zájmovým územím jsou patrné u pH, konduktivity, Fe a Ca. Na toku Teplička dochází po průtoku povodím ke snížení pH, zatímco na toku Sitka pH stoupá. Chuman *et al.* (2012) uvádí, že obecně se většinou koncentrace látek níže po toku zvyšují. Ke stejným závěrům dochází také Likens a Buso (2006), kteří uvádí, že pH se v podélném profilu (se snižující se nadmořskou výškou) zvyšuje. Na toku Teplička se ovšem pH v podélném profilu snížilo, což může být následek odlesnění a výluhů z kyselého opadu smrků. U odlesnění do 1/3 porostu to není časté, ale také to není nemožné. Například Erdoğan *et al.* (2018) popisují, že pH se v jejich experimentu (výběrová těžba 18 %) statisticky významně snížilo pouze 4. rok po zásahu. Snížení pH bylo častěji pozorováno u odlesnění nad 1/3 porostu (např.

Likens *et al.* 1970, Neal *et al.* 2003, Tremblay *et al.* 2009). Na toku Sitka je patrné zvýšení konduktivity až na třetím odběrném místě (S3). Toto místo se nachází až pod místní částí Horní Žleb obce Šternberk navíc v blízkosti kamenolomu, což může být příčina zvýšení. Množství Fe po průtoku zájmovým územím Sitky klesá. Množství Fe na prvním odběrném místě na Sitce (S1) je ve srovnání s hodnotami na Tepličce vysoké. Zřejmě je tedy zdroj Fe na toku Sitka výše proti proudu. Možné je zvýšení v důsledku vyplavování z podloží ale i antropogenní činnost (např. korozivní procesy na materiálech v obci). Níže po toku se pak množství Fe naředí a je sníženo díky samočisticím procesům. Lehké zvýšení Ca lze přisuzovat většímu množství opadu a zbytků po těžbě a jejich rozkladu. Dekompozice je jeho největším zdrojem (Feller 2005).

### **Analýza trendu na toku Sitka v průběhu let**

Pro vyhodnocení trendu mezi jednotlivými roky jsem použila dostupná data od Povodí Moravy. Tato data však nebyla kontinuální a chybí v nich například hodnoty z let 2017 a 2018, které by mohly být pro mou práci klíčové. Seasonall Kendall test for trend (Hirsch *et al.* 1982) samotný funguje i v případě chybějících let mezi daty, ale změna chemismu po odlesnění je relativně rychlý proces. Největší změny jsou patrné nejčastěji v rozmezí 6 měsíců až 2 let po odlesnění (Likens *et al.* 1970, Boggs *et al.* 2016, Oda *et al.* 2018) a postupně se zpět zmenšují ke stavu před zásahem. Je možné, že ke změnám parametrů, především  $\text{NO}_3^-$ , došlo v letech 2017 a 2018, ze kterých ovšem nemám k dispozici data. Vzhledem k ploše odlesnění lze vyvodit, že potenciální změny parametrů byly malé, takže jejich návrat k původním hodnotám by navíc mohl být relativně rychlý.

Analýza trendu prokázala klesající trend pouze u parametru pH. V letech 2019 a 2020 bylo pH nižší než v předcházejících letech. Studie uvádí, že pokles pH je běžný, ale parametr se vyznačuje návratem do hodnot před odlesněním do roku po zásahu (Martin *et al.* 2000, Wang *et al.* 2005). V mém případě snížené pH přetrvává déle. Navíc změny po průtoku povodím ukazují, že pH po průtoku zájmovým odlesňovaným územím toku Sitka stoupá, zatímco na toku Teplička klesá. Zřejmě se tedy nejedná o změnu způsobenou odlesněním. U hodnot Ca je patrný výrazný rozdíl hodnot měřených Povodím Moravy a mých vlastních měřených hodnot. Studie připouští možnou změnu Ca po odlesnění, a to i při odlesnění do 1/3 porostu (Likens *et al.* 1998, Wang *et al.* 2005). Nicméně takto náhlá změna je



nepravděpodobná a spíše než s odlesněním, souvisí s rozdílností metod analýz vzorku. Povodí Moravy využívá pro analýzu Ca metodu ICP-MS, zatímco pro mé analýzy byla použita atomová spektrofotometrie, samozřejmě zde mohl sehrát roli i lidský faktor. Konduktivita se v roce 2020 (červenec-prosinec) viditelně snížila oproti ostatním rokům. Toto vychýlení bylo způsobeno srážkami, které byly v tomto roce vyšší než v předcházejících letech. Zvláště odběr vzorků v tomto období probíhal v deštivých dnech nebo dnech bezprostředně po dešti.

