

Vliv hydrologické situace na jakost vod — možnosti hodnocení

SILVIE SEMERÁDOVÁ

Klíčová slova: povrchová voda — jakost vod — množství vody — koncentrace — vztah koncentrace a průtoku — statistické metody

ABSTRAKT

Mění se klimatické a hydrologické podmínky ovlivňují také jakost vod ve vodních tocích a nádržích. Na toto téma již bylo publikováno více studií, většinou zaměřených na konkrétní území a situaci. Česká republika (ČR) disponuje dostatečně dlouhými a podrobnými řadami sledování průtoků i jakosti na to, aby bylo možné podrobnou datovou analýzou vysledovat převládající typy vztahů v závislosti na charakteristikách povodí a zdrojích znečištění.

Pro účel článku byly vybrány profily sledování jakosti v letech 2010–2019, k nimž bylo možné přiřadit kromě obecných charakteristik povodí také přiměřeně přesné údaje o průtoku v době měření. Údaje o měřených koncentracích sledovaných ukazatelů byly porovnávány s hydrologickou situací kvantifikovanou pomocí statistické četnosti výskytu průtoků ve dni odběru vůči dlouhodobé časové řadě.

Na takto připravené datové sadě byly zjišťovány vztahy mezi průtokem a koncentracemi vybraných látek. Tyto vztahy lze rozdělit do tří kategorií: chemostáze, kdy se koncentrace nemění nebo kolísají nezávisle na průtoku, obohacení, kdy koncentrace s rostoucími průtoky rostou, a ředění, kdy koncentrace s rostoucími průtoky klesají. O tom, který z těchto vztahů převládne, případně zda se projeví kombinace více vztahů, rozhodují kromě vlastností látek také charakteristiky povodí. V některých případech lze právě na základě vztahu určit v povodí převládající zdroj znečištění.

Cílem článku je poukázat na potenciál statistických metod pro optimalizaci monitorovacích kampaní a vyhodnocení rozhodujících vlivů a charakteristik povodí.

ÚVOD

Klimatická změna posledních dekád má dopad i na hydrologické charakteristiky toků, jak v ČR dokládají dlouhodobá sledování [1]. Kromě poklesu průměrných průtoků sledujeme rovněž četnější a delší epizody sucha nebo naopak extrémních odtoků. Tyto změny mají důsledky také pro kvalitu vody, což může způsobovat vážné problémy vzhledem k tomu, že už nyní nejsou u mnoha vodních útvarů splněny požadavky na dobrý chemický a ekologický stav a navzdory řadě opatření dochází jen k pomalému nebo žádnému zlepšování, v některých případech i ke zhoršování [2].

O souvislostech mezi kvantitativními a kvalitativními vlastnostmi vodních toků v různých typech povodí a za různých hydrologických situací byla provedena řada studií. Nejčastěji se autoři zaměřují na přirozený chemismus povodí [3, 4] a nutrienty [5, 6], méně často na další látky, např. farmaka nebo pesticidy. Vztah mezi koncentrací a průtokem (C-Q slope) se pro tyto účely používá jako metrika a je výrazně ovlivněn jak charakteristikami povodí [7], tak převládajícími zdroji znečištění včetně historické zátěže [8]. Jinak se tento vztah projevuje při použití delších časových řad méně častých sledování a jinak v podrobných časových řadách, kde lze vysledovat vztahy typické pro srážkovodotokové události [9]. Zároveň se ukazuje,

že vlivy určující chování látek v povodí mohou být kombinované, jak dokládá článek od Minaudo [10], kde je pro dusičnany sestaven model zahrnující sezonní průběh i jednorázové události, jež mají do značné míry protichůdný charakter.

Porozumění uvedeným vztahům může pomoci při zjišťování zdrojů znečištění, modelování odezvy na klimatickou změnu nebo naopak na navržená zmírňující opatření a také upřesnit výpočet látkových odnosů z povodí. Proto byly na vybrané množině dat otestovány postupy přípravy dat a prostřednictvím série grafů ilustrovány některé dílčí výsledky.

Účelem tohoto výzkumu bylo pokusit se sestavit pro ČR dostatečně robustní datovou sadu spojující hydrologické a jakostní charakteristiky vodních toků a při té příležitosti otestovat, jaká data a jaké postupy lze k tomu využít a jaká jsou jejich omezení. Dalším cílem bylo vyhodnocením dat ověřit výsledky z literatury v podmínkách ČR a zjistit, nakolik lze postupy využívané pro všeobecné chemické ukazatele použít pro další, méně často sledované látky. Sada jednoduchých, jednoduchým postupem generovaných grafů má za cíl ilustrovat metody a obecné zákonitosti a pomoci vytipovat, na jaké ukazatele, vztahy a typy vodních toků by bylo vhodné se zaměřit v podrobnějším výzkumu.

METODIKA

Pro stanovení vztahu mezi jakostí a množstvím vody se nejčastěji používá kombinace bodových měření koncentrace a okamžitého průtoku v čase odběru vzorku. Pro analýzu těchto závislostí se využívají jak jednoduché statistické přístupy, tak pokročilejší modelovací metody, včetně lineární a nelineární regrese, korelačních analýz a vícerozměrných statistických postupů [3, 7].

Lineární regrese se uplatňuje v případech, kdy je předpokládán přibližně lineární vztah mezi proměnnými, její použití je však omezeno požadavkem na normální rozdělení reziduí. To bývá problematické zejména u hydrologických dat, kde koncentrace i průtoky obvykle vykazují silně nesymetrická rozdělení. Z tohoto důvodu se často používá logaritmická transformace jedné nebo obou proměnných, jež stabilizuje variabilitu dat a umožňuje lépe aproximovat lineární vztah v transformovaném prostoru [4, 7].

K hodnocení vztahu mezi koncentrací a průtokem se dále používají korelační koeficienty, zejména Pearsonův a Spearmanův. Spearmanův korelační koeficient je preferován v případech, kdy data nesplňují předpoklady normality nebo kdy je vztah nelineární či monotónní [9].

Pokročilejší přístupy zahrnují regresní a semiparametrické modely, jako jsou zobecněné lineární modely (GLM), zobecněné aditivní modely (GAM) nebo smíšené modely s náhodnými efekty. V hydrologii se často využívají také specializované přístupy pro odhad transportu látek, např. modely WRTDS (Weighted Regressions on Time, Discharge, and Season), které umožňují lépe zachytit sezonnost a dlouhodobé trendy v datech.

Tab. 1. Počet dostupných hodnot
Tab. 1. Number of available values

Ukazatel – název	Počet profilů s měřením	Počet hodnot	Počet hodnot pod mezí detekce	Zkratka (v grafech)
Acetochlor	127	9 299	8 846	ACETOCHLOR
Metabolity acetochloru	132	9 411	9 063	ACETOCHLOR-MB
Hliník	126	10 532	1 527	AL
Alachlor	132	10 197	10 091	ALACHLOR
Alachlor-ESA	120	5 856	2 666	ALACHLOR-ESA
Metabolity alachloru	122	6 594	6 578	ALACHLOR-MB
Alachlor-OA	120	5 856	5 661	ALACHLOR-OA
AMPA	126	6 803	2 122	AMPA
Adsorbovatelné organicky vázané halogeny	134	14 457	122	AOX
Arsen	133	14 384	4 146	AS
Benzo[a]pyren	133	9 832	3 794	B-A-PYREN
Benzo(b)fluoranten	133	9 833	3 077	B-B-FLUORANT
Benzo(g,h,i)perylene	133	9 831	3 476	B-GHI-PERYL
Bromdifenyleter	114	6 534	5 432	BROMDIFENYLETHER
Biologická spotřeba kyslíku pětidenní	138	16 135	19	BSK ₅
Vápník	138	15 726	0	CA
Kadmium	131	11 456	7 349	CD
Kadmium – rozpuštěné	137	18 262	13 497	CD-R
Železo – celkové	132	13 585	142	FE-TOTAL
Fluoranten	133	9 839	343	FLUORANTEN
Metazachlor	128	9 522	8 051	METAZACHLOR
Metolachlor	127	9 507	7 950	METOLACHLOR
Metabolity metolachloru	132	9 643	8 381	METOLACHLOR-MB
Naftalen	133	9 666	2 557	NAFTALEN
Dusík amoniakální	138	16 158	1 903	N-NH ₄
Dusík dusičnanový	138	16 053	62	N-NO ₃
Dusík celkový	138	14 047	8	N-V
Olovo	131	11 485	4 310	PB
Olovo – rozpuštěné	137	18 268	10 696	PB-R
Fosfor – fosforečnanový	138	15 363	864	P-PO ₄
Fosfor – celkový	138	16 034	25	P-V

V případě dostupnosti několika vysvětlujících proměnných lze využít více-
rozměrné statistické metody, jako jsou faktorová analýza, shluková analýza
nebo metoda hlavních komponent, jež pomáhají identifikovat dominantní pro-
cesy ovlivňující export látek z povodí [6].

