

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Geografie a Kartografie



Adam Bartůšek

Změny vybraných parametrů geochemismu povrchových vod ve vazbě na srážko-odtokový režim
Changes of selected surface water geochemistry parameters in relation to rainfall-runoff regime

Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Praha, 2022

Zadání bakalářské práce

Název práce

Změny vybraných parametrů geochemismu povrchových vod ve vazbě na srážko-odtokový režim.

Cíle práce

Cílem práce je studium charakteristik vybraných parametrů geochemismu povrchových vod, a to především ve vazbě na srážko-odtokový režim a jeho proměnu. Toho je dosaženo jak rešerší odborné literatury na dané téma, tak následnou aplikací vybraných metod při analýze změn vybraných parametrů v povodí Klíčavy. Důraz je kladen především na vývoj parametrů mezi lety 1996 a 2020 a jejich vazbu na srážko-odtokový režim a jeho proměnu.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Rešerše aktuální zahraniční a domácí odborné literatury na danou problematiku

Příprava a analýza databáze vybraných hydroklimatických proměnných a parametrů geochemismu povrchových vod

Statistická analýza

Diskuse a shrnutí výsledků

Zájmové území: povodí Klíčavy

Datové zdroje

Odborná literatura, mapové a datové podklady; Povodí Vltavy, s. p., ČHMÚ

Datum zadání: 03.12.2021

Student: Adam Bartůšek

Podpis studenta:

Vedoucí práce: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Podpis vedoucího práce:

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze 26. 07. 2022

Adam Bartůšek

Podpis:

Poděkování

Děkuji RNDr. Miladě Matouškové, Ph.D. za vedení práce, odborné rady, konstruktivní připomínky a získání dat potřebných pro tuto práci. Tímto děkuji i podniku Povodí Vltavy, s. p. za laskavé poskytnutí těchto dat.

Bakalářská práce byla zpracována v rámci projektu PERUN SS02030040, úkolu 7.2. „Změny dílčích parametrů kvality povrchových vod v kontextu změny klimatu.“

Abstrakt

Tato práce se zabývá studiem změn geochemismu povrchových vod ve vazbě na srážko-odtokový režim a jeho proměnu. Jelikož v posledních letech přibývá srážko-odtokových extrémů, jako jsou dlouhé epizody sucha s nízkými průtoky nebo naopak vysoké průtoky způsobené extrémními úhrny srážek, je důležité poznat, jak tyto jevy působí na kvalitu vod. Proto jsou hlavními cíli této práce jednak rešerše odborné literatury na téma změn geochemismu povrchových vod v době změny klimatu a srážko-odtokového režimu a metod, pomocí kterých lze tyto změny kvantifikovat, a posléze aplikace některých z těchto metod při analýze vybraných parametrů a jejich změn v povodí Klíčavy. Předmětem analýzy byly kromě některých klimatických charakteristik a průtoků i základní parametry geochemismu (průtok, teplota vody), fyzikálně chemické parametry (elektrolytická konduktivita, pH), některé živiny (formy dusíku a fosforu) a ukazatele organického znečištění a čistoty toků (BSK₅, CHSK_{cr}, TOC a rozpuštěný kyslík). Navíc byl stručně zhodnocen stav a vývoj koncentrací některých metabolitů herbicidů. K analýze dat byly využity např. krabicové diagramy, Mann-Kendallův test, korelační koeficienty či lineární regrese. Bylo zjištěno, že se v zájmovém území ve sledovaném období projevila postupující změna klimatu. Největší dopad tato změna měla na teplotu vody, která prokazatelně vzrostla na všech profilech. Oproti očekávání se ale významně snížil obsah rozpuštěného kyslíku, možná i z důvodu stále klesajících hodnot BSK₅. Ostatní parametry nevykazovaly za celé období významnou proměnu, nicméně koncentrace těch, u kterých byla vypočítána převážně inverzní závislost na průtoku, se v poslední desetiletí spíše zvyšovaly. Naopak parametry, jejichž koncentrace se zvyšovaly při vysokých průtocích, zaznamenávaly spíše velmi mírný pokles koncentrací, a to převážně v posledních letech.

Klíčová slova: Změny kvality povrchové vody, teplota vzduchu, teplota vody, srážky, průtok, korelační koeficienty

Abstract

This work deals with the study of changes in the geochemistry of surface waters in relation to the rainfall-runoff regime and its transformation. As rainfall-runoff extremes such as long episodes of drought with low flows or, conversely, high flows caused by extreme rainfall events have been increasing in recent years, it is important to understand how these phenomena affect water quality. Therefore, the main objectives of this work are firstly a literature search on the changes in surface water geochemistry during change of climate and precipitation-runoff regime and methods that can be used to quantify these changes, and then the application of some of these methods to the analysis of selected parameters and their changes in the Klíčava catchment. In addition to some climatic characteristics and flow rates, the analysis included basic parameters of geochemistry (flow rate, water temperature), physicochemical parameters (electrolytic conductivity, pH), some nutrients (forms of nitrogen and phosphorus) and indicators of organic pollution and stream cleanliness (BOD₅, COD_{Cr}, TOC and dissolved oxygen). In addition, the status and evolution of concentrations of some herbicide metabolites were briefly assessed. For data analysis, e.g. box plots, Mann-Kendall test, correlation coefficients or linear regression were used. It was found that a progressive climate change was observed in the area of interest during the period under study. The greatest impact of this change was on water temperature, which was shown to have increased on all profiles. However, dissolved oxygen content did not decrease significantly, as expected, possibly due to the still decreasing BOD₅ values. The other parameters did not show a significant change over the whole period, but the concentrations of those for which a predominantly inverse flow dependence was calculated have tended to increase over the last decade. Conversely, substances whose concentrations tended to increase at high flows tended to show a very slight decrease in concentrations, mostly in recent years.

Key words: Changes of surface water quality, air temperature, water temperature, rainfall, discharge, correlation coefficients

Obsah

1. Úvod	10
2. Dosavadní studie	12
2.1. Vliv změny klimatu a srážko-odtokového režimu na kvalitu vod.....	12
2.2. Ovlivnění jednotlivých parametrů	12
2.2.1. Teplota.....	12
2.2.2. Fyzikálně-chemické parametry	13
2.2.3. Kyslík	16
2.2.4. Formy fosforu.....	17
2.2.5. Formy dusíku.....	19
2.2.6. Ukazatele organického znečištění	21
2.2.7. Herbicidy	24
2.3. Přehled vybraných metod	25
2.3.1. Regresní analýza.....	25
2.3.2. Analýza hlavních komponent	26
2.3.3. Korelační koeficienty	28
2.3.4. Hysterezní smyčky	30
2.3.5. Mann-Kendallův test	32
2.3.6. Neparametrické estimátory sklonu	33
2.3.7. Shluková analýza.....	34
3. Charakteristika zájmového území	35
3.1. Základní charakteristika povodí	35
3.2. Přírodní poměry.....	36
3.2.1. Geologická stavba	36
3.2.2. Geomorfologie.....	36
3.2.3. Půdy.....	37
3.2.4. Krajinný pokryv	37
3.2.5. Klima	38
3.2.6. Antropogenní ovlivnění.....	39
4. Data a metody.....	41
4.1. Zdroje dat	41
4.2. Použité metody	42
5. Výsledky.....	44
5.1. Analýza klimatických a odtokových poměrů	44
5.1.1. Teplota vzduchu	44
5.1.2. Srážky	45

5.1.3. Sníh.....	46
5.1.4. Odtokové poměry	47
5.2. Kvalita vody a její vazba na srážko-odtokový režim	48
5.2.1. Teplota.....	49
5.2.2. Konduktivita.....	51
5.2.3. Reakce vody pH	53
5.2.4. Rozpuštěný kyslík	54
5.2.5. Formy dusíku.....	55
5.2.6. Formy fosforu.....	60
5.2.7. Ukazatele organického znečištění	63
5.2.8. Herbicidy	66
6. Diskuze.....	70
7. Závěr.....	75
8. Seznam literatury.....	77
8.1. Internetové a další zdroje.....	85
Seznam obrázků	86
Seznam tabulek.....	87
Seznam příloh.....	88
Přílohy	89

1. Úvod

Je patrné, že v posledních desetiletích můžeme pozorovat zrychlující se změnu klimatu. Ta se projevuje především nárůstem teplot a změnou v intenzitě a rozložení srážek. Jen za minulé století vzrostla podle mezivládního panelu pro změnu klimatu (IPCC) globální teplota o 0,6 °C (IPCC 2001), a podle nejnovějších publikací této organizace svět dělí od překročení hodnoty oteplení o 1,5 °C oproti preindustriální teplotě pouhé dvě dekády (IPCC 2022). Spolu s teplotou se mění i další klimatické a hydroklimatické charakteristiky jako srážkové úhrny a jejich prostorové i časové rozložení, frekvence, intenzita a délka trvání extrémních projevů počasí a jejich důsledků jako jsou sucha a povodně, nebo celkové zvyšování výparu a povrchového odtoku, které negují případné místní zvýšení srážkových úhrnů (Eastrling 2000). Všechny tyto změny mají přímý i nepřímý vliv na přírodní systémy či na společnost.

Klimatická změna ovlivňuje i chování a charakteristiky vodních toků. Intenzita a časové rozložení srážek mají nepopíratelný vliv na vodní stav povrchových vodních toků, důležité je také, v jaké formě (dešťové vs. sněhové) srážky vypadávají. Kromě srážek je také důležitým faktorem intenzita vypařování (Bates et al. 2008). Změny teploty vzduchu přímo působí na teplotu povrchových vod. V minulém století se například zvýšila teplota Rýna a Dunaje o 1 až 3 °C (EEA 2016), nárůst teploty vod lze pozorovat všude na světě. Teplota vzduchu ale zároveň zprostředkovaně působí i na kvalitu vody, jelikož zvýšená teplota vody má za následek proměnu některých jejích vlastností, jako například obsahu rozpuštěných tuhých látek a plynů (hlavně kyslíku), rychlosti biochemických procesů, poměrů dusíkatých látek apod. (Pitter 2005). Na parametry kvality vody, jak ukazují mnohé studie zmíněné v této práci, působí kromě teploty i změna srážko-odtokového režimu, tedy intenzity a časoprostorového rozdělení atmosférických srážek, které mají přímý vliv na odtokové poměry povrchových vodních toků. Četné výzkumy, poměrně komplexní z hlediska počtu měřených parametrů (například Rostami et al. 2020, Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk 2020, Fraindová et al. 2022a a další) ukazují, že změny srážko-odtokového režimu sice prokazatelně působí na velké množství parametrů geochemismu povrchových vod, nicméně různé parametry jsou ovlivněny různou měrou a jejich koncentrace mohou být ovlivněny jak pozitivně, tak negativně. Výsledky se poměrně často liší nejen mezi rozličnými studiemi, ale nezřídka i v rámci studií mezi měrnými profily navzájem. Vždy záleží i na fyzickogeografických vlastnostech dané lokality.

Při studiu ovlivnění parametrů geochemismu vod změnami srážko-odtokového režimu je třeba rozlišovat časový rámec ovlivnění. Mnoho studií se zaměřuje spíše na dlouhodobé trendy změny kvality vod ve vazbě na změnu klimatu, přičemž je v nich často hodnocen trend jednoho nebo malé skupiny parametrů v průběhu let a je srovnáván se změnami hydroklimatických proměnných za stejné období. Jiné studie se zabývají vztahem mezi průtokem a kvalitou vody v řádu hodin až měsíců (krátkodobé a střednědobé měřítko) a některé práce dokonce studují tyto vztahy přímo během srážko-odtokových událostí, tedy v řádu minut až hodin. Pro kvantifikaci těchto mimořádně krátkodobých vztahů autoři

nejčastěji používají metodu tzv. hysterezních smyček, které zobrazují průběh závislosti koncentrace měřené veličiny na průtoku v čase – v řádu minut až hodin.

Předmětem této práce je shrnutí jak změn jednotlivých vybraných parametrů geochemismu povrchových vod ve vazbě na dynamiku a změny srážko-odtokového režimu, tak hlavních metod, které jsou ve studiích této problematiky využívány. Toho je docíleno pomocí rešerše zahraniční i české odborné literatury zabývající se tímto tématem. Vybrané metody jsou aplikovány při analýze parametrů kvality vody ve vazbě na dynamiku hydroklimatických proměnných v povodí Klíčavy.

2. Dosavadní studie

Tato kapitola práce se dělí na dvě hlavní části. V první části jsou představeny poznatky o vazbě vybraných parametrů geochemismu povrchových vod na srážko-odtokový režim a jeho změnu. V druhé části pak jsou uvedeny metody, které se používají ke studiu těchto vztahů. Veškeré poznatky jsou získány studiem zahraniční i domácí odborné literatury.

2.1. Vliv změny klimatu a srážko-odtokového režimu na kvalitu vod

Téměř všechny parametry kvality vody jsou více či méně ovlivněny srážko-odtokovým režimem. To znamená, že se mění jejich koncentrace v toku v závislosti na změně průtoku. Tyto změny jsou dány především intenzivními či dlouhotrvajícími srážkami a táním sněhu v případě vysokých průtoků a suchými (často i horkými) epizodami v případě nízkých průtoků. Některé parametry (jako například konduktivita nebo pH) mají většinou inverzní závislost na průtoku, jiné (např. DOC/TOC) jej většinou sledují. U většiny látek také hraje velkou roli zdroj, ze kterého se do toku uvolňují. U bodových zdrojů se nejčastěji projevuje efekt ředění, kdy korytem teče větší množství vody, ale množství uvolňovaných látek se nemění (příkladem mohou být čistírny odpadních vod). Naopak u plošných zdrojů se při srážko-odtokových událostech projeví splach látek z těchto zdrojů do toku (Langhammer 2002). Chování různých parametrů z hlediska srážko-odtokového režimu je ovlivněno celou řadou faktorů, je často proměnlivé a těžko se hledají jeho konkrétní, předvídatelné vzorce. Poznatky z dosavadních studií o chování jednotlivých ukazatelů kvality vod jsou představeny v následující části.

2.2. Ovlivnění jednotlivých parametrů

V této části bude podrobněji představeno, jak reagují vybrané parametry kvality vody na změny a dynamiku srážko-odtokového režimu, tedy především na období nízkých průtoků způsobených trvajícím suchem, na období vysokých průtoků, na běžné změny průtoků a také na fenomén bleskových povodní, kdy po suché epizodě přijde rychlá povodňová vlna. Vybranými parametry jsou teplota, fyzikálně chemické parametry (pH, elektrolytická konduktivita), kyslík, formy fosforu (celkový fosfor, fosforečnany), formy dusíku (celkový dusík, amoniakální dusík, dusičnanový dusík) a ukazatele organického znečištění (celkový a rozpuštěný uhlík, chemická spotřeba kyslíku, biochemická spotřeba kyslíku).

2.2.1. Teplota

S rostoucí teplotou vzduchu roste i teplota vody ve vodních tocích, jelikož tyto dva parametry jsou úzce provázány (Whitehead et al. 2009). Teplota vody pak má vliv i na jiné její charakteristiky, jako například obsah rozpuštěných tuhých látek, kyslíku, rychlost chemických reakcí, biochemickou spotřebu kyslíku a další (Pitter 2005, Whitehead 2009). Zvyšování teploty vody je v dnešní době pozorováno po celém světě, příkladem mohou být některé polské řeky s pozorovaným průměrným nárůstem teplot o 0,1 až 0,3 °C za dekádu (Ptak et al. 2019), který silně koreluje s růstem teplot vzduchu. V našem prostředí je pozorován nárůst teplot třeba na Svatavě (Navrátilová 2020) nebo na Vltavě (Kopáček et al. 2020).

Rostami et al. (2018) vypočítal, že teplota vybraných kanadských řek vzroste do osmdesátých let až o 7 %. Jsou to ale i srážkové úhrny a s nimi spjaté hodnoty průtoku, které ovlivňují teplotu vody. Obecně platí, že vyšší vodní stavy mají za následek spíše nižší teplotu vody. Celkové snížení teploty vody v den srážkové události zaregistrovaly Puczko a Jekatierynczuk-Rudezyk (2020), události ale nebyly sledovány s takovým časovým rozlišením, aby odhalily podrobnější vztahy. Určitého vlivu úhrnu srážek, a tedy i průtoku na teplotu vody, si všimli i Pietruszyński a Cieśliński (2019). Při srážkových událostech v severním Polsku pozorovali, že s rostoucím průtokem nejprve mírně roste i teplota vody (cca o půl stupně Celsia), mírný růst pak ale následuje relativně prudký pokles (zhruba o 1,8 stupně). To si autoři vysvětlují vlivem teploty půdy na teplotu srážkové vody, jež se do vodního toku během srážkové události dostane. Počáteční vzrůst teploty byl pravděpodobně způsoben ohřevem srážkové vody o prohrátý substrát. Následně se substrát postupem času díky absorpci dopadající srážkové vody ochlazoval, až se o něj srážková voda přestala ohřívat a s téměř nezměněnou teplotou dosáhla vodní tok. To se projevilo zmíněným prudkým poklesem teploty o 1,8 °C v řádu minut. Rychlou zápornou reakci teploty vody na zvýšení průtoku pozoroval na Temži Lawler et al. (2006). Při studiu vlivu průtoku na teplotu vody je potřeba dát si pozor na fakt, že jak teplota vody, tak průtok jsou často ovlivněny sezonalitou podnebí, tudíž často oba parametry souvisí s jejich pozicí v rámci roku, ale nikoliv se sebou navzájem. Je ale patrné, že jak zvyšující se teploty vzduchu, tak snižující se průtoky, jsou a budou důležitým faktorem při oteplování povrchových vod.

Teplotu vody ale ovlivňuje i člověk. Antropogenní činnost má vliv nejen na absolutní teplotu vody ve vodním toku, nýbrž i na její rozkolísanost během určitých časových jednotek (během dne i během roku). Nepřímo jsou ale teplota vody a její chod ovlivněny i například výstavbou přehrad a nádrží. Liu et al. (2005) při zkoumání teplot vody v povodí řeky Leny zjistil, že signifikantní vliv na ročním rozložení teplot vody mají právě vodní nádrže a regulace průtoku. To je dáno především změnou průtoku pod nádrží a také teplotní stratifikací nádrže samotné. Wiejaczka (2015), který v Polsku studoval závislost konduktivity na teplotě vody před výstavbou vodní nádrže a po ní zjistil, že v zimě je teplota vody pod nádrží mírně vyšší a během léta naopak nižší oproti období před výstavbou nádrže. Potvrdil tak zjištění Lia, u něhož ale byly rozdíly zřetelně vyšší. Důvod spočívá nejspíše ve skutečnosti, že pokud je výpust z nádrže umístěna u jejího dna, v závislosti na ročním období se pak různě projevuje její teplotní stratifikace. V zimě je voda u dna nádrže teplejší než u povrchu a v létě je tomu naopak. Proto je voda v zimních měsících pod přehradou o něco teplejší a v letních zase o něco chladnější než bez jejího vlivu (Liu et al. 2005).

2.2.2. Fyzikálně-chemické parametry

Mezi fyzikálně-chemické parametry jsou v této práci zařazeny reakce vody pH a elektrolytická konduktivita. Oba parametry mají podle dosavadních studií většinou patrnou vazbu na srážko-odtokový režim a dosahují nižších hodnot spíše při vyšších průtocích a vice versa.

Velké množství studií objevilo negativní závislost hodnot pH na aktuální vodnosti toku. Obecně reakci vody snižuje vysoký průtok, který do toku vymývá látky zvyšující kyselost roztoků (např. huminové látky nebo oxidy síry a dusíku). Naopak vyšší hodnoty jsou často zaznamenávány při nižších průtocích kvůli sníženému obsahu oxidu uhličitého, který je vyčerpáván organismy. Trendy vývoje hodnot pH v různých povodích se často liší. Pozorované klesající trendy jsou často vysvětlovány spíše jinými faktory než změnou srážko-odtokového režimu, například specifickým chováním rašelinišť (Fraindová et al. 2022a), zvýšenou depozicí oxidů dusíku a síry, nebo vlivem různých druhů hornin (Matsubara et al. 2009). Naopak snižování emisí dusíku a síry vede ke zvyšování pH v tocích (Navrátilová 2020, Fraindová et al. 2022b). Podle těchto faktorů pak může srážko-odtokový režim a jeho změna ovlivňovat hodnoty pH různě. Puczko a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020) pozorovaly kolísání pH vody v závislosti na denním kolísání průtoku. Tato závislost byla nepřímá, s rostoucím průtokem hodnota pH klesala. Nicméně tento trend nebyl tak signifikantní v porovnání s pozorovaným růstem pH při obdobích sucha s nízkými průtoky. To potvrzují i výsledky Fraindové, které taktéž zaznamenala snížené hodnoty pH při zvyšujícím se průtoku v šumavských a krušnohorských povodích (Fraindová et al. 2022a). Největší pokles pH se zvýšeným průtokem podle ní vykazovala povodí s největším zastoupením mokřadů. Nejprudší poklesy pH byly zaznamenány při četných letních srážko-odtokových událostech, na rozdíl od událostí po delším období sucha nebo při tání sněhu. Celkově byly ale hodnoty pH poměrně nízké, což odporuje tvrzení, že se střední Evropa postupně vzpamatovává z acidifikace (Fraindová et al. 2022b). Studium vlivu suchých období na hodnoty pH se zabývali van Vliet a Zwolsman (2008). Po četných měřeních na řece Máze zjistili, že suchá letní období s nízkým průtokem signifikantně ovlivňují hodnoty pH, které se zvyšují. To vysvětlují sníženou koncentrací rozpuštěného oxidu uhličitého. Nepřímo úměrnou závislost pH a průtoku popisuje ve své diplomové práci, která se mimo jiné zabývá sledováním pH v šumavském Hamerském potoce, i Prokš (2010). Četné studie se zabývají i závislostí hodnoty pH na průtoku přímo v průběhu srážko-odtokových událostí, tedy v krátkodobém měřítku. Negativní korelaci pH s průtokem pozoroval například Burt et al. (2015), který v jižní Anglii zaznamenal při nástupu srážko-odtokové události propad pH až o 1 jednotku během asi 30 minut. Eludoyin et al. (2017) zjistil taktéž v jižní Anglii poněkud odlišný průběh. Podle jeho pozorování při nástupu události pH nejdříve poměrně prudce pokleslo a poté lehce stoupalo, současně se zvyšujícím se průtokem. Směr hysterezní smyčky tak byl klasifikován jako proti směru hodinových ručiček. Lawler et al. (2006) dokonce ve střední Anglii sledoval zvýšení pH po nástupu srážko-odtokové události. Zde je ale nutno podotknout, že předchozí dvě studie byly prováděny v zemědělském, respektive urbanizovaném povodí. Většinově tedy převládá názor, že suchá období zvyšují hodnoty pH. V budoucnu by se tedy mohlo pH, kvůli snižujícím se průtokům, spíše zvyšovat.

Obecně také záleží, jakých hodnot pH v daném území dosahují jak atmosférické srážky, tak samotné vodní toky. Dešťová voda má standardně v neznečištěných oblastech pH 5–6, ale pokud jsou v ovzduší vyšší koncentrace oxidů dusíku a síry, může být pH srážkové vody i nižší (Pitter 2005). Pokud je oblast

silně znečištěna těmi to látkami, má to za následek nižší pH, které se nejvíce projeví při bleskových povodních. Pokud ale oblast znečištěná není a srážková voda má vyšší pH než voda v toku, může být efekt opačný, záleží na dalších okolnostech (např. přítomnost mokřadů a rašelinišť či specifických typů půd a hornin v povodí).

Co se týče vlivu srážek a průtoku na hodnoty konduktivity, zde se většina autorů shodne na nepřímo úměrné závislosti. To je způsobeno skutečností, že srážková voda a obecně odtékající „nová“ voda při srážkové události je relativně chudší na rozpuštěné látky než voda „stará“, která interaguje s povrchem delší dobu a je tak na rozpuštěné látky bohatší (Cano-Paoli et al. 2019). Rostami et al. (2018) pozoroval na třech kanadských řekách, že konduktivita negativně koreluje jak s úhrny srážek, tak s průtokem. To potvrdil i v pozdější studii (Rostami et al. 2020), kde byla konduktivita na téměř všech profilech zařazena do skupiny ukazatelů, které při vyšších průtocích zaznamenávají nižší hodnoty. Juhls et al. (2020) zase pozoroval snížené hodnoty konduktivity na řece Leně při jarním tání sněhu. Tyto hodnoty se opět začaly zvyšovat na podzim, když se snižoval průtok. Naopak vliv sucha na hodnoty konduktivity popisují Puczko a Jekatierynczuk-Rudezyk (2020). Ve své práci popisují, že konduktivita silně negativně koreluje s průtokem, což se ukazuje i na případě velmi vysokých hodnot konduktivity v suchém období oproti referenčnímu období. To potvrzuje i výzkum Fraindové, která pozorovala nejvyšší hodnoty konduktivity v Blanici v obdobích s nejvyšší teplotou vody a nejnižším průtokem (Fraindová et al. 2022b). Na Rolavě byly rekordní hodnoty konduktivity naměřeny v nejsušších obdobích (Šajnarová 2021). Podrobnější průběh závislosti konduktivity na průtoku popisuje Langhammer (2002). Uvádí, že obecným vzorcem chování konduktivity je její prudké snížení se zvýšením vodnosti toku. Následně se konduktivita dostává na svou původní úroveň jen zvolna. Je to způsobeno ředěním a nejčastěji se tak děje na profilech, které jsou zatíženy bodovým zdrojem znečištění (Langhammer 2002). Zuecco et al. (2016) v Italských Alpách porovnával různé hysterezní indexy, mimo jiné na datech elektrické konduktivity a průtoku. Směr hysterezních smyček byl vždy proti směru hodinových ručiček a ukazoval na snižování konduktivity se zvyšováním průtoku. Stejné chování potvrdil i v pozdějším výzkumu, kde navíc uvádí, že nejnižších hodnot konduktivita dosahuje ještě před kulminací průtoku a nejvyšších pak při jeho snižování, kdy je ale průtok stále vyšší než před příchodem srážko-odtokové události. Zajímavé je, že hodnoty konduktivity při ustupujícím vodním stavu jsou stejné, a někdy dokonce vyšší, než před příchodem události. To je přisouzeno podpovrchovému odtoku z okolních svahů a příbřežní zóny, kde byly v klidném období naměřeny vyšší hodnoty konduktivity v podzemní vodě než v samotném toku (Zuecco et al. 2018). Burt et al. (2015) pozorování rozšířil o události, kdy došlo k významným srážko-odtokovým událostem ihned po velmi dlouho trvajícím období sucha. Studoval celkem pět po sobě jdoucích událostí, přičemž determinoval tři různé typy chování konduktivity. Při prvních dvou událostech, tedy hned po dlouhém období sucha, se při nástupu srážek a vzestupu hladiny začala konduktivita prudce zvyšovat. To autoři vysvětlují tak, že po dlouhém období bez srážek se na povrchu nahromadilo velké množství rozpustného materiálu, který byl při bouřích

okamžitě odveden do koryta toku. Třetí událost vykazovala rozporuplnou závislost, nicméně poslední dvě události už probíhaly podle vzorce, který uvádí většina autorů (snížení konduktivity se zvýšením průtoku). Podobné chování není výjimečné, popisují ho například i Pietruszyński a Cieśliński (2019), kteří v urbanizovaném povodí pozorovali dokonce dvojnásobné zvýšení konduktivity ihned po nástupu srážek, nebo Eludoyin et al. (2017), jenž pomocí hysterezních smyček odhalil, že konduktivita při zvýšení průtoku zaznamenala nejprve mírný nárůst a poté rychlý pokles pod původní hodnoty. Podle těchto výsledků se tedy zdá, že ač mají povodně a vyšší vodní stavy obecně nepřímo úměrný vliv na hodnoty konduktivity, která se snižuje díky efektu ředění, s postupující změnou klimatu, která se v našich oblastech vyznačuje mj. i delšími obdobími sucha následovanými bleskovými povodněmi, může docházet naopak ke zvyšování konduktivity při srážkových událostech.

Elektrolytická konduktivita je často ovlivněna antropogenní zátěží (Langhammer 2002). To potvrzují i výsledky studie, kterou provedly Puczko a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020). Ty odhalily, že ekologický stav toku výrazně negativně koreluje s hodnotami konduktivity. Na konduktivitu ale může mít vliv i výstavba vodních nádrží. Wiejaczka (2015) po analýze dat teploty a konduktivity vody z období před výstavbou nádrže a po ní vyvodil, že tato má na konduktivitu řádově větší vliv než na teplotu. Před výstavbou nádrže byla konduktivita vždy nejnižší v zimě a nejvyšší v létě a po celý rok více či méně korelovala s teplotou vody. Ovšem po výstavbě nádrže dosahovala konduktivita nejvyšších hodnot v zimě a jen o něco nižších v létě. Roční průběh se tedy stabilizoval a téměř se oprostil od závislosti na teplotě vody. Podle autora je to následek oproštění se konduktivity od jejích determinačních faktorů, jako jsou srážkové úhrny a hodnota průtoku, a naopak zesílení (vznik) závislosti na teplotní stratifikaci vody v nádrži (Wiejaczka 2015).

2.2.3. Kyslík

Vliv změn srážko-odtokového režimu na obsah rozpuštěného kyslíku není jednotně popsán. Obecně se změny obsahu kyslíku vysvětlují jinými faktory, než je průtok, ale tyto mohou být s průtokem úzce svázány. Nízké (především letní) průtoky budou mít za následek vyšší koncentrace polutantů, jelikož budou méně zředěny. Tím pádem bude i vyšší biochemická spotřeba kyslíku, kterého tedy bude ve vodě ubývat. Zároveň samotné zvyšující se teploty vzduchu a s nimi svázané teploty vody budou mít za následek nižší obsah rozpuštěného kyslíku (Whitehead et al. 2009). V teplejší vodě je totiž rozpustnost kyslíku nižší (Pitter 2005). Totéž co Whitehead uvádí například Hammond a Pryce (2007) ve zprávě britské Agentury životního prostředí. Jako jeden z hlavních faktorů ovlivňujících obsah rozpuštěného kyslíku označují teplotu téměř všichni autoři. Snížené letní průtoky a zvýšené teploty vyvolají kromě vyšších hodnot biochemické spotřeby kyslíku a zrychlené nitrifikace i masivnější vodní květ, což by mělo negativní účinek na kyslíkovou bilanci (Cox a Whitehead 2009). Povodně naopak mohou díky vysoké rychlosti toku pozitivní vliv na obsah kyslíku, nicméně ve znečištěných (zemědělských či urbánních) oblastech ale mohou do toku spláchnout velké množství organických látek, což by mělo naopak vliv negativní (Hrdinka et al. 2012).

Co se týče terénních výzkumů provedených na téma vlivu srážko-odtokového režimu na obsah rozpuštěného kyslíku, jsou výsledky poněkud rozporuplné. Puczko a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020) našly signifikantní negativní korelaci obsahu rozpuštěného kyslíku s průtokem druhý den po příchodu srážko-odtokové události. Dále pozorovaly snížené hodnoty jak při dlouhotrvajícím suchém období, tak při povodních. To zčásti koresponduje se zjištěním Hrdinky, který změřil při povodních v roce 2006 na řece Lužnici neobvykle vysoké hodnoty biochemické a chemické spotřeby kyslíku (Hrdinka et al. 2012). Rostami et al. (2018) při analýze dat kvality vody z kanadských řek zjistil, že rozpuštěný kyslík negativně koreluje s vodností toku. Toto zjištění je ale nepřímou vyjádřená závislost na teplotě, jelikož v jím zkoumaných povodích dochází k největší průtokům v létě, kdy je voda i nejteplejší a má nejmenší obsah rozpuštěného kyslíku. Rostami et al. (2020) nenašel žádnou závislost mezi průtokem a obsahem rozpuštěného kyslíku. Provedená shluková analýza dokonce zařadila tento parametr na osmi profilech do celkem šesti různých skupin ukazatelů, z nichž některé měly odlišnou či zcela opačnou závislost na průtoku. Průtok tak podle něj může nepřímou ovlivnit obsah kyslíku jakožto faktor určující množství hydrofytů. Při výzkumech s vyšším časovým rozlišením přišli Pietruszyński a Cieśliński (2019) a Lawler et al. (2006) se zjištěním, že při srážkové události obsah rozpuštěného kyslíku v toku mírně vzroste (podle Lawlera nejdříve ještě mírně poklesne), tato zjištění však nejsou dostatečně potvrzena a ani autoři jim nepřikládají přílišnou váhu. Teoreticky za tím lze hledat, tak jako za většinou změn rozpuštěného kyslíku, reakci na změnu teploty vody při vyšším průtoku. S rostoucími teplotami vzduchu i vody, nižšími průtoky, které mohou růst teplot ještě umocňovat a tím pádem i vyššími koncentracemi znečišťujících látek pod bodovými zdroji znečištění lze předpokládat, že budou koncentrace rozpuštěného kyslíku stále klesat, což může mít katastrofální dopady na celkový ekologický stav toků.

2.2.4. Formy fosforu

Nejčastějšími parametry, které se v rámci forem fosforu vyhodnocují jakožto ukazatele kvality vod, jsou celkový fosfor (TP) a fosforečnany (PO_4^-). Proto jsou v této práci zahrnuty právě tyto ukazatele.

Vliv srážko-odtokového režimu na koncentrace fosforu v tocích závisí na zdroji, ze kterého fosfor pochází, respektive na faktorech jeho mobilizace. V mnohých studiích se uvádí, že fosfor, ať už pochází primárně z jakéhokoli zdroje (odpady, zemědělství, přirozené zvětrávání hornin a minerálů), se snadno ukládá v říčních sedimentech. Rostami et al. (2020) pozoroval, že hodnoty celkového fosforu mají stejný sezonní chod jako hodnoty průtoku. Ukázalo se, že největší vliv na koncentraci celkového fosforu má zvýšení průtoku při středních a vysokých vodních stavech, při nízké vodnosti není reakce fosforu na zvýšení průtoku zřejmá, nebo je dokonce záporná. To autoři vysvětlují právě tím, že při vyšších vodních stavech je vyšší pravděpodobnost, že se do toku spláchnou polutanty z nebodových zdrojů znečištění a že se mobilizují říční sedimenty (Rostami et al. 2020). Vazbu na říční sedimenty a tím pádem zvýšené koncentrace celkového fosforu při vysokých průtocích potvrzuje i Botter et al. (2019). Poukazuje i na to, že fosfor se snadno váže na půdní částice a pokud dochází k intenzivní půdní erozi, při následných deštích jsou tyto částice i s navázaným fosforem snadno odneseny do vodních toků. Při měření na

švýcarských řekách ale nebyla pozitivní závislost obsahu celkového fosforu na průtoku potvrzena na všech profilech. Z analýz dat za poslední dekády ale bylo zjištěno, že v případě, že tato závislost existuje, stává se v poslední době silnější (Botter et al. 2019). Mechanismus mobilizace fosforu ve formě fosforečnanů spolu se sedimenty popisuje Hrdinka et al. (2012), při povodních na řece Lužnici ovšem žádnou odchylku od normálních koncentrací sám nepozoroval. Rostami et al. (2018) zjistil, že zvýšené koncentrace celkového fosforu korelují se součtem srážkových úhrnů za delší období, obecně tedy našel pozitivní korelaci s průtokem. Téměř na všech profilech vypočítal zvýšení koncentrací více než o 5 % do roku 2080, což dává do souvislosti se zvyšujícími se úhrny srážek v dané oblasti. Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020) objevily při analýze denních dat pozitivní korelaci koncentrace celkového fosforu s hodnotami průtoku. Při dlouhodobém suchu pozorovaly snížení koncentrací, zatímco při bleskových povodních jejich zvýšení. Zajímavé je, že během vzestupů hladiny zapříčiněných dlouhotrvajícími dešti pozorovaly spíše nižší koncentrace celkového fosforu. To by mohlo značit, že při pomalém vzestupu hladiny nedochází k takové mobilizaci částic nebo se projevuje efekt ředění. Koncentrace celkového fosforu se tedy dávají do souvislosti s oběma hydrologickými extrémy. Chování celkového fosforu a fosforečnanů v tocích ovlivněných bodovými zdroji znečištění popisuje Langhammer (2002). Podle něj je závislost koncentrace obou typů fosforu inverzně závislá na průtoku, tedy s nízkými průtoky lze pozorovat vyšší koncentrace a vice versa. To potvrzuje například Whitehead et al. (2009), který popisuje, že nízké průtoky na řece Tame pod bodovým zdrojem znečištění vykazují vyšší koncentrace fosforu. S postupující změnou klimatu a stále nižšími minimálními průtoky by to tak mohlo mít velký dopad na koncentrace fosforu ve vodních tocích (Whitehead et al. 2009). Téměř o 50 % vyšší koncentrace fosforečnanů zaznamenal při suchém období na řece Lužnici Hrdinka et al. (2012), což je v souladu se zjištěními Whiteheada. Vlivu zvýšeného průtoku na koncentraci fosforu v tocích si všimla Fraindová et al. (2022a) v povodích Šumavy a Krušných hor, nebyl ale tak signifikantní jako u nízkých průtoků. Při nízkých průtocích byly naměřeny zvýšené hodnoty jak celkového fosforu, tak i fosforečnanů, ne však na všech profilech. Ukázalo se, že v povodích s větším zastoupením mokřadů obsahují toky více celkového fosforu (Fraindová et al. 2022a). Vysoké koncentrace celkového fosforu během suchých epizod popsala Navrátilová (2020) na Svatavě.

Celkově tedy lze říci, že chování fosforu a jeho sloučenin ve vodách v závislosti na průtoku není dle analyzovaných studií jednotné. Nejdůležitějším faktorem jeho absolutních koncentrací a kolísání během srážko-odtokových událostí je zdroj jeho původu, i když primárně je to antropogenní činnost. V tocích, které jsou ovlivněny bodovými zdroji fosforu, by se mohla při častějších epizodách sucha koncentrace fosforečnanů zvyšovat. Naopak v povodích s plošnými či difuzními zdroji fosforu by nízké průtoky mohly znamenat nižší koncentrace, ačkoliv extrémní srážko-odtokové události by mohly mít v těchto povodích přesně opačný vliv. Fraindová et al. (2022b) měřila při srážkových událostech v povodí Blanice až pětinašobný růst koncentrace celkového fosforu, jehož původ určila v podpovrchových

odvodňovacích systémech. To může znamenat poměrně velký problém z hlediska eutrofizace vod při náhlých srážkových událostech.

2.2.5. Formy dusíku

Dusík se ve vodách vyskytuje ve více formách, tato práce se soustředí na amoniakální, dusičnanový a celkový dusík. Mezi těmito typy dusíku je určitá závislost způsobená procesy nitrifikace a denitrifikace. Amoniakální dusík se nitrifikuje na dusitany a ty se posléze nitrifikují na dusičnany. Denitrifikace probíhá opačným směrem. Zatímco při procesu nitrifikace je spotřebováván kyslík, tento je při denitrifikaci naopak uvolňován (Pitter 2005).