## Závěr

S kůrovcovou kalamitou se pravděpodobně budeme ještě několik let potýkat. V Nízkém Jeseníku se míra odlesňování začíná zpomalovat a sází se stále více listnatých dřevin. Plochy holin po těžbě také relativně rychle zarůstají i díky přirozené obnově porostu. Holoseče větších rozměrů se však stále objevují a kůrovcová kalamita není jedinou disturbancí, která může naše lesy potkat. Z mých výsledků vyplývá, že při odlesnění do 1/3 porostu dochází dlouhodobě pouze ke změně pH v toku. Prokázala jsem dlouhodobou změnu parametru již při odlesnění 12,7 %, což podle dosavadních výzkumů není obvyklé. Jistě by stálo za to vývoj této změny monitorovat i v dalších letech. Změny ostatních měřených parametrů, tedy konduktivity,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Fe a Ca, nebyly prokázány nebo pro jejich průkaznost chybí data z klíčových let, neboť změny u maloplošných odlesnění zpravidla nemají dlouhého trvání.

Pro komplexnější výsledky by bylo třeba dlouhodobého nepřerušovaného monitoringu nejlépe na více lokalitách, kvůli specifčnosti změn. Sledované změny po odlesnění jsou většinou negativní a dočasné. Doba trvání změn je však velmi individuální a může vydržet i 10 let, což už může mít dopad na biotu toku. Monitoring změn chemického složení v toku po odlesnění podává svědectví o procesech v ekosystému, ale také podává informace o vhodnosti a šetrnosti lesnického managementu.

## Literatura

- Arthur MA, Coltharp GB, Brown DL. 1998. Effects of best management practices on forest streamwater quality in eastern Kentucky. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(3), 481-495.
- Baker Jr. MB. 1986. Effects of ponderosa pine treatments on water yield in Arizona. *Water Resources Research*, 22(1), 67-73.
- Belt GH, O’Laughlin J, Merrill T. 1992. Design of Forest Riparian Buffer Strips for the Protection of Water Quality: Analysis of Scientific Literature. *Report (USA)*.
- Boggs J, Sun G, McNulty S. 2016. Effects of timber harvest on water quantity and quality in small watersheds in the Piedmont of North Carolina. *Journal of Forestry*, 114(1), 27-40.
- Bormann FH, Likens GE. 1967. Nutrient cycling. *Science*, , 155(3761), 424-429.
- Bormann FH, Likens GE. 1981. Pattern and process in a forested ecosystem.
- Brown GW, Krygier JT. 1970. Effects of clear-cutting on stream temperature. *Water resources research*, 6(4), 1133-1139.
- Brown, TC, Binkely D. 1994. Effect of management on water quality in North American forests. *US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station*.
- Burton TM, Likens GE. 1973. The effect of strip-cutting on stream temperatures in the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Bioscience*, 23.7: 433-435.
- Campbell JL, Lindsey ER, Bailey SW, Bernhardt ES, Driscoll CT, Green MB, Groffman PM, Lovett GM, McDowell WH, McGuire KJ, Rosi EM. 2020. Watershed Studies at the Hubbard Brook Experimental Forest: New Lines of Investigation Stemming from a Rich Legacy of Research. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. p. PA11C-0987.
- Castelle AJ, Johnson AW, Conolly C. 1994. Wetland and stream buffer size requirements—a review. *Journal of Environmental Quality*, 23(5), 878-882.
- Clinton BD. 2011. Stream water responses to timber harvest: Riparian buffer width effectiveness. *Forest Ecology and Management*, 261(6), 979-988.