Vztahování koncentrací ke kvantilům průtoků je užitečné pro identifikaci
chování systému v extrémních podmínkách, např. při vysokých nebo nízkých
průtocích. Tento přístup je často používán pro interpretaci tzv. koncentrace-
průtokových (C–Q) vztahů [3, 7]. Výhodou této metody je její jednoduchost,
interpretovatelnost a možnost aplikace i v případech omezeného množství dat
nebo hodnot pod mezí detekce.

Pro potřeby této práce byla zvolena metoda porovnání průměrných kon-
centrací podle kvantilů průtoků, a to zejména pro její jednoduchost, názornost
a schopnost ilustrovat základní principy vztahu mezi hydrologickými podmín-
kami a transportem látek. Současně je však nutné zdůraznit, že jakákoli analýza
tohoto typu je silně závislá na kvalitní předúpravě dat, která je klíčovým krokem
pro spolehlivou interpretaci výsledků.

Výběr profilů

Aby byla statistická analýza co nejvíce průkazná, je potřeba shromáždit co nej-
úplnější množinu dat. V případě výběru profilů byly limitujícími faktory časové
pokrytí, dostupnost údajů o co nejširším spektru ukazatelů a možnost doplnit
údaje o průtoku v době odběru. Pro účely tohoto článku byly vybrány profily,

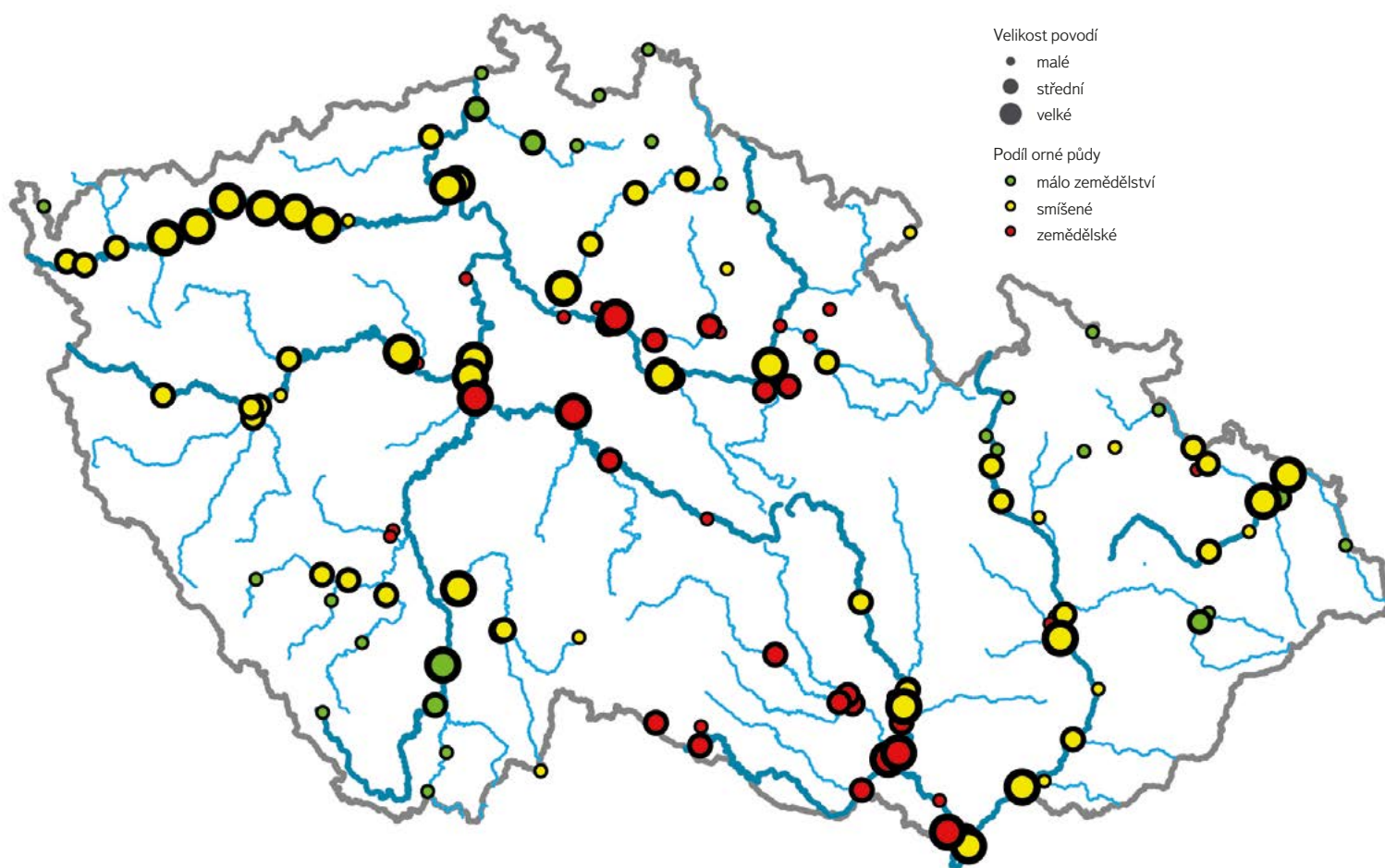
kde bylo měření jakosti realizováno v měsíčních krocích po dobu 10 let – kromě
všeobecných ukazatelů kyslíkových poměrů a živin byla k dispozici také měření
dalších látek – a kde bylo zároveň možné přiřadit hydrologické údaje. Pro zís-
kání hydrologických údajů byla každému jakostnímu profilu přiřazena hydrolo-
gická stanice, která byla jakostnímu profilu nejbližší po nebo proti proudu vod-
ního toku. Vlastní průtoky byly přepočteny na základě poměru velikosti povodí.
Profily s poměrem plochy povodí nad 4 nebo pod 0,2 byly vyřazeny.

Výběr ukazatelů

Výběr ukazatelů se odvíjel primárně od dostupnosti dat. Zvláštní důraz byl kladen
na ukazatele způsobující nedosažení dobrého stavu podle Rámcové směrnice
o vodách [11], upřednostněny byly profily, kde bylo k dispozici širší spektrum uka-
zatelů. Využity byly údaje provozního monitoringu v letech 2010–2019, přičemž
byly vyřazeny ty ukazatele, u nichž nebyl k dispozici dostatek měřených hodnot.
Přehled sledovaných ukazatelů a dostupných měřených hodnot je v *tab. 1*.

