

VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

VTEI / 2026 / 4



4 / Propojení kritických bodů s indikátorem přívalových povodní

12 / Predikce zabezpečení vodních zdrojů v ČR k roku 2050

42 / Predikce BSK₅ na odtoku z čistírny odpadních vod pomocí strojového učení

Psali jsme před 60 lety

Ve VTEI č. 3 v roce 1966 vyšel článek s názvem „Jezy na Sázavě“. Jeho autorem byl Inž. Zdeněk Teplý z firmy KVRIS-Praha.

Před 50 lety voroplavba na Sázavě pomalu ustávala. Jezy sloužily od té doby hlavně k pohonu mlýnů. V nedávné době však mlýny byly zrušeny a o jezy se nikdo nestaral. Reálné právo váže sice udržovací povinnost na příslušnou nemovitost, avšak noví nájemci mlýnských budov, kterých užívají jako skladů obilí, šrotovníků nebo jako obývacích prostor, nemají zájem ani na získávání vodní energie a samozřejmě ani dobrém stavu jezů. Jezy se proto již delší dobu vůbec neudržují, vodu nevzdouvají a z hydrotechnického hlediska nevytvářejí ani spádový stupeň, který by zajišťoval setrvalý stav hladiny.

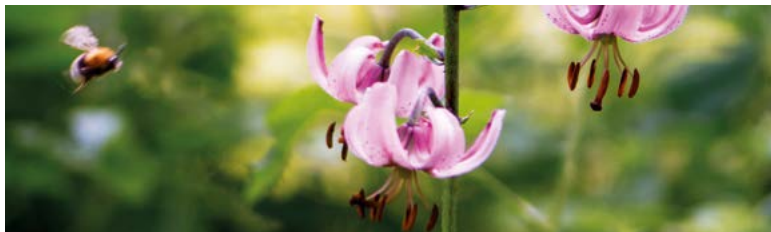
Zanikání jezů má za následek nenahraditelné škody. Podélným vymíláním koryta zapadá zához do prohlubní poblíž břehů a vytvoří již oporu břehového opevnění. Hladina spodní vody se sníží a pozemky u břehu ztrácejí na užitkovosti, protože jsou vlastně odvodněny. Ve studnách voda zapadne a studny se musí prohlubovat. Jezové zdrže jsou bez vody. Z uvedeného je patrné, jak důležitá a nutná je údržba jezů, na kterou by se mělo v budoucnu více pamatovat.

Z archivu VÚV TGM



Topografická mapa S-1952 z roku 1956, aplikace Archiv (<https://ags.cuzk.gov.cz/archiv/>).

Obsah



3 Úvod

4 Propojení kritických bodů s indikátorem přívalových povodní

Petr Šercl, Martin Pecha, Vojtěch Svoboda, Tomáš Vlasák, Karel Drbal,
Martin Caletka, Pavla Štěpánková



12 Predikce zabezpečení vodních zdrojů v ČR k roku 2050

Petr Vyskoč, Hana Prchalová, Marie Kozlová, Jiří Pícek, Adam Vízina



22 Vývoj stavu útvarů povrchových vod podle chemických a fyzikálně-chemických ukazatelů

Hana Prchalová, Petr Vyskoč, Marie Kozlová

32 Vliv hydrologické situace na jakost vod – možnosti hodnocení

Silvie Semerádová



42 Predikce BSK₅ na odtoku z čistírny odpadních vod pomocí strojového učení

Nassima Lekouaghet, Lakhdar Bouragbi, Brahim Mahfoud

54 Rozhovor s Ing. Jiřím Jílkem, projektantem a stavitelem vodních staveb

Tomáš Hrdinka



Vážení čtenáři,

v závěru letních prázdnin si vodohospodářská i širší odborná veřejnost připomene Světový den jezer, který připadá na 27. srpna. Tato nová mezinárodní akce, vyhlášená Valným shromážděním OSN v prosinci 2024, upozorňuje na význam jezer, nádrží a souvisejících vodních ekosystémů pro zásobování vodou i na biodiverzitu, stabilitu krajiny, rekreaci a jejich hospodářské využití. Jezera a vodní nádrže zároveň citlivě reagují na klimatickou změnu, znečištění, proměny využívání krajiny i rostoucí tlak společnosti na vodní zdroje. Péče o ně proto vyžaduje propojení hydrologie, limnologie, jakosti vod, územního plánování, technických opatření i dlouhodobé správy krajiny.

Právě tato šíře vodohospodářských témat je dobře patrná také v aktuálním čísle VTEI, jež otevírá článek Petra Šercla a kolektivu autorů zaměřený na zpřesnění odhadu rizika přívalových povodní v aplikaci Indikátor přívalových povodní, kterou využívá ČHMÚ. Navržené úpravy metodiky nově zohledňují míru urbanizace území a kritické body soustředěného odtoku, což umožňuje lépe postihnout riziko lokálního zatopení zejména v intravilánu obcí.

Druhý odborný článek Petra Vyskoče a jeho kolegů se zabývá celostátním hodnocením zabezpečení odběrů vody a minimálních průtoků ve výhledu k roku 2050 v podmínkách klimatické změny a očekávaného socio-ekonomického vývoje. Výsledky ukazují na potenciální rizika u části vodních nádrží i útvarů podzemních vod a zdůrazňují význam dlouhodobého plánování při zajišťování vodních zdrojů.

Následující příspěvek autorského kolektivu vedeného Hanou Prchalovou se věnuje hodnocení vývoje stavu povrchových vod a míry pokroku při dosahování dobrého stavu. Pomocí indexu nesouladu sleduje změny vybraných ukazatelů jakosti vod a přináší údaje o tom, že zatímco u části látek dochází ke zlepšování, jiné ukazatele dlouhodobě stagnují nebo se zlepšují jen velmi pomalu.

Článek Silvie Semerádové se zaměřuje na vztah mezi průtokovými poměry a koncentracemi vybraných ukazatelů jakosti vody. Dokazuje, že statistické hodnocení dlouhodobých dat může pomoci odlišit různé typy vazeb mezi průtokem a znečištěním, lépe identifikovat rozhodující vlivy v povodí a podpořit cílenější plánování monitoringu.

Zahraniční příspěvek autorky Nassimy Lekouaghet a jejích kolegů představuje využití moderních metod strojového učení při predikci hodnot BSK₅ na odtoku z čistírny odpadních vod. Článek prezentuje datově orientované přístupy a nástroje umělé inteligence, jež nacházejí své místo i ve vodohospodářské praxi, zejména tam, kde mohou přispět k lepšímu vyhodnocování provozních dat a podpoře rozhodování.

Srpnové číslo uzavírá rozhovor s Jiřím Jílkem, jenž čtenářům nabízí osobnější pohled na vodohospodářskou a krajinářskou praxi. Rozhovor se dotýká revitalizací, práce s vodou ve veřejném prostoru, významu detailů i zkušeností získaných při realizaci konkrétních projektů. Připomíná, že dobré vodohospodářské řešení není pouze otázkou výpočtu a technického návrhu, ale také porozumění místu, materiálu, krajině a lidem, kteří ji užívají.

Věřím, že srpnové číslo VTEI nabídne čtenářům pestrý pohled na aktuální vodohospodářská témata – od hydrologických extrémů přes klimatickou změnu, jakost vod a moderní datové metody až po praktické zkušenosti z terénu. Budeme rádi, pokud v něm najdete podněty pro vlastní odbornou práci, další diskuzi i širší přemýšlení o roli vody v krajině a společnosti.

Za redakci VTEI
Ing. Josef Nistler

Propojení kritických bodů s indikátorem přívalových povodní

PETR ŠERCL, MARTIN PECHA, VOJTĚCH SVOBODA, TOMÁŠ VLASÁK, KAREL DRBAL, MARTIN CALETKA, PAVLA ŠTĚPÁNKOVÁ

Klíčová slova: přívalové povodně — riziko povodní — Flash Flood Indication (FFI) — kritické body — urbanizace — nowcasting

ABSTRAKT

Príspevek se zabývá problematikou zpřesnění odhadu nebezpečí přívalových povodní prostřednictvím inovace aplikace Indikátor přívalových povodní (Flash Flood Indicator, dále FFI), který je využíván v předpovědní povodňové službě Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Dosavadní přístup FFI vycházel především z hodnocení nebezpečí stanoveného na základě porovnání odtokové odezvy a prahových hodnot odvozených od teoretických průtoků s danou dobou opakování, přičemž expozice a zranitelnost byly uvažovány pouze implicitně. V článku je navrženo rozšíření metodiky o explicitní zohlednění těchto složek rizika prostřednictvím dvou hlavních přístupů: (i) úpravy prahových hodnot nebezpečného odtoku v závislosti na míře urbanizace území a (ii) začlenění kritických bodů (míst potenciálního vstupu drah soustředěného odtoku do urbanizovaných lokalit) a jejich přispívajících ploch do výpočtů FFI.

Na základě analýzy vybraných srážkových epizod z let 2023–2024 bylo prokázáno, že snížení prahových hodnot v urbanizovaných oblastech vede k realističtějšímu odhadu míry rizika lokálního zatopení, zejména v intravilánu obcí. Současně bylo ukázáno, že zahrnutí kritických bodů, definovaných jako místa soustředěného odtoku na rozhraní extravilánu a intravilánu, významně zlepšuje identifikaci lokalit se zvýšeným rizikem, které nejsou dostatečně zachyceny v polygonové síti 3 × 3 km. Výsledky dále potvrzují zásadní vliv kvality vstupních meteorologických dat – především radarových odhadů srážek – na přesnost výsledného hodnocení rizika. Navržené úpravy představují krok od hodnocení samotného nebezpečí ke komplexnějšímu vyjádření reálného rizika, jež zohledňuje prostorovou variabilitu expozice a zranitelnosti. Článek zároveň identifikuje hlavní limity současného přístupu a formuluje doporučení pro další vývoj systému FFI, zejména v oblasti zpřesnění meteorologických vstupů a adaptivního nastavení prahových hodnot.

ÚVOD

Přívalové povodně mohou způsobit významné materiální škody i ztráty na životech. Vznikají následkem rychlého odtoku vody vyvolaného intenzivními srážkami většinou na menším území. Srážky spadlé na území o velikosti nejčastěji do několika km² s dobou trvání v řádu jednotek až desítek minut zpravidla nevyvolají přívalovou povodeň, ale pouze rychle se tvořící povrchový odtok z okolních pozemků. Ten může způsobovat lokální zatopení níže ležících míst a objektů. Pokud však přívalové srážky trvají déle a zasáhnou větší území, povrchový odtok se koncentruje do údolí stálých vodotečí a při souběžném zasažení vícero povodí menších vodních toků může pod jejich soutokem vyvolat přívalovou povodeň, která postihne i obce ležící níže po toku.

Výskytu přívalových povodní v různých částech světa a jejich katastrofálním následkům je věnována mediální pozornost. Z Evropy je možné zmínit povodně z července 2021 v Německu na řece Ahr (180 obětí na životech) a z října 2024 v okolí Valencie ve Španělsku v povodí řeky Turia (232 obětí). Vysoký počet obětí v případě povodní v Německu byl způsoben chybným vyhodnocením situace ze strany obyvatelstva, kdy meteorologické prognózy byly sice správné a více-méně přesné, ale hydrologická odezva a zejména její dopady byly podceněny, a tudíž chybělo i potřebné varování před extrémní povodní [1]. Ve Španělsku šlo primárně o pozdní varování ze strany samosprávy a všeobecně o celkovou nepřipravenost krizového systému, infrastruktury a obyvatelstva [2].

Na území České republiky (ČR) se v poslední době přívalové povodně většího územního rozsahu a extremity vyskytly např. 7. června 2020 ve večerních hodinách na Uničovsku a části Šumperska [3], případně 29. června 2022 večer v Pošumaví v povodí Blanice na Zlatém potoce [4]. Kulminační průtoky obou povodní dosahovaly doby opakování cca 50 let.

Včasné varování před přívalovými povodněmi je často velmi obtížné. Rozlišení meteorologických modelů a složitá fyzika atmosféry u konvektivních bouří neumožňují přesné určení místa výskytu srážek s nebezpečnými úhrny. U extrémních srážek většího územního rozsahu je pravděpodobnost úspěšné předpovědi vyšší. Meteorologické modely však predikují hodnoty některých parametrů (např. CAPE – konvektivní dostupná potenciální energie), z nichž je možné dedukovat obecné nebezpečí výskytu přívalových srážek v dané (větší) oblasti. Nejistota předpovědi často přetrvává i v den očekávané události. Variabilita jednotlivých výstupů předpovědních modelů je vysoká, což komplikuje územní specifikaci meteorologických či hydrologických výstrah. Klíčovým faktorem ovlivňujícím odtok je také nasycení půdy z předchozích srážek, jehož vyšší hodnoty snižují práh potenciálně nebezpečných srážkových úhrnů.

Pro přesnější predikci přívalových povodní je proto nutné využívat data z meteorologických radarů. Z aktuálního vývoje srážkové významné oblačnosti v čase a prostoru se počítá propagace této oblačnosti v horizontu cca 30 minut až hodiny. Tato krátkodobá předpověď, která na základě pohybu srážkové oblačnosti a výškového proudění za poslední časový interval vypočítá následné pozice této srážkové oblačnosti v daném intervalu, se nazývá nowcasting. Metoda nowcastingu, jež je nyní využívána v ČHMÚ, posouvá srážkovou oblačnost v čase bez jakékoli změny její struktury (intenzity deště), což je zatím největší omezení této metody krátkodobé předpovědi.

Informace o aktuální nasycenosti půdy a aktuálním vývoji srážkové oblačnosti používá FFI, který slouží ke krátkodobé predikci nebezpečí lokálního zatopení a vzniku přívalových povodní. Tento nástroj je v předpovědní službě ČHMÚ využíván již několik let a od roku 2017 prošel významným vývojem [5]. Zkušenosti z provozu FFI v roce 2022 a částečně v roce 2023 jsou analyzovány a komentovány v článku [4].

Nebezpečí vzniku přívalových povodní a lokálního zatopení doposud nebylo v systému FFI příliš svázáno s rizikem, které vedle nebezpečí zahrnuje i prvky expozice a zranitelnosti. Výzkumný projekt, za jehož podpory vznikl tento článek, si kladl za jeden z cílů prvky expozice a zranitelnosti do systému FFI zahrnout, a to zejména využitím nově odvozených lokalit kritických bodů a jejich přispívajících ploch v celé ČR. Kritické body, jako jsou průsečíky drah soustředěného odtoku s hranicí intravilánu, představují místa, kde se koncentruje projev nebezpečí z přívalových srážek a současně je možné hovořit o riziku (škod, ztrát na životech a zdraví obyvatel) v urbanizované ploše.

V článku jsou na vybraných událostech přívalových povodní ukázány stávající možnosti systému FFI ohledně jejich predikce. U lokálního zatopení jsou rozebírány možnosti úpravy parametrů pro stanovení kritických prahů nebezpečného odtoku a využití kritických bodů pro posílení prvků zranitelnosti a expozice ve výpočtech FFI. U vybraných událostí je na provedených resimulacích zhodnoceno zahrnutí upravených prahů kritického odtoku a vrstvy kritických bodů.

METODIKA

Odhad rizika v Indikátoru přívalových povodní

Riziko je nejčastěji vyjádřeno mírou pravděpodobnosti výskytu nežádoucího jevu a nepříznivých dopadů na životy, zdraví, majetek nebo životní prostředí. Obecně riziko vzniká spolupůsobením nebezpečí, zranitelnosti a expozice, tj. doby, po kterou nebezpečí působilo.

$$R = f(\text{Nebezpečí}, \text{Expozice}, \text{Zranitelnost}) \quad (1)$$

Riziko je tím větší, čím delší je doba expozice, tj. čím delší je doba, po kterou je objekt vystaven nebezpečí, a čím větší je jeho zranitelnost.

Z pravděpodobnostního hlediska je riziko definováno jako n -tice vektorů [6]:

$$R_i \equiv (S_{c_i}, P_i, D_i), i = 1, \dots, n \quad (2)$$

kde:

S_c	je	scénář nebezpečí
P		pravděpodobnost výskytu scénáře nebezpečí
D	jsou	následky (poškození, škoda), vyjádřené ve vhodných jednotkách

Všechny tyto veličiny jsou časově závislé, neboť jak scénář nebezpečí, tak pravděpodobnost jeho výskytu a škoda se mohou v čase měnit. V souladu s uvedenou obecnou definicí je možné riziko určit jako spojitou funkci podle vztahu:

$$R(D) = \int_0^\infty (D(u|O) \cdot g(u) \cdot du) \quad (3)$$

kde:

$D(u O)$	je	funkce následků
u		kvantifikátor události závislý na vektoru opatření a rozhodnutí
O		výška ochranné hráze podél toku, kapacita svodného průlehu, včasná evakuace apod., jež ovlivňují následky extrémní události

Funkce $g(u)$ představuje hustotu pravděpodobnosti výskytu události (scénáře nebezpečí) s následky $D(u|O)$.

K vyjádření rizika v rámci nástroje – Indikátoru přívalových povodní – byl uplatněn jednoduchý koncepční model, který vychází ze vztahu (1). V kontextu problematiky přívalových povodní a pro vyšší srozumitelnost textu jsou jednotlivé komponenty rizika zavedeny následovně:

- **Nebezpečí (hazard):** je stav (hrozba nebo jev) s potenciálem způsobit nežádoucí následky. Ve sledovaném kontextu se jedná o přívalovou povodeň nebo lokální zatopení jako následky zejména velmi intenzivního deště, příp. porušení hráze vodní nádrže (zvláštní povodně). Tyto jevy mohou způsobit záplavy, poškodit budovy, infrastrukturu a ohrozit životy.

Indikátor přívalových povodní (FFI) počítá pravděpodobnou odtokovou odezvu na již spadlé, právě padající či očekávané srážky, a to:

- v systému povodí a říčních úseků, kde v každém dílčím povodí je v místě závěrového profilu odvozen průběh odtokové odezvy v čase; výstupem je odhad charakteristik nebezpečí, tj. přívalové povodně pro obce s rozšířenou působností,
- v pravidelné polygonové síti 3×3 km, kde je odvozena velikost maximálního specifického odtoku v daném polygonu; výstupem je odhad charakteristik nebezpečí lokálního zatopení pro obce s rozšířenou působností.

Kombinací charakteristik obou složek nebezpečí, lokálního zatopení a přívalové povodně, je odvozena míra tzv. „souhrnného“ nebezpečí přívalové povodně.

Kulminační průtok či maximální specifický odtok je porovnán s teoretickou hodnotou průtoku (specifického odtoku) s dobou opakování 100 let a na základě stanovených prahových hodnot se určí míra nebezpečí přívalové povodně (v systému povodí) a lokálního zatopení (v polygonové síti). Míra nebezpečí je klasifikována podle teoretické doby opakování daného jevu bez ohledu na lokalitu výskytu. Výsledkem je vyjádření nebezpečí jevu ve čtyřstupňové škále {0, 1, 2, 3}.

- **Expozice (exposure):** expozice popisuje, do jaké míry (resp. po jakou dobu) jsou lidé, infrastruktura, majetek nebo jiné hodnotné prvky vystaveny nebezpečí. Jde o obyvatele, domy, silnice, infrastrukturu nebo zemědělskou půdu, které se nacházejí v oblasti vystavené rozlivům z přívalových povodní či lokálnímu zatopení. Např. domy v blízkosti vodního toku, kde nejsou dostatečné protipovodňové zábrany, nebo nízko položené oblasti v obcích bez dostatečných odvodňovacích systémů jsou více vystaveny uvedenému nebezpečí.

- **Zranitelnost (vulnerability):** zranitelnost představují podmínky dané fyzickými, sociálními, ekonomickými a environmentálními faktory či procesy, jež zvyšují vnímavost/náchylnost jednotlivce, komunity, hmotného majetku nebo systémů vůči dopadu nebezpečí. V případě povodní zranitelnost může znamenat:

- málo odolné budovy vůči účinkům (proudící) vody,
- chybějící nebo nedostačující protipovodňové plány či opatření,
- nedostatečně funkční odvodňovací systémy v zástavbě, např. malá kapacita mostů, propustků či kanalizace,
- nedostatečná informovanost obyvatel o potenciálním ohrožení či aktuálním riziku.

V rámci nástroje FFI jsou vlastnosti území dané expozicí a zranitelností určující pro vyjádření rozdílu mezi intravilánem a extravilánem. Jak pro klasifikaci expozice, tak i pro zranitelnost je ve výsledku uplatněna dvoustupňová škála {0, 1}, v logice:

Expozice:

Intravilán {1}

Extravilán {0}

Zranitelnost:

Intravilán {1}

Extravilán {0}

(4)

Zastavěné území (intravilán) je tedy v systému FFI klasifikováno maximálním stupněm. Riziko se tak stává funkcí samotného nebezpečí s tím, že expozice a zranitelnost jsou uvažovány jako (nenulové) konstanty. V tomto případě tudíž platí:

$R = f(\text{Nebezpečí})$

(5)

Míra nebezpečí, a tím i rizika, roste s dobou opakování jevu, např. povodeň s dobou opakování 100 let představuje větší nebezpečí než povodeň s $N = 10$ let. Ukázalo se však, že míru nebezpečí je nutné posuzovat odlišně v extravilánu a v intravilánu. V územích s vyšším podílem urbanizovaných ploch úměrně roste podíl odtoku vody ze srážek, tj. potenciálně nebezpečný odtok nastává s vyšší frekvencí. Zároveň se významně zvyšuje pravděpodobnost větší expozice a zranitelnosti, a proto potenciální nebezpečí, které představuje v extravilánu 100letá povodeň, nastává v intravilánu s větší četností.

Z uvedeného je zřejmé, že stále trvá potřeba zpřesnění zranitelnosti či expozice pro konkrétní místa s takovou podrobností, aby bylo možné nastavit prahy nebezpečného odtoku pro každé konkrétní povodí či říční úsek, příp. polygon, v systému FFI. Pro nebezpečí lokálního zatopení byl proto navržen jednoduchý princip, který zohledňuje podíl urbanizovaných ploch na míře nebezpečí, a to stanovením nižších prahových hodnot vůči velikosti 100letého specifického odtoku:

$T_u = T_{100} + (T_0 - T_{100}) \cdot (1 - u_p)^2$

(6)

kde:

u_p	je	podíl urbanizovaného území v daném polygonu nebo dílčím povodí
T_{100}		prahová hodnota vůči 100letému specifickému odtoku v intravilánu
T_0		prahová hodnota vůči 100letému specifickému odtoku v extravilánu

Uplatněním uvedeného principu je upravena klasifikace nebezpečí, a tím i hodnota rizika přívalové povodně, viz vztah (5).

Kritické body a Indikátor přívalových povodní

Kritické body – ve vztahu k povodňovému nebezpečí – jsou místa na rozhraní extravilánu a intravilánu, kde za situace přívalových srážek může dojít k soustředěnému odtoku vody z pozemků v extravilánu, tvořících tzv. přispívající plochu. Přispívající plocha je povodí, které je uzavřeno profilem kritického bodu.

Soustředěný odtok proto představuje bezprostřední nebezpečí pro danou obec a za určitých okolností i významné riziko spočívající v ohrožení majetku a životů obyvatel obce. Stanovení kritických bodů vychází z upravené metodiky [7], kde významnými parametry jsou vedle velikosti příslušné přispívající plochy rovněž průměrná sklonitost, podíl orné půdy a hodnota parametru CN (číslo odtokové křivky), jež slouží k vyjádření souhrnné charakteristiky tzv. ukazatele kritických podmínek (F).