Vliv dynamiky srážko-odtokového režimu na koncentrace amoniakálního dusíku se zdá být nejednotný. Podle Langhammera (2002) je amoniakální dusík vázán nejčastěji na bodové zdroje znečištění (například čistíčky odpadních vod). To znamená, že by měl vykazovat inverzní závislost s hodnotami průtoku. Na jeho koncentrace má vliv i proces nitrifikace. Podle Whiteheada et al. (2009) se v souvislosti s klimatickou změnou bude při nízkých letních průtocích a vysokých teplotách zrychlovat proces nitrifikace, a proto budou koncentrace amoniakálního dusíku klesat (na rozdíl od dusičnanového dusíku). Klesající tendenci koncentrace amoniakálního dusíku se zvýšeným průtokem pozoroval Wang et al. (2016) v čínském povodí. Zjistil, že zatímco při nízkých průtocích jsou hodnoty amoniakálního dusíku poměrně variabilní, při vyšších průtocích jsou vždy nízké. To koresponduje s výše zmíněným tvrzením Langhammera (2002), že při vyšších průtocích jsou jeho koncentrace ředěny. Jiné studie ale ukazují odlišné výsledky. Například Hrdinka et al. (2012) při měření koncentrací amoniakálního dusíku v období nízkých průtoků v povodí Lužnice žádné signifikantní změny v koncentracích nezaznamenal. Nejednoznačné výsledky zaznamenaly i Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020), když vysledovaly, že zatímco při nízkém průtoku způsobeném suchem a při bleskové povodni koncentrace amoniakálního dusíku klesala, během jiné epizody sucha a při déletrvajících deštích naopak rostla. Žádnou vazbu na průtok u amoniakálního dusíku neobjevila ani Fraindová et al. (2022a). Fučík et al. (2012) při výzkumech na Kopaninském potoce došel taktéž k nejednoznačným výsledkům, v jeho případě ale na většině profilů koncentrace amoniakálního dusíku se zvyšujícím se průtokem spíše rostly. Amoniakální dusík se často váže na půdní částice (Kvítek a Tippl 2005). To by mohlo značit zvyšování jeho koncentrací v oblastech (obzvláště zemědělských), kde dochází k výrazné půdní erozi, především při vyšších srážkových úhrnech.

Dusičnanový dusík je produktem nitrifikace amoniakálního dusíku (přes dusitanový dusík). Do vod se dostává i depozicí z atmosféry (Pitter 2005). Největším zdrojem dusičnanového dusíku jsou plošné zdroje znečištění v podobě zemědělských ploch ošetřovaných hnojivy na bázi dusíku a jejich drenáží (Langhammer 2002). Roční chod koncentrací dusičnanového dusíku je primárně ovlivněn vegetačním obdobím rostlin, které ho na jaře a v létě spotřebovávají pro svůj růst. Proto je obtížné v dlouhodobém měřítku analyzovat jeho koncentrace ve vodách v závislosti na srážko-odtokovém režimu. Whitehead et

al. (2009) predikuje, že se koncentrace dusičnanového dusíku v tocích budou zvyšovat, a to hlavně kvůli vyšším teplotám, při kterých rychleji mineralizuje půda, nižším průtokům, které budou méně ředit koncentrace polutantů a rychlejší nitrifikaci. Nejsignifikantnější budou nárůsty koncentrací po delších epizodách sucha následovaných vysokými úhrny srážek (Whitehead et al. 2009). Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk, které v suchém období sledovaly rapidní zvýšení koncentrací dusičnanového dusíku, toto chování přičítají většímu (nezřetěněnému) znečištění a malému příspěvku relativně čistší podzemní vody, která by znečištění redukovala. Při povodních se naopak koncentrace snižovala. To koresponduje i s výsledky Neala et al. (2012), který i přes pozorovanou komplexnost vztahů dusičnanový dusík – průtok determinoval spíše klesající koncentrace s rostoucím průtokem. Botter et al. (2019) naproti tomu zjistila, že koncentrace dusičnanového dusíku jsou nízké při povodních i při nízkých průtocích. Langhammer (2002) uvádí, že nejvyšší koncentrace dusičnanového dusíku lze pozorovat brzy na jaře při nejvyšších průtocích, zatímco nejnižší se vyskytují v létě při nízkých průtocích a vrcholné epizodě vegetačního období. Vyšší koncentrace při větší vodnosti potvrzují Hrdinka et al. (2012), Douglas et al. (2013), Fraindová et al. (2022a) nebo Pietruszyński a Cieśliński (2019). Poslední dvojice autorů dokonce zaznamenala nárůst koncentrace dusičnanů při srážko-odtokové události o 371 %. Krátkodobými změnami v koncentraci dusičnanového dusíku v závislosti na průtoku se zabýval například Fučík et al. (2012). Ten odhalil hlavní dva typy chování – při hysterezní smyčce proti směru hodinových ručiček nejprve koncentrace mírně roste, po kulminaci průtoku klesá, aby při snižování průtoku zase vzrostla a po odeznění srážko-odtokové události, kdy převládne opět bazální odtok, se ustálila na původní úrovni. Při smyčce sledující směr hodinových ručiček nejprve koncentrace klesá a po dosažení nejvyššího průtoku roste na původní hodnoty. Baker a Showers (2019) také našli více typů hysterezních smyček, jejich variabilitu přikládali nejvíce stavu předchozího nasycení půdy vlhkostí.

Celkový dusík představuje součet předchozích forem dusíku (a organického). Jelikož každá jeho složka může na srážko-odtokové události reagovat jinak a poměr složek není stálý, jsou výsledky studií jeho vazby na hydrologické extrémy poněkud odlišné. Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020) objevily silnou zápornou korelaci celkového dusíku s průtokem. Podle jejich výsledků reaguje celkový dusík na vydatné srážky snížením koncentrace, při suchých epizodách s nízkými průtoky pak jeho koncentrace rostou. Botter et al. (2019) naopak v případě švýcarských řek zjistila, že zatímco při nízkých průtocích se koncentrace celkového dusíku snižuje, při vysokých průtocích vykazuje celkový dusík chemostatické chování. V polském povodí dokonce Pietruszyński a Cieśliński (2019) při srážkové události naměřili dvojnásobné hodnoty celkového dusíku. Proto jsou další autoři (Rostami et al. 2018, Rostami et al. 2020) opatrní s děláním závěrů o chování celkového dusíku při změnách vodnosti. Při jejich výzkumech v podstatě neobjevili žádnou vazbu na srážko-odtokový režim, hodnoty spíše více korelovaly se zastoupením zemědělských ploch v povodí.

Jelikož jsou různé formy dusíku různě vázané, jsou spjaty s jinými zdroji znečištění a různými typy mobilizace, lze těžko vyjádřit jejich celkové chování. V této podkapitole byly z vybraných studií shrnuty poznatky o chování jednotlivých forem dusíku i dusíku celkového. Ty se ale v obou případech poměrně liší. Ukazuje se, že spíše než samotný srážko-odtokový režim mají na chování dusíku vliv jiné faktory (například roční období, typy zdrojů znečištění, prekondice povodí apod.), což má za následek různé vzorce chování při srážko-odtokových událostech. Podle Kasteho et al. (2020) bude v chladnějších oblastech mírného pásu spolu s vyššími srážkami docházet k intenzivnějšímu vymývání dusíkatých látek z atmosféry. Vyšší teploty mohou kvůli rychlejší dekompozici a mineralizaci organické hmoty indukovat rychlejší tvorbu dusičnanů. Na druhou stranu ale prodlužující se vegetační období rostlin zapříčiní větší odběr těchto látek rostlinami.

2.2.6. Ukazatele organického znečištění

Mezi ukazatele organického znečištění byly zahrnuty TOC a DOC (celkový a rozpuštěný organický uhlík), CHSK (chemická spotřeba kyslíku) a BSK (biochemická spotřeba kyslíku).

Hlavním zdrojem uhlíku ve vodách jsou organické látky obsažené v povodí. Jejich uvolňování do vody v přírodním prostředí způsobují především hydroklimatické faktory, avšak může za ním být i změna v depozici síranů z atmosféry (Monteith 2007). Mnoho studií se zaměřilo na TOC nebo DOC a jejich vazbu na srážko-odtokový režim. Hodnotám DOC lze přisuzovat poměrně značnou sezonní variabilitu. V oblastech, kde jsou dlouhé zimy s bohatou sněhovou pokrývkou, bývají měřeny nejnižší koncentrace DOC na konci zimy, největší naopak ihned po nástupu jarního tání, nejrarekdy i pár dní po nejnižších naměřených hodnotách. Dílčí maxima jsou pak zaznamenávána i v létě při epizodickém zvyšování průtoku vinou vysokých teplot a srážkových událostí (Juhls et al. 2020). To potvrzuje například Ågren et al. (2010), který měřil vysoké hodnoty koncentrace DOC při jarním tání ve Švédsku. Při tom determinoval několik charakteristik zimy, které mají na jarní množství DOC vliv, a to např. odtok a export DOC z povodí během zimy, počet dní s teplotou nepřesahující 0 °C, délku trvání a datum konce zimy apod. Když byla zima velice mírná, na jaře pak byl obsah DOC v půdě nižší a tím pádem, jelikož se dostává do vody hlavně vyplavením z povodí, i jeho koncentrace v toku. To může být důležité zjištění vzhledem k stále kratším a mírnějším zimám. Obecně lze pozorovat vyšší koncentrace DOC i TOC ve vodě při vyšších průtocích. Botter et al. (2019) to vysvětluje tím, že DOC a TOC jsou vázány na půdní částice a sedimenty, a proto se při srážkových událostech a vysokých průtocích více mobilizují, a to hlavně v povodích, která jsou charakterizována prudkými svahy a mělkými půdami, tj. mají nejmenší asimilační kapacitu pro uhlík a jsou nejnáchylnější k erozi. Pozitivní vztah mezi DOC a průtokem uvádí i Rostami et al. (2018) v případě kanadských řek nebo Neal et al. (2012) ve Walesu. Neal poukazuje na zjištění, že tento vztah je nejsilnější po delším období sucha. Silnou korelaci mezi DOC a průtokem vypočítal Douglas et al. (2013) na Aljašce. Při déle trvajícím suchu pozoroval postupný pokles koncentrace DOC. V Polsku pozorovaly podobné chování Puczek a Jeaktiernyczuk-Rudczyk (2020), které při suchých epizodách naměřily nízké koncentrace DOC a při následných bleskových povodních

naopak koncentrace vysoké. Překvapivým zjištěním ale bylo, že v obdobích delších srážkových epizod koncentrace DOC spíše klesaly (Puczko a Jeaktierynczuk-Rudczyk 2020). Během srážko-odtokových událostí ale nemusí být jediným faktorem, který určuje množství DOC či TOC ve vodě, jen průtok. Köhler et al. (2009) se nezastavil u zjištění, že při nejvyšší vodnosti ve švédské pramenné oblasti vykazuje tok nejvyšší koncentraci TOC, ale popsal i její další prediktory. Tím byla, kromě teploty vzduchu a chemismu břehové zóny, hlavně vlhkost půdy, respektive její nasycení z předchozích srážek. Ukázalo se, že čím více vody obsahuje půda v příbřežní zóně, tím větší koncentrace TOC se v ní nacházejí a tím pádem i uvolňují do samotného toku. S tím koresponduje i zjištění, že v letech bohatších na atmosférické srážky, kdy byla půda obecně vlhčí, docházelo k prudkému nárůstu koncentrace TOC při kulminaci, zatímco v sušších letech byl nárůst také znatelný, ale relativně menší (Köhler et al. 2009). S tím souvisí i vazba TOC na hladinu podzemní vody. Ta pozitivně ovlivňuje koncentrace TOC v břehové zóně, s jejím vzestupem (až do hloubky 5 cm pod povrchem, výše už na TOC nemá vliv) obsah TOC v půdě roste (Lyon et al. 2011).

Příkladem zjištění, že průtok nemusí být z hlediska srážko-odtokového režimu hlavním determinujícím faktorem koncentrace DOC, je studie Vidona et al. (2014) ze severovýchodu USA. Ten sice pozoroval nejvyšší koncentrace DOC při srážkových událostech a během jarního tání, jenže vysoké hodnoty zjistil několikrát i během léta, kdy jím zkoumaný tok vykazoval jen bazální odtok. Ukázalo se, že všem těmto případům předcházely období s vysokými teplotami a v delším horizontu i srážkové události. Vidon usoudil, že vyšší hodnoty DOC jsou spjaté právě s předešlými srážkami. To koresponduje se zjištěním Blaurock et al. (2021), která staví vliv extremity srážkové události na roveň s vlivem prekonice povodí z hlediska nasycení srážkami. Velký vliv podle Vidona měly i vysoké teploty, jelikož během nich probíhá zvýšená mineralizace půdy a produkuje se více DOC. Důležitým faktorem je podle něj charakteristika povodí, obzvláště zastoupení lesů, mokřadů, rašelinišť či jezer (Vidon et al. 2014).

Existují ale i studie, které závislost na průtoku a srážko-odtokovém režimu nepotvrzují. Tou je například výzkum, který prováděla Jennings et al. (2020) v horském povodí Irska. Ta pozorovala mnoho srážko-odtokových událostí, ale nepotvrdila růst koncentrace DOC se zvyšujícím se průtokem. Kategorizovala více typů chování, mezi nimiž mělo to předpokládané spíše minoritní zastoupení, naopak, častěji se koncentrace DOC s rostoucím průtokem snižovaly. Celkově ale průtok podle výsledků vysvětloval jen 19 % z celkové variability koncentrace DOC. Navíc bylo povodí charakterizované vysokým výskytem rašelinišť. To odpovídá zjištění Špringerové (2019), která ve své diplomové práci objevila větší závislost DOC na průtoku spíše v povodích s menším zastoupením rašelinišť. Clark et al. (2008) tento jev vysvětluje tím, že v případě klasických typů půd je DOC ve spodním minerálním horizontu ukládán a ze svrchního organického horizontu se naopak mobilizuje, což má za následek zvýšené koncentrace v toku při vymývání svrchních horizontů při srážkové události. Organické půdy (rašeliniště) naopak uvolňují DOC ze všech horizontů, a proto srážko-odtokový režim nevysvětluje změny jeho koncentrací v toku.

Variabilita hodnot chemické spotřeby kyslíku (CHSK) je kromě antropogenního znečištění ovlivněna i srážko-odtokovým režimem. Erlandsson et al. (2008) po vyhodnocení 35 let dlouhé datové řady učinil zjištění, že chemická spotřeba kyslíku má největší vazbu právě na změny průtoku, přičemž při nárůstu průtoků jsou hodnoty CHSK nejvyšší. V pětiletém období mezi velmi suchým a vlhkým rokem zaznamenal nárůst hodnot CHSK téměř o 40 %. K podobným závěrům došla Kočárková (2016). Ta naměřila nejvyšší hodnoty CHSK v povodí Rolavy v období vysokých průtoků způsobených jarním táním sněhu. Při zvýšených průtocích v únoru ale zaznamenala spíše nižší hodnoty. Chování CHSK bylo ovlivněno přítomností rašelinišť, která jsou důležitým zdrojem organických látek. V oblastech s největším zastoupením rašelinišť byly naměřeny nejvyšší hodnoty CHSK. To se zároveň projevilo vysokou pozitivní korelací s obsahem huminových látek. Rašeliniště jsou totiž mimo jiné zdrojem huminových látek a železa. To potvrzuje i Fraindová et al. (2022a), která na většině profilů v Krušných horách a na Šumavě zjistila stejné chování CHSK, huminových látek a železa, jejichž koncentrace se zvyšovaly s průtokem. Mezi těmito parametry byla vypočtena silná pozitivní korelace. Až čtyřnásobné hodnoty CHSK oproti mediánu byly naměřeny během srážko-odtokové události na řece Blanici Fraindovou et al. (2022b). Ta rovněž zmiňuje důležitost přítomnosti rašelinišť v povodí. Při bodovém znečištění antropogenního původu naopak s rostoucím průtokem hodnoty CHSK klesají. Projevuje se zde vliv ředění (Langhammer 2002). Stejně jako v případě TOC byl u CHSK pozorován vliv snižující se atmosférické depozice síranů, jenž měl za následek zvýšené hodnoty CHSK (Erlandsson et al. 2008).

Biochemická spotřeba kyslíku (BSK) vyjadřuje množství kyslíku spotřebovaného při biochemické oxidaci organických látek ve vodě, ukazuje tak (na rozdíl od CHSK nebo TOC) pouze množství biologicky rozložitelných látek v toku (Pitter 2005). Znečištění, které je měřeno pomocí BSK, je zejména antropogenního původu a představuje nejčastěji komunální, zemědělské či průmyslové odpady (Langhammer 2002).

Jelikož jsou zdroje znečištění BSK často antropogenního původu, tento ukazatel většinou nevykazuje významnou sezonní rozkolísanost (Langhammer 2002), což potvrdil například Bouza-Deaño při výzkumech v povodí řeky Ebro (Bouza-Deaño et al. 2008). Výjimkou mohou být oblasti zaznamenávající sezonní nápor znečištění, například vlivem turismu (Langhammer 2002). Vzhledem k faktu, že znečištění BOD pochází nejčastěji z bodových zdrojů, zaznamenávají jeho hodnoty propad v období zvýšené vodnosti, když se projeví efekt ředění (Langhammer 2002). Whitehead et al. (2009) v souladu s Langhammerem konstatuje, že s nižšími (hlavně letními) průtoky se do budoucna mohou zvyšovat koncentrace BSK v tocích, jelikož bude minimalizován efekt ředění. Hammond a Pryce (2007) poukazují i na efekt zvyšujících se teplot, které mají za následek nižší koncentrace kyslíku a vyšší hodnoty BSK ve vodních tocích. BSK ale může reagovat na zvýšené průtoky i pozitivně, a to především v méně antropogenně ovlivněných povodích, kde se nachází lesní plochy. Právě v lesních porostech se tvoří více organické hmoty, která je při srážko-odtokových událostech vyplavena do vodního toku. Vysoké koncentrace BSK₅ zjistil Hrdinka et al. (2012) při povodních na řece Lužnici.

Situace ohledně BSK se ale ve vyspělých zemích postupně zlepšuje se zvyšujícím se počtem a kvalitou čistíren odpadních vod. Jen v Česku za poslední dekádu minulého století klesl objem vypouštěného znečištění indikovaného ukazatelem BSK zhruba o 87 % (Langhammer 2002). Tímto vysvětluje celkový pokles koncentrací BSK₅ v krušnohorských povodích Navrátilová (2020).

2.2.7. Herbicidy

Specifickou skupinou látek, které se nacházejí především v antropogenně ovlivněných vodních tocích, jsou pesticidy. V této práci jsou analyzovány některé z látek spadající do skupiny herbicidů, tedy látek, které mají za úkol zabránit růstu plevelů, jež negativně ovlivňují zemědělskou produkci (Langhammer 2002).

Velká část herbicidů jsou látky přírodě cizí (Langhammer 2002). I přes své zjevné benefity mohou mít kvůli své časté toxicitě a vedlejším účinkům negativní vliv na životní prostředí (Kolpin et al. 1998). Do vodních toků se herbicidy dostávají především při splachu ze zemědělských pozemků nebo větrem (Langhammer 2002). Herbicidy po aplikaci podléhají degradačním procesům. Na jejich rychlost má přitom vliv více faktorů, jako pH, teplota nebo mikrobiální aktivita v půdě (Mikulka a Kneifelová 2004). Při rozkladu herbicidů vznikají jejich tzv. metabolity, které mohou v půdě či ve vodě přetrvávat mnohem déle, často i jednotky až desítky let. Hancock et al. (2008) ve svém výzkumu v USA našel v půdní vodě jen ty herbicidy, které byly aplikovány ve stejný rok. Pouze metabolity byly nalezeny v případě herbicidů, které byly aplikovány před více než 1 rokem.

Mobilitu herbicidů v přírodním prostředí ovlivňuje několik faktorů. Přímou aplikaci dané látky je to rychlost větru. Vítr může distribuovat tyto látky do širokého okolí, kde se dostávají do půdy či do povrchových vodních toků. Dalším faktorem je druh půdy. V lehkých, písčitých půdách s malou sorpční kapacitou se herbicidy snadno pohybují skrz půdní profil a hrozí tak jejich vyplavení do podzemních vod. Naopak v těžších, jílovitých půdách, se herbicidy snadněji vážou a méně mobilizují (Mikulka a Kneifelová 2004). Důležitou příčinou pohybu herbicidů jsou srážkové události. Při nich často dochází k vyplavování herbicidů do vodních toků (Langhammer 2002). Roli hrají kromě samotných fyzikálně-chemických vlastností herbicidů a intenzity a doby trvání srážek i další faktory, kterými jsou např. vlastnosti půdy, vegetační kryt nebo sklon svahů (Klöppel et al. 1994). Andrade et al. (2021) pozorovala, že při nástupu srážkové události se rapidně zvýší koncentrace všech sledovaných herbicidů ve vodních tocích v Argentině. Následný pokles na původní koncentrace pak trval průměrně 7 dní. Výzkum Dobiáš et al. (2018) na Čechtickém potoce ukázal, že převážná většina pesticidů a jejich metabolitů reagovala na rychlé zvýšení průtoku zvýšením koncentrací, a to především při intenzivnějších srážkových událostech. Naproti tomu ale metabolity metazachloru, alachloru, acetochloru a metolachloru dosahovaly při vyšších průtocích nižších koncentrací. Samotné herbicidy tedy většinou reagují na srážkové události pouze určitou dobu po jejich aplikaci, poté už v prostředí převažují jejich metabolity, které mohou, ale i nemusí reagovat podobně.

2.3. Přehled vybraných metod

V této kapitole budou představeny vybrané metody práce s daty a typy analýz vyskytující se v literatuře. Z dostupné literatury byly zvoleny často používané statistické analýzy, které se používají při práci s hydrologickými a hydrochemickými daty. Jedná se o analýzu hlavních komponent (PCA – Principal Component Analysis), regresní analýzu, Mann-Kendallův test, shlukovou analýzu (CA – Cluster Analysis), Spearmanův korelační koeficient, Pearsonův korelační koeficient a metodu hysterezních smyček.

2.3.1. Regresní analýza

Regresní analýza je jedna ze základních a často používaných metod statistické analýzy dat. Pomocí lineární regrese lze studovat vztah mezi závislými a nezávislými proměnnými, konkrétně mezi jednou závislou proměnnou y a jednou nezávislou proměnnou x (Brown 2009). Platí zde vztah:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

kde y je hodnota predikované závislé proměnné, β_0 a β_1 jsou parametry a x je hodnota nezávislé proměnné (prediktoru). Zmíněná rovnice není vlastně nic jiného než vyjádření přímky ve dvourozměrném prostoru. Tato přímka má tu vlastnost, že má nejmenší možný součet reziduí (respektive jejich čtverců), což znamená, že její průměrná vzdálenost od pozorování je nejmenší možná.

Tato metoda je pro svou jednoduchost a v mnoha případech i účelnost poměrně hojně používána. Výsledky lineární regrese autoři nejčastěji uvádějí ve formě grafu s uvedenými statistikami R^2 (koeficientem determinace) a p -hodnotou a předpisem funkce či sklonem přímky.

Metodu lineární regrese využila například Fraindová et al. (2022), která zkoumala, jak se mění hodnoty určitých charakteristik geochemismu vod v povodí Rolavy a Vydry, Köhler et al. (2008) studující vztah mezi koncentrací TOC a úhrnem srážek či teplotou půdní vody v malém povodí v severovýchodním Švédsku, Fučík et al. (2012) když zjišťoval, jaký má vliv okamžitý průtok na koncentrace dusičnanového dusíku, amoniakálního dusíku a nerozpuštěných látek v Kopaninském potoce nebo Worral a Burt (2008) při evaluaci vlivu sucha na obsah DOC ve vodních tocích Velké Británie. Sapač et al. (2020) pomocí lineární regrese stanovovala závislost mezi šesti hydrologickými a biogeochemickými proměnnými ve slovinském povodí. Ne vždy se při lineární regresi na osách zobrazují pravé hodnoty (koncentrace, průtoku...), někteří z autorů (Godsey et al. 2009, Botter et al. 2019) na osách místo reálných hodnot vynášejí logaritmické jednotky, jelikož výsledné přímky se pak dají lépe porovnat s referenčními přímkami o sklonu -1, 0 nebo 1, které značí ideální lineární chování látky v toku. Metodu lineární regrese využil také Wiejaczka (2015), který jejím použitím studoval závislost konduktivity vody na její teplotě.

Pokud se trend závislosti mezi dvěma proměnnými zdá být nelineárního charakteru, dají se použít určité modifikace lineární regrese. Tou je například logaritmická regrese, která u nezávislé proměnné (x) počítá s jejím přirozeným logaritmem:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x)$$

Logaritmické regrese využil například Ledesma et al. (2016) při modelování vlivu příbřežní zóny na hydrologické a hydrochemické procesy v povodí na severovýchodě Švédska nebo Wang et al. (2016), který studoval vztah mezi průtokem a koncentrací amoniakálního dusíku v čínské řece Wej-che. Určitým způsobem byla použita logaritmická regrese ve studii závislosti vybraných parametrů kvality vod na průtoku na kanadských řekách (Rostami et al. 2018). Autoři zde podle dostupných dat testovali pro každý parametr kvality vody na každém profilu všech řek více regresních modelů (lineární, exponenciální, polynomický, logaritmický) a podle výsledného koeficientu determinace (R^2) vybrali pro každý parametr nejvhodnější model k predikci stavu do budoucnosti.

Někteří autoři nepoužívají jednoduchou lineární regresi, ale takzvanou mnohonásobnou lineární regresi (anglicky multilinear regression nebo multiple linear regression). Mnohonásobná lineární regrese používá na rozdíl od lineární regrese k předpovědi jedné závislé proměnné dvě a více nezávislých proměnných (Brown 2009), a to podle vztahu:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n$$

kde y je hodnota predikované závislé proměnné, $\beta_0 - \beta_n$ jsou parametry a $x_1 - x_n$ jsou hodnoty nezávislých proměnných (prediktorů). Pomocí mnohonásobné lineární regrese tedy lze přidáváním či odebráním nezávislých proměnných odhalit, které z nich nejlépe predikují (vysvětlují) hodnoty závislé proměnné.

Köhler et al. (2009) použil mnohonásobnou lineární regresi při vyhodnocování okamžité koncentrace celkového organického uhlíku (TOC) v menším vodním toku na území Švédska. Jako závislá proměnná zde byla stanovena okamžitá koncentrace celkového organického uhlíku, jako nezávislé proměnné byly určeny půdní teplota v hloubce 30 cm 4 metry od hranice toku, základní (běžná) koncentrace TOC v toku, specifický odtok a průměrný specifický odtok za určitý počet předchozích dnů. Mnohonásobnou lineární regresi využila i de Witt et al. (2021) při vyhodnocování množství rozpuštěného organického uhlíku (DOC) a jeho možných prediktorů v tocích mírných šířek severní polokoule. Pomocí mnohonásobné lineární regrese byla schopna určit, které z potenciálních prediktorů vysvětlují nejvíce variability množství DOC.

2.3.2. Analýza hlavních komponent

Analýza hlavních komponent (PCA) je další z často používaných statistických metod. Velmi často se užívá v přírodních vědách k vysvětlení struktury dat (Vialle et al. 2011). Jedná se o metodu, která hledá závislosti v tabulce (matici) dat, skládající se z hodnot více proměnných, které na sobě jsou často závislé. PCA má za úkol z tabulky dat extrahovat lineární vztah mezi více proměnnými (Fraňdová et al. 2022a). Princip PCA je poměrně složitější než u regrese. Vstupem pro PCA jsou tabulky (matice) čítající i proměnných a pro každou proměnnou j hodnot, přičemž j odpovídá počtu profilů. Počítač následně sestaví i -dimenzionální graf, jehož osy odpovídají proměnným. Do grafu je vyneseno j bodů

(podle os). Následně je bodovým mračenem proložena taková přímka, která maximalizuje vzájemnou vzdálenost bodů, které se na ni promítnou. To je ekvivalentní minimalizaci vzdáleností původních bodů od přímky (viz regresní analýza). Taková přímka vysvětluje nejvíce variability, a proto se zve hlavní komponenta 1 (PC 1). Přímka kolmá na PC 1 protínající ji v centru bodového mrače se nazývá hlavní komponenta 2 (PC 2) a vysvětluje o něco méně variability než PC 1. Pokud se z PC 1 udělá jednotkový vektor, tento vektor se pak zve singulární vektor nebo „eigenvector“ pro PC 1. Součet čtverců vzájemných vzdáleností bodů promítnutých na přímku (PC 1) se nazývá „eigenvalue“ pro PC 1. Každá z i os má určitou váhu (součet vah je roven 1), která se určuje podle toho, jak osa přispívá k variabilitě dat. Nakonec se PC 1 a PC 2 (jelikož jsou navzájem kolmé) posunou tak, aby jejich průsečík byl v počátku os, a tím vlastně vzniknou osy nové (Bouza-Deaño et al. 2008). Do nového grafu je pak každý z profilů vynesena následovně:

$$PCI_{profil\ 1} = HP1 * VOP1 + HP2 * VOP2 + ... + HPi * VOPi$$

kde $PCI_{profil\ 1}$ je hodnota profilu 1 na ose PCI , HPi je hodnota i . proměnné a $VOPi$ je váha osy i . proměnné. Obdobně se získá hodnota profilu 1 na ose PC 2. Procedura se opakuje pro všechny profily, čímž vznikne graf PCA. Ze součástí singulárního vektoru lze určit, jak moc přispívá která osa (proměnná) k oběma hlavním komponentám. Grafickým vyjádřením těchto příspěvků je takzvaný „loadings plot“. Spojením PCA plotu a loadings plotu vznikne PCA „biplot“. Jak moc jednotlivé hlavní komponenty vysvětlují variabilitu dat ukazuje „Scree plot“.

PCA je na hydrologická a biogeochemická data aplikována v mnoha studiích. Bouza-Deaño et al. (2008) pomocí PCA testoval, které faktory mají největší vliv na kvalitu vody v řece Ebro a byl díky tomu schopný určit čtyři hlavní faktory (geogenní, turbiditní, klimatický a antropogenní), přičemž každý z nich odpovídal menší skupině proměnných, které měly určitý hydrochemický význam a jejichž variabilita mohla být vysvětlena právě daným faktorem. Fraindová et al. (2022a) využila metodu hlavních komponent, aby odhalila vztahy mezi šestnácti biogeochemickými parametry, osmi charakteristikami povodí (např. krajinný pokryv, svažitost) a průtokem. Podobně si počínaly Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020), v jejich studii je PCA použita na porovnání rozdílů v parametrech kvality vody v dobách sucha, povodní a v době standardních podmínek. V zajímavém výzkumu Fučíka et al. (2012) PCA analyzovala vztah mezi nerozpuštěnými látkami, dusičnanovým dusíkem a amoniakálním dusíkem a typy a tvary hysterezních smyček při srážko-odtokových událostech (atmosférické srážky a tání sněhu) v povodí Kopaninského potoka. Fraindová et al. (2022b) pomocí PCA zjišťovala, jak se liší charakteristiky povodí jednotlivých profilů ve studovaném území a jakou mají tyto charakteristiky souvislost s parametry kvality vody. Azhar et al. (2015) používal PCA k rozdělení 9 profilů do skupin se společnými vlastnostmi kvality vody, respektive k vyjádření signifikance jednotlivých vlastností, které vysvětlují provedené rozdělení do tříd. Velmi podobné postupy můžeme nalézt i v práci, která se zabývala posouzením kvality vody pomocí multivariačních

statistických metod (Shrestha a Kazama 2007). Zde byly pomocí shlukové analýzy vytvořeny tři skupiny profilů podle míry kvality vody a následně byla u každé skupiny provedena analýza hlavních komponent, která určila, které faktory mají na kvalitu vody největší vliv.

2.3.3. Korelační koeficienty

Populárním způsobem kvantifikace závislosti mezi dvěma proměnnými jsou korelační koeficienty. Dvěma v této práci uvedenými druhy korelačních koeficientů jsou Spearmanův koeficient pořadové korelace (Spearman 1904) a Pearsonův koeficient součinné korelace (Pearson 1895).

Spearmanův korelační koeficient je neparametrickou metodou odhadu korelace. Vyjadřuje, do jaké míry lze vyjádřit vztah mezi dvěma proměnnými pomocí monotónní (neklesající či nerostoucí) funkce (Bouza-Deaño et al. 2008). Pro svou jednoduchost a nenáročnost (nevyžaduje ani normální rozdělení, ani linearitu dat) je hojně používaným statistickým nástrojem. Je také robustní vůči odlehlým pozorováním. Korelace nese název pořadová, jelikož jejím důležitým aspektem pořadí analyzovaných prvků. Když je analyzován vztah mezi dvěma proměnnými, každé naměřené hodnotě se přiřadí pořadní číslo podle velikosti (v rámci každé proměnné zvlášť). Poté se v každé příslušné dvojici pozorování (z každé proměnné jedno) spočte jejich rozdíl. Rozdíl je dosazen do vzorce:

$$\rho = 1 - \frac{6 * \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

kde ρ je hodnota Spearmanova korelačního koeficientu, d je zmíněný rozdíl mezi pořadím ve dvojici a n celkový počet pozorování v rámci jedné proměnné (počet dvojic). Tento vztah lze využít, pokud data v rámci jedné proměnné neobsahují dvě stejné hodnoty. Pokud ano, je třeba využít komplikovanější vztah tak, jak ho uvádí například (Bouza-Deaño et al. 2008):

$$\rho = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n R(x_i)R(y_i) - n(\frac{n+1}{2})^2}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n R(x_i)^2 - n(\frac{n+1}{2})^2) * \sqrt{(\sum_{i=1}^n R(y_i)^2 - n(\frac{n+1}{2})^2)}}$$

kde $R(x_i)$ a $R(y_i)$ jsou pořadí jedné, respektive druhé hodnoty ve dvojici a n je počet dvojic. Spearmanův korelační koeficient nabývá hodnot od -1 do 1, přičemž extrémy znamenají absolutní negativní, respektive pozitivní korelaci a hodnoty blíží se 0 znamenají nepatrnou či žádnou korelaci. Je vhodné, a autoři tak většinou činí, spolu s výslednou hodnotou korelačního koeficientu uvádět, zda a na jaké hladině je signifikantní.

Puczko a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020) pomocí Spearmanova korelačního koeficientu hodnotily vliv průtoku během srážko-odtokových událostí i mimo ně na 25 charakteristik kvality vody. Stejným způsobem zkoumaly, zdali má na tyto charakteristiky vliv i celková environmentální hodnota toku u daného profilu. Rostami et al. (2020) také koreloval parametry kvality vody s průtokem, rozdělil ale průtoky do tří různých intervalů, u každé pak provedl korelaci zvlášť. Vypočítané korelační koeficienty

pak posloužily jako vstup pro shlukovou analýzu. Ve své předchozí práci (Rostami et al. 2018) používal korelaci k vyhodnocení vztahů mezi průtokem a srážkami (respektive ke zjištění, kolik dní po srážkové události nejlépe reaguje průtok) a následně ke zjištění, jak reagují v ideální „zpožděný“ den na průtok parametry kvality vody. Korelaci využila také Broder et al. (2017) při porovnávání charakteristik vody z hlediska DOC a DOM v pramenné oblasti Harzu, nebo Fučík et al. (2012), který se snažil vyčíslit vztah mezi N-NO₃, N-NH₄ a nerozpuštěnými látkami a průtokem při srážko-odtokových událostech. Specifickým způsobem se Spearmanovým korelačním koeficientem pracovala Fraindová et al. (2022a), kdy po výpočtu samotného koeficientu pro vzájemnou závislost mezi mnoha parametry kvality vody (včetně průtoku) vytvořila takzvané korelační mapy. V nich jsou vyneseny veškeré parametry kvality vody naproti sobě do čtvercové matice a body různých odstínů, tmavosti a hranic indikují hodnoty Spearmanova korelačního koeficientu mezi každými dvěma parametry. Pomocí Spearmanova korelačního koeficientu byly zkoumány i sezonní vlivy na charakteristiky kvality vody (Shrestha a Kazama 2007, Bouza-Deaño et al. 2008).

Pearsonův korelační koeficient je naopak parametrickou metodou odhadu korelace mezi dvěma proměnnými (Bouza-Deaño et al. 2008). Předpokládá linearitu dat a hodí se především pro korelaci proměnných s normálním rozdělením. Nechá se spočítat jako podíl kovariance dvou proměnných a součinu jejich směrodatných odchylek dle vztahu:

$$\rho = \frac{cov(XY)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

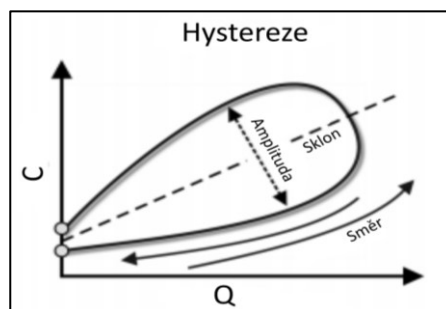
Stejně jako Spearmanův korelační koeficient nabývá hodnot od -1 do 1 podle stejných kritérií. Hodnoty parametrů kvality vody často nemají normální rozdělení (Rostami et al. 2018), proto se ve studiích týkajících se kvality vody častěji používá Spearmanův korelační koeficient. Alternativou pro takové případy je také Kendallův (neparametrický) koeficient pořadové korelace (Kendall 1938). Kendallův koeficient je robustní vůči odlehlým pozorováním a nelinearitě dat (Newson 2002). Ve své práci ho používá například Fučík et al. (2012).

Pearsonův korelační koeficient byl použit například v práci Wiejaczky (2015), kde pomocí něj byla sledována závislost mezi teplotou vody a elektrickou vodivostí v závislosti na regulaci toku vodní nádrží. Bouza-Deaño (2008) pomocí Pearsonova korelačního koeficientu měřil závislost mezi mnoha proměnnými kvality vody v řece Ebro, Fučík et al. (2012) používal všechny tři korelační koeficienty (viz výše), nicméně Pearsonův nepoužíval, když v datech bylo nalezeno jiné než normální rozdělení. Vysoký Pearsonův k. k. značí, že proměnné spolu korelují a zároveň vykazují lineární závislost. Proto Navrátilová (2020) korelovala parametry s průtokem pomocí Pearsonova k. k. a při vysokých výsledných hodnotách doplnila analýzu i o lineární regresi.

2.3.4. Hysterezní smyčky

V literatuře se lze poměrně často setkat s popisováním vztahu mezi koncentrací určité látky či hodnotou parametru kvality vody a průtokem pomocí takzvaných hysterezních smyček. Hystereze je nelineární chování, které je v hydrologii a obecně v přírodních systémech poměrně běžné (Zuecco et al. 2016). Jedná se o chování, kdy koncentrace určité látky ve vodě během srážko-odtokové události má při daném rostoucím průtoku jinou hodnotu, než když po skončení této události průtok klesá na stejnou hodnotu (Toler 1965, Evans a Davies 1998, Wymore et al. 2019). To má za následek konstrukci smyčky, pokud jsou hodnoty průtoku a koncentrace dané látky vynášeny v čase do grafu. V posledních letech je studium chování vlastností toků při srážko-odtokových událostech pomocí hysterezních smyček poměrně rozšířené, a to hlavně díky dostupnosti dat s velkým časovým rozlišením (Lloyd et al. 2016). Obecně je pro takovouto analýzu potřeba co největší časové rozlišení dat parametrů kvality vody a průtoku (v řádu minut). Popis chování látek v toku během hydrologických extrémů je nezbytný pro pochopení budoucích dopadů klimatické změny na kvalitu vod.