Metoda hodnocení hydrologické situace

Pro hodnocení hydrologické situace byly využity denní průtoky v hydrolo-
gických stanicích se stálým měřením. Na základě dlouhodobé řady denních
průtoků z let 1980–2019 (u několika případů byla dostupná jen kratší řada,



Obr. 1. Umístění a typ profilů (velikost bodů odlišuje malé, střední a velké, zelené s malým, žluté se středním a červené s velkým podílem orné půdy)

Fig. 1. Location and type of profiles (dot size indicates small, medium and large catchments; green, yellow and red indicate a small, medium and large share of arable land, respectively)

minimálně však od roku 2002 do roku 2019) byly stanoveny percentily průtoku pro každý profil. Přepočítaný průtok v době odběru vzorku pro stanovení jakosti byl porovnán s (přepočítaným) percentilem a zařazen do odpovídající skupiny. Tak bylo možno vyhodnotit, jestli byl průtok v době odběru vzorků významně zvýšený nebo snížený.

Charakteristiky povodí

Pro charakterizaci povodí byla určena rozloha povodí jakostního profilu, byl stanoven podíl orné půdy v povodí a podíl městské zástavby. Povodí byla následně rozdělena na malá (< 500 km²), střední (500–2 000 km²) a velká, s velkým (> 60%), středním (20–60%) a malým podílem orné půdy a velkým (> 5%), středním (1–5%) a malým zastoupením městské zástavby (≤ 1%). Účelem tohoto rozdělení bylo zjistit, jaké parametry mají na vztahy jakosti a hydrologie vliv – zda jsou např. drobné vodní toky citlivější k obdobím sucha nebo naopak k extrémním srážkoodtokovým událostem, zda lze na základě typu vztahu rozlišit pravděpodobně dominantní vliv různého typu znečištění atd. Počet profilů v jednotlivých skupinách je v tab. 2. Kvůli porovnávání situace ve velkých a malých povodích byly v datové sadě ponechány i profily na dolních částech toků, jejichž povodí se s povodími výše položených profilů překrývají.

Výsledkem bylo 138 částečně se překrývajících povodí o různých charakteristikách (obr. 1).

Tab. 2. Počet profilů (hodnocených záznamů/ukazatelů)

Tab. 2. Number of profiles

	Malé	Střední	Velké
Hodně zemědělství, hodně sídel	6	3	1
Hodně zemědělství, středně sídel	10	13	5
Hodně zemědělství, málo sídel	2	1	0
Středně zemědělství, hodně sídel	5	6	4
Středně zemědělství, středně sídel	7	17	17
Středně zemědělství, málo sídel	1	7	0
Málo zemědělství, hodně sídel	7	1	0
Málo zemědělství, středně sídel	10	3	0
Málo zemědělství, málo sídel	10	1	1

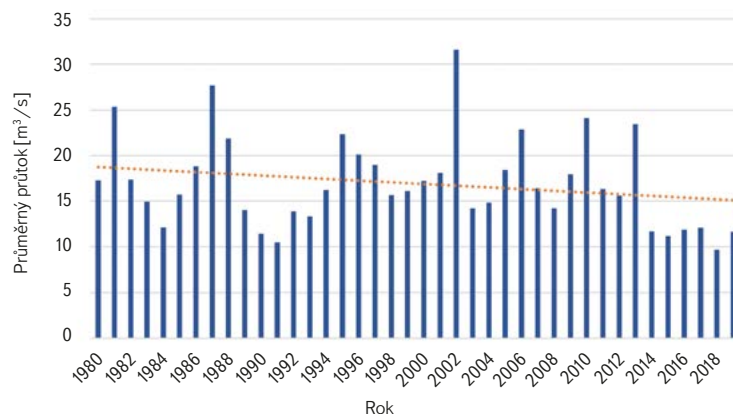
VÝSLEDKY

Vývoj

Ačkoli výběr sledovaných povodí nelze považovat za reprezentativní pro posouzení hydrologické situace na území ČR, i v tomto výběru se potvrzuje trend mírného poklesu průměrných průtoků od osmdesátých let 20. století a také suché období v druhé polovině desátých let 21. století. Na obr. 2 je zobrazen průměrný průtok všech sledovaných povodí. Proloženy lineární trend je

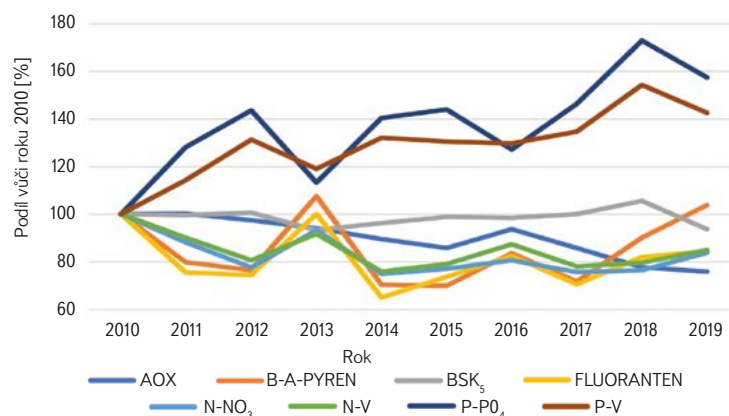
klesající, což ovšem může být zkresleno několika suchými roky na konci sledovaného období.

Co se týče jakosti, ani tady nelze hovořit o reprezentativním vzorku, nicméně i zde odpovídá vývoj ve vybraných profilech dříve popsaným trendům. Na obr. 3 vidíme vývoj vybraných ukazatelů v ročním průměru všech sledovaných profilů. Pro srovnatelnost jednotlivých ukazatelů není vývoj koncentrací uveden v původních jednotkách, nýbrž v procentech koncentrací na začátku sledování. Většina sledovaných ukazatelů velmi mírně klesá, případně stagnuje, nárůst lze pozorovat u fosforu.



Obr. 2. Průměrný průtok testovací datové sady (m³/s)

Fig. 2. Average flow rate of the test dataset (m³/s)

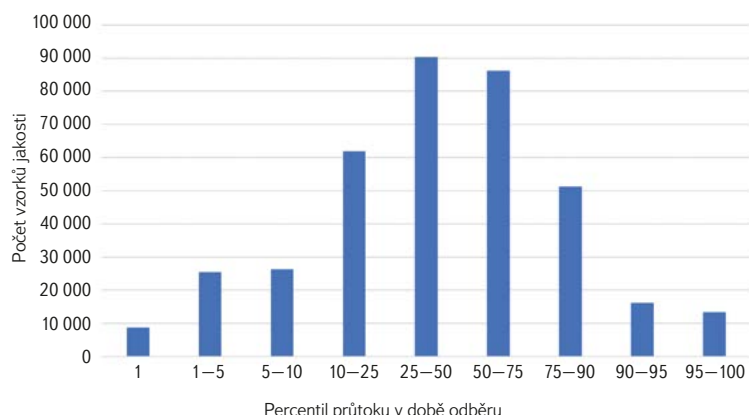


Obr. 3. Vývoj průměrných ročních koncentrací vybraných ukazatelů v testovaných profilech (v % roku 2010)

Fig. 3. Development of average annual concentrations of selected indicators in tested profiles (as a percentage of 2010 levels)

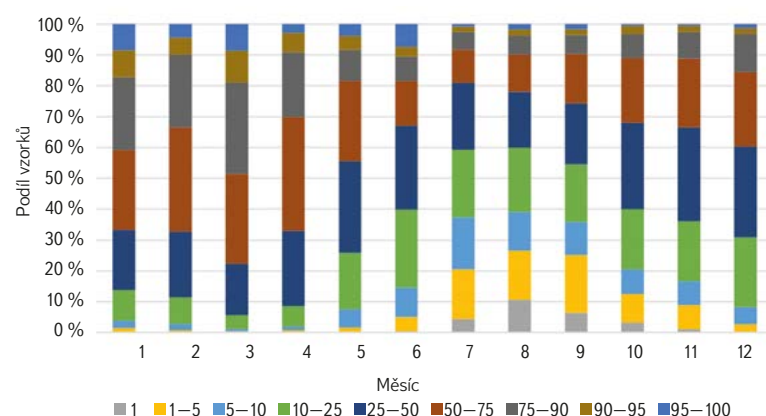
Sezonnost

Významným vlivem, který je potřeba vzít v úvahu, jsou sezonní výkyvy jak v průtocích, tak v jakosti. Četnost nízkých průtoků je obecně vyšší v letních měsících, zvýšené průtoky se pravidelně objevují v březnu a dubnu. Tomu odpovídá i četnost odběru vzorků podle percentilu v jednotlivých měsících. V grafu na obr. 4 vidíme četnost odebraných vzorků rozdělenou podle percentilu průtoku v době odběru na konkrétním profilu. Obr. 5 a 6 pak ukazují rozložení vzorků podle percentilů v jednotlivých měsících, resp. letech. Jednoznačně se zde potvrzuje vyšší četnost odběrů v době nejnižších průtoků v letních měsících.



