

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Jan Krejčí

Univerzita Pardubice  
Fakulta Chemicko-technologická

Monitorování obsahu dusičnanů a fosforečnanů v povrchových vodách  
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan Krejčí**  
Osobní číslo: **C21303**  
Studijní program: **B0588A130001 Chemie a technologie ochrany životního prostředí**  
Téma práce: **Monitorování obsahu dusičnanů a fosforečnanů v povrchových vodách**  
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

## Zásady pro vypracování

- Vypracujte literární rešerši týkající se působení zvýšeného výskytu dusičnanů a fosforečnanů v povrchových vodách. Zaměřte se na možné zdroje výše uvedených kontaminantů a jejich vliv na vodní floru a faunu.
  - V rámci experimentální části práce zvolte dostupné vodní zdroje na území města Pardubic a blízkého okolí k monitoringu výskytu obsahů dusičnanů a fosfátů. Z těchto vytypovaných míst pak odebírejte vzorky vod ve vhodných časových intervalech. Ke stanovení dusičnanů využijte spektrofotometricky sledovanou simultánní mikrotitraci, fosfáty analyzujte pomocí průtokového zařízení SAN?? SYSTEM (Skalar).
  - Zjištěné výsledky kriticky zhodnoťte.
  - Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 7/2019 "Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací" v platném znění.
-

Rozsah pracovní zprávy:  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Jaromíra Chýlková, CSc.**  
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **26. ledna 2024**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2024**

L.S.

---

**prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.**  
děkan

---

**doc. Ing. Anna Krejčová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 26. ledna 2024

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Práci s názvem Monitorování obsahu dusičnanů a fosforečnanů v povrchových vodách jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s §47b zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 21. 6. 2024

Jan Krejčí v. r.

## **Poděkování**

Předně bych rád poděkoval vedoucí práce paní prof. Ing. Jaromíře Chýlkové, CSc. za čas, trpělivost a poskytnuté rady související s teoretickou i praktickou částí mé bakalářské práce. Dále děkuji paní laborantce Janě Hrnčířové za zajištění potřebných roztoků, pomůcek a vzorků studničních vod. Za poskytnutí vzorku studniční vody také děkuji paní doc. Ing. Anně Krejčové, Ph.D. V neposlední řadě poděkování náleží mé rodině, která mě celou dobu podporovala a zajistila mi příznivé podmínky pro mé studium.

## **ANOTACE**

Tato bakalářská práce se věnuje monitoringu obsahů dusičnanů, amonných iontů a fosforečnanů ve vytypovaných povrchových vodách na území Pardubic a přilehlého okolí, ke kterým byly přidány i vybrané studniční vody. Odběry vzorků vod probíhaly v časovém období ve třech sériích od listopadu roku 2023 až do dubna 2024. Teoretická část je zaměřena na problematiku spojenou s původem a následky vyšších koncentrací těchto látek ve vodách. V praktické části je uvedena krátká charakteristika odběrových míst a použitých analytických metod. Konkrétně se jednalo o využití simultánní spektrofotometricky sledované neutralizační mikrotitrace a kontinuální průtokové analýzy (CFA). Naměřené hodnoty byly kriticky zhodnoceny a porovnány s platnými právními předpisy pro povrchové a pitné vody. Bylo zjištěno, že některé vzorky nespĺňují mezní hodnoty obsahu analyzovaných látek.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

eutrofizace, dusičnany, fosforečnany, povrchové vody

## **TITLE**

Monitoring the content of nitrates and phosphates in surface waters

## **ANNOTATION**

This bachelor's thesis is devoted to the monitoring of nitrate, ammonium ion and phosphate contents in selected surface waters in Pardubice and the surrounding area, to which selected well waters were added. Water sampling took place in three series over a period of time from November 2023 to April 2024. The theoretical part is focused on issues related to the origin and consequences of higher concentrations of these substances in water. In the practical part, a brief description of the sampling points and the analytical methods used is given. Specifically, it involved the use of simultaneous spectrophotometrically monitored neutralization microtitration and continuous flow analysis (CFA). The measured values were critically evaluated and compared with the valid legal regulations for surface and drinking water. It was found that some samples do not meet the limit values for the content of the analyzed substances.

## **KEYWORDS**

eutrophication, nitrates, phosphates, surface water

# **OBSAH**

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK .....	9
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK .....	10
ÚVOD .....	11
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	12
1.1. Dusík .....	12
1.2. Dusičnany .....	13
1.3. Fosfor .....	14
1.4. Fosforečnany .....	15
1.5. Eutrofizace .....	17
1.6. Opatření proti eutrofizaci .....	20
1.6.1. Nitrátová směrnice .....	20
1.6.2. Snížení obsahu fosforu v detergitech .....	21
1.6.3. Terciální dočišťování odpadních vod .....	22
2 PRAKTICKÁ ČÁST .....	24
2.1. Odběrové lokality .....	24
2.1.1. Jezero Bajkal .....	24
2.1.2. Jarkovského jezero .....	25
2.1.3. Bohdanečský rybník .....	25
2.1.4. Bylanka .....	25
2.1.5. Labe .....	25
2.1.6. Slepé rameno – Cihelna .....	26
2.1.7. Rybník Hrádek .....	26
2.1.8. Matiční jezero .....	26
2.1.9. Chrudímka .....	26
2.1.10. Slepé rameno – Rosice nad Labem .....	27
2.1.11. Na podkově – Nemošice .....	27

2.1.12. Spojilský odpad .....	28
2.1.13. Studniční vody .....	28
2.2. Odběry a uchovávání vzorků .....	29
2.3. Použité chemikálie a roztoky .....	29
2.4. Použité metody a přístroje.....	30
2.4.1. Stanovení dusičnanů.....	30
2.4.2. Stanovení fosforečnanů .....	32
3 VÝSLEDKY A DISKUZE.....	37
3.1. Povrchové vody.....	37
3.2. Studniční vody .....	44
4 ZÁVĚR.....	46
POUŽITÁ LITERATURA.....	47

## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obr. 1 – Cyklus dusíku .....	12
Obr. 2 – Schéma nitrifikace .....	13
Obr. 3 – Distribuce orthofosfátových forem v závislosti na pH při 25 °C .....	16
Obr. 4 – Příklady nejpoužívanějších polyfosforečnanů .....	16
Obr. 5 – Cyklus fosforečnanů .....	17
Obr. 6 – Vodní květ na hladině slepého ramene Na podkově .....	18
Obr. 7 – Zakroucená vlákna sinice <i>Dolichospermum flos-aquae</i> .....	19
Obr. 8 – Kolonie zelených řas rodu <i>Dyctiosphaerium</i> a <i>Dimorphococcus</i> .....	19
Obr. 9 – Křemité schránky rozsivky rodu <i>Cymbella</i> .....	19
Obr. 10 – Zranitelné oblasti na území České republiky .....	21
Obr. 11 – Mapa odběrových lokalit povrchových vod .....	24
Obr. 12 – Mapa odběrových lokalit eutrofizovaných vod .....	27
Obr. 13 – Mapy znázorňující umístění zdrojů odebraných vzorků studničních vod .....	28
Obr. 14 – Aparatura simultánní spektrofotometricky sledované neutralizační mikrotitrace .....	30
Obr. 15 – Zařízení Ultra Clear TP UV UF TM .....	32
Obr. 16 – Analyzátor Skalar San <sup>++</sup> .....	33
Obr. 17 – Graf znázorňující záznam analýzy vzorků povrchových vod .....	35
Obr. 18 – Graf znázorňující záznam analýzy vzorků studničních vod .....	36
Graf 1 – Porovnání obsahu amonných iontů z jednotlivých odběrů povrchových vod .....	40
Graf 2 – Porovnání obsahu dusičnanů z jednotlivých odběrů povrchových vod .....	41
Graf 3 – Porovnání obsahu fosforečnanů z jednotlivých odběrů povrchových vod .....	42
Graf 4 – Obsah dusičnanů ve vzorcích studničních vod .....	44
Graf 5 – Obsah fosforečnanů ve vzorcích studničních vod .....	45
Tabulka 1: Oxidační stupně dusíku ve vodném prostředí .....	13
Tabulka 2: Výsledky rozborů vzorků povrchových vod z první série odběrů dne 24. 11. 2023 .....	37
Tabulka 3: Výsledky rozborů vzorků povrchových vod z druhé série odběrů dne 10. 03. 2024 .....	38
Tabulka 4: Výsledky rozborů vzorků povrchových vod ze třetí série odběrů dne 21. 04. 2024 .....	39
Tabulka 5: Výsledky rozborů vzorků vod s významným projevem eutrofizace .....	43

## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

anorg.	anorganický
ATP	Adenosintrifosfát
BPEJ	bonitová půdně ekologická jednotka
CFA	kontinuální průtoková analýza
č.	číslo
ČR	Česká republika
DNA	Deoxyribonukleová kyselina
EHS	Evropské hospodářské společenství
ES	Evropské společenství
EU	Evropská unie
MT	monitorování celkového uhlíku
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Amoniakální dusík
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Dusičnanový dusík
obr.	obrázek
p. a.	pro analýzu
PET	polyethylentereftalát
PPH	povinné požadavky na hospodaření
RNA	Ribonukleová kyselina
Sb.	Sbírký
str.	strana
TOC	celkový organický uhlík
UF	ultrafiltrace
UV	ultrafialové záření

# ÚVOD

Voda pokrývá více než tři čtvrtiny povrchu naší planety, pouze však zhruba 2,5 % tvoří voda sladká. Těla rostlin jsou tvořena až z 90 % touto složkou a těla živočichů ze 60–70 %. Je nezbytná pro veškerý zemský život. Slouží jako živina, smáčedlo, rozpouštědlo a transportní prostředek umožňující průběh všech fyziologických a chemických pochodů <sup>[1]</sup>. V domácnostech je používána na vaření, uklízení, každodenní hygienu. Voda se používá též při výrobě potravin, oblečení, automobilů, na stavbách domů a silnic, k vytápění budov či výrobě elektrické energie. Pokud jde o zemědělství, voda k zalévání plodin může obsahovat rezidua chemických látek, které jsou součástí hnojiv. Po použití se vlivem splachů dešťovými srážkami část této kontaminované vody vrací zpět do vodních útvarů. V řekách, jezerech a mořích se mohou znečišťující látky ukládat prostřednictvím přenosu vzduchem z dopravy a průmyslu. V konečném důsledku je voda, kterou vracíme do přírody, často velmi odlišná od té, kterou z ní čerpáme <sup>[0]</sup>. Z těchto skutečností tedy vyplývá, že nejnáchylnější z hlediska antropogenního znečištění jsou právě vody povrchové.

Povrchové vody jsou vody přirozeně se vyskytující na zemském povrchu, dělí se na stojaté a tekoucí. Povrchové vody jsou charakteristické velkou dynamikou prostředí a změnami v čase. U tekoucího typu vod se toto projevuje prohlubováním koryta toku, rozšiřováním příčného průřezu, erozí, meandry, vyrovnáním dna. U stojatých vod dochází k zarůstání, sedimentaci, hromadění živin. Přirozeným biologickým procesem je stárnutí jezer, kdy vlivem zarůstání a zabahňování se mění v mělčiny a bažiny. Povrchové vody se přirozeně vyskytují na zemském povrchu. Tento charakter neztrácejí, protékají-li přechodně zakrytými úseky, přirozenými dutinami pod zemským povrchem nebo v nadzemních vedeních <sup>[3]</sup>.

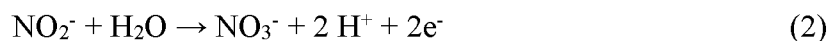
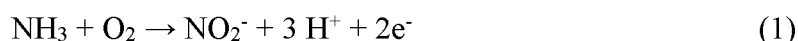
Cílem této práce je provést rešerši problematiky trofizace vod, způsobené nadměrným přísunem živin ve formě dusičnanů a fosforečnanů. Analyzování obsahu vybraných látek ve vytypovaných povrchových vodách. K tomu využít simultánní spektrofotometricky sledovanou neutralizační mikrotitraci, která umožňuje postupné stanovení amonných iontů a následně i dusičnanů. Pro analýzu obsahu fosforečnanů využít kontinuální průtokový analyzátor Skalar San<sup>++</sup>. V konečném kroku kriticky zhodnotit naměřená data a odhadnout případné zdroje stanovovaných látek.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

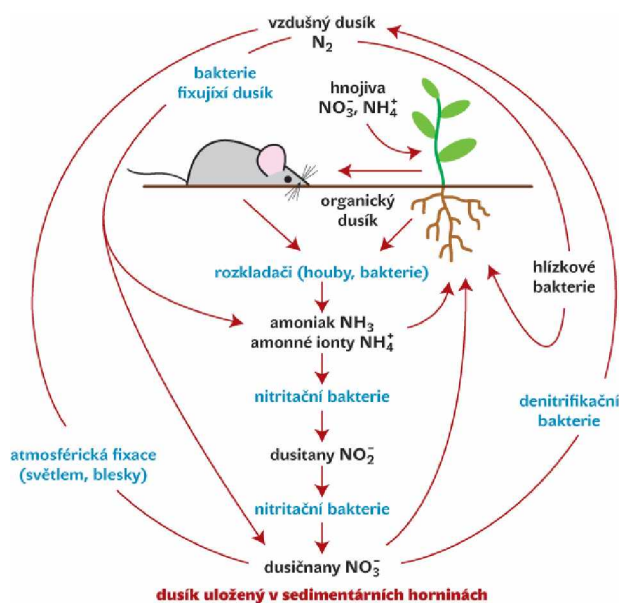
## 1.1. Dusík

Dusík (latinsky *nitrogenium*; značka N) je jedno- až pětimocný prvek s atomovým číslem 7 a relativní atomovou hmotností 14. Jeho oxidační stupeň ve sloučeninách nabývá hodnot od -III po +V. Jedná se o bezbarvý, dvouatomový ( $N_2$ ) nehořlavý plyn, bez chuti a zápachu, tvořící zhruba 78 % zemské atmosféry. Díky své nízké reaktivitě se používá jako ochranný – inertní plyn. V kapalně formě se hojně využívá jako chladicí médium<sup>1, 4)</sup>.

Vyskytuje se v organické hmotě všech živých organismů, ve zvířecích a rostlinných proteinech. Organická hmota odumřelých jedinců, nebo produktů jejich zpracování i produktů metabolismu živočichů a člověka je rozkládaná mikroorganismy. Při tomto rozkladu dochází k uvolňování dusíku ve formě amoniaku. V aerobním prostředí je amoniak oxidován nitrifikačními bakteriemi na dusitany (rovnice 1) a dále na dusičnany (2). Procesy denitrifikační jsou v anaerobním prostředí redukovány na dusičnany a dusitany a ty dále na elementární dusík, oxid dusný a malá část na amoniak<sup>[1, 4, 5]</sup>.