Jak lze vidět na obr. 1, hysterezní smyčku lze popsat pomocí směru, amplitudy (velikosti) a sklonu (Creed et al. 2015). Zdrojem variability koncentrace látek ve vodě v čase je podzemní voda, která má téměř stálé složení, a pak voda, jež se dostane do toku povrchově během srážko-odtokové události. Evans a Davies (1998) tyto dva druhy vody zvou „pre-event“ a „event“ water. Autoři ve svých pracích většinou uvádí graficky znázorněné hysterezní smyčky znázorňující jejich tvar a směr, avšak někteří v rámci snahy o možnost porovnání smyček



Obr. 1: Základní popisné charakteristiky hysterezní smyčky. Převzato z Creed et al. (2015), upraveno

zavádí určité popisné charakteristiky, jako například sklon, amplitudu, zakřivení, a především hysterezní indexy HI (Lloyd et al. 2016, Zuecco et al. 2016, Wymore et al. 2019, Baker a Showers 2019, Blaurock et al. 2021, Burt et al. 2015). Časté je dělení hysterezních smyček do podobných skupin podle tvarů a směrů (po nebo proti směru hodinových ručiček, standardní tvar, „osmičkový“ tvar apod.).

Hysterezní smyčky jsou využity v mnoha studiích. Zuecco et al. (2018) pomocí hysterezních smyček zkoumal spojitost mezi průtokem a třemi proměnnými (půdní vlhkostí, hladinou podzemní vody a konduktivitou) v horských povodích. Podobně si počínal i Eludoyin et al. (2017), který se zaměřil na vybrané parametry kvality vody (konduktivitu, pH, N-NO₃- a další) a jejich reakci na změnu průtoku nebo Fučík et al. (2012), zajímající se o vazbu určitých forem dusíku a nerozpuštěných látek na průtok. Creed et al. (2015) použila vypočtený sklon hysterezních smyček k porovnání s řádovostí toků, aby popsala, jak se postupně mění chování rozpouštěné organické hmoty směrem po toku. Long et al. (2017) pomocí hysterezních smyček sledoval závislost koncentrace některých organických a anorganických látek a bakterie *E. coli* na průtoku.

Lawler et al. (2006) vyvinul bezrozměrný hysterezní index HI_{mid} , pomocí kterého lze kvantifikovat velikost a směr hysterezní smyčky tak, aby šly tyto parametry porovnávat mezi různými smyčkami z různých srážko-odtokových událostí a profilů. Definoval ho jako:

$$HI_{mid} = (C_{RL} / C_{FL}) - 1$$

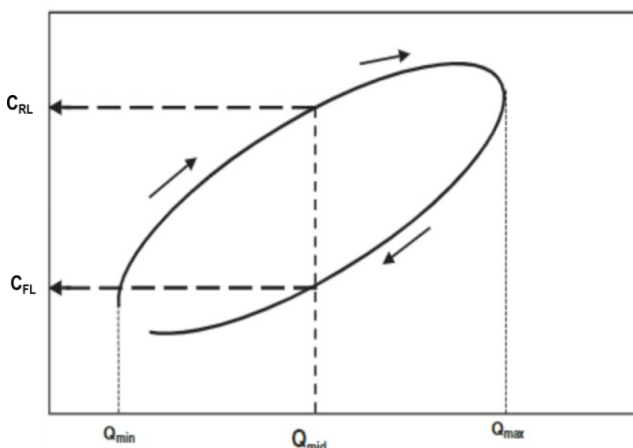
pro smyčky sledující směr hodinových ručiček (koncentrace látky při rostoucím průtoku je vyšší než při klesajícím) a:

$$HI_{mid} = (-1 / (C_{RL} / C_{FL})) + 1$$

pro smyčky jdoucí proti směru hodinových ručiček (koncentrace látky při klesajícím průtoku je vyšší než při rostoucím), kde HI_{mid} je hodnota hysterezního indexu pro smyčku v místě středního průtoku pro danou srážko-odtokovou událost, C_{RL} je koncentrace sledovaného parametru při 50% (středním) rostoucím průtoku (rising limb) a C_{FL} je koncentrace sledovaného parametru při 50% (středním) klesajícím průtoku (falling limb). Střední průtok během srážko-odtokové události se předtím vypočte podle následujícího vztahu:

$$Q_{mid} = k (Q_{max} - Q_{min}) + Q_{min}$$

kde Q_{mid} je hledaná střední hodnota průtoku, k je pozice, ve které se vyhodnocuje šířka smyčky (50% = 0,5), Q_{max} je maximální průtok během události a Q_{min} je minimální, tedy počáteční průtok (obr. 2). Index má hodnotu 0, pokud nelze pozorovat žádná hystereze, a zvyšuje či snižuje se podle velikosti a směru hysterezní smyčky (Lawler et al. 2006).



Obr. 2: Parametry pro výpočet HI_{mid} , převzato z Lawler et al. (2006), upraveno

Lawler ale sám přiznává, že pro složitější smyčky nemusí být tento index dostačující.

Proto Lloyd (2016) modifikoval Lawlerovu metodu tak, že počítal více H-indexů (nikoliv 1 při 50% průtoku), a to 3 HI po 25 % průtoku (při 25, 50 a 75% průtocích), 9 HI po 10 % průtoku (při 10, 20,..., 90% průtocích), 19 HI po 5 % průtoku a 99 HI po 1 % průtoku. Navíc Lloyd přišel s vlastní metodou výpočtu H-indexu H_{new} :

$$H_{new} = C_{RL_norm} - C_{FL_norm}$$

kde C_{RL_norm} a C_{FL_norm} jsou normalizované koncentrace látek při normalizovaném rostoucím, resp. klesajícím průtoku. Normalizace proběhla podle vztahu:

$$Q_{i_norm} = \frac{Q_i - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}}$$

$$C_{i_norm} = \frac{C_i - C_{min}}{C_{max} - C_{min}}$$

kde Q_i / C_i je průtok/koncentrace v čase i a max/min jsou maximální/minimální hodnoty parametru během události. Normalizace je podle Lloyd et al. (2016) důležitá, protože pak se dají porovnávat srážko-odtokové události mezi sebou bez zkreslení. Proto ve svých pracích používají normalizovaná data i další autoři, například Zuecco et al. (2016), který porovnával hysterezní indexy více autorů, vytvořil svůj vlastní index h a aplikoval všechny indexy na experimentální data. Při sledování zájmových parametrů použili normalizované hysterezní smyčky i Fraindová et al. (2022a) v českých pohořích, Lloyd et al. (2016), nebo Šajnarová (2021) ve své bakalářské práci, týkající se vlivu hydrologických extrémů na kvalitu povrchových vod v pramenných oblastech. Blaurock et al. (2021) při studiu vlivu sucha a nízké hydrologické konektivity na export DOC použila normalizaci jen pro průtok, nikoliv pro koncentrace DOC, Baker a Showers (2019), kteří sledovali koncentrace dusičnanů v závislosti na průtoku, porovnávali hysterezi pouze s normalizovaným průtokem s hysterezí s normalizovaným průtokem i koncentrací dusičnanů.

2.3.5. Mann-Kendallův test

Mann-Kendallův (trendový) test (Mann 1945, Kendall 1975) je neparametrickou statistickou metodou určenou ke zjišťování dlouhodobých trendů v datech (Bissenbayeva et al. 2020), není však uzpůsoben pro absolutní kvantifikaci nalezeného trendu, proto se po jeho vyhodnocení často používají další statistické metody určující strmost trendu jako například regresní analýza či Senův estimátor (Bouza-Deaño 2008). Výhodou Mann-Kendallova testu je, že nevyžaduje určité rozdělení dat a je poměrně imunní vůči chybějícím a duplicitním datům. To je způsobeno faktem, že nepracuje s absolutními hodnotami dat, ale s jejich relativními rozdíly (Gilbert 1987). Předpokladem Mann-Kendallova testu je, že naměřená data na sobě nejsou závislá (nejsou např. měřena těsně po sobě). Statistika S se spočítá jako:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

kde n je počet pozorování a $\text{sign}(x_j - x_k)$ se rovná buď -1, 0 nebo 1 podle toho, je li rozdíl j -té a k -té hodnoty záporný, nulový či kladný. Prakticky to znamená, že se vytvoří všechny možné dvojice, ve kterých je x_j dále v pořadí měření než x_k , u každé se spočítá jejich rozdíl a k hodnotě S se přičte buď -1, 0 nebo 1. Podle výsledné p -hodnoty je pak určeno, zdali se zamítne či potvrdí nulová hypotéza H_0 , která tvrdí, že v datech nelze pozorovat žádný trend. Pokud je dat příliš (Gilbert 1987 uvádí více než 40 pozorování) a vyskytují se mezi nimi stejné hodnoty vícekrát, je potřeba spočítat varianci S a poté pomocí S a $\text{var}(S)$ testovou statistiku Z (Gilbert 1987, str. 211, rovnice 16.3 a 16.4).

Mann-Kendallův test je velmi často používanou metodou analýzy trendů v datech. Nejčastěji se pomocí něj určuje, zda rostou či klesají koncentrace sledovaných látek ve vodních tocích, či zda se za sledované období proměnily klimatické faktory. V našem prostředí jej využila například Fraindová et al. (2022b) pro determinaci dlouhodobých trendů koncentrace více látek, především sloučenin dusíku a fosforu, na řece Blanici nebo Navrátilová (2020) při studiu změn geochemismu vod v Krušných horách. V zahraniční literatuře je MK test využit např. v práci Bissenbayevy et al. (2020) pro určení dlouhodobé míry mineralizace řeky Syrdarji. Koncentrace uhlíku a dusíku ve srážkách a ve vodě a jejich celkový tok v malých norských povodích podrobil Mann-Kendallovu testu Kaste et al. (2020).

Pokud jsou v datech přítomné vlivy sezonních cyklů, měly by se použít testy, které buď vlivy sezóny eliminují, nebo jimi nejsou ovlivněny (Gilbert 1987). Takovým testem je Kendallův sezónní test (Hirsch, Slack a Smith 1982). Sezónní Kendallův test je modifikací klasického Mann-Kendallova testu. Používá stejnou statistiku, avšak aplikuje ji na každou sezónu (např. měsíc v roce) zvlášť. Sezónní statistiky jsou pak sečteny. Tento test, stejně jako Mann-Kendallův test, může být použit i při chybějících datech a duplicitních hodnotách, přičemž nevyžaduje normalitu rozložení dat (Gilbert 1987). Kendallův sezónní test použil Löfgren et al. (2011) při zkoumání trendu koncentrace DOC v půdní vodě v návaznosti na pozorování tohoto trendu ve vodě povrchové, Ledesma et al. (2016), když vyhodnocoval trendy koncentrace síranů a DOC ve švédském drobném vodním toku a jeho přilehlé zóně nebo Bouza-Deaño et al. (2008) při evaluaci trendu změny koncentrace mnoha látek a parametrů za 24leté období v řece Ebro.

2.3.6. Neparametrické estimátory sklonu

Po provedení Mann-Kendallově testu či Kendallově sezónním testu, který v datech potvrdil určitý monotónní trend, se lze pokusit tento trend kvantifikovat. K tomu slouží řada statistických nástrojů, například regresní analýza (viz výše) nebo právě neparametrické estimátory sklonu (Bouza-Deaño 2008). Regresní metody ale mohou být ovlivněny chybami či odlehlostmi v datech. Neparametrické estimátory sklonu, jako například Sen's slope estimator (Sen, 1968) nebo Theil's slope estimator (Theil, 1950), jsou na rozdíl od regrese vůči chybějícím datům, odlehklým pozorováním a chybám v datech poměrně imunní (Gilbert 1987, Kaste et al. 2020). Senova metoda kvantifikuje trend v datech vztahem:

$$Q = \frac{x_{i'} - x_i}{i' - i}$$

kde Q je sklon vektoru mezi pozorováním $x_{i'}$ a x_i a $x_{i'}/x_i$ jsou hodnoty dat (pozorování) v čase i' / i , kde $i' > i$. Prakticky to znamená, že je spočítán vektor (sklon přímky) mezi každými dvěma pozorováními ($i' > i$ aby se stejná dvojice hodnot neporovnávala dvakrát, pak by se vektory navzájem vyloučily). Počet všech sklonů odpovídá počtu všech možných kombinací dvou pozorování $n(n-1)/2$. Pak se sklony seřadí od nejmenšího po největší, a najde se prostřední hodnota – medián (Gilbert 1987, Kaste et al. 2020, Bouza-Deaño et al. 2008, Bissenbayeva et al. 2020). Senův estimátor je upravená verze Theilova estimátoru, který počítá i sklon mezi body s $i' \geq i$.

Senovou metodou doplňovali Mann-Kendallův test či Kendallův sezónní test Kaste et al. (2020), Bouza-Deaño et al. 2008 a Bissenbayeva et al. 2020). Theilovu metodu využili Löfgren et al. (2011) a Ledesma et al. (2016). Obě metody jsou ale snadno zaměnitelné, je proto možné, že někteří autoři použili druhou metodu, než kterou uvedli. Standardní je taková prezentace dat, kde jsou pro jednotlivé parametry v tabulce uvedeny hodnoty odhadnutého sklonu, které jsou doplněny informací o signifikanci podle Mann-Kendallova testu nebo Kendallova sezónního testu.

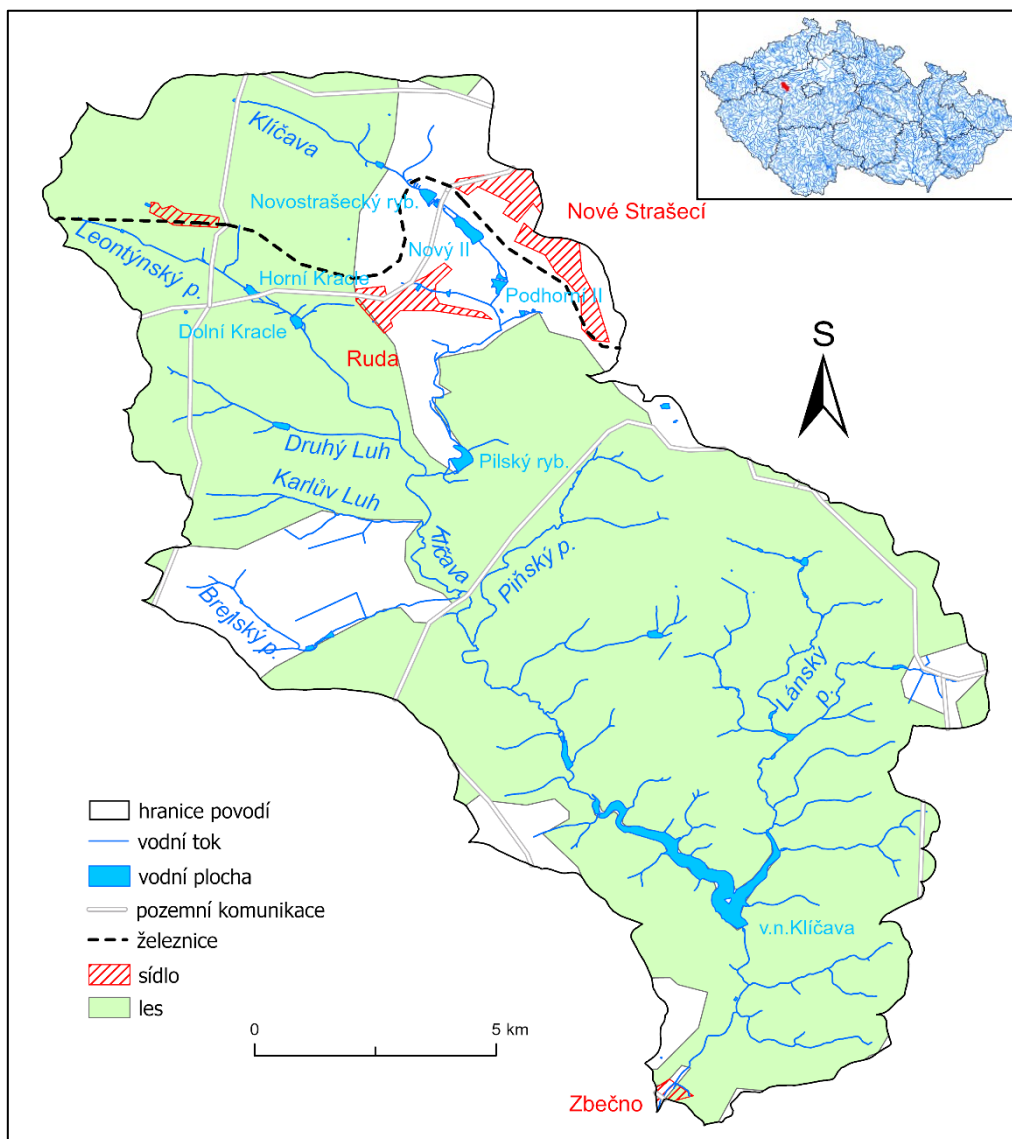
2.3.7. Shluková analýza

Shluková analýza (CA – Cluster Analysis) je nesupervizovaná statistická metoda na analýzu dat na základě jejich podobnosti (Rostami et al. 2020). Shlukuje objekty do skupin (klastřů), které vykazují co nejvyšší vnitřní homogenitu (v rámci klastru) a co nejvyšší vnější heterogenitu (mezi klastry). Nejčastější metodou je hierarchické aglomerativní shlukování (Shrestha a Kazama 2007), které shlukuje nejdříve objekty do nejpodobnějších dvojic, aby je pak postupně spojovala do větších a větších skupin (Bouza-Deaño et al. 2008). Shluková analýza má velký potenciál pro redukci dat. Když se například 15 profilů roztřídí do 3 skupin podle kvality vody nebo její reakce na srážko-odtokové události, lze pak analyzovat z každé skupiny jen jeden profil bez signifikantní ztráty výpovědní hodnoty (Shrestha a Kazama 2007, Simeonov et al. 2003). To může pomoci i snížení zbytečné dimenzionality budoucích výzkumů. Pro samotný postup shlukování je mezi autory nejčastěji používána tzv. Wardova metoda, využívající čtverec vzdáleností k měření podobností. Ta analyzuje rozptyl k vyhodnocení vzdáleností mezi shluky ve snaze minimalizovat součet čtverců euklidovských vzdáleností v každých dvou shlucích, které se vytváří najednou (Shrestha a Kazama 2007). Případným výstupem shlukové analýzy může být dendrogram, ze kterého lze vyčíst postup shlukování a výsledné skupiny (a jejich podobnost).

Hierarchické aglomerativní shlukování pomocí Wardovy metody využil Bouza-Deaño et al. (2008) aby rozřadil 13 profilů na řece Ebro do skupin podle variability kvality vody. Totožným postupem vyhodnocovali kvalitu vody v Japonsku Shrestha a Kazama (2007), kteří rozdělili profily do tří skupin podle stupně znečištění a dále v každé skupině analyzovali příčiny znečištění a jejich variabilitu, nebo Simeonov et al. (2003), který totéž prováděl v severním Řecku. Gonçalves a Alpuim (2011) testovaly spolu s Wardovou metodou ještě další dvě, které aplikovaly na 11 parametrů kvality vody v severozápadním Portugalsku, aby taktéž rozdělily profily do skupin podle znečištění (pro každý parametr zvlášť). Azhar et al. (2015) pomocí Wardovy metody rozdělil 7 profilů na dvě skupiny podle míry znečištění 6 různými parametry. Následně se mu pomocí PCA grafu podařilo potvrdit správnost zařazení shlukovou analýzou. Hierarchické klastrování použil i Rostami et al. (2020). Jako vstup pro CA mu posloužily vypočítané Spearmanovy korelační koeficienty vyjadřující sílu vztahů mezi parametry kvality vody a průtokem. Do skupin tentokrát neshlucoval profily, ale jednotlivé parametry určující kvalitu vody podle toho, jak reagovaly na změnu průtoku.

3. Charakteristika zájmového území

Praktická část této práce se zabývá analýzou dat kvality vody, její změny a vazbou na srážko-odtokový režim. Pro tuto práci bylo vybráno povodí Klíčavy, ležící v obcích s rozšířenou působností Kladno a Rakovník ve Středních Čechách. Profily, z nichž pochází data o kvalitě vody, leží na samotné Klíčavě a jejím levostranném přítoku Lánském potoce. Klíčava je přítokem Berounky, což z ní činí tok IV. řádu (Lánský potok je tokem V. řádu). Přehledová mapa povodí je zobrazena na obrázku 3.



Obr. 3: Povodí Klíčavy, vlastní zpracování. Zdroje dat: DIBAVOD (2022), ArcČR500

3.1. Základní charakteristika povodí

Klíčava pramení na území ORP Rakovník mezi vrchy Žalý (506 m n. m.) a Malý Louštín (526 m n. m.). Nadmořská výška pramene je 451 m n. m. Klíčava se vlévá do Berounky, jejímž je levostranným přítokem, na území obce Zbečno. Nadmořská výška u ústí činí 226 m n. m. Převážná část toku se nalézá na území CHKO Křivoklátsko. Povodí Klíčavy má rozlohu 87,38 km², samotný tok je dlouhý 21,67 km

(Šilhánová 2007). Rozdíl mezi nadmořskou výškou pramene a ústí je 225 m, což přisuzuje celému toku průměrný sklon 10,38 ‰. Nejdůležitějšími pravostrannými přítoky Klíčavy jsou (seřazeny podle vzdálenosti ústí od pramene Klíčavy) Leontýnský potok (místně zvaný První Luh), Druhý Luh, Karlův Luh a Brejlský potok. Hlavními levostrannými přítoky jsou Piňský potok a Lánský potok.

Lánský potok pramení zhruba 4 km severovýchodně od vodní nádrže Klíčava v nadmořské výšce 425 m n. m. a vlévá se do nádrže v nadmořské výšce 295 m n. m., což při jeho délce 6,46 km (Šilhánová 2007) znamená sklon 20,17 ‰. Plocha povodí Lánského potoka je 18,5 km². Jedná se o vodní tok V. řádu.

3.2. Přírodní poměry

3.2.1. Geologická stavba

Dle geovědních map 1 : 50 000 (ČGS 2022a) se většina povodí Klíčavy nachází na proterozoických zpevněných sedimentech Barrandienu. Jedná se především o droby, prachovce a břidlice. V jižní části povodí se vyskytují i protáhlé útvary vulkanických hornin téhož proterozoického stáří. Mladší jsou nepevněné sedimenty paleozoika, které leží v severní části povodí, přičemž jde hlavně o pískovce, slepence a prachovce karbonského stáří. Severní vrchy jsou tvořeny horninami druhohor, a to zpevněnými křídovými sedimenty marinního původu v podobě písčitých slínovců až jílovců. Mezozoické sedimenty se rovněž nachází v severovýchodní části oblasti v okolí obcí Nové Strašecí a Rynholec. Na dnech údolí se nachází kvartérní sedimenty fluvialního původu.

3.2.2. Geomorfologie

Z geomorfologického hlediska povodí Klíčavy spadá na severu do podcelku Řevničovská pahorkatina a na zbytku území do podcelku Lánská pahorkatina (Demek et al. 2006). Konkrétní zařazení v geomorfologické nomenklatuře znázorňuje tabulka 1. Lánská pahorkatina má charakter erozně-denudačního reliéfu se zbytky zarovnaných povrchů a zaoblenými sukami. Reliéf je rozčleněn hlubokými údolími Klíčavy. Řevničovská pahorkatina je strukturní stupňovina rozčleněná poměrně hlubokými a širokými údolími severovýchodního a západního směru. Na mnoha místech se zde projevují svahové procesy (Demek et al. 2006). Nejvyšším vrcholem povodí je s nadmořskou výškou 526 m n. m. vrch Malý Louštín, nacházející se v severozápadní části povodí. Jediným dalším vrcholem s nadmořskou výškou větší než 500 m n. m. je Žalý, který se nachází také na severu povodí. V centrální části za zmínku stojí vrcholy Dlouhý hřeben (470 m n. m.) a Habrová stráň (452 m n. m.), v jižní části pak vrch Sklada (453 m n. m.), jenž se tyčí přímo nad vodní nádrží Klíčava.

Systém	Hercynský
Subsystém	Hercynská pohoří
Provincie	Česká vysočina
Subprovincie	Poberounská subprovincie
Oblast	Brdská oblast
Celky	Křivoklátská vrchovina, Džbán
Podcelky	Lánská pahorkatina, Řevničovská pahorkatina

Tab. 1: Zařazení zájmové oblasti do geomorfologického členění ČR. Zdroj: Demek et al. 2006

3.2.3. Půdy

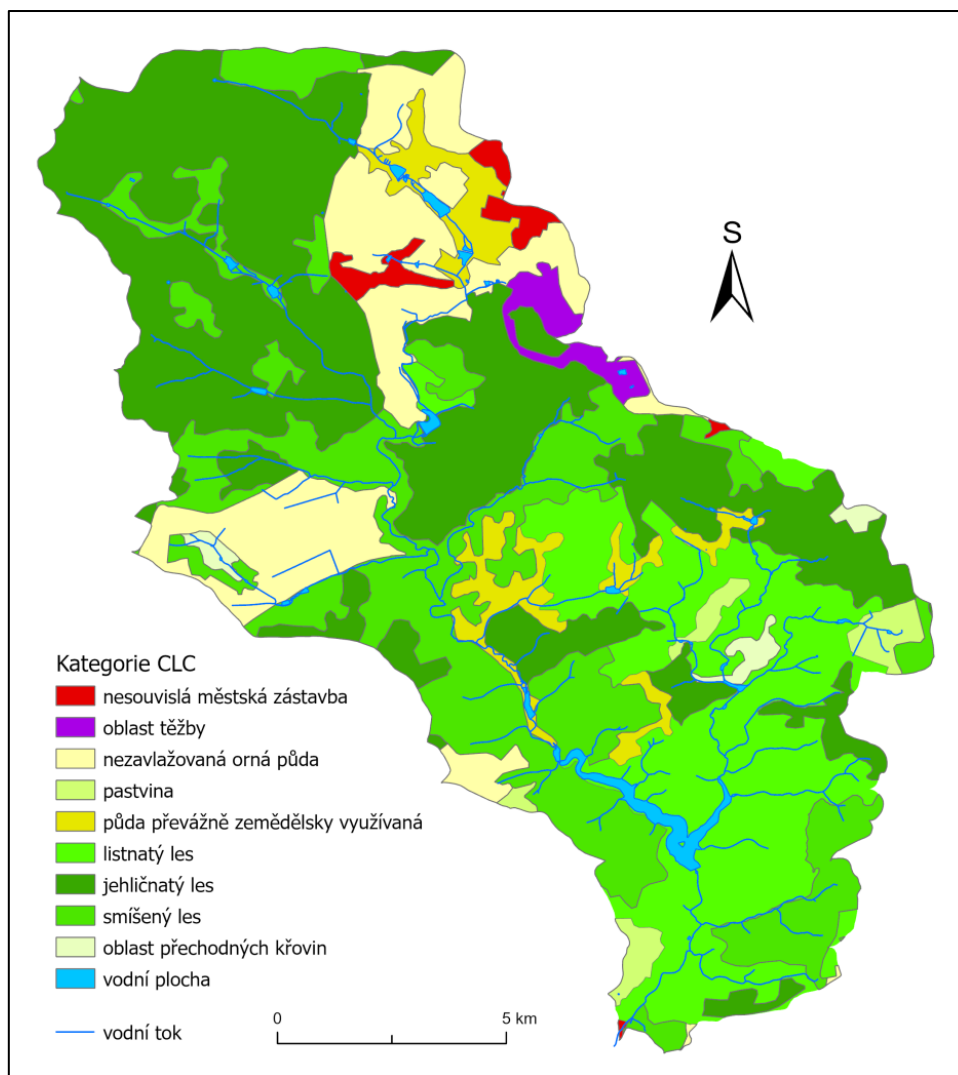
Podle půdní mapy 1 : 50 000 (ČGS 2022b) v celém sledovaném území převažují rozličné typy kambizemí, hlavně kambizem mesobazická a kambizem dystrická. Poměrně velké zastoupení mají i pseudogleje, které jsou vázány především na pramenné oblasti drobných vodních toků. Pseudogleje se společně s gleji vyskytují nejvíce v pramenné oblasti Klíčavy a jejích pravostranných přítoků Druhý Luh a Leontýnský potok, kde jsou determinovány přítomnými mokřady. Na strmých suťových březích Lánského p. a jeho přítoků se často vyskytují rankery, více než v případě Klíčavy. Na dna údolí a koryta vodních toků jsou pak vázány fluvizemě. Zajímavý je i poměrně velký ostrov hnědozemě, který se nachází na severovýchodě povodí na území obce Ruda.

3.2.4. Krajinný pokryv

Převažujícím typem krajinného pokryvu jsou lesy. Jehličnaté (34,9 %), smíšené (22,9 %) a listnaté (19,4 %) lesy tvoří celkem více než tři čtvrtiny celého povodí. Druhou nejzastoupenější kategorií krajinného pokryvu jsou zemědělské plochy, a to nezavlažovaná orná půda (11,8 %), půda převážně zemědělsky využívaná (4,9 %) a pastviny (1,8 %). Antropogenní plochy, tedy městská zástavba a oblasti těžby, zabírají dohromady necelé 3 % plochy povodí (EEA 2018). Data pochází z roku 2018. Grafické znázornění rozložení krajinného pokryvu vyjadřuje obrázek 4, přehled procentuálního zastoupení jednotlivých kategorií pak tabulka 2.

kategorie	%
jehličnatý les	34,9
smíšený les	22,9
listnatý les	19,4
nezavlažovaná orná půda	11,9
půda převážně zemědělsky využívaná	4,9
pastviny	1,8
oblasti těžby	1,4
nesouvislá městská zástavba	1,3
oblasti přechodných křovin	0,9
vodní plochy	0,7

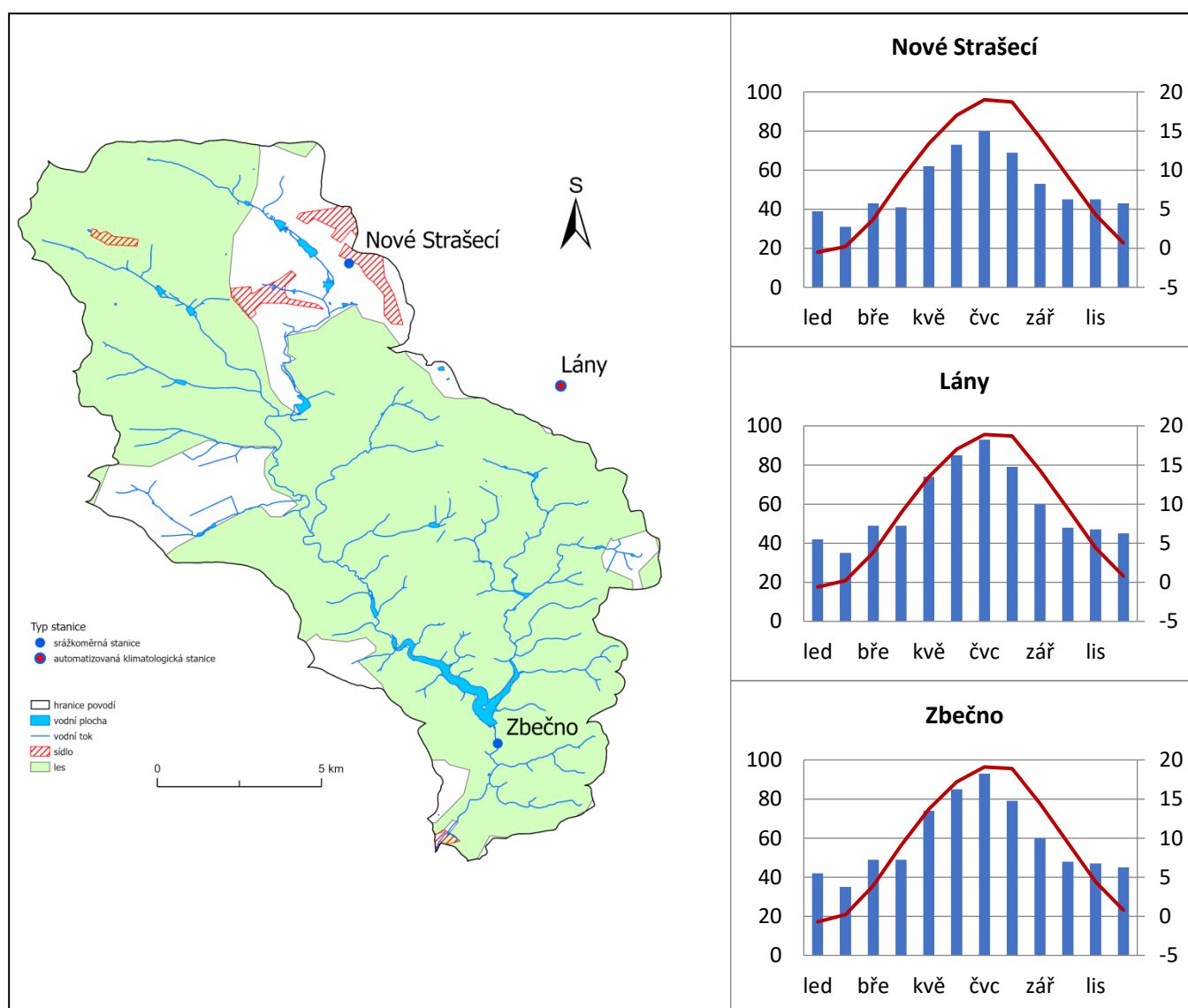
Tab. 2: Zastoupení kategorií krajinného pokryvu v roce 2018. Zdroj dat: EEA (2018)



Obr. 4: Krajinný pokryv zájmové oblasti. Zdroj dat: EEA (2018), DIBAVOD (2022)

3.2.5. Klima

Celé sledované území se dle Köppen-Geigerovy klasifikace nachází v oblasti Cfb, což ukazuje na mírné klima se středně teplými léty a víceméně vyrovnanými srážkami po celý rok. Podle Quittovy klasifikace náleží oblast do kategorie MT11, což značí krátká, mírně teplá jara, dlouhá, teplá a suchá léta, krátké, mírně teplé podzimy a mírně teplé, suché zimy s krátkým trváním sněhové pokrývky (Quitt 1971). V blízkém okolí Klíčavy se nachází tři meteorologické stanice, jejichž provozovatelem je ČHMÚ. Jedná se o stanice Lány, Zbečno a Nové Strašecí (obr. 5). Průměrná roční teplota v oblasti lehce přesahuje hodnotu 9 °C. Nejteplejším měsícem je na všech stanicích červenec, v němž průměrná teplota dosahuje zhruba 19 °C.



Obr. 5: Poloha meteorologických stanic v rámci povodí (vlevo), klimadiagramy pro jednotlivé stanice (vpravo). Červená linie vyjadřuje teplotu ve °C (pravá svislá osa), modré sloupce úhrn srážek v mm (levá svislá osa). Zdroj dat: CLIMATEDATA.ORG, ArcCR500

Na všech stanicích je nejchladnějším měsícem leden s průměrnou teplotou okolo $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Climate-data.org 2022). Dlouhodobý průměrný roční úhrn srážek na dvou stanicích přesahuje 700 mm, v Novém Strašecím ale dosahuje jen hodnoty 624 mm. Ve všech případech je nejdeštivějším měsícem červenec s 80 až 93 mm, nejsušším měsícem je únor s 31 až 35 mm. Charakteristiky jsou platné pro období 1991-2021 (Climate-data.org 2022).

3.2.6. Antropogenní ovlivnění

Do území povodí zasahují svými zastavěnými částmi čtyři obce. Jedná se o Nové Strašecí (5573 obyvatel), Ruda (759 obyvatel) a okrajově i Lány (2252 obyvatel) a Zbečno, které má 568 obyvatel (ČSÚ 2022). Nejvíce zástavby je situováno v severní části povodí, asi 5 km od pramene Klíčavy. Umělé

povrchy se zde vyskytují i ve formě pozemních komunikací, severní částí povodí vede neelektrifikovaná železnice (obr. 3). Celkově se v povodí nachází 11,9 % orné půdy, která je situována především v západní a severovýchodní části (EEA 2018, obr. 4). Mezi obcemi Nové Strašecí a Lány se rozkládá povrchový lom na těžbu lupků (obr. 4). Podle společnosti Ekologie s.r.o. se v jihovýchodní části lomu nachází legální skládka (Ekologie 2010). V povodí Klíčavy se nachází poměrně velké množství rybníků, z nichž ty nejdůležitější leží přímo na Klíčavě. Jedná se především o rybníky Novostražecký, Nový II, Podhorní a Pílský. Na Leontýnském potoce leží dva významnější rybníky, a to Horní a Dolní Kracle (obr. 3). Na Lánském potoce je více malých umělých nádrží, největší z nich je U ručiček. Mnoho z těchto umělých nádrží tvoří významná mokřadní stanoviště, a proto mají spíše ochranný význam (Šilhánová 2009). Největším vodním dílem v povodí je vodní nádrž Klíčava, která kromě regulace průtoku slouží k zásobování obyvatel pitnou vodou. Plocha zátopu nádrže činí 0,714 km², objem nádrže je 10,42 mil. m³ (Povodí Vltavy, s. p. 2008). Podle Šilhánové (2009) byla v minulosti největším bodovým zdrojem znečištění v povodí obec Ruda, ta ale měla v roce 2009 začít s výstavbou ČOV. Dalšími potenciálními zdroji znečištění jsou plochy orné půdy, těch se ale v povodí příliš mnoho nevyskytuje. V listopadu roku 2012 se v Rakovnickém deníku objevila zpráva, že ve vodní nádrži Klíčava byly nalezeny pesticidní látky. Zdroj byl nalezen v blízkosti vodního toku Karlův luh i přímo v něm, šlo však o jednorázovou událost spíše než o systematické znečišťování (Rakovnický deník 2012).

4. Data a metody

4.1. Zdroje dat

Data parametrů geochemismu vody byla poskytnuta podnikem Povodí Vltavy, s. p. Tyto parametry byly více či méně pravidelně měřeny na čtyřech profilech, jejichž poloha v rámci povodí je zobrazena na obr. 6. Na Klíčavě se nacházely tři profily (Myší díra, Požáry a Klíčava pod vodárnou). Na profilu Myší díra (MD, 3364) probíhala měření většiny parametrů mezi lety 1996 a 2020. V letech 2001 a 2004 neprobíhala měření v zimním období. V případě profilu pod vodárnou (PVN, 3360) měření začínají na konci roku 2005 a končí v roce 2020. Specifický je profil Požáry (PZR, 6750), který měří mezi lety 1999 a 2020, ale převážně jen od května a října. Na tomto profilu jsou zaznamenávány pouze teplota a koncentrace dusičnanů a celkového fosforu. Na Lánském potoce se nacházel jeden profil (LAN, 3365), na němž byla dostupná data z let 1996-2020. Charakteristiky profilů jsou uvedeny v tabulce 3. Data byla až na některé výjimky zaznamenávána v měsíčním kroku, i když občas se vyskytly chybějící měsíce, či dokonce celé roky. Data průtoků byla získána z databázi Českého hydrometeorologického ústavu a také od Povodí Vltavy, s. p. Pro Klíčavu byly dostupné dva měrné profily, a to Lány-Městečko (193000) a Klíčava pod vodárnou (3360). Profil Lány-Městečko je pod správou ČHMÚ a jsou z něj dostupné hodnoty průměrných denních průtoků, Klíčava pod vodárnou je ve správě Povodí Vltavy, s. p. a jsou z něj dostupné denní průtoky měřené v 7:00. Na Lánském potoce se nachází jeden profil, a to Lány-Běleč (194000), který spravuje ČHMÚ, a jsou u něj dostupné průměrné denní průtoky. Podrobnosti profilů ukazuje tabulka 4. Tyto profily jsou taktéž zobrazeny na obr. 6. Jedinou meteorologickou stanicí, která zaznamenává v denním kroku srážky, teplotu vzduchu i výšku sněhové pokrývky, je stanice Lány. Na této stanici bohužel nejsou dostupné hodnoty z let 2005 a 2006 a velké části roků 2004 a 2007. Proto byla veškerá data, kromě teplot, převzata ze stanice Nové Strašecí. Teploty mezi lety 2004 a 2007 byly dopočítány podle stanice Kněževy, která leží asi 22 km západním směrem od stanice Lány, o 78 metrů níže.