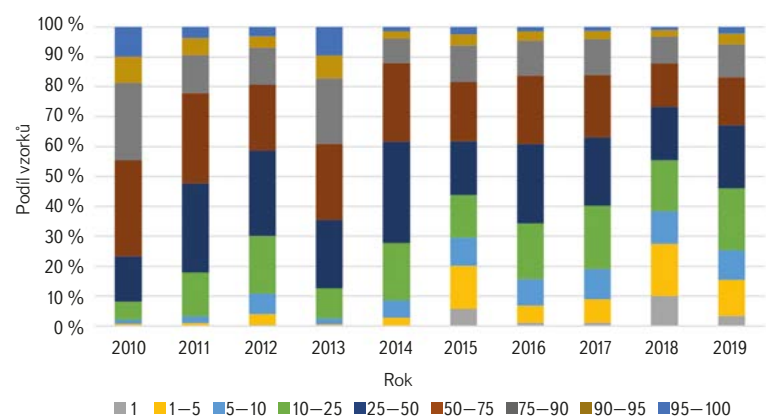
Obr. 4. Počet vzorků podle percentilu průtoku v době odběru

Fig. 4. Number of samples by flow percentile at the time of sampling



Obr. 5. Počet vzorků podle percentilu průtoku v době odběru podle jednotlivých měsíců

Fig. 5. Number of samples by flow percentile at the time of sampling in each month

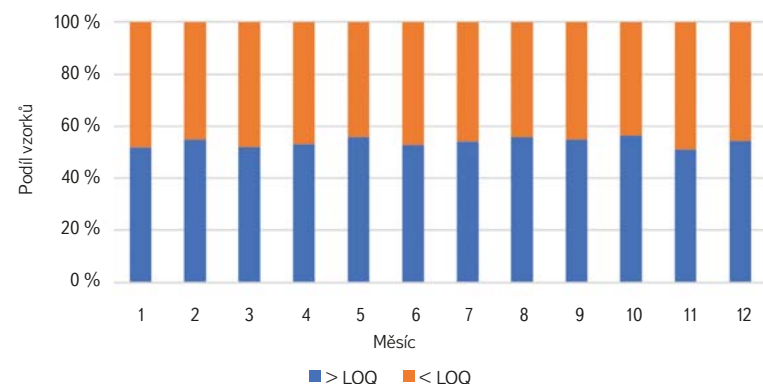


Obr. 6. Počet vzorků podle percentilu průtoku v době odběru podle jednotlivých let

Fig. 6. Number of samples by flow percentile at the time of sampling in each year

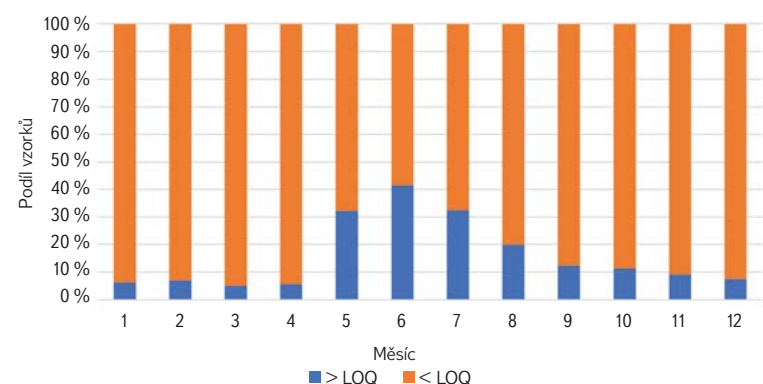
Sezonní výkyvy se rovněž týkají sledované jakosti. Potvrzeny byly vyšší koncentrace dusíku v zimě a fosforu v létě. Sezonní charakter má též výskyt pesticidů a některých jejich metabolitů. Dobře to dokládají grafy na obr. 7–9. Obr. 7 ukazuje výskyt metabolitů pesticidu alachlor (zakázán roku 2008) a metolachlor (povolen v době, kdy byla pořízována data). Vzhledem k tomu, že tyto látky, ač pravidelně stanovené, jsou v měřitelných hodnotách zachyceny pouze v některých případech, bylo potřeba pracovat i se záznamy pod mezí

stanovitelnosti (LOQ). Porovnání těchto dvou ukazatelů dokládá sezonní výskyt aktivně používané látky oproti konstantnímu výskytu metabolitů zakázané látky, a to jak u podílu záchytů, tak v jejich absolutní hodnotě.



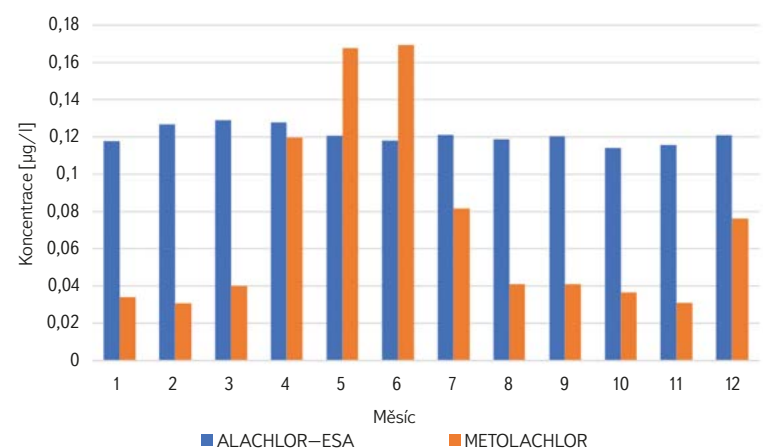
Obr. 7. Alachlor – ESA – počty záznamů pod a nad mezí stanovitelnosti v jednotlivých měsících

Fig. 7. Alachlor – ESA – numbers of records below and above the limit of quantification in each month



Obr. 8. Metolachlor – počty záznamů pod a nad mezí stanovitelnosti v jednotlivých měsících

Fig. 8. Metolachlor – numbers of records below and above the limit of quantification in each month



Obr. 9. Alachlor – ESA a Metolachlor – průměrné měřené koncentrace pro jednotlivé měsíce

Fig. 9. Alachlor – ESA and Metolachlor – average measured concentrations in each month

Vztah C-Q

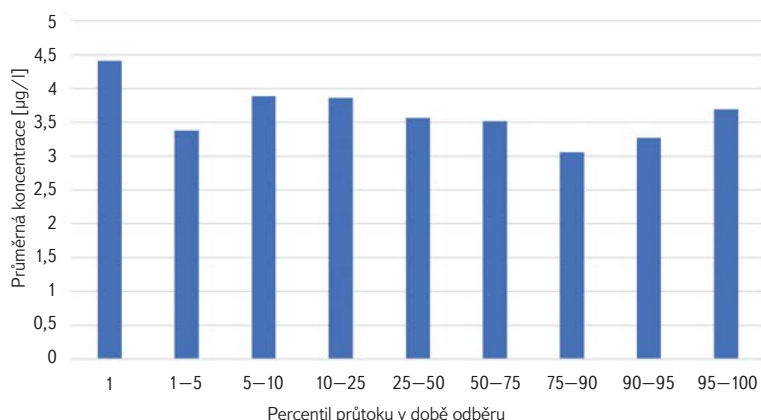
Pomocí metody C-Q slope můžeme vztahy mezi koncentrací a průtokem rozlišit na tři základní typy:

1. chemostázi, kde koncentrace zůstává víceméně stejná bez ohledu na průtok,
2. obohacení, kdy s rostoucím průtokem roste i koncentrace,
3. ředění, kdy s rostoucím průtokem koncentrace klesá.