Zredukovat vzdušný dusík do použitelné podoby zvládnou jen některé mikroorganismy. Aby si zajistily přísun fixovaného dusíku, nabízejí některé rostliny těmto mikroorganismům přímo svoje kořeny<sup>[6]</sup>. Neustálý koloběh dusíku v organismech, půdě a atmosféře znázorňuje obr.1.



Obr. 1 – Cyklus dusíku [6]

Dusík se uplatňuje při všech biologických procesech probíhajících v povrchových, podzemních a odpadních vodách a při biologických procesech čištění a úpravy vody. Ve vodném prostředí se nachází v různých oxidačních stupních (viz tabulka 1), převážně však ve formě  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$  a  $\text{NO}_3^-$ . Mezi jednotlivými formami existuje rovnováha, ve které působí biologické procesy několika typů bakterií, příjem a uvolňování z organismů, výměna mezi sedimenty dna a vodním sloupcem [7, 8].

*Tabulka 1: Oxidační stupně dusíku ve vodném prostředí*

Oxidační stupeň	Forma výskytu
-III	amoniakální dusík ( $\text{NH}_4^+$ , $\text{NH}_3$ ), kyanatany ( $\text{OCN}^-$ ), kyanidy ( $\text{CN}^-$ )
-I	hydroxylamin ( $\text{NH}_2\text{OH}$ )
0	elementární dusík ( $\text{N}_2$ )
+I	oxid dusný ( $\text{N}_2\text{O}$ )
+III	dusitanový dusík ( $\text{N-NO}_2^-$ )
+V	dusičnanový dusík ( $\text{N-NO}_3^-$ )

## 1.2. Dusičnany

Dusičnany jsou soli kyseliny dusičné  $\text{HNO}_3$ , snadno rozpustné ve vodě [1]. Jsou běžnou součástí povrchových i podzemních vod, odkud je rostliny čerpají pro svůj růst. V půdě je základním zdrojem dusičnanů proces zvaný nitrifikace, jemuž předchází několik fází přeměn. Na začátku je organický materiál bohatý na dusík. Aby mohly rostliny tuto formu dusíku využít, musí organický materiál nejdříve podstoupit amonifikaci, kdy mikroorganismy mění dusík v půdním organickém materiálu na dusík amoniakální ( $\text{NH}_4^+$ ), který mohou rostliny dále absorbovat kořeny. V teplé, dobře provzdušněné půdě bakterie rychle přeměňují amoniakální dusík nejdříve na dusitany ( $\text{NO}_2^-$ ) a následně na dusičnany ( $\text{NO}_3^-$ ). Tento děj je schematicky shrnut na obr. 2. Rostliny ochotně přijímají dusičnany stejně jako amoniakální dusík. Rozkladem rostlinných těl se organický dusík dostává zpět do vody a půdy [9, 10].



*Obr. 2 – Schéma nitrifikace*

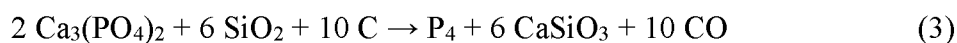
Dále mohou být dusičnany přirozeně produkovány při bouřce vlivem blesků. Při elektrickém výboji dochází ke vzniku oxidů dusíku, které jsou následně absorbovány dešťovou vodou. Také pocházejí i z antropogenních zdrojů. Člověk svojí činností výrazně zvyšuje obsah dusičnanů v půdě a vodě, který mnohdy několikanásobně převyšuje jeho přípustnou koncentraci, což má negativní důsledky na organismus <sup>[11, 12]</sup>. V České republice existuje Vyhláška č. 252/2004 Sb. (*Vyhláška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody*), která udává nejvyšší mezní hodnotu dusičnanů v pitné vodě, a to  $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  <sup>[13]</sup>.

Dusičnany také mohou vznikat jako součást výfukových plynů automobilů, jsou vypouštěny z čistíren odpadních vod a z průmyslových procesů. Do krajiny se dostávají i drenážemi, průsaky ze septiků, kanalizací či vypouštěním vod z domácností a chatových oblastí. Významným zdrojem dusičnanů je již několik desetiletí zemědělská činnost, zejména časté používání vysokých dávek dusíkatých hnojiv. Typickými představiteli statkových hnojiv jsou kejda a tekutý podíl po její mechanické separaci (fugát), hnojůvka, močůvka, silážní šťávy, drůbeží trus, hnůj skotu či prasat a koní. Mezi často používaná anorganická hnojiva se řadí například dusičnan draselný  $\text{KNO}_3$  nebo amonný  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Zemědělské plodiny obvykle pro svůj růst nespotřebují veškeré dodané hnojivo. Vlivem eroze zemědělské půdy a splachy dešťovými srážkami, se zbytky hnojiv dále dostávají do povrchových a podzemních vod, čímž může docházet i ke kontaminaci zdrojů pitné vody <sup>[10, 11, 12, 14]</sup>.

### 1.3. Fosfor

Fosfor (z řeckého *fosforos* – světlodárný; značka P) je nekovový prvek s atomovým číslem 15 <sup>[1]</sup>. Má několik krystalových modifikací, ty pak mají různé vlastnosti. Bílý fosfor je bílá voskovitá látka, mimořádně reaktivní. Na vzduchu se sama zapaluje a je velmi toxická. Naopak červený fosfor je tmavě červená látka, netoxická, na vzduchu stálá. Dá se dokonce vyrobit tzv. černý fosfor, který má kovové vlastnosti – vede dobře teplo a elektrický proud. Všechny modifikace fosforu jsou hořlavé. V přírodě se vyskytuje pouze ve sloučeninách. Jeho hlavní surovinou je směsný fosforečnan vápenatý, tvořící minerál apatit  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$  (přičemž X může být F (fluorapatit), OH skupina (hydroxylapatit) nebo Cl (chlorapatit)) <sup>[4, 15]</sup>.

Fosfor se vyrábí vysokoteplotním tavením (cca 1300 °C) fosfátové horniny s pískem a uhlíkem v elektrické obloukové peci. Vznikající fosfor se ve formě P<sub>4</sub> odpařuje a následně kondenzuje pod vodní hladinou jako bílý fosfor (viz souhrnná rovnice 3).



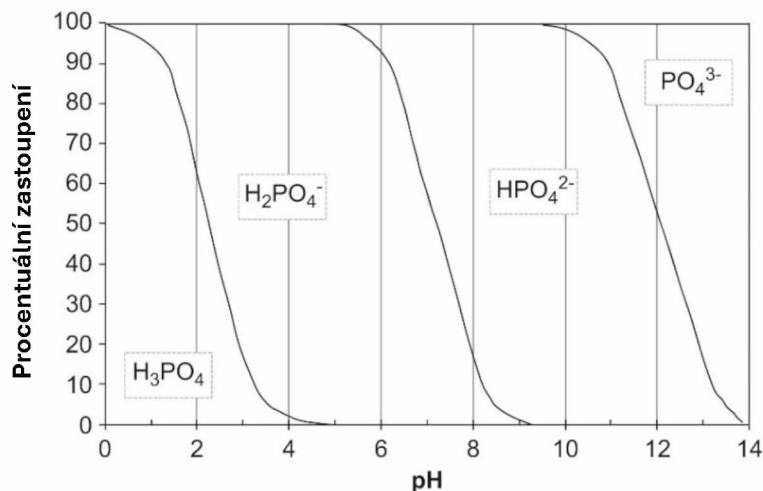
Elementární fosfor se využívá při výrobě polovodičů, v hutnickém průmyslu při výrobě různých slitin, malé množství fosforu se využívá na výrobu sirek. Daleko důležitější jsou sloučeniny, které se z fosforu vyrábějí, hlavně kyselina fosforečná. V životním prostředí je P ve formě fosforečnanu důležitý biogenní prvek, který se ve vodách vyskytuje v organických nebo anorganických sloučeninách [15, 16]. Geochemický koloběh fosforu se liší od koloběhu ostatních hlavních biogenních prvků tím, že chybí jeho atmosférická část. Jedná se spíše o jednosměrný přesun fosforu z hornin do sedimentů. Ani jedna z obvyklých sloučenin fosforu nemůže být přemísťována atmosférou, a proto fosfor s vodou sdílí pouze část jejího koloběhu, a to z litosféry do hydrosféry [17, 18, 19].

## 1.4. Fosforečnany

Fosforečnany, nebo také fosfáty, jsou soli kyseliny fosforečné H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> [1]. Fosfor ve formě fosforečnanu (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) je součástí řady nezbytných molekul jako jsou DNA, nebo RNA. Je nedílnou součástí všech živých organismů. Prostřednictvím adenosintrifosfátu (ATP) se anorganický fosfor podílí na přenosu energie, ve formě fosfolipidů je základním stavebním kamenem buněčných stěn. Přírodním zdrojem fosforečnanů ve vodách je rozpouštění a vyluhování některých minerálů, zejména apatitů, a zvětralých hornin [16].

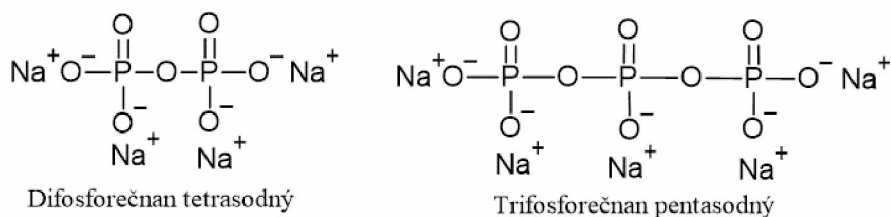
Anorganické formy jsou ortofosforečnany a polyfosforečnany. Nejčastější formou výskytu jsou zmíněné ortofosforečnany, které jsou v přírodní vodě přítomny ve čtyřech různých druzích podle pH: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Přirozeně se vyskytující koncentrace ortofosforečnanu se liší, přičemž koncentrace pozadí se nejčastěji pohybují od 0 do 0,01 mg/l [20].

Níže uvedený graf (obr. 3) znázorňuje distribuci orthofosfátových forem při 25 ° C podle pH a ukazuje, že při jakémkoli pH nejsou přítomny více než dvě orthofosfátové formy.



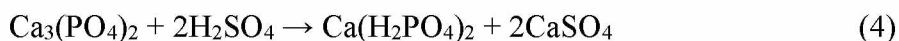
**Obr. 3** – Distribuce orthofosfátových forem v závislosti na pH při 25 °C [20]

Mezi bodové zdroje fosfátů lze zařadit především vypusti kanalizací a čistíren odpadních vod měst, obcí a průmyslových podniků [21]. Mezi nejvýznamnější antropogenní emise fosforečnanů patří polyfosforečnany využívané jako změkčovače vody, kdy na sebe vážou vápenaté a hořečnaté soli. V pracích, čistících a odmašťovacích prostředcích (souhrnně detergentech), se při styku s vodou postupně hydrolyzou rozkládají na orthofosfáty [16, 20]. Příklady nejpoužívanějších polyfosforečnanů uvádí obr. 4.

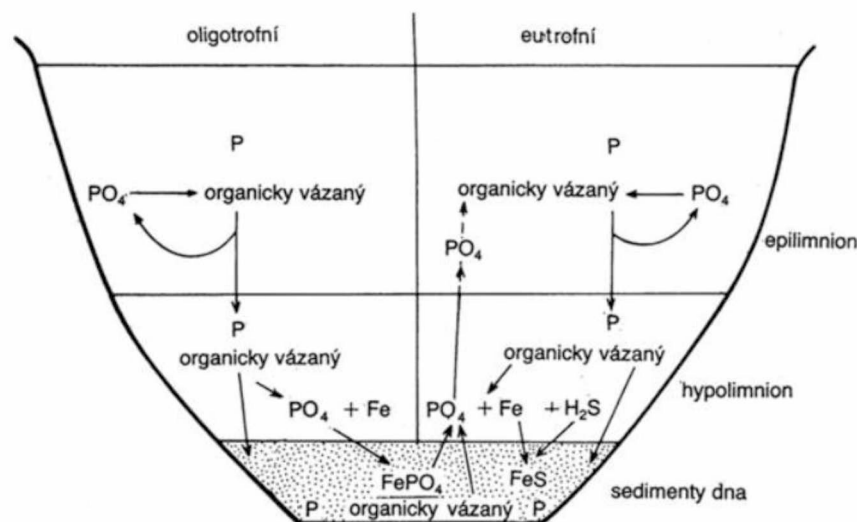


**Obr. 4** – Příklady nejpoužívanějších polyfosforečnanů

Prokazatelně největší znečištění povrchových vod fosfáty způsobuje zemědělská činnost, konkrétně využívání superfosfátového hnojiva. Dihydrogenfosforečnan vápenatý, označován jako superfosfát, se průmyslově vyrábí reakcí apatitu s kyselinou sírovou podle rovnice 4.



Poměrně významné množství fosforečnanů je uloženo ve formě sedimentů na dně vodních útvarů. Na obr. 5 lze porovnat cyklus fosforečnanů ve vodách chudých na živiny (tzv. oligotrofní), ve kterých je převážná část fosforečnanů postupnými přeměnami vázána do sedimentů. Opakem jsou vody bohaté na živiny (eutrofní), v nichž za určitých podmínek může docházet k uvolňování v sedimentech vázaných fosfátů. Mezi nejdůležitější faktory, které ovlivňují uvolňování fosforu ze sedimentu ve většině typů jezer a nádrží patří složení sedimentu, oxidačně-redukční podmínky, teplota a pH. Pozitivní úlohu představují organické látky obsažené v sedimentu, které podporují růst mikroorganismů a nepřímo tak snižují obsah kyslíku a mění oxidačně-redukční podmínky v sedimentu. S poklesem obsahu kyslíku a působením sulfanu pocházejícího z hnilobných procesů, dochází k rozpouštění železa a dalších kovů, vázaných ve sloučeninách s fosforem a fosforečnany jsou uvolňovány do hlubší vrstvy vody (hypolimnion) nad sedimentem [22]. Odtud jsou fosforečnany transportovány do vyšší horní prohřáté a větrem promíchávané vrstvy (Epilimnion), kde společně s fosfáty antropogenního původu mohou v kombinaci s dusičnany způsobovat jev zvaný eutrofizace.



Obr. 5 – Cyklus fosforečnanů [23]

## 1.5. Eutrofizace

Přírodní vody, zejména vody povrchové nejsou prostředím bez života. Biologické osídlení souvisí s úživností tohoto prostředí. Pro mikrobiální populaci je podmínkou jejího rozvoje dostatek substrátu, jímž je u organismů organická hmota [5]. Eutrofizací (z řeckého „eu“ = *hojný* a „trophí“ = *potrava/živná látka*) se rozumí postupné obohacování vody a půdy živinami, zvláště dusičnany a fosfáty. Ve výživově bohatých podkladech může pak významně růst tzv. primární produkce zelených rostlin. Lze rozlišovat přirozenou eutrofizaci, jejíž hlavní

příčinou je splach živin z půdy a rozklad mrtvých organismů, a eutrofizaci antropogenní, kdy je nadměrné obohacování vod živinami způsobeno jako důsledek lidské činnosti. Rychlá, člověkem navozená eutrofizace, vyúsťuje ve vodním prostředí v bouřlivý rozvoj zelených řas, rozsivek a sinic (souhrnně fytoplanktonu). Jejich odumření vede k silnému snížení koncentrace rozpuštěného kyslíku a k ochuzení života ve vodě [24, 25].