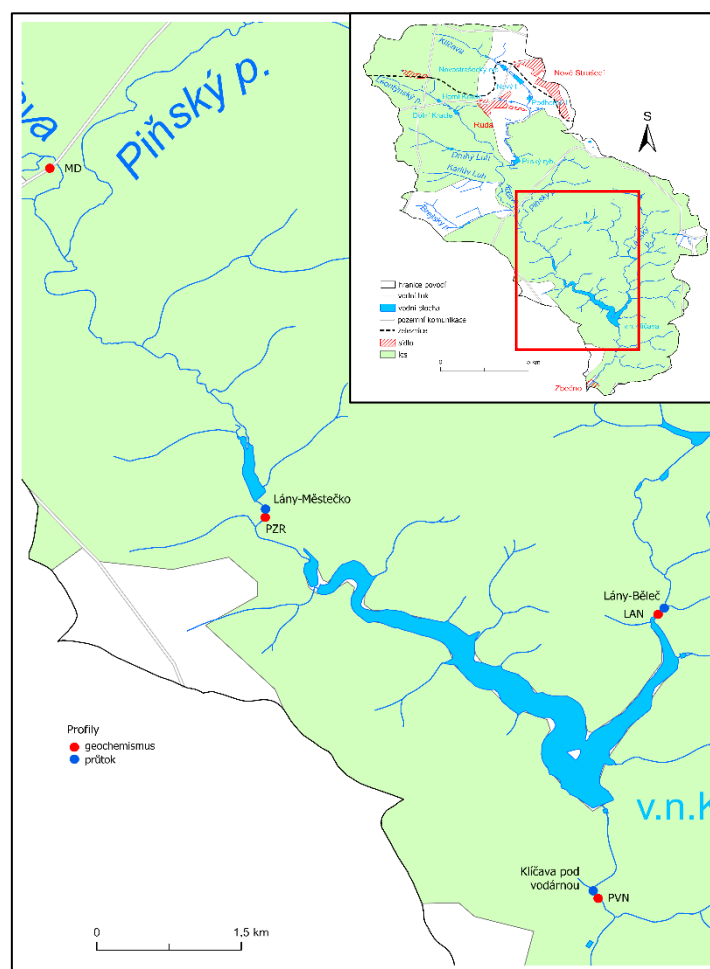
název	ID	tok	zkratka	ř. km	souřadnice (WGS84)	období	chybějící roky
Myší díra	3364	Klíčava	MD	10,7	50.1038303N, 13.8834358E	1996-2020	1999, 2000, 2003
Klíčava pod vodárnou	3360	Klíčava	PVN	1,9	50.0584550N, 13.9336897E	2005-2020	
Požáry	6750	Klíčava	PZR	5,8	50.0828494N, 13.9024042E	1999-2020*	2003
Lány	3365	Lánský p.	LAN	0	50.0763364N, 13.9392767E	1996-2020**	2008-2010

Tab. 3: Měrné profily geochemismu v povodí Klíčavy. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p. *Na profilu PZR jsou koncentrace měřeny jen zhruba 6x ročně od jara do podzimu. **Profil LAN zaznamenává data od roku 2011 pouze v teplé části roku.

název	ID	tok	ř. km	správa	souřadnice (WGS84)	období
Lány-Městečko	193000	Klíčava	6,6	ČHMÚ	50.0830139N, 13.9022789E	1996-2020
Klíčava pod vodárnou	3360	Klíčava	1,9	PVL	50.0584550N, 13.9336897E	2006-2020
Lány-Běleč	194000	Lánský p.	0,1	ČHMÚ	50.0777814N, 13.9401086E	1996-2020

Tab. 4: Měrné profily průtoků v povodí Klíčavy. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p., ČHMÚ

Veškeré mapové prvky, zobrazené v práci, byly vytvořeny pomocí programu ArcGIS Pro. Data, znázorněná v těchto mapách, byla získána z databází ArcČR500, DIBAVOD a CORINE Land Cover.



Obr. 6: Poloha profilů v rámci povodí. Zdroj dat: ArcČR500, DIBAVOD, ČHMÚ, Povodí Vltavy, s. p.

4.2. Použité metody

Jelikož byly hodnoty parametrů geochemismu měřeny zhruba jednou za měsíc a data průtoků měla denní chod, bylo nejprve potřeba přiřadit ke každé hodnotě daného parametru na všech profilech průměrnou denní hodnotu průtoků (v případě profilu PVN hodnotu naměřenou v 7:00). Následně byla provedena kontrola normality dat, a to převážně pomocí histogramů, v nejasných případech byl použit Shapiro-Wilkův test (Shapiro a Wilk, 1965). Potvrdila se hypotéza, že data průtoků ani parametrů geochemismu vody nesledují normální rozdělení. Nicméně i přesto byla pro každý parametr na všech profilech provedena regresní analýza v podobě lineární regrese, kde jako závislá proměnná byla určena hodnota parametru, jako vysvětlující proměnná byl určen průtok. Vzhledem k nenormálnímu rozdělení dat, celkově malému množství dat, která nemusí postihovat charakteristické hodnoty průtoků a koncentrací, a častým odlehlým pozorováním až na výjimky lineární regrese vykazovala nízké koeficienty determinace. Proto byly dále zvoleny spíše neparametrické statistické metody. Jednou z nich byl výpočet korelačních koeficientů pro zjištění závislosti mezi koncentrací a průtokem. Byly zvoleny tři

korelační koeficienty, a to Pearsonův (Pearson 1895), Spearmanův (Spearman 1904) a Kendallův (Kendall 1938). Jelikož Spearmanův a Kendallův korelační koeficient lépe postihují závislosti, které jsou monotónní, ale ne nutně lineární (na rozdíl od Pearsonova korelačního koeficientu), a jsou neparametrické, byl brán zřetel spíše na tyto dva.

Dále byla použita metoda znázorňování koncentrací pomocí krabicových diagramů. Z průměrných denních průtoků za celé sledované období pro daný profil byly spočteny prahové hodnoty Q_{300} a Q_{90} . Průtoky přesahující Q_{90} byly brány jako vyšší, průtoky mezi Q_{90} a Q_{300} jako normální a průtoky menší než Q_{300} jako nižší. Tyto prahové hodnoty byly zvoleny i s ohledem na rozložení dat parametrů geochemismu vody. Pokud by zvolené prahové hodnoty byly extrémnější, mohlo by se stát, že by po přiřazení průtoků ke koncentracím mezi těmito průtoky bylo jen nepatrné množství těch nízkých a vysokých. Všechny koncentrace daného parametru, ke kterým patřily průměrné denní průtoky nižší než Q_{300} , byly znázorněny jedním diagramem, koncentrace náležící k průtokům mezi Q_{90} a Q_{300} druhým diagramem a zbylé koncentrace třetím diagramem. Tak vlastně vzniklo porovnání koncentrací při malých, středních a vysokých průtocích, přičemž u každé kategorie byl zobrazen medián koncentrací, první a třetí kvartil, směrodatná odchylka a veškeré hodnoty koncentrací.

Další metoda, sloužící k vyjádření vývoje koncentrací parametrů se vzrůstajícím průtokem, spočívala v přiřazení průtoků k jednotlivým datům měřených koncentrací a seřazení všech dvojic koncentrace-průtok podle hodnoty průtoků (od nejnižší po nejvyšší). Vyjádření této metody pomocí grafu pak znázornilo případnou závislost, navíc mohly být objeveny koncentrace, které vyčnívaly z řady a odporovaly nalezenému trendu. U těchto měření pak mohlo být manuálně zkontrolováno a interpretováno, kdy se vyskytla a proč mohla danému trendu odporovat.

Koncentrace vybraných parametrů geochemismu za celé sledované období v rámci profilů, stejně jako vývoj průměrných ročních úhrnů srážek, teplot a výšky a délky trvání sněhové pokrývky za celé sledované období (1996-2020), byly podrobeny Mann-Kendallovu testu (Mann 1945, Kendall 1975), a to i přesto, že datové řady jsou poměrně krátké a hrozí tak riziko chyby (příloha 1). Pro porovnání měřených koncentrací u každého parametru napříč profily byly spočítány základní popisné charakteristiky, a to počet měření, maximum, minimum, medián, průměr a směrodatná odchylka.

Veškeré grafy byly vytvořeny za použití softwaru MS Excel, pro statistické analýzy byly využity nadstavby tohoto programu XLSTAT a Real Statistics Resource Pack.

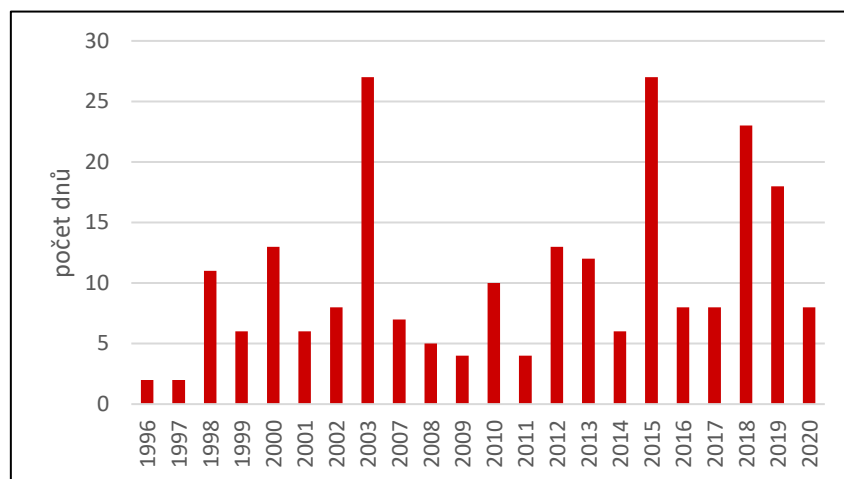
5. Výsledky

5.1. Analýza klimatických a odtokových poměrů

V této části práce budou stručně shrnuty klimatické a hydrologické charakteristiky, které se dávají do souvislosti s klimatickou změnou, především jejich vývoj za posledních 25 let ve sledovaném území (aby mohl být porovnán se změnami geochemismu za stejné období). Jedná se o teplotu vzduchu, množství kapalných srážek, výšku a trvání sněhové pokrývky a průtok/odtok. Dle odborné literatury by tyto charakteristiky měly ovlivňovat koncentrace zájmových látek ve vodních tocích.

5.1.1. Teplota vzduchu

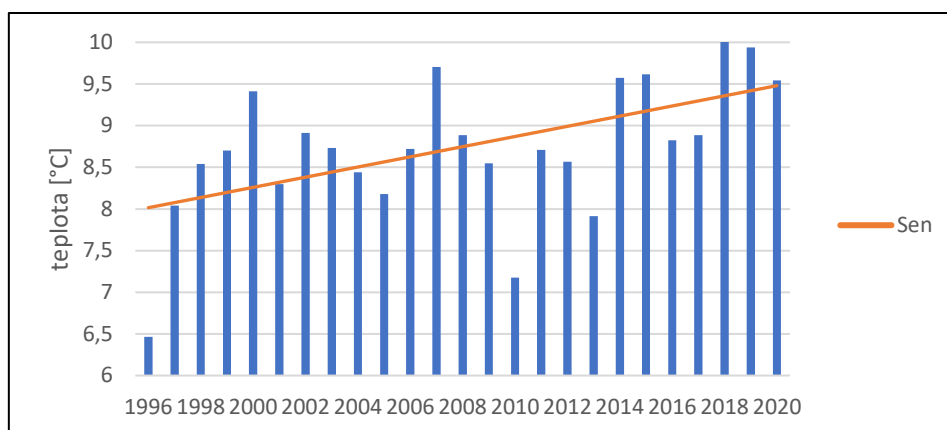
Jediná meteorologická stanice, která měřila průměrnou denní teplotu vzduchu a maximální teplotu vzduchu, byla stanice Lány. U této stanice bohužel chybí data z roků 2005 a 2006 a z částí roků 2004 a 2007, proto byly hodnoty dopočítány. Nicméně i přes to lze z dat vyvodit poměrně jasné závěry. U teploty vzduchu můžeme vidět za celé sledované období (1996-2020) nárůst. Průměrné roční teploty



Obr. 7: Vývoj počtu tropických dnů ve sledovaném území mezi lety 1996 a 2020. Zdroj dat: ČHMÚ

jsou zobrazeny na obr. 8. Dvě ze tří nejvyšších průměrných teplot byly naměřeny v posledních třech letech. Nárůst teplot by mohl být statisticky významný, jelikož je potvrzen signifikantním Mann-Kendallovým testem. Senova linie dokonce ukazuje průměrný meziroční nárůst o 0,06 °C. Nejvýraznější bylo oteplování v (meteorologické) zimě (0,104 °C za rok), na podzim (0,072 °C za rok) a v létě (0,049 °C za rok). Pro tato roční období vyšly signifikantní MK testy, pro jaro ovšem nikoliv, Senova linie v případě jara vykazovala sklon 0,023.

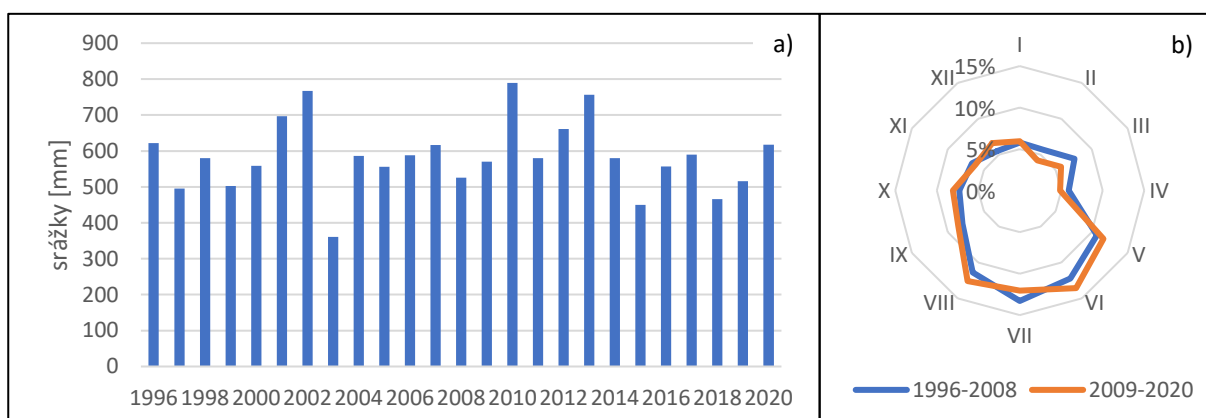
Na obr. 7 je zobrazen počet dnů s maximální teplotou přesahující 30 °C. I když MK test neodhalil žádnou významnou změnu, z grafu lze soudit, že se počet tropických dnů zvyšuje. Nejextrémnější jsou roky 2003 a 2015, kdy počet tropických dnů přesáhl hranici 25. Na začátku sledovaného období se tropické dny vyskytovaly výhradně v meteorologickém létě, v posledních letech se ale objevují i v květnu a září.



Obr. 8: Vývoj průměrných ročních teplot ve sledovaném území mezi lety 1996 a 2020. Pro roky 2004-2007 byly hodnoty dopočítány podle stanice Kněževy. Zdroj dat: ČHMÚ

5.1.2. Srážky

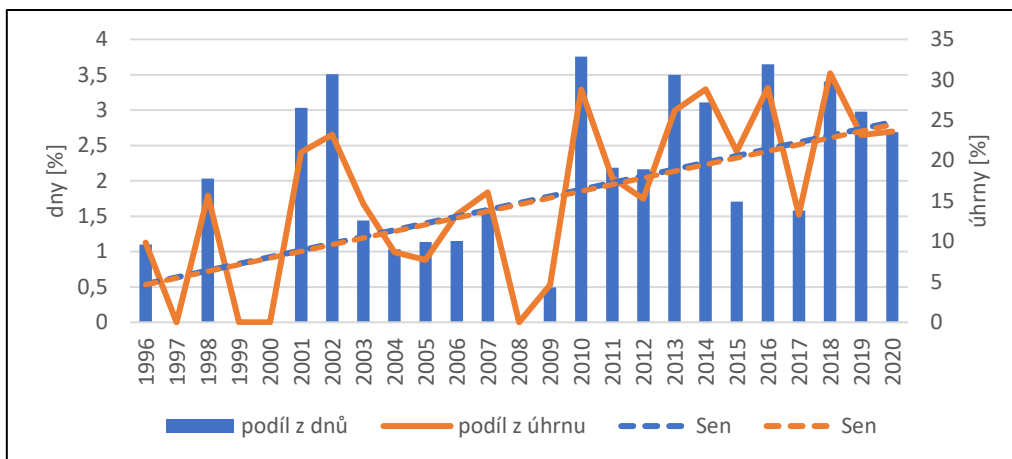
Pro analýzu srážkových poměrů byla zvolena data ze stanice Nové Strašecí, jelikož jsou v celém sledovaném období kontinuální a homogenní. Tato stanice se přitom nachází asi 4 km vzdušnou čarou od stanice Lány. Celkové roční úhrny srážek jsou zobrazeny na obr. 9a. Z grafu nelze vyčíst jednoznačný směr vývoje, což potvrzuje i nesignifikantní Mann-Kendallův test. Nejbohatšími na srážky byly roky



Obr. 9: Vývoj ročních úhrnů srážek mezi lety 1996-2020 (a), průměrný relativní příspěvek měsíců k celkovému ročnímu úhrnu srážek pro dvě období (b). Zdroj dat: ČHMÚ

2002, 2010 a 2013, kdy celkové úhrny přesáhly 700 mm. Nejsuššími pak byly roky 2003, 2015 a 2018. Zdá se, že se v pozdější části sledovaného období lehce zvyšuje podíl srážek v letních a podzimních měsících na celkovém ročním úhrnu, a to na úkor jarních a zimních (obr. 9b). Každopádně po celé období platí majoritní podíl letních měsíců na celkovém množství srážek.

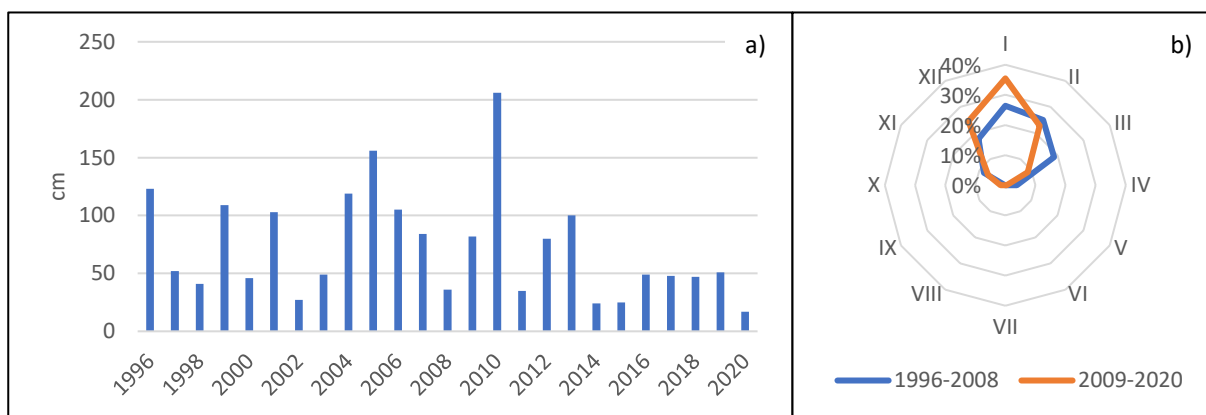
I když nebyl zjištěn celkový klesající nebo rostoucí vývoj srážkových úhrnů, byla nalezena signifikantní změna extremity srážek. Ta je představena zvyšováním podílu dnů se srážkovými úhrny nad 20 mm na celkovém počtu dnů se srážkami (obr. 10). Podíl podle Senovy linie vzrostl ze zhruba 0,5 % na více než 2,5 %. Vyrůstá také celkový podíl úhrnů z těchto extrémních srážek na celkovém ročním úhrnu, v posledních letech se blíží ke 30 %, i když v roce 1996 to bylo asi 10 %, některé roky dokonce 0 % (obr. 10).



Obr. 10: Podíl dnů se srážkovými úhrny přesahujícími 20 mm na celkovém počtu dnů se srážkami (modře), podíl úhrnů z těchto dnů na celkovém ročním úhrnu (oranžově). Zdroj dat: ČHMÚ

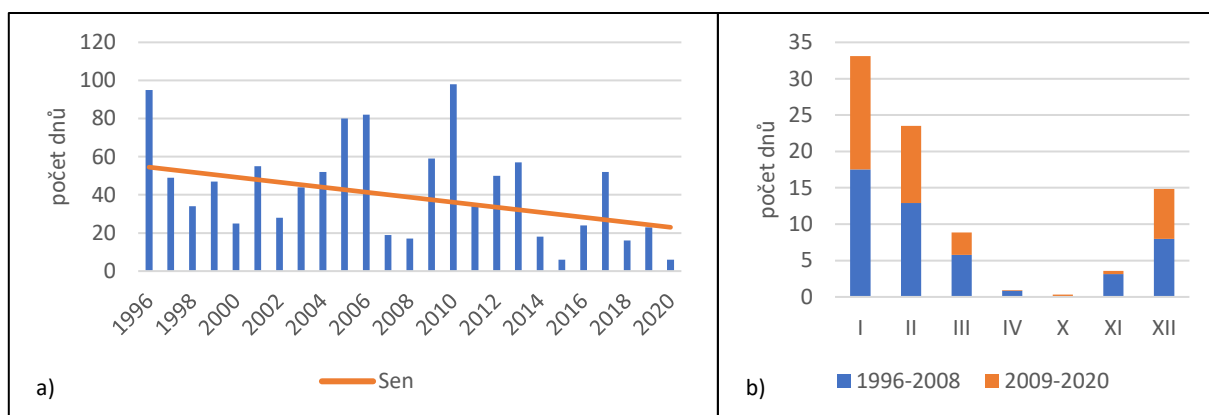
5.1.3. Sníh

Pro charakteristiky sněhových srážek a celkového trvání sněhové pokrývky byla využita data ze stanice Nové Strašecí. Průměrná výška nově napadlého sněhu za celé sledované období byla 72,6 cm, nicméně v posledních sedmi letech hodnota nedosáhla ani 50 cm. Nejbohatší na sněhové srážky byl rok 2010 (206 cm), nejchudší pak rok 2020 (17 cm). MK test jen velmi těsně nepotvrdil signifikantní pokles, ale při pohledu na obr. 11a je vidět poměrně zřetelný vývoj, který je ovšem velmi ovlivněn vysokou hodnotou v roce 2010. Dalším pozorovaným fenoménem je změna rozložení sněhových srážek v jednotlivých měsících (obr. 11b). Zatímco v raném období byly úhrny v prosinci, lednu, únoru a březnu poměrně vyrovnané, ve druhém období výrazně převážily ve prospěch prosince a ledna. V březnu nastal propad z 18,7 % na 8,6 %.



Obr. 11: Úhrn sněhových srážek za roky 1996-2020 (a), relativní příspěvek měsíců k celkovému úhrnu sněhových srážek za dvě období (b). Zdroj dat: ČHMÚ

Počet dnů, kdy na povrchu ležela alespoň 1 cm vysoká sněhová pokrývka vykazuje klesající trend, který je již potvrzen i MK testem. Z toho se dá usoudit, že větší vliv na klesající množství sněhu má spíše rychlost tání nežli změna skupenství srážek. Podle Senovy linie pokles vykazuje rychlost zhruba o 1,3 dne za rok (obrázek 12a). Průměrně se v první části období (1996-2008) vyskytovala sněhová pokrývka

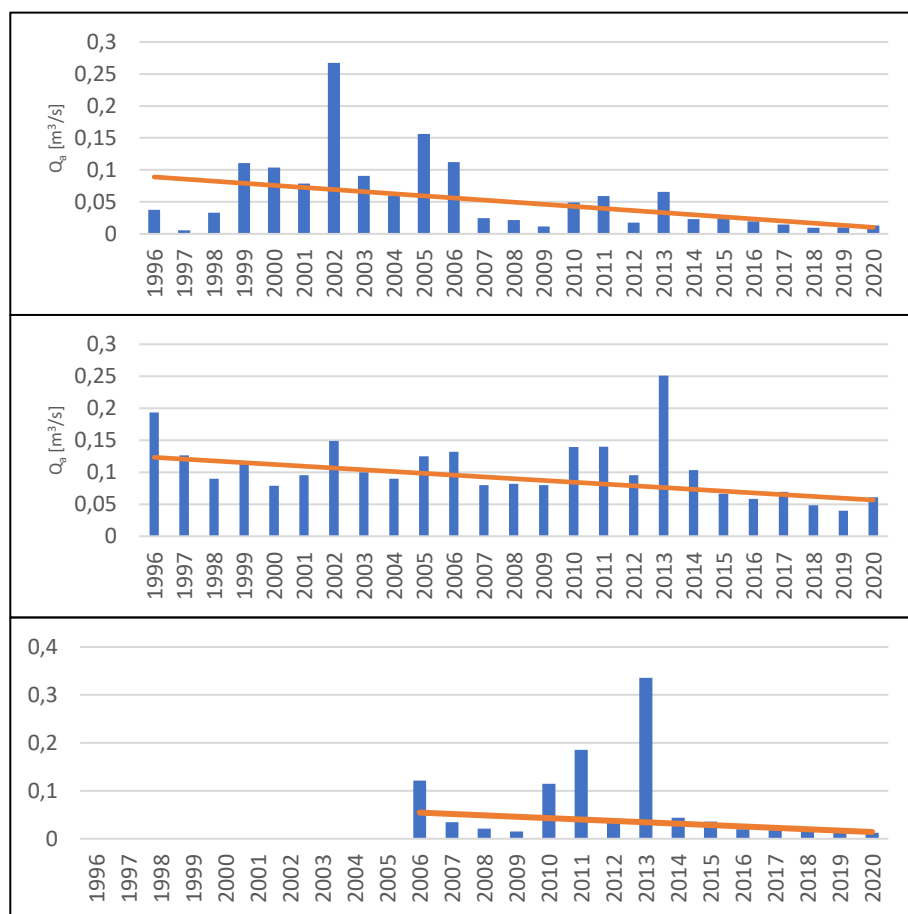


Obr. 12: Počet dnů se sněhovou pokrývkou mezi lety 1996 a 2020 (a), srovnání dvou období z hlediska trvání sněhové pokrývky za měsíce (b). Zdroj dat: ČHMÚ

více dnů ve všech měsících, kdy byla pozorována (kromě října), než v druhé části (obr. 12b). Největší rozdíly jsou v březnu, dubnu a listopadu.

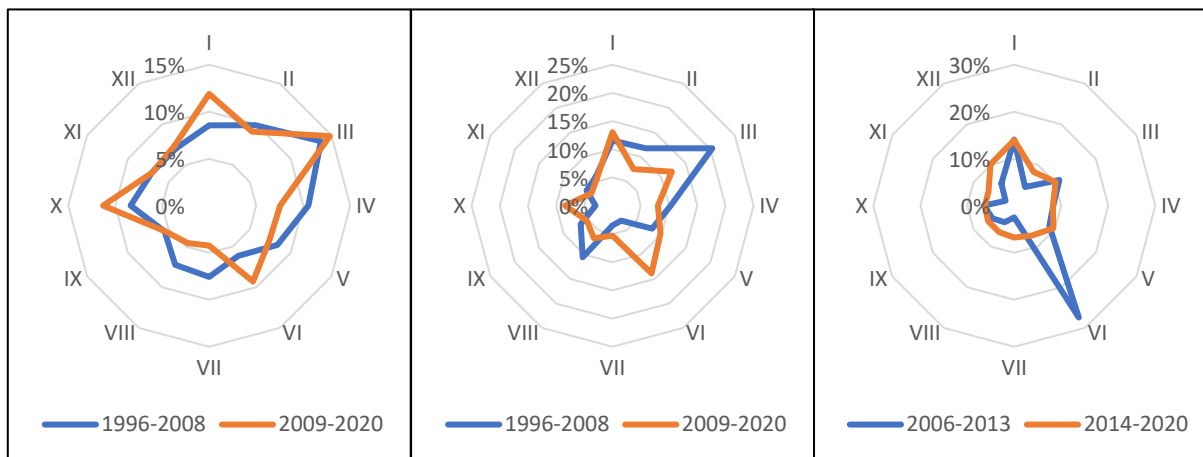
5.1.4. Odtokové poměry

Odtokové poměry byly analyzovány na základě dat z profilů Lány-městečko (průměrné denní průtoky) a Klíčava pod vodárnou (průtoky v 7:00) pro Klíčavu a profilu Lány-Běleč (průměrné denní průtoky) pro Lánský potok. Vývoj průměrných ročních průtoků pro všechny měrné profily je zobrazen na obr. 13. Všude je více či méně pozorován pokles průtoků, potvrzený signifikantním MK testem.



Obr. 13: Q_a na profilech (shora) Lány-Běleč, Lány-městečko a Klíčava pod vodárnou. Zdroj dat: ČHMÚ, Povodí Vltavy, s. p.

Nejvodnějším rokem byl na Klíčavě rok 2013, nejsuššími byly roky 2019 a 2020. Nejvyšší průměrný průtok na Lánském potoce byl zaznamenán v roce 2002, nejnižší pak v roce 2018. Průměrný roční pokles průtoku podle Senovy linie byl na všech profilech zhruba 0,003 m³/s. Na profilech kromě Klíčavy pod vodárnou jsou měsíce nejvyššího odtoku (postupně) březen a leden, na profilu Lány-městečko byl třetí v pořadí překvapivě říjen, na profilu Lány-Běleč pak únor. Na profilu Klíčava pod vodárnou byl průměrně nejvodnější červen (pravděpodobně kvůli povodním 2013), následovaný lednem a březnem. To ovšem neplatilo každý rok, a tak byla zjišťována i proměna těchto charakteristik v průběhu let. Obr. 14 ukazuje příspěvek jednotlivých měsíců k odtoku zvlášť pro první a druhou část sledovaného období.



Obr. 14: Příspěvek měsíců k odtoku pro dvě období na profilech (zleva) Lány-městečko, Lány-Běleč, Klíčava pod vodárnou. Zdroj dat: ČHMÚ, Povodí Vltavy, s. p.

Nejvyšší průtok vykazuje Klíčava před vodní nádrží (profil Lány-Městečko). Poté následuje Klíčava pod vodárnou a nejmenší průtoky vykazuje Lánský potok na profilu Lány-Běleč. Maximální průtoky během sledovaného období byly dosaženy při letních povodních v roce 2002, na profilu pod vodárnou, kde jsou data až od roku 2006, pak při letních povodních 2013.

5.2. Kvalita vody a její vazba na srážko-odtokový režim

Analýzy provedené nad dostupnými daty ukazují, že koncentrace mnoha parametrů kvality vody více či méně závisí na průtoku a obecně reagují na srážko-odtokové události. Tabulka 5 uvádí hodnoty Pearsonova (P), Spearmanova (S) a Kendalova (K) korelačního koeficientu pro vybrané parametry kvality vody. Nejčastěji byla závislost objevena na profilech MD a PZR, kde byly dostupné nejdelší datové řady. Na všech profilech byla vypočtena signifikantní korelace pouze u ukazatelů TN a TOC. Sledované parametry lze v zásadě rozdělit do čtyř skupin: parametry vykazující převážně signifikantní pozitivní korelaci s průtokem (formy dusíku, TOC), parametry vykazující převážně signifikantní negativní korelaci s průtokem (konduktivita, formy fosforu), parametry vykazující jakoukoli signifikantní korelaci s průtokem pouze na jednom profilu (pH, CHSK_{cr}, BSK₅) a parametry, které sice vykazují signifikantní korelaci s průtokem, ale je zřejmé, že kauzalita této korelace tkví spíše v ročním období a teplotě vzduchu (teplota, rozpuštěný kyslík). Nejsilnější a prostorově nejkonzistentnější pozitivní vazbu na průtok mají dle výsledků dusíkaté látky, převážně dusičnany a celkový dusík. To

může být částečně způsobeno sezónním chodem koncentrací dusíkatých látek, které během vegetačního období spotřebovávají rostliny. Vysokých koncentrací tak dosahují na přelomu zimy a jara, kdy nastávají i vyšší průtoky. Vyšší koncentrace dusíkatých látek byly několikrát změřeny i na podzim při nižších a středních průtocích, to může být důsledek snadnější mobilizace těchto látek z čerstvě zorané půdy i při méně intenzivních srážkách. Naopak nejvýraznější inverzní vazbu na průtok zaznamenal celkový fosfor a fosforečnany. To může ukazovat na převládající bodový charakter zdrojů fosforu. Celkově byly korelace poměrně slabé, což ale bylo v případě měsíčních dat očekáváno.

Profil	MD			LAN			PVN			PZR		
Koef.	P	S	K	P	S	K	P	S	K	P	S	K
T	-0,121	-0,279	-0,187	-0,047	-0,118	-0,114	0,006	-0,056	-0,043	-0,098	-0,155	-0,123
EC	0,010	-0,096	-0,070	-0,282	-0,363	-0,250	-0,332	-0,263	-0,180			
pH	-0,315	-0,344	-0,240	-0,116	0,003	0,005	-0,017	0,018	0,024			
O ₂	0,097	0,282	0,191	0,225	0,228	0,159	0,110	0,035	0,028			
N-NO ₃ ⁻	0,477	0,479	0,345	0,275	0,180	0,120	0,089	0,104	0,075	0,387	0,620	0,450
N-NH ₄ ⁺	0,250	0,187	0,133	-0,016	0,051	0,040	0,352	0,107	0,074			
TN	0,485	0,522	0,381	0,555	0,387	0,279	0,111	0,238	0,172			
P-PO ₄ ⁻	-0,122	-0,380	-0,273	0,015	-0,137	-0,098	-0,183	-0,354	-0,242			
TP	0,100	-0,085	-0,058	-0,030	-0,065	0,000	-0,230	-0,352	-0,241	-0,121	-0,474	-0,328
CHSK _{cr}	0,291	0,203	0,135	0,030	-0,035	-0,026	0,118	0,013	0,011			
BSK ₅	0,355	0,379	0,259	-0,014	0,006	0,001	0,093	0,142	0,104			
TOC	0,298	0,185	0,124	0,128	0,188	0,128	0,200	0,178	0,121			

Tab. 5: Přehled výsledných korelačních koeficientů vztahů parametrů kvality vody s hodnotami průtoku. Tučně zvýrazněné hodnoty se statisticky významně liší od 0 na hladině spolehlivosti $\alpha = 0,05$. T = teplota, EC = konduktivita. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s.p.

Na následujících stranách jsou podrobněji charakterizovány jednotlivé parametry kvality vody z hlediska jejich absolutních koncentrací, vývoje v průběhu let a v rámci roku, rozdílů mezi jednotlivými profily a vazby na srážko-odtokový režim.

5.2.1. Teplota

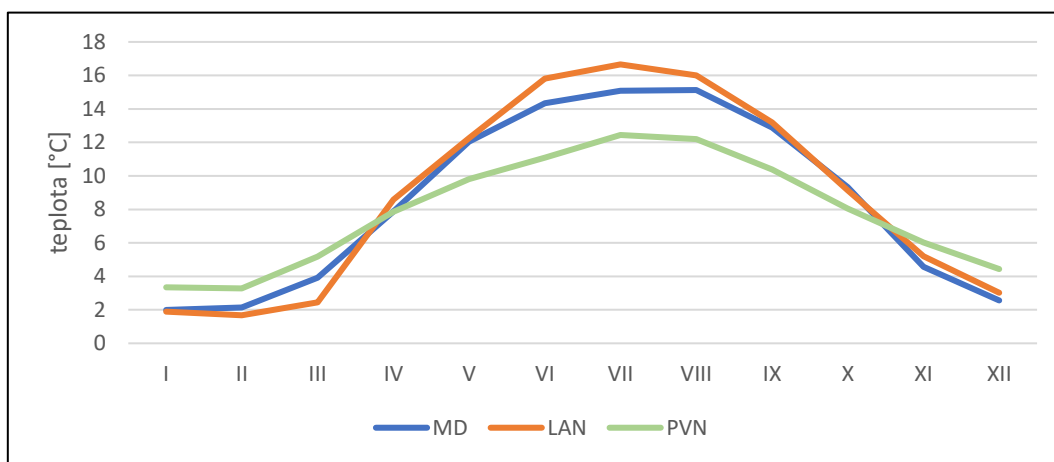
Na profilech LAN a PVN dosahovala teplota vody nejnižších hodnot v únoru, na profilu MD v lednu.

Na profilu PZR nebyly zimní teploty měřeny (z toho důvodu zde není hodnocen). Průměrně nejteplejší byla voda na všech profilech v červenci či srpnu (obr. 15). Nejteplejší byl v průměru profil LAN (12,32 °C, ale je zde ovlivnění, viz tab. 6), nejchladnější pak PVN (7,79 °C). Na profilu PVN byl roční chod teplot méně rozkolísaný, a to patrně z důvodu, že se voda z nádrže vypouští z hloubky, což má za následek nižší teploty v létě a vyšší v zimě

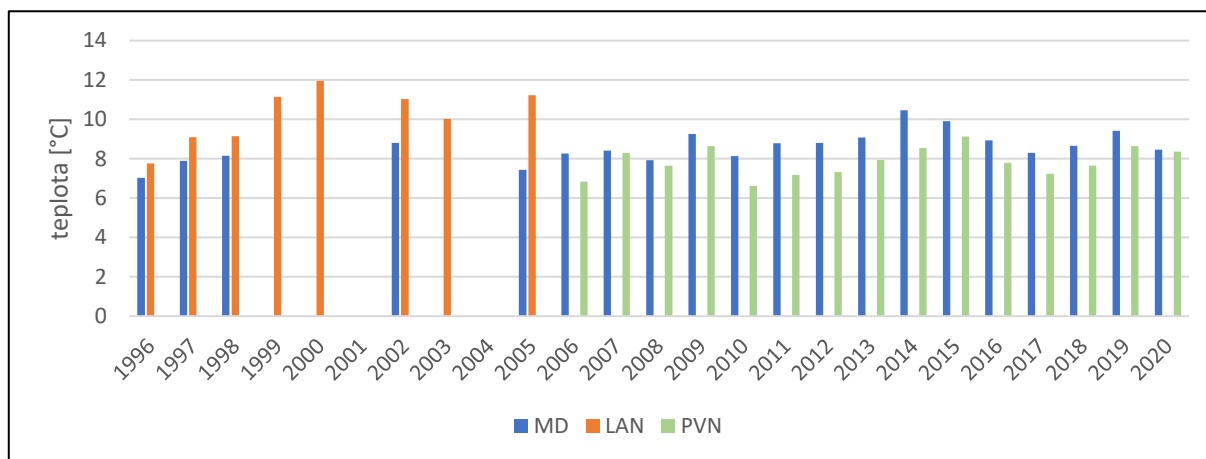
Profil	MD	LAN*	PVN	PZR*
Počet měření	258	336	182	406
Minimum	0,00	0,00	0,50	1,60
Maximum	19,40	22,30	16,30	23,90
Medián	9,15	13,25	7,75	16,60
Průměr	8,61	12,32	7,79	15,99
SO	5,45	5,09	3,69	3,94

Tab. 6: Teplotní charakteristiky profilů (ve °C) za sledované období. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p. *Na profilu PZR byly měřeny teploty jen od dubna do října, stejně tak v části období na profilu LAN

(z důvodu stratifikace). Obecně teplota toků vzrůstá (obr. 16), což ukázal i MK test u profilů MD a PVN (ty mají nejdelší a nejhomogennější datové řady).