Chemostáze

Chemostatické chování látek lze připsat dlouhodobým stálým zásobám v povodí a významnému vlivu podzemních vod.

Příkladem chemostáze může být v testovací datové sadě arsen, jehož koncentrace se v závislosti na průtoku příliš nemění, mírný nárůst sledujeme jen u extrémních epizod sucha a ani ten není příliš výrazný (graf na obr. 10).



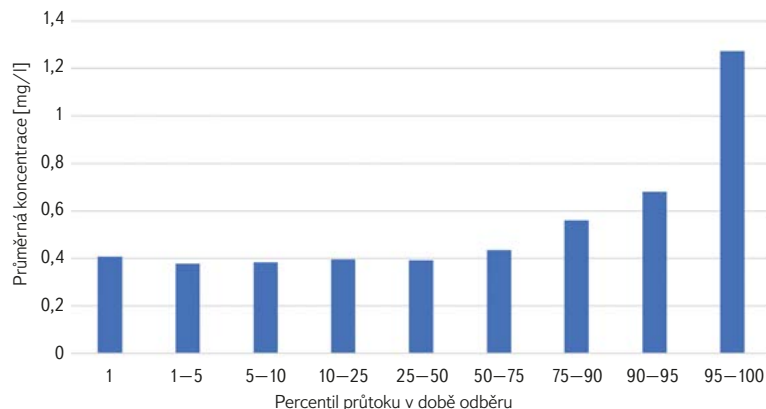
Obr. 10. Průměrné koncentrace arсенu (µg/l) podle kvantilu průtoku – ukázka chemostatického vztahu

Fig. 10. Average arsenic concentrations (µg/L) by flow percentile – example of chemostatic relationship

Obhacení

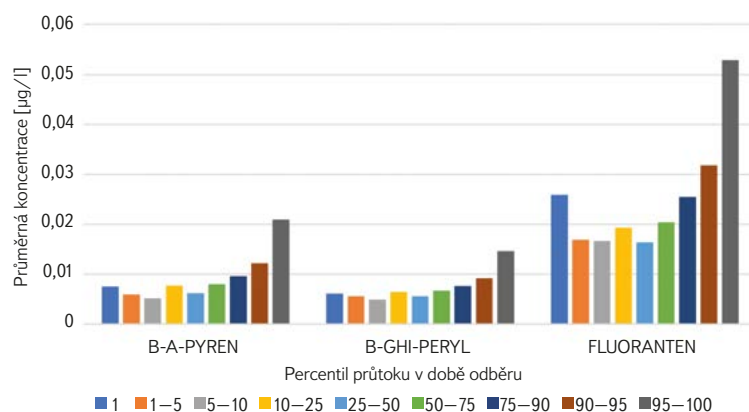
Obhacení je vztah, kdy s rostoucím průtokem roste i koncentrace. Typický je u látek vázaných na sediment a u těch, kde lze předpokládat výrazný vliv povrchového odtoku. Ze sledované množiny dat se ukázkový obraz obohacení objevuje u železa (obr. 11), jehož koncentrace jsou stále u podprůměrných a průměrných průtoků, s vyššími průtoky mírně stoupá a radikální několikanásobné navýšení nastává u extrémních průtoků.

Obdobný průběh lze sledovat u některých látek z kategorie polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) (obr. 12) – tedy stálost za běžných podmínek a místy až exponenciální nárůst s vyšším průtokem.



Obr. 11. Průměrné koncentrace železa (mg/l) podle kvantilu průtoku – ukázka obohacení

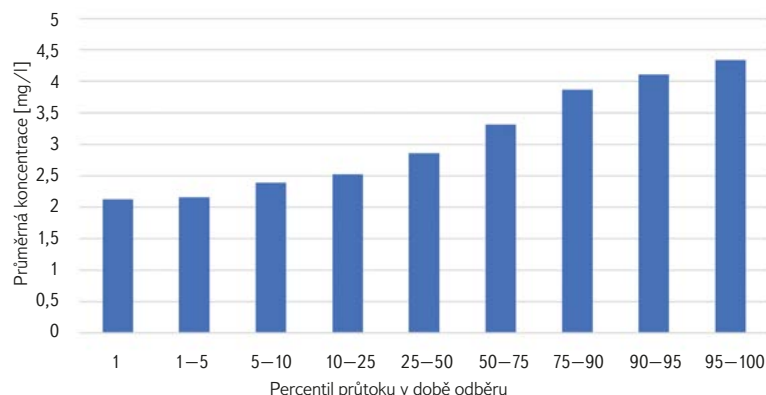
Fig. 11. Average iron concentrations (mg/L) by flow percentile – example of enrichment



Obr. 12. Průměrné koncentrace vybraných PAU (µg/l) podle kvantilu průtoku – ukázka obohacení

Fig. 12. Average concentrations of selected polycyclic aromatic hydrocarbons (µg/L) by flow percentile – example of enrichment

Poněkud odlišný obraz obohacení nacházíme u dusičnanového dusíku (obr. 13), kdy k nárůstu koncentrací dochází už u průměrných hodnot průtoků, naopak u extrémních průtoků je nárůst jen nepatrný.

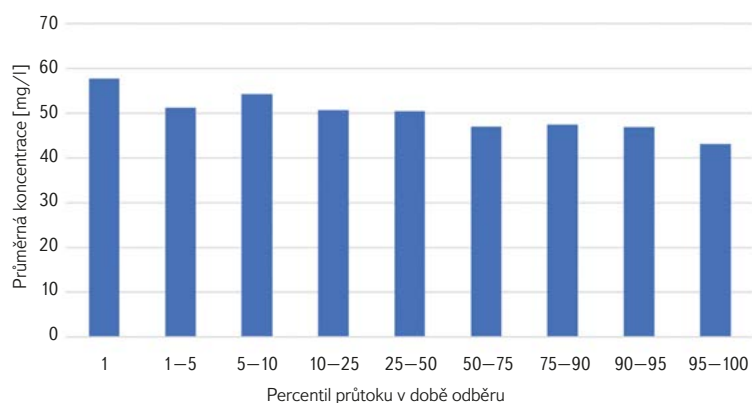


Obr. 13. Průměrné koncentrace dusičnanového dusíku (mg/l) podle kvantilu průtoku – ukázka jiného typu obohacení

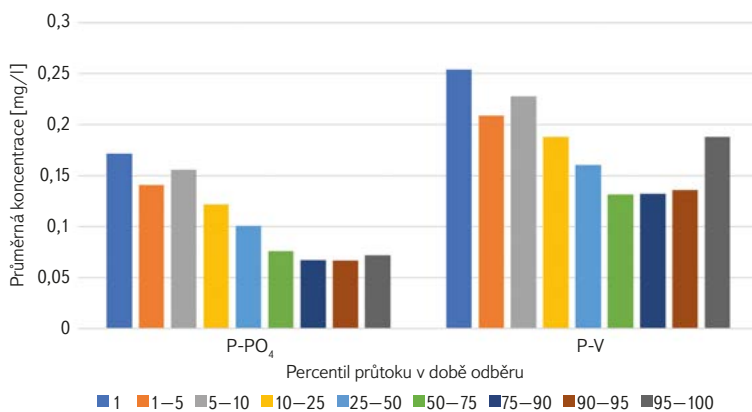
Fig. 13. Average nitrate nitrogen concentrations (mg/L) by flow percentile – example of another type of enrichment

Ředění

Vztah, kdy s rostoucím průtokem koncentrace klesá, může provázet látky vstupující do povrchových vod primárně z vod podzemních a jejich úbytek může znamenat snižující se podíl základního odtoku vůči povrchovému (např. vápník, obr. 14). V některých případech však slouží také jako ukazatel znečištění z bodových zdrojů, které je na hydrologické situaci nezávislé.