Eutrofizace vod je v posledních letech velmi palčivý problém vedoucí až k úplné ztrátě ekologické funkce vodních biotopů. Pro produkci biomasy je optimální, aby byl splněn stechiometrický poměr živin C:N:P = 106:16:1. Ve většině nádrží v ČR je poměr N:P podstatně vyšší než 16, proto je fosfor limitujícím prvkem eutrofizace. Zdrojem uhlíku je rozpuštěný CO<sub>2</sub>. Pro vznik eutrofizované vody je také nutné teplé počasí a dostatek slunečního záření [16, 26].

Zvýšené hladiny živin ve vodách umí nejlépe využít již zmíněný fytoplankton a některé druhy vyšších rostlin. Známým projevem tohoto procesu je masový rozvoj fytoplanktonu v podobě sinicového vodního květu (obr. 6), který na hladinách vod vytváří hustý zelený povlak. Dalším negativním důsledkem zvýšeného výskytu fytoplanktonu je narušení kyslíkového režimu. Z toho vyplývající masové odumírání vzniklé biomasy zapříčiňuje snížení koncentrace kyslíku, který je ve zvýšené míře spotřebováván bakteriemi při rozkladu biomasy řas. Pokles obsahu kyslíku ve vodě může vést k úhynu ryb a bezobratlých organismů. K úhynu vyšších organismů však může dojít také už v prvotních fázích vodního květu, kdy sinice, příp. zelené řasy či rostliny intenzivně rostou, a přitom stoupá hodnota pH a vznikají toxické formy sloučenin dusíku [25].

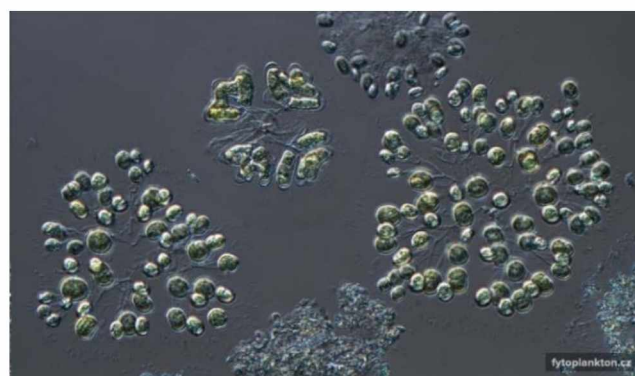


**Obr. 6** – Vodní květ na hladině slepého ramene Na podkově

Složení vodního květu se liší případ od případu a druhové složení se mění také během roku. Nejpočetněji jsou zastoupeny sinice tvořící zakroucená vlákna. Na obr. 7 je představen hlavní zástupce *Dolichospermum flos-aquae*, často tvořící vodní květ. Vliv má také doba zdržení vody v nádrži. Pokud je doba zdržení kratší než generační doba sinic, nemohou se zde sinice přemnožit a v nádrži je nahradí rychleji rostoucí kolonie zelených řas (obr. 8) a jednobuněčné hnědé řasy – rozsivky (obr. 9) [27].



**Obr. 7** – Zakroucená vlákna sinice *Dolichospermum flos-aquae* [28]



**Obr. 8** – Kolonie zelených řas rodu *Dytiosphaerium* a *Dimorphococcus* [28]



**Obr. 9** – Křemité schránky rozsivky rodu *Cymbella* [28]

Dalším problémem je nebezpečí sekundárního znečištění vody organickými látkami. Sinice produkují toxické látky nazývané cyanotoxiny. Jedná se většinou o látky, které se hromadí uvnitř sinic a do vodního prostředí se uvolňují z odumírajících buněk v obdobích, kdy dochází k hromadnému rozkladu vodního květu. S tím je spojeno i zhoršení organoleptických vlastností vody, konkrétně přítomným hnilobným zápachem. Z hygienického hlediska se stává vodní plocha nevhodnou k rekreačním účelům. Při přímém styku s cyanotoxiny dochází k alergickým respiračním reakcím, podráždění a svědění kůže, vedoucí až ke vzniku ekzémů. Případné požití může v krajním případě způsobit poruchy gastrointestinálního traktu [26, 27].

## 1.6. Opatření proti eutrofizaci

V současné době se stále hledají vhodná opatření, která by vedla k potlačení vniku vodního květu. Eutrofizace je spolehlivě omezena, když koncentrace biologicky dostupného fosforu ve vstupech do vodních nádrží nepřesahují hodnotu cca  $0,03 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , tj. běžnou koncentrační úroveň přírodního pozadí v odtoku vody z povodí a ve srážkách <sup>[21]</sup>.

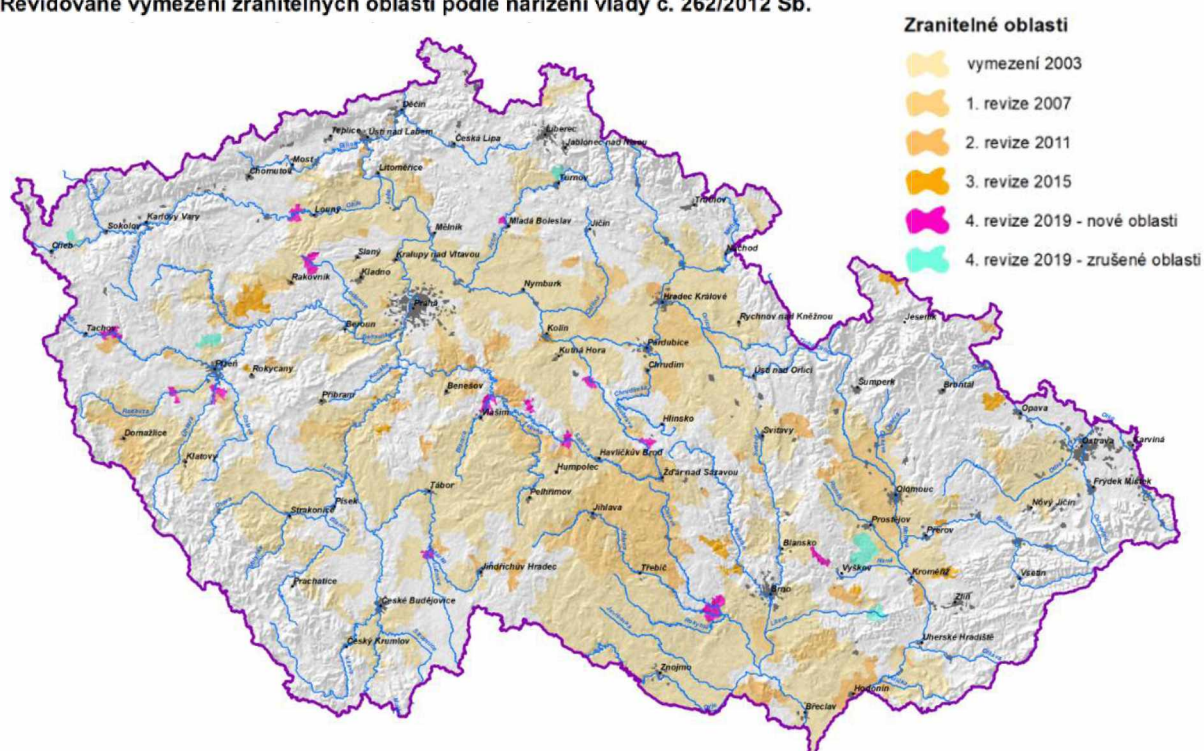
### 1.6.1. Nitrátová směrnice

Dlouhodobě zhoršující se kvalita jak povrchových, tak i podzemních vod působením dusičnanů a fosforečnanů, postupem času vedla k zavedení několika opatření, jejichž záměrem je potlačení nadměrné expozice těchto látek do životního prostředí. Na úrovni Evropské unie byla schválena a následně i uvedena do praxe takzvaná Nitrátová směrnice (*Směrnice Rady 91/676/EHS*). Jedná se o předpis vytvořený pro ochranu vod před znečištěním dusičnany ze zemědělství. Plnění nitrátové směrnice je povinné ve zranitelných oblastech, které jsou vymezeny v hranicích katastrálních území. Zranitelné oblasti jsou oblasti, kde se vyskytují vody znečištěné dusičnany ze zemědělských zdrojů. Zemědělské hospodaření ve zranitelných oblastech dále upravuje akční program nitrátové směrnice. Akční program podléhá přezkoumání a případným úpravám nejdéle ve čtyřletých intervalech. Požadované způsoby hospodaření závisí na půdních a klimatických podmínkách. K tomu je využito údajů o bonitaci půdy (bonitované půdně ekologické jednotky, BPEJ). Směrnice obsahuje i požadavky na realizaci kontrolních monitorovacích programů pro posouzení účinnosti jednotlivých akčních programů, kterými se kontroluje obsah nitrátů na měřících místech. V roce 2019 proběhla 4. revize vymezení, při které podíl plochy zranitelných oblastí v ploše ČR činil 42 %. Dodržování podmínek této směrnice se od roku 2023 promítá také do povinných požadavků na hospodaření, konkrétně do PPH2 zaměřených na ochranu vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů <sup>[29]</sup>.

V České republice je Směrnice Rady 91/676/EHS implementována do třech národních předpisů. Prvním je zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon) ve znění pozdějších předpisů. Druhým je nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu. Třetím je zákon o hnojivech č. 156/1998 Sb., ve znění pozdějších předpisů <sup>[29]</sup>.

Níže uvedený obr. 10 zobrazuje vymezení zranitelných oblastí na území České republiky, na základě pravidelných čtyřletých revizí.

Revidované vymezení zranitelných oblastí podle nařízení vlády č. 262/2012 Sb.



VUV  
TGM

Obr. 10 – Zranitelné oblasti na území České republiky [29]

### 1.6.2. Snížení obsahu fosforu v detergentech

S cílem omezit eutrofizaci vzniklo Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 259/2012, kterým se mění nařízení (ES) č. 648/2004, které omezuje používání fosforečnanů a jiných sloučenin fosforu v pracích prostředcích pro malospotřebitele a v detergentech určených pro automatické myčky nádobí. Nařízení poukazuje na důležitost snižování obsahu fosforečnanů v čistících a pracích prostředcích. Zmiňuje i nutnost nalezení vhodných náhrad, které by fosfáty kompletně nahradily, tím by se snížily i náklady na odstraňování fosforečnanů v čistírnách odpadních vod. Uvádí také, že členské státy mohou zachovat nebo stanovit vnitrostátní pravidla týkající se omezení obsahu fosforečnanů a jiných sloučenin fosforu v detergentech [30]. V České republice je zřízen Zákon č. 150/2010 Sb. (*Zákon, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 200/1990 Sb., o přestupcích, ve znění pozdějších předpisů*), kterým se v § 39 doplňuje odstavec 10. Tento odstavec udává, že se nesmí uvádět na trh a prodávat spotřebitelům prací prostředky pro praní textilu s koncentrací fosforu vyšší než 0,5 %

hmotnostních. Omezení uvádět na trh se ovšem nevztahuje na prací prostředky používané pro praní v průmyslu a institucích, které je prováděné školenými zaměstnanci a určené pro vývoz nebo pro distribuci do jiných členských států Evropských společenství [31].

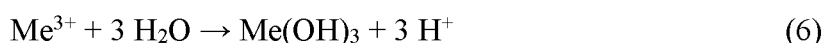
### 1.6.3. Terciální dočištění odpadních vod

Za vodu odpadní je považována veškerá voda, která projde jakýmkoliv výrobním procesem a tímto použitím se změnila její jakost nebo teplota, příp. i jiné vody, odtékající ze sídlišť, obcí, dolů, závodů a dalších objektů, které jsou vypouštěny do vod povrchových a mohou ohrozit jakost těchto vod. Za odpadní vodu je nutné pokládat i srážkové a balastní vody odtékající kanalizacemi z obcí. Čištění odpadních vod je souhrnem technologických procesů na zneškodňování a snižování obsahu látek znečišťujících odpadní vodu. Toho se docílí zpravidla ve třech až čtyřech hlavních stupních, kdy první (mechanický) stupeň zachycuje unášený materiál a suspendované látky, druhý (biologický) stupeň je založen na biochemické aktivitě heterotrofních mikroorganismů, zejména bakterií a jeho účelem je rozklad a mineralizace organických látek. Ve třetím stupni (terciální čištění) se chemickou či biologickou cestou snižuje obsah fosforu. Dusík se chemicky srážet nedá, může být odstraněn pouze biologicky (procesy nitrifikace a denitrifikace) [32].

Chemickými postupy se fosforečnany srážejí dávkováním iontů  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  nebo  $\text{Ca}^{2+}$ . Srážení se provádí v přítoku na čistírnu, v aktivační nádrži nebo ve vyčištěné vodě. Tímto způsobem se daří eliminovat přes 80 % fosforu. V praxi se nejčastěji aplikují železité ionty ve formě  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ , méně častěji se využívá  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nebo  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , přičemž vznikají nerozpustné sraženiny fosforečnanů. Obecně se dají popsat probíhající reakce zjednodušeně rovnicí (5) (Me – Fe; Al):



Souběžně s touto reakcí může probíhat tvorba hydroxidů podle následující zjednodušené rovnice hydrolyzy (6):



Samotný srážecí proces se skládá ze čtyř kroků. Na začátku probíhá dávkování srážecího činidla spojené s potřebou intenzivního rozmíchání. Za druhé dochází ke srážení fosfátů a vzniku malých vloček. Třetím krokem je koagulace a flokulace vloček do větších agregátů. V závěru je zařazena separace vloček pomocí sedimentace, filtrace, popř. flotace [33].