V rámci stanovení rizik vyplývajících z lokálního zatopení nebo přívalové povodně ve FFI byl původní předpoklad začlenit povodí přispívajících ploch do výpočtu odhadu rizika přívalové povodně, tedy počítat riziko v systému vzájemně propojených povodí a říčních úseků. Z hlediska faktického vyhodnocení nebezpečí, které plyne z potenciálního výskytu přívalových srážek na povodích kritických bodů, bylo rozhodnuto začlenit povodí ke kritickým bodům (KB) pro stanovení nebezpečí následkem lokálního zatopení, jelikož odtoková odezva odpovídá svou povahou spíše pluvialní povodni než fluvialní (říční) povodni. Přispívající vrstvy kritických bodů budou tedy v systému FFI fungovat jako samostatná vstupní vrstva GIS s vypočtenými fyzickogeografickými charakteristikami a určenými prahovými hodnotami pro vyhodnocení míry rizika lokálního zatopení.

Zapojení kritických bodů a jejich charakteristik do systému FFI bylo testováno na datech odvozených v rámci předchozího projektu v roce 2009 (celkem 9 261 kritických bodů a přispívajících ploch). Postupně se přechází na vrstvy aktualizovaných KB z roku 2026. Při klasifikaci povodí kritických bodů z hlediska odhadu rizik se vycházelo z upraveného přístupu (viz kap. Odhad rizika v Indikátoru přívalových povodní), který kromě zvyšování míry nebezpečí s růstem doby opakování kulminačního průtoku předpokládá rovněž zvyšování expozice a zranitelnosti s růstem míry urbanizace v povodí. Vzhledem k tomu, že kritické body, jako jsou závěrové profily přispívajících ploch, leží na hranici intravilánu, byly prahové hodnoty pro stanovení míry nebezpečí uvažovány pro stupeň urbanizace odpovídající 100 %.

Výpočetní procedura FFI, pomocí níž je odvozována míra nebezpečí (a rizika) vzniku lokálního zatopení z přívalových srážek, byla upravena tak, že vedle stanovení odtoku v rámci čtvercové sítě 3 × 3 km je počítáno i riziko nebezpečného odtoku z povodí ke kritickým bodům. Příslušnost jednotlivých povodí kritických bodů k obci s rozšířenou působností (ORP) je dána závěrovým profilem povodí a jeho polohou vůči ORP. Výsledná míra rizika plynoucího z lokálního zatopení je brána jako ta méně příznivá dle výpočtů nad čtvercovou sítí a na povodí ke kritickým bodům.

VÝSLEDKY

Úprava prahových hodnot nebezpečného odtoku

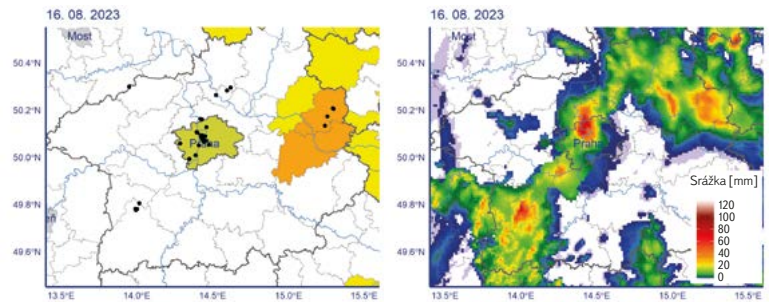
Vztah (6) byl testován na vybraných významnějších srážkových epizodách v letech 2023–2024, jež způsobily lokální zatopení, a to především v intravilánu měst. Jako podklad pro výběr epizod posloužily vedle srážkových údajů i údaje o výjezdech hasičů, které má ČHMÚ pro interní potřebu k dispozici, a také fotky a videa ze zasažených oblastí.

Zmenšení prahových hodnot v některých případech logicky vedlo k odhadům vyššího stupně rizika lokálního zatopení v polygonech, kde skutečné riziko bylo dle reálných následků větší než odhad rizika dle původních prahových hodnot (tab. 1).

Tab. 1. Vybrané testované události s výskytem přívalových srážek
Tab. 1. Selected tested events with occurrence of torrential rainfall

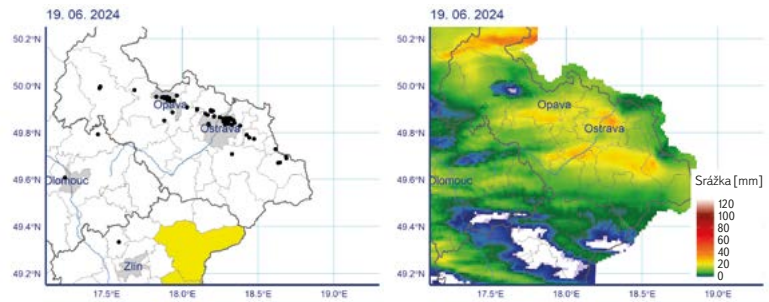
Termín výpočtu	Testovaná ORP	Původní max. riziko	Nové max. riziko
16. 8. 2023 18:50	Praha	1	2
13. 9. 2023 22:20	Opava	1	1
6. 6. 2024 20:05	Brno	0	0
19. 6. 2024 21:35	Ostrava	0	1
18. 8. 2024 17:35	Praha	2	3

Podrobněji jsou dále popsány tři vybrané epizody, u nichž se díky změnám v nastavení prahových hodnot podařilo výstupy FFI přiblížit realitě v zasažených oblastech. Jde o dny 16. srpna 2023, 19. června 2024 a 18. srpna 2024. Ve zbylých dvou případech v Opavě a Brně ani změna parametrů nezpůsobila změnu vypočteného stupně rizika. Obrázek vlevo ukazuje místa zásahů hasičů v terénu spojená s vodou (černé tečky) a nejvyšší hodnotu rizika pro jednotlivé obce s rozšířenou působností (ORP), kde barevné rozlišení odpovídá riziku 0–3, jak je uvedeno v tab. 1. Obrázek vpravo ukazuje rozložení a množství srážek během vybraných epizod.



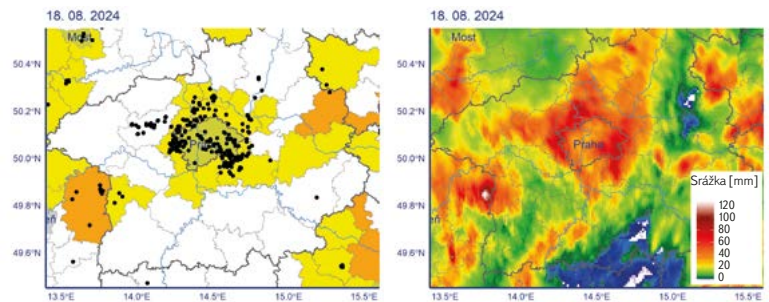
Obr. 1 a, b. Souhrnné riziko přívalové povodně a suma srážek (MERGE) z 16. srpna 2023
Fig. 1 a, b. General flash flood risk and precipitation total (MERGE) from 16th August 2023

Dne 16. srpna 2023 šlo o lokální a velmi intenzivní srážky, které se nad centrum Prahy nasouvaly od severu a pohybovaly se velmi pomalu (obr. 1 b). Zůstávaly tak nad jedním místem delší dobu a za cca hodinu spadlo 40 až 50 mm (např. stanice Praha-Střešovice 44,5 mm). Dle vysokého počtu výjezdů hasičů, informací přímo z terénu a množství fotek a videí na sociálních sítích byly zasaženy poměrně velké části centrální Prahy. Ačkoli zde byl krátkodobě téměř přerušen běžný provoz, ve dvou výpočtech FFI po sobě bylo vpodvečer identifikováno pouze nejnižší riziko vzniku lokálního zatopení (tab. 1), což znamenalo i nejnižší stupeň souhrnného rizika (obr. 1 a). Po změnách v nastavení prahových hodnot dle vzorce (6) a následné resimulaci byl vypočten druhý stupeň rizika lokálního zatopení pro centrum Prahy, což znamená alespoň přiblížení k reálným dopadům této situace v centru Prahy.



Obr. 2 a, b. Souhrnné riziko přívalové povodně a suma srážek (MERGE) z 19. června 2024
Fig. 2 a, b. General flash flood risk and precipitation total (MERGE) from 19th June 2024

Při srážkové události na Ostravsku 19. června 2024 (obr. 2) z hlediska FFI šlo o poměrně složitou situaci, jelikož přechod intenzivních srážek přes Ostravu byl velmi rychlý a FFI porovnává potenciální rizikové srážky se skutečně spadlými v rámci trvání minimálně jedné hodiny. V Ostravě spadlo na některých místech cca 30 mm za zhruba 30 minut, případně i za kratší dobu, a radarové odhady srážek byly spíše podhodnocené vůči skutečnosti. FFI v tomto případě nemohlo dostatečně zareagovat a nebyl vypočten ani nejnižší stupeň rizika. Po změně parametrů a resimulaci už byl vypočten pro některé části Ostravy alespoň nejnižší stupeň rizika lokálního zatopení.



Obr. 3 a, b. Souhrnné riziko přívalové povodně a suma srážek (MERGE) z 18. srpna 2024
Fig. 3 a, b. General flash flood risk and precipitation total (MERGE) from 18th August 2024

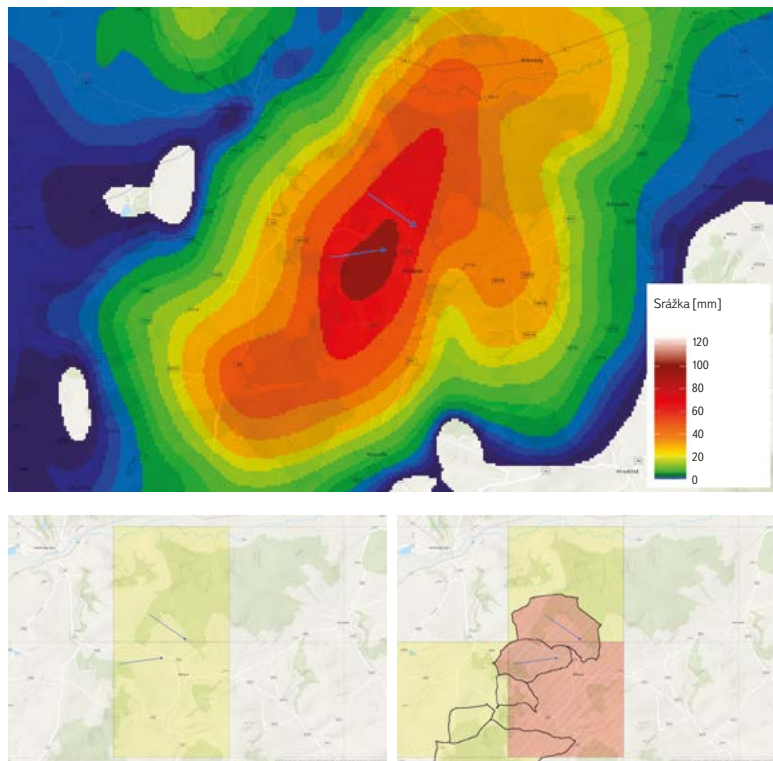
Poslední testovaná epizoda je z 18. srpna 2024, kdy byly Praha a blízké okolí zasaženy velmi intenzivní srážkovou činností (obr. 3 b). V Praze-Ruzyni, kde spadlo téměř 70 mm za hodinu, musel být dokonce přerušen provoz mezinárodního letiště, protože byla (nejen) odletová plocha zatopená. Také na mnoha dalších místech v Praze a blízkém okolí byly srážky tak intenzivní, že docházelo k lokálnímu zatopení či rychlému odtoku z krajiny. Operativní výpočty FFI vygenerovaly první stupeň souhrnného rizika (žlutá barva na obr. 3 a) a pouze výjimečně bylo riziko lokálního zatopení na stupni 2 (tab. 1). Po změnách v nastavení prahových hodnot a následné resimulaci byl v oblasti letiště Ruzyně vypočten nejvyšší stupeň nebezpečí vzniku lokálního zatopení a ve více lokalitách bylo lokální zatopení alespoň na středním stupni 2.

Začlenění kritických bodů do Indikátoru přívalových povodní

Upravené procedury FFI (viz kap. Kritické body a Indikátor přívalových povodní) byly testovány na proběhlých srážkoodtokových epizodách z minulých let, prioritně na třech vybraných povodňových událostech. Šlo o přívalovou povodeň z 2. června 2024 ve Štěnovicích na Plzeňsku a o přívalové povodně z 27. června 2024 v Blížejově na Domažlicku a v Šišmě u Lipníka nad Bečvou.

Na obr. 4 je ukázka z testování přívalové povodně v Blížejově na Domažlicku z 27. června 2024, konkrétně z termínového výpočtu 12:20 UTC, kdy byla v obci Blížejov zaznamenána významná lokální povodeň z přívalových srážek. V horní

části obrázku je znázorněno rozložení srážek (kombinovaný radarový odhad – MERGE) a ukázán směr přítoku do obce Blížejev. Patrné je zasažení dvou přispívajících ploch kritických bodů. Obrázek dole vlevo (4 b) ukazuje původní verzi výpočtu bez kritických bodů, vpravo (4 c) pak už s jejich započtením. Nejintenzivnější srážky spadly právě na povodí s vymezenými kritickými body severozápadně od okraje obce, což výrazně ovlivnilo odhad reálného nebezpečí lokálního zatopení v obci Blížejev. Zatímco výpočty pouze pro polygon 3×3 km ukázaly jen malé až střední riziko (žlutá), na povodí ke kritickým bodům bylo zaznamenáno riziko velmi vysoké (červená). Bezejmenná vodoteč je v obci navíc zatrubněná a níže po toku vede koryto do málo kapacitního železničního propustku, což také přispělo ke zhoršení odtokové situace v obci.



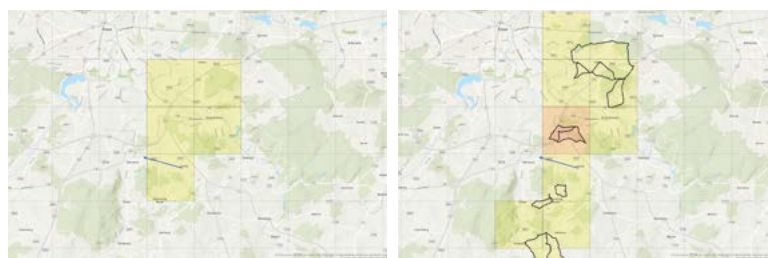
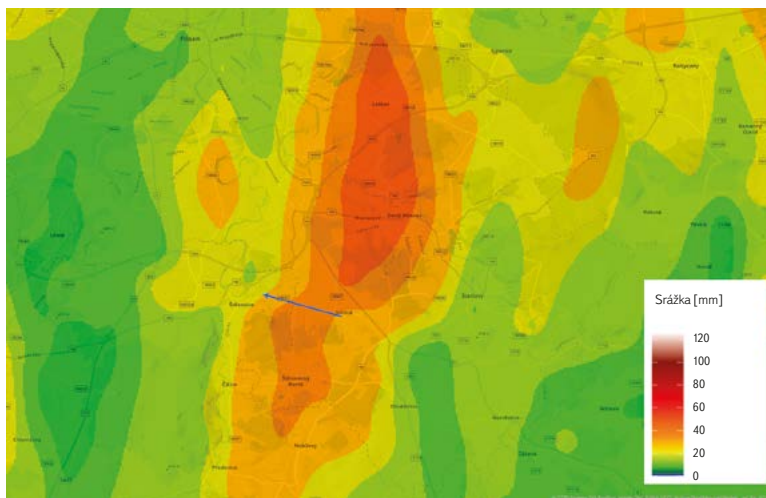
Obr. 4 a, b, c. Testování výpočtů na situaci přívalové povodně v Blížejevě na Domažlicku z 27. června 2024 v čase 12:20 UTC. Na horním obrázku je 24hodinový úhrn srážek k termínu 28. června 2024 06:00 UTC. Vlevo je verze výpočtu FFI bez kritických bodů, vpravo nová verze výpočtu FFI s jejich započtením

Fig. 4 a, b, c. Testing of calculations for the flash flood situation in Blížejev in the Domažlice region on 27th June 2024 at 12:20 UTC. The upper image shows the 24-hour precipitation total up to 28th June 2024, 06:00 UTC. On the left is the FFI calculation version without critical points; on the right is the new FFI calculation version including them

Na obr. 5 je situace z okolí obce Štěnovice na Plzeňsku z 2. června 2024, kdy se zde vyskytla významná přívalová povodeň, jež způsobila značné škody na majetku a ohrožovala i obyvatele. Obcí protéká řeka Úhlava, do které zprava ústí Losinský potok, na jehož povodí spadly přívalové srážky. Pod soutokem se nachází vodoměrná stanice na Úhlavě, která povodeň na Losinském potoce ve formě výrazné průtokové špičky zaznamenala (obr. 6). Na základě tohoto hydrogramu povodně na Úhlavě lze odvodit, že v kulminaci mohlo přitékat z Losinského potoka ($11,6 \text{ km}^2$) odhadem $40\text{--}45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($Q_{100} \approx 20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

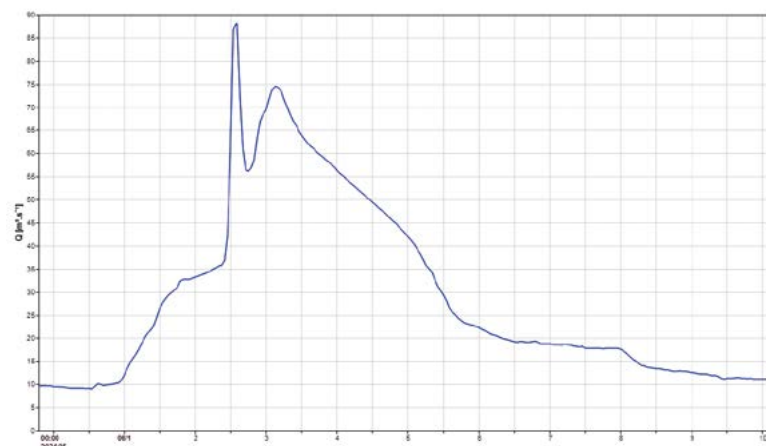
Na základě zjištění z amatérského pozorování srážek ve Štěnovicích a v obci Losíná lze usuzovat na poměrně výrazné podhodnocení radarových odhadů srážek v kombinaci se srážkoměry (metoda MERGE), což vedlo k tomu, že ve FFI bylo na povodí Losinského potoka detekováno riziko pouze na nejnižším stupni

(žlutý). Při uvažování povodí ke kritickým bodům bylo severně od Štěnovic odhadnuto riziko druhého stupně (oranžový), patrně z důvodu o něco vyšších a realitě tak nejspíše bližších odhadů srážkových úhrnů.



Obr. 5 a, b, c. Testování výpočtů na situaci přívalové povodně ve Štěnovicích na Plzeňsku z 2. června 2024 v čase 10:50 UTC. Na horním obrázku je 24hodinový úhrn srážek k 3. červnu 2024 06:00 UTC. Vlevo je verze výpočtu FFI bez kritických bodů, vpravo nová verze výpočtu FFI už s jejich započtením

Fig. 5 a, b, c. Testing of calculations for the flash flood situation in Štěnovice in the Plzeň region on 2nd June 2024 at 10:50 UTC. The upper image shows the 24-hour precipitation total up to 3rd June 2024, 06:00 UTC. On the left is the FFI calculation version without critical points; on the right is the new FFI calculation version already including them



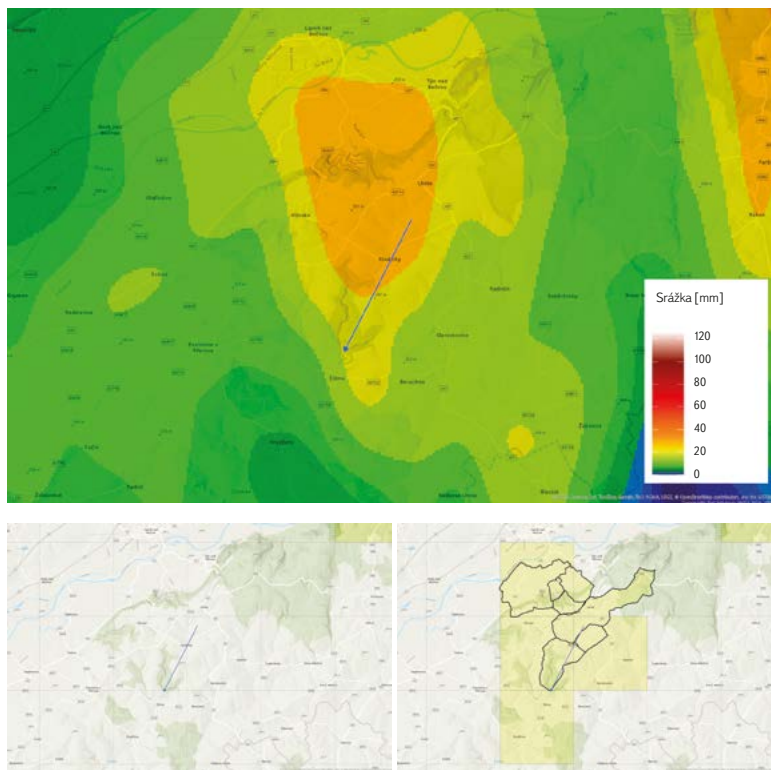
Obr. 6. Povodňová vlna na Úhlavě ve Štěnovicích na začátku června 2024

Fig. 6. Flood wave on the Úhlava river in Štěnovice at the beginning of June 2024

Třetí testovanou událostí je extrémní přívalová povodeň z 27. června 2024 na Šišemce (přítok Moštěnky) na Přerovsku, kde nejpostiženější obcí byla Šišma, ale

zasaženy byly i další obce. Průtočné poměry v obci Šišma byly nepříznivě ovlivněny mnohými mostky vedoucími přes koryto Šišemky k jednotlivým nemovitostem. Hodnota kulminačního průtoku v obcích Šišma a Hradčany přesahovala odhadem $30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (více než Q_{100}), v Prusech na Moštěnce již patrně plošší, tedy transformovaná, průtoková vlna kulminovala na hodnotě $18\text{--}20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Na obr. 7 je znázorněna situace v okolí obce Šišma a kombinované radarové odhady srážek (MERGE), které byly bohužel velmi podhodnocené. Amatérský srážkoměr v obci Šišma naměřil více než 50 mm za zhruba 30–40 minut, odhady srážek z radaru však v daném místě činily jen 10 mm. FFI také z tohoto důvodu zaznamenal riziko pouze na nejnižším stupni (žlutá), a to až při zohlednění povodí ke kritickým bodům.