Obr. 14. Průměrné koncentrace vápníku (mg/l) podle kvantilu průtoku – ukázka ředění
Fig. 14. Average calcium concentrations (mg/L) by flow percentile – example of dilution



Obr. 15. Průměrné koncentrace fosforečnanového fosforu (ředění) a celkového fosforu (mg/l) (kombinace ředění a obohacení)
Fig. 15. Average concentrations of phosphate phosphorus (dilution) and total phosphorus (combination of dilution and enrichment) (mg/L) by flow percentile

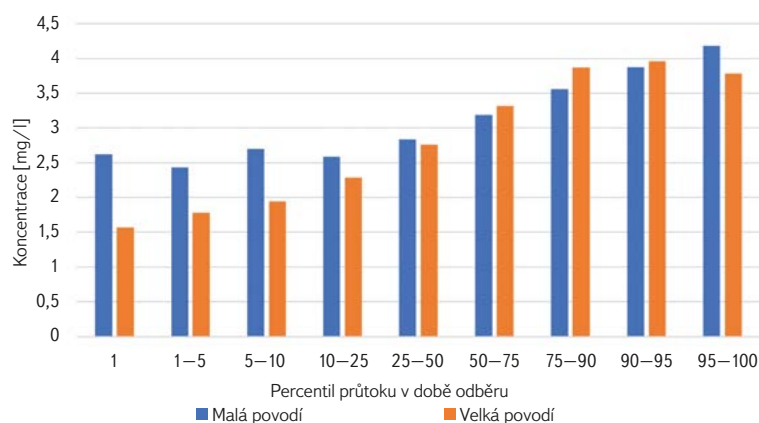
Kombinace

Výsledný graf může být kombinací několika faktorů, kdy extrémy lze nalézt na obou stranách. V grafu na obr. 15 vidíme klasický obrázek ředění v případě fosforečnanového fosforu v porovnání s grafem pro celkový fosfor, který při nižších průtocích fosforečnanový fosfor v podstatě kopíruje, v případě vysokých průtoků ale přibývá navýšení.

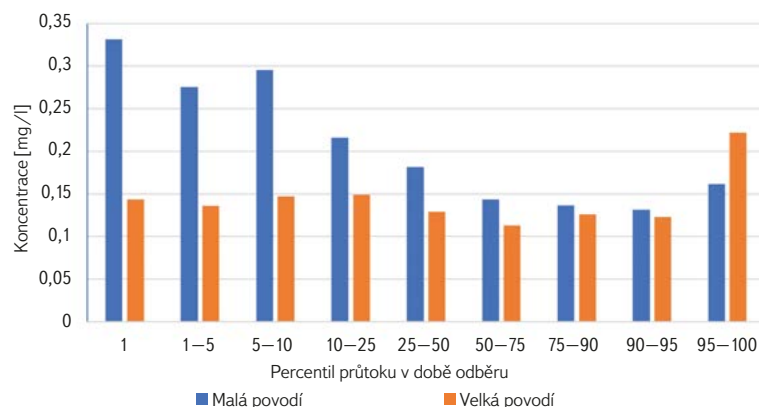
Vliv charakteristik povodí

Vlastnosti povodí zásadním způsobem ovlivňují vztah mezi hydrologií a jakostí. Základní charakteristiky – velikost, podíl zemědělství a podíl sídel – na využití půdy se ukázaly jako podstatné i v testovacím souboru. Následující grafy znázorňují tento vliv na příkladu živin.

Obr. 16 a 17 porovnávají hodnoty dusičnanového dusíku a celkového fosforu v malých (pod 500 km²) a velkých (nad 2 000 km²) povodích. Zatímco u průměrných a vyšších průtoků jsou koncentrace živin v malých a velkých povodích takřka identické, nízké průtoky znamenají zvýšené koncentrace živin zejména v malých povodích. U fosforu platí tato zákonitost pro velká i malá povodí, ale u malých je podstatně výraznější. V případě dusičnanového dusíku se při nízkých průtocích koncentrace ve velkých povodích dále snižují, zatímco v malých povodích zůstávají stejné jako při středních průtocích.

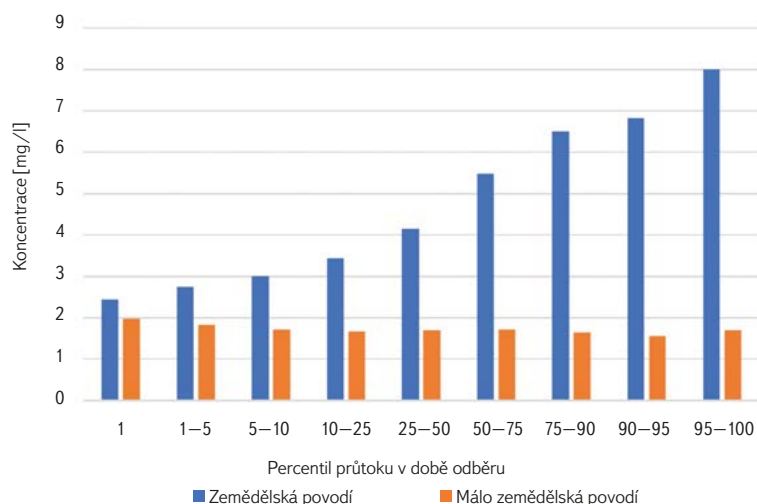


Obr. 16. Rozdíl C-Q slope pro dusičnanový dusík (mg/l) podle velikosti povodí
Fig. 16. Differences in the C-Q relationship for nitrate nitrogen (mg/L) by catchment size

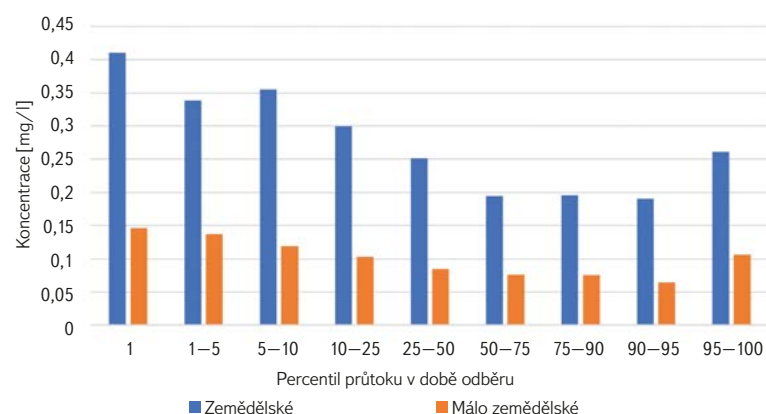


Obr. 17. Rozdíl C-Q slope pro celkový fosfor (mg/l) podle velikosti povodí
Fig. 17. Differences in the C-Q relationship for total phosphorus (mg/L) by catchment size

Ještě výraznější je rozdíl u povodí s vysokým a nízkým podílem orné půdy v povodí (obr. 18 a 19). Zatímco u celkového fosforu je tvar grafu víceméně stejný a liší se pouze maximálními hodnotami, které jsou v případě zemědělských povodí výrazně vyšší, u dusíku můžeme pozorovat zcela opačný tvar křivky. U povodí s dominantním podílem orné půdy se koncentrace dusičnanů zvyšují spolu s průtokem, naopak v povodích s nevýznamným podílem zemědělství zůstávají konstantní, nebo se dokonce snižují.