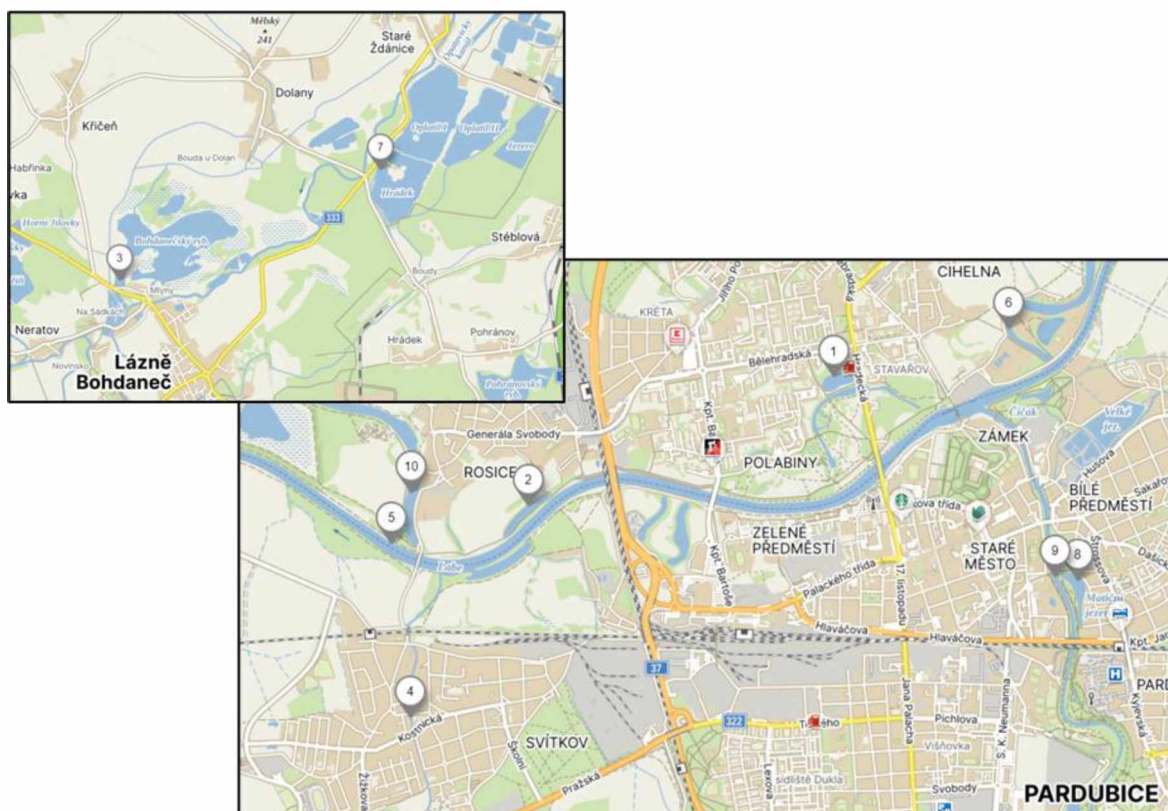
Tyto srážecí způsoby však mají řadu nevýhod, které brání jejich širšímu používání, např. srážení fosfátu v aktivační směsi neprobíhá za optimálních podmínek, takže je potřeba volit přebytek srážedla <sup>[32]</sup>. Při pH běžné odpadní vody není schopen kation  $\text{Fe}^{3+}$  existence a do reakcí vždy vstupují různé aqua-komplexy trojmocného železa, vytvářející koloidní roztoky <sup>[34]</sup>. Na konci celého procesu vznikají produkty, které nelze recyklovat v průmyslu a mají malou hodnotu jako hnojivo, neboť fosfor je biologicky nedostupný <sup>[33]</sup>.

Prosazovanou alternativou k chemickým postupům je biologické odstraňování pomocí bakterií, které jsou schopné v aerobních podmínkách akumulovat sloučeniny fosforu, z nichž vytvářejí zásobu energie pro anaerobní podmínky. Některé druhy obligátně aerobních bakterií, jejichž charakteristickým představitelem je rod *Acinetobacter*, jsou schopné za aerobních podmínek při limitaci jinými nutrienty, než je zdroj organického uhlíku, spotřebovávat fosfáty z okolního prostředí i bez tvorby nové biomasy a akumulované fosfáty ukládat do polyfosfátových granulí. Polyfosfáty v buňce slouží jako metabolická rezerva fosforu, k regulaci vnitřní rovnováhy fosforu v buňce a jako náhradní zdroj energie. V anaerobních podmínkách pak uvolňují buňky fosfáty zpět do prostředí, čímž se obnoví jejich akumulací kapacita <sup>[32]</sup>.

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1. Odběrové lokality

Na počátku práce bylo zvoleno 10 snadno a volně přístupných zdrojů povrchových vod (obr. 11). Všechna zvolená místa se nacházejí na území Pardubic a blízkého okolí. Byl kladen důraz na to, aby byly zastoupeny jak vody stojaté – rybníky, jezera, slepá ramena, tak i vody tekoucí, tedy řeky a menší říční toky. Přihlíženo bylo i k rozmanitosti fauny a flory v odběrových lokalitách.



**Obr. 11** – Mapa odběrových lokalit povrchových vod: 1 Jezero Bajkal, 2 Jarkovského jezero, 3 Bohdanečský rybník, 4 Bylanka, 5 Labe, 6 Slepé rameno – Cihelna, 7 Rybník Hrádek, 8 Matiční jezero, 9 Chrudimka, 10 Slepé rameno – Rosice nad Labem

#### 2.1.1. Jezero Bajkal

Jezero Bajkal je tvořeno neprůtočnou vodní nádrží, nacházející se v bezprostřední blízkosti pardubického sídliště Polabiny V a frekventované silniční komunikace Hradecká. Vzniklo na konci 80. let 20. století vlivem těžby podložního materiálu při výstavbě výše zmíněného sídliště. Vodní hladinu téměř celoročně obývá nespočet druhů vodního ptactva. Břehy jsou lemovány vzrostlými stromy a křovinami. Jezero je obklopeno parkem, který pro místní obyvatelstvo představuje prostor pro krátkodobou rekreaci, dokonce je využíváno jako rybářský revír.

### **2.1.2. Jarkovského jezero**

Jarkovského jezero se nachází jižně od pardubické městské části Rosice. Vzniklo regulací řeky Labe ve 30. letech 20. století. Jde o neprůtočné slepé rameno, které je v jihozápadním cípu propojeno krátkým kanálem s Labem. Ze severu k němu bezprostředně přiléhá intenzivně zemědělsky obhospodařované pole. Břehy lemuje hustý porost, převážně tvořený olšemi a jasany. Magistrátem města Pardubic je vyhlášeným významným krajinným prvkem, mimo jiné také sloužící jako hnízdiště vodního ptactva. V letních měsících hladinu pravidelně pokrývá hustý vodní květ, který je doprovázený hnilobným zápachem.

### **2.1.3. Bohdanečský rybník**

Bohdanečský rybník leží ve zvláště chráněném území, které zde bylo vyhlášeno již roku 1951. Roku 2004 zde byla nařízením vlády č.608/2004 Sb. vyhlášena ptačí oblast o výměře 306,8 ha, i Evropsky významná lokalita. Od roku 2005 jsou Bohdanečský rybník spolu s rybníkem Matka součástí národní přírodní rezervace Bohdanečský rybník. Nachází se na severozápadním okraji města Lázně Bohdaneč, a asi 10 km od Pardubic. Největší plochu (zhruba 60 %) zaujímají mokřady s mokřadní vegetací, jež je domovem mnoha bezobratlých živočichů a obojživelníků. Oblast je především ornitologickou lokalitou. Bylo zde zaznamenáno 185 druhů ptáků, z toho 78 hnízdících. Rybník je díky tradičnímu chovu kaprů i rybářsky obhospodařován <sup>[35]</sup>.

### **2.1.4. Bylanka**

Bylanka je potokem pramenícím v Železných horách, s celkovou délkou toku 24,3 km <sup>[36]</sup>. Tok prochází nížinným územím s pestrým břehovým porostem, z větší části polní trati. Protéká řadou obcí, jmenovitě například Morašicemi, Lány a Bylany. Dále obtéká pardubické letiště a severně od městské části Svítkov se vlévá do Labe. Koryto je místy vlivem říčních nánosů viditelně zarostlé travinami.

### **2.1.5. Labe**

Labe tvoří mohutný říční tok pramenící v Krkonoších na severu Čech. Protéká Německem a ústí do Severního moře. Je 1094 km dlouhé (z toho v Česku 370,74 km) <sup>[37]</sup>. Svými břehy křížuje řadu lesů, orné půdy a nespočet měst a menších obcí. Do Labe ústí odtoky z čistíren odpadních vod, slouží také jako zdroj průmyslové vody pro přilehlé chemické podniky.

### **2.1.6. Slepé rameno – Cihelna**

Slepé rameno – Cihelna je pozůstatkem původního toku Labe. Nachází se v městské části Cihelna. Ze severní strany přiléhá k rozsáhlému poli. Je to neprůtočné rameno, jehož břehy lemuje hustě zastavěná zahrádkářská kolonie. Mnohé chaty mají odpadní potrubí přímo vyvedeno do této vodní nádrže. Začátkem roku 2024 vlivem stavebních prací na silničním přemostění, které je vedeno nad tímto ramenem, došlo k mohutnému uvolnění sedimentu do vodní masy.

### **2.1.7. Rybník Hrádek**

Písník Hrádek je velká vodní plocha o rozloze cca 55 ha vzniklá po těžbě šterkopísku ukončené v 90. letech 20. století <sup>[38]</sup>. Nalézá se na katastru obce Stéblová. V letním období je obyvateli Hradecko-pardubické aglomerace hojně využíván jako přírodní koupaliště. Hrádek těsně sousedí s písníkem Oplatil, který slouží jako jeden ze zdrojů pitné vody pro Pardubice. Oba rybníky jsou od sebe odděleny úzkou písčnou hrází. Voda je zde od pohledu průzračně čistá.

### **2.1.8. Matiční jezero**

Matiční jezero tvoří slepé rameno Chrudimky. Nachází se v blízkosti městského parku Bubeníkovy sady. V jižním i severním cípu je kanály propojeno s řekou. Břehy jsou střídavě lemovány keři a stromy. Na podzim 2018 jezero prošlo rok a půl trvajícím rozsáhlou revitalizací, při které došlo k jeho odbahnění a zpevnění břehů. Je součástí rybářského revíru i domovem vodního ptactva. Místy se na hladině tvoří zelené ostrůvky z leknínů.

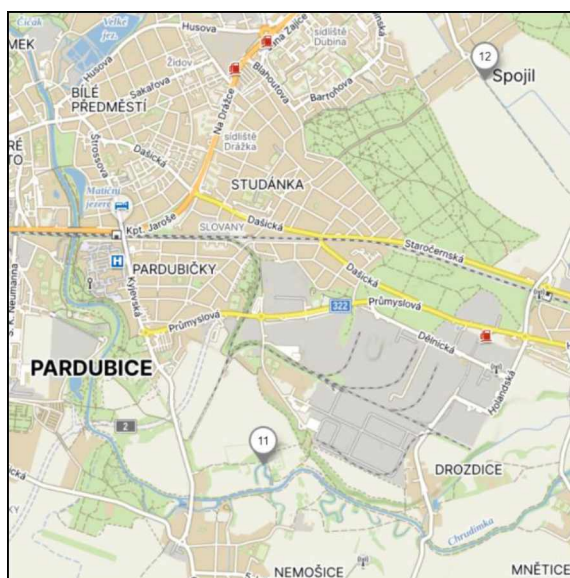
### **2.1.9. Chrudimka**

Řeka Chrudimka s délkou vodního toku 106 km, pramení nad obcí Kameničky a ústí do řeky Labe v Pardubicích. Prameniště je součástí chráněného území přirozené akumulace vody v Chráněné krajinné oblasti Žďárské vrchy. Na vodním toku a podél jeho koryta byla vyhlášena chráněná území soustavy Natura 2000 na celkem čtyřech evropsky významných lokalitách, ve správě Agentury ochrany přírody a krajiny České republiky <sup>[Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.]</sup>. Jedna z nich se nachází přímo na území Pardubic v přírodním parku Červeňák, který je součástí úseku Dolní Chrudimka. Dlouhodobý problém představuje výrazné znečištění řeky splašky. Při vydatných deštích pravidelně dochází na území Chrudimi k přetížení stokové sítě, vedoucí k vypouštění naředené směsi dešťové a odpadní vody přímo do toku.

### 2.1.10. Slepé rameno – Rosice nad Labem

Slepé rameno – Rosice nad Labem je největším slepým ramenem na území Pardubicka. Nachází se západně od Rosic nad Labem. Svou jihozápadní částí je stále propojeno s Labem, jedná se tedy o doposud průtočný dvojitý meandr. Dříve se na ostrově mezi ramenem a řekou nacházelo vojenské cvičiště. Dnes se zde nachází odkaliště chemických závodů. Společně s dalšími odkališti na sousedním katastrálním území Rybitví, představují starou ekologickou zátěž. Východní část je vedena jako významný krajinný prvek Zákoutí. V současnosti je tento prostor značně zanesen říčním bahnem, který postupně zarůstá rákosím a většinu vodní hladiny zde pokrývají lekníny. Břehy a nejbližší okolí je zastoupeno rozmanitou faunou a flórou.

V průběhu práce byly do souboru vzorků přidány další dvě lokality popsané na následující mapě (obr. 12), u kterých se v jarních měsících výrazně projevila eutrofizace. Jedná se o mrtvé rameno řeky Chrudimky a o spojilskou odvodňovací strouhu.



*Obr. 12 – Mapa odběrových lokalit vod s výraznou eutrofizací:  
11 Na podkově – Nemošice, 12 Spojilský odpad*

### 2.1.11. Na podkově – Nemošice

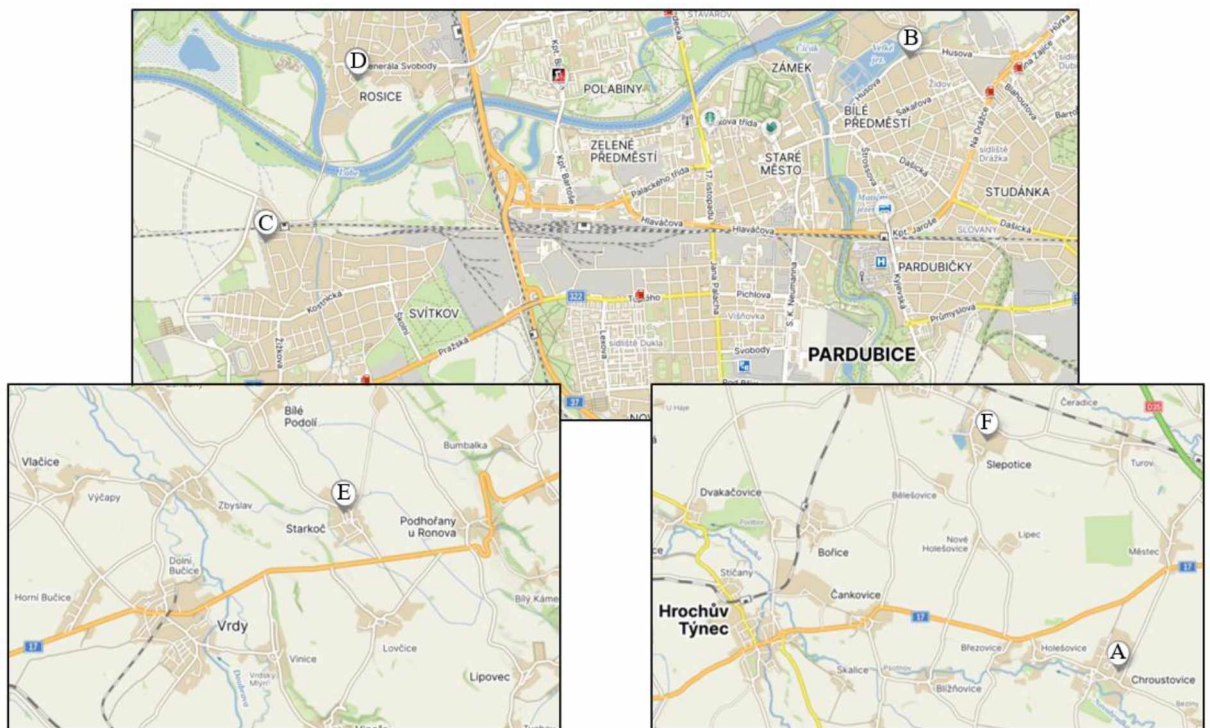
Mrtvé rameno Chrudimky zvané „Na Podkově“, leží mezi přírodní památkou Nemošická stráž a Nemošicemi. V minulosti zde proběhla revitalizace. Pod vodní hladinou propojuje vodní nádrž a řeku kanál s mříží. Okraje ramene jsou od říčního koryta vzdáleny 20 a 30 metrů. Vnější oblouk podkovovitého tvaru ramene je pravidelně sečen a využíván k rekreaci. Oproti tomu břehy vnitřního oblouku, neprošly revitalizací a jsou souvisle zarostlé rákosem, keři i stromy. Rameno je hustě zarybněné, přičemž přítomné ryby jsou dodatečně přikrmovány [40].