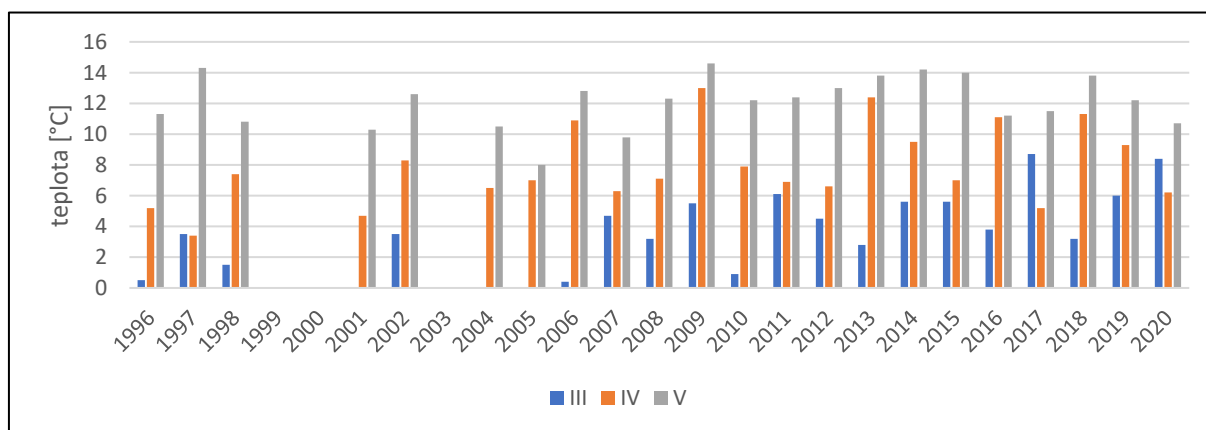


Obr. 15: Roční chod teplot vody na profilech MD, LAN a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Obr. 16: Vývoj průměrných ročních teplot vody na profilech MD, LAN a PVN. Po roce 2005 na profilu LAN chybí hodnoty z chladné části roku. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Nejvíce se nárůst teplot projevil v jarních měsících, především v březnu a dubnu, a také v únoru. Vývoj jarních teplot na profilu MD je na obr. 17. Vývoj v ostatních ročních obdobích je v přílohách 3-5.



Obr. 17: Vývoj teploty vody na profilu MD v jarních měsících. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

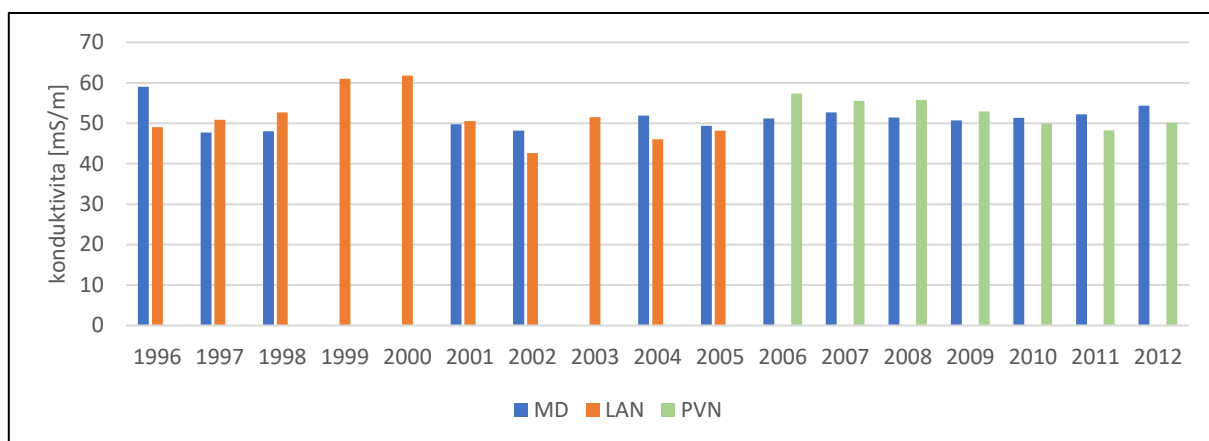
Vzhledem ke skutečnosti, že teplota vody je ovlivněna především teplotou vzduchu (a nejvyšší průtoky nastávají spíše v chladnějších měsících), nemá cenu ji dávat do souvislosti s průtokem. Pro zjištění, jak konkrétně srážko-odtokové události ovlivňují teplotu vody by byla potřeba data s mnohem větším časovým rozlišením, aby bylo možné porovnávat teplotu v řádu dnů nebo hodin.

5.2.2. Konduktivita

Profily, na kterých byla dostupná data konduktivity (všechny kromě PZR) vykazovaly průměrné hodnoty cca. 51–53 mS/m (viz tab. 7). Nejvyšší hodnota (111 mS/m) byla naměřena na Lánském potoce 3.11.1999, tomuto dnu předcházelo sušší období, kdy za 30 dnů spadlo celkem 23 mm srážek. Nejnižší hodnota byla naměřena také na profilu LAN, a to 31.8.2004. Ačkoliv mají všechny profily velmi podobné průměrné hodnoty, profil LAN se vyznačuje poměrně vysokou variabilitou a rozpětím hodnot. Na obrázku 18 je vidět, že průměrné roční hodnoty

Profil	MD	LAN	PVN
Počet měření	164	129	87
Minimum	38,20	5,10	39,50
Maximum	92,70	111,00	84,60
Medián	50,25	51,40	52,10
Průměr	51,23	51,83	52,99
SO	6,31	12,31	5,75

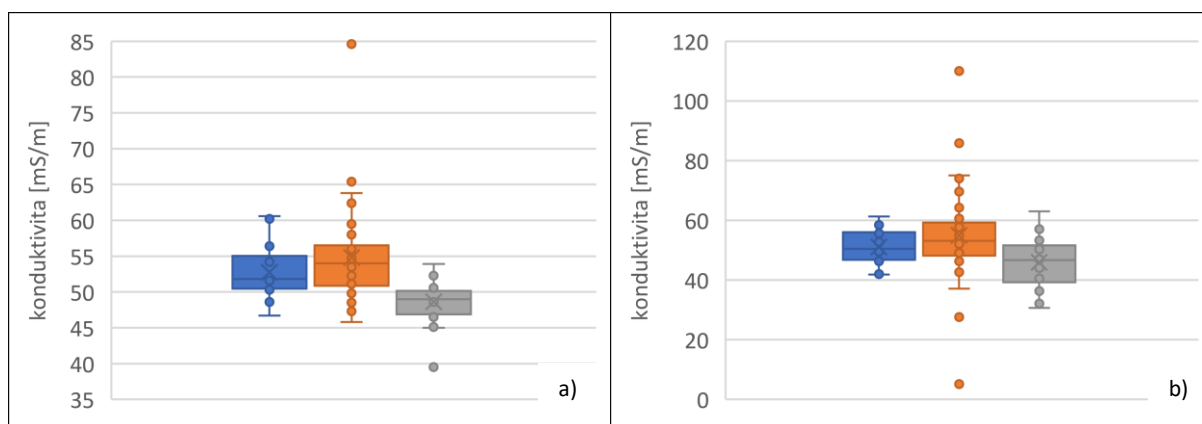
Tab. 7: Shrnutí charakteristik hodnot konduktivity (mS/m). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Obr. 18: Vývoj ročních průměrů konduktivity. Pro roky 2001 a 2004 nejsou k dispozici data z prvních tří měsíců. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

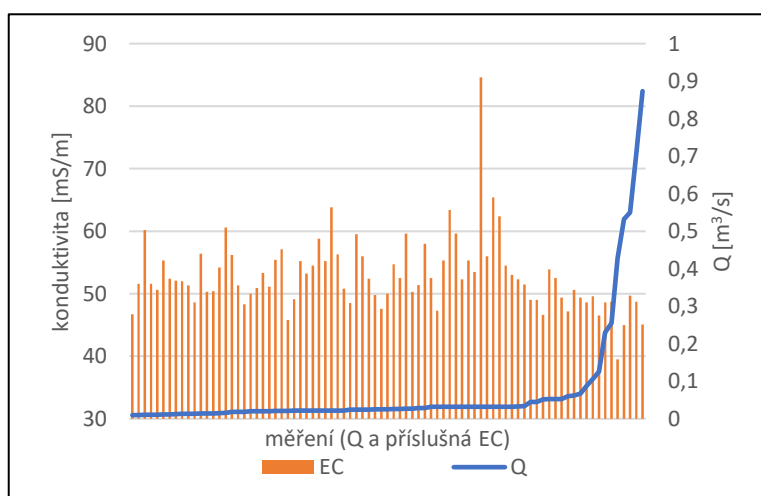
konduktivity spíše klesají (LAN, PVN), zatímco v případě profilu MD lze pozorovat mírný nárůst (potvrzeno MK testem, s průměrným meziročním nárůstem zhruba o 0,3 mS/m podle Senovy linie). Na všech profilech spadá voda z hlediska konduktivity do jakostní skupiny II dle státní normy ČSN 75 7221 (ÚNMZ 2017).

Konduktivita reaguje na změny průtoku převážně inverzně. Na profilech LAN a PVN vyšly všechny korelační koeficienty záporné a signifikantní, nicméně tato závislost se neprojevila na profilu MD, kde se koeficienty blížily nule. V případě profilu LAN to ukazuje na bodové zdroje znečištění, které jsou eliminovány při vyšších průtocích. Zdá se, že při nižších průtocích jsou hodnoty konduktivity nižší než při normálních průtocích, nejnižší jsou ale průměrně při průtocích vysokých (obr. 19).



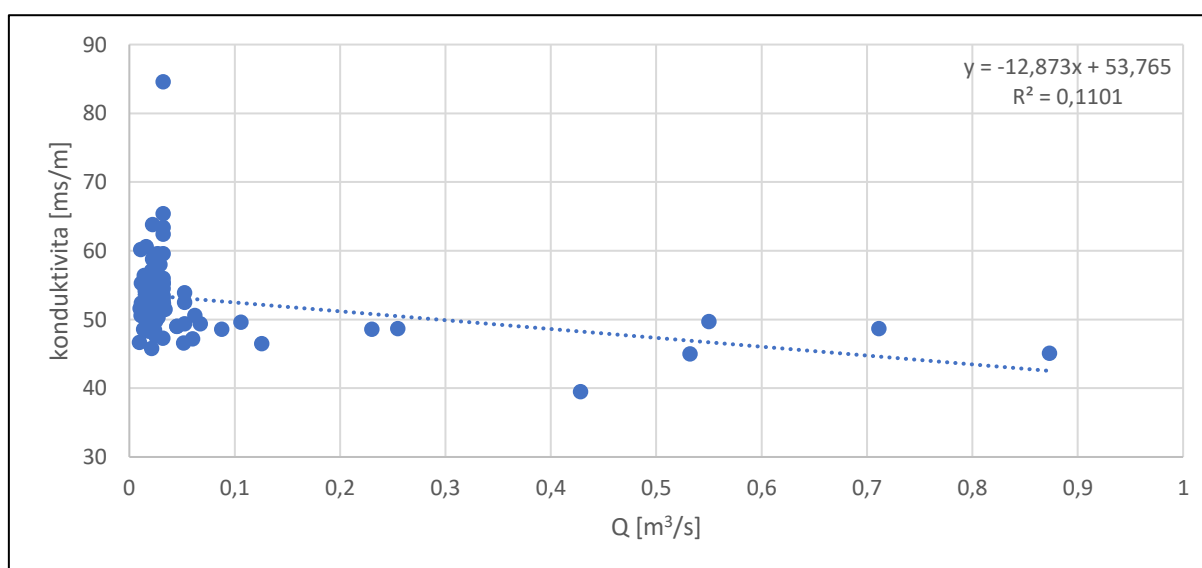
Obr. 19: Krabicové diagramy pro hodnoty pH na profilu MD při nízkých (modře), středních (oranžově) a vysokých (šedě) průtocích na profilech PVN (a) a LAN (b). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Po seřazení průtoků od nejmenšího po největší a přiřazení příslušné hodnoty konduktivity k danému Q a dni je patrný pokles konduktivity se zvyšujícími se průtoky především v přechodu ze středních až vyšších průtoků na nejvyšší (obr. 20). To platí pro profily LAN a PVN, na profilu MD vykazuje konduktivita chování téměř nezávislé na průtoku. Lineární regrese ukázala nejzřetelnější závislost na



Obr. 20: Hodnoty konduktivity podle seřazených průtoků na profilu PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy s. p.

profilu PVN (obr. 21). Nejnižších hodnot dosahovala konduktivita (na profilech, kde byla patrná inverzní závislost) při vyšších průtocích převážně na jaře a v zimě, kdy byly spojené s táním sněhu.



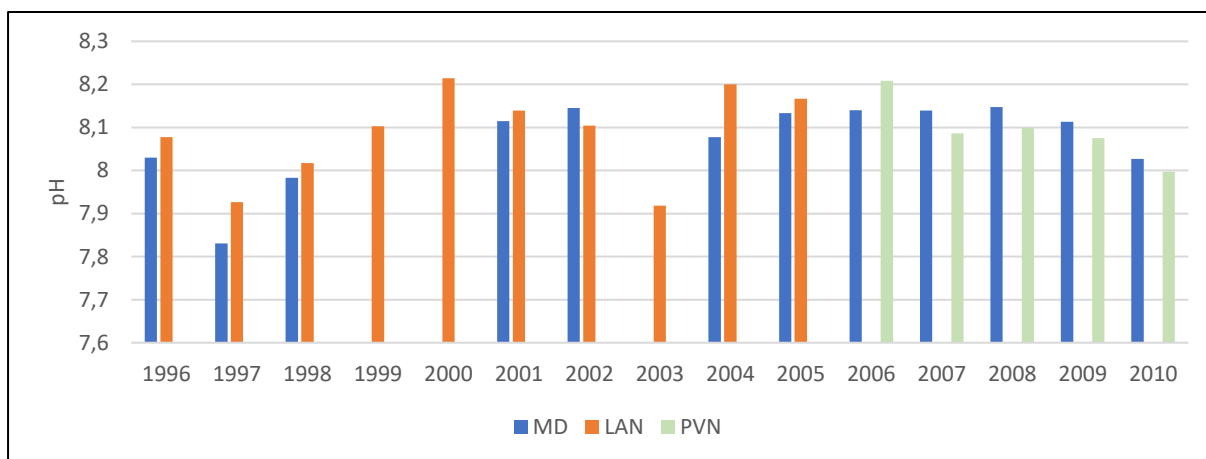
Obr. 21: Lineární regrese závislosti konduktivity na průtoku na profilu PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

5.2.3. Reakce vody pH

Celé povodí vykazuje vyšší hodnoty pH, průměrně kolem 8,1. Podrobnější charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 8. Minimální hodnota (6,48) byla naměřena na profilu LAN 14.4.2003, po měsíčním období s velmi malým úhrnem srážek. Nicméně dva dny před tímto datem napadla na duben již poněkud neobvyklá sněhová pokrývka, která ale brzy roztála. Maximální hodnota byla naměřena taktéž na profilu LAN, a to v září téhož roku. Při obou extrémech byl průtok normální až lehce nadnormální pro dané období. Dle obr. 22 nelze jednoznačně charakterizovat směr vývoje hodnot pH, kromě profilu PVN, kde pH spíše klesá. Zdá se, že pH do roku 2005 rostlo, poté se růst zastavil a pH začalo spíše klesat. MK test neukázal v případě MD a LAN žádný signifikantní trend (navíc je datová řada velmi krátká).

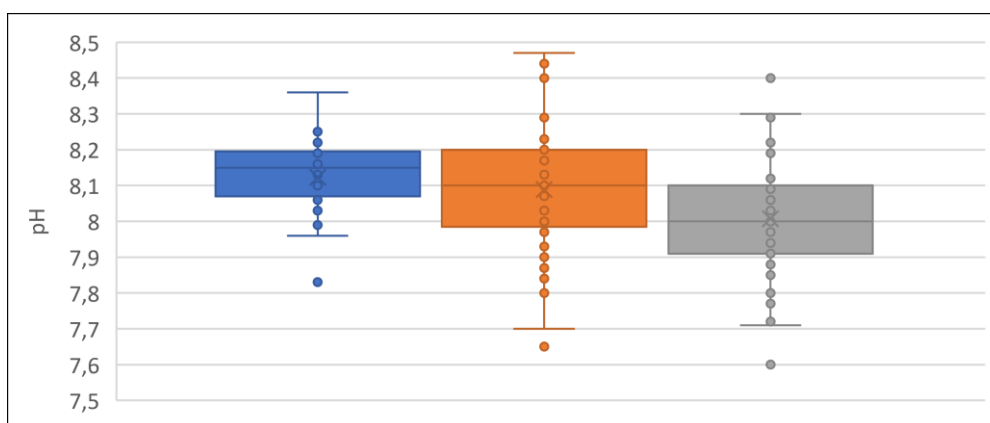
Profil	MD	LAN	PVN
Počet měření	141	122	64
Minimum	7,60	6,48	7,84
Maximum	8,47	8,71	8,44
Medián	8,10	8,12	8,10
Průměr	8,07	8,09	8,10
SO	0,16	0,25	0,14

Tab. 8: Shrnutí hodnot pH. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Obr. 22: Vývoj ročních průměrů pH na profilech MD, LAN a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Chování pH v závislosti na průtoku se napříč profilemi liší, v případě profilů LAN a PVN nebyla nalezena žádná významná závislost, zatímco na profilu MD byla zjištěna inverzní závislost – všechny korelační koeficienty byly signifikantní (možná díky mokřadům u pramene Klíčavy). Na profilu MD byly při



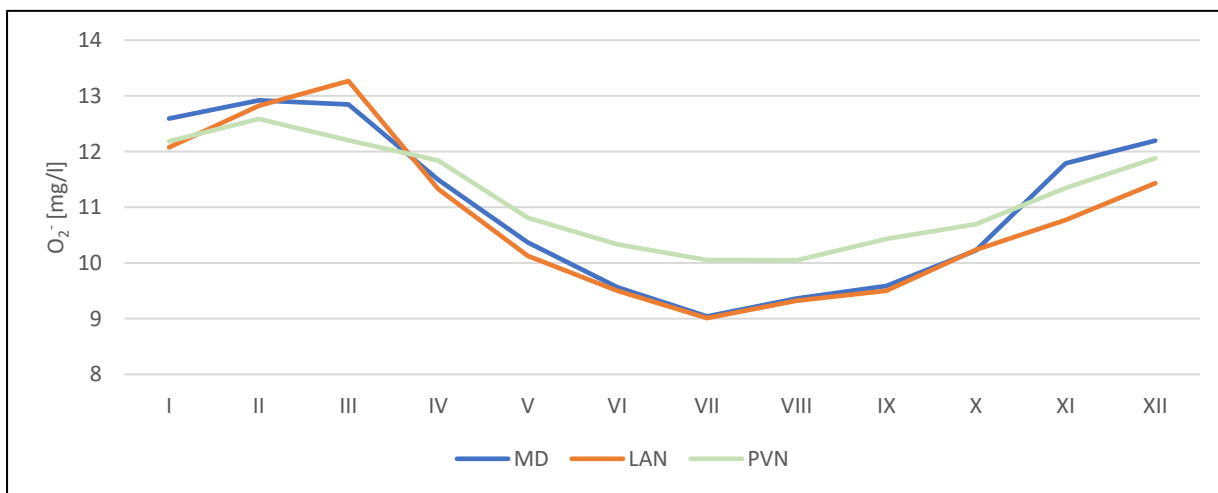
Obr. 23: Krabicové diagramy pro hodnoty pH na profilu MD při nízkých (modře), středních (oranžově) a vysokých (šedě) průtocích. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

vyšších průtocích zaznamenávány spíše nižší hodnoty pH a vice versa, nicméně při středních a vyšších průtocích měly hodnoty pH poměrně vysokou variabilitu (obr. 23).

Na zbylých profilech pH vykazovalo jen nevýznamné změny v závislosti na průtoku. Dále se ukázalo, že z šesti vybraných dnů, ve kterých byly měřeny nejnižší hodnoty pH a nejvyšší průtoky (profil MD), byly ve čtyřech případech tyto zvýšené průtoky způsobeny déletrvajícími dešti a ve dvou případech táním sněhu spojeným s kapalnými srážkami, ani jedna z nich nevykazovala známky přívalové srážky a bleskového zvýšení průtoku. Naopak z šesti vybraných případů dnů s nejvyššími hodnotami pH a nejnižšími průtoky bylo pět způsobeno suchými epizodami v teplejší části roku, pouze jeden případ byl prosincový nízký průtok způsobený delším obdobím bez kapalných srážek.

5.2.4. Rozpuštěný kyslík

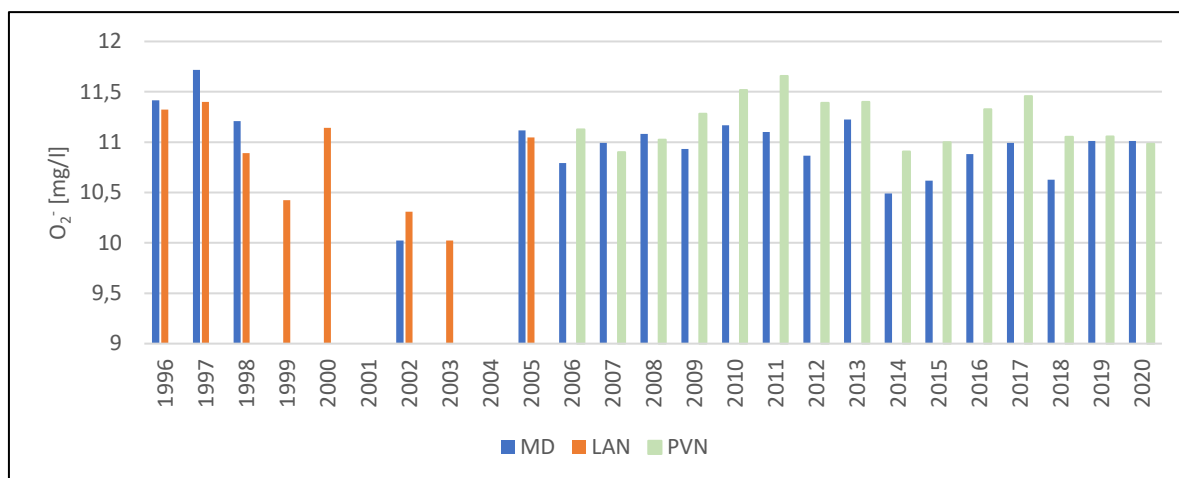
V případě rozpuštěného kyslíku se projevila výrazná sezónnost. Nejvyšších koncentrací dosahoval v únoru či březnu, nejnižších pak v červenci či srpnu, chod je tedy opačný než u teploty (obr. 24). Minimální hodnota 5,1 mg/l byla naměřena na profilu LAN 3.11.1999, což odpovídá dnu s nejvyšší naměřenou konduktivitou, maximální hodnota byla 17 mg/l na profilu MD. Obrázek 25 ukazuje vývoj průměrných ročních hodnot na jednotlivých profilech, MK test neukázal u žádného profilu významné změny v průběhu let. Celkově jsou koncentrace rozpuštěného kyslíku poměrně vysoké, oba toky na všech profilech spadají do I. jakostní kategorie.



Obr. 24: Roční vývoj koncentrací rozpuštěného kyslíku na profilech MD, LAN a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Na profilech MD a LAN byla sice stanovena pozitivní korelace rozpuštěného kyslíku s průtokem, nicméně při interpretaci těchto zjištění je nutná určitá obezřetnost. Například na profilu MD bylo všech 50 nejvyšších koncentrací kyslíku naměřeno v období od listopadu do března, takže i když se v tomto období vyskytovaly často vyšší průtoky, vyšší koncentrace kyslíku jsou způsobeny nižšími teplotami. Na profilu PVN byly sice také měřeny vyšší koncentrace v chladné části roku, ale zde nebyly v těchto

měsících měřeny vyšší průtoky, proto analýzy neukázaly žádný vztah. Lze předpokládat, že s rostoucími teplotami vzduchu a vody se budou koncentrace rozpuštěného kyslíku mírně snižovat.



Obr. 25: Vývoj průměrných ročních koncentrací O_2^- na profilech MD, LAN a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

5.2.5. Formy dusíku

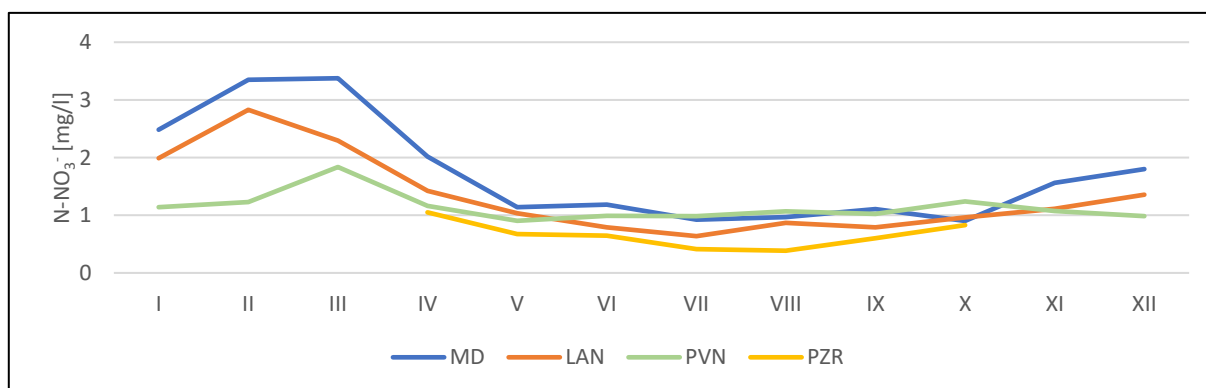
Koncentrace dusíkatých látek jsou v analyzovaných tocích obecně nízké. Nejvyšší koncentrace a také největší reakce na změny průtoku byly pozorovány na Klíčavě před vodní nádrží (MD), kam se pravděpodobně dostávají ze zemědělských ploch (převážně dusičnany).

Dusičnany byly jedním ze tří parametrů, které byly zaznamenávány na všech čtyřech profilech. Dusičnanový dusík vykazuje značnou sezonalitu, přičemž nejvyšších koncentrací je dosahováno začátkem jara (před začátkem vegetačního období) a nejnižších ve vrcholícím létě (obr. 26). Obecně jsou toky charakterizovány nízkými koncentracemi dusičnanů, průměrně 1-1,7 mg/l (tab. 9). Minimální hodnoty byly

Profil	MD	LAN	PVN	PZR
Počet měření	259	233	183	309
Minimum	0,20	0,20	0,43	0,20
Maximum	8,00	8,60	5,60	5,50
Medián	1,30	0,80	0,98	0,35
Průměr	1,71	1,09	1,14	0,63
SO	1,32	0,96	0,62	0,64

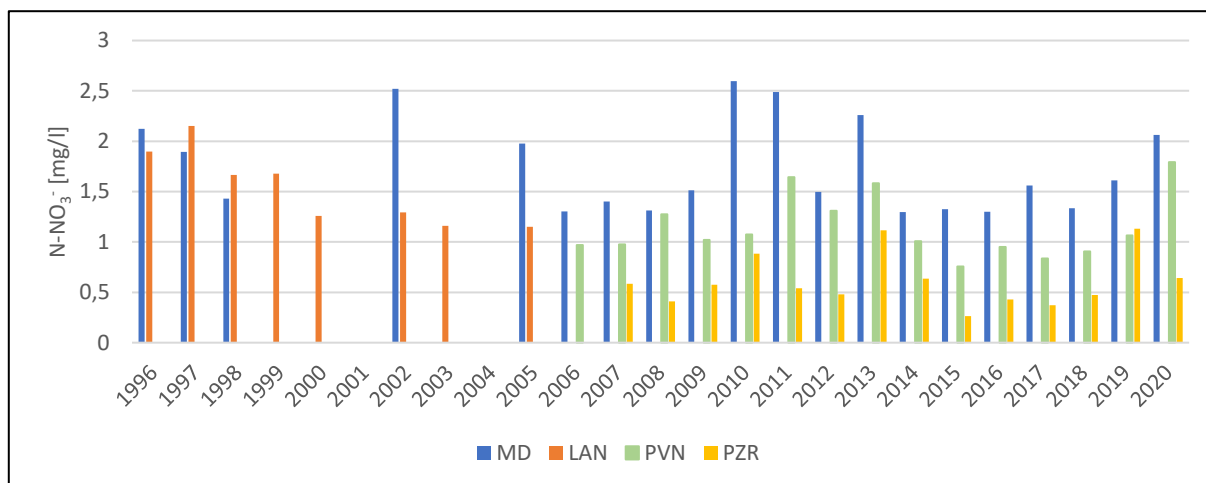
Tab. 9: Shrnutí koncentrací dusičnanů (mg/l). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

na všech profilech, kromě PVN, 0,2 mg/l, což je prahová hodnota detekce. Maximální hodnoty přesahovaly na profilech MD a LAN 8 mg/l. Celkově byly nejnižší hodnoty měřeny na profilu PZR,



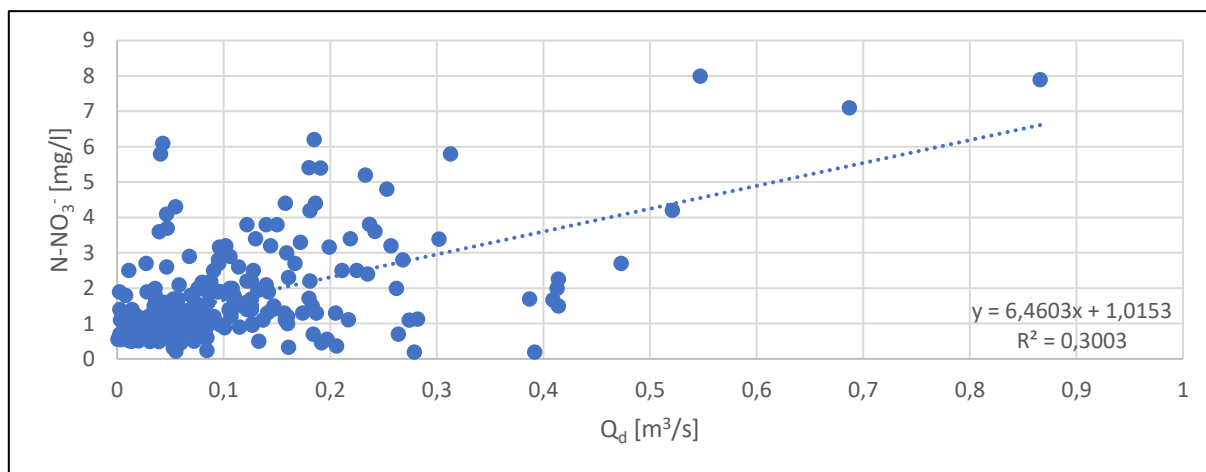
Obr. 26: Roční vývoj koncentrací $N-NO_3^-$ na profilech MD, LAN, PVN a PZR. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

nicméně tyto jsou nesrovnatelné s hodnotami na ostatních profilech, jelikož na PZR jsou dostupné hodnoty pouze z období od dubna do října. Nejvyšší hodnoty byly průměrně zaznamenávány na profilu MD, což může být zapříčiněno nejvyšším zastoupením orné půdy v tomto dílčím povodí. Vývoj ročních průměrných koncentrací je zobrazen na obr. 27. Ačkoliv nelze najít jednotnou změnu, zdá se, že na profilech, kde jsou dostupná data od roku 1996, prvních několik let koncentrace dusičnanů spíše klesaly. Stejně tak si lze všimnout nižších koncentrací od roku 2014, což koresponduje se suššími roky.



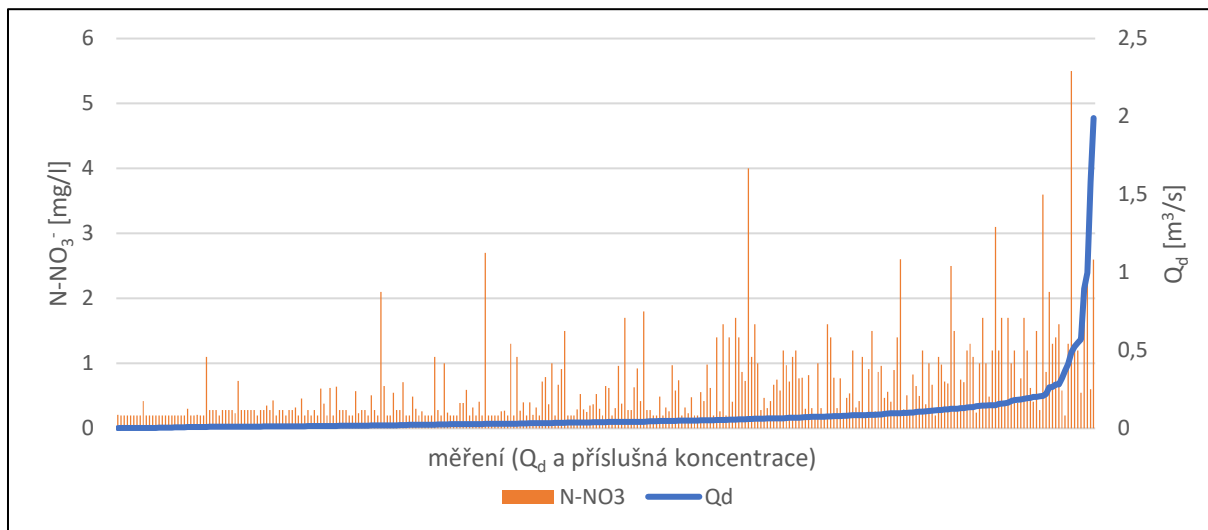
Obr. 27: Vývoj průměrných ročních koncentrací dusičnanů pro všechny profile. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Na všech profilech (kromě PVN) koncentrace dusičnanů poměrně silně pozitivně korelovaly s průtokem, a to v případě všech korelačních koeficientů. Na profilech MD a LAN dokonce nebyl nejslabší Pearsonův korelační koeficient, což značí, že závislost může být bližší lineárnímu charakteru než u jiných parametrů. U MD byl koeficient determinace pro lineární regresi (obr. 28) 0,23, což je, v porovnání s ostatními parametry, relativně vyšší hodnota. I ostatní metody potvrdily u tří zmíněných profilů signifikantní závislost. Zde je ovšem potřeba zvážit, zda tato zjištění nejsou ovlivněna skutečností, že nejvyšší koncentrace dusičnanů jsou měřeny těsně před začátkem vegetačního období (konec zimy/začátek jara), kdy jsou také v roce dlouhodobě nevyšší průtoky. Proto je zajímavé se zaměřit na profil PZR, kde jsou koncentrace měřeny jen od dubna do října, tedy v průběhu vegetačního



Obr. 28: Lineární regrese závislosti koncentrace dusičnanů na průtoku na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

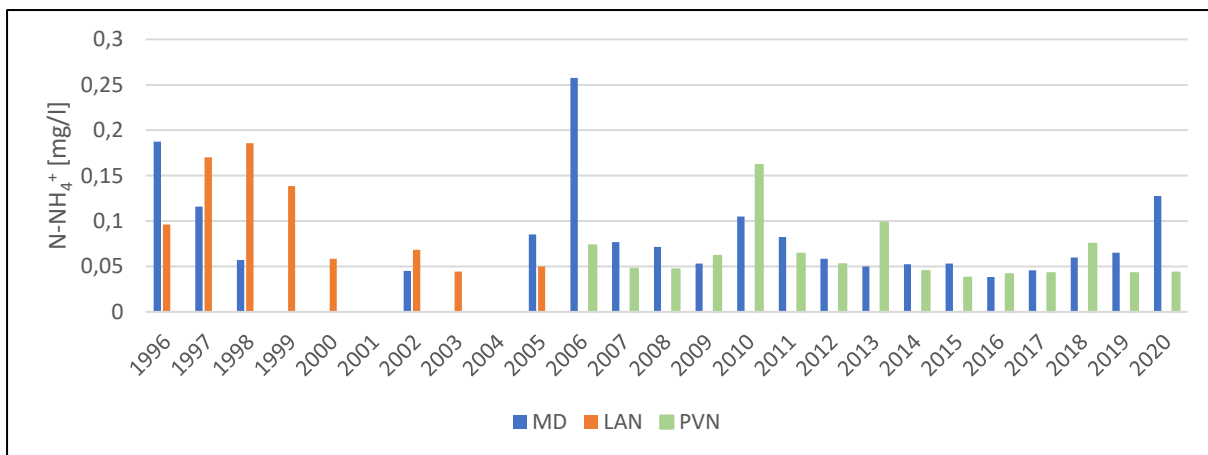
období, kdy jsou celkově koncentrace nižší. Zde jsou korelační koeficienty zdaleka nejvyšší, v případě Spearmanova dokonce 0,62, což je nejvyšší hodnota napříč všemi parametry a profily. Tato závislost je zobrazena i na obr. 29.



Obr. 29: Koncentrace dusičnanů podle seřazených průtoků na profilu PZR. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Dále se ukázalo, že z šesti vybraných dnů, ve kterých byly měřeny nejvyšší koncentrace dusičnanů a nejvyšší průtoky na profilu MD, byly ve čtyřech případech tyto zvýšené průtoky způsobeny rychlým táním sněhu, v jednom případě dlouhotrvajícími dešti a v posledním případě i jednorázovým vysokým úhrnem srážek. Aby se odstranil vliv ročních období, byla stejná analýza provedena i na profilu PZR. Ve čtyřech z pěti případů byly vysoké hodnoty průtoku způsobeny dlouhými dešti (i přes 100 mm za týden), v jednom případě se nejspíše jednalo o bleskovou povodeň. Celkově jsou koncentrace dusičnanů nízké, drtivá většina hodnot se vejde do limitu I. jakostní kategorie. Tomu napomáhá nejspíše i malá plocha zemědělské půdy v povodí.