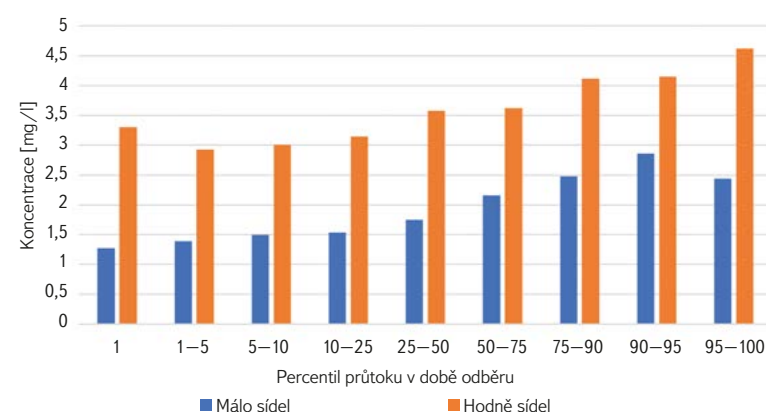


Obr. 18. Rozdíl C-Q slope pro dusičnanový dusík (mg/L) podle podílu orné půdy v povodí
Fig. 18. Differences in the C-Q relationship for nitrate nitrogen (mg/L) by proportion of arable land in the catchment

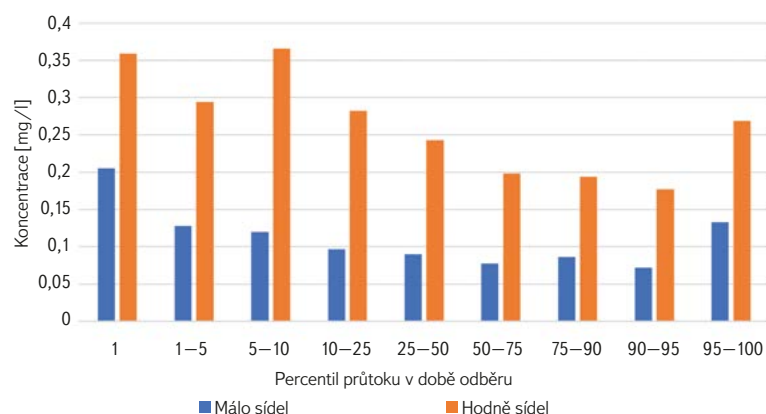


Obr. 19. Rozdíl C-Q slope pro celkový fosfor (mg/L) podle podílu orné půdy v povodí
Fig. 19. Differences in the C-Q relationship for total phosphorus (mg/L) by proportion of arable land in the catchment

Podíl sídel na využití území se v ukázkovém případě projevuje spíše celkovým zvýšením koncentrací než změnou tvaru křivky (grafy na obr. 20 a 21).



Obr. 20. Rozdíl C-Q slope pro dusičnanový dusík (mg/L) podle podílu sídel v povodí
Fig. 20. Differences in the C-Q relationship for nitrate nitrogen (mg/L) by proportion of urban development in the catchment



Obr. 21. Rozdíl C-Q slope pro celkový fosfor (mg/L) podle podílu sídel v povodí
Fig. 21. Differences in the C-Q relationship for total phosphorus (mg/L) by proportion of urban development in the catchment

DISKUZE

Zvolená jednoduchá metoda dobře ukazuje, jak široké spektrum otázek je možné pokládat a jaké aspekty vztahu hydrologických a jakostních parametrů lze sledovat. Pro podrobné vyhodnocení a učinění závěrů je ovšem nezbytné vzít do úvahy mnoho okolností, jež by bylo potřeba vždy ošetřit na základě konkrétní potřeby.

Pro porovnání je vhodné vybrat nezávislá (vzájemně se neobsahující) povodí. U analýzy charakteristik povodí je nutné provést důkladnější analýzu vnitřních korelací, např. hustoty osídlení a zemědělské aktivity. Zastoupení sídel bylo pro tuto analýzu omezeno na jejich podíl na využití území – počet obyvatel a struktura čištění odpadních vod by byly vhodnějším prediktorem. Práce s průměrnými denními průtoky neumožňuje zachytit dynamiku jednotlivých extrémních událostí, např. první splach při extrémním průtoku [13] nebo rozdíly ve vlivu suchého období podle délky jeho trvání.

Z hlediska živin se i na testovacích datech ukazuje mimo jiné vliv zemědělství na množství dusičnanů, který je tak výrazný, že se v závislosti na podílu zemědělství obrací dynamika vztahu – v zemědělských povodích převládá efekt obohacení, v oblastech bez zemědělství naopak ředění. Tento efekt ukazuje na pravděpodobnou kombinaci zdrojů, jež může být zachycena v komplexnějších modelech, jaké jsou popsány např. v článku [10], kde je odlišen efekt obohacení převládající v zemědělských povodích v zimě od efektu ředění, jež převládá ve všech typech povodí v létě. Zdá se, že podobný model by byl aplikovatelný v podmínkách ČR. Zároveň se ukazuje, že efekt obohacení při extrémně vysokých průtocích sice existuje, ale není výrazný. Malá povodí jsou více ohrožena v případě sucha.

Fosfor byl v prostředí ČR popsán řadou autorů, např. [13, 14]. Testovací data potvrzují, že z hlediska fosforu je dominantním vztahem ředění; obohacení se týká jen celkového fosforu za mimořádných průtoků. Zde by bylo vhodné se zaměřit na to, zda se efekt obohacení při vysokých průtocích týká všech typů povodí, nebo jen těch s vyšším zastoupením orné půdy. Nejvíce zranitelná jsou z hlediska fosforu malá povodí s hustou zástavbou a intenzivním zemědělstvím, kde suchá období mohou vést až k několikanásobnému zvýšení koncentrací. Detailnější analýzu by bylo možné udělat s podrobnějšími údaji o počtu obyvatel a způsobu hospodaření s odpadními vodami.

Podobné statistické metody lze aplikovat na všechny ukazatele, u nichž je k dispozici dostatečné množství dat. V literatuře jsou další látky zastoupeny podstatně méně než živiny. Z testovacích dat se dobře ukazuje pozitivní závislost koncentrací většiny PAU na průtoku, tedy obohacení, které je tím větší, čím

extrémnější je průtok. Tato závislost tak kopíruje závislost nerozpuštěných látek, ale i např. železa, tedy závislost na podílu povrchového odtoku. Za podrobnější průzkum by stálo porovnání vlivu zpevněných ploch oproti jiným druhům povrchů (např. orné půdy náchylné k erozi). Vzhledem k tomu, že závislost je poměrně stabilní, bylo by možné ji využít např. pro modelování koncentrací na základě korelací s průtokem, popř. s množstvím nerozpuštěných látek, a v terénu se soustředit na ověřující měření nebo lépe využít závislosti pro přesnější stanovení emisí, jež u prioritních látek vyžaduje Rámcová směrnice o vodách.

Zajímavé závěry – bohužel silně omezené (ne)dostupností dat – přináší zpracování výsledků u pesticidů. Vzhledem k četným nálezům pod mezí stanovitelnosti a k nejednotnosti mezí u různých měření se nabízí zahrnout i tato data a soustředit se na pravděpodobnost překročení meze stanovitelnosti.

Obecně lze říci, že vliv hydrologických podmínek je tak výrazný, že může zakrýt dlouhodobý pozitivní trend vývoje znečištění. Řada látek způsobujících nedosažení dobrého stavu je citlivá jak na extrémní srážkové události, tak zejména na epizody sucha.

Modely založené na C-Q vztahu lze s určitou mírou nepřesnosti využít pro výpočty při nedostatečném množství dat, např. i pro přesnější odhad látkového obsahu.

ZÁVĚR

Statistických metod umožňujících práci s velkými daty existuje mnoho a při vhodně zvolených otázkách i výběru dat přináší zajímavé informace. Podobné zpracování samozřejmě vždy doprovází určité zjednodušení a nemůže nahradit detailní analýzu studovaného povodí. Na druhou stranu statistické analýzy již nasbíraných dat jsou rychlé a levné a mohou poskytnout cenné podklady, např. pro analýzu zdrojů znečištění v povodí, pro modelování odpovědi na navrhovaná opatření nebo během plánování monitorovacích kampaní tak, aby při nejmenších nákladech poskytly co nejvíce informací.