### 2.1.12. Spojilský odpad

Spojilský odpad pramení v západní části katastrálního území města Dašice. Jedná se o struhu odvodňující pozemky vysušených rybníků (Staročernského, Strýčka a Spojilského). Postupně protéká zemědělsky obhospodařovanou krajinou a zahrádkářskými koloniemi. Místa je koryto zarostlé těžko dostupným rákosovým porostem. Celková délka toku činí 7,1 km, kdy je v závěru veden potrubím až do Labe <sup>[41]</sup>.

### 2.1.13. Studniční vody

V závěru experimentální části této práce bylo odebráno šest vzorků studničních vod, jejichž umístění je vyznačeno na mapách (obr. 13). Jednalo se o studny z Chroustovic, Pardubic (ulice Husova), Svítkova, Rosic nad Labem, Starkoči a Slepotic.



**Obr. 13** – Mapy znázorňující umístění zdrojů odebraných vzorků studničních vod: **A** Chroustovice, **B** Pardubice (Husova), **C** Svítkov, **D** Rosice nad Labem, **E** Starkoč u Čáslavi, **F** Slepotic

## 2.2. Odběry a uchování vzorků

Vzorky povrchových vod byly odebrány ve třech sériích, aby bylo docíleno širšího přehledu o dlouhodobém stavu kvality zmíněných vod. První série odběrů proběhla již v listopadu 2023 po vydatných deštích na konci zemědělské sezóny. Zbylé dvě série odběrů byly provedeny na jaře, a to v březnu po silných dešťových srážkách, a nakonec po nadprůměrně teplém dubnu 2024. Ve všech případech byla k odběru použita dvou litrová polypropylenová nádoba, připevněná na hliníkové teleskopické tyči. Odebraná voda byla přemístěna do 500ml plastových vzorkovnic. Vzorkovnice byly vždy nejprve třikrát vypláchnuty a následně byly po okraj naplněny finálním množstvím vzorku. Vzorky s projevem rozsáhlé eutrofizace a studniční vody byly odebrány přímo do 250 až 500ml PET lahví, přičemž vždy byly nejdříve třikrát promyty odebíranou vodou a až následně doplněny po okraj hrdla.

Všechny vzorky byly uskladněny v lednici při 4 °C, bez přístupu světla. Některé vzorky byly později z důvodu delší prodlevy mezi odběrem a samotnou analýzou zmrazeny, aby byly důkladně potlačeny případné mikrobiální procesy.

## 2.3. Použité chemikálie a roztoky

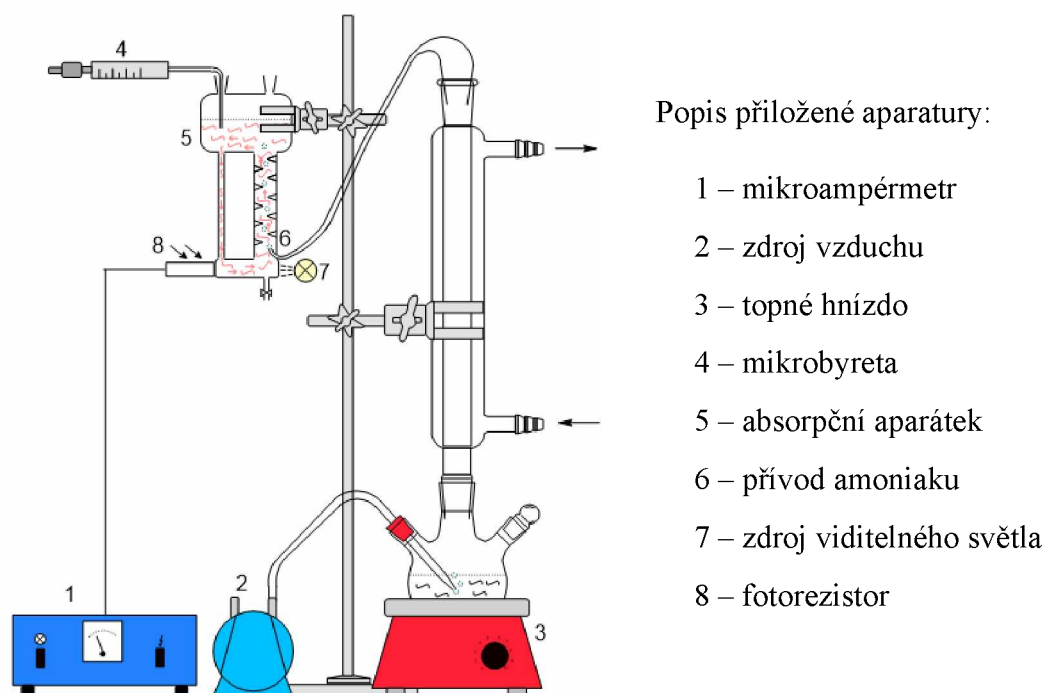
V průběhu práce byly připravovány a používány následující roztoky:

- Roztok NaOH ( $4 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ )
- Roztok HCl ( $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ )
- Roztok  $\text{NH}_4\text{Cl}$  ( $0,1 \text{ mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ) obsahující indikátor methylčerveně
- Kalibrační roztoky  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (nutno připravovat každý den čerstvé)
  - platí že  $0,43942 \text{ g KH}_2\text{PO}_4\cdot\text{l}^{-1}$  odpovídá  $100 \text{ mg P}\cdot\text{l}^{-1}$
- Roztok  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (stabilní jeden týden)
  - 40 ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (95-97%, od společnosti Penta) na 1 litr destilované vody + 2 ml mazadla FFD6 (Skalar)
- Roztok kyseliny askorbové (stabilní 3 dny)
  - 11 g  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$  (VWR Chemicals) na 1 litr destilované vody
- Roztok heptamolybdenanu amonného (stabilní jeden týden)
  - na 1 litr destilované vody smíšeno 225 mg  $\text{K}_2(\text{SbO})_2\text{C}_8\text{H}_4\text{O}_{10}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (p. a., Merck) + 60 ml  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (95-97%, Penta) + 6 g  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (p. a., Merck)
- Vysoce čistá voda + FFD6
  - 3 ml FFD6 (Skalar) na 1 litr vysoce čisté vody

## 2.4. Použité metody a přístroje

### 2.4.1. Stanovení dusičnanů

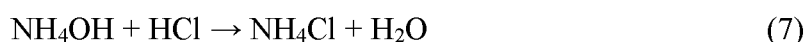
Obsah dusičnanů ve vzorcích povrchových i studničních vod byl stanovován pomocí simultánní spektrofotometricky sledované neutralizační mikrotitrace (obr. 14). Tato metoda umožňuje postupné stanovení nízkých koncentrací amonných iontů a následně dusičnanů [42].



Obr. 14 – Aparatura simultánní spektrofotometricky sledované neutralizační mikrotitrace

K analýze amonných iontů a dusičnanů bylo do tříhrdlé varné baňky odměřeno 50 ml vzorku, který byl následně alkalizován 10 ml NaOH o látkové koncentraci  $4 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$ . Takto připravená směs byla přivedena k varu, za současného intenzivního stripování vzduchem. Uvolňující se amoniak byl absorbován do  $0,1 \text{ mol} \cdot \text{l}^{-1}$   $\text{NH}_4\text{Cl}$  s přísadou acidobazického indikátoru methylové červeně ve speciálním absorpčním aparátu, který umožňuje objektivní sledování barevných změn náplně. Amoniak zvyšoval pH absorpční náplně, což vedlo ke změně jejího zbarvení, konkrétně z červené do žluté. Toto bylo objektivně sledováno jednoduchým spektrofotometrickým systémem, který se skládal ze zdroje viditelného záření, fotoelektrického snímače a analogového mikroampérmetru. Následovala simultánní titrace přítomného amoniaku přidávkou odměrného roztoku kyseliny chlorovodíkové z mikrobyrety, dokud se vlivem neutralizace pH neustálilo na původní hodnotě, což bylo indikováno stabilním zbarvením absorpčního roztoku a nulovou proudovou hodnotou.

Průběh stanovení popisuje následující rovnice (7):



Obsah amonných solí v  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  byl vypočítán na základě celkové spotřeby kyseliny chlorovodíkové, podle následujícího vztahu (8):

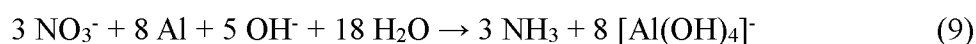
$$\text{mg NH}_4^+ / \text{l} = V_{(\text{HCl})} \cdot 15,23 \cdot 10^{-3} \cdot c_{(\text{HCl})} \cdot M_{(\text{NH}_4^+)} \cdot f_z \quad (8)$$

kde:

$V_{(\text{HCl})}$	objem spotřebované HCl v [mm] mikrošroubu,
$15,23 \cdot 10^{-3}$	faktor mikrobyrety [ml],
$c_{(\text{HCl})}$	látková koncentrace HCl v [ $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ],
$M_{(\text{NH}_4^+)}$	molekulová hmotnost amonných iontů v [ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ],
$F_z$	zřed'ovací faktor.

Po ochlazení reakční směsi následovalo stanovení dusičnanů. Přídavkem 0,5 g Dewardovy slitiny (50 % měď, 45 % hliník, 5 % zinek) proběhla redukce přítomných dusičnanů na amoniak který byl následně stanovován již výše uvedeným postupem.

Průběh redukce je vyjádřen rovnicí (9).



Obsah dusičnanů v  $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$  byl vypočítán obdobně jako u amonných iontů podle následujícího vztahu (10):

$$\text{mg NO}_3^- / \text{l} = V_{(\text{HCl})} \cdot 15,23 \cdot 10^{-3} \cdot c_{(\text{HCl})} \cdot M_{(\text{NO}_3^-)} \cdot f_z \quad (10)$$

kde:

$V_{(\text{HCl})}$	objem spotřebované HCl v [mm] mikrošroubu,
$15,23 \cdot 10^{-3}$	faktor mikrobyrety [ml],
$c_{(\text{HCl})}$	látková koncentrace HCl v [ $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$ ],
$M_{(\text{NO}_3^-)}$	molekulová hmotnost dusičnanů v [ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ ],
$F_z$	zřed'ovací faktor.

## 2.4.2. Stanovení fosforečnanů

Pro stanovení obsahu fosforečnanů byla zvolena metoda kontinuální průtokové analýzy (CFA). Tato metoda je velice citlivá a vyžaduje použití vysoce čisté vody. Ta byla získávána pomocí zařízení Ultra Clear TP UV UF TM (s monitorováním TOC), model W3T360166 od společnosti Evoqua Water Technologies (obr. 15). Systém je připojen přímo na zdroj běžné kohoutkové vody, jejíž následná úprava zahrnuje UV oxidaci, monitorování TOC (TM) a ultrafiltraci.



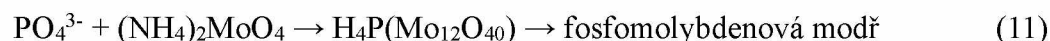
*Obr. 15 – Zařízení Ultra Clear TP UV UF TM*

Fosforečnany byly stanovovány kontinuálním průtokovým analyzátozem Skalar San<sup>++</sup> (obr. 16). Tento systém nabízí vysokou přesnost výsledků a významnou úsporu času díky plně automatickému postupu analýzy [43]. Je vybaven automatickým vzorkovačem (autosampler) SA1100 s karuselem umožňujícím umístění až 2 x 50 vzorků. Součástí autosampleru je i vestavěné oplachové čerpadlo. V modulu je integrován vysoce přesný vstřikovač vzduchu a čerpadlo pro přívod vzduchu se samostatným vestavěným kompresorem pro zvýšenou stabilitu průtoku. Nacházejí se zde i peristaltická čerpadla pro přívod jednotlivých reakčních komponent a termostat. Přiváděné kapaliny jsou vedeny systémem rozvodných hadiček o různých průměrech, dále průtokovými spirálami zajišťující turbulentní míchání, dialyzační membránou a reakčními cívkami. Na konci sestavy je zařazen kolorimetrický detektor s filtrem vlnových délek dimenzovaným na 880 nm.