Obr. 7 a, b, c. Testování výpočtů na situaci přívalové povodně v Šišmě u Lipníka nad Bečvou z 27. června 2024 v čase 15:35 UTC. Na horním obrázku je 24hodinový úhrn srážek k 28. červnu 2024 6:00 UTC. Vlevo je verze výpočtu FFI bez kritických bodů, vpravo nová verze výpočtu FFI s jejich započtením

Fig. 7 a, b, c. Testing of calculations for the flash flood situation in Šišma near Lipník nad Bečvou on 27th June 2024 at 15:35 UTC. The upper image shows the 24-hour precipitation total up to 28th June 2024, 06:00 UTC. On the left is the FFI calculation version without critical points; on the right is the new FFI calculation version including them

SHRNUTÍ, ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ

Predikce přívalových povodní zůstává i nadále jednou z nejsložitějších úloh v hydrometeorologické předpovědní službě. Hlavní příčinou obtížnosti je výrazná prostorová a časová variabilita konvektivních srážek, jež zásadně omezuje schopnost jejich spolehlivé předpovědi. Numerické meteorologické modely, včetně modelů s vysokým prostorovým rozlišením, zpravidla poskytují pouze informaci o zvýšené pravděpodobnosti výskytu nebezpečných srážek v širších oblastech, nikoli však o jejich přesné lokalizaci a intenzitě. Krátkodobé zpřesnění předpovědi umožňuje nowcasting, jehož přínos spočívá zejména v extrapolaci aktuálního pohybu srážek. Tento přístup však zatím většinou nedokáže spolehlivě zachytit rychlé změny struktury a intenzity konvektivních

buněk, které jsou pro vznik přívalových povodní klíčové. Výsledná přesnost predikce přívalových povodní je navíc významně ovlivněna hydrologickými vstupy, především odhadem aktuální nasycenosti půdy, a rovněž nejistotami v odhadu množství spadlých i předpovídaných srážek.

V kontextu přívalových povodní je podstatná klasifikace území na extravilán a intravilán. V urbanizovaných územích je odtoková odezva povodí mnohem rychlejší a dochází ke zvětšení objemu povrchového odtoku, což se projevuje častějším výskytem a vyšší intenzitou lokálních záplav i při srážkách s kratší dobou opakování. Vyhodnocení míry rizika ve FFI je vázáno na prahové hodnoty překročení nebezpečného odtoku, které jsou odvozené od velikosti průtoku s dobou opakování 100 let a jsou stejné bez ohledu na klasifikaci území. Takto stanovené hodnoty ovšem nemusejí vyjadřovat skutečnou míru nebezpečí a rizika v extravilánu a intravilánu.

Zásadním prvkem expozice a zranitelnosti jsou kritické body definované jako místa, kde soustředěný povrchový odtok ze zemědělské krajiny vstupuje do intravilánu obce. Právě tato místa často představují iniciační body vzniku povodňových škod při přívalových srážkách. Zahrnutí povodí kritických bodů do výpočtu FFI výrazně zpřesňuje odhad míry nebezpečí a rizika [8], zejména v případech, kdy standardně využívaná polygonová síť o velikosti $3 \times 3 \text{ km}$ nedokáže dostatečně postihnout lokální odtokovou odezvu a její dopady na obydlená území.

I přes tyto úpravy přístupu stanovení míry nebezpečí a rizika zůstává zásadním prvkem nejistoty reprezentativnost vstupních srážkových dat. Analýza vybraných případů významných přívalových povodní, např. ve Štěnovicích dne 2. června 2024 a v obci Šišma dne 27. června 2024, ukázala výrazné podhodnocení radarových odhadů srážek ve srovnání s naměřenými úhrny amatérskými pozorovateli. Tento nedostatek měl přímý dopad na schopnost FFI adekvátně vyhodnotit míru nebezpečí, a to i přesto, že do výpočtu byly zahrnuty všechny v tu dobu dostupné údaje o srážkových úhrnech či intenzitách i kritické body. Tyto příklady, ale i některé jiné z let předchozích, zdůrazňují, že další zlepšení predikce a hodnocení přívalových povodní bude nutně závislé nejen na zpřesnění metodiky FFI, ale také na dalším rozvoji a validaci radarových srážkových produktů, které procházejí postupným vývojem [9].

Na základě upravených přístupů testovaných na reálných povodňových událostech lze formulovat následující závěry:

Testované povodňové události prokázaly, že úprava prahových hodnot nebezpečného odtoku na základě podílu urbanizovaných ploch ve výpočtových polygonech umožňuje reálnější odhad míry rizika v intravilánu. Tím dochází k lepšímu odlišení situací, jež mohou vést ke skutečným dopadům v zastavěném území, od případů, kdy zvýšený odtok zůstává bez významnějších následků. Zároveň je ale nutné mít na paměti, že zmenšení prahových hodnot odtoku může vést ke zvýšení počtu falešných alarmů.

Významný přínos pro vyhodnocování lokálního rizika představuje zahrnutí kritických bodů do výpočtu FFI. Započtení povodí kritických bodů umožňuje zachytit lokální odtokové špičky, které by v rámci standardní polygonové sítě jinak zůstaly potlačené nebo zcela opomenuty. Tento přístup přispívá zejména k přesnějšímu vyhodnocení rizika v menších obcích a v místech, kde koncentrovaný povrchový odtok vstupuje do zástavby a představuje hlavní mechanismus vzniku povodňových škod.

Současně se potvrzuje, že úspěšná predikce přívalových povodní je zásadně závislá na kvalitě meteorologických vstupů. Nejistoty v radarových odhadech srážek i v jejich krátkodobé předpovědi se přímo promítají do celkové nejistoty výsledků FFI a mohou vést k podhodnocení rizika i v případech, kdy jsou uvažovány kritické body i míra urbanizace území. Přes tyto limity však lze konstatovat, že FFI se postupně posouvá od hodnocení samotné míry nebezpečí směrem k reálnějšímu odhadu povodňového rizika.

Analýza povodňových událostí nicméně nadále ukazuje, že modelové odhady vyžadují další zpřesňování, a to zejména v městském prostředí. Lokální morfologie terénu, technická infrastruktura a způsob využití území zde mají

zásadní vliv na výslednou míru rizika a představují významnou výzvu pro další rozvoj metodických přístupů hodnocení a predikce přívalových povodní.

Z výše uvedených závěrů je možné formulovat doporučení pro další vývoj FFI i směrem k efektivnějšímu zvládnutí rizik spojených s přívalovými povodněmi. Tato doporučení se týkají jak technického rozvoje samotného nástroje, tak jeho praktické integrace do krizového řízení a směrů příštího výzkumu.

Jako klíčové se jeví další zlepšení zpracování radarových odhadů srážek. Pravidelná validace radarových dat vůči síti profesionálních srážkoměrů by měla být standardní součástí provozu. Doplňkově lze uvažovat i o využití lokálních srážkoměrů provozovaných obcemi nebo dobrovolníky [10]. I přes vědomí možných systematických či náhodných chyb těchto měření mohou tato data přinášet cennou informaci o lokálních extrémech, které radarový odhad nedokáže vždy spolehlivě zachytit. Dalším důležitým krokem ke snížení nejistot predikcí konvektivních srážek, které jsou pro vznik přívalových povodní rozhodující, je posílení nowcastingových metod, zejména zapojením algoritmů schopných modelovat vývoj konvektivních buněk v čase, včetně změn jejich struktury a intenzity. Současně se jako perspektivní ukazuje zavedení adaptivních prahových hodnot nebezpečí a rizika, diferencovaných podle typu obce. Městské, příměstské a venkovské oblasti se výrazně liší svou odtokovou odezvou, a jednotlivé prahové hodnoty proto nemusejí odpovídat skutečné míře ohrožení v daném území.

Vedle technického rozvoje je nezbytné věnovat pozornost také lepší integraci hodnocení rizika do systému krizového řízení. Kritické body identifikované v rámci celé ČR by měly být systematicky využívány např. při aktualizaci lokálních povodňových plánů. Zároveň je vhodné posílit komunikaci rizika směrem k obyvatelům obcí, a to zejména v souvislosti s místy, kde dochází ke zvýšené koncentraci povrchového odtoku a lokálnímu zaplavení způsobenému nedostatečným odvodněním obce. Zvýšení povědomí o těchto „slepých místech“ může přispět ke snížení škod i zlepšení připravenosti obyvatel. Dalším krokem by mohlo být technologické propojení indikátoru FFI s automatickými varovnými systémy obcí, jako jsou chytré sirény, SMS varování nebo notifikace skrze mobilní aplikace. Takové propojení by umožnilo rychlejší a cílenější varování v situacích, kdy se riziko lokálního zatopení rychle zvyšuje.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl za podpory výzkumného projektu TA ČR č. SS06010059 „Zvýšení připravenosti urbanizovaných lokalit v ČR propojením metody kritických bodů s indikátorem přívalových povodní“.

Literatura

- [1] THIEKEN, A., ZENKER, M.-L., BUBECK, P. Flood-Related Fatalities During the Flood of July 2021 in North Rhine-Westphalia, Germany: What Can Be Learnt for Future Flood Risk Management? *Journal of Coastal and Riverine Flood Risk*. 2023, 2. Dostupné z: <https://doi.org/10.59490/jcfr.2023.0005>
- [2] CHAVDA, S. The 2024 Spain Floods: Failures in Early Warning, Action, Coordination, and Localisation. *Global Network of Civil Society Organizations for Disaster Reduction*. 2024. [citováno 2025-12-05]. Dostupné z: <https://www.gndr.org/2024-spain-floods-early-warning-action-coordination-and-localisation>
- [3] ŠERCL, P. *Povodeň na Uničovsku 7. a 8. června 2020. Předběžné vyhodnocení extrémní hydrometeorologické situace*. 16. června 2020. Dostupné z: <https://storymaps.arcgis.com/stories/878800fbefee43fb850c89ac587cb263>
- [4] ŠERCL, P., PECHA, M., SVOBODA, V., VLASÁK, T. Indikátor přívalových povodní – zkušenosti z provozu. *Meteorologické zprávy*. 2023, 76(5), s. 138–147. ISSN 0026-1173. Dostupné z: https://www.chmi.cz/documents/42501/55105/MZ_05_2023.pdf/3c744ab4-a791-628f-35e5-3c6198338b60?t=1761301223425
- [5] ŠERCL, P., PECHA, M., NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., LEDVINKA, O., SVOBODA, V., DAŇHELKA, J. *Flash Flood Indicator*. Praha: CHMÚ, 2023. 54 s. ISBN 978-80-7653-050-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.59984/978-80-7653-050-8>
- [6] TICHÝ, M. Rizikové inženýrství. 1–Riziko a jeho odhad. *Stavební obzor*. 1994, 9, s. 261–262.

[7] DRBAL, K., CALETKA, M., ŠTĚPÁNKOVÁ, P., ŠERCL, P. *Metodický návod pro identifikaci kritických bodů*, 2026. Dostupné z: https://heis.vuv.cz/data/webmap/datovesady/projekty/kritickebody/docvystupy/Metodicky_navod_KB_2026.pdf?v=2

[8] DRBAL, K., DUMBROVSKÝ, M., MUCHOVÁ, Z., SOBOTKOVÁ, V., ŠTĚPÁNKOVÁ, P., ŠARAPATKOVÁ, B. Mitigation of Flood Risks with the Aid of the Critical Points Method. *Agronomy*. 2022, 12(6), 1300. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/agronomy12061300>

[9] NOVÁK, P., KYZNAROVÁ, H., PECHA, M., ŠERCL, P., SVOBODA, V., LEDVINKA, O. Utilization of Weather Radar Data for the Flash Flood Indicator Application in the Czech Republic. *Remote Sensing*. 2021, 13(16), 3184. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13163184>

[10] O'HARA, T., McCLEAN, F., HERRERA, R. V., LEWIS, E., FOWLER, H. J. Filling Observational Gaps with Crowdsourced Citizen Science Rainfall Data from the Met Office Weather Observation Website. *Hydrology Research*. 2023, 54(4), s. 547–556. ISSN 1998-9563. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/nh.2023.136>

Autoři

Ing. Petr Šercl, Ph.D.¹

✉ petr.sercl@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-1581-961X

Mgr. Martin Pecha¹

✉ martin.pecha@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-0294-8981

Ing. Vojtěch Svoboda, Ph.D.¹

✉ vojtech.svoboda@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-8716-0239

Ing. Tomáš Vlasák, Ph.D.²

✉ tomas.vlasak@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-2819-5180

Ing. Karel Drbal, Ph.D.³

✉ karel.drbal@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5595-2493

Mgr. Martin Caletka³

✉ martin.caletka@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-0772-3247

Ing. Pavla Štěpánková, Ph.D.³

✉ pavla.stepankova@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-2079-9078

¹Český hydrometeorologický ústav, Praha (Česká republika)

²Český hydrometeorologický ústav, pobočka České Budějovice (Česká republika)

³Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Brno (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.05.001

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

LINKING CRITICAL POINTS TO THE FLASH FLOOD INDICATOR

ŠERCL, P.¹; PECHA, M.¹; SVOBODA, V.¹; VLASÁK, T.²; DRBAL, K.³; CALETKA, M.³; ŠTĚPÁNKOVÁ, P.³

¹Czech Hydrometeorological Institute, Prague (Czech Republic)

²Czech Hydrometeorological Institute, České Budějovice (Czech Republic)

³T. G. Masaryk Water Research Institute, Brno (Czech Republic)

Keywords: flash floods — flood risk — Flash Flood Indicator (FFI) — critical points — urban areas — nowcasting

This paper addresses the improvement of flash flood hazard estimation through modifications of the Flash Flood Indicator (FFI), which is operationally used by the Czech Hydrometeorological Institute. The existing FFI framework primarily evaluates hazard based on the comparison of runoff response and threshold values derived from theoretical return period discharges, while exposure and vulnerability have so far been considered only implicitly. This paper proposes

an extension of the methodology to explicitly incorporate these components of risk through two main approaches: (i) adjustment of runoff threshold values according to the degree of urbanization and (ii) integration of critical points (positions of potential entry of concentrated runoff pathways into urbanized locations) and their contributing areas into the FFI calculations.

Based on the analysis of selected rainfall events from 2023–2024, it is demonstrated that lowering threshold values in urbanized areas leads to a more realistic estimation of local flooding risk, particularly within built-up areas. Furthermore, the inclusion of critical points, defined as locations where concentrated runoff from rural catchments enters urban areas, significantly improves the identification of high-risk locations that are not adequately captured by the standard 3 × 3 km grid. The results also highlight the crucial influence of meteorological input data quality, especially radar-based precipitation estimates, on the overall accuracy of risk assessment. The proposed modifications represent a shift from hazard-based evaluation towards a more comprehensive assessment of actual risk, accounting for spatial variability in exposure and vulnerability. At the same time, the paper identifies key limitations of the current approach and provides recommendations for further development of the FFI system, particularly in terms of improving meteorological inputs and implementing adaptive threshold settings.



Predikce zabezpečení vodních zdrojů v ČR k roku 2050

PETR VYSKOČ, HANA PRCHALOVÁ, MARIE KOZLOVÁ, JIŘÍ PICEK, ADAM VIZINA

Klíčová slova: klimatická změna — vodní zdroje — nedostatek vody — zásobování vodou — vodní bilance

ABSTRAKT

Článek představuje postupy a výsledky vyhodnocení zabezpečení odběrů vody a minimálních průtoků ve výhledu k roku 2050 v podmínkách možných dopadů klimatické změny na vodní zdroje a výhledových požadavků na odběry vody vycházejících z predikce socioekonomického vývoje. Řešení bylo zpracováno v celostátním rozsahu. Jako minimální územní měřítko byly zvoleny vodní útvary vymezené pro potřebu plánování v oblasti vod. Při řešení byly uplatněny metody simulačního modelování (při posuzování zdrojů povrchových vod), metody vodohospodářské bilance a postupy hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemních vod. Vliv možných dopadů klimatické změny na vodní zdroje byl uvažován variantně pro kombinaci klimatických modelů (CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM2-0, TAIESM1, HADGEM2-ES a ALADIN-CLIMATE/CZ) a emisních scénářů (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585, RCP4.5). Uvažována byla stávající infrastruktura vodních nádrží a převodů vody a jejich kapacit. Při vyhodnocení zdrojů povrchových vod bylo jako potenciálně rizikové identifikováno 33 vodních nádrží (z 82 posuzovaných) zajišťujících odběry vody a/nebo minimální průtoky ve vodních tocích. Zdroje podzemních vod byly vyhodnoceny u 838 pracovních jednotek útvarů podzemních vod (z 1 220 v ČR), přičemž vysoké riziko bylo zjištěno u 106 pracovních jednotek o ploše 12,7 % ČR, střední riziko u 43 pracovních jednotek o ploše 6,1 % a nízké riziko u 689 pracovních jednotek o ploše 66,3 %.

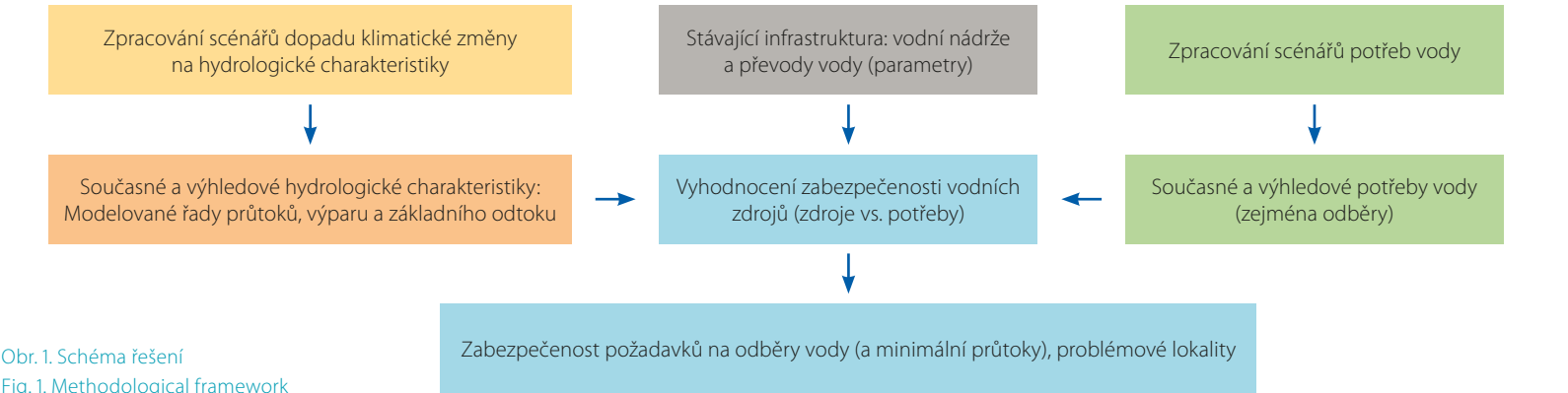
ÚVOD

Problematika dostupnosti vodních zdrojů a zabezpečení požadavků na užívání vody (zejména odběrů vody) v podmínkách možných dopadů klimatické změny byla v posledních cca 20 letech předmětem řady studií řešených v různém územním rozsahu. V letech 2020–2025 se jí rovněž zabýval pracovní

balíček WP 1 „Predikce vývoje zabezpečení vodních zdrojů v ČR do roku 2050 v podrobnosti krajů v závislosti na změně klimatu“ projektu TA ČR č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“ (dále „Centrum Voda“). Cílem bylo vyhodnocení zabezpečení vodních zdrojů k úrovni roku 2050 při uvažování dopadů klimatické změny na jejich kapacitu a scénářů vývoje potřeb vody v jednotlivých sektorech v závislosti na socioekonomickém vývoji. Výsledkem je zejména identifikace potenciálně problémových oblastí. Řešení je realizováno v celostátním měřítku. Postup prací WP 1 ilustruje schéma na obr. 1. Lze jej rozdělit do tří navazujících částí:

- A. zpracování scénářů vývoje potřeb vody, zejména predikce požadavků na odběry vody,
- B. zpracování scénářů dopadu klimatické změny na hydrologické charakteristiky a identifikace deficitních oblastí,
- C. vyhodnocení bilance potřeb a zdrojů vody při uvažování stávající infrastruktury (vodní nádrže, převody vody a jejich kapacity) a následné vyhodnocení zabezpečení zdrojů vody a identifikace problémových lokalit.

Vyhodnocení scénářů vývoje potřeb vody popisuje [1], vlivem dopadů klimatické změny na hydrologické charakteristiky se zabývá [2]. Zde prezentovaný článek se zaměřuje na závěrečnou část řešení – vyhodnocení zabezpečení požadavků na odběry vody a identifikaci lokalit v budoucnu potenciálně rizikových z hlediska nedostatku vody. Podrobně je řešení této části dostupné v příslušné výzkumné zprávě [3]. Na zpracování WP 1 spolupracovala (zejména v oblasti predikce potřeb vody) řada organizací: VÚV TGM (odběry pro veřejné vodovody a energetiku, dopady klimatické změny na hydrologické



Obr. 1. Schéma řešení
Fig. 1. Methodological framework

charakteristiky a identifikace deficitních oblastí, vyhodnocení zabezpečení zdrojů vody a identifikace problémových lokalit), VŠCHT (potřeba vody pro průmysl), ÚVGZ AV ČR (potřeba vody pro závlahy podle scénářů dopadů klimatické změny), ČVUT (závlahy), ČZU (závlahy a živočišná výroba) a ČHMÚ (vliv odběrů a vypouštění na průtoky). Řešení WP 1 „Centra Voda“ do určité míry navazuje na projekt Bezpečnostního výzkumu MV č. VI20192022159 „Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou“, řešeného VÚV TGM v letech 2019–2022. Tento projekt byl – na rozdíl od řešení v rámci WP 1 „Centra Voda“ – omezen na problematiku zásobování veřejnými vodovody [4, 5]. Vzhledem k obdobným postupům jsou dílčí výstupy tohoto projektu začleněny i do zde dále uváděných výsledků identifikace rizikových lokalit. Podrobné popisy a výsledky řešení uvedených projektů jsou dostupné na příslušných internetových stránkách [6], resp. [7].

METODIKA A DATA

Predikce zajištění vodních zdrojů byla zaměřena na posouzení rizika možného budoucího nedostatečného zajištění požadavků na odběry vody a do jisté míry rovněž na zajištění minimálních průtoků. Jako minimální územní podrobnost byla zvolena úroveň vodních útvarů – či jejich částí – vymezených pro potřebu plánování v oblasti vod (v ČR je vymezeno celkem 1 118 útvarů povrchových vod a 1 220 tzv. pracovních jednotek útvarů podzemních vod). Metodické postupy a podrobnost řešení byly do značné míry určeny disponibilními daty. Základními vstupy pro vyhodnocení bilance zdrojů a potřeb vody byly údaje o výhledových hodnotách požadavků na odběry vody a o výhledových hodnotách hydrologických charakteristik ovlivněných klimatickou změnou. Tato část vstupních dat byla vytvořena přímo v rámci WP 1 „Centra Voda“ [1, 2] a projektu Bezpečnostního výzkumu [4, 5].

Vstupní data

Při řešení byly konkrétně využity následující datové sady:

- Predikce odběrů vody k roku 2050 v rozdělení do kalendářních měsíců. Zdroj: VÚV TGM, VŠCHT, ČVUT a ČZU [1].
- Časové řady modelovaných závlahových potřeb ve výhledu k roku 2050. Zdroj: ÚVGZ AV ČR [1].
- Údaje o odběrech, vypouštění, akumulaci vod a parametrech vodních nádrží (objem zásobního prostoru a minimální odtok) evidované podle vyhlášky 431/2001 Sb. Zdroj: státní podniky Povodí a VÚV TGM [8].
- Údaje o podílu srážkových vod ve vypouštění do povrchových vod Majetkové a provozní evidence vodovodů a kanalizací (část kanalizační stoky a ČOV) vedené podle vyhlášky 428/2001 Sb. Zdroj: Ministerstvo zemědělství [9].
- Časové řady modelovaného měsíčního odtoku, výparu a základního odtoku z povodí vodoměrných stanic a z mezipovodí útvarů povrchových vod. Zdroj: VÚV TGM [2, 4].
- Dlouhodobé a roční hodnoty základního odtoku z hydrogeologických rajonů ČR. Zdroj: ČHMÚ.
- Rebilance zásob podzemních vod. Zdroj: ČGS [10].
- Hydrogeologická rajonizace. Projekt Rady vlády ČR pro výzkum a vývoj VaV/650/4/02, souhrnná závěrečná zpráva za období řešení 2002–2005. Zdroj: VÚV TGM [11].