Velmi nízké koncentrace byly měřeny také v případě amoniakálního dusíku. Průměrné koncentrace se pohybovaly mezi 0,06 a 0,08 mg/l, což řadí toky taktéž do I. jakostní kategorie. Minimální hodnoty (na všech profilech 0,02 mg/l) jsou též zároveň detekčním limitem. Na profilech MD a LAN ale maximální hodnoty přesáhly i 1 mg/l (LAN dokonce 1,7 mg/l, viz tabulka 10). Na profilu MD byly nejvyšší



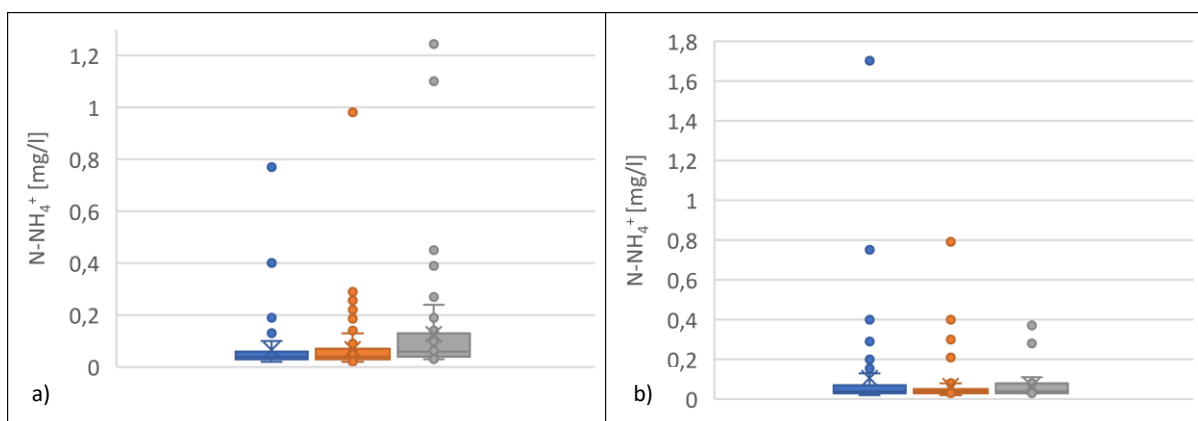
Obr. 30: Vývoj průměrných ročních koncentrací N-NH_4^+ na profilech MD, LAN a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

koncentrace měřeny spíše při vyšších průtocích, zatímco na profilu LAN při malých průtocích. To by mohlo ukazovat na bodové zdroje amoniakálního dusíku v povodí Lánského p. Amoniakální dusík nebyl příliš ovlivněn ročními obdobími. Vývoj ročních průměrů koncentrací je vidět na obr. 30. Vývoj je velmi podobný jako u dusičnanového dusíku.

Výsledky analýz porovnávající průtok a koncentrace amoniakálního dusíku jsou poněkud nejednoznačné. Na profilu MD vyšly všechny korelační koeficienty kladné a signifikantní, na PVN vyšel kladný a významný pouze Pearsonův k.k. a v případě LAN nebyl signifikantní žádný koeficient. Nejvyšší koncentrace byly na profilu MD naměřeny při vyšších průtocích, avšak vyšších hodnot dosahovaly i při středních a nižších průtocích (obr. 31a). Nejvyšší koncentrace měřené při vysokých průtocích byly zaznamenány nejčastěji od ledna do března. Naopak vysoké koncentrace při nízkých průtocích, nejspíše zaviněné

Profil	MD	LAN	PVN
Počet měření	261	179	183
Minimum	0,02	0,02	0,02
Maximum	1,24	1,70	0,62
Medián	0,05	0,04	0,05
Průměr	0,08	0,08	0,06
SO	0,14	0,16	0,06

Tab. 10: Shrnutí koncentrací N-NH_4^+ (mg/l).
Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Obr. 31: Krabicové diagramy pro koncentrace N-NH_4^+ na profilech (a) MD a (b) LAN při nízkých (modře), středních (oranžově) a vysokých (šedě) průtocích. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

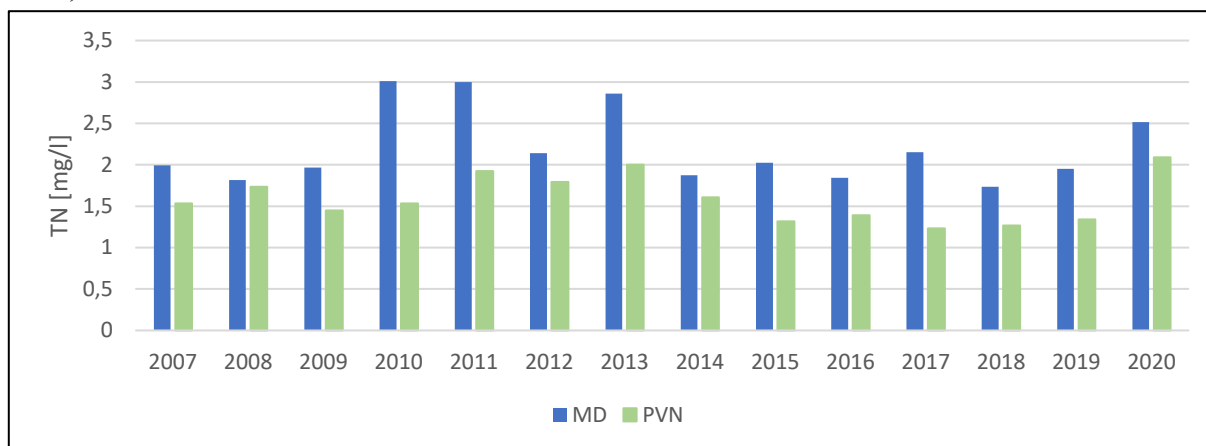
bodovými antropogenními zdroji, se vyskytovaly v období od srpna do prosince. To potvrzuje i nejvyšší naměřená koncentrace, 1,7 mg/l na profilu LAN, která byla změřena 7. října 1998 při poměrně malém průtoku. Na tomto profilu sice nebyla vypočtena žádná významná závislost koncentrace na průtoku, nicméně z obr. 31b vyplývá, že vyšší hodnoty byly měřeny spíše při menších průtocích, což ukazuje spíše na bodový charakter zdrojů amoniakálního dusíku.

Poslední frakcí dusíkatých látek je parametr celkový dusík (TN). Podobně jako u předchozích forem dusíku, koncentrace celkového dusíku nabývaly poměrně nízkých hodnot, průměrně nejvíce na MD s hodnotou 2,21 mg/l. V žádném roce na žádném profilu nebyla překročena průměrná roční hodnota 3 mg/l (hranice I. jakostní skupiny), nicméně v rámci roku byla tato hodnota překračována v únoru a březnu, patrně

Profil	MD	LAN	PVN
Počet měření	168	83	168
Minimum	0,50	0,60	0,80
Maximum	9,00	4,00	5,70
Medián	1,75	1,30	1,40
Průměr	2,21	1,43	1,59
SO	1,40	0,54	0,60

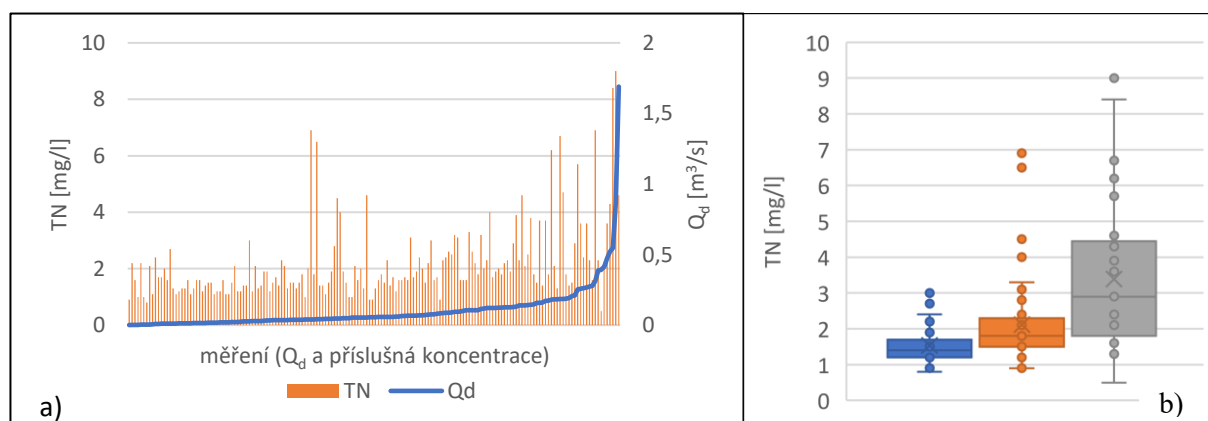
Tab. 11: Shrnutí koncentrací TN (mg/l). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

vinou vysokých koncentrací dusičnanového dusíku. Nejvyšší koncentrace byly měřeny na profilu MD, nejnižší na LAN (tab. 11), a to nejspíš kvůli vyššímu zastoupení orné půdy v dílčím povodí Klíčavy a kvůli převážně letním termínům měření na profilu LAN. Vývoj koncentrací celkového dusíku je zobrazen na obr. 32. Pro profil LAN nebyla dostupná vhodná data, resp. pouze data z teplejší části roku. Nebyly nalezeny žádné významné změny. Vyšší koncentrace byly na obou profilech naměřeny v letech 2011, 2013 a 2020.



Obr. 32: Vývoj průměrných ročních koncentrací TN pro profile MD a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

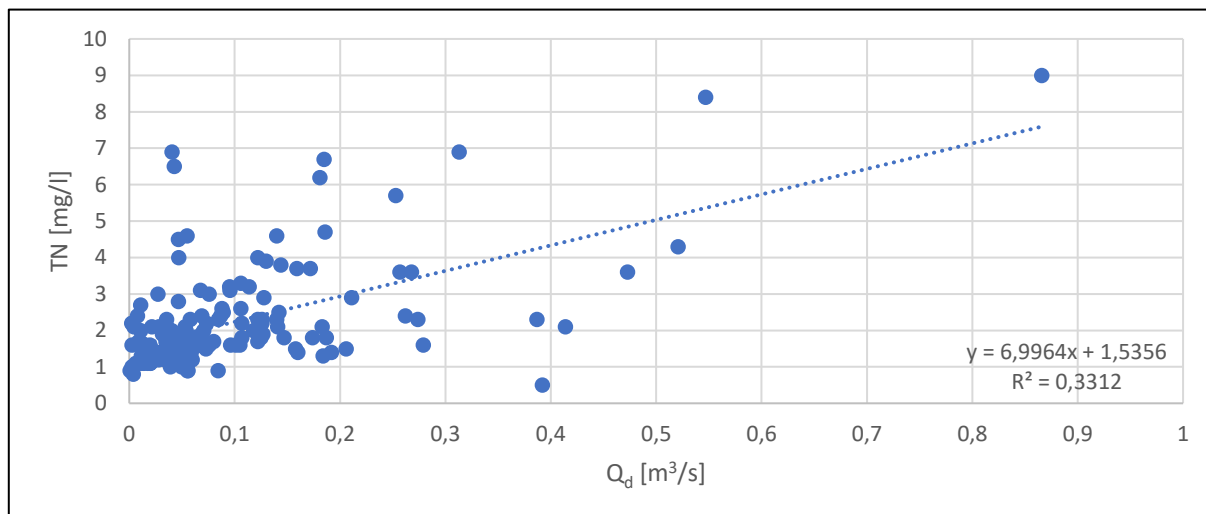
Vazba celkového dusíku na průtok je podobná dusičnanovému dusíku. Na všech profilech koncentrace významně a relativně silně koreluje s hodnotami průtoku (viz. tabulka 5), na PVN je korelace nejslabší. Lineární regrese na profilech MD (obr. 34) a LAN výjimečně ukazuje oproti ostatním parametrům relativně vyšší koeficienty determinace. Obr. 33, jenž zobrazuje koncentrace TN podle seřazených průtoků (a) a koncentrace TN ve třech intervalech průtoků (b) na profilu MD, tento trend také potvrzuje.



Obr. 33: Koncentrace TN podle seřazených průtoků (a), krabicové diagramy pro koncentrace TN při nízkých (modře), středních (oranžově) a vysokých (šedě) průtocích (b) na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p

Velmi podobné výsledky vyšly i v případě profilu LAN. Při interpretaci výsledků je ale z výše zmíněných důvodů nutná obezřetnost jako u dusičnanového dusíku, který tvoří převážnou část TN. Při pohledu na dny nejvyšších koncentrací a průtoků je patrné, že data maximálních koncentrací a průtoků jsou shodná s těmi u dusičnanového dusíku a jsou charakterizována stejnými srážko-odtokovými

událostmi. Mezi daty s nejvyššími koncentracemi TN lze opět najít i několik říjnových dnů, ale naprostá většina pochází z přelomu zimy a jara.



Obr. 34: Lineární regrese závislosti koncentrace TN na průtoku na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

5.2.6. Formy fosforu

Jelikož se v povodí Klíčavy nenachází velké množství sídel a rozlehlé plochy zemědělské půdy, nebyly koncentrace fosforu v tocích příliš vysoké. Závislost na průtoku se ukázala být převážně inverzní, což by ukazovalo na bodové zdroje fosforu.

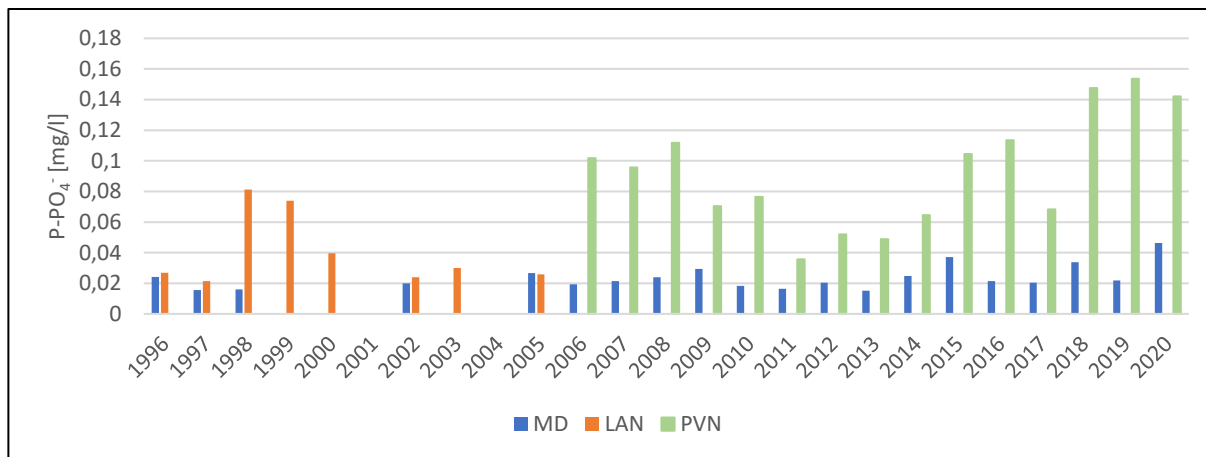
Profil	P-PO ₄ ⁻ [mg/l]			TP [mg/l]			
	MD	LAN	PVN	MD	LAN	PVN	PZR
Počet měření	258	171	183	260	338	183	414
Minimum	0,003	0,003	0,003	0,011	0,010	0,026	0,003
Maximum	0,320	0,460	0,320	0,450	0,701	0,360	1,900
Medián	0,017	0,027	0,074	0,060	0,070	0,110	0,075
Průměr	0,024	0,038	0,093	0,075	0,080	0,124	0,119
SO	0,026	0,049	0,067	0,060	0,062	0,068	0,174

Tab. 12: Shrnutí koncentrací P-PO₄⁻ a TP (mg/l). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

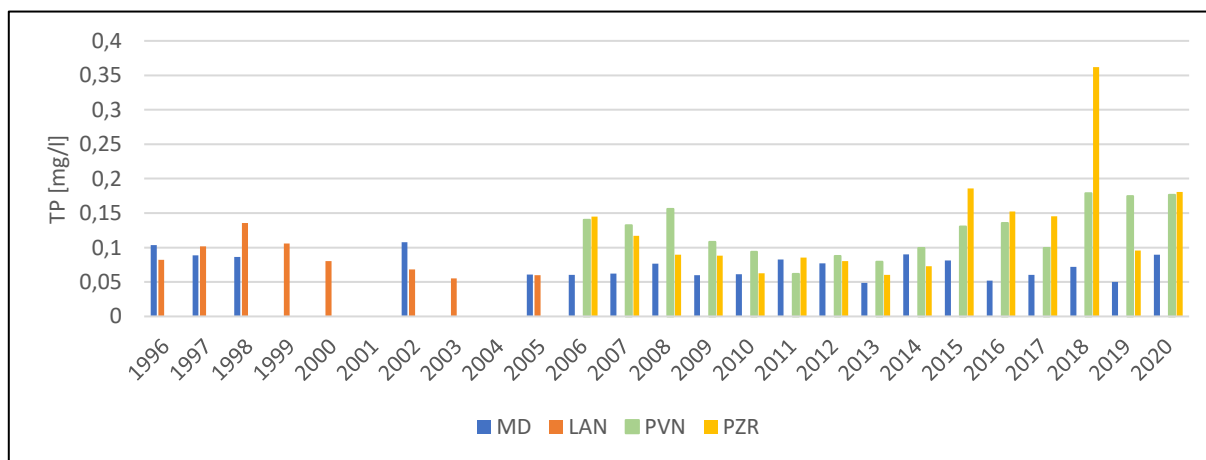
Fosforečnany vykazovaly nízké koncentrace, často i pod hranici detekce (0,003 mg/l), nicméně vyskytly se i vysoké koncentrace (např. 0,46 mg/l na profilu LAN 7. října 1998 – to odpovídá dnu s maximální koncentrací amoniakálního dusíku na tomto profilu, což indikuje bodový zdroj znečištění). Průměry se pohybovaly mezi 0,02 (MD) a 0,09 (PVN) mg/l. Charakteristické hodnoty jsou uvedeny v tabulce 12. Profil PVN vykazuje konstantně nejvyšší koncentrace. U celkového fosforu (TP) lze pozorovat obdobné chování jako u fosforečnanů. TP byl měřen na všech čtyřech profilech, ale na profilu PZR pouze převážně od května do září, tudíž nelze porovnávat s ostatními profilech. Profil PVN stejně jako v případě fosforečnanů vykazuje nejvyšší a nejkonstantnější hodnoty. To může být způsobeno uvolňováním fosforu ze dna nádrže při anoxických podmínkách, tedy hlavně v teplejších a sušších letech. Průměrné hodnoty se pohybují od 0,08 (MD, LAN) po 0,12 mg/l (PVN), což všechny toky řadí do II. jakostní

kategorie. Na profilu PZR ale byla naměřena i hodnota 1,9 mg/l (13. srpna 2018), což více než trojnásobně převyšuje hodnotu hranice mezi IV. a V. kategorií.

MK test pro celé sledované období našel významný pokles koncentrací pouze u celkového fosforu, a to pouze na profilu MD. Nicméně při pohledu na obr. 36, a s ohledem na krátkou datovou řadu, je změna spíše neprůkazná. Naopak, spíše se zdá, že na všech profilech v posledních letech koncentrace obou forem fosforu spíše mírně rostou (obr. 35, 36)



Obr. 35: Vývoj průměrných ročních koncentrací P-PO₄⁻ pro profily MD, LAN a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

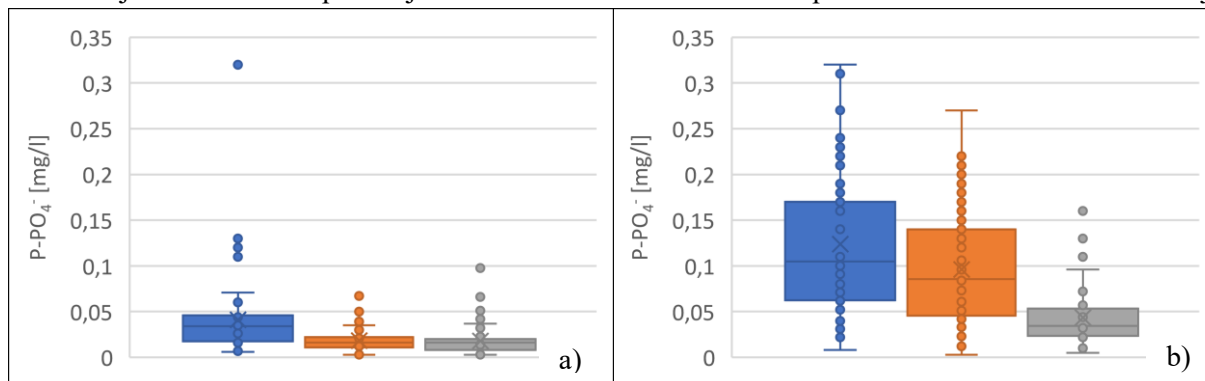


Obr. 36: Vývoj průměrných ročních koncentrací TP pro profily MD, LAN, PVN a PZR. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Pokud byla nalezena signifikantní korelace mezi koncentrací fosforečnanů a průtokem (to je případ MD a PVN), byla tato korelace záporná. Zatímco nízké koncentrace byly měřeny v podstatě při všech průtocích, nejvyšší koncentrace byly měřeny výhradně v suché či normální části spektra průtoků. To ukazuje na znečištění bodovými zdroji, které se více projeví při nižších průtocích. Koncentrace fosforečnanů při různých vodních stavech na profilech PVN a MD jsou zobrazeny na obr. 37. Profil PVN se od MD liší svou velkou variabilitou, tzn. lze celkově pozorovat nižší koncentrace při vyšších průtocích, ale rozpětí hodnot pro každý interval průtoků je značné. Na tomto profilu byly naměřeny nejvyšší koncentrace pouze při nízkých průtocích především v obdobích od srpna do prosince, naopak nízké koncentrace byly měřeny při vyšších průtocích na jaře. Stejné chování vykazují fosforečnany i na

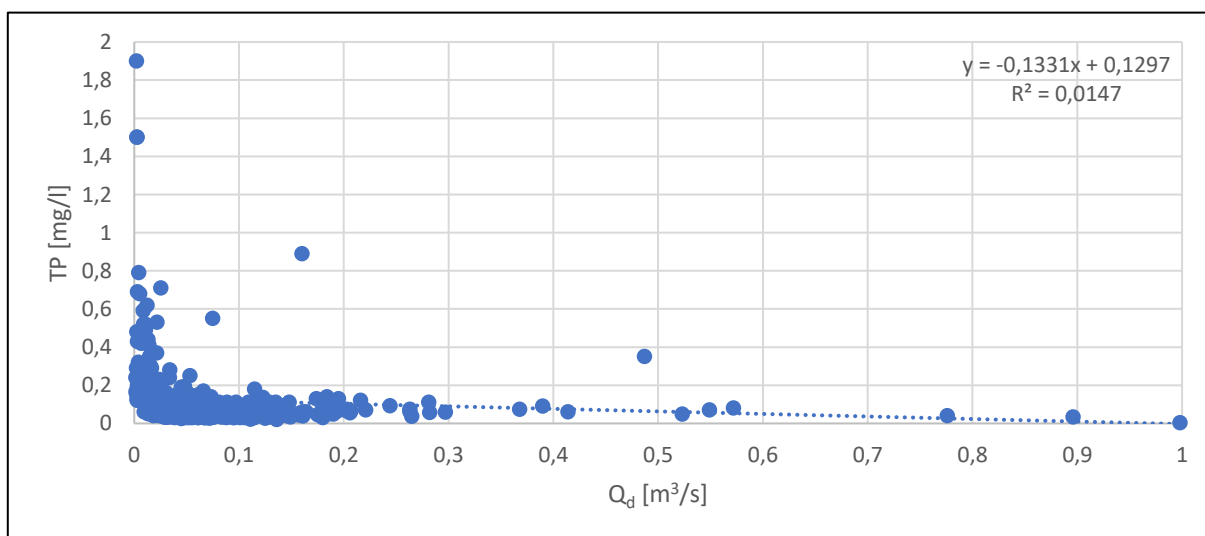
profilu MD, kde jsou ale nejvyšší koncentrace při velmi nízkých letních průtocích. Zajímavé je, že na profilu LAN byla tato závislost přítomná především v posledním desetiletí, naopak, celkově nejvyšší hodnoty byly měřeny na přelomu tisíciletí a nebyly vázány na nejnižší průtoky.

Koncentrace celkového fosforu korelují s průtokem pouze na dvou profilech ze čtyř, a to PVN a PZR. Podrobnější vztah u těchto profilů je zobrazen na obr. 39. Zatímco na profilu PVN se koncentrace snižují



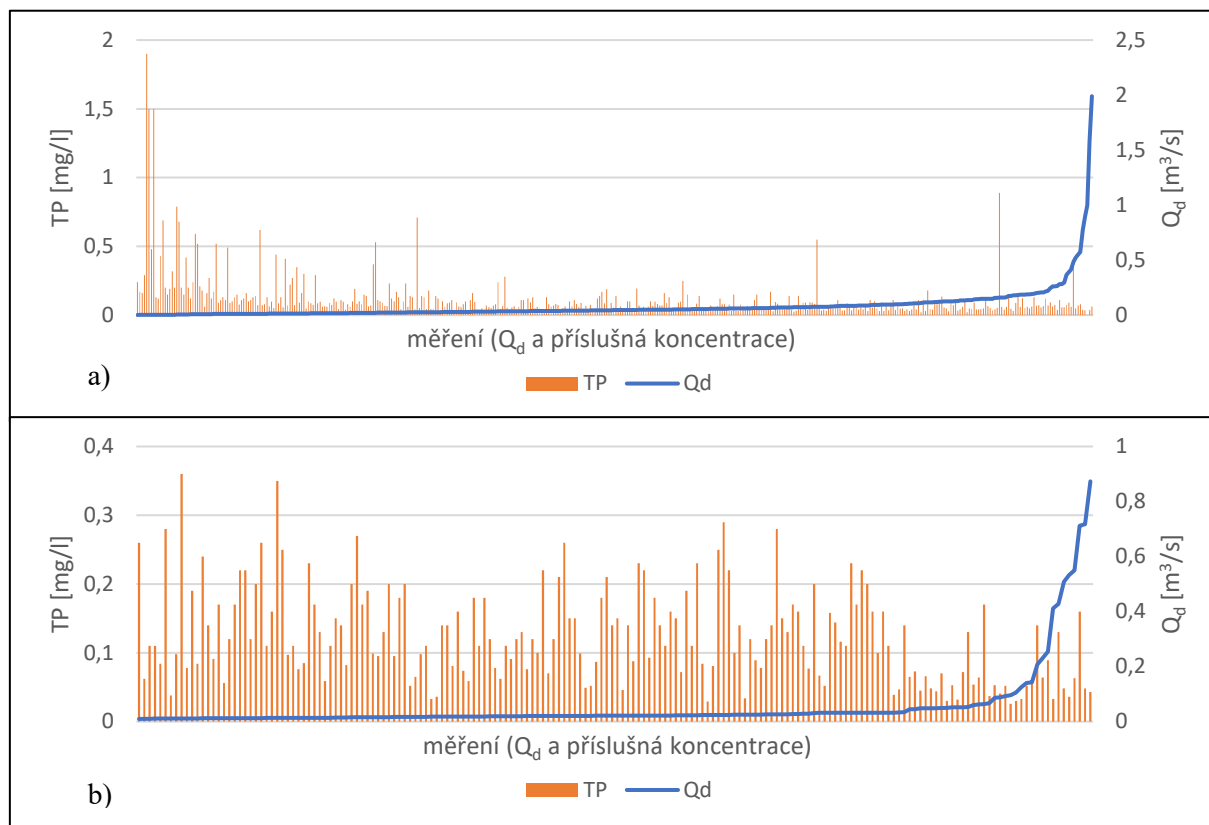
Obr. 37: Krabicové diagramy pro koncentrace $P-PO_4^-$ při nízkých (modře), středních (oranžově) a vysokých (šedě) průtocích na profilu MD (a) a PVN (b). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p

až s vysokými průtoky (obr. 39b), v případě profilu PZR lze nejvyšší pokles sledovat už v rámci nízkých průtoků a přechodu na průtoky střední (obr. 39a, 38). Zajímavé je také blíže se podívat na konkrétní hodnoty koncentrací. Na obr. 39a je vidět, že i když je trend poměrně jednoznačný, přesto se zde vyskytuje několik vysokých koncentrací i při vyšším průtoku. Pohled na tyto konkrétní hodnoty odhaluje, že všechny byly naměřeny od konce srpna do října. Podobné je to i u profilu PVN (obr. 39b), kde ale nelze tak jednoznačně odlišit vysoké koncentrace. To by mohlo značit, že přes pravděpodobný bodový charakter zdrojů fosforu zde může existovat i menší plošný zdroj v podobě zemědělské plochy, která uvolňuje po pozdně-letní či podzimní orbě a hnojení při srážkách fosfor do toku. Zřetelnější to je v případě profilu MD, kde bylo poměrně mnoho vysokých koncentrací změřeno při vyšších průtocích,



Obr. 38: Lineární regrese závislosti koncentrace TP na průtoku na profilu PZR. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

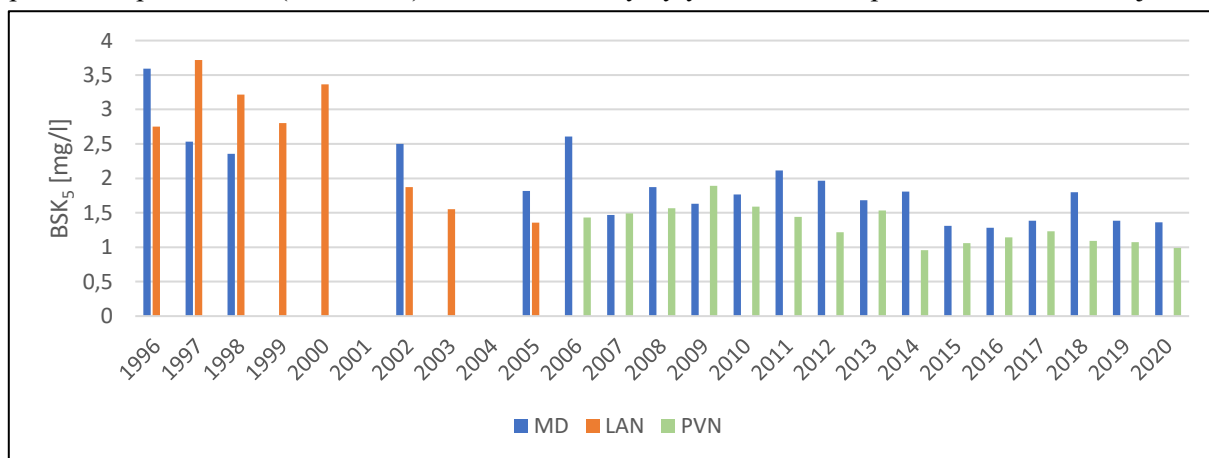
a to v létě a na podzim. Na profilu LAN je vztah k průtoku stejný jako v případě fosforečnanů (tedy maximální hodnoty před rokem 2000 nehledě na průtoky).



Obr. 39: Koncentrace TP podle seřazených průtoků na profilech PZR (a) a LAN (b). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

5.2.7. Ukazatele organického znečištění

Koncentrace ukazatelů organického znečištění, tedy TOC, CHSK_{Cr} a BSK_5 byly vyšší, průměrné hodnoty řadily Klíčavu a Lánský potok převážně do II. jakostní třídy. Nejnižší koncentrace všech tří parametrů byly měřeny na profilu PVN, jako relativně více znečištěný se projevil z hlediska všech parametrů profil LAN (tabulka 13), nicméně hodnoty byly srovnatelné s profilem MD, rozhodující tak



Obr. 40: Vývoj průměrných ročních koncentrací BSK_5 pro profile MD, LAN a PVN. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

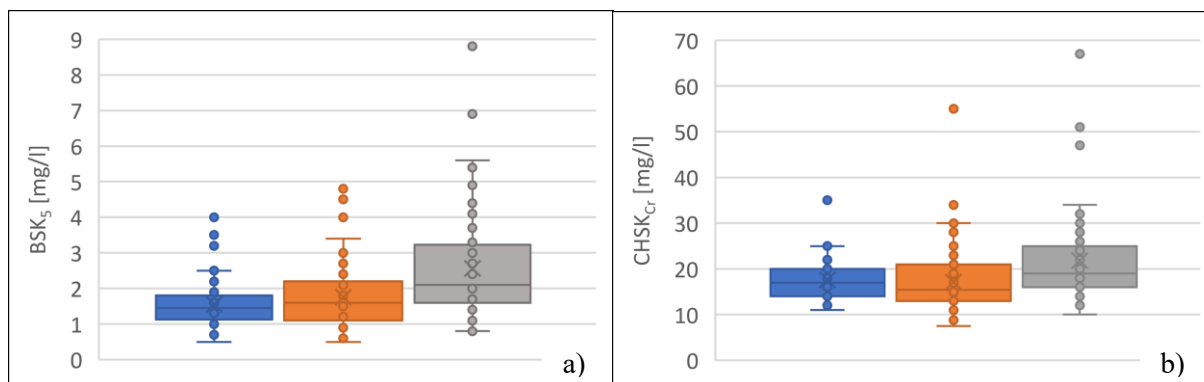
pravděpodobně bylo, že na profilu LAN byly v poslední dekádě měřeny jen koncentrace mezi dubnem a říjnem, což při vyšších letních koncentracích zvyšuje i celkový průměr. Maximálních koncentrací

dosahovaly všechny parametry (kromě BSK₅ na profilu LAN) na všech profilech v létě a na podzim. MK test ukázal na všech profilech v průběhu let u koncentrací TOC mírný pokles, nikde však nebyl statisticky významný, naopak u ukazatele BSK₅ byl na všech profilech signifikantní pokles koncentrací, podle Senovy linie nejvíce až o 0,3 mg/l za rok (LAN). Obzvlášť v případě profilu MD by to mohlo být způsobeno výstavbou ČOV v obci Ruda. Tento trend je zobrazen na obr. 40. Chemická spotřeba kyslíku se v průběhu let významně nemění.

	TOC [mg/l]			CHSK _{Cr} [mg/l]			BSK ₅ [mg/l]		
Profil	MD	LAN	PVN	MD	LAN	PVN	MD	LAN	PVN
Počet měření	212	125	167	232	146	181	256	171	181
Minimum	4,40	5,14	4,30	7,50	10,00	7,90	0,50	0,70	0,50
Maximum	24,00	26,00	17,00	67,00	58,00	51,00	8,80	9,40	4,50
Medián	7,40	8,80	6,60	17,00	21,00	15,00	1,70	1,70	1,20
Průměr	7,95	9,68	7,01	18,47	22,22	16,41	1,92	2,25	1,32
SO	2,75	3,65	1,79	7,17	8,16	5,22	1,08	1,47	0,55

Tab. 13: Shrnutí koncentrací TOC, CHSK_{Cr} a BSK₅ (mg/l). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

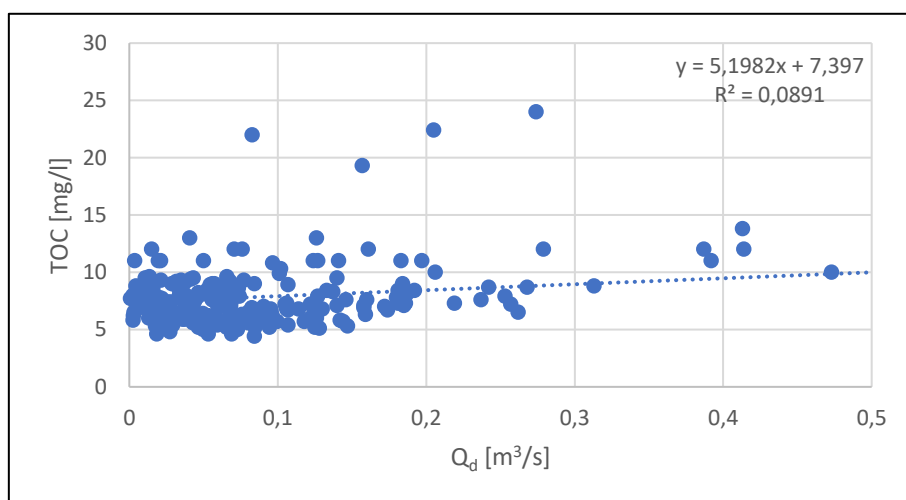
Vazba na srážko-odtokové události a průtok je napříč profily proměnlivá. Profil MD vykazuje pozitivní korelaci, tedy zvýšené koncentrace při zvýšeném průtoku, více či méně u všech parametrů (tab. 5). To je pravděpodobně způsobeno velkou plochou lesů v okolí Klíčavy a mokřadů v její pramenné oblasti. Nejsilnější je korelace v případě BSK₅. Nízké hodnoty zde byly měřeny při všech průtocích, ale ty nejvyšší hlavně při vysokých průtocích (obr. 41a). Organické látky se zde pravděpodobně vyplavují



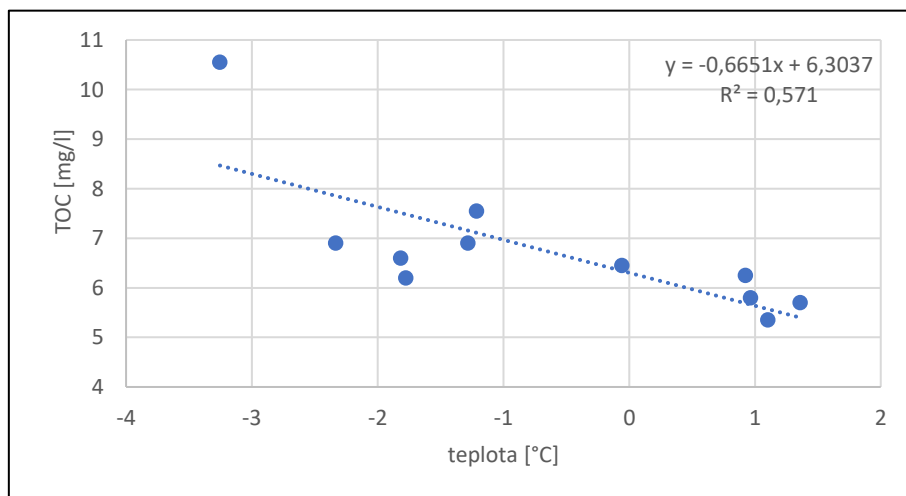
Obr. 41: Krabicové diagramy pro koncentrace BSK₅ (a) a CHSK_{Cr} (b) při nízkých (modře), středních (oranžově) a vysokých (šedě) průtocích na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

z lesních porostů. Nejvyšší koncentrace byly měřeny hlavně v první polovině sledovaného období, patrně zde přispívala i obec Ruda, která v té době neměla ČOV. Chemická spotřeba kyslíku taktéž vykazovala pozitivní korelaci s průtokem pouze na profilu MD. Na rozdíl od BSK₅ ale měla průměrně o něco nižší hodnoty při středních průtocích (viz obr. 41b). Za zvýšenými průtoky ve dnech nejvyšších naměřených koncentrací stály především vysoké srážkové úhrny, přičemž dvě nejvyšší hodnoty byly naměřeny po letní rychlé srážko-odtokové události a předchozích vysokých teplotách. TOC jako jediný z ukazatelů organického znečištění koreloval s průtokem na všech profilech, i když nejsilněji opět na

profilu MD. Závislost koncentrace na průtoku na tomto profilu ilustruje obr. 42. I když lze nejvyšší koncentrace TOC pozorovat převážně při vyšších průtocích, některé vyšší hodnoty se objevují i při středních průtocích. Celkově byly nejvyšší koncentrace TOC měřeny mezi květnem a zářím, tedy v teplejší části roku, a to na profilech MD a LAN, kde jsou poměrně rozsáhlé plochy lesů. Bylo zjištěno, že všem těmto měřením předcházely dny s maximálními teplotami atakujícími nebo přesahujícími hranici 30 °C, nejčastěji pak následovanými vysokými srážkami. Na profilu PVN byla ale naopak značná část nejvyšších koncentrací TOC naměřena v chladnější části roku. Celkově byly koncentrace TOC pod vodní nádrží nejnižší ze všech profilů, což může značit, že se uhlík ukládá do sedimentů v nádrží. Dále byla testována hypotéza, že po tuhých zimách se na jaře vyskytují vyšší koncentrace organického uhlíku. Nejdelší kontinuální data pro teploty zimních měsíců a koncentrace TOC v jarních měsících byla dostupná mezi lety 2009 a 2020 pro profil MD. Zdá se, že při nižší průměrné teplotě (dohromady) za leden a únor jsou poté březnové a dubnové koncentrace TOC o něco vyšší (viz obr. 43).