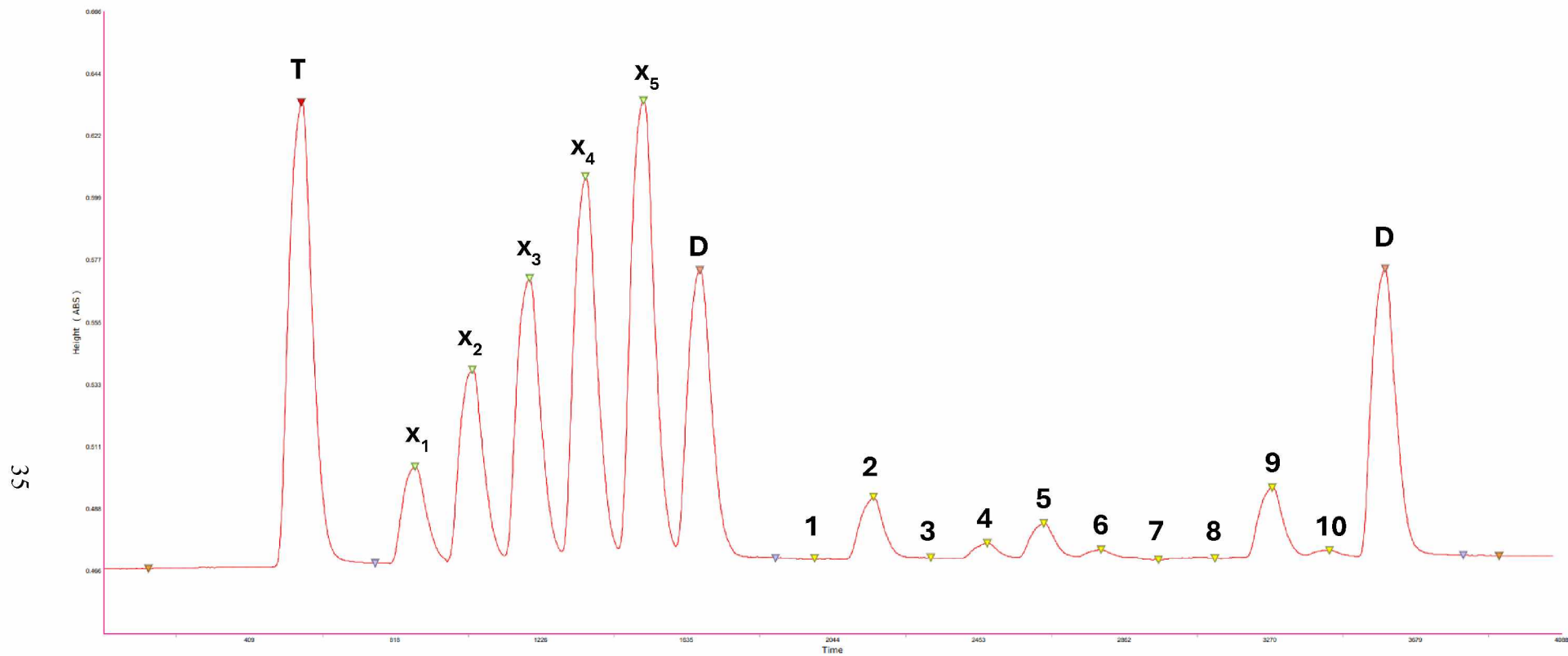
*Obr. 16 – Analyzátor Skalar San<sup>++</sup>*

Princip stanovení spočívá v kontinuálním přivádění vzorku autosamplerem do proudu reakčních činidel. V průběhu svého pohybu soustavou reagují přítomné fosforečnany v prostředí  $\text{H}_2\text{SO}_4$  za katalytického účinku antimonitých iontů s heptamolybdenanem amonným za vzniku heteropolykyseliny – kyseliny molybdatofosforečné. Ta následně přechází redukcí kyselinou askorbovou na roztok fosfomolybdenové modři (viz rovnice 11), který je již vhodný pro fotometrické stanovení. Reakční produkt je analyzován v 50 mm průtočné kyvetě fotometrickým detektorem. Výsledek je softwarově zpracován a podle kalibrační křivky vyhodnocen přímo v miligramech anorganického fosforu na litr [ $\text{mg P}\cdot\text{l}^{-1}$ ].

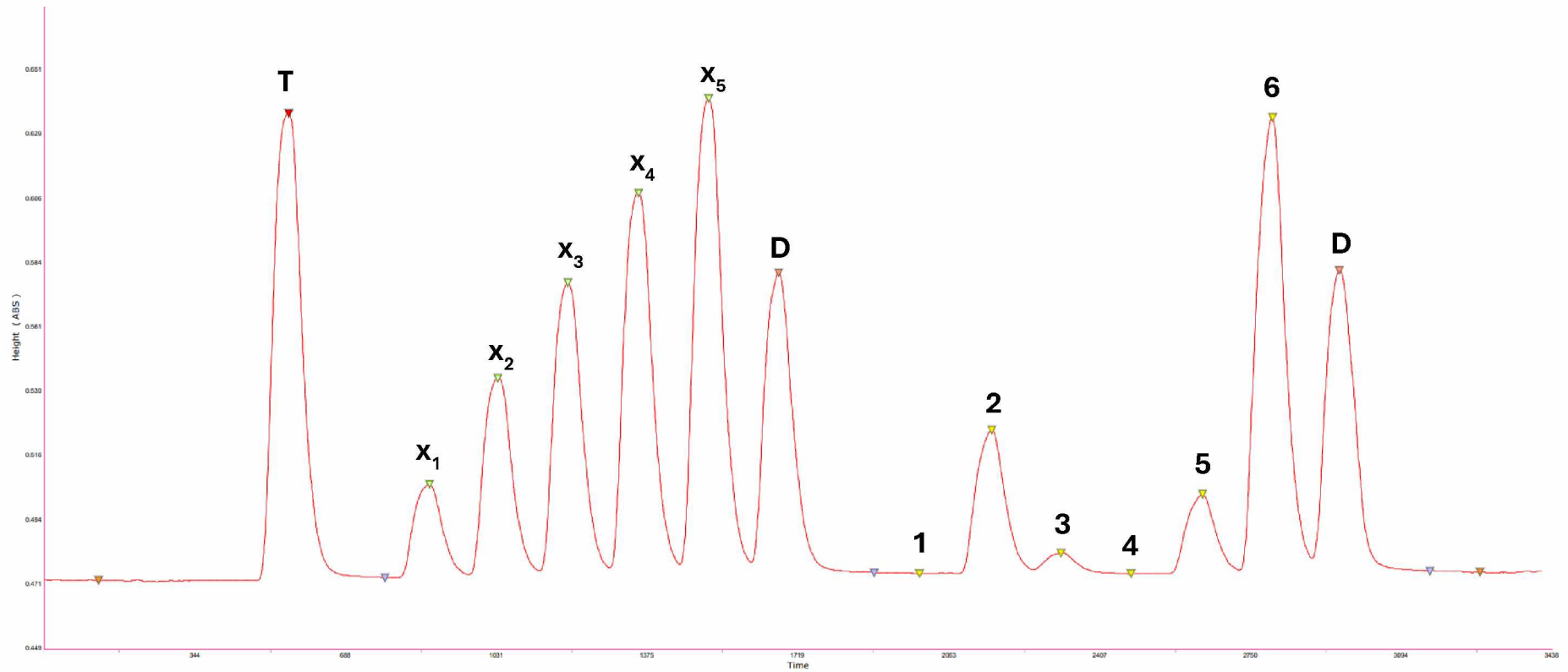


Před zahájením každé analýzy bylo nutno nejprve připravit čerstvé reakční roztoky. Konkrétně roztoky  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (95-97%), kyseliny askorbové a heptamolybdenanu amonného. Dále byla připravena řada pěti kalibračních roztoků a zásobní lahev s vysoce čistou vodou, do které bylo pro lepší průchodnost kapalin hadičkami přidáno smáčedlo FFD6. Následně byly do příslušných reakčních roztoků, včetně nádoby s vysoce čistou vodou, zavedeny odpovídající nasávací hadičky a přístroj byl spuštěn. Posléze bylo nutné vyčkat na vytemperování termostatu na pracovní teplotu 40 °C. Po ustálení toku a velikosti vzduchových bublinek, proudících hadičkami přístroje, byl na pracovní ploše počítače spuštěn ovládací program FlowAccess™ V3. Zde byla zvolena potřebná analytická metoda, nastaveny vhodné parametry a vytvořena pracovní tabulka vzorků. V záložce „Kalibrace“ bylo třeba dále zadat koncentrace kalibračních roztoků. Byla připravena řada o koncentracích 0,2 – 0,4 – 0,6 – 0,8 – 1  $\text{mg P}\cdot\text{l}^{-1}$ . Po ustálení nulové linie byla spuštěna samotná analýza. Takto byly analyzovány všechny tři série vzorků povrchových vod a vod studničních.

Na konci každé analýzy byla vygenerována tabulka s naměřenými hodnotami koncentrací anorganického fosforu. Dalším výstupem bylo grafické znázornění průběhu celého stanovení formou závislosti absorbance na čase. Na následujících dvou stranách jsou uvedeny ukázky grafického záznamu analýz jak povrchových (obr. 17), tak studničních vod (obr. 18).



**Obr. 17** – Graf znázorňující záznam analýzy vzorků povrchových vod: (**T**) tracer, (**D**) drift, (**x<sub>1</sub> – x<sub>5</sub>**) kalibrační roztoky, **1** Jezero Bajkal, **2** Jarkovského jezero, **3** Bohdanečský rybník, **4** Bylanka, **5** Labe, **6** Slepé rameno – Cihelna, **7** Rybník Hrádek, **8** Matiční jezero, **9** Chrudimka, **10** Slepé rameno – Rosice nad Labem



**Obr. 18** – Graf znázorňující záznam analýzy vzorků studničních vod: (**T**) tracer, (**D**) drift, ( $x_1 - x_5$ ) kalibrační roztoky, **1** Chroustovice, **2** Pardubice (Husova), **3** Svítkov, **4** Rosice nad Labem, **5** Starkoč u Čáslavi, **6** Slepotice

## 3 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 3.1. Povrchové vody

V následujících tabulkách 2 až 4 jsou uvedeny naměřené hodnoty obsahu  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$  iontů, resp. anorganického fosforu získané analýzou studovaných vybraných vodních útvarů. Jednotlivé tabulky jsou členěny podle data provedení odběru.

*Tabulka 2: Výsledky rozborů vzorků povrchových vod z první série odběrů dne 24. 11. 2023*

Číslo vzorku	Lokalita	Datum odběru: 24. 11. 2023		
		$\text{NH}_4^+$ [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]	$\text{NO}_3^-$ [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]	$\text{P}_{(\text{anorg.})}$ [ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ]
1	Jezero Bajkal	0,60	4,74	0,06
2	Jarkovského jezero	<i>Pod mezí detekce</i>	5,13	0,26
3	Bohdanečský rybník	1,15	6,91	0,07
4	Bylanka	<i>Pod mezí detekce</i>	11,33	0,06
5	Labe	0,02	13,38	0,10
6	Slepé rameno – Cihelna	0,52	8,68	0,06
7	Rybník Hrádek	<i>Pod mezí detekce</i>	3,24	0,03
8	Matiční jezero	0,06	2,84	0,06
9	Chrudimka	0,27	16,93	0,09
10	Slepé rameno – Rosice nad Labem	0,06	15,19	0,10

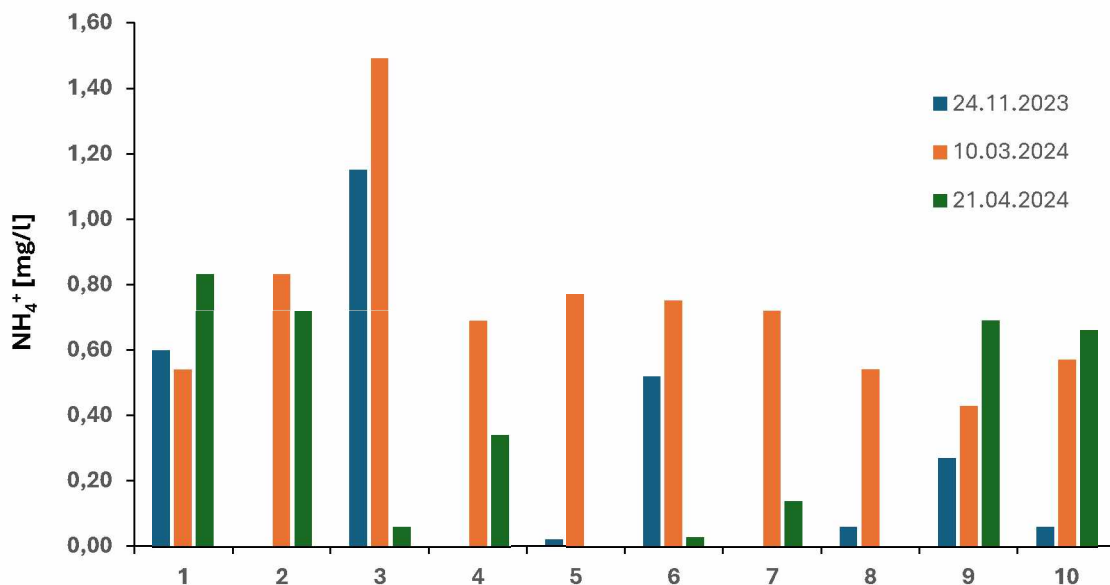
*Tabulka 3: Výsledky rozborů vzorků povrchových vod z druhé série odběrů dne 10. 03. 2024*

Číslo vzorku	Lokalita	Datum odběru: 10. 03. 2024		
		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg·l <sup>-1</sup> ]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg·l <sup>-1</sup> ]	P <sub>(anorg.)</sub> [mg·l <sup>-1</sup> ]
1	Jezero Bajkal	0,54	2,47	<i>Pod mezí detekce</i>
2	Jarkovského jezero	0,83	4,24	0,03
3	Bohdanečský rybník	1,49	2,17	<i>Pod mezí detekce</i>
4	Bylanka	0,69	26,15	<i>Pod mezí detekce</i>
5	Labe	0,77	7,40	0,01
6	Slepé rameno – Cihelna	0,75	12,83	<i>Pod mezí detekce</i>
7	Rybník Hrádek	0,72	4,34	<i>Pod mezí detekce</i>
8	Matiční jezero	0,54	2,37	<i>Pod mezí detekce</i>
9	Chrudimka	0,43	27,73	<i>Pod mezí detekce</i>
10	Slepé rameno – Rosice nad Labem	0,57	6,14	0,01

*Tabulka 4: Výsledky rozborů vzorků povrchových vod ze třetí série odběrů dne 21. 04. 2024*