Hydrologické podmínky

Vzhledem k nejistotám predikce dopadů klimatické změny na hydrologické charakteristiky bylo vyhodnocení dostupnosti vodních zdrojů ve výhledu

k roku 2050 řešeno ve variantách. Varianty hydrologických podmínek byly určeny kombinací klimatických modelů a emisních scénářů [2, 4]. Přehled uvažovaných klimatických modelů a emisních scénářů je uveden v tab. 1. Klimatický model HADGEM2-ES a model hydrologických podmínek při oteplení o 2 °C byly posouzeny v rámci Bezpečnostního výzkumu a jejich dopady byly posouzeny pouze pro vodárenské odběry [4]. Ostatní uvedené klimatické modely a emisní scénáře byly vyhodnoceny v rámci prací WP 1 „Centra Voda“ [2]. Každá kombinace klimatického modelu a emisního scénáře představuje alternativní možný vývoj klimatických podmínek. Tento přístup umožňuje lépe zachytit nejistoty spojené s budoucím vývojem klimatu a porovnat robustnost výsledků vůči různým variantám vývoje.

Tab. 1. Hodnocené klimatické modely a emisní scénáře
Tab. 1. Evaluated climate models and emission scenarios

Klimatický model	Emisní scénář	Poznámka
CMCC-ESM2	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	-
EC-EARTH3	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	-
GFDL-ESM4	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	-
MPI-ESM1-2-HR	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	-
MPI-ESM2-0	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	-
TAIESM1	SSP126, SSP245, SSP370, SSP585	-
ALADIN-CLIMATE/CZ	SSP245, SSP585	-
HADGEM2-ES	RCP4.5	vodárenské odběry
Současné klima + 2 °C	-	vodárenské odběry

Emisní scénář SSP585 je v současné odborné literatuře často interpretován jako scénář vysokých emisí reprezentující horní hranici možného vývoje klimatické změny. Přestože není v současnosti některými odborníky považován za nejpravděpodobnější trajektorii budoucího socioekonomického vývoje, zůstává vhodným scénářem pro hodnocení rizik a posouzení citlivosti vodních zdrojů na potenciálně nepříznivý klimatický vývoj. V předkládané práci proto nebyl scénář SSP585 interpretován jako nejpravděpodobnější varianta budoucnosti, nýbrž jako jedna z variant umožňujících posoudit rozsah možných dopadů klimatické změny na dostupnost vodních zdrojů.

Požadavky na odběry vody a minimální průtoky

V roce 2021 byly v evidenci podle [8] zapsány odběry vody z celkem 5 602 odběrných míst, a to o celkovém odebraném množství cca 1 400 mil. m³ · rok⁻¹ (bez započtení odběrů do převodů vody). Jednalo se o 883 míst odběrů povrchové vody o celkovém množství cca 1 030 mil. m³ · rok⁻¹ (cca 74 % celkového odebraného množství) a o 4 719 míst odběrů podzemní vody o celkovém množství cca 370 mil. m³ · rok⁻¹ (cca 26 % celkového odebraného množství). Zatímco odběry povrchové vody jsou významně užívány pro veřejné vodovody, průmysl, energetiku i zemědělství, odběry podzemní vody slouží zejména pro veřejné vodovody.

Požadavky na odběry vody byly uvažovány ve dvou variantách: pro současné požadavky a pro výhled k roku 2050 [1].

Současné požadavky byly určeny takto:

- Odběry pro veřejné vodovody, energetiku a průmysl byly určeny podle evidovaných skutečných měsíčních odběrů vody za období let 2015–2021. Požadavky byly v každém měsíci určeny jako aritmetický průměr skutečných odběrů pro všechny ekonomické sektory s výjimkou odběrů pro zemědělství.
 - Odběry pro zemědělství byly určeny v každém měsíci jako maximální hodnoty v uvedeném období (odběry pro závlahy se v suchém období významně zvyšují).
- Výhledové požadavky („vysoká varianta“) byly určeny takto:
- Odběry pro veřejné vodovody byly určeny jako průměrné měsíční odběry za období let 2016–2021 korigované podle „vysoké varianty“ demografického vývoje.
 - Odběry pro energetiku byly určeny jako výhled k roku 2050 podle podkladů pro energetickou koncepci.
 - Odběry pro průmysl byly určeny jako maximální evidovaný skutečný roční odběr za období let 2009–2021, rovnoměrně rozdělený v průběhu roku.
 - Odběry pro zemědělství byly určeny jako maximální odběry v jednotlivých kalendářních měsících za období let 2015–2021.
 - Závlahovou potřebu reprezentovaly časové řady měsíčních závlahových potřeb pro mezipovodí útvarů povrchových vod pro jednotlivé klimatické modely a emisní scénáře ve variantách:
 - pro zabránění stresu suchem,
 - pro optimalizaci produkce.

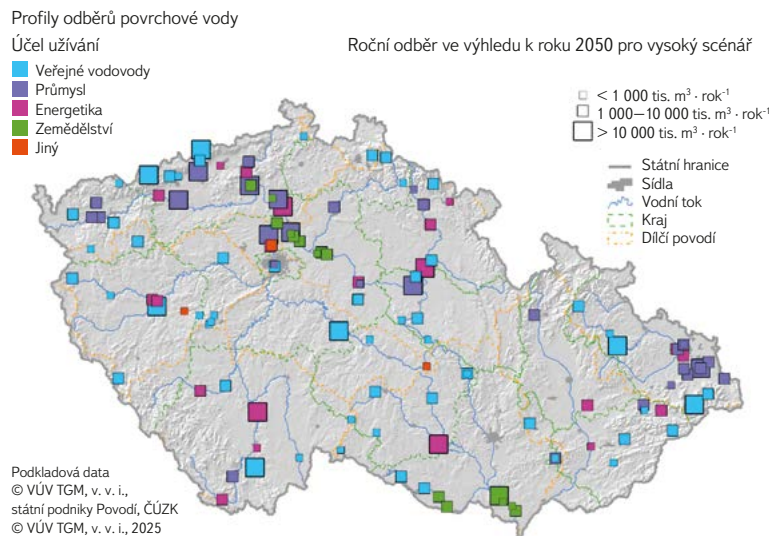
Zabezpečení minimálních průtoků byla vyhodnocena pro současné požadavky na minimální odtok z vodních nádrží a aktivní nadlepšování minimálních průtoků v dalších níže položených profilech.

Postup hodnocení zdrojů povrchových vod

Zabezpečení odběrů z povrchových vod a minimálních průtoků ve vodních tocích byla posouzena pomocí metod vodohospodářské bilance a simulačního modelování zásobní funkce vodohospodářských soustav. Aplikovanou metodu podrobně popisuje [12]: model simuluje chování soustavy v chronologické řadě diskretních časových kroků (zde je zvolen měsíční krok) na základě znalosti časových řad přirozených průtoků (neovlivněných regulací a odběrů/vypouštěním vody), požadavků na užívání vody (zde odběrů vody) a zachování minimálních průtoků, technických parametrů prvků soustavy (zde objemu zásobního prostoru nádrží a kapacit převodů vody) a do modelu zavedených pravidel regulace odtoku (manipulačních pravidel v zásobním prostoru vodních nádrží). Výstupem modelu jsou časové řady simulovaných aktivit: průtoků a výparu z hladin vodních nádrží, odběrů vody, odtoků z vodních nádrží, objemu vody a hladin v zásobním prostoru nádrží. Tyto časové řady jsou následně statisticky vyhodnoceny. Jako základní charakteristika vyjadřující zajištění odběrů vody je vyhodnocena zabezpečení podle trvání p_t definovaná [13] (zjednodušeně vyjadřuje procentní podíl délky období, po kterou jsou požadavky na odběry vody nebo minimální průtoky plně zajištěny, z celkové délky celého posuzovaného období). Při simulaci hospodaření s vodou byl využit výpočetní program „Simulační model zásobní funkce vodohospodářské soustavy“ [14] vyvinutý VÚV TGM.

V referenčním roce 2021 bylo v evidenci odběrů vody vedené podle [8] evidováno 82 vodních nádrží a 14 převodů vody, jež jsou relevantní z hlediska plnění zásobní funkce, a 883 míst odběrů povrchové vody. Pro posouzení zabezpečení byla vybrána místa odběrů vody s ročním množstvím odběru přesahujícím 500 tis. $\text{m}^3 \cdot \text{rok}^{-1}$. Jednalo se o 132 odběrných míst. Z těchto míst bylo odebíráno cca 90 % z celkového odebíraného množství povrchových vod. Vybraná místa odběrů vody jsou znázorněna na obr. 2. Vliv ostatních (menších) odběrů vody byl do řešení zahrnut agregovaně k nejbližšímu profilu vodohospodářské soustavy. Obdobně byl zahrnut i vliv všech odběrů podzemní vody (projekci

místa odběru na říční síť) a vypouštění vody. Do vodohospodářské soustavy bylo rovněž zařazeno 16 kontrolních profilů, kde je hodnoceno aktivní nadlepšování minimálního průtoku vodními nádržemi, a 222 závěrných profilů útvarů povrchových vod, kde jsou posuzovány možnosti pokrytí závlahové potřeby v příslušném mezipovodí vodního útvaru.



Obr. 2. Místa významných odběrů povrchové vody

Fig. 2. Locations of significant surface water abstraction

Simulace zásobní funkce proběhla pro každou posuzovanou variantu v měsíčním kroku nad chronologickým hydrologickým podkladem (tj. časovými řadami modelovaných přirozených průměrných měsíčních průtoků a výparu) v celkové délce 30 let (resp. 60 let v projektu Bezpečnostního výzkumu). Simulační model následně u každého posuzovaného požadavku na odběr vody a minimální průtok vyhodnotil simulovanou zabezpečení a porovnal ji se zabezpečení doporučenou ČSN 75 2405 [13].

Postup hodnocení zdrojů podzemních vod

Při posouzení dostatečnosti zdrojů podzemních vod byly aplikovány metody zpracování vodohospodářské bilance současného a výhledového stavu množství podzemních vod [15] a postupy hodnocení kvantitativního stavu podzemních vod [16]. Problémem aplikace těchto dosavadních standardních celorepublikových metod byla dostupná vstupní data o přírodních zdrojích, která se zpracovávala pouze v měřítku hydrogeologických rajonů (celkem 152), jejichž plocha může být až 5 800 km^2 . Konečné výsledky pak mohly ve skutečnosti reprezentovat jen část hodnoceného území. V současné době se dokončuje nová etapa hodnocení kvantitativního stavu podzemních vod, která je rovnou bilancována v měřítku útvarů podzemních vod (celkem 174), nicméně jde pouze o přepočtení přírodních zdrojů podle poměru plochy útvarů vůči rozloze hydrogeologických rajonů. Jedinou výjimkou jsou kvarterní útvary svrchní vrstvy, pro něž se metodika hodnocení kvantitativního stavu zcela změnila. První projekt, který sofistikovaněji pracoval u přírodních zdrojů podzemní vody s podrobnějším měřítkem pro větší plochu ČR, byl projekt Bezpečnostního výzkumu [5] realizovaný v letech 2019–2022, kde byla spočítána současná situace a také změny základního odtoku na úrovni ploch mezipovodí útvarů povrchových vod (celkem 1 118), a poskytl tak data pro 825 pracovních jednotek útvarů podzemních vod (1 220) v rámci varianty II. V projektu „Centrum Voda“ bylo riziko budoucího nedostatečného zajištění zdrojů pro odběry podzemní vody vyhodnocováno též za pracovní jednotky útvarů podzemních vod.

Tab. 2. Vodní nádrže rizikové z hlediska nedostatečného zajištění požadavků na odběry povrchové vody a minimální průtoky k roku 2050

Tab. 2. Water reservoirs at risk of failing to meet surface water abstraction requirements and/or minimum flow rates by 2050

Vodní nádrž	Vodní tok	Odběr vody	Posuzované množství odběru vody ve výhledu [tis. m ³ · rok ⁻¹]	Zabezpečení P _t [%] maximální	Zabezpečení P _t [%] minimální	Riziko
Březová	Teplá	-	-	98,8	84,4	vysoké
České Údolí	Radbuza	-	-	99,1	84,9	vysoké
Dalešice	Jihlava	ostatní	54 697	99,9	98,2	střední
Hamry	Chrudimka	vodárenský	328	99,9	90,5	střední
Hracholusky	Mže	-	-	99,9	99,1	střední
Hubenov	Maršovský potok	vodárenský	3 812	99,9	95,8	střední
Husinec	Blanice	-	-	99,9	94,9	střední
Jesenice	Odrava	-	-	99,9	87,8	střední
Karhov a Zhejral	Studenský potok	vodárenský	217	99,9	95,9	střední
Klabava	Klabava	-	-	93,8	78,8	vysoké
Klíčava	Klíčava	vodárenský	2 858	99,9	74,4	střední
Koryčany	Kyjovka	vodárenský	705	99,9	95,2	střední
Les Království	Labe	-	-	99,9	98,8	střední
Lučina	Mže	vodárenský	1 324	99,9	95,2	střední
Ludkovice	Ludkovický potok	vodárenský	434	99,9	99,8	střední
Luhačovice	Luhačovický potok	-	-	99,9	98,8	střední
Myslivny	Černá	vodárenský	303	99,9	98,8	střední
Nová Říše	Řečice (Olšanský potok)	vodárenský	980	99,9	79,4	střední
Obecnice	Obecnický potok	vodárenský	771	99,6	69,4	vysoké
Olešná	Olešná	ostatní	3 961	99,9	89,4	střední
Opatovice	Malá Haná	vodárenský	2 039	99,9	96,7	střední
Pílská	Pílský potok	vodárenský	970	99,9	91,6	střední
Pílská u Žďáru	Sázava	-	-	99,9	95,5	střední
Podhora a Mariánské Lázně	Teplá	vodárenský	585	99,9	97,8	střední
Římov	Malše	vodárenský	16 605	99,9	99,5	střední
Slušovice	Dřevnice	vodárenský	4 907	99,9	99,1	střední
Stanovice	Lomnický potok	vodárenský	5 318	99,9	96,0	střední
Staviště	Staviště	-	-	99,9	97,1	střední
Tatrovce	Tatrovický potok	ostatní	3 519	99,9	96,3	střední
Vranov	Dyje	vodárenský	2 273	99,9	98,2	střední
Vrchlice	Vrchlice	vodárenský	3 813	99,9	92,2	střední
Znojmo	Dyje	vodárenský	2 377	99,9	98,1	střední
Žlutice	Střela	vodárenský	2 561	99,9	98,0	střední

Na straně přírodních zdrojů byly využity dlouhodobé hodnoty přírodních zdrojů pro hydrogeologické rajony z Rebilance [10] (pro přírodní zdroje s 50% a 80% zabezpečeností a využitelné zdroje zásob podzemních vod), dále z dat ČHMÚ (pro přírodní zdroje s 50% a 80% zabezpečeností) a doplňkově i data z Rajonizace 2005 [11] (ekvivalent přírodních zdrojů s 50% zabezpečeností). Všechny tyto hodnoty bylo dále třeba přepočítat na menší pracovní jednotky podle výstupů modelu hydrologické bilance současného stavu.

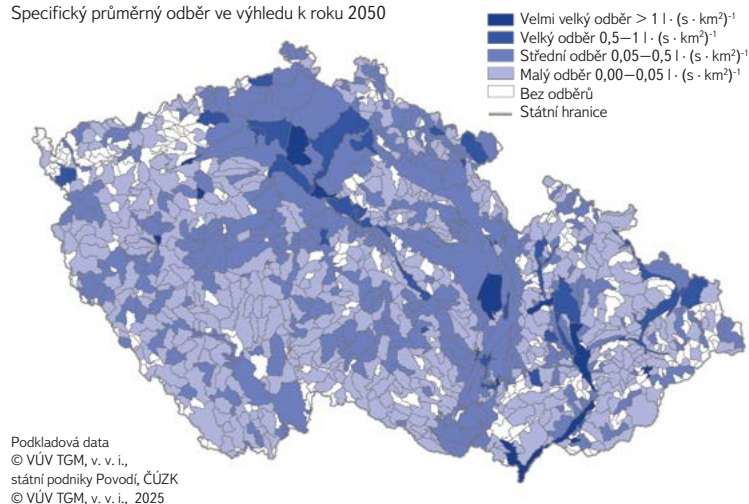
Při hodnocení rizika nedostatečných zdrojů pro odběry podzemních vod byl nejprve pro všechny klimatické modely a emisní scénáře (pomocí územní analýzy) vyhodnocen jejich dopad na změny základního odtoku. Následně byla jako „reprezentativní“ vybrána varianta klimatického modelu ALADIN-CLIMATE/CZ a emisního scénáře SSP585 k roku 2050 (v projektu „Centrum Voda“) a HADGEM2-ES a emisního scénáře RCP4.5 – výhled pro období 2041–2060 (projekt Bezpečnostního výzkumu).

Základem pro bilanci zdrojů podzemní vody jsou na straně spotřeby data o odběrech, přepočtená na l/s. Pro „Centrum Voda“ byly vyčísleny:

- sumy realizovaných ročních odběrů za období 2016–2021 v hydrogeologických rajonech/pracovních jednotkách útvarů podzemních vod,
- průměrné roční odběry v hydrogeologických rajonech/pracovních jednotkách útvarů podzemních vod za období 2016–2021,
- výhledové odběry k roku 2050 dle postupu vyvinutého pro „Centrum Voda“: použitý scénář – vysoká varianta).

Do hodnocení v projektu „Centrum Voda“ byly zahrnuty pouze odběry podzemní vody realizované v roce 2021 jako průměrné roční hodnoty za období 2016–2021, projekt Bezpečnostního výzkumu pracoval s obdobím 2013–2018. Odběry pro pitné účely tvořily se 308 mil. m³ · rok⁻¹ zhruba 82 % veškeré odebírané podzemní vody (v rámci 64 % evidovaných odběrů), ostatní odběry tvořily s 65 mil. m³ · rok⁻¹ přibližně 18 % z odebíraného množství (a 36 % z evidovaných odběrů podzemní vody). Výhledové odběry sestávaly z nezměněných odběrů pro nepitné účely a sumy odběrů pro pitné účely na bilancovanou územní jednotku upravené podle předpokládaného demografického vývoje k roku 2050. Prognózu předpokládaných požadavků na odběry podzemní vody v návaznosti na očekávaný demografický vývoj k roku 2050 znázorňuje obr. 3.

Pracovní jednotky útvarů podzemních vod
Specifický průměrný odběr ve výhledu k roku 2050



Obr. 3. Požadavky na odběry podzemních vod ve výhledu k roku 2050
Fig. 3. Projected groundwater abstraction requirements by 2050

Do bilančního porovnání odběrů podzemních vod vůči přírodním zdrojům v pracovních jednotkách bylo zahrnuto pouze 271 pracovních jednotek z 1 220 s ročními odběry za rok 2021 od 5 l · s⁻¹ výše. Zbývajících 949 pracovních

jednotek nebylo v projektu „Centrum Voda“ hodnoceno, obdobně jako bylo z hodnocení výhledu v projektu Bezpečnostního výzkumu vyřazeno 395 pracovních jednotek. Bilancování odběrů malých hodnot je totiž zatíženo velkými nepřesnostmi.

VÝSLEDKY

Výsledkem výše uvedených postupů bylo vyhodnocení dostatečnosti vodních zdrojů vzhledem k požadavkům na odběry vody a minimální průtoky. Podrobné výsledky řešení jsou – vzhledem k počtu řešených variant a odpovídajícímu datovému rozsahu – uvedeny v příslušné specializované veřejné databázi (viz dále). Zde jsou uvedeny v souhrnné podobě.

Zdroje povrchové vody

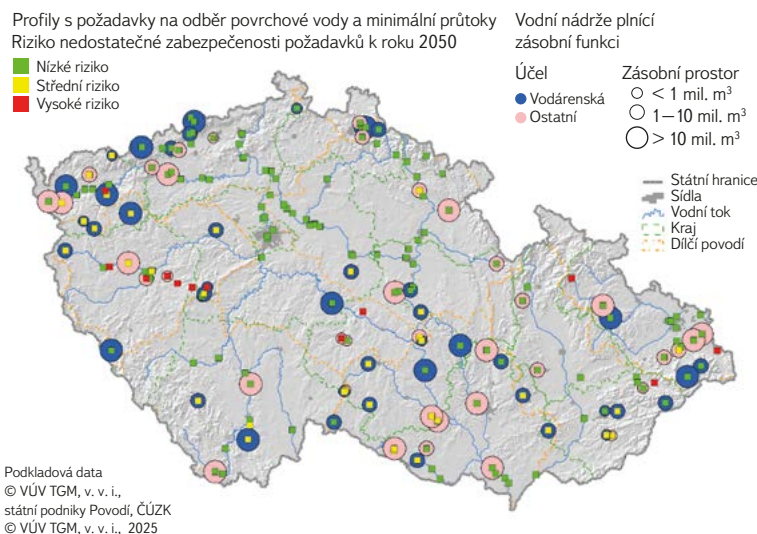
Vyhodnocení zabezpečenosti odběrů povrchové vody a minimálních průtoků pod vodními nádržemi bylo zpracováno ve více než 50 variantách kombinujících posuzované hydrologické podmínky (modely klimatické změny a emisní scénáře) a požadované množství odběru vody.

Riziko nedostatečného zajištění odběru povrchové vody či minimálního průtoku ve výhledu k roku 2050 je v jednotlivých posuzovaných profilech souhrnně pro všechny řešené varianty vyjádřeno pomocí následující klasifikace:

- Vysoké riziko: požadavek není v žádné variantě plně zajištěn a alespoň v jedné variantě nedosahuje normou [13] doporučené hodnoty.
- Nízké riziko: požadavek je ve všech variantách plně zabezpečen.
- Střední riziko: ostatní případy než výše uvedené.

Výsledky ilustruje obr. 4. Rizikové vodní nádrže a rozsah minimální a maximální dosažené zabezpečenosti jimi zajišťovaných odběrů vody a/nebo minimálních průtoků podle trvání p₁ ve výhledu k roku 2050 jsou uvedeny v tab. 2.

Jako vysoce rizikové byly vyhodnoceny vodárenská nádrž Obecnice a dále vodní nádrže Březová, České Údolí a Klabava. Jako středně rizikové bylo identifikováno dalších 29 vodních nádrží, mezi nimi 19 vodárenských.