- Dahlgren RA. 1998. Effects of forest harvest on stream-water quality and nitrogen cycling in the Caspar Creek watershed. *RR Ziemer (technical coordinator). USDA Forest Service General Technical Report PSW-GTR-168. Pacific Southwest Research Station, US Forest Service, US Department of Agriculture, Albany, California, 45-53.*
- Erdoğan BU, Gökbülak F, Serengil Y, Yurtseven İ, Özçelik M S. 2018. Changes in selected physical water quality characteristics after thinning in a forested watershed. *Catena*, 166, 220-228.
- Feller M. 2005. Forest harvesting and streamwater inorganic chemistry in western north America: A review. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41.4: 785-811.
- Fukuzawa K, Shibata H, Takagi K, Nomura M, Kurima N, Fukazawa T, Satoh F, Sasa K. 2006. Effects of clear-cutting on nitrogen leaching and fine root dynamics in a cool-temperate forested watershed in northern Japan. *Forest ecology and management*, 225(1-3), 257-261.
- Gökbülak F, Şengönül K, Serengil Y, Özhan S, Yurtseven İ, Uygur B, Özçelik MS. 2016. Effect of forest thinning on water yield in a sub-humid Mediterranean oak-beech mixed forested watershed. *Water Resources Management*, 30(14), 5039-5049.
- Gorham E. 1961. Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 72.6: 795-840.
- Hibbert AR. 1965. Forest treatment effects on water yield. *Asheville: Coweeta Hydrologic Laboratory, Southeastern Forest Experiment Station.*
- Hirsch RM, Slack JR, Smith RA. 1982. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water resources research*, 18(1), 107-121.
- Horáková M, Lischke P, Grünwald A. 1989. Chemické a fyzikální metody analýzy vod. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 389 s.
- Hornbeck JW, Pierce RS, Federer CA. 1970. Streamflow changes after forest clearing in New England. *Water Resources Research*, 6(4), 1124-1132.
- Hubalová P, Janíček T a kol. 2019. Zpráva o stavu vodního hospodářství České republiky v roce 2018. Praha: Ministerstvo zemědělství, 142 s.

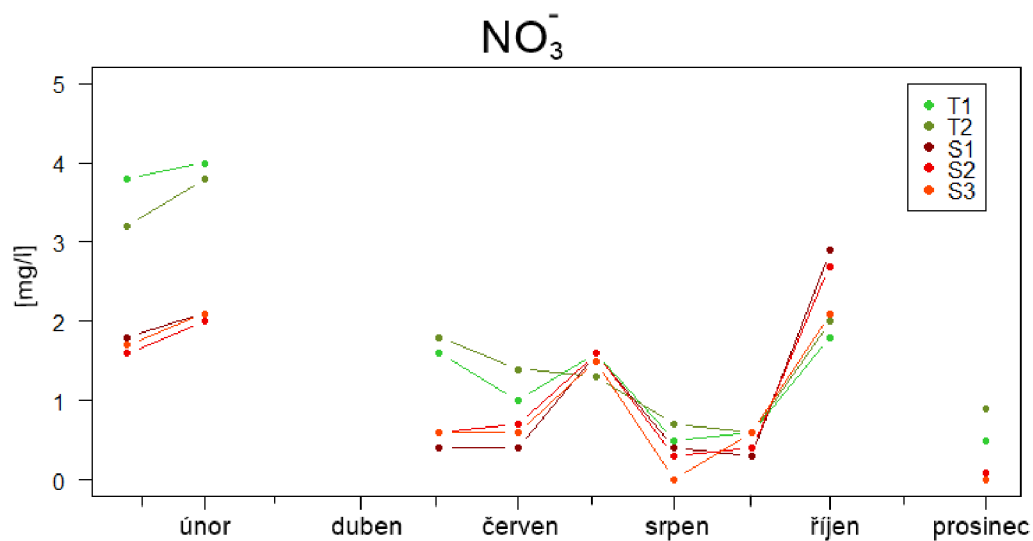
- Chuman T, Hruška J, Oulehle F, Gürtlerová P, Majer V. 2012. Does stream water chemistry reflect watershed characteristics?. *Environmental monitoring and assessment*, 185(7), 5683-5701.
- Likens GE, Bormann FH, Johnson NM, Fisher DW, Pierce RS. 1970. Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem. *Ecological monographs*, 40(1), 23-47.
- Likens GE, Driscoll C, Siccama TG, Johnson C, Lovett G, Fahey TJ, Reiners W, Ryan D, Martin CW, Bailey S. 1998. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook. *Biogeochemistry*. 41. 89-173.
- Likens GE. 2004. Some perspectives on long-term biogeochemical research from the Hubbard Brook ecosystem study. *Ecology*, 85(9), 2355-2362.
- Likens GE, Buso DC. 2006. Variation in streamwater chemistry throughout the Hubbard Brook Valley. *Biogeochemistry*, 78(1), 1-30.
- Löfgren S, Ring E, von Brömssen C, Sørensen R, Högbom L. 2009. Short-term effects of clear-cutting on the water chemistry of two boreal streams in northern Sweden: A paired catchment study. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 38(7), 347-356.
- Marks PL, Bormann FH. 1972. Revegetation following forest cutting: mechanisms for return to steady-state nutrient cycling. *Science*, 176(4037), 914-915.
- Martin CW, Hornbeck JW, Likens GE, Buso DC. 2000. Impacts of intensive harvesting on hydrology and nutrient dynamics of northern hardwood forests. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 57(S2), 19-29.
- Ministerstvo zemědělství, kolektiv autorů. 2019. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství v roce 2018. Praha: Ministerstvo zemědělství.
- Ministerstvo zemědělství, kolektiv autorů. 2020. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2019. Praha: Ministerstvo zemědělství.
- Modlinger R, Trgala K. 2019. Možné příčiny a důsledky kůrovcové kalamity v lesích ČR s ohledem na specifika při zpracování kalamitního dříví. Odborná studie. Praha: Česká zemědělská univerzita, 56.
- Neal C, Reynolds B, Neal M, Wickham H, Hill L, Pugh B. 2003. The impact of conifer harvesting on stream water quality: a case study in mid-Wales. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 3(1), 119-138.