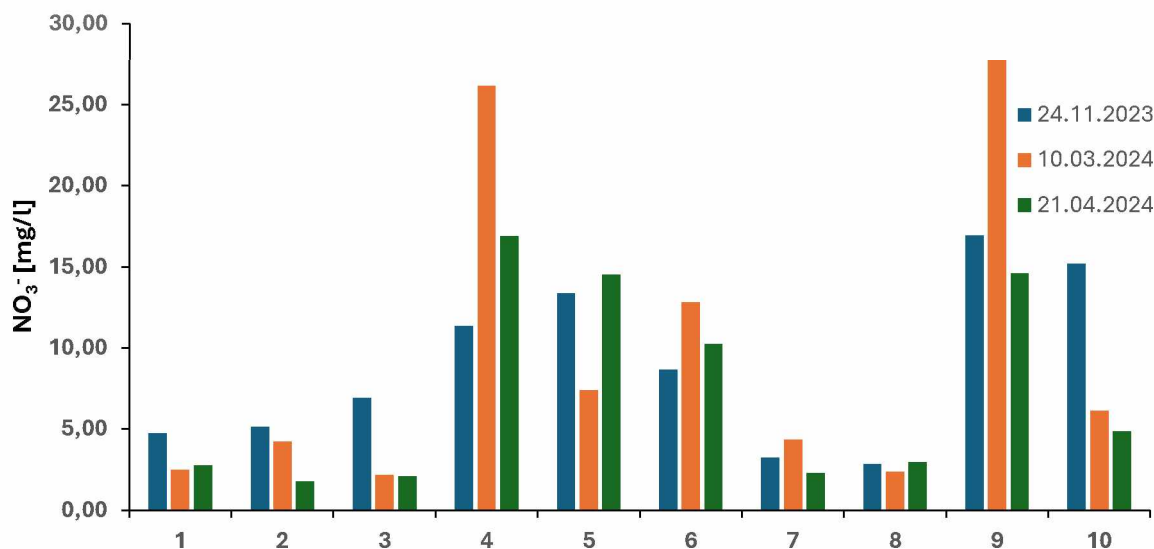
Číslo vzorku	Lokalita	Datum odběru: 21. 04. 2024		
		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> [mg·l <sup>-1</sup> ]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg·l <sup>-1</sup> ]	P <sub>(anorg.)</sub> [mg·l <sup>-1</sup> ]
1	Jezero Bajkal	0,83	2,76	<i>Pod mezí detekce</i>
2	Jarkovského jezero	0,72	1,78	0,12
3	Bohdanečský rybník	0,06	2,07	<i>Pod mezí detekce</i>
4	Bylanka	0,34	16,87	0,01
5	Labe	<i>Pod mezí detekce</i>	14,51	0,06
6	Slepé rameno – Cihelna	0,03	10,26	<i>Pod mezí detekce</i>
7	Rybník Hrádek	0,14	2,27	<i>Pod mezí detekce</i>
8	Matiční jezero	<i>Pod mezí detekce</i>	2,96	<i>Pod mezí detekce</i>
9	Chrudimka	0,69	14,60	0,14
10	Slepé rameno – Rosice nad Labem	0,66	4,84	<i>Pod mezí detekce</i>

Získané výsledky jednotlivých látek jsou znázorněny na grafech 1 až 3 a bylo třeba je porovnat s hodnotami uvedenými v příloze č. 3 Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. s názvem *Ukazatele a hodnoty přípustného znečištění povrchových vod a vod užívaných pro vodárenské účely, koupání osob a lososové a kaprové vody, vztahující se k místu odběru vody pro úpravu na vodu pitnou, místu provozování koupání, respektive k úseku vodního toku stanoveného jako lososová nebo kaprová voda* <sup>[44]</sup>.



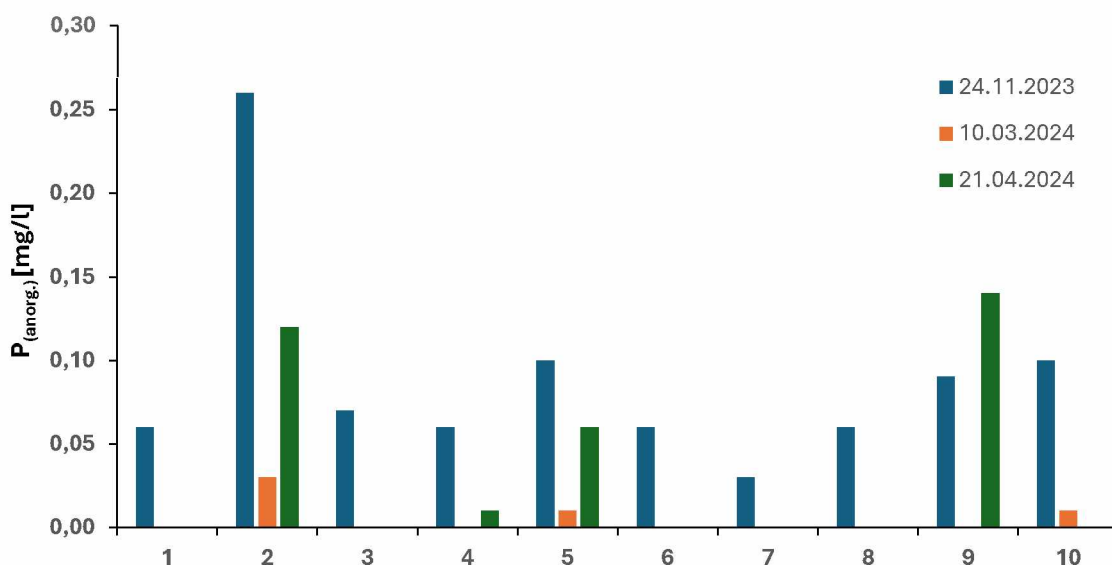
**Graf 1** – Porovnání obsahu amonných iontů z jednotlivých odběrů povrchových vod: 1 Jezero Bajkal, 2 Jarkovského jezero, 3 Bohdanečský rybník, 4 Bylanka, 5 Labe, 6 Slepé rameno – Cihelna, 7 Rybník Hrádek, 8 Matiční jezero, 9 Chrudimka, 10 Slepé rameno – Rosice nad Labem

Udávaný roční průměr hodnoty přípustného znečištění amonnými ionty je 0,23 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>·l<sup>-1</sup>, tj. 0,29 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>·l<sup>-1</sup>. Dále je rozlišován přípustný obsah pro lososové vody, který je 0,03 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>·l<sup>-1</sup> (tj. 0,04 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>·l<sup>-1</sup>) a kaprové vody 0,16 mg N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>·l<sup>-1</sup> (tj. 0,21 mg NH<sub>4</sub><sup>+</sup>·l<sup>-1</sup>). Z grafu 1 je patrné, že ve většině vzorcích došlo k překročení roční průměrné hodnoty a z toho vyplývá, že byly překročeny i limity pro chov ryb. V případě vzorku 1, který pocházel z jezera Bajkal, jde o dlouhodobý problém. Zdrojem je pravděpodobně trus ryb a vodního ptactva. Nejvyšší hodnoty byly zaznamenány u vzorku 3, což je voda z Bohdanečského rybníka. Jedná se o rozsáhlou ptačí oblast a rybník je určený k intenzivnímu chovu ryb. Lze se domnívat, že zdroj je obdobný jako v případě vzorku 1, jen ve větší míře. Skokový nárůst obsahu amonných iontů ve vzorku 2 z Jarkovského jezera je možné přisoudit začátku zemědělské sezóny a s tím spojeným hnojením přilehlého pole. Možným zdrojem znečištění vzorku 6 odebraného ze Slepého ramene – Cihelna, by mohla být kanalizace z blízké chatové oblasti. Ve vzorku 9 z řeky Chrudimky zvýšené koncentrace způsobuje nejspíše kombinace splachů ze zemědělské půdy a emise ze stokového potrubí města Chrudim. Ke vzorku 10 – Slepé rameno Rosice nad Labem, je možné přiřadit jako původce zvýšeného obsahu NH<sub>4</sub><sup>+</sup> iontů hnilobné procesy, spojené se stárnutím tohoto vodního útvaru. Náhlý nárůst hodnot u zbylých vzorků byl nejspíše zapříčiněn snížením obsahu rozpuštěného kyslíku vlivem vyšších okolních teplot, kdy tím byla potlačena možná činnost nitrifikačních bakterií.



**Graf 2** – Porovnání obsahu dusičnanů z jednotlivých odběrů povrchových vod: **1** Jezero Bajkal, **2** Jarkovského jezero, **3** Bohdanečský rybník, **4** Bylanka, **5** Labe, **6** Slepé rameno – Cihelna, **7** Rybník Hrádek, **8** Matiční jezero, **9** Chrudimka, **10** Slepé rameno – Rosice nad Labem

Udávaný roční průměr hodnoty přípustného znečištění dusičnany podle Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. je  $5,4 \text{ mg N-NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ , tj.  $23,89 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{l}^{-1}$ . Z grafu 2 je patrné, že v období druhého odběru došlo k překročení přípustného obsahu ve dvou vzorcích. U pěti vzorků, a to 1, 2, 3, 7 a 8 se obsah dusičnanů pohybuje ve velmi nízkých hodnotách, které lze považovat za přírodní pozadí. V případě zbylých vzorků 4, 5, 6, 9 a 10 už by se dalo uvažovat o přítomnosti antropogenních emisí. Nejvýznamnějším zdrojem kontaminantů vzorků 4, 5 a 6 by mohly být splachy ze zemědělské půdy. Stejně tak i u vzorku 9, ovšem v kombinaci s vypouštěním odpadních vod ze stokové sítě města Chrudim. Zdrojem vyššího obsahu dusičnanů ve vzorku 10 může být propojení s řekou Labe a průsaky z přilehlých odkališť nitrátových výrob.



**Graf 3** – Porovnání obsahu fosforečnanů z jednotlivých odběrů povrchových vod: **1** Jezero Bajkal, **2** Jarkovského jezero, **3** Bohdanečský rybník, **4** Bylanka, **5** Labe, **6** Slepé rameno – Cihelna, **7** Rybník Hrádek, **8** Matiční jezero, **9** Chrudimka, **10** Slepé rameno – Rosice nad Labem

Nařízení vlády č. 401/2015 Sb. v tomto případě uvádí přípustné limity pro celkový fosfor a to  $0,15 \text{ mg } P_{\text{celk.}} \cdot \text{l}^{-1}$ , respektive  $0,05 \text{ mg } P_{\text{celk.}} \cdot \text{l}^{-1}$  pro vodní nádrže využívané ke koupání. Celkový fosfor je součet všech přítomných forem fosforu, tedy i analyzovaného anorganického uvedeného v grafu 3. V naší zeměpisné oblasti je předpokládána přirozená hodnota koncentrace fosfátů (forma anorganického fosforu) v přírodních vodách cca  $0 \text{ až } 0,01 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . Koncentrace vyšší jsou nejčastěji známkou fekálního znečištění. Z hodnot uvedených na grafu 3 lze usoudit, že všechny vzorky mají patrně obdobné zdroje vstupu. Konkrétně u vzorků 4 až 10 se dá předpokládat, že je kontaminace způsobena kombinací vyústění přeпадů kanalizačních sítí a trativodů. Dalším původcem může být trus ptáků a ryb či splachy zbytků fosfátových hnojiv z polí. Podobně u vzorků 1 a 3 je patrně příčinou trus ryb a vodního ptactva. Odběrové místo vzorku 2 se nachází v blízkosti intenzivně obhospodařovaného pole, kde původcem fosforečnanů mohou být používaná superfosfátová hnojiva.

Výsledky analýzy povrchových vod, na jejichž hladině se vyskytla rozsáhlá eutrofizace jsou uvedeny v tabulce 5.

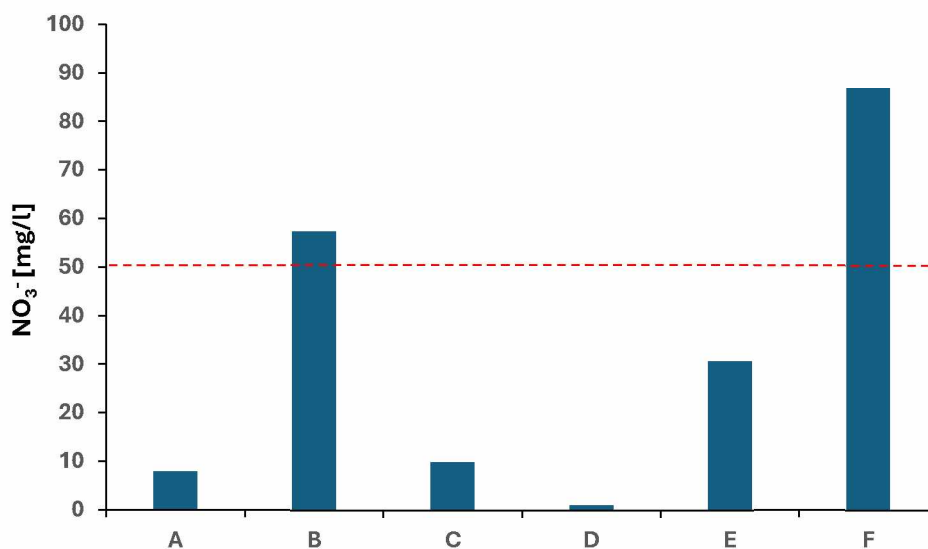
*Tabulka 5: Výsledky rozborů vzorků vod s významným projevem eutrofizace*

<b>Číslo vzorku</b>	<b>Lokalita</b>	<b>Datum odběru</b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> [mg·l<sup>-1</sup>]</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> [mg·l<sup>-1</sup>]</b>	<b>P<sub>(anorg.)</sub> [mg·l<sup>-1</sup>]</b>
<b>11</b>	Na podkově – Nemošice	07. 04. 2024	7,81	3,55	0,31
<b>12</b>	Spojilský odpad	21. 04. 2024	<i>Pod mezí detekce</i>	35,13	0,02

Lze předpokládat, že hlavním zdrojem kontaminantů ve vzorku 11 je trus zde chovaného velkého počtu ryb, v relativně malé nádrži a dále zbytky dodávaného rybiho krmiva. Z vysokého obsahu amonných iontů se dá usoudit, že se procesem eutrofizace spotřebovalo velké množství ve vodě rozpuštěného kyslíku. Tím pravděpodobně se zvýšila aktivita denitrifikačních anaerobních bakterií, které přítomné dusičnany přeměnily na zmíněné amonné ionty. Tomu i nasvědčuje skutečnost, že v době odběru vzorku voda vykazovala silný hnilobný zápach. V případě vzorku 12 jsou antropogenním zdrojem vybraných látek s největší pravděpodobností splachy zbytků hnojiv z přilehlých polí.

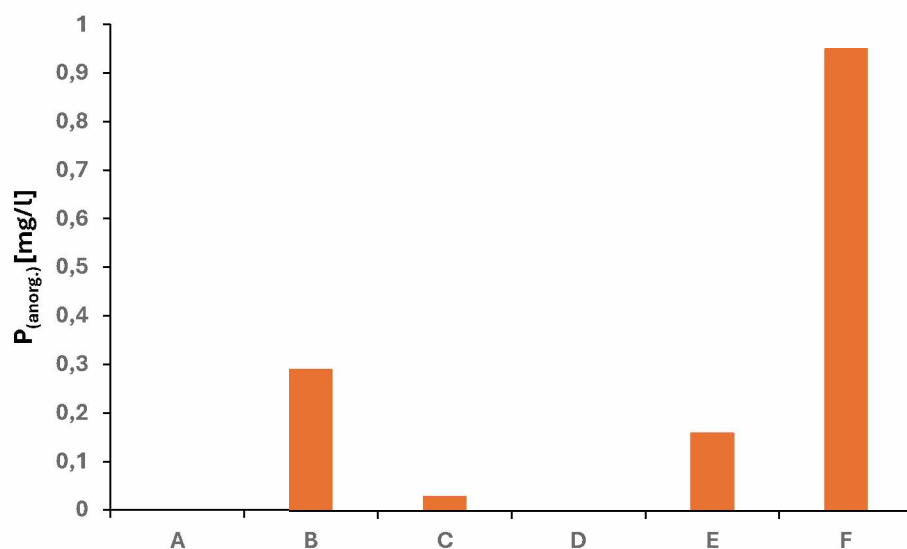
### 3.2. Studniční vody

Studny často bývají využívány jako zdroj pitné vody, proto jsou naměřená data z analýzy vzorků studničních vod porovnávána s Vyhláškou č. 252/2004 Sb. (*Vyhláška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody*). Obsah amonných iontů ve všech vzorcích dosahoval nulové hodnoty. V následujících grafech jsou uvedeny naměřené hodnoty koncentrací dusičnanů (graf 4) a fosforečnanů ve formě anorganického fosforu (graf 5).