Obr. 4. Riziko nedostatečného zajištění požadavků na odběry povrchové vody a minimální průtoky k roku 2050
Fig. 4. Risk of failing to meet surface water abstraction requirements and minimum flow rates by 2050

Hodnocení rizikovosti výhledového stavu k roku 2050



Obr. 5. Podíl ploch pracovních jednotek (PRJ) rizikových z nedostatku zdrojů pro odběry podzemních vod k roku 2050 v hydrogeologických rajonech
 Fig. 5. Proportion of work units (PRJ) at risk of groundwater abstraction shortages by 2050 in hydrogeological zones

Zdroje podzemní vody

Kritické meze poměru odběrů vůči přírodním zdrojům byly převzaty z postupů hodnocení kvantitativního stavu jako 0,4 pro přírodní zdroje s 50% zabezpečeností a 0,5 pro přírodní zdroje s 80% zabezpečeností. Pro porovnání odběrů vůči využitelným zdrojům nebyly spočítány bilanční podíly, ale od využitelných zdrojů byly odečteny průměrné roční odběry za období 2016–2021 a podíl zbylých (nevyužitých) zdrojů vůči celkové hodnotě využitelných zdrojů byl porovnán s kritickou mezí 20 % (tj. výsledek byl považován za nevyhovující, pokud podíl nevyužitých zdrojů byl nižší než 0,2).

Z bilančního hodnocení byl kromě pracovních jednotek s příliš malými odběry podzemní vody vyřazen i hydrogeologický rajon 3110 Pavlovské vrchy, u něhož chybí stanovení přírodních zdrojů jakýmkoli způsobem a zároveň v něm nejsou přítomny významné odběry.

Syntéza dílčích bilančních porovnání odběrů vůči přírodním zdrojům (pro šest bilančních porovnání současného stavu a šest bilančních porovnání výhledového stavu) mírně prioritizovala na stranu bezpečnosti nevyhovující výsledky pro poměry vůči 50% přírodním zdrojům. Výsledky bilančních poměrů odběrů s 80% přírodními zdroji a bilančních porovnání odběrů s využitelnými zdroji byly považovány za méně věrohodné. Nulové odběry výslednou kategorii stavu logicky nezhoršovaly, ale nulové přírodní zdroje ano. Dále výslednou syntézu nepříznivě ovlivňovalo i množství bilančních porovnání, která nemohla být pro absenci dat o přírodních zdrojích stanovena u pracovních jednotek, v nichž vyšlo alespoň jedno nevyhovující porovnání.

Výsledkem bilančních porovnání bylo zhodnocení současného i výhledového stavu (výsledky k roku 2050, viz obr. 5). Při použití modelu ALADIN-CLIMATE/CZ a emisního scénáře SSP585 pro přírodní zdroje a zároveň využití demografických prognóz vychází poměrně málo pracovních jednotek podzemních vod jako rizikových – z hodnocených pracovních jednotek jich bylo 47 s vysokým rizikem (což je 6,6 % plochy), 16 se středním rizikem (1,5 % plochy) a 208 s nízkým rizikem (39,7 % plochy). Zbývajících 949 pracovních jednotek (52,2 % plochy) nebylo hodnoceno z důvodu nízkých hodnot odběrů podzemní vody (pod $5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) a s tím spojené vysoké nepřesnosti.

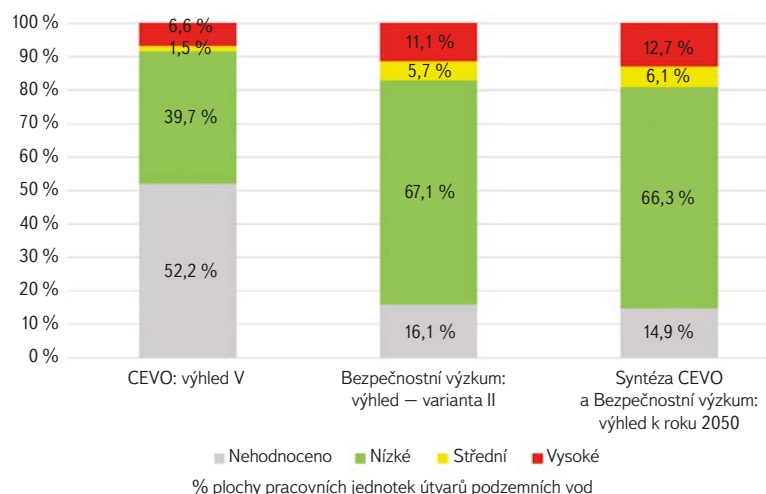
V hydrogeologických rajonech, kde alespoň jedna pracovní jednotka vyšla ve výhledu jako riziková, byly zpracovány statistiky výsledků pracovních jednotek dle procenta plochy rajonu (viz obr. 6). Podíly nehodnoceného území činily až 84,4 % plochy rajonu. I tak bylo zřejmé, že výsledky hodnocení rizikovosti mohou být velice heterogenní a zacílení hodnocení výhledového stavu v podrobnějším měřítku má i navzdory limitům predikce vývoje smysl.

Celková suma všech průměrných ročních odběrů za hodnocené období 2016–2021 činila $11\,627 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ a suma výhledových odběrů k roku 2050 $11\,665 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ pro model ALADIN-CLIMATE/CZ a emisní scénář SSP585. Podíl předpokládaného odebíraného množství k roku 2050 ze všech výhledových odběrů byl 29,2 % ($3\,410 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) v pracovních jednotkách s vysokým rizikem, 5,8 % ($681 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) v pracovních jednotkách se středním rizikem, 56,3 % ($6\,567 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) v pracovních jednotkách s nízkým rizikem a 8,6 % ($1\,007 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) v nehodnocených pracovních jednotkách.

V rámci Bezpečnostního výzkumu bylo vyhodnoceno 825 pracovních jednotek z 1 220 za pomoci klimatického modelu HADGEM2-ES při emisním scénáři RCP4.5 s výhledem k roku 2050, přičemž vysoké riziko bylo zjištěno u 91 pracovních jednotek o ploše 11,1 % ČR, střední riziko u 37 pracovních jednotek o ploše 6,1 % a nízké riziko u 697 pracovních jednotek o ploše 67,1 % (obr. 6). Zbylé pracovní jednotky nebyly hodnoceny z důvodu nízkých odběrů.

Nakonec byla provedena syntéza výsledků z „Centra Voda“ a Bezpečnostního výzkumu, kdy byl převzat vždy nejhorší z obou výstupů. Celkem bylo zhodnoceno 838 pracovních jednotek z 1 220, přičemž vysoké riziko bylo zjištěno u 106 pracovních jednotek o ploše 12,7 % ČR, střední riziko u 43 pracovních jednotek o ploše 6,1 % a nízké riziko u 689 pracovních jednotek o ploše 66,3 % (obr. 6 a 7). Zbývajících 382 pracovních jednotek (14,9 % plochy) nebylo hodnoceno.

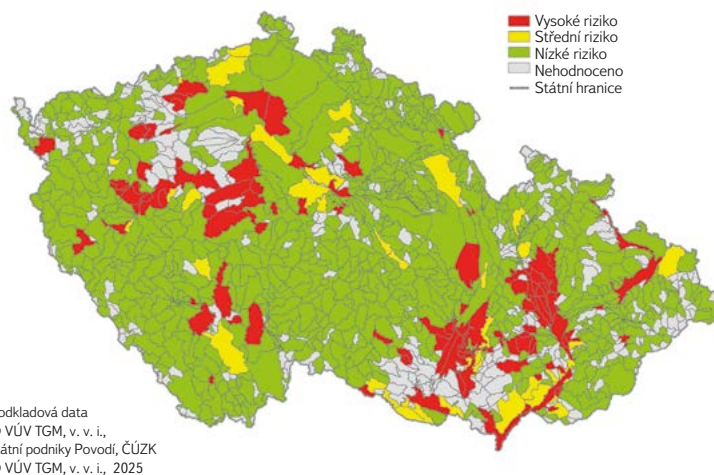
Rizikové pracovní jednotky podzemní vody jsou znázorněny v přehledové mapě na obr. 7.



Obr. 6. Porovnání výsledků vyhodnocení rizika pro klimatický model ALADIN-CLIMATE/CZ při scénáři SSP585 („Centrum Voda“ – CEVO) a klimatický model HADGEM2-ES při emisním scénáři RCP4.5 (Bezpečnostní výzkum)

Fig. 6. Comparison of risk assessment results for the ALADIN-CLIMATE/CZ climate model under the SSP585 scenario (Water Center – CEVO) and the HADGEM2-ES climate model under the RCP4.5 emissions scenario (Security research)

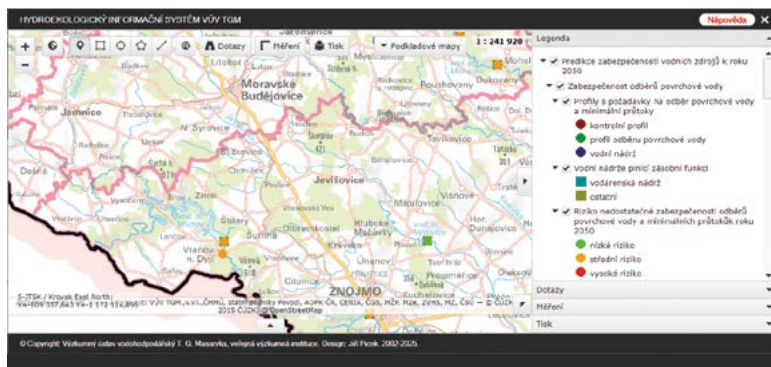
Pracovní jednotky útvárů podzemní vody
Riziko nedostatečných zdrojů pro předpokládané odběry podzemních vod k roku 2050



Obr. 7. Riziko nedostatečných zdrojů pro odběry podzemních vod k roku 2050
Fig. 7. The risk of insufficient groundwater resources for abstraction by 2050

Veřejná specializovaná databáze

Podrobné výsledky vyhodnocení zabezpečení vodních zdrojů byly zapracovány do příslušných specializovaných veřejných databází, jež lze najít na internetových stránkách obou projektů [7, 17]. Data jsou dostupná prostřednictvím prohlížečských služeb formou interaktivních map a připojených tabulek. Uživatelské rozhraní ilustrují obr. 8 a 9.



Obr. 8. Uživatelské rozhraní prohlížečské služby: Mapová část

Fig. 8. Browser Service User Interface: Map section

Suhai	Varianta	Kódový název	Zdroj	Rozsah	Rozsah	ID odběru	Název odběru	POVZAB_UCEL	Zabezpečení podle zdrojů (P)	Zabezpečení podle zdrojů (P)
1.	ALADN_SSP245_2050_SH	ALADN	SSP245	rozsahové požadavky	2 000	POVSI 1981	VAB Zdroje - SV Zdroje - VAB	rozsahové požadavky	99 903	100
2.	ALADN_SSP245_2050_VV	ALADN	SSP245	výhledové požadavky k roku 2050 (vysoká varianta)	2 000	POVSI 1981	VAB Zdroje - SV Zdroje - VAB	rozsahové požadavky	99 903	100
3.	ALADN_SSP585_2050_SH	ALADN	SSP585	rozsahové požadavky	2 000	POVSI 1981	VAB Zdroje - SV Zdroje - VAB	rozsahové požadavky	96 515	98 647
4.	ALADN_SSP585_2050_VV	ALADN	SSP585	výhledové požadavky k roku 2050 (vysoká varianta)	2 000	POVSI 1981	VAB Zdroje - SV Zdroje - VAB	rozsahové požadavky	96 515	98 647
5.	CMCC_E042_SSP126_2050_SH	CMCC	SSP126	rozsahové požadavky	2 000	POVSI 1981	VAB Zdroje - SV Zdroje - VAB	rozsahové požadavky	99 903	100

Obr. 9. Uživatelské rozhraní prohlížečské služby: Tabulková část

Fig. 9. Browser Service User Interface: Table view

DISKUZE

Posouzení zabezpečení vodních zdrojů v budoucnosti představuje řešení poměrně komplexní problematiky. Její modelování v rozsahu celé ČR vyžaduje nezbytná zjednodušení a je zatíženo řadou nejistot. Jako významné nejistoty lze uvést následující. Časový horizont roku 2050 byl zvolen v souladu se zadáním projektu „Centrum Voda“ a současně představuje období, pro které lze ještě relativně věrohodně predikovat nejen vývoj klimatických charakteristik, ale i budoucí požadavky na odběry vody a stav vodohospodářské infrastruktury. Ve výhledu k roku 2100 by se významně zvyšovaly nejistoty spojené nejen s klimatickými modely, ale také s demografickým, ekonomickým a technologickým vývojem. Z tohoto důvodu lze výsledky posuzovat především jako podklad pro střednědobé plánování adaptačních opatření v horizontu několika desetiletí. Výsledky nelze interpretovat jako jednoznačnou predikci budoucího stavu, nýbrž jako vyhodnocení možného rozpětí budoucího vývoje při různých kombinacích klimatických a socioekonomických předpokladů.

Významnou nejistotu ve výsledcích řešení představují zejména predikce dopadu klimatické změny na hydrologické charakteristiky, v menší míře potom predikce budoucího vývoje požadavků na odběry vody. Nejistota je reflektována volbou více variant řešení. To se nicméně projevilo i při určitém rozptylu vyhodnocené zabezpečení (např. vodní nádrže Klíčava, Obecnice, Stanovice nebo Hamry), kdy řada lokalit byla identifikována jako riziková jen při některých méně příznivých variantách. Nejvyšší míra identifikovaných rizik se zpravidla objevovala u kombinací klimatických modelů s emisním scénářem SSP585, který lze chápat především jako scénář reprezentující horní hranici potenciálních dopadů klimatické změny. Tento scénář nebyl v rámci studie interpretován jako nejpravděpodobnější vývoj, ale jako jedna z variant umožňujících posoudit rozsah možných budoucích rizik pro vodní zdroje. Hodnocení zdrojů

podzemních vod je zatíženo nejistotami u údajů týkajících se zdrojů podzemních vod v současnosti, heterogenitou přírodních zdrojů v hydrogeologických rajonech a aproximací přírodních zdrojů do budoucnosti.

Odběry vody jsou limitovány požadavky na zachování ekologické funkce vodních toků. Tento požadavek je nyní zajištěn zachováním tzv. minimálních zůstatkových průtoků. V současné době je připravováno nařízení vlády, jež by mělo způsob stanovení hodnot minimálních zůstatkových průtoků přiblížit požadavkům Rámcové směrnice pro vodní politiku EU. Posouzení zabezpečení minimálních průtoků se při řešení omezilo na průtoky aktivně zajišťované vodními nádržemi (tedy minimální odtok z vodní nádrže, případně nadlepšování minimálních průtoků v dalších níže položených profilech). V ostatních posuzovaných profilech nebyl výhledový minimální průtok určen, a tudíž nebyla ani klasifikována jeho zabezpečení.

Požadavky na odběry vody vycházejí především z analýzy skutečných evidovaných odběrů. Skutečné odběry vody nicméně nemusí dostatečně přesně reprezentovat současné požadavky na odběry: odebrané množství se může měnit v závislosti na mnoha faktorech souvisejících např. s provozem průmyslových podniků (odstávky provozu apod.) nebo výskytem sucha (omezení odběrů v důsledku nedostatku vody ve vodních zdrojích, zvýšené nároky na odběry pro závlahy kvůli nedostatku vody v půdě apod.). Problém s určením požadavků na odběry a příslušných zdrojů může nastávat rovněž v případě zásobování pitnou vodou vodárenskými systémy, kdy odběr může být uskutečněn z více zdrojů (vodních toků či nádrží), odebrané množství z určitého zdroje může být proměnlivé, např. v závislosti na dalších pro provoz důležitých faktorech. Rovněž povolené množství odběru se v mnoha případech dlouhodobě liší (je často výrazně vyšší) než skutečně odebírané množství.

ZÁVĚR

Cílem výše popsaného řešení bylo vyhodnotit zabezpečení odběrů vody a minimálních průtoků zdroji povrchových i podzemních vod ve výhledu k roku 2050 a identifikovat problémové lokality. Zabezpečení odběrů vody byla posouzena pomocí metod simulačního modelování (při posuzování zdrojů povrchových vod), vodohospodářské bilance a postupů hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemních vod. Řešení bylo zpracováno v celostátním rozsahu. Vstupními údaji byly zejména časové řady modelovaného odtoku, výparu a základního odtoku z povodí vodoměrných stanic a z mezipovodí útvarů povrchových vod v podmínkách dopadů klimatické změny a výhledové požadavky na odběry vody. Uvažována byla stávající infrastruktura vodních nádrží a převodů vody a jejich kapacit. Nejistoty vyplývající z predikce budoucího vývoje byly reflektovány variantním řešením. Požadavky na odběry vody byly posouzeny pro současné skutečné odběry vody i predikované odběry vody. Vliv možných dopadů klimatické změny na vodní zdroje byl uvažován pro kombinaci klimatických modelů a emisních scénářů. Mezi nejistoty řešení lze zařadit problém stanovení požadavků na odběry vody (např. dlouhodobě značné rozdíly mezi povoleným a skutečným odebíraným množstvím), na problematiku minimálních zůstatkových průtoků a problém interakce mezi povrchovými a podzemními vodami. Při vyhodnocení zdrojů povrchových vod bylo jako potenciálně rizikové identifikováno 33 vodních nádrží (z 82 posuzovaných). Zdroje podzemních vod byly vyhodnoceny u 838 pracovních jednotek útvarů podzemních vod (z 1 220 v ČR), přičemž vysoké riziko bylo zjištěno u 106 pracovních jednotek o ploše 12,7 % ČR, střední riziko u 43 pracovních jednotek o ploše 6,1 % a nízké riziko u 689 pracovních jednotek o ploše 66,3 %. Zbývajících 382 pracovních jednotek (14,9 % plochy ČR) nebylo do hodnocení výhledu zařazeno z důvodu nízkých odběrů (pod $5 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) a s tím spojené nepřesnosti hodnocení. V pracovních jednotkách s vysokým rizikem činil podíl předpokládaného odebíraného množství k roku 2050 ze všech výhledových odběrů 29,2 % ($3 410 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ z celkových $11 665 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ za celou ČR), v pracovních jednotkách se středním rizikem byl

5,8 % ($681 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$), v pracovních jednotkách s nízkým rizikem 56,3 % ($6\,567 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) a v nehodnocených pracovních jednotkách 8,6 % ($1\,007 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$) pro klimatický model ALADIN-CLIMATE/CZ při scénáři SSP585.

Výsledky vyhodnocení byly zapracovány do příslušných specializovaných veřejných databází. I přes výše uvedené nejistoty a nezbytná zjednodušení vyplývající z řešení v celostátním rozsahu poskytuje určení v budoucnosti potenciálně rizikových zdrojů podzemních a povrchových vod podklad pro podrobnější řešení a včasnou přípravu případných opatření ke snížení rizik.

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“ řešeného s finanční podporou Technologické agentury ČR v rámci podprogramu 3 – Dlouhodobé environmentální a klimatické perspektivy programu SS – Program aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí – Prostředí pro život a projektu č. VI20192022159 „Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou“ programu BV III/1-VS řešeného s finanční podporou Ministerstva vnitra ČR.

Literatura

[1] DLABAL, J., VYSKOČ, P., BINDZAR, J., POTOPOVÁ, V., SCHWARZOVÁ, P., TRNKA, M., DOSTÁL, T., DOČKAL, M., SEMERÁDOVÁ, D., ARBELAEZ GAVIRIA, J., ŠTĚPÁNEK, P., JÁČKOVÁ, A., MUSIOLKOVÁ, M., KULT, A. Scénáře budoucí potřeby vody do roku 2050: sektorové analýzy a prognózy. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2024, 66(6), s. 26–44. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2024.09.001>

[2] VIZINA, A., GEORGIEOVÁ, I., VYSKOČ, P., MELIŠOVÁ, E., HANEL, M., TRNKA, M., PAVLÍK, P., FISCHER, M. Databáze HYMOD-KZ a deficitní oblasti. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2024, 66(6), s. 4–11. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2024.09.003>

[3] VYSKOČ, P., PRCHALOVÁ, H., KOZLOVÁ, M., PICEK, J., NOVÁKOVÁ, H. *Predikce vývoje zabezpečení vodních zdrojů v ČR do r. 2050 v podrobnosti krajů v závislosti na změně klimatu*. Výzkumná zpráva. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2025. Dostupné z: <https://www.centrum-voda.cz/vysledky/wp-1-budoucnost-vody>

[4] VIZINA, A., VYSKOČ, P., PELÁKOVÁ, M., PICEK, J., BERAN, A. a KOŽÍŇ, R. Zabezpečení odběrů vody z vodárenských nádrží v podmínkách klimatické změny. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2021, 63(3), s. 4–18. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2021.03.001>

[5] PRCHALOVÁ, H., VYSKOČ, P., VIZINA, A., NOVÁKOVÁ, H. Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(5), s. 22–31. ISSN 0322-8916. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2022.07.005>

[6] *Centrum Voda* [on-line]. VÚV TGM, v. v. i. [citováno 2026-05-10]. Dostupné z: <https://www.centrum-voda.cz>

[7] *Vodohospodářské a vodárenské soustavy a preventivní opatření ke snížení rizik při zásobování pitnou vodou*. Projekt MV ČR, č. VI20192022159. VÚV TGM, v. v. i., 2019–2022. [citováno 2026-05-10]. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/projekty/rzv>

[8] *Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 431/2001 Sb., o obsahu vodní bilance, způsobu jejího sestavení a o údajích pro vodní bilanci*.

[9] *Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu a o změně některých zákonů (zákon o vodovodech a kanalizacích)*.

[10] KADLECOVÁ, R. et al. *Rebilance zásob podzemních vod*. Česká geologická služba, 2018. Dostupné z: <http://www.geology.cz/rebilance/vysledky>

[11] PRCHALOVÁ, H. ed. *Hydrogeologická rajonizace. Závěrečná zpráva*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2005. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/projekty/HGR2005>

[12] VYSKOČ, P., ZEMAN, V. *Metodický postup zpracování vodohospodářské bilance současného a výhledového stavu množství povrchových vod*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2008.

[13] ČSN 75 2405. *Vodohospodářská řešení vodních nádrží*. 2017.

[14] PICEK, J., VYSKOČ, P., ZEMAN, V. *Simulační model množství povrchových vod: zásobní funkce vodohospodářské soustavy*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2008.

[15] *Metodický pokyn MZE pro sestavení vodohospodářské bilance povodí ze dne 28. 8. 2002*. Dostupné z: <https://mze.gov.cz/public/portal/mze/-q357509---WXqafPVQ/metodicky-pokyn-25248-2002-6000>

[16] PRCHALOVÁ, H., DURČÁK, M., KOZLOVÁ, M., VIZINA, A., ROSENDORF, P., MRKVIČKOVÁ, M. et al. *Metodiky hodnocení chemického a kvantitativního stavu útvarů podzemních vod pro druhý cyklus plánů povodí v ČR*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2013. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/projekty/rsv>

[17] VYSKOČ, P., PRCHALOVÁ, H., KOZLOVÁ, M., PICEK, J. *Specializovaná veřejná databáze: Predikce vývoje zabezpečení vodních zdrojů v ČR do r. 2050*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2025. Dostupné z: <https://heis.vuv.cz/link/cevowplzabezpdzdroju>

Autoři

Ing. Petr Vyskoč

✉ petr.vyskoc@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-5006-5414

RNDr. Hana Prchalová

✉ hana.prchalova@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-1890-8335

Ing. Marie Kozlová

✉ marie.kozlova@vuv.cz

ORCID: 0009-0001-6601-6107

Ing. Jiří Píček

✉ jiri.picek@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-6978-6801

Ing. Adam Vizina, Ph.D.