Obr. 42: Lineární regrese závislosti koncentrace TOC na průtoku na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

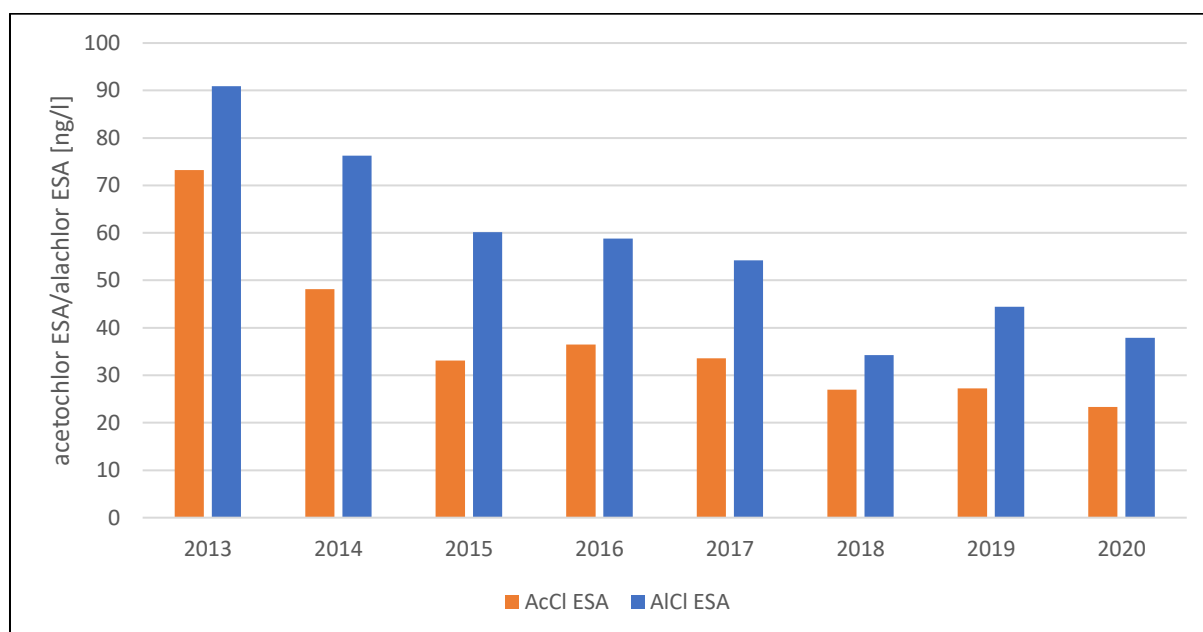


Obr. 43: Závislost průměrné koncentrace TOC zprůměrované za března a duben (svislá osa) na průměrné teplotě zprůměrované za předchozí leden a únor (vodorovná osa) pro roky 2009-2020 na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

5.2.8. Herbicidy

Z herbicidních látek a jejich metabolitů, jejichž koncentrace jsou v povodí Klíčavy sledovány, vícekrát překročily detekční limity pouze metabolity acetochlor ESA, alachlor ESA a metolachlor ESA a OA, a to pouze na profilu MD.

Používání acetochloru bylo na našem území zakázáno v roce 2014, v případě alachloru dokonce už v roce 2008 (Šabršulová 2018), což se výrazně projevilo na koncentracích jejich metabolitů ESA ve sledovaném povodí. Ty byly v případě acetochloru ESA nejvyšší (průměrně přes 70 ng/l, ale 17. 4. 2013 dokonce 112 ng/l) v roce 2013 a dále téměř monotónně klesaly, v roce 2020 průměrná hodnota lehce přesahovala 20 ng/l (obr. 44). Koncentrace alachloru ESA vykazovaly téměř stejný vývoj, avšak byly o něco vyšší (obr. 44). Nejvyšší koncentrace byly měřeny také na jaře 2013 (19. 3. 2013 dokonce 130 ng/l). Průměrem koncentrací za celé období dokonce spadá alachlor ESA do II. jakostní kategorie dle ČSN 75 7221. Maximální koncentrace obou metabolitů se vyskytovaly od února do dubna.

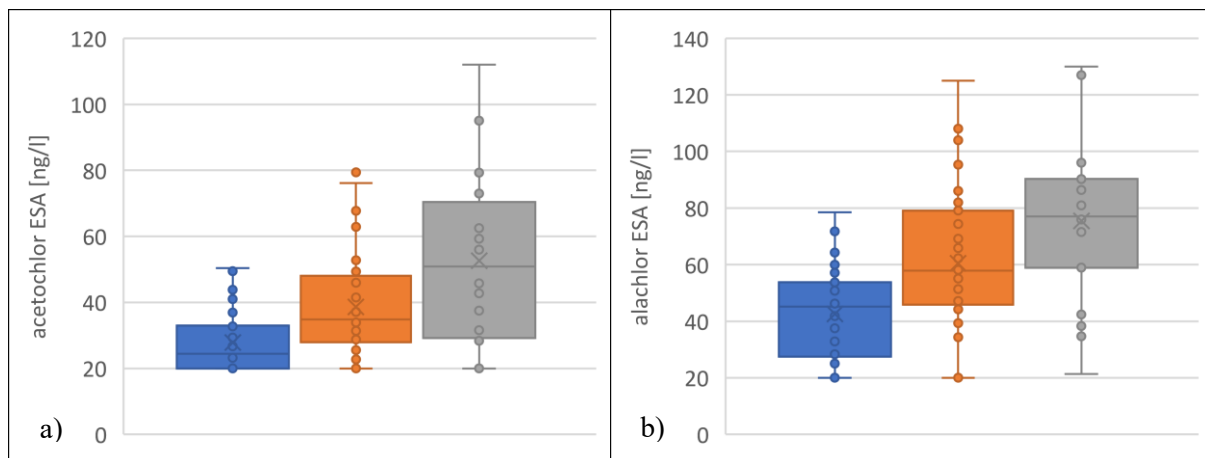


Obr. 44: Vývoj průměrných ročních koncentrací acetochloru ESA a alachloru ESA na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

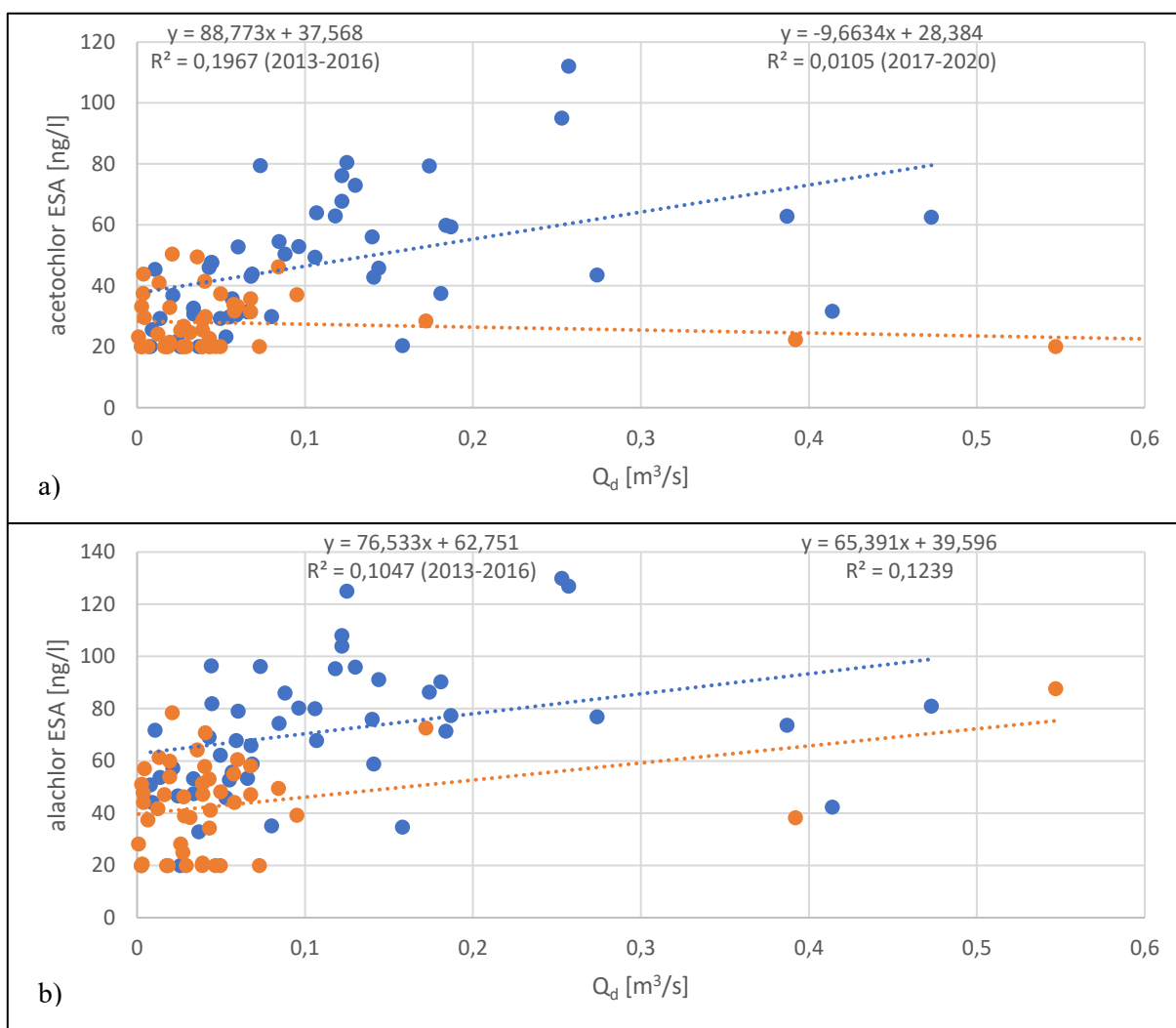
Metolachlor ESA a metolachlor OA vykazují o poznání méně hodnot nad prahem detekce, proto nemá cenu zde ukazovat jejich vývoj. Důraz bude proto kladen na jednotlivé dny zvýšených koncentrací. Metolachlor se v České republice smí legálně aplikovat na zemědělské plodiny.

Z obrázku 45a je patrné, že acetochlor ESA dosahuje vyšších koncentrací při vyšších průtocích. To ukazují i korelační koeficienty (tab. 14). Občas se ale při vyšší vodnosti vyskytují i nízké koncentrace, nejčastěji v posledních letech. Jelikož je používání acetochloru od roku 2014 zakázáno, postupem času klesají i koncentrace jeho metabolitů, které tím pádem stále méně reagují na srážko-odtokové události (obr. 46a). V případě alachloru ESA je reakce podobná (obr. 45b), avšak i v pozdějším období lze

pozorovat určitou reakci na zvýšené průtoky (obr. 46b). U tohoto metabolitu jsou korelační koeficienty o něco vyšší (tab. 14).



Obr. 45: Krabicové diagramy pro koncentrace acetochloru ESA (a) a alachloru ESA (b) při nízkých (modře), středních (oranžově) a vysokých (šedě) průtocích na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Obr. 46: Lineární regrese závislosti koncentrace acetochloru ESA (a) a alachloru ESA (b) na průtoku na profilu MD. Modře jsou vyznačena měření z let 2013-2016, oranžově z let 2017-2020. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

Kontrola jednotlivých dnů se zvýšenými koncentracemi acetochloru ESA ukázala, že v prvních dvou letech (2013 a 2014) sice byly měřeny vyšší koncentrace i vyšší průtoky, nicméně tyto průtoky většinou nebyly způsobeny srážkami či táním sněhu, ale byly vyšší v dlouhodobém vývoji. Za zvýšenými koncentracemi tak mohla stát poměrně čerstvá aplikace herbicidu. To bylo i očekáváno, hlavně s ohledem na fakt, že se až do roku 2014 mohl acetochlor legálně aplikovat. V roce 2016 byly změřeny 3 vyšší koncentrace. V lednu měření (47,6 ng/l) předcházelo tání 3 cm sněhu doprovázené každodenními malými úhrny srážek. Hned poté na počátku února (54,5 ng/l) se nejspíš projevila srážková aktivita v lednu, kdy od začátku ledna až do data měření pršelo téměř každý den s úhrny 0,5-4 mm za den. Na začátku listopadu téhož roku (52,8 ng/l) se projevil deštivý říjen a začátek listopadu, kdy napršelo celkem 75,5 mm, i když v listopadu byly srážky spíše mírnější a častější. V roce 2017 byly změřeny vyšší koncentrace v červenci (50,4 ng/l) a říjnu (46,2 ng/l), oběma dnům předcházely v horizontu zhruba jednoho týdne intenzivnější srážky (10 mm/den i více dnů po sobě). V dalších letech už jsou koncentrace nižší (často pod prahem detekce) a i výjimečně vyšší hodnoty nejsou více vázány na srážko-odtokové události než ty velmi nízké. Celkově ale není vazba koncentrací acetochloru ESA na srážkové a odtokové události jednoznačná. Sice vyšším koncentracím většinou předcházely srážky, často ale nebyly intenzivní a je otázka, do jaké míry koncentrace ovlivnily, jelikož podobné srážky se dají najít téměř před každým libovolným datem.

V případě alachloru ESA je vazba na srážky o něco zřetelnější. Ačkoliv nejvyšší koncentrace byly opět, nehledě na srážko-odtokové události, měřeny v letech 2013 a 2014, i v pozdějším období se vyskytly zvýšené koncentrace, a to právě ve vazbě na srážkové události.

Kromě termínů, zmíněných v případě acetochloru ESA (mimo října 2017), byly vysoké koncentrace zaznamenány ve 4 dalších dnech mezi lety 2016 a 2020. V březnu 2016 (91,2 ng/l) předcházelo měření tání menšího množství sněhu, týden před nímž napršelo za den 13 mm srážek. V únoru, respektive březnu 2017 byly vyšší koncentrace (70,9, resp. 72, 6

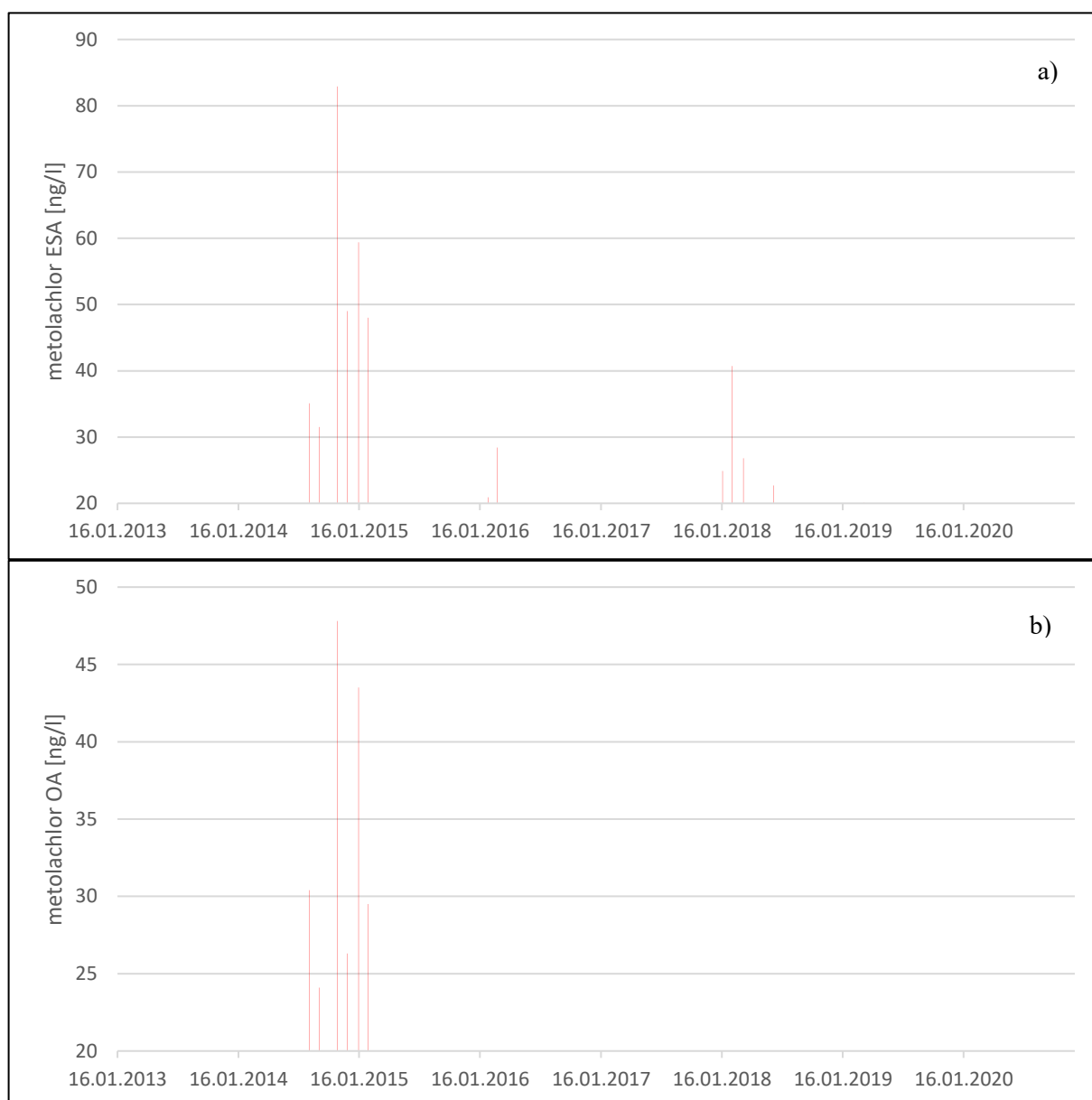
Profil	MD		
Koef.	P	S	K
ac. ESA	0,120	0,508	0,381
al. ESA	0,426	0,561	0,410
met. ESA	-0,016	0,173	0,142
met. OA	-0,005	0,153	0,123

Tab. 14: Koeficienty korelace vybraných metabolitů herbicidů s průtokem. Tučně zvýrazněné hodnoty se statisticky významně liší od 0 na hladině spolehlivosti $\alpha = 0,05$. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

ng/l) zaznamenány po jednorázových vyšších úhrnech srážek (1 den po úhrnu 8 mm, resp. 3 dny po úhrnu 20 mm). Vysoká koncentrace (87,7 ng/l), neobvyklá pro poslední roky, byla změřena v březnu 2020. Den před měřením spadlo téměř 20 mm srážek, a to do povodí již nasyceného z předchozích srážek (je to také den 2. nejvyššího průtoku). Je možné, že byl v blízké minulosti před měřením (v únoru či ještě na podzim) nepovoleně aplikován alachlor, jelikož v tento termín byly koncentrace acetochloru ESA pod prahem detekce. Naproti tomu ale ve stejný rok v říjnu, kdy byl naměřen jednoznačně nejvyšší průtok, byla koncentrace alachloru ESA jen velmi těsně nad detekčním limitem.

V případě metabolitů metolachloru ESA a OA byly změřeny koncentrace vyšší než 20 ng/l (limit detekce) pouze na konci roku 2014 a na počátku roku 2015, s občasnými pozdějšími výjimkami u

metabolitu ESA (obr. 47). Oba metabolity dosahovaly shodně v těchto měsících nejvyšších koncentrací, v podstatě ale nevykazovaly reakci na průtok a srážkové události. Menší detekovatelné koncentrace metolachloru ESA byly změřeny ještě v některých měsících let 2016 a 2018, což by mohlo znamenat, že předtím byla aplikována mateřská látka. Nicméně při následujících měřeních ve stejné roky při vysokých průtocích byly koncentrace opět nedetekovatelné. Jelikož metabolity mohou v půdním prostředí přetrvávat i několik let, jedná se tak spíše o rezidua z let 2014 a 2015. U metolachloru OA tyto zvýšené koncentrace měřeny nebyly, což odpovídá skutečnosti, že metabolity metolachloru ESA jsou častější a déle přetrvávající než metabolity OA.



Obr. 47: Vývoj koncentrací metolachloru ESA (a) a metolachloru OA (b) v měsíčním kroku na profilu MD. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.

6. Diskuze

Dle analýzy klimatických a odtokových poměrů je zřejmé, že projevy změny klimatu se ve sledovaném území dají pozorovat i v relativně krátké době 25 let. Byly nalezeny výrazné změny např. pro růst teploty, nebo ústup sněhové pokrývky. Jednotlivé parametry geochemismu byly studovány především v návaznosti na tyto změny.

Při analýze teploty vody bylo zjištěno, že výrazně nejvyšších hodnot dosahuje na profilu LAN, kde ale posledních několik let nebyly měřeny hodnoty v zimě. Nicméně teploty byly vyšší i v roky, kdy jsou data kompletní. Přitom byly vzorky odebírány zhruba ve stejnou denní dobu na všech profilech, takže lze vyloučit faktor denního chodu teploty. Chladnější voda v Klíčavě tak může být způsobena jejím hlubším a stinnějším údolím. Zajímavý je také rozdíl chodů teplot na Klíčavě před nádrží a pod ní. Pod vodní nádrží je roční chod méně rozkolísaný, což je způsobeno přirozenou teplotní stratifikací nádrže a vypouštěním vody z větší hloubky. K totožnému zjištění došel například Wiejaczka (2015) v Polsku. Bylo zjištěno, že nejznatelnější nárůst je na profilu MD pozorován v únoru, březnu a dubnu.

Největší vazbu má teplota vody na teplotu vzduchu (Whitehead et al. 2009), u obou ukazatelů byl ve sledovaném období pozorován signifikantní nárůst. Nárůst teplot vody v průběhu času je potvrzen v mnoha studiích, v našem prostředí například Navrátilovou (2020) na řece Svatavě nebo Kopáčkem et al. (2020) na Vltavě.

Nejvyšší průměrná konduktivita byla měřena na profilu PVN, ale rozdíl od ostatních profilů je velmi malý. Měsíční chod byl na Klíčavě před nádrží (MD) velmi podobný jako pod nádrží (PVN), tedy se zde nepotvrdily výsledky Wiejaczky (2015), podle jehož studie mají vodní nádrže významný vliv na roční chod konduktivity. V případě měsíčních dat je ale velká šance na neobjevení trendu, který by mohl existovat.

Na dvou ze tří profilů byla objevena signifikantní negativní korelace konduktivity s průtokem, což u nich indikuje přítomné bodové zdroje znečištění. Stejné chování popisuje i Fraindová et al. (2022b), Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020) nebo Šajnarová (2021) na Rolavě. Se stále se snižujícími průtoky by to tak mohlo znamenat, že se častěji budou vyskytovat vyšší hodnoty konduktivity, nicméně kromě profilu MD nebyla taková změna zaznamenána. V povodí Svatavy a Rolavy naopak trend ukazuje na snižující se hodnoty konduktivity (Navrátilová 2020, Kočárková 2016). Burt et al. (2005) popisuje vysoké hodnoty konduktivity při srážko-odtokových událostech po dlouhých teplých a suchých epizodách, zde však takovéto chování potvrzeno nebylo.

Hodnoty pH jsou poměrně vysoké, na všech profilech průměrně kolem 8,1. Na žádném profilu nebyla během sledovaného období objevena významná změna hodnot pH. Přesto se zdá že hodnoty pH spíše nepatrně klesají, hlavně v druhé polovině sledovaného období. To odporuje například zjištěním Fraindové et al. (2022b) z povodí Blanice nebo Navrátilové (2020) z povodí Svatavy, které obě sledovaly spíše zvyšující se pH. Tyto výzkumy ale byly prováděny v povodích s výskytem rašelinišť,

kteřá mají na hodnoty pH vliv. Vazba na srážko-odtokové události se potvrdila na profilu MD, kde šla pozorovat inverzní závislost pH na průtoku. Může to být způsobeno nejvyšším počtem měření, nebo přítomností trvale zamokřených ploch v pramenné oblasti Klíčavy. Tento efekt pozorovala i Fraindová et al. (2022a) na Šumavě nebo Navrátilová (2020) na Svatavě. Převážně inverzní vazbu pH na průtok pozorovali i na Hamerském potoce Prokš (2010) nebo v Krušných horách a na Šumavě Fraindová et al. (2022a). V těchto případech ale opět hrála roli přítomná rašeliniště, proto byla vazba většinou silnější než v povodí Klíčavy.

Rozpuštěný kyslík se projevil jako výrazně sezonní parametr, jelikož nejvyšších koncentrací dosahoval vždy v únoru či březnu a nejnižších v červenci a srpnu. Zde je patrná jeho vazba na teplotu vody a teplotu vzduchu (Whitehead 2009, van Vliet a Zwolsmann 2008). Průměrně nejnižší koncentrace byly měřeny na profilu LAN. To koresponduje i s nejvyššími teplotami a nejvyššími koncentracemi ukazatelů organického znečištění na tomto profilu. Nízké koncentrace kyslíku měřil při povodních se zvýšenými hodnotami CHSK a BSK Hrdinka et al. (2012). Za celé sledované období byl zaznamenán lehký pokles koncentrací, ale na rozdíl od teploty nebyl statisticky významný (podobně jako v případě Fraindové et al. 2022b). Korelace s průtokem byla spíše pozitivní, což ale opět značí spíše vazbu na teplotu, jelikož konstantně vyšší průtoky se objevovaly spíše v chladnějších částech roku. Na profilu PVN, kde byly průměrně nejvyšší průtoky pozorovány v červnu, byla korelace téměř nulová. Obecně lze očekávat, že se vzrůstajícími teplotami budou koncentrace rozpuštěného kyslíku klesat, což by mohlo mít velice negativní vliv na vodní faunu a flóru (Rostami et al. 2020). Snížené koncentrace kyslíku při letních suchých obdobích v našich podmínkách zjistily např. Fraindová et al. (2022b) nebo Šajnarová (2021).

Poměrně nízké hodnoty byly měřeny v případě dusíkatých látek. Průměrně nejvyšších hodnot nabývaly na profilu MD (na profilu LAN je průměr snížený pouze letními měřeními z posledních let, nicméně koncentrace zde byly nižší i v kompletních letech), kde je registrováno největší antropogenní ovlivnění v podobě sídel a zemědělských ploch. Ukázalo se, že vodní nádrž tyto živiny akumuluje (koncentrace pod ní byly nejnižší). U koncentrací všech forem dusíku byly potvrzeny průměrně nejvyšší koncentrace na přelomu zimy a jara, což je determinováno vegetačním obdobím rostlin. MK testy nenaznačily jakékoli změny koncentrací, i když až na výjimky byly v posledním „suším“ desetiletí zaznamenány spíše nižší koncentrace. Významné snižování koncentrací dusičnanů prokázala Fraindová et al. (2022b) na řece Blanici. Dusičnanový dusík a celkový dusík projevovaly jedny z nejsilnějších pozitivních korelací s průtokem ze všech parametrů, a to na všech profilech, což odpovídá výsledkům Fraindové et al. (2022a) a Hrdinky et al. (2012). Vysoké koncentrace byly naměřeny převážně při vysokých průtocích, zvýšené koncentrace při středních průtocích byly měřeny hlavně na podzim a mohou indikovat orbu a hnojení polí, po kterých stačí i menší srážky k vyluhování dusíku či odnosu vodní erozí (Kvítek a Tippl 2005). V případě amoniakálního dusíku, který se váže na půdní částice (Kvítek a Tippl 2005) a je tak nejnáchylnější k mobilizaci při vodní erozi, je fenomén podzimních vysokých koncentrací

i přes nízké a střední průtoky nejzřetelnější, hlavně na profilu MD. Naopak chování amoniakálního dusíku na profilu LAN ukazuje spíše na bodové zdroje znečištění. Ukazuje se tak, že na chování těchto látek má velký vliv zdroj, ze kterého pochází.

Fosforečnany a celkový fosfor nabývaly nejvyšších koncentrací na profilu PVN a nejnižších na profilu MD. To je poměrně překvapivé zjištění, protože nejvíce antropogenně ovlivněná je především horní část povodí Klíčavy. Koncentrace obou forem fosforu se významně neměnily, i když v posledních suchších letech nabývaly spíše vyšších hodnot. Zvýšené koncentrace celkového fosforu v suchých letech pozoroval přímo ve vodní nádrži Klíčava Duras (2010). Na profilu PVN je významná negativní korelace obou forem fosforu s průtokem, na profilu MD jen fosforečnanů. Inverzní vztah k průtoku v případě celkového fosforu pozorovala Navrátilová (2020) na Svatavě. Vysoké koncentrace obou forem fosforu při nízkých průtocích popisuje Fraindová et al. (2022a) nebo Hrdinka et al. (2012), který zaznamenal v povodí Lužnice značné zhoršení kvality vody z hlediska fosforečnanů právě ve velmi suchém období. Ačkoliv byly vysoké koncentrace celkového fosforu měřeny především při nízkých průtocích, několik vysokých koncentrací se objevilo i při vyšších průtocích, a to převážně na profilu MD, v období podzimu. Jelikož se poblíž nachází nejvíce orné půdy, je možné, že je to důsledek aplikace hnojiva na fosforové bázi, zorání půdy a následného odnosu do toku při srážkových událostech. Na mechanismus zvýšeného odnosu fosforu v půdních částicích při intenzivní erozi poukazuje Botter et al. (2019). Uvolňování fosforu při srážkových událostech může být problém z hlediska eutrofizace vod (Fraindová et al. 2022b).

Další analyzovanou skupinou látek byly ukazatele organického znečištění $CHSK_{Cr}$, BSK_5 a TOC. Průměrně nejvyšší koncentrace byly dosaženy na profilu LAN pro všechny tři parametry (nicméně na profilu MD byly hodnoty jen mírně nižší, na profilu LAN byly posledních několik let měřeny koncentrace převážně v teplé části roku, což může zvyšovat průměrnou hodnotu), nejnižší na profilu PVN. Nejvyšších koncentrací dosahují všechny parametry v létě a na podzim. V případě $CHSK$ toto zjištění odporuje Kočárkové (2016), která na Rolavě popisuje nejvyšší koncentrace $CHSK$ při jarním tání. V jejím případě hrála roli rašeliniště, která často akumulují organickou hmotu a při tání ji naopak uvolňují. Naopak, v povodí Klíčavy byly vysoké koncentrace naměřeny spíše po letních rychlých srážko-odtokových událostech. Přírodními zdroji $CHSK$ jsou často rašeliniště a trvale zamokřené plochy, kterých se v povodí Klíčavy vyskytuje málo. Proto nebyla potvrzena častá a silná vazba $CHSK$ na průtok, jako například ve studiích Fraindové (2022a, 2022b) nebo v práci Kočárkové (2016), v jejichž studovaných povodích se nacházelo více mokřadů a rašeliniště. Nejsilnější korelace byla vypočítána na profilu MD, který je nejbliž k malým zamokřeným plochám v pramenné oblasti Klíčavy. Ukázalo se též, že často předcházely vysokým koncentracím $CHSK_{Cr}$ vysoké teploty. Zvýšené koncentrace $CHSK_{Cr}$ a BSK_5 pozoroval při povodních na řece Lužnici Hrdinka et al. (2012). V případě BSK_5 byla pozitivní korelace nalezena také především na profilu MD, který je obklopen lesními porosty. Na profilu MD byly nejvyšší koncentrace měřeny téměř výhradně v první polovině sledovaného období,

což může být důsledek neexistence ČOV v obci Ruda v těchto letech. Popsané chování (hlavně v druhé polovině sledovaného období) ale ukazuje spíše na přirozený původ BSK₅ (organické látky jsou spíše vyplavovány z lesních porostů). Celkový organický uhlík dosahoval průměrně nejvyšších koncentrací na všech profilech převážně v létě, což je v souladu se zjištěním Navrátilové (2020), i když na profilu PVN byly čtyři nejvyšší koncentrace změřeny mezi říjnem a dubnem. Profil PVN se ale chová odlišně od ostatních profilů, z důvodu polohy pod v. n. Klíčava, která se projevuje jako past na organické látky. I když se na všech profilech objevila signifikantní korelace TOC s průtokem, podobně jako v práci Špringerové (2016) v povodí Vydry a horní Blanice, na profilech MD a LAN se vyskytlo několik vysokých koncentrací i při nízkém průtoku. Manuální kontrolou dat bylo zjištěno, že těmto měřením vždy předcházely v řádu několika dnů vysoké teploty, následované srážkovými událostmi, které však nezvedly nízký průtok natolik, aby byl brán jako vysoký. To koresponduje se zjištěním Vidona et al. (2014) nebo Puczek a Jekatierynczuk-Rudczyk (2020).

Dostupná data pro koncentrace parametrů organického znečištění až na výjimku v podobě BSK₅ nevykázala během sledovaného období žádný signifikantní vývoj. V případě BSK₅ byl pozorován pokles na všech profilech, patrně z důvodu zlepšení technologií ČOV. Ke stejnému závěru došla i Navrátilová (2020), nicméně ta navíc pozorovala i signifikantní snížení koncentrací CHSK. Zdá se ale, že v posledním desetiletí mírně klesají koncentrace CHSK i TOC, což může být ovlivněno zvyšováním extremity srážek, kdy měsíční měření často nepostihnou rychlé srážko-odtokové události, a celkovým snižováním průtoků.

V Klíčavě na profilu MD, kde jsou nejčastěji přítomné zemědělské plochy, byly nalezeny i občasné zvýšené hodnoty koncentrací metabolitů ESA či OA několika herbicidů. Nejčastěji překračovaly detekční minimum metabolity acetochlor ESA a alachlor ESA, a to i přesto, že je aplikace jejich mateřských látek na našem území již několik let zákonem zakázána. Nejvyšší koncentrace byly v obou případech měřeny v roce 2013 a poté postupně klesaly. Oba metabolity vykazovaly poměrně silnou pozitivní korelaci s průtokem. Lineární regrese ukázala, že v první polovině sledovaného období (2013-2016) koncentrace obou metabolitů rostly s průtokem, zatímco v druhé polovině (2017-2020) byla tato vazba patrná jen u alachloru ESA. Kontrola dat ukázala, že zřetelnější vazbu na jednotlivé srážkové události má alachlor ESA, u kterého byly při zvýšených koncentracích nalezeny významnější srážkové události. Korelace s průtokem byla v případě tohoto metabolitu vyšší. Metabolity metolachloru (ESA a OA) překročily limit detekce jen několikrát a nebyla u nich nalezena vazba na srážko-odtokový režim, stejně jako v práci Dobiáše et al. (2018). Zvýšené hodnoty tak patrně pouze následovaly aplikaci samotných látek a poté se již výrazněji neprojevovaly.

Celkově provedené analýzy až na výjimky nevykazovaly nikterak silné, jednotné a konkrétní vazby na srážko-odtokový režim. Je pravděpodobné, že měsíční data, často i s chybějícími hodnotami, nemusí postihnout všechny trendy, stejně jako mohou náhodou najít trendy a vazby, které neplatí. Proto byly

často výsledky všech analýz ověřovány i manuálně, kontrolou nejvyšších a nejnižších hodnot, aby se daly výsledky lépe interpretovat. Chyby mohou pramenit i z odlišného charakteru dat průtoků a parametrů geochemismu. Průměrný denní průtok nebo průtok v 7:00 nemusí korespondovat s průtokem, který by byl naměřen přímo při odběru vzorků. Nejsignifikantnější vztahy (často i s $p < 0,0001$) byly pozorovány na profilu MD a PZR, kde byly dostupné nejdelší a nejhomogennější časové řady měření. Kromě frekvence měření se tak ukazuje jako klíčová i homogenita dat, jejich množství a pravidelný sběr.

7. Závěr

Tato práce se zabývala změnami koncentrací vybraných parametrů geochemismu povrchových vod v závislosti na změně klimatu a srážko-odtokového režimu. Dle odborné literatury byly popsány vybrané parametry kvality vody a jejich vazba na hydrologické a klimatické charakteristiky a na jejich dynamiku a proměnu, stejně jako statistické metody a přístupy, pomocí kterých se tato vazba studuje. Práce je doplněna stručnou analýzou vývoje hydroklimatických proměnných (teplota, srážky, sněhová pokrývka, průtoky) a parametrů geochemismu vod, kterými jsou teplota, konduktivita, pH, rozpuštěný kyslík, formy dusíku, formy fosforu, ukazatele organického znečištění a herbicidy, v povodí Klíčavy.

Přestože byla u mnoha parametrů nalezena signifikantní vazba na srážky a odtok, jen v malém množství případů se tak stalo u všech profilů. Ukázalo se, i přes zřetelné změny klimatických charakteristik a srážko-odtokového režimu (nárůst teplot a extremity srážkových událostí, kratší trvání sněhové pokrývky, snižování průtoků i zvyšování jejich extrémů) nenastala u velkého množství parametrů během sledovaného období významná změna. Otázkou však je, do jaké míry jsou data sbíraná v měsíčním kroku schopná tyto změny zachytit. Sledované období je navíc poměrně krátké.

Výraznější změnu koncentrací v povodí Klíčavy za studované období zaznamenala především teplota vody, která vykazuje na všech profilech zřetelný nárůst, hlavně v měsících na přelomu zimy a jara. Fyzikálně-chemické parametry vykazovaly spíše inverzní vztah s průtokem a nebyla u nich zaznamenána významná změna v čase. I přes zvýšené teploty nebyla zaznamenána významná proměna v koncentracích rozpuštěného kyslíku. U nutrientů byla zjištěno odlišné chování. Zatímco dusíkaté látky spíše sledovaly změny průtoků, u forem fosforu tomu bylo přesně naopak. Možná i proto byl v posledních letech zjištěn nárůst koncentrací fosforečnanů a celkového fosforu v tocích. Vysoké koncentrace byly u obou skupin látek měřeny často na podzim (nehledě na vodnost), což může mít souvislost s ošetřováním zemědělských ploch. Ukazatele organického znečištění nevykazovaly, kromě BSK₅, významný nárůst ani pokles koncentrací s časem. Hodnoty BSK₅ během sledovaného období klesaly, což by mohlo být, spíše než klimatickými faktory, vysvětleno výstavbou a zvětšením efektivity ČOV. Manuální kontrola maximálních hodnot na všech profilech, kromě PVN, ukázala, že TOC dosahuje nejvyšších koncentrací v horizontu několika dnů po výskytu velmi vysokých teplot, což by mohlo hrát velkou roli při postupujícím oteplování. Současně zvyšující se extrémita srážek může mít za následek prudší změny koncentrací organických látek (a nejen těch, ale i ostatních parametrů výrazněji reagujících na změny průtoků). Analýza koncentrací metabolitů vybraných herbicidů ukázala, že nejčastěji limity detekce překračují a významněji na srážky a průtok reagují acetochlor ESA a alachlor ESA, i když jejich koncentrace i vazba na srážko-odtokové události v průběhu času klesají.