**Graf 4** – Obsah dusičnanů ve vzorcích studničních vod: **A** Chroustovice, **B** Pardubice (Husova), **C** Svítkov, **D** Rosice nad Labem, **E** Starkoč u Čáslavi, **F** Slepotice

Červená rovnoběžka s osou  $x$  v grafu 4 udává mezní hodnotu koncentrace dusičnanů v pitných vodách (tj.  $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ), přičemž dva z uvedených vzorků tuto hranici překračují. Kontaminace vzorku B nejspíše způsobují průsaky z městské kanalizace, která se nachází v blízkosti studny. Jako zdroj zvýšené koncentrace dusičnanů ve vzorku F je možné s jistotou označit trativod ze septiku, který se nachází v bezprostřední blízkosti dotčeného zdroje. U vzorku E může jít o kombinaci průsaků ze zemědělsky obhospodařované půdy a ze septiků. Obsah dusičnanů ve zbylých třech vzorcích lze považovat za přírodní pozadí.



**Graf 5** – Obsah fosforečnanů ve vzorcích studničních vod: **A** Chroustovice, **B** Pardubice (Husova), **C** Svitkov, **D** Rosice nad Labem, **E** Starkoč u Čáslavi, **F** Slepotice

Na základě údajů z grafu 5 je vidět, že ve dvou vzorcích nebyly zaznamenány detekovatelné koncentrace anorganického fosforu. V případě vzorků B, C a E jsou patrně zdrojem zvýšeného obsahu průsaky z kanalizační sítě, nacházející se v blízkosti dotčených studní. Jako původce kontaminace vzorku F, lze stejně jako u dusičnanů s jistotou označit trativod z blízkého septiku.

## 4 ZÁVĚR

První část bakalářské práce byla věnována teoretickému popisu prvků dusíku a fosforu, dále zdrojům a vlastnostem dusičnanů a fosforečnanů v povrchových vodách. Popsány byly i podmínky děje zvaného eutrofizace, souvisejícího s nadměrným přísunem živin a jeho dopady na ekosystém. Uvedeny a charakterizovány byly i tři hlavní opatření proti vzniku eutrofizace.

Cílem praktické části bylo stanovení obsahu vybraných látek ve vytypovaných zdrojích povrchových vod a následně i studničních vodách. Součástí bylo i určení možných zdrojů jejich emisí do životního prostředí. V této části byl také zmíněn postup analýzy, způsob odběru vzorků a popis jednotlivých lokalit.

Naměřené hodnoty obsahu amonných iontů, dusičnanů a anorganického fosforu byly přehledně uspořádány to tabulek a grafů. Následně byly porovnány v rámci zvoleného časového horizontu a kriticky zhodnoceny v souladu se současně platnými právními normami. Provedenou analýzou bylo zjištěno, že ve většině vzorcích došlo k překročení roční průměrné hodnoty a že byly překročeny i limity pro chov ryb. Limit pro dusičnany byl překročen u dvou vzorků pocházejících z Bylanky a Chrudimky. Výrazně vyšší koncentrace fosfátů oproti přírodnímu pozadí byly naměřeny ve vzorcích z Jarkovského jezera a Chrudimky. U vod s výrazným výskytem eutrofizace došlo v obou případech k překročení alespoň jednoho parametru. Důležité je brát v potaz, že získaná data byla porovnávána s ročním průměrem přípustného znečištění. Přesnější hodnocení reálného stavu kvality studovaných vodních zdrojů by vyžadovalo provádění monitoringu v průběhu celého kalendářního roku, což za daných podmínek nebylo možné. Dále rozbor studničních vod ukázaly, že jako zdroj pitné vody lze používat pouze studny v Rosicích nad Labem a Chroustovicích.

## POUŽITÁ LITERATURA

1. *VELKÁ VŠEOBECNÁ ENCYKLOPEDIJE*. Euromedia Group, 2010. ISBN 978-80-86938-94-3.
2. BRUYNINCKX, Hans. *Úvodní slovo – Čistá voda znamená život, zdraví, potraviny, volný čas, energii...* Online. In: European Environment Agency. 2018, 29. 08. 2023. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/cs/signaly/signaly-2018/clanky/uvodni-slovo-2013-cista-voda>. [cit. 2024-03-29].
3. *Povrchové vody*. Online. In: Ministerstvo životního prostředí. C2008-2023. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/povrchove\\_vody](https://www.mzp.cz/cz/povrchove_vody). [cit. 2024-04-05].
4. *Velká encyklopedie vědy*. 2. vydání. Praha: FRAGMENT, 2014. ISBN 978-80-7200-809-4.
5. MALÝ, Josef, MALÁ, Jitka, ed. *Chemie a technologie vody*. Brno: NOEL 2000, 1996. ISBN 80-86020-13-4.
6. ZOUHAR, Petr. Jak ekosystém k dusíku přišel. *Vesmír*. 2011, roč. 2011, č. 11, s. 616.
7. PITTER, Pavel. *Hydrochemie*. Praha: VŠCHT, 2015. ISBN 978-80-7080-928-0
8. *Hydrobiologie: Stanovení obsahu sloučenin dusíku* [online]. 2011, 9. Dostupné z: [http://hydrobiologie.upol.cz/uploads/files/03\\_metody\\_stanoveni\\_obsahu\\_%20dusiku.pdf](http://hydrobiologie.upol.cz/uploads/files/03_metody_stanoveni_obsahu_%20dusiku.pdf). [cit. 2024-04-06]
9. KVÍTEK, Tomáš a TIPPL, Martin. *Ochrana povrchových vod před dusičnany z vodní eroze a hlavní zásady protierozní ochrany v krajině*. 2005.
10. KLEMEŠ, Jiří; SMITH, Robin a KIM, Jin-Kuk. *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*. Woodhead Publishing, 2008. ISBN 978-1-84569-195-0.
11. FOSSEN JOHNSON, Sarah. Methemoglobinemia: Infants at risk. *Current Problems in Pediatric and Adolescent Health Care*. 2019, roč. 2019, č. 49 (3), s. 57-67.
12. FOREJT, Martin. DUSIČNANY V POTRAVINÁCH. *Medicína pro praxi*. 2008 (5), 2. Dostupné také z: <https://www.medicinapropraxi.cz/pdfs/med/2008/09/13.pdf>.
13. Vyhláška č. 252/2004 Sb.: Vyhláška, kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody. In: *Sbírka zákonů České republiky Ministerstvo zemědělství, částka 82, 5402-5425, 2004*.

14. KLÍR, Jan a KOZLOVSKÁ, Lada. *Zásady hospodaření pro ochranu vod před znečištěním dusičnany*. Praha - Ruzyně: Výzkumný ústav rostlinné výroby, 2016. ISBN 978-80-7427-218-9.
15. *Fosfor*. Online. In: PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UK V PRAZE. Periodická video tabulka prvků. C2015-2024. Dostupné z: <https://www.chemickeprvky.cz/prvek/p/>. [cit. 2024-04-09].
16. *CELKOVÝ FOSFOR*. Online. In: MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Integrovaný registr znečišťování. 2021. Dostupné z: [https://www.irz.cz/latky-v-irz/celkovy-fosfor#field\\_content\\_zakladni\\_informace](https://www.irz.cz/latky-v-irz/celkovy-fosfor#field_content_zakladni_informace). [cit. 2024-04-09].
17. MOLDAN, B., ZÝKA, J., JENÍK, J. *Životní prostředí očima přírodovědce*. Praha: Academia, 1979. 168 s.
18. HETEŠA, J., KOČKOVA, E. *Hydrochemie*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1997. 106 s. ISBN 80-7157-289-6
19. ŠIMEK, M. *Základy nauky o půdě: 3. Biologické procesy a cykly prvků*. České Budějovice: Jihočeská univerzita, 2003. 151 s. ISBN 80-7040-630-5
20. WARWICK, Christopher; GUERREIRO, Antonio a SOARES, Ana. Sensing and analysis of soluble phosphates in environmental samples: A review. *Biosensors and Bioelectronics*. 2013, vol. 41, s. 1-11.
21. KRÁSA, Josef, a kolektiv autorů. *Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2013. ISBN 978-80-01-05428-4.
22. ROSENDORF, Pavel a FIALA, Daniel. *Metodika vymezení zranitelných oblastí podle eutrofizace vod*. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2011. Dostupné také z: DOI: 10.13140/RG.2.1.1749.7360.
23. *Sladkovodní ekosystémy A)*. Online. In: Ekologie v kostce. Dostupné z: [https://ekologie-v-kostce.blogspot.com/2011/07/sladkovodni-ekosystemy\\_17.html](https://ekologie-v-kostce.blogspot.com/2011/07/sladkovodni-ekosystemy_17.html). [cit. 2024-04-16].
24. NĚMEC, Jan a HLADNÝ, Josef. *Voda v České republice*. Praha: Consult, 2006. ISBN 80-903482-1-1.
25. ROSENDORF, Pavel; OLLESCH, Gregor; TREPEL, Michael; DURAS, Jindřich; PRCHALOVÁ, Hana et al. *Strategie ke snížení obsahu živin ve vodách v mezinárodní oblasti povodí Labe*. Magdeburk: Mezinárodní komise pro ochranu Labe, 2018.

26. PIVOKONSKÝ, Martin. *Povrchové stojaté vody, chemická stratifikace, eutrofizace*. Online. Přírodovědecká fakulta UK, 2013. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/21190342-Povrchove-stojate-vody-chemicka-stratifikace-eutrofizace.html>.
27. ZNACHOR, Petr. Vodní květy řas a sinic. *Scientific American: české vydání*. 2005, č. 3, s. 42-51. ISSN 1213-7723.
28. ZNACHOR, Petr. *Mikrofotografie*. Online. In: ZNACHOR, Filip. HYDROBIOLOGICKÝ ÚSTAV, BIOLOGICKÉ CENTRUM AV ČR, VVI. Fytoplankton.cz. 2004–2024. Dostupné z: <https://www.fytoplankton.cz/galerie/mikrofotografie>. [cit. 2024-04-18].
29. *Nitrátová směrnice*. Online. In: Ministerstvo zemědělství. 2021. Dostupné z: <https://eagri.cz/public/portal/mze/zivotni-prostredi/nitratova-smernice>. [cit. 2024-05-01].
30. 32012R0259: *Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 259/2012 ze dne 14. března 2012, kterým se mění nařízení (ES) č. 648/2004, pokud jde o používání fosforečnanů a jiných sloučenin fosforu v pracích prostředcích pro spotřebitele a v detergentech určených pro automatické myčky nádobí pro spotřebitele*. Online. In: *Zákony pro lidi*. 2010–2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/pravo/eu/dokument?celex=32012R0259&date=0>. [cit. 2024-05-01].
31. Zákon č. 150/2010 Sb.: *Zákon, kterým se mění zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon), ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 200/1990 Sb., o přestupcích, ve znění pozdějších předpisů*. In: *Sbírka zákonů*. 2010, částka 53, s. 1929-1968. ISSN 1211-1244.
32. ADÁMEK, Zdeněk, Jan HELEŠIC, Blahoslav MARŠÁLEK a Martin RULÍK. *Aplikovaná hydrobiologie*. 1. vyd. Vodňany: VÚRH JU Vodňany, 2008, 256 s. Učebnice. ISBN 978-80-85887-79-2.
33. YOUSEF, Mohamed a VIDLÁŘ, Jiří. *STUDIE CHEMICKÉHO SRÁŽENÍ ORTHOFOSFOREČNANŮ NA ÚČOV OSTRAVA*. Ostrava: Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava Řada hornicko-geologická, 2002. ISSN 0474-8476.
34. FOLLER, Jan. *Třetí stupeň čištění*. Online. In: *Vodní hospodářství*. 2021. Dostupné z: <https://vodnihospodarstvi.cz/treti-stupen-cistení/>. [cit. 2024-05-06]
35. *Bohdanečský rybník (národní přírodní rezervace)*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Bohdane%C4%8Dsk%C3%BD\\_rybn%C3%ADk\\_\(n%C3%A1rodn%C3%AD\\_p%C5%99%C3%ADrodn%C3%AD\\_rezervace\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bohdane%C4%8Dsk%C3%BD_rybn%C3%ADk_(n%C3%A1rodn%C3%AD_p%C5%99%C3%ADrodn%C3%AD_rezervace)). [cit. 2024-05-06].

36. *Potok Bylanka*. Online. In: Povodňový plán obce Lány. 2010–2013. Dostupné z: [https://la.povodnoveplany.cz/lang\\_cs/clanek/3756/](https://la.povodnoveplany.cz/lang_cs/clanek/3756/). [cit. 2024-05-06].
37. *Labe*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Labe>. [cit. 2024-05-19].
38. *Hrádek (písník)*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Hr%C3%A1dek\\_\(p%C3%ADsn%C3%ADk\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Hr%C3%A1dek_(p%C3%ADsn%C3%ADk)). [cit. 2024-05-07].
39. *Chrudimka*. Online. In: Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Chrudimka>. [cit. 2024-05-28].
40. PEŠANOVÁ, Věra. *Ekologie užovky podplamaté (Natrix tessellata) na Chrudimce*. Diplomová práce. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, 2022.
41. *Hydrologické údaje*. Online. In: Povodňový plán obce Spojil. 2010–2024. Dostupné z: [https://www.edpp.cz/spl\\_hydrologicke-udaje/](https://www.edpp.cz/spl_hydrologicke-udaje/). [cit. 2024-05-07].
42. CHÝLKOVÁ J., ŘÍHA V., ROSA A.: Automatická spektrofotometrická metoda stanovení mikrogramových množství dusičnanů. *Vodní hospodářství* 1, (1986), 25-27, ISSN 1211-0760
43. *Skalar San++ CFA analyzer for the analysis of nitrogen and phosphate*. Online. In: Skalar. 2023, 18.11.2017. Dostupné z: <https://www.skalar.com/news/skalar-san-cfa-analyzer-for-the-analysis-of-nitrogen-and-phosphate>. [cit. 2024-05-18].
44. *Nářízení č. 401/2015 Sb.: Nářízení vlády o ukazatelích a hodnotách přípustného znečištění povrchových vod a odpadních vod, náležitostech povolení k vypouštění odpadních vod do vod povrchových a do kanalizací a o citlivých oblastech*. Online. In: *Zákony pro lidi*. 2024. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-401>. [cit. 2024-06-16].