✉ adam.vizina@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-4683-9624

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

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.05.005

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

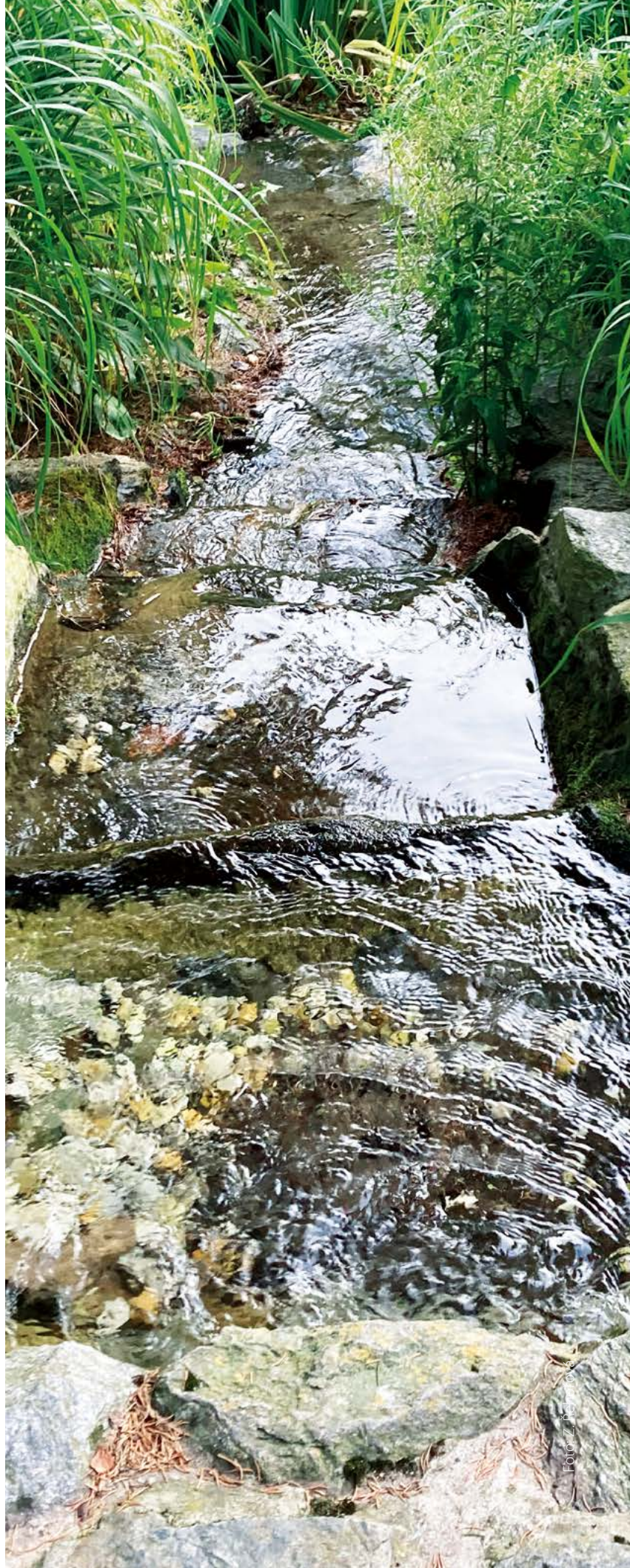
FORECAST OF WATER RESOURCE SECURITY IN THE CZECH REPUBLIC BY 2050

**VYSKOČ, P.; PRCHALOVÁ, H.; KOZLOVÁ, M.;
PICEK, J.; VIZINA, A.**

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

Keywords: climate change — water resources — water scarcity —
water supply — water balance

This article presents the methods and results of an assessment of the security of water abstraction and minimum flow rates through 2050, taking into account the potential impacts of climate change on water resources and projected water demand based on socioeconomic development forecasts. The study was conducted on a national scale. Water bodies defined for water planning purposes were selected as the minimum spatial scale. The study employed simulation modeling methods, water balance methods, and procedures for evaluating the quantitative status of groundwater bodies. The potential impacts of climate change on water resources were considered using a combination of 8 climate models (CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM2-0, TAIESM1, HADGEM2-ES, and ALADIN-CLIMATE/CZ) and emission scenarios (SSP126, SSP245, SSP370, SSP585, RCP4.5). The existing infrastructure of water reservoirs and water transfers, along with their capacities, was taken into account. In the assessment of surface water sources, 33 water reservoirs (out of 82 assessed) were identified as potentially at risk, as they provide water abstractions and/or ensure minimum flows in watercourses. Groundwater sources were assessed for 838 groundwater body units (out of 1,220 in the Czech Republic), with high risk identified in 106 units covering 12.7 % of the Czech Republic, medium risk in 43 units covering 6.1 % of the area, and low risk in 689 units covering 66.3 % of the area.



Vývoj stavu útvarů povrchových vod podle chemických a fyzikálně-chemických ukazatelů

HANA PRCHALOVÁ, PETR VYSKOČ, MARIE KOZLOVÁ

Klíčová slova: chemický stav vod — ekologický stav vod — vodní útvar — ukazatele jakosti vod — znečišťující látky

ABSTRAKT

V příspěvku jsou prezentovány navrhované postupy pro zjišťování vývoje stavu povrchových vod, tedy jak probíhá díky realizovaným opatřením pokrok při dosahování dobrého stavu. Postupy vycházejí z nově přepočítaných hodnocení pro jednotlivé profily, ukazatele a tříletí, přičemž se používají poslední schválené charakteristické hodnoty a limity. Ke každému profilu, ukazateli a tříletí se přiřadí kromě celkového výsledku (dobrý/nevyhovující stav) také index nesouladu, což je podíl charakteristické hodnoty vůči limitu dobrého stavu. Dalším krokem je zařazení indexu nesouladu do jednotlivých kategorií, které reprezentují buď výši překročení limitu, nebo naopak (pro kategorie dobrého stavu) blízkost k limitu. Při porovnávání výsledků za jednotlivá tříletí je potřeba vybírat jen ty profily, jež měly měření za celé hodnocené období, aby bylo srovnání vypovídající.

Postup byl zároveň aplikován na celkem 10 ukazatelů, které reprezentují nejvíce problematické ukazatele ekologického a chemického stavu/potenciálu (s výjimkou biologických složek, jimiž se projekt nezabýval).

Z výsledků bylo zjevné, že dusičnanový a amoniakální dusík, fluoranten, metabolity alachloru a AOX ukazují trend snižování koncentrací a častěji dosahují dobrého stavu, ale koncentrace se snižují i v profilech, kde je index nesouladu vysoký. Koncentrace BSK₅, metolachloru a jeho metabolitů a EDTA v zásadě stagnují, pro celkový a fosforečnanový fosfor lze pozorovat stagnaci až pomalé zhoršování, nezlepšují se ani vysoké koncentrace.

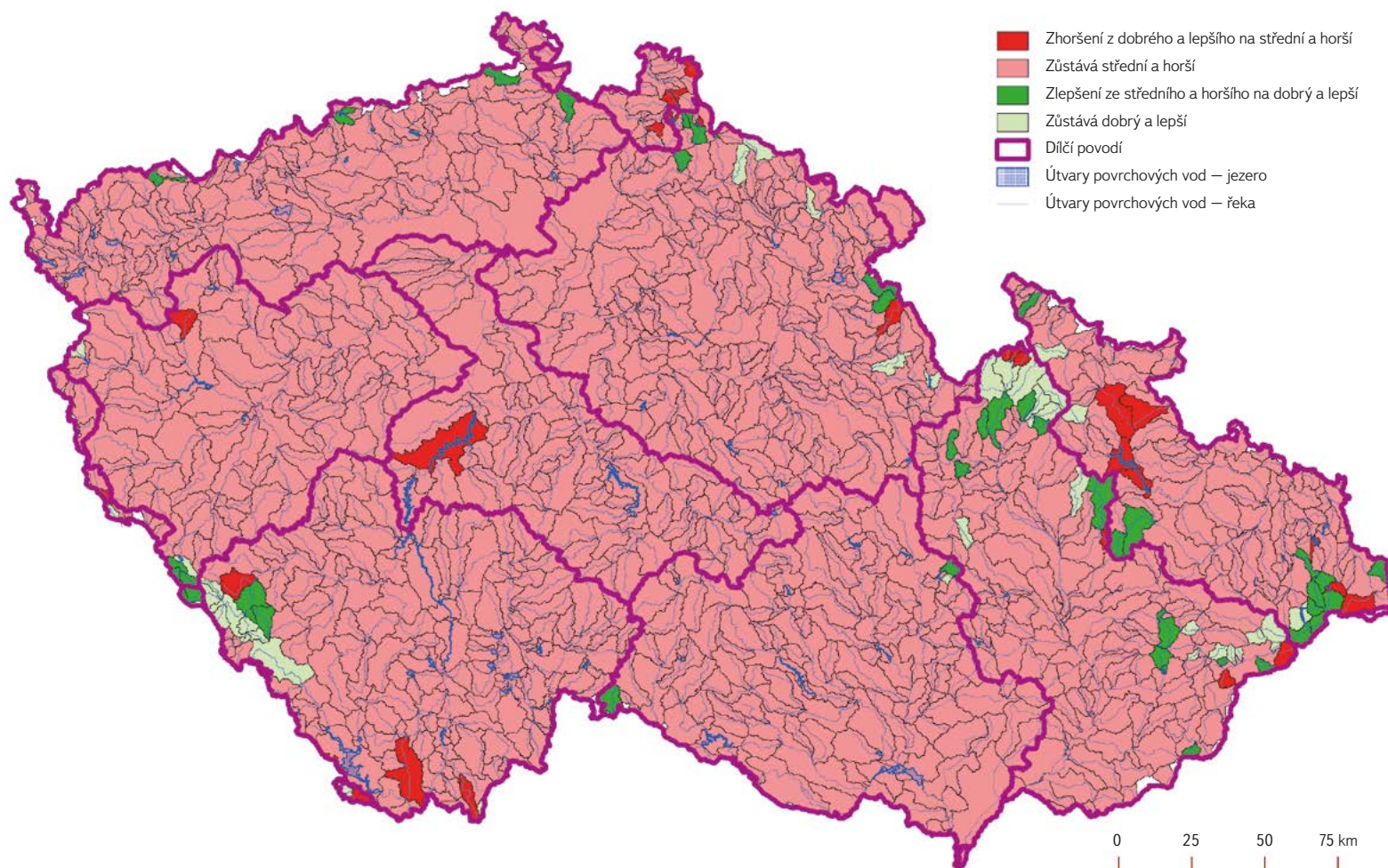
ÚVOD

Významnou součástí plánů povodí podle Rámcové směrnice o vodách (RSV) [1] je hodnocení stavu vodních útvarů. Cílem plánů povodí je dosáhnout dobrého ekologického stavu (případně dobrého ekologického potenciálu) a dobrého chemického stavu povrchových vod. Pro plány povodí se stav povrchových vod hodnotí jednou za šest let, ale podle § 4 vyhlášky č. 98/2011 Sb., o způsobu hodnocení stavu útvarů povrchových vod, způsobu hodnocení ekologického potenciálu silně ovlivněných a umělých útvarů povrchových vod a náležitostí programů zjišťování a hodnocení stavu povrchových vod ve znění pozdějších předpisů [2], se stav útvarů povrchových vod vyhodnocuje jednou za tři roky. Pro plány povodí se pak používá druhé tříletí, takže např. v průběhu třetího cyklu plánů byl vyhodnocen stav povrchových vod za tříletí 2013–2015 a pak za 2016–2018, přičemž pro plány byly využity v naprosté většině výsledky za období 2016–2018.

Ačkoli se chemický i ekologický stav/potenciál skládá z více složek kvality nebo z více znečišťujících látek, pro něž platí pravidlo „one out – all out“ (tj. stav určuje nejhorší hodnocení), výsledky se převážně uvádějí v agregované

formě – jeden stav pro celý ekologický nebo chemický stav na vodní útvar. Vzhledem k tomu, že hodnocení stavu probíhá již od roku 2010 a za posledních 16 let se toho mnoho změnilo jak na evropské, tak na národní úrovni z hlediska vymezení vodních útvarů, výběru ukazatelů, limitů dobrého stavu, postupů hodnocení, monitorovaných ukazatelů a zároveň již také probíhají opatření na zlepšení stavu vod, je velmi obtížné na základě agregovaných výsledků hodnocení určit, jestli se situace zlepšuje, či nikoli. Zároveň je realizace opatření velice nákladná, a kontrola efektivity opatření je proto nezbytná – a to jak pro instituce, které se návrhem a realizací opatření zabývají, tak i pro širší veřejnost. Mezi zeměmi již existuje konsensus, že pro zjišťování pokroku při dosahování dobrého stavu je nutné v ekologickém stavu rozčlenit vyhodnocení nejméně na jednotlivé složky kvality – biologické, hydromorfologické, chemické (specifické znečišťující látky) a fyzikálně-chemické – a v chemickém stavu na tzv. všudypřítomné látky a ostatní. Pro chemický stav Evropská komise požaduje rozčlenit vykazování výsledků podle prvních požadavků, aby byly výsledky srovnatelné. Nicméně ukazuje se, že takto hrubé členění nestačí.

Při diskuzích na evropské úrovni se ukazuje, že navrhnout jeden způsob zjišťování pokroku při dosahování dobrého stavu pro všechny členské státy je velmi problematické, neboť se liší jak frekvence a četnost monitoringu jednotlivých ukazatelů či znečišťujících látek, tak i způsob hodnocení stavu. Např. některé země hodnotí stav vybraných ukazatelů chemického stavu každý rok a použijí poslední hodnocení, jiné země však hodnotí jen některé roky. ČR nejčastěji monitoruje chemický stav každý rok a výsledek stavu je dán nejhorším výsledkem z posledních tří let. Pro všeobecné fyzikálně-chemické ukazatele (např. živiny, teplotu a kyslík) se zase používá výsledek za tříleté období – v ČR se většinou hodnotí medián (pro dusičnanový dusík a teplotu také maximální hodnoty) z posledních tří let, ale postupy se pro jednotlivé země liší. Např. v Rakousku se dusík v povrchových vodách hodnotí – stejně jako v ČR – jako dusičnanový dusík a hranice mezi dobrým a středním ekologickým stavem je určena typově specificky. Limitní hodnoty se obvykle pohybují mezi 3,0 a 4,0 mg/l (v ČR 2,3–3,8), nicméně v Rakousku se hodnotí pomocí 90. percentilu z dat sebraných za celý kalendářní rok a výsledný stav odpovídá nejhoršímu ročnímu výsledku za celé šestileté období [3]. V Maďarsku se hodnotí celkový anorganický dusík, limit je 1,4–5,0 mg/l ročního aritmetického průměru, ale je-li fyto-bentos nebo fytoplankton v dobrém stavu, k výsledku celkového anorganického dusíku se nepřihlíží. Při vykazování stavu se počítá šestiletý aritmetický průměr ze všech ročních průměrů, nicméně pokud koncentrace dusíku vykazují za poslední tři roky cyklu jasně stoupající trend, použijí se pouze data za poslední tři roky [4]. Ve Francii se hodnotí dusičnany, limit dobrého stavu je jen jeden pro všechny povrchové vody – 50 mg/l (cca 11,3 mg/l dusičnanového dusíku), stejně jako v Rakousku se používá 90. roční percentil, ale pro výsledný stav se využívají – podobně jako v ČR – výsledky za poslední tři roky monitorovacího cyklu, spočítané jako 90. percentil [5]. Z této krátké ukázky je zřejmé, že postupy hodnocení



Obr. 1. Změna ekologického stavu nebo ekologického potenciálu útvarů povrchových vod mezi obdobími 2016–2018 a 2022–2024

Fig. 1. Changes in the ecological status or ecological potential of surface water bodies between the periods 2016–2018 and 2022–2024

jsou různé a veškeré pokusy stanovit společnou evropskou metodiku tedy většinou končí u nejmenšího společného jmenovatele [6], který možná umožní porovnávat jednotlivé země, avšak jeho vypovídací schopnost výsledků pro zjišťování pokroku je značně omezená.

Z těchto důvodů tedy vznikla zde částečně prezentovaná metodika pro zjišťování pokroku v dosahování dobrého stavu povrchových vod (ve výzkumném projektu TA ČR č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“), která sice vychází ze základních evropských principů [6], ale je přizpůsobena datům a postupům používaným v ČR.

METODIKA A POUŽITÁ DATA

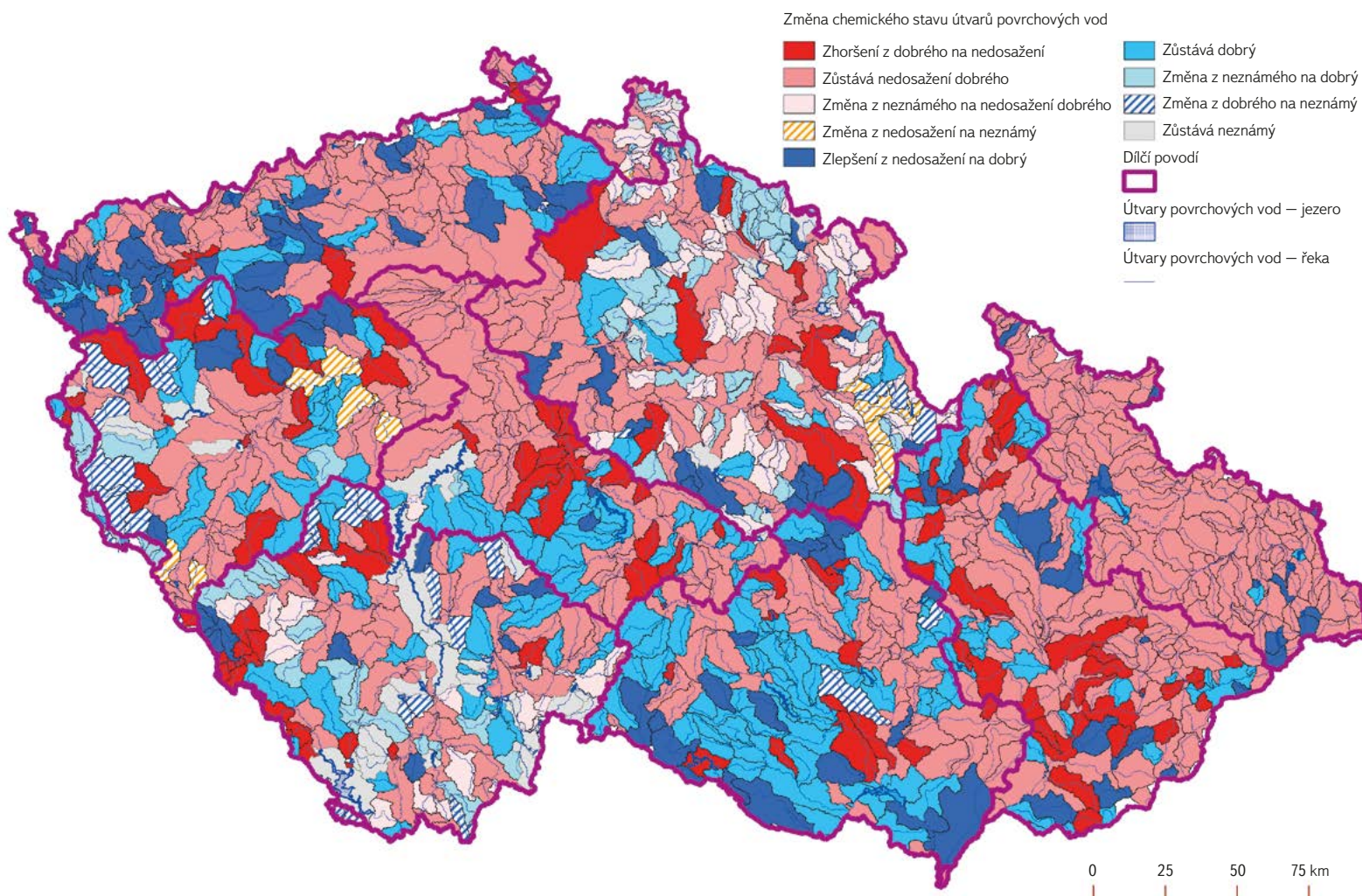
Než byla vybrána vhodná metodika, předcházelo jí relativně dlouhé období, ve kterém byly testovány různé přístupy. Nejčastější bylo porovnání výsledků dobrý – nevyhovující stav pro jednotlivé útvary (obr. 1), kde je v mapě znázorněna změna ekologického stavu/potenciálu mezi dvěma plánovacími cykly [7].

Rozdíly v hodnocení ekologického stavu/potenciálu byly pro toto porovnání zvoleny proto, že je porovnávání výsledků nejjednodušší – obě hodnocená tříletí byla zpracována stejnou metodikou a ekologický stav téměř všech útvarů byl hodnocen (tedy bylo tam minimum nehodnocených útvarů). Už z mapy je zřejmé, že změn ekologického stavu/potenciálu bylo minimum a zahrnovaly jak zlepšení (zelené útvary), tak zhoršení (červené útvary). Ke zlepšení stavu (což ale

vždy neznamená dosažení dobrého stavu, do zlepšení se počítá i posun ze zničeného na špatný nebo ze špatného na dobrý) došlo v tříletí 2022–2024 u 18,3 % útvarů, naopak ke zhoršení u 14,7 % útvarů (stále dobrých bylo 3,4 % a stále nevyhovujících 63,6 % útvarů). Tento způsob porovnání však nedává žádnou informaci o důvodech, proč ke změně hodnocení došlo.

Stejným způsobem byly znázorněny změny v hodnocení chemického stavu (obr. 2). Vzhledem k tomu, že v obou tříletích se část útvarů nemonitorovala (nebo v nich byl příliš malý počet měření), je zde již mnohem více kategorií. Tyto další kategorie nelze pominout (respektive bylo by pouze možné je zařadit mezi neznámé, což by nebylo přesné), ale v každém případě je celkový výsledek nevyhovující a zároveň ještě více nepřehledný. Zlepšení stavu na dobrý bylo zjištěno pro 10,6 % útvarů, velmi podobně zhoršení 10,8 % útvarů, stále dobrých je 18,5 %, stále nevyhovujících 37,3 % a jen v jednom tříletí bylo hodnoceno 22,8 % útvarů.

Při hodnocení vývoje ekologického a chemického stavu se musíme zaměřit na jednotlivé ukazatele, případně složky kvality. Prvním problémem je, na které ukazatele a složky se zaměřit – pokud nepočítáme hydromorfologickou složku, která je jen podpůrná, je celkem pět biologických složek, 10 ukazatelů všeobecných fyzikálně-chemických složek a 137 specifických a prioritních znečišťujících ukazatelů. Ne všechny složky a ukazatele jsou stejně významné z hlediska nedosahování dobrého stavu. Tento článek se nezabývá biologickými složkami (i když jsou velmi významné a způsobují nedosažení ekologického stavu či potenciálu pro 76,3 % útvarů ve tříletí 2022–2024), ale ještě větší procento (88,7) způsobují



Obr. 2. Změna chemického stavu útvarů povrchových vod mezi obdobím 2016–2018 a 2022–2024

Pozn.: V mapách i procentech nejsou zahrnuty drobné finální změny z období 2022–2024.