Veškeré sledované parametry kvality vody nabývaly nízkých koncentrací, většina z nich svými průměrnými hodnotami zapadá do I. až II. jakostní kategorie dle ČSN 75 7221 (příloha 2). Nicméně u

některých parametrů maxima i několikanásobně přesahovala hranici nejhorší jakostní kategorie. Na tyto parametry by se dalo v budoucnu zaměřit a podrobněji popsat jejich chování.

8. Seznam literatury

- ÅGREN, A., HAEI, M., KÖHLER, S. J., BISHOP, K., LAUDON, H. (2010): Regulation of stream water dissolved organic carbon (DOC) concentrations during snowmelt; the role of discharge, winter climate and memory effects. *Biogeosciences*, 7, 2901-2913.
- ANDRADE, V.S., GUTIERREZ, M. F., REGALDO, L., PAIRA, R. A., REPETTI, M. R., GAGNETEN, A. M. (2021): Influence of rainfall and seasonal crop practices on nutrient and pesticide runoff from soybean dominated agricultural areas in Pampean streams, Argentina. *Science of The Total Environment*, 788, 1-10.
- AZHAR, S. C., ARIS, A. Z., YUSOFF, M. K., RAMLI, M. F., JUAHIR, H. (2015): Classification of River Water Quality Using Multivariate Analysis. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 79-84.
- BAKER, E. B., SHOWERS, W. J. (2019): Hysteresis analysis of nitrate dynamics in the Neuse River, NC. *Science of the Total Environment*, 652, 889-899.
- BATES, B., KUNDZEWICZ, Z., WU, S., PALUTIKOF, J. (2008): Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 s.
- BISSENBAYEVA, S., ABUDUWAILI, J., ISSANOVA, G., SAMARKHANOV, K. (2020): Characteristics and Causes of Changes in Water Quality in the Syr Darya River, Kazakhstan. *Water Resources*, 47, 904-912.
- BLAUROCK, K., BEUDERT, B., GILFEDDER, B. S., FLECKENSTEIN, J. H., PEIFFER, S., HOPP, L. (2021): Low hydrological connectivity after summer drought inhibits DOC export in a forested headwater catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 5133-5151.
- BOTTER, M., BURLANDO, P., FATICHI, S. (2019): Anthropogenic and catchment characteristic signatures in the water quality of Swiss rivers: a quantitative assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 1885-1904.
- BOTTER, M., BURLANDO, P., FATICHI, S. (2019): Anthropogenic and catchment characteristic signatures in the water quality of Swiss rivers: a quantitative assessment, *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 1885–1904.
- BOUZA-DEAÑO, R., TERNERO-RODRÍGUEZ, M., FERNÁNDEZ-ESPINOSA, A. J. (2008): Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain). *Journal of Hydrology*, 361, 227-239.

- BRODER, T., KNORR, K. H., BIESTER, H. (2017): Changes in dissolved organic matter quality in a peatland and forest headwater stream as a function of seasonality and hydrologic conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 2035-2051.
- BROWN, S. H. (2009): Multiple Linear Regression Analysis: A Matrix Approach with MATLAB. *Alabama Journal of Mathematics*, Spring/Fall 2009, 1-3.
- BURT, T. P., WORRALL, F., HOWDEN, N. J. K., ANDERSON, M. G. (2015): Shifts in discharge-concentration relationships as a small catchment recover from severe drought. *Hydrological Processes*, 29, 498-507.
- CANO-PAOLI, K., CHIOGNA, G., BELLIN, A. (2019): Convenient use of electrical conductivity measurements to investigate hydrological processes in Alpine headwaters. *Science of total environment*, 685, 37-49.
- CLARK, J.M., LANE, S.N., CHAPMAN, P.J., ADAMSON, J.K. (2008): Link between DOC in near Surface Peat and Stream Water in an Upland Catchment. *Science of the Total Environment*, 404, 308-315.
- COX, B.A., WHITEHEAD, P.G. (2009): Impacts of climate change scenarios on dissolved oxygen in the River Thames, UK. *Hydrology Research*, 40, 138-152.
- CREED, I.F., MCKNIGHT, D.M., PELLERIN, B.A., GREEN, M.B., BERGAMASCHI, B.A., AIKEN, G.R., BURNS, D. A., FINDLAY, S. E. G., SHANLEY, J. B., STRIEGL, R. G., AULENBACH, B. T., CLOW, D. W., LAUDON, H., MCGLYNN, B. L., MCGUIRE, K. J., SMITH, R. A., STACKPOOLE, S. M. (2015): The river as a chemostat: fresh perspectives on dissolved organic matter flowing down the river continuum. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72, 8, 1272-1285.
- DE WIT, H. A., STODDARD, J. L., MONTEITH, D. T., SAMPLE, J. E., AUSTNES, K., COUTURE, S., FÖLSTER, J., HIGGINS, S. N., HOULE, D., HRUŠKA, J., KRÁM, P., KOPACEK, J., PATERSON, A. M., VALINIA, S., VAN DAM, H., VUORENMAA, J., EVANS, C. D. (2021): Cleaner air reveals growing influence of climate on dissolved organic carbon trends in northern headwaters. *Environmental Research Letters*, 16, 1-13.
- DEMEK, J., MACKOVČIN, P., (eds.). *Hory a nížiny. Zeměpisný lexikon ČR. 2. upravené vydání. Brno: AOPK ČR, 2006. 582 s.*
- DOBIÁŠ, J., KOŽELUH, M., ZAJÍČEK, A., FUČÍK, P., LIŠKA, M. (2018): Dynamika vyplavování pesticidních látek v povodí Čechtického potoka. *VTEI*, 4, 10-16.
- DOUGLAS, T. A., BLUM, J. D., GUO, L., KELLER, K., GLEASON, J. D. (2013): Hydrogeochemistry of seasonal flow regimes in the Chena River, a subarctic watershed draining discontinuous permafrost in interior Alaska (USA). *Chemical Geology*, 335, 48-62.

DURAS, J. (2010): Nádrž Klíčava – vztah kvality a intenzity vodárenského využití. Sborník konference Pitná voda, 271-276.

EASTERLING, D. R., MEEHL, G. A., PARMESAN, C., CHANGNON, S.A., KARL, T. R., MEARNES, L. O. (2000): Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 289, 5487, 2068–2074.

ELUDOYIN, A. O., GRIFFITH, B., ORR, R. J., BOL, R., QUINE, T. A., BRAZIER, R. E. (2017): An evaluation of the hysteresis in chemical concentration–discharge (C–Q) relationships from drained, intensively managed grasslands in southwest England. *Hydrological Sciences Journal*, 62, 8, 1243-1254.

ERLANDSSON, M., BUFFAM, I., FÖLSTER, J., LAUDON, H., TEMNERUD, J., WEYHENMEYER, G.A., BISHOP, K. (2008): Thirty-five years of synchrony in the organic matter concentrations of Swedish rivers explained by variation in flow and sulphate. *Global Change Biology*, 14, 1191-1198.

EVANS, C., DAVIES, T.D. (1998): Causes of concentration/discharge hysteresis and its potential as a tool for analysis of episode hydrochemistry. *Water Resources Research*, 34, 1, 129–137.

FRAINDOVÁ, K., MATOUŠKOVÁ, M., KLIMENT, Z., VLACH, V. (2022b): Changes and dynamics of headwaters chemistry on the boundary of nature protected areas: Example of upper Blanice River catchment, Czechia. *Geografie*, 127, 99-126.

FRAINDOVÁ, K., MATOUŠKOVÁ, M., KLIMENT, Z., VLČEK, L., VLACH, V., ŠPRINGEROVÁ, P. (2022a): Headwaters biogeochemistry focused on different rainfall-runoff conditions, and the role of waterlogged areas: a comparative study of Czech mountains. *Hydrological Sciences Journal*, 67(4), 588-612.

FUČÍK, P., KAPLICKÁ, M., KVÍTEK, T., PETERKOVÁ, J. (2012): Dynamics of Stream Water Quality during Snowmelt and Rainfall – Runoff Events in a Small Agricultural Catchment. *Clean – Soil, Air, Water*, 40, 2, 154-163.

GILBERT, R.O. (1987): *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Wiley, New York.

GODSEY, S.E., KIRCHNER, J.W., CLOW, D.W. (2009): Concentration–discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. *Hydrological Processes*, 23, 1844-1864.

GONÇALVES, A. M., ALPUIM, T. (2011): Water quality monitoring using cluster analysis and linear models. *Environmetrics*, 22, 933-945.

HAMMOND, D., PRYCE, A. R. (2007): Climate change impacts and water temperature. Report no. SC060017/SR, EnvironmentAgency, Bristol.

- HANCOCK, T. C., SANDSTORM, M. W., VOGEL, J. R., WEBB, R. M. T., BAYLESS, E. R., BARBASH, J. E. (2008): Pesticide Fate and Transport throughout Unsaturated Zones in Five Agricultural Settings, USA. *Journal of Environmental Quality*, 37, 3, 1086-1100.
- HIRSCH, R.M., SLACK, J.R., SMITH, R.A. (1982): Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18, 1, 107-121.
- HRDINKA, T., NOVICKÝ, O., HANSLÍK, E., RIEDER, M. (2012): Possible impacts of floods and droughts on water quality. *Journal of Hydro-environment Research*, 6, 145-150.
- JENNINGS, E., DE EYTO, E., MOORE, T., DILLANE, M., RYDER, E., ALLOTT, N., NIC AONGHUSA, C., ROUEN, M., POOLE, R., PIERSON, D.C. (2020): From Highs to Lows: Changes in Dissolved Organic Carbon in a Peatland Catchment and Lake Following Extreme Flow Events. *Water*, 12, 1-19.
- JUHLS, B., STEDMON, C. A., MORGENSTERN, A., MEYER, H., HÖLEMANN, J., HEIM, B., POVAZHNYI, V., OVERDUIN, P. P. (2020): Identifying Drivers of Seasonality in Lena River Biogeochemistry and Dissolved Organic Matter Fluxes. *Frontiers in Environmental Science*, 8, článek 53.
- KASTE, Ø., AUSTNES, K., DE WITT, H. A. (2020): Streamwater responses to reduced nitrogen deposition at four small upland catchments in Norway. *Ambio*, 49, 1759-1770.
- KENDALL, M. G. (1938): A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika*, 30, 81-93.
- KENDALL, M.G. (1975): Rank correlation methods. Griffin, London.
- KLÖPPEL, H., HAIDER, J., KÖRDEL, W. (1994): Herbicides in surface runoff: A rainfall simulation study on small plots in the field. *Chemosphere*, 28, 4, 649-662.
- KOČÁRKOVÁ, T. (2016): Změny biochemismu v pramenných oblastech. Aplikace v experimentálním povodí horní Rolavy. Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 76 s.
- KÖHLER, S. J., BUFFAM, I., LAUDON, H., BISHOP, K. (2008): Climate's control of intra-annual and inter-annual variability of total organic carbon concentration and flux in two contrasting boreal landscape elements, *Journal of Geophysical Research*, 113, 1-12.
- KÖHLER, S., BUFFAM, I., LAUDON, H., BISHOP, K. (2009): Dynamics of stream water TOC concentrations in a boreal headwater catchment: Controlling factors and implications for climate scenarios. *Journal of Hydrology*, 373, 44-56.
- KOLPIN, D. W., THURMAN, E. M., LINHART, S. M. (1998): The Environmental Occurrence of Herbicides: The Importance of Degradates in Ground Water. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* volume 35, 385-390.

- KOPÁČEK, J., HEJZLAR, J., PORCAL, P., ZNACHOR, P. (2021): Biogeochemical causes of sixty-year trends and seasonal variations of river water properties in a large European basin. *Biogeochemistry*, 154, 81-98.
- KVÍTEK, T., TIPPL, M. (2005): Ochrana povrchových vod před dusičnany z vodní eroze a hlavní zásady protierozní ochrany v krajině. Ústav zemědělských a potravinářských informací, Praha.
- LANGHAMMER, J. (2002): Kvalita povrchových vod a jejich ochrana. Skripta. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, 225 s.
- LAWLER, D. M., PETTS, G. E., FOSTER, I. D. L., HARPER, S. (2006): Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK. *Science of the Total Environment*, 360, 109-126.
- LEDESMA, J. L. J., FUTTER, M. N., LAUDON, H., EVANS, C. D., KÖHLER, S. J. (2016): Boreal forest riparian zones regulate stream sulfate and dissolved organic carbon. *Science of the Total Environment*, 560, 110-122.
- LIU, B., YANG, D., YE, B., BEREZOVSKAYA, S. (2005): Long-term open-water season stream temperature variations and changes over Lena River Basin in Siberia. *Global and Planetary Change*, 48, 96-111.
- LLOYD, C. E. M., FREER, J. E., JOHNES, P. J., COLLINS, A. L. (2016): Technical Note: Testing an improved index for analysing storm discharge–concentration hysteresis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 625-632.
- LÖFGREN, S., ZETTERBERG, T. (2011): Decreased DOC concentrations in soil water in forested areas in southern Sweden during 1987–2008. *Science of the Total Environment*, 409, 10, 1916-1926.
- LONG, D. T., VOICE, T. C., XAGARORAKI, I., CHEN, A., WU, H., LEE, E., OUN, A., XING, F. (2017): Patterns of c-q hysteresis loops and within an integrative pollutograph for selected inorganic and organic solutes and *E. coli* in an urban salted watershed during winter-early spring periods. *Applied Geochemistry*, 83, 93-107.
- LYON, S. W., GRABS, T., LAUDON, H., BISHOP, K. H., SEIBERT, J. (2011): Variability of groundwater levels and total organic carbon in the riparian zone of a boreal catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116, 1-12.
- MANN, H.B. (1945): Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 3, 245–259.
- MATSUBARA, H., MORIMOTO, S., SASE, H., OHIZUMI, T., SUMIDA, H., NAKATA, M., UEDA, H. (2009): Long-Term Declining Trends in River Water pH in Central Japan. *Water, Air, & Soil Pollution*, 200, 253-265.

- MIKULKA, J., KNEIFELOVÁ, M. (2004): Rizika kontaminace potravin a pitné vody herbicidy. Vědecký výbor fytosanitární a životního prostředí, Praha, 11 s.
- MONTEITH, D. T., STODDARD, J. L., EVANS, C. D., DE WIT, H. A., FORSIUS, M., HØGÅSEN, T., WILANDER, A., SKJELKVÅLE, B. L., JEFFRIES, D. S., VUORENMAA, J., KELLER, B., KOPÁČEK, J., VESELÝ, J. (2007): Dissolved organic carbon trends resulting from changes in atmospheric deposition chemistry. *Nature Letters*, 450, 537-541.
- NAVRÁTILOVÁ, D. (2020): Změny geochemismu povrchových vod ve vybraných povodích Krušných hor. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha, 132 s.
- NEAL, C., REYNOLDS, B., ROWLAND, P., NORRIS, D., KIRCHNER, J. W., NEAL, M., SLEEP, D., LAWLOR, A., WOODS, C., THACKER, S., GUYATT, H., VINCENT, C., HOCKENHULL, K., WICKHAM, H., HARMAN, S., ARMSTRONG, L. (2012): High-frequency water quality time series in precipitation and streamflow: From fragmentary signals to scientific challenge. *Science of the Total Environment*, 434, 1-12.
- NEWSON, R. (2002): Parameters behind “Nonparametric” Statistics: Kendall's tau, Somers' D and Median Differences. *Stata Journal*, 2, 1, 45-64.
- PEARSON, K. (1895): Notes on Regression and Inheritance in the Case of Two Parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240-242.
- PIETRUSZYŃSKI, L., CIEŚLIŃSKI, R. (2019): The impact of hydrometeorological events on the state of the urban river quality. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 26(3), 521-533.
- PITTER, P. (2005): *Hydrochemie*. VŠCHT, Praha, 555 s.
- PROKŠ, M. (2010): Odtokový režim v povodí Hamerského potoka se zaměřením na reakci pH vody ve vybraných povodňových epizodách. Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha.
- PTAK, M., SOJKA, M., KAŁUŻA, T., CHOIŃSKI, A., NOWAK, B. (2019): Long-term water temperature trends of the Warta River in the years 1960–2009. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 19, 441-451.
- PUCZKO, K., JEKATIERYN CZUK-RUDCZYK, E. (2020): Extreme Hydro-Meteorological Events Influence to Water Quality of Small Rivers in Urban Area: A Case Study in Northeast Poland. *Scientific Reports*, 10, 1.
- QUITT, M. (1971): Klimatické oblasti Československa. *Studia geografica* 16., Academia, Praha.
- ROSTAMI, S., HE, J., HASSAN, Q. (2018): Riverine water quality response to precipitation and its change. *Environments*, 5, článek 8.

ROSTAMI, S., HE, J., HASSAN, Q. (2020): Water quality response to river flow regime at three major rivers in Alberta. *Water Quality Research Journal*, 55, 1, 79-92.

SAPAČ, K., VIDMAR, A., BEZAK, N., RUSJAN, S. (2020): Lag Times as Indicators of Hydrological Mechanisms Responsible for NO₃-N Flushing in a Forested Headwater Catchment. *Water*, 1092, 1-13.

SEN, P. K. (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 324, 1379-1389.

SHAPIRO, S. S., WILK, M. B. (1965): An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52, 591-611.

SHRESTHA, S., KAZAMA, F. (2007): Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22, 4, 464-475.

SIMEONOV, V., STRATIS, J. A., SAMARA, C., ZACHARIADIS, G., VOUTSA, D., ANTHEMIDIS, A., SOFONIOU, M., KOUIMTZIS, T. (2003): Assessment of the Surface Water Quality in Northern Greece. *Water Research*, 37, 4119-4124.

SPEARMAN, C. (1904): The proof and measurement of association between two things. *American Journal of Psychology*, 15, 1, 72-101.

ŠABRŠULOVÁ, A. (2018): Kinetika vybraných herbicidů a jejich biodegradace v půdním a vodním prostředí. *Bakalářská práce. Katedra ekologie PřF UK, Praha*, 47 s.

ŠAJNAROVÁ, L. (2021): Vliv hydrologických extrémů na kvalitu povrchových vod v pramenných oblastech. Aplikace v modelovém povodí horní Rolavy. *Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha*, 81 s.

ŠILHÁNOVÁ, V. (2007): Ekomorfologický monitoring říční sítě v povodí Klíčavy. *Bakalářská práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha*, 49 s.

ŠILHÁNOVÁ, V. (2009): Ekomorfologický průzkum vodních toků v chráněných oblastech - aplikace na povodí Klíčavy. *Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha*, 111 s.

ŠPRINGEROVÁ, P. (2019): Změny koncentrací organického uhlíku v povrchových vodách v pramenných oblastech. *Diplomová práce. Katedra fyzické geografie a geoekologie PřF UK, Praha*, 147 s.

THEIL, H. (1950): A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Sciences*, 53, 386-392.

- TOLER, L. G. (1965): Relation between chemical quality and water discharge in Spring Creek, Southwestern Georgia. US Geological Survey Professional Paper, 525, 209-213.
- ÚNMZ (2017): ČSN 75 7221. Kvalita vod – Klasifikace kvality povrchových vod. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 17 s. Třídící znak 75 7221.
- VAN VLIET, M. T. H., ZWOLSMAN, J. J. G. (2008): Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *Journal of Hydrology*, 353, 1–17.
- VIALLE, C., SABLİYROLLES, C., LOVERA, M., JACOB, S., HUAU, M. C., MONTREJAUD-VIGNOLES, M. (2011): Monitoring of water quality from roof runoff: Interpretation using multivariate analysis. *Water Research*, 45, 12, 3765-3775.
- VIDON, P., CARLETON, W., MITCHELL, M. J. (2014): Spatial and temporal variability in stream dissolved organic carbon quantity and quality in an Adirondack forested catchment. *Applied Geochemistry*, 46, 10-18.
- WANG, S., LU, A., DANG, S., CHEN, F. (2016): Ammonium nitrogen concentration in the Weihe River, central China during 2005–2015. *Environmental Earth Sciences*, 75, 512, 1-18
- WHITEHEAD, P. G., WILBY, R. L., BATTARBEE, R. W., KERNAN, M., WADE, A. J. (2009): A review of the potential impacts of Climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 1, 101-123.
- WIEJACZKA, Ł. (2015): Reservoir Triggered Distortion in the Relation between Water Conductivity and River Temperature. *Water Resources*, 42, 362-370.
- WORRALL, F., BURT, T. P. (2008): The effect of severe drought on the dissolved organic carbon (DOC) concentration and flux from British rivers. *Journal of Hydrology*, 361, 262-274.
- WYMORE, A. S., LEON, M. C., SHANLEY, J. B., MCDOWELL, W. H. (2019): Hysteretic Response of Solutes and Turbidity at the Event Scale Across Forested Tropical Montane Watersheds. *Frontiers in Earth Sciences*, 7, článek 126.
- ZUECCO, G., PENNA, D., BORGA, M. (2018): Runoff generation in mountain catchments: Longterm hydrological monitoring in Rio Vauz Catchment, Italy. *Cuadernos de investigacion geografica*, 44, 2, 397-428.
- ZUECCO, G., PENNA, D., BORGA, M., VAN MEERVELD, H.J. (2016): A versatile index to characterize hysteresis between hydrological variables at the runoff event timescale. *Hydrological Processes*, 30, 1449 – 1466.

8.1. Internetové a další zdroje

ARCDATA PRAHA: Arc ČR 4.0 – Geografické informační systémy – ARCDATA [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-4-0>

CLIMATE-DATA.ORG: Climate diagrams: Lány, Nové Strašecí, Zbečno, [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://en.climate-data.org/>

ČGS (2022a): Geovědní mapy 1 : 50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 28.7.2022]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geocr50/>

ČGS (2022b): Půdní mapa 1 : 50 000 [online]. Praha: Česká geologická služba [cit. 28.7.2022]. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/pudy/>

ČHMÚ: Denní data dle zákona 123/1998 Sb. [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/historicka-data/hydrologie/denni_data/denni-data-dle-z.-123-1998-Sb

ČSÚ (2022): Databáze demografických údajů za obce ČR [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/databaze-demografickych-udaju-za-obce-cr>

EEA (2016): Trends in water temperature of large European rivers and lakes. [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz>

EEA (2018): Corine Land Cover – Copernicus Land Monitoring Service [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

EKOLOGIE (2010): Ekologie se chystá modernizovat skládku v Rynholci [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://www.skladka-ekologie.cz/?page=3>

IPCC (2001): TAR Climate Change 2001. [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/report/ar3/wg1/>

IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

POVODÍ VLTAVY (2008): Vodní díla a nádrže [online]. [cit. 28.7.2022]. Dostupné z: <https://www.pvl.cz/vodohospodarske-informace/vodni-dila/vodni-dila-a-nadrze>

RAKOVNICKÝ DENÍK (2012): Klíčavu ohrozily pesticidy, případ vyšetřuje kriminálka [online]. [cit. 26. 7. 2022]. Dostupné z: <https://rakovnicky.denik.cz/zlociny-a-soudy/klicavu-ohrozily-pesticidy-pripad-vysetruje-kriminalka-20121119.html>

VÝZKUMNÝ ÚSTAV VODOHOSPODÁŘSKÝ T. G. MASARYKA (2022): Digitální báze vodohospodářských dat DIBAVOD [online]. [cit. 26. 7. 2022] Dostupné z: <https://www.dibavod.cz/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Základní popisné charakteristiky hysterezní smyčky.....	30
Obr. 2: Parametry pro výpočet HI_{mid}	31
Obr. 3: Povodí Klíčavy.....	35
Obr. 4: Krajinový pokryv zájmové oblasti	38
Obr. 5: Poloha meteorologických stanic v rámci povodí a klimadiagramy pro jednotlivé stanice	39
Obr. 6: Poloha profilů v rámci povodí.....	42
Obr. 7: Vývoj počtu tropických dnů ve sledovaném území mezi lety 1996 a 2020.....	44
Obr. 8: Vývoj průměrných ročních teplot ve sledovaném území mezi lety 1996 a 2020	45
Obr. 9: Vývoj ročních úhrnů srážek mezi lety 1996-2020 a průměrný relativní příspěvek měsíců k celkovému ročnímu úhrnu srážek pro dvě období.....	45
Obr. 10: Podíl dnů se srážkovými úhrny přesahujícími 20 mm na celkovém počtu dnů se srážkami a podíl úhrnů z těchto dnů na celkovém ročním úhrnu	46
Obr. 11: Úhrn sněhových srážek za roky 1996-2020 a relativní příspěvek měsíců k celkovému úhrnu sněhových srážek za dvě období.	46
Obr. 12: Počet dnů se sněhovou pokrývkou mezi lety 1996 a 2020 a srovnání dvou období z hlediska trvání sněhové pokrývky za měsíce.....	47
Obr. 13: Q_a na profilech Lány-Běleč, Lány-městečko a Klíčava pod vodárnou.	47
Obr. 14: Příspěvek měsíců k odtoku pro dvě období na profilech Lány-městečko, Lány-Běleč, Klíčava pod vodárnou.....	48
Obr. 15: Roční chod teplot vody na profilech MD, LAN a PVN.....	50
Obr. 16: Vývoj průměrných ročních teplot vody na profilech MD, LAN a PVN.....	50
Obr. 17: Vývoj teploty vody na profilu MD v jarních měsících	50
Obr. 18: Vývoj ročních průměrů konduktivity	51
Obr. 19: Krabicové diagramy pro hodnoty pH na profilu MD při nízkých, středních a vysokých průtocích na profilech PVN a LAN.....	52
Obr. 20: Hodnoty konduktivity podle seřazených průtoků na profilu PVN.....	52
Obr. 21: Lineární regrese závislosti konduktivity na průtoku na profilu PVN.	52
Obr. 22: Vývoj ročních průměrů pH na profilech MD, LAN a PVN.....	53
Obr. 23: Krabicové diagramy pro pH na profilu MD při nízkých, středních a vysokých průtocích	53
Obr. 24: Roční vývoj koncentrací rozpuštěného kyslíku na profilech MD, LAN a PVN.....	54
Obr. 25: Vývoj průměrných ročních koncentrací O_2 na profilech MD, LAN a PVN	55
Obr. 26: Roční vývoj koncentrací $N-NO_3^-$ na profilech MD, LAN, PVN a PZR.....	55
Obr. 27: Vývoj průměrných ročních koncentrací dusičnanů pro všechny profily	56
Obr. 28: Lineární regrese závislosti koncentrace dusičnanů na průtoku na profilu MD.....	56
Obr. 29: Koncentrace dusičnanů podle seřazených průtoků na profilu PZR.	57
Obr. 30: Vývoj průměrných ročních koncentrací $N-NH_4^+$ na profilech MD, LAN a PVN.....	57

Obr. 31: Krabicové diagramy pro koncentrace N-NH_4^+ na profilech MD a LAN při nízkých, středních a vysokých průtocích.....	58
Obr. 32: Vývoj průměrných ročních koncentrací TN pro profily MD a PVN	59
Obr. 33: Koncentrace TN podle seřazených průtoků a krabicové diagramy pro koncentrace TN při nízkých, středních a vysokých průtocích na profilu MD.....	59
Obr. 34: Lineární regrese závislosti koncentrace TN na průtoku na profilu MD.....	60
Obr. 35: Vývoj průměrných ročních koncentrací P-PO_4^- pro profily MD, LAN a PVN.....	61
Obr. 36: Vývoj průměrných ročních koncentrací TP pro profily MD, LAN, PVN a PZR	61
Obr. 37: Krabicové diagramy pro koncentrace P-PO_4^- při nízkých, středních a vysokých průtocích na profilu MD a PVN.....	62
Obr. 38: Lineární regrese závislosti koncentrace TP na průtoku na profilu PZR.....	62
Obr. 39: Koncentrace TP podle seřazených průtoků na profilech PZR a LAN	63
Obr. 40: Vývoj průměrných ročních koncentrací BSK_5 pro profily MD, LAN a PVN	63
Obr. 41: Krabicové diagramy pro koncentrace BSK_5 a CHSK_{Cr} při nízkých, středních a vysokých průtocích na profilu MD.....	64
Obr. 42: Lineární regrese závislosti koncentrace TOC na průtoku na profilu MD	65
Obr. 43: Závislost průměrné koncentrace TOC zprůměrované za březen a duben na průměrné teplotě zprůměrované za předchozí leden a únor pro roky 2009-2020 na profilu MD	65
Obr. 44: Vývoj průměrných ročních koncentrací acetochloru ESA a alachloru ESA na profilu MD...	66
Obr. 45: Krabicové diagramy pro koncentrace acetochloru ESA a alachloru ESA při nízkých, středních a vysokých průtocích na profilu MD.....	67
Obr. 46: Lineární regrese závislosti koncentrace acetochloru ESA a alachloru ESA na průtoku na profilu MD.	67
Obr. 47: Vývoj koncentrací metolachloru ESA a metolachloru OA na profilu MD	69

Seznam tabulek

Tab. 1: Zařazení zájmové oblasti do geomorfologického členění ČR.....	37
Tab. 2: Zastoupení kategorií krajinného pokryvu	37
Tab. 3: Měrné profily geochemismu v povodí Klíčavy.....	41
Tab. 4: Měrné profily průtoků v povodí Klíčavy	41
Tab. 5: Přehled výsledných korelačních koeficientů.....	49
Tab. 6: Teplotní charakteristiky profilů za sledované období.	49
Tab. 7: Shrnutí charakteristik hodnot konduktivity.....	51
Tab. 8: Shrnutí hodnot pH.....	53
Tab. 9: Shrnutí koncentrací dusičnanů	55
Tab. 10: Shrnutí koncentrací N-NH_4^+	58

Tab. 11: Shrnutí koncentrací TN	58
Tab. 12: Shrnutí koncentrací P-PO ₄ ⁻ a TP	60
Tab. 13: Shrnutí koncentrací TOC, CHSK _{Cr} a BSK ₅	64
Tab. 14: Koeficienty korelace vybraných metabolitů herbicidů s průtokem.....	68

Seznam příloh

Příloha 1: Výsledky Mann-Kendallových testů pro parametry geochemismu vod a hydroklimatické charakteristiky za sledované období.....	89
Příloha 2: Zařazení parametrů na všech profilech do skupin jakosti podle ČSN 75 7221	89
Příloha 3: Vývoj teploty vody na profilu MD v zimních měsících	90
Příloha 4: Vývoj teploty vody na profilu MD v podzimních měsících.	90
Příloha 5: Vývoj teploty vody na profilu MD v letních měsících	90

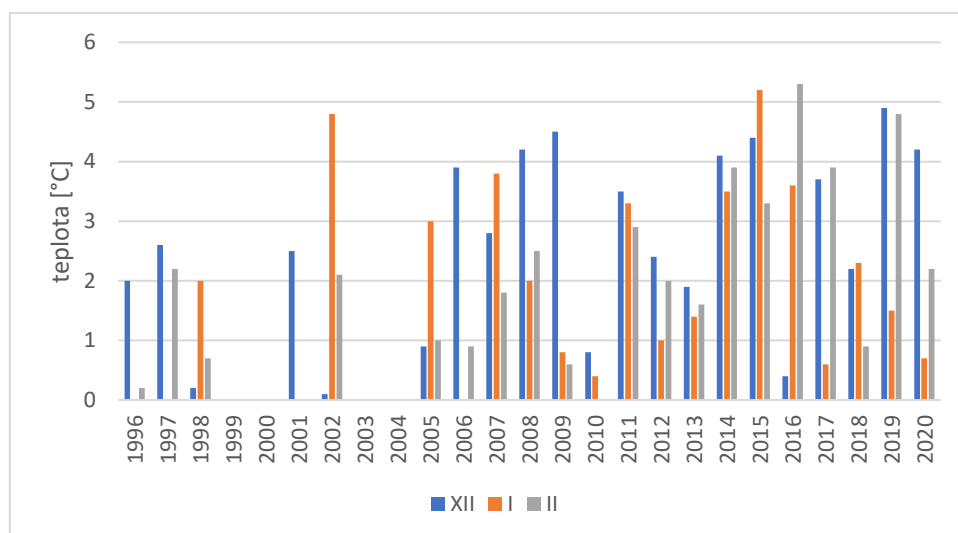
Přílohy

Profil	MD		LAN***		PVN		PZR	
Stat	τ	Sen	τ	Sen	τ	Sen	τ	Sen
Srážky	0,013	0,037	0,013	0,037	0,013	0,037	0,013	0,037
T _{avg}	0,457	0,061	0,457	0,061	0,457	0,061	0,457	0,061
Q _a	-0,373	-0,003	-0,407	-0,003	-0,448	-0,003	-0,373	-0,003
T**	0,195	0,071	x	x	0,123	0,063	x	x
EC	0,407	0,289	-0,784*	-0,38*	x	x	x	x
pH	0,303	0,006	0,333*	0,015*	x	x	x	x
O ₂ ⁻	-0,237	-0,016	-0,500*	-0,123*	-0,029	-0,004	x	x
N-NO ₃ ⁻	-0,116	-0,007	-0,786*	-0,103*	-0,010	-0,001	0,011	0,001
N-NH ₄ ⁺	-0,259	-0,002	-0,571*	-0,015*	-0,306	-0,001	x	x
TN	-0,099	-0,013	0,089*	0,004*	-0,177	-0,021	x	x
P-PO ₄ ⁻	0,286	0,002	-0,155*	-0,002*	0,276	0,006	x	x
TP	-0,276*	-0,001*	-0,644*	-0,004*	0,153	0,003	0,181	0,004
CHSK _{cr}	0,250	0,187	x	x	-0,067	-0,111	x	x
BSK ₅	-0,586	-0,053	-0,571*	-0,280*	-0,505	-0,042	x	x
TOC	-0,242	-0,079	-0,167*	-0,125*	-0,354	-0,091	x	x

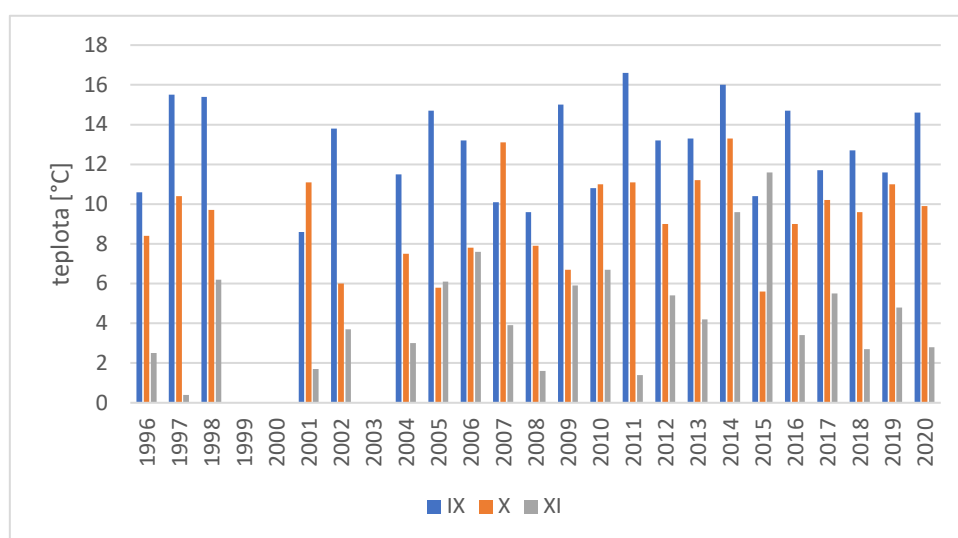
Příloha 1: Výsledky Mann-Kendallových testů pro parametry geochemismu vod a hydroklimatické charakteristiky za sledované období. Červená barva značí růst, zelená pokles. Tmavé odstíny, stejně jako tučný font, značí statisticky významnou změnu ($\alpha = 0,05$). Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p. * značí sledované období kratší 10 let, x značí chybějící data či sledované období kratší 8 let. ** V případě teploty (sezonního parametru) byly vynechány roky s méně než 12 měřeními. *** U profilu LAN mezi lety 2006 a 2012 chybí data, od roku 2012 jsou měřena nepravidelně jen několikrát za rok

Profil	MD			LAN			PVN			PZR		
Koeficient	Pr	Po	Clk	Pr	Po	Clk	Pr	Po	Clk	Pr	Po	Clk
T	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
EC	II	II	II	II	II	II	II	II	II	x	x	x
pH	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
O ₂ ⁻	I	I	I	I	I	I	I	I	I	x	x	x
N-NO ₃ ⁻	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
N-NH ₄ ⁺	I	I	I	I	I	I	I	I	I	x	x	x
TN	I	I	I	I	I	I	I	I	I	x	x	x
P-PO ₄ ⁻	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
TP	II	II	II	II	II	II	II	III	II	II	III	II
CHSK _{Cr}	I	II	II	II	II	II	I	II	II	x	x	x
BSK ₅	II	I	I	II	I	II	I	I	I	x	x	x
TOC	III	II	II	III	II	II	II	II	II	x	x	x
ac. ESA	II	I	I	x	x	x	x	x	x	x	x	x
al. ESA	II	I	II	x	x	x	x	x	x	x	x	x
met. ESA	I	I	I	x	x	x	x	x	x	x	x	x
met. OA	I	I	I	x	x	x	x	x	x	x	x	x

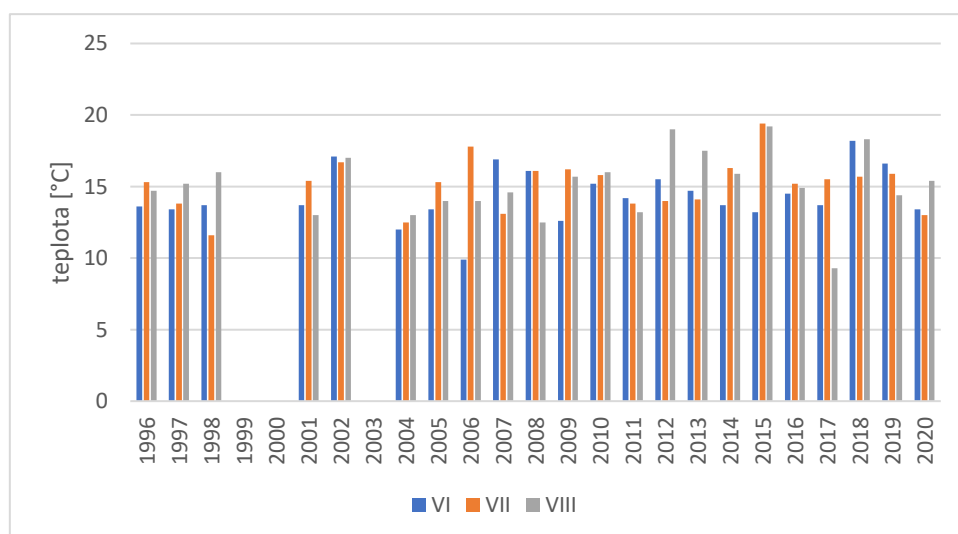
Příloha 2: Zařazení parametrů na všech profilech do skupin jakosti podle ČSN 75 7221. Pr – první rok, Po – poslední rok, Clk – průměr za celé období. T = teplota, EC = konduktivita. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Příloha 3: Vývoj teploty vody na profilu MD v zimních měsících. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Příloha 4: Vývoj teploty vody na profilu MD v podzimních měsících. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.



Příloha 5: Vývoj teploty vody na profilu MD v letních měsících. Zdroj dat: Povodí Vltavy, s. p.