- Oda T, Green MB, Urakawa R, Scanlon TM, Sebestyen SD, McGuire KJ, Katsuyama M., Adams MB, Ohte N. 2018. Stream runoff and nitrate recovery times after forest disturbance in the USA and Japan. *Water Resources Research*, 54(9), 6042-6054.
- Özyuvaci N, Özhan S, Gökbülak F, Serengil Y, Balci AN. 2004. Effect of selective cutting on streamflow in an oak-beech forest ecosystem. *Water Resources Management*, 18(3), 249-262.
- Palviainen M, Finér L, Laurén A, Launiainen S, Piirainen S, Mattsson T, Starr M. 2014. Nitrogen, phosphorus, carbon, and suspended solids loads from forest clear-cutting and site preparation: Long-term paired catchment studies from eastern Finland. *Ambio*, 43(2), 218-233.
- Patric JH, Reinhart KG. 1971. Hydrologic effects of deforesting two mountain watersheds in West Virginia. *Water Resources Research*, 7(5), 1182-1188.
- Serengil Y, Gökbülak F, Özhan S, Hızal A, Şengönül K, Balci AN, Özyuvacı N. 2007. Hydrological impacts of a slight thinning treatment in a deciduous forest ecosystem in Turkey. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 569-577.
- Shimizu T, Tsuboyama Y, Hosoda I. 1994. Effects of contour-line strip-cutting on stream flow (I) Long-term runoff characteristics during the warm season. *Journal of the Japanese Forestry Society*, 76(5), 393-401.
- Shure DJ, Phillips DL, Bostick, PE. 2006. Gap size and succession in cutover southern Appalachian forests: an 18 year study of vegetation dynamics. *Plant Ecology*, 185(2), 299-318.
- Siemion J, Burns DA, Murdoch PS, Germain RH. 2011. The relation of harvesting intensity to changes in soil, soil water, and stream chemistry in a northern hardwood forest, Catskill Mountains, USA. *Forest Ecology and Management*, 261(9), 1510-1519.
- Stednick, J D, 1996. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of hydrology*, 176(1-4), 79-95.
- Swank W T, Vose JM, Elliott KJ. 2001. Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *Forest Ecology and management*, 143.1-3: 163-178.