Fig. 2. Changes in the chemical status of surface water bodies between the periods 2016–2018 and 2022–2024

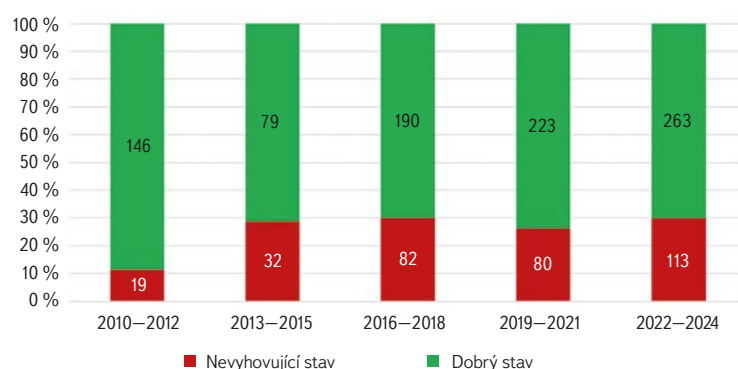
Note: Minor final changes for 2022–2024 are not included in the maps or percentages.

všeobecné fyzikálně-chemické ukazatele. Do ekologického stavu patří rovněž specifické znečišťující látky, kvůli kterým nedosahuje dobrého stavu 42 % útvarů.

Zaměříme-li se na jednotlivé ukazatele, těch nejvýznamnějších není už tolik – viz tab. 1.

Chceme-li zjišťovat vývoj jednotlivých ukazatelů, je vhodné porovnávat jednotlivá tříletí. K tomu jsou dostupné výsledky hodnocení stavu povrchových vod za celkem pět tříletí – první tříletí je z období 2010–2012 a poslední dostupné tříletí 2022–2024. Tříletí je vhodné z toho důvodu, že se tím sníží vliv kolísání koncentrací, vyplývající hlavně z měnící se hydrologické situace – krátkodobých such i naopak povodňových stavů. Jak již však bylo zmíněno, hlavně v prvních třech tříletích docházelo k významným změnám v hodnocení – převymezovaly se útvary povrchových vod, měnily se postupy hodnocení včetně určení hranic mezi dobrým a středním ekologickým stavem nebo dobrým a nevyhovujícím chemickým stavem a postupně se přidávaly další prioritní látky či matrice do chemického stavu. Tyto faktory, které neumožňují porovnání výsledků stavu, byly na evropské úrovni rozpoznány již dříve, ale dodnes se dostatečně nerespektuje stejně důležitá změna, a to postupné zlepšování rozsahu monitorovaných ukazatelů.

Např. kyselina ethylendiamintetraoctová (EDTA), která je v ČR zařazena do specifických znečišťujících látek, byla v prvním tříletí monitorována a hodnocena ve 165 profilech a v posledním tříletí v 376 profilech (obr. 3).



Obr. 3. Hodnocení kyseliny ethylendiamintetraoctové (EDTA) v jednotlivých tříletích podle limitů dobrého stavu (čísla v grafu jsou počty útvarů)

Fig. 3. Assessment of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) in individual three-year periods based on good status limits (numbers in the graph represent the number of water bodies)

Když však porovnáváme vývoj ukazatelů z hlediska pokroku dosahování dobrého stavu – a tedy i efektivnosti realizovaných opatření –, musíme kromě výsledků hodnocení stavu použít podrobnější data. K tomu musíme dodržovat několik zásad:

- hodnotit co nejdelší dobu,
- používat výsledky za tříletí,
- vycházet z postupů a limitů dobrého stavu,
- hodnotit pouze ty profily, které v daných třiletích měly dostupné analýzy,
- nezaměřovat se jen na dosažení dobrého stavu, ale také na snižování/ zvyšování koncentrací.

Tab. 1. Nejčastěji nevyhájící ukazatele ve třiletí 2022–2024

Tab. 1. Indicators that most often fail to achieve a good status in the three-year assessment 2022–2024

Ukazatel	Procento nevyhovujících útvarů
Všeobecná fyzikálně-chemická složka	
Fosfor celkový	65,2
Fosfor fosforečnanový	51,1
Nasycení vody kyslíkem	41,7
Dusík dusičnanový	40,9
BSK ₅	32,6
Dusík amoniakální	20,8
Teplota vody	19,1
Reakce vody	10,3
Specifické znečišťující látky	
Metabolity alachloru	11,0
AOX	9,0
EDTA	8,9
Metolachlor a jeho metabolity	7,9
Železo	7,6
Prioritní látky	
Benzo[a]pyren	34,8
Fluoranten	33,5
Benzo[ghi]perylene	23,9
Benzo[b]fluoranten	15,7
Benzo[k]fluoranten	7,3

Poznámky

Při výběru období je nutné zvolit data až od doby, kdy začaly fungovat plány povodí, jinak bychom nezjišťovali efektivitu opatření z plánů povodí, nýbrž obecné zlepšování situace. Samozřejmě pokud bychom použili data z devadesátých let (existují-li v dostatečné kvalitě), byl by přinejmenším pro klasické ukazatele pokrok mnohem vyšší, ale netýkal by se opatření realizovaných podle plánů.

Měli bychom používat postupy hodnocení stavu a limitů dobrého stavu – jestliže se limity v průběhu času měnily, používají se současně platné (většinou jsou přísnější). Zároveň však nelze zvolit všude zcela totožný přístup – hodnotíme-li

tříletí, pro specifické znečišťující látky a prioritní látky, kde se používá roční průměr (a výsledek je daný podle nejhoršího roku), pro klasifikaci vývoje přepočítáváme průměr z primárních dat na celé tříletí a porovnáváme výsledky tříletých průměrů. Pokud byl pro nějaký ukazatel stavu platný medián a maximum nebo průměr a maximum, pro porovnávání výsledků je vhodný jen medián nebo průměr. I když jsme se pokusili najít nějaký postup pro zjišťování vývoje maxim, nenašli jsme nic, co by poskytlo použitelné a věrohodné porovnání, tudíž velkou část problematických prioritních látek nelze hodnotit, neboť se pro ně používá jen maximum. Z toho všeho vyplývá nutnost použít primární data a nepřebírat pouze výsledky stavu. Zpočátku byly srovnávány pouze výsledky prvního a posledního tříletí, ale nakonec se ukázalo jako vhodnější rozšířit výsledky na všechna tříletí.

Pro hodnocení vývoje lze používat jen ty profily, které měly ve všech obdobích data o jakosti – tím se vyřeší změny ve vymezení (použijeme pouze ty profily, které celou dobu reprezentovaly nějaký útvar) a také to, že se měnil rozsah ukazatelů. Sice to znamená, že se nám sníží počet hodnotitelných profilů proti současnosti, ale máme záruku, že jsou výsledky srovnatelné.

Poslední zásada je také důležitá – zvláště u ukazatelů, kde je vysoký počet nevyhovujících výsledků, je důležité se zaměřit nejen na to, kde se již podařilo dosáhnout dobrého stavu, ale zda koncentrace v zásadě klesají, zůstávají stabilní, nebo dokonce stoupají. Výpočty trendů pro jednotlivé profily jsou pracné, a pokud se řeší přes lineární trendy, jsou i dost nespolehlivé [8]. Proto byl využit jednodušší způsob – rozčleněním výsledků podle tzv. indexu nesouladu, který se zjistí podílem příslušné charakteristické hodnoty vůči limitu. Pro všechny ukazatele byly použity kategorie 0,8; 0,8–1 (obě tyto kategorie reprezentují dobrý stav); 1–1,5; 1,5–2 a 2. V případě, že bylo hodně profilů, které nesplňovaly dobrý stav a zároveň byly indexy nesouladu značně vysoké, byly přidány zvlášť ještě další kategorie s vyššími indexy nesouladu s hranicemi 2; 3 a 4 nebo 2; 4 a 7.

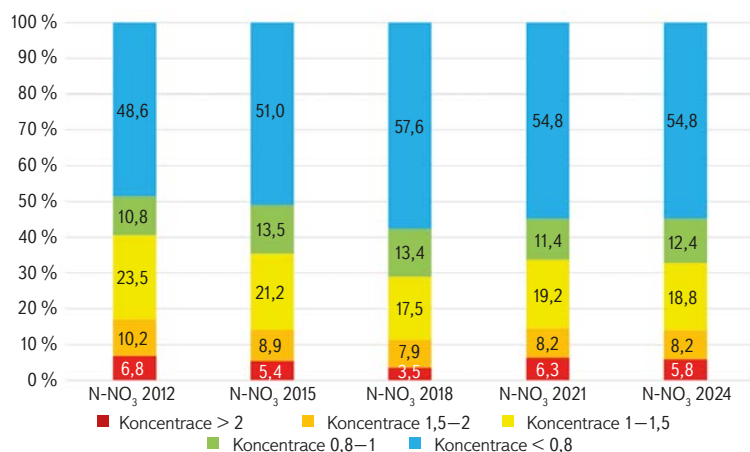
Z výše uvedené tabulky byly nakonec vyřazeny tyto ukazatele: nasycení vody kyslíkem, teplota vody, reakce vody, železo, benzo[a]pyren, benzo[ghi]perylene, benzo[b]fluoranten a benzo[k]fluoranten. Nejčastějším důvodem bylo to, že pro hodnocení stavu jsou určeny limity pouze pro maximum; výjimkou jsou teplota vody (tam bude pravděpodobně nutné změnit limity kvůli klimatické změně), železo (vzhledem k tomu, že nelze prokázat, kdy je zvýšená koncentrace kvůli přírodním podmínkám a kdy jde o znečištění) a nakonec benzo[a]pyren, u něhož kvůli velmi nízké normě environmentální kvality (limit dobrého stavu) byla až donedávna mez stanovitelnosti vyšší než norma environmentální kvality.

Pro zbylé ukazatele byly vypočítány a porovnány jednotlivé kategorie indexu nesouladu ve všech třiletích – pro všeobecné fyzikálně-chemické ukazatele od třiletí 2010–2012, pro fluoranten a specifické znečišťující látky od třiletí 2013–2015 (v prvním třiletí bylo sledováno výrazně méně profilů) a pro kyselinu ethylen-diamintetraoctovou (EDTA) až od třetího třiletí 2016–2018. Vyhodnocení proběhlo ve všech reprezentativních profilech útvarů povrchových vod ČR a počet profilů, které splňovaly požadavky, se značně lišil – pro všeobecné fyzikálně-chemické ukazatele byl nejvyšší (od 793 do 850), pro fluoranten a specifické znečišťující látky 310–343 a nejméně hodnocených profilů bylo pro kyselinu ethylen-diamintetraoctovou (EDTA) – pouze 203.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Všeobecné fyzikálně-chemické ukazatele

Výsledky všeobecných fyzikálně-chemických ukazatelů se dost významně liší. Dusičnanový dusík a amoniakální dusík (obr. 4–8) ukazují, že se koncentrace snižují, a to jak v jednotlivých kategoriích, tak podle dosažení dobrého stavu. Pro dusičnanový dusík činil rozdíl mezi prvním a posledním třiletím 7,8 procentního bodu (obr. 5) a pro amoniakální dusík 7,3 procentního bodu (obr. 6). Amoniakální dusík také vykazuje významné snížení vysokých koncentrací, a to jak z hlediska počtů, tak podílů (obr. 7).

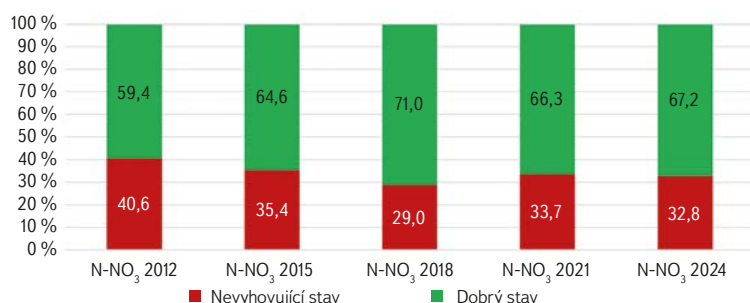


Obr. 4. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací dusičnanového dusíku v jednotlivých třiletích

Poznámka: Třiletí jsou označena podle posledního roku.

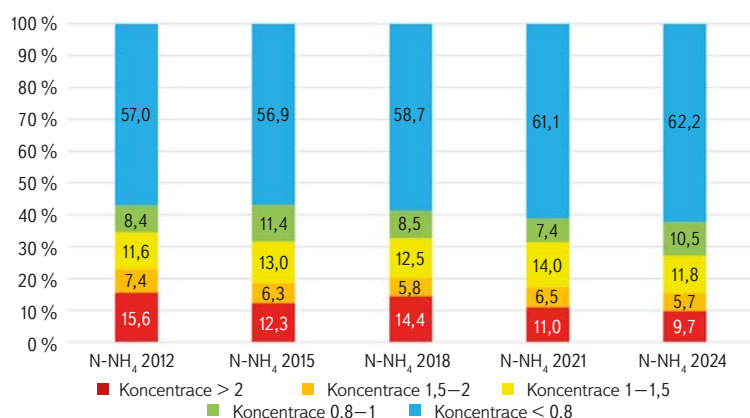
Fig. 4. Proportion of profiles by multiples of nitrate nitrogen concentrations relative to the limit in each three-year period

Note: The three-year periods are designated by their final year.



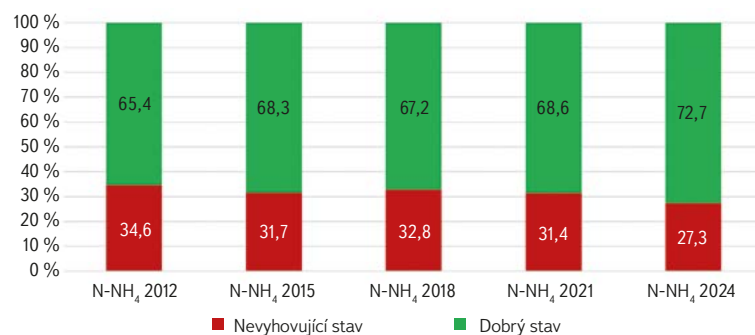
Obr. 5. Podíl profilů podle limitů stavu dusičnanového dusíku v jednotlivých třiletích

Fig. 5. Proportion of profiles by nitrate nitrogen limits in each three-year period



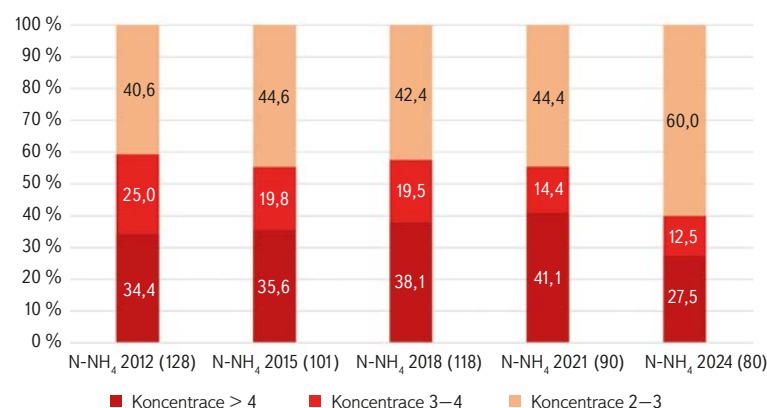
Obr. 6. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací amoniakálního dusíku v jednotlivých třiletích

Fig. 6. Proportion of profiles by multiples of ammoniacal nitrogen concentrations relative to the limit in each three-year period



Obr. 7. Podíl profilů podle limitů stavu amoniakálního dusíku v jednotlivých třiletích

Fig. 7. Proportion of profiles by ammoniacal nitrogen limits in each three-year period

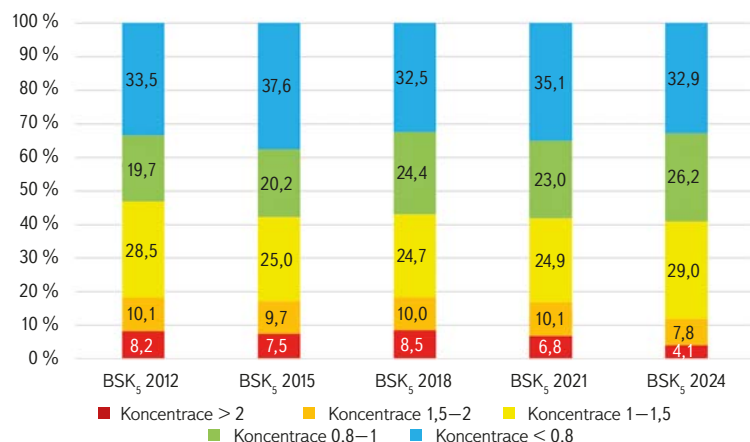


Obr. 8. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací amoniakálního dusíku v jednotlivých třiletích – vysoké koncentrace (čísla v grafu v závorkách jsou počty útvarů)

Fig. 8. Proportion of profiles by multiples of ammoniacal nitrogen concentrations relative to the limit in each three-year period – high concentrations (numbers in the graph in brackets represent the number of profiles)

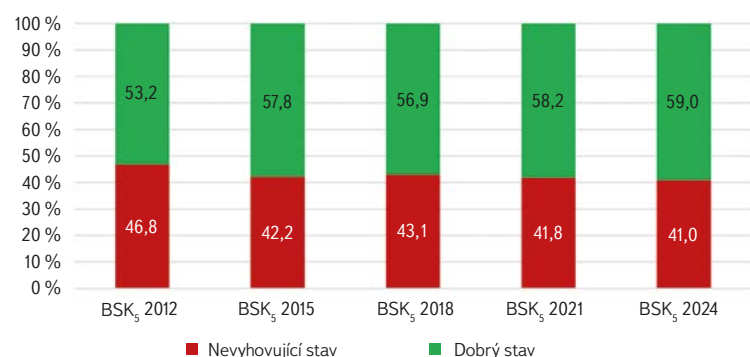
Rozdíl mezi nimi je hlavně v průběhu jednotlivých třiletí – dusičnanový dusík měl nejnižší koncentrace v třiletí 2016–2018, kdy se projevilo delší sucho, v dalším třiletí se koncentrace poněkud zvýšily a poté opět klesaly. To bude patrně způsobeno tím, že hlavním zdrojem dusičnanového dusíku je plošné znečištění ze zemědělství a v suchém období se dusík z půdy nevymývá – ale zároveň není tolik spotřebováván rostlinami – a k jeho uvolnění do vody dojde, až se srážka opět zvýší. Pro amoniakální dusík byly rozdíly v jednotlivých třiletích méně patrné, což se dá vysvětlit tím, že jeho hlavním zdrojem není zemědělství, nýbrž komunální odpadní vody.

Biochemická spotřeba kyslíku (BSK₅) sice spíše stagnuje (obr. 10), ale podobně jako formy dusíku vykazuje stejné vysoké poklesy koncentrací (obr. 9). Pro BSK₅ je nutné uvést, že k nejvyšším poklesům koncentrací došlo již v období 1990–2010, takže současné zlepšování je už pomalejší.



Obr. 9. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací biochemické spotřeby kyslíku v jednotlivých třiletích

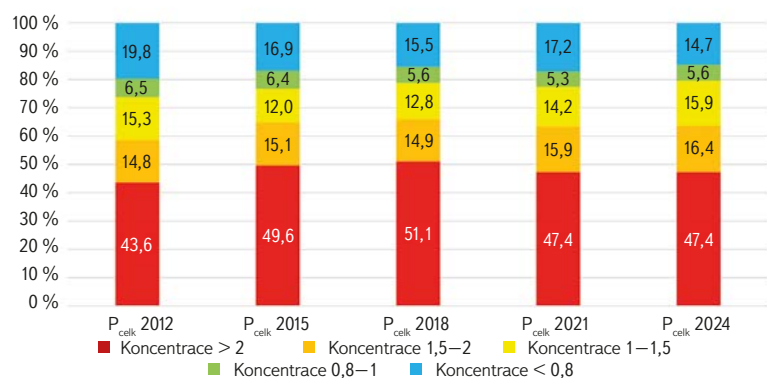
Fig. 9. Proportion of profiles by multiples of the biological oxygen demand concentrations relative to the limit in each three-year period



Obr. 10. Podíl profilů podle limitů stavu biochemické spotřeby kyslíku v jednotlivých třiletích

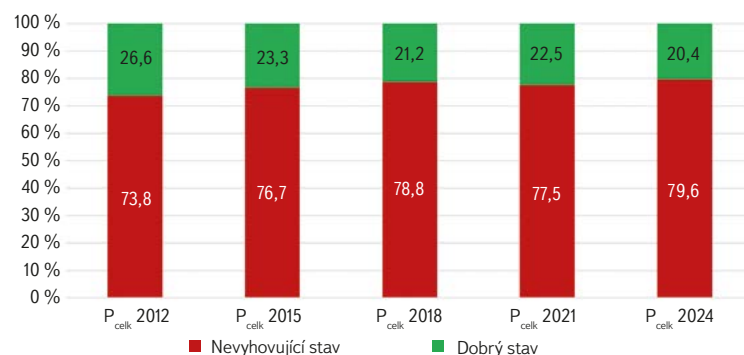
Fig. 10. Proportion of profiles by biological oxygen demand limits in each three-year period

Poslední všeobecné fyzikálně-chemické ukazatele jsou celkový a fosforečnanový fosfor (obr. 11–13). Bohužel na rozdíl od předchozích ukazatelů prakticky nevykazují žádné zlepšení a rozdíly mezi jednotlivými třiletími jsou minimální. Fosforečnanový fosfor má proti celkovému fosforu jen poněkud nižší indexy nesouladu (obr. 13) a vyšší podíly profilů v dobrém stavu než celkový fosfor.