Použitá datová sada a postup zpracování se i přes četná úskalí ukázaly jako funkční.

Z použitých dat a postupů vyplývá, že hydrologické poměry mají na jakost povrchových vod zásadní vliv. Letní epizody sucha významně zvyšují koncentrace fosforu, a to více na drobných tocích než u velkých vodních toků s rozsáhlým povodím. Mírné až střední zvýšení odtoku se projevuje zvýšenými koncentracemi dusičnanů zejména v zimě, avšak pouze u povodí s významným zastoupením orné půdy; v povodích bez orné půdy zůstávají konstantní. Koncentrace látek ze skupiny PAU se velmi výrazně zvyšují při vysokých až extrémních průtocích. Skupina pesticidů by si zasloužila vlastní podrobnější průzkum.

Jednoduché zobrazení ukazuje na významnost vztahů jak v oblasti živin, tak i jiných ukazatelů. V příštím výzkumu by bylo vhodné se zaměřit na další nebo přesnější charakteristiky povodí (např. na počet obyvatel a jejich napojení na veřejnou kanalizaci namísto nepřesného podílu zastavěné plochy) a věnovat se podrobněji ostatním ukazatelům – zejména ze skupiny pesticidů a farmak – tam, kde existuje dostatečný počet měření za různých podmínek.

Poděkování

Článek byl realizován v rámci projektu Technologické agentury ČR č. S502030040 „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku“ (<https://www.perun-klima.cz/>). Děkujeme podnikům povodí a Českému hydrometeorologickému ústavu za poskytnutí dat.

Literatura

- [1] KAŠPÁREK, L., KOŽÍN, R. Změny srážek a odtoků na povodích v ČR v období intenzivního oteplování. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(2), s. 17–27. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2022.01.002>
- [2] PRCHALOVÁ, H., RICHTER, P., VYSKOČ, P., PICEK, J., DUBSKÁ, M., KOZLOVÁ, M. Hodnocení trendů v koncentracích chemických a fyzikálně-chemických ukazatelů stavu povrchových vod. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2023, 65(3), s. 4–16. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2023.03.002>
- [3] GODSEY, S. E., KIRCHNER, J. W., CLOW, D. W. Concentration–Discharge Relationships Reflect Chemostatic Characteristics of US Catchments. *Hydrological Processes*. 2009, 23(13), s. 1 844–1 864. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.7315>
- [4] BIEROZA, M. Z., HEATHWAITE, A. L., BECHMANN, M., KYLLMAR, K., JORDAN, P. The Concentration–Discharge Slope as a Tool for Water Quality Management. *Science of the Total Environment*. 2018, 630, s. 738–749. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.256>
- [5] EBELING, D. M., DUPAS, R., ABBOTT, B., KUMAR, R., EHRHARDT, S., FLECKENSTEIN, J. H., MUSOLFF, A. Long-Term Nitrate Trajectories Vary by Season in Western European Catchments. *Global Biogeochemical Cycles*. 2021, 35. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2021GB007050>
- [6] MUSOLFF, A., SCHMIDT, C., SELLE, B., FLECKENSTEIN, J. H. Catchment Controls on Solute Export. *Advances in Water Resources*. 2015, 86, Part A, s. 133–146. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.026>
- [7] MOATAR, F., ABBOTT, B. W., MINAUDO, C., CURIE, F., PINAY, G. Elemental Properties, Hydrology, and Biology Interact to Shape Concentration–Discharge Curves for Carbon, Nutrients, Sediment, and Major Ions. *Water Resources Research*. 2017, 53(2), s. 1 270–1 287. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2016WR019635>
- [8] HRACHOWITZ, M., BENETTIN, P., BREUKEL, B., FOVET, O., HOWDEN, N. J. K., RUIZ, L., VAN DER VELDE, Y., WADE, A. J. Transit Times – The Link between Hydrology and Water Quality at the Catchment Scale. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*. 2016, 3. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/wat2.1155>
- [9] KNAPP, J. L. A., FREYBERG, J., STUDER, B., KIEWIET, L., KIRCHNER, J. W. Concentration–Discharge Relationships Vary among Hydrological Events, Reflecting Differences in Event Characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2020, 24(5), s. 2561–2576. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/hess-2019-684>
- [10] MINAUDO, C., DUPAS, R., GASCUEL-ODOUX, CH., ROUBEIX, V., DANIS, P.-A., MOATAR, F. Seasonal and Event-Based Concentration–Discharge Relationships to Identify Catchment Controls on Nutrient Export Regimes. *Advances in Water Resources*. 2019, 131. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103379>
- [11] Směrnice 2000/60/ES Evropského parlamentu a Rady ze dne 23. října 2000 ustavující rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky. *Úřední věstník Evropských společenství*, 2000.
- [12] SÝKORA, F., SEMERÁDOVÁ, S., KODEŠ, V., SUCHAROVÁ, J., VERLÍKOVÁ, N., MIČANÍK, T., ROZTOČILOVÁ, H. Atmosférická depozice polycyklických aromatických uhlovodíků v pilotním povodí Výrovky a městských oblastech Prahy a Ostravy. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2026, 68(1), s. 22–33. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2025.11.004>
- [13] DURAS, M. et al. Vývoj emisí fosforu v povodí vodárenské nádrže Švihov. In: *Sborník příspěvků 16. biennální konference CzWA 17.–19. září 2025*. Litomyšl, 2025, s. 288–295.
- [14] ROSENDORF, P., PICEK, J., RYŠAVÝ, S., JÁCHYMOVÁ, B., HANÁK, R. et al. Jaké zdroje fosforu jsou klíčové pro zatížení hraničního profilu Hřensko/Schmilka na Labi? Modelování významnosti zdrojů pomocí modelu VSTOOLS.EUTRO-NEO. In: *XX. Konference České limnologické společnosti a Slovenskej limnologickéj spoločnosti. Sborník příspěvků. 23.–27. června 2025, Frymburk*, s. 12–13.

Autorka

Mgr. Silvie Semerádová

✉ silvie.semeradova@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-6633-9424

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha (Česká republika)

Príspevek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.05.004

ISSN 0322-8916/© 2026 Autorka. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

THE IMPACT OF THE HYDROLOGICAL SITUATION ON WATER QUALITY – ASSESSMENT OPTIONS

SEMERÁDOVÁ, S.

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague (Czech Republic)

Keywords: surface water – water quality – water quantity – concentration–discharge relationship – statistical methods

Changing climatic and hydrological conditions also affect the quality of water in streams and reservoirs. A number of studies have been published on this topic, mostly focused on specific areas and situations. The Czech Republic has sufficiently long and detailed series of monitoring of both flows and quality to enable detailed data analysis to trace the prevailing types of relationships depending on the characteristics of the catchment area and sources of pollution. Selected procedures were applied to a test data set from the last decade.

For the purpose of the article, long-term quality monitoring profiles were selected, to which it was possible to assign reasonably accurate data on flow at the time of measurement as well as general characteristics of the catchment area. Data on measured concentrations of the monitored determinands were compared with the hydrological situation quantified using the statistical frequency of flow occurrence on the day of sampling against a long-term time series.

The relationships between flow and concentrations of selected substances can be divided into three categories: chemostasis, when concentrations do not change or fluctuate independently of flow, enrichment, when concentrations increase with increasing flow, and dilution, when concentrations decrease with increasing flow. Which of these relationships prevails, or whether a combination of several relationships is manifested, is determined not only by the properties of the substances, but also by the characteristics of the catchment area. In some cases, it is precisely on the basis of the relationship that the predominant source of pollution in the catchment area can be determined.

The aim of the article is to point out the potential of statistical methods for optimizing monitoring campaigns and evaluating the decisive influences and characteristics of the catchment area.