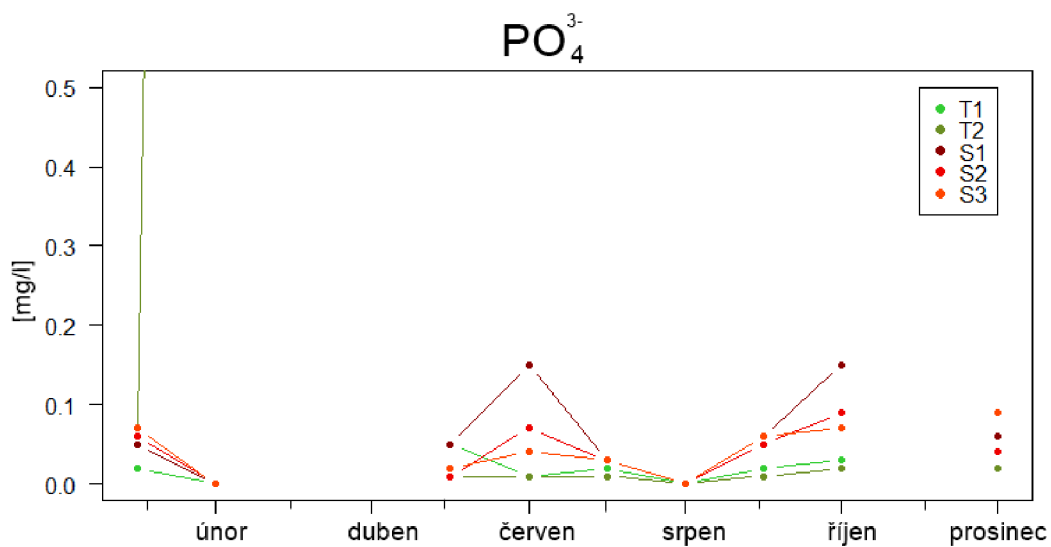
- Swift LW, Messer JB. 1971. Forest cuttings raise temperatures of small streams in the southern Appalachians. *Journal of soil and water conservation*, 26, 111-115.
- Štefáček S. 2008. Encyklopedie vodních toků Čech, Moravy a Slezska. Praha: Baset.
- Tremblay Y, Rousseau AN, Plamondon AP, Lévesque D, Prévost M. 2009. Changes in stream water quality due to logging of the boreal forest in the Montmorency Forest, Quebec. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(5), 764-776.
- Wang X, Burns DA, Yanai RD, Briggs RD, Germain RH. 2005. Changes in stream chemistry and nutrient export following a partial harvest in the Catskill Mountains, New York, USA. *Forest Ecology and Management*, 223(1-3), 103-112.
- Yurtseven I, Gökbülak F, Serengil Y, Erdoğan BU, Özçelik MS, Şengönül K, Özhan S. 2017. Response of selected water chemical quality parameters to slight thinning in a mature oak–beech forest ecosystem under sub-humid climate conditions. *European Journal of Forest Research*, 136(4), 653-664.

## Přílohy

Příloha 1: Srovnání  $\text{NO}_3^-$  na jednotlivých odběrových místech za rok 2020

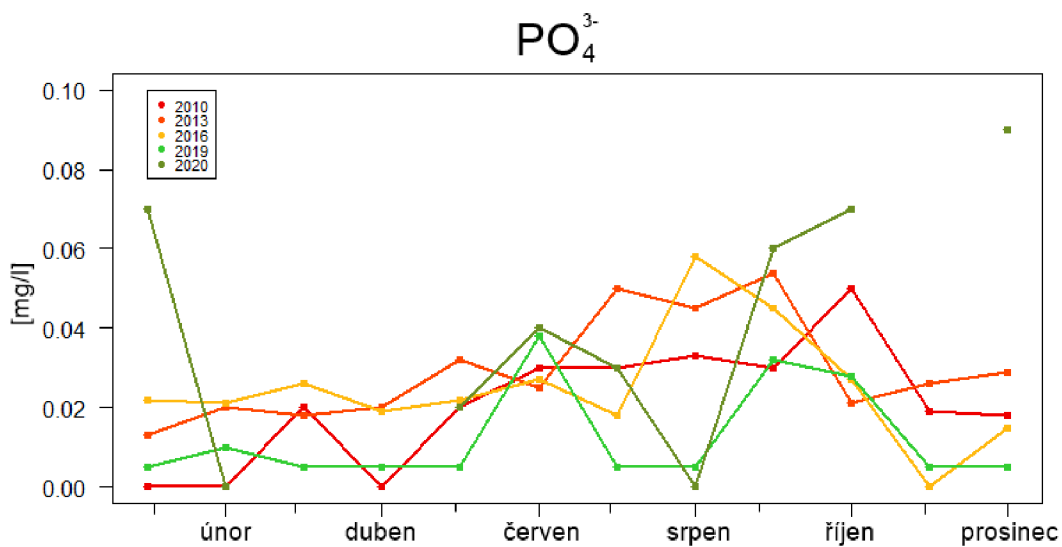


Příloha 2: Srovnání  $\text{PO}_4^{3-}$  na jednotlivých odběrových místech za rok 2020





Příloha 3: Porovnání hodnot  $\text{PO}_4^{3-}$  na toku Sitka mezi lety



Příloha 4: Porovnání hodnot Fe na toku Sitka mezi lety