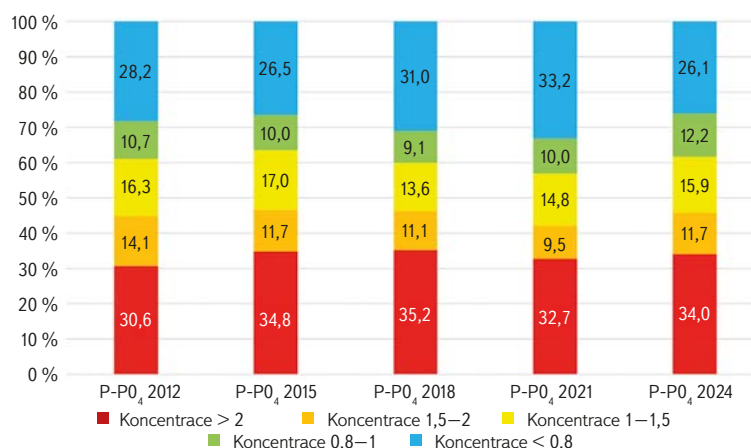
Obr. 11. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací celkového fosforu v jednotlivých třiletích

Fig. 11. Proportion of profiles by multiples of the total phosphorus concentrations relative to the limit in each three-year period



Obr. 12. Podíl profilů podle limitů stavu celkového fosforu v jednotlivých třiletích

Fig. 12. Proportion of profiles by the total phosphorus limits in each three-year period

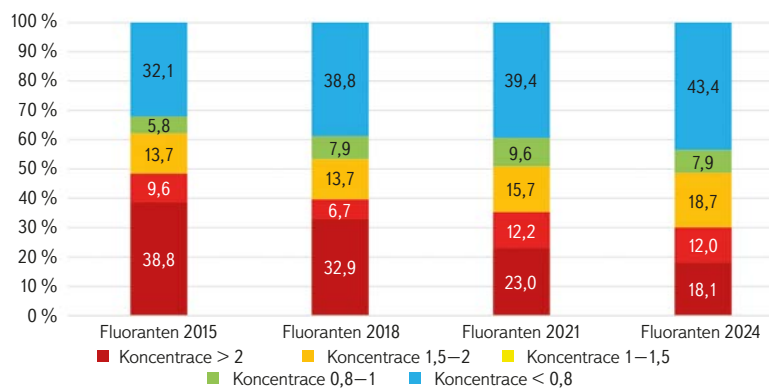


Obr. 13. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací fosforečnanového fosforu v jednotlivých třiletích

Fig. 13. Proportion of profiles by multiples of the phosphate phosphorus concentrations relative to the limit in each three-year period

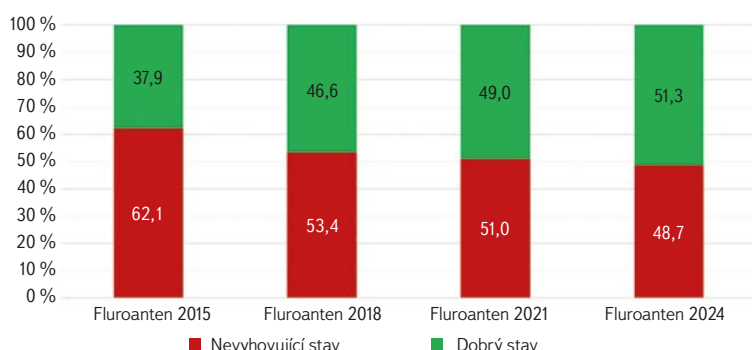
Fluoranten a specifické znečišťující látky

Na rozdíl od všeobecných fyzikálně-chemických ukazatelů, kde lze pozorovat zlepšování konstatovat pouze u dusičnanového a amoniakálního dusíku, pro fluoranten, metabolity alachloru a adsorbovatelné, organicky vázané halogeny (AOX) lze sledovat výrazné zlepšení. Pro fluoranten vidíme významné poklesy koncentrací ve všech třech typech grafů (obr. 14–16), podíl profilů v dobrém stavu se zvýšil o 13,4 procentního bodu (obr. 15) a silně se snížil podíl profilů s koncentracemi nad 7násobek indexu nesouladu – z 5,5 % z celkového počtu hodnocených profilů na pouhých 1,5 % (obr. 16). Zároveň je pokles plynulý a není vidět žádné zřetelné kolísání.



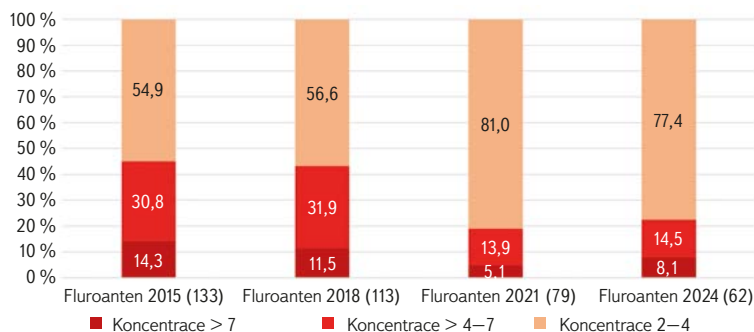
Obr. 14. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací fluorantenu v jednotlivých třiletích

Fig. 14. Proportion of profiles by multiples of fluoranthene concentrations relative to the limit in each three-year period



Obr. 15. Podíl profilů podle limitů stavu fluorantenu v jednotlivých třiletích

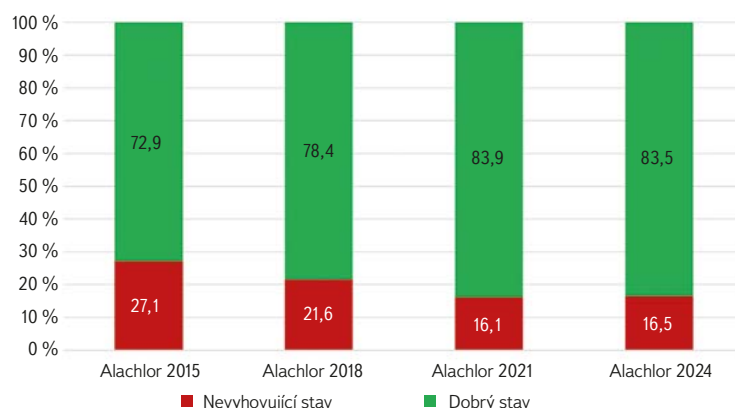
Fig. 15. Proportion of profiles by fluoranthene limits in each three-year period



Obr. 16. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací fluorantenu v jednotlivých třiletích – vysoké koncentrace (čísla v grafu v závorkách jsou počty útvarů)

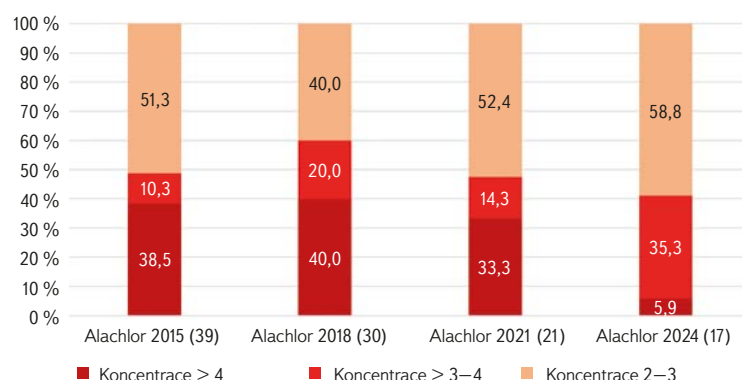
Fig. 16. Proportion of profiles by multiples of fluoranthene concentrations relative to the limit in each three-year period – high concentrations (numbers in the graph in brackets represent the number of profiles)

Podobně se chovají metabolity alachloru – podíl profilů v dobrém stavu stoupl o 10,6 procentního bodu (obr. 17) a silně se snížil podíl profilů s koncentracemi nad 4násobek indexu nesouladu – ze 4,8 % z celkového počtu hodnocených profilů na pouhé 0,3 % (obr. 18). Nicméně je vidět, že v posledních dvou třiletích poklesy koncentrací poněkud stagnovaly – to však může být dáno tím, že alachlor byl zakázán již v roce 2006.



Obr. 17. Podíl profilů podle limitů stavu metabolitů alachloru v jednotlivých třiletích

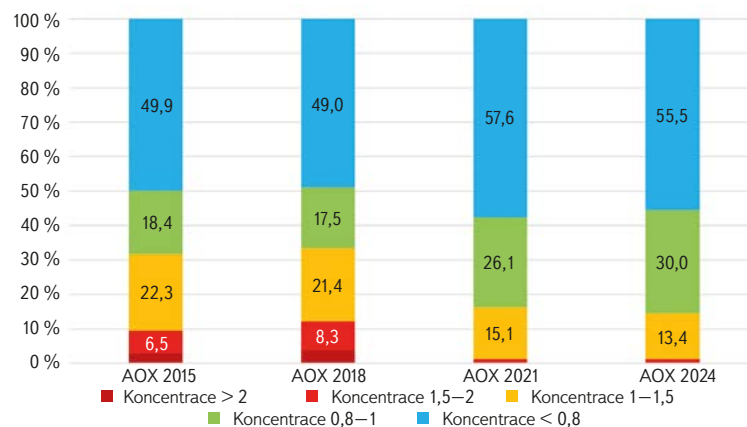
Fig. 17. Proportion of profiles by alachlor metabolite limits in each three-year period



Obr. 18. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací metabolitů alachloru v jednotlivých třiletích – vysoké koncentrace (čísla v grafu v závorkách jsou počty útvarů)

Fig. 18. Proportion of profiles by multiples of the alachlor metabolites concentrations relative to the limit in each three-year period – high concentrations (numbers in the graph in brackets represent the number of profiles)

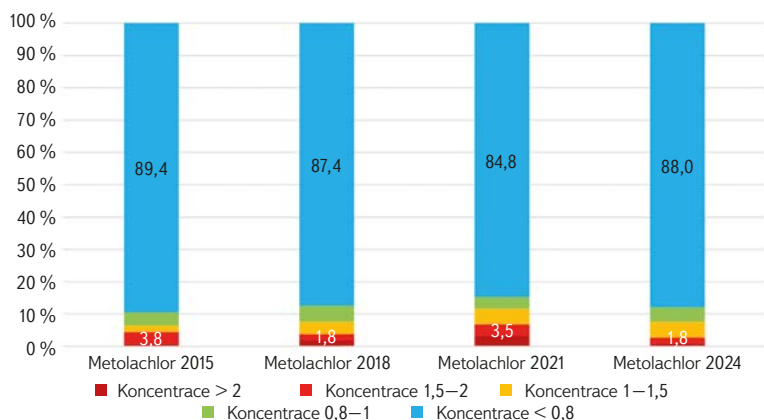
Stejně jako fluoranten se chovají koncentrace adsorbovatelných, organicky vázaných halogenů (AOX) (obr. 19). Pokles koncentrací je plynulý, podíl profilů v dobrém stavu stoupl dokonce o 17,3 procentního bodu a v posledním třiletí se již nevyskytoval žádný profil s indexem nesouladu vyšším než 2.



Obr. 19. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací AOX v jednotlivých třiletích

Fig. 19. Proportion of profiles by multiples of the AOX concentrations relative to the limit in each three-year period

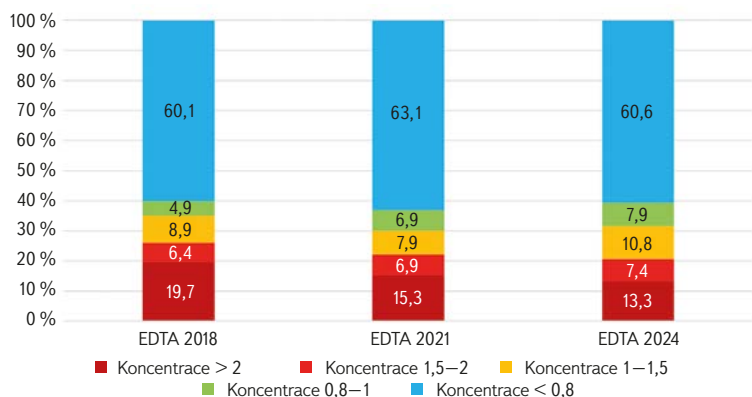
Trochu jinak vypadá situace pro metolachlor a jeho metabolity (obr. 20). I když znečištění povrchových vod není tak časté jako pro metabolity alachloru (ve třiletí 2022–2024 bylo v ČR kvůli metolachloru nevyhovujících jen 7,9 % útvarů), podíl útvarů v nevyhovujícím stavu víceméně stagnuje. Zároveň bylo další používání S-metolachloru v roce 2024 zakázáno – to se však v hodnoceném období ještě nemohlo projevit. Dá se nicméně předpokládat, že metabolity metolachloru v půdě a ve vodách budou ještě dost dlouhou dobu doznívat.



Obr. 20. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací metolachloru a jeho metabolitů v jednotlivých třiletích

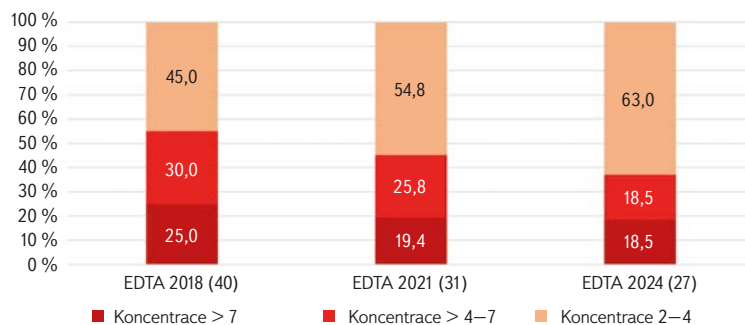
Fig. 20. Proportion of profiles by multiples of metolachlor and its metabolites concentrations relative to the limit in each three-year period

Poslední hodnocenou specifickou znečišťující látkou je kyselina ethylen-diamintetraoctová (EDTA). Z hodnocení není pozorovatelný žádný vývoj koncentrací – rozdíl 3,5 procentního bodu není významný (obr. 21), nicméně se zdá, že nejvyšší koncentrace nad 7násobek limitu postupně klesají – ze 4,9 % všech profilů na 2,5 % (obr. 22). Jelikož však EDTA byla více analyzována až od třiletí 2016–2018 a porovnávat je možné pouze 203 profilů, není tento závěr dostatečně podložený daty.



Obr. 21. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací EDTA v jednotlivých třiletích

Fig. 21. Proportion of profiles by multiples of the EDTA concentrations relative to the limit in each three-year period



Obr. 22. Podíl profilů podle kategorií indexu nesouladu koncentrací EDTA v jednotlivých třiletích – vysoké koncentrace (čísla v grafu v závorkách jsou počty útvarů)

Fig. 22. Proportion of profiles by multiples of the EDTA concentrations relative to the limit in each three-year period – high concentrations (numbers in the graph in brackets represent the number of profiles)

ZÁVĚR

Pro zjišťování vývoje stavu povrchových vod je nutné se zaměřit na jednotlivé ukazatele. Nejvhodnější je hodnocení za třiletí – jednak je to v souladu s hodnocením stavu povrchových vod, jednak se tím potlačí hlavně hydrologické extrémy, tedy kratší sucha a naopak vysoké průtoky, jež ovlivňují naměřené koncentrace. Hodnotit lze pouze profily, které byly sledovány celé hodnocené období, a způsob by měl být co nejpodobnější postupům při klasifikaci chemického a ekologického stavu, tj. používat by se měly průměry nebo mediány (hodnotit vývoj na základě maxim nebo minim tímto způsobem nelze) a stejné limity dobrého stavu (normy environmentální kvality). Pokud se postupy v čase lišily, používají se poslední platné. To tedy znamená, že je nutné přepočítat stav z primárních dat. I když lze porovnávat jen první a poslední třiletí, pro lepší pochopení je vhodnější použít všechna třiletí. Hodnocení je vhodnější na větší území, nicméně když známe chování ukazatele pro větší počet útvarů/profilů, je možné zjišťovat eventuální rozdíly mezi nimi. Pro vývoj zde uvedených postupů byla použita data za celou ČR a za období 2010–2024, tedy pět třiletí. Nestačí však zjišťovat jen počty profilů v dobrém stavu, vhodnější je rozčlenění výsledků podle kategorií indexu nesouladu (tedy podílu charakteristické hodnoty vůči limitu). Při zpracování se osvědčily kategorie indexu nesouladu 0,8 – 1 – 1,5 – 2 a v případě vysokého počtu nevyhovujících výsledků ještě kategorie 2 – 3 – 4; případně 2 – 4 – 7.

Postupy byly použity na pět všeobecných fyzikálně-chemických ukazatelů (dusičnanový a amoniakální dusík, BSK₅, celkový a fosforečnanový fosfor), jednu prioritní látku (fluoranten) a čtyři specifické znečišťující látky. Zatímco pro všeobecné fyzikálně-chemické ukazatele bylo vyhodnoceno všech pět třiletí, pro ostatní ukazatele mohla být použita data až od druhého třiletí, neboť v prvním třiletí bylo sledováno příliš málo profilů, a pro EDTA ze stejných důvodů až od třetího třiletí.

Na základě zpracování se zjistilo, že postupné mírné snižování koncentrací je přítomno pro dusičnanový a amoniakální dusík, významné zlepšení bylo prokázáno pro fluoranten, metabolity alachloru a AOX. Stagnují koncentrace BSK₅, metolachloru a jeho metabolitů a EDTA; pro celkový a fosforečnanový fosfor lze pozorovat stagnaci až pomalé zhoršování. Z hlediska efektivity opatření je tedy celkem úspěšné čištění odpadních vod pro amoniakální dusík a pravděpodobně pro průmyslové odpadní vody, které reprezentuje ukazatel AOX, a vzhledem k souběhu několika faktorů (vysoké ceny hnojiv a dobré poradenství) i plošné znečištění ze zemědělství. Na znečištění fluorantem sice neexistuje žádné přímo zaměřené opatření, ale koncentrace se významně snižují pravděpodobně postupným omezováním některých průmyslových provozů a postupným utlumováním těžby a spalování uhlí. Pro metabolity alachloru

pomohl zákaz jeho užívání v roce 2006, i tak se znečištění vod zatím postupně snižovalo až do třetího desetiletí 2019–2021 a v posledním třetího již stagnuje. Tento vývoj se dá očekávat i pro metolachlor a jeho metabolity, ale vzhledem k tomu, že byl zakázán až v roce 2024, bude to patrně ještě dlouho trvat; na druhou stranu není znečištění vod tak rozšířené (v třetího 2022–2024 jen 7,9 % útvarů).

Koncentrace BSK₅ sice stagnují, ale dá se předpokládat, že čištění městských odpadních vod je již funkční a zvýšené koncentrace pocházejí spíše z jiných zdrojů. Nejméně funguje snižování koncentrací celkového a fosforečnanového fosforu, což je pravděpodobně způsobeno velkým podílem odlehčovaných vod, obyvatel nepřipojených na kanalizaci a také erozí.

Je nutné si uvědomit, že zde představovaný postup nenahrazuje hodnocení stavu povrchových vod. Uvedená čísla a podíly pouze ukazují, jak se výsledky mění, nikoli podíly útvarů v dobrém a nevyhovujícím stavu, což je dáno tím, že se pro porovnávání nemohou používat všechny výsledky. Čím více profilů bylo použito pro zjišťování pokroku v dosahování dobrého stavu, tím více se blíží výsledkům za celou ČR (dusičnanový a amoniakální dusík, ovšem při hodnocení dusičnanového dusíku se kromě mediánu hodnot i maxima, tudíž výsledky stavu jsou horší). Z hlediska počtu hodnocených profilů může být hodně zkreslené hodnocení EDTA, neboť zahrnuje pouze 203 profilů.

Rámcová směrnice o vodách také zakazuje zhoršování stavu, při práci s reálnými daty se však potvrzuje, že v souvislosti se změnami průtoků mohou koncentrace některých ukazatelů částečně kolísat, a tím se i přesouvat mezi kategoriemi. Pro hodnocení stavu se to týká hlavně profilů, kde jsou výsledky v kategorii 0,8–1 a 1–1,5, čímž může docházet k přesouvání z výsledku „dobrý stav“ do „stav nevyhovující“, přitom ale reálně nejde o zhoršení.

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“ řešeného s finanční podporou Technologické agentury ČR v rámci podprogramu 3 – Dlouhodobé environmentální a klimatické perspektivy programu SS – Program aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí – Prostředí pro život. Autoři příspěvku závěrem děkují jednotlivým státním podnikům Povodí Vltavy, Povodí Labe, Povodí Ohře, Povodí Moravy a Povodí Odry za poskytnutá data.

Literatura

- [1] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/60/ES ze dne 23. října 2000, kterou se stanoví rámec pro činnost Společenství v oblasti vodní politiky.
- [2] Vyhláška č. 98/2011 Sb., o způsobu hodnocení stavu útvarů povrchových vod, způsobu hodnocení ekologického potenciálu silně ovlivněných a umělých útvarů povrchových vod a o náležitostech programů zjišťování a hodnocení stavu útvarů povrchových vod, ve znění pozdějších předpisů.
- [3] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umweltschutz, Regionen und Wasserwirtschaft. *Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan 2021 (NGP 2021)*. Wien, 2022. Dostupné z: <https://www.bmluk.gv.at/themen/wasser/wisa/ngp/ngp-2021.html>
- [4] Országos Vízügyi Főigazgatóság. *Magyarország III. Országos Vízügyi-Értékelési Terve 2022 (OVF)*. Budapešť, 2022. Dostupné z: <https://vizeink.hu/vgt/#page=304>
- [5] Office français de la biodiversité (OFB) & Ministère de la Transition écologique. *Guide des règles d'évaluation de l'état des eaux (4e cycle de la DCE) 2023*. Paris, 2023. Dostupné z: <https://ofb.gouv.fr/evaluation-de-etat-biologique-des-eaux-de-surfices-continentales>
- [6] *Technical Report on Groundwater Indicators for Nitrate and Pesticides – Summary Report Draft 2024*. Dostupné z: https://circabc.europa.eu/ui/group/9ab5926d-bed4-4322-9aa7-9964bbe8312d/library/fa3c36c0-9e04-4038-ae7f-c908cd6f60e9?p=1&n=10&sort=modified_DESC
- [7] VYSKOČ, P. et al. *Hodnocení ekologického a chemického stavu/potenciálu povrchových vod*. Prezentace na jednání Pracovního výboru KPOV, Praha, 19. 2. 2026. Dostupné z: <https://mze.gov.cz/public/portal/mze/voda/planovani-v-oblasti-vod/ramcova-smernice-o-vodach/x4-planovaci-obdobi/koordinace-procesu/zaznamy-z-jednani-kpov-a-rsv-kpov-v-roce-2026>

[8] 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. 4–10. Dostupné z: <https://www.vtei.cz/2023/06/hodnoceni-trendu-v-koncentracich-chemickych-a-fyzikalne-chemickych-ukazatelu-stavu-povrchovych-vod/>

Autoři

RNDr. Hana Prchalová
ORCID: 0000-0003-1890-8335
✉ hana.prchalova@vuv.cz

Ing. Petr Vyskoč
ORCID: 0000-0002-5006-5414
✉ petr.vyskoc@vuv.cz

Ing. Marie Kozlová
ORCID: 0009-0001-6601-6107
✉ marie.kozlova@vuv.cz

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

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.05.002

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

CHANGES IN THE STATUS OF SURFACE WATER BODIES BASED ON CHEMICAL AND PHYSICOCHEMICAL INDICATORS

PRCHALOVÁ, H.; VYSKOČ, P.; KOZLOVÁ, M.

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

Keywords: chemical status of water — ecological status of water — water quality indicators — progress toward achieving good status for water bodies

This article presents a proposed approach for assessment of monitoring changes in the status of surface waters—that is, how progress toward achieving good status is being made thanks to the measures implemented. The methodology is based on newly recalculated assessments for individual profiles, indicators, and three-year periods, using the most recently approved procedures and limits. In addition to the overall result (good/poor status), each profile, indicator,

and three-year period is assigned a non-compliance index, which is the ratio of the characteristic value to the good status limit. The next step is to classify the non-compliance index into individual categories, which represent either the extent to which the limit is exceeded or, conversely (for good status categories), proximity to the limit. When comparing results for individual three-year periods, it is necessary to select only those profiles that had measurements for the entire evaluation period to ensure the comparison is reliable.

The approach was also applied to a total of 10 indicators representing the most problematic indicators of ecological and chemical status/potential (with the exception of biological quality elements, which were not addressed by the project).

The results showed that nitrate and ammoniacal nitrogen, fluoranthene, alachlor metabolites, and AOX show a trend of decreasing concentrations and more frequently achieve good status, but concentrations are also decreasing in profiles where the non-compliance index is high. Concentrations of BOD₅, metolachlor and its metabolites, and EDTA are stagnating; for total and phosphate phosphorus, stagnation or even a slow deterioration can be observed, and even high concentrations are not improving.



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 dekad má dopad i na hydrologické charakteristiky toků, jak v ČR dokládají dlouhodobá sledování [1]. Kromě poklesu průměrných průtoků sledujeme rovněž čtenější 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 srážkoodtokové 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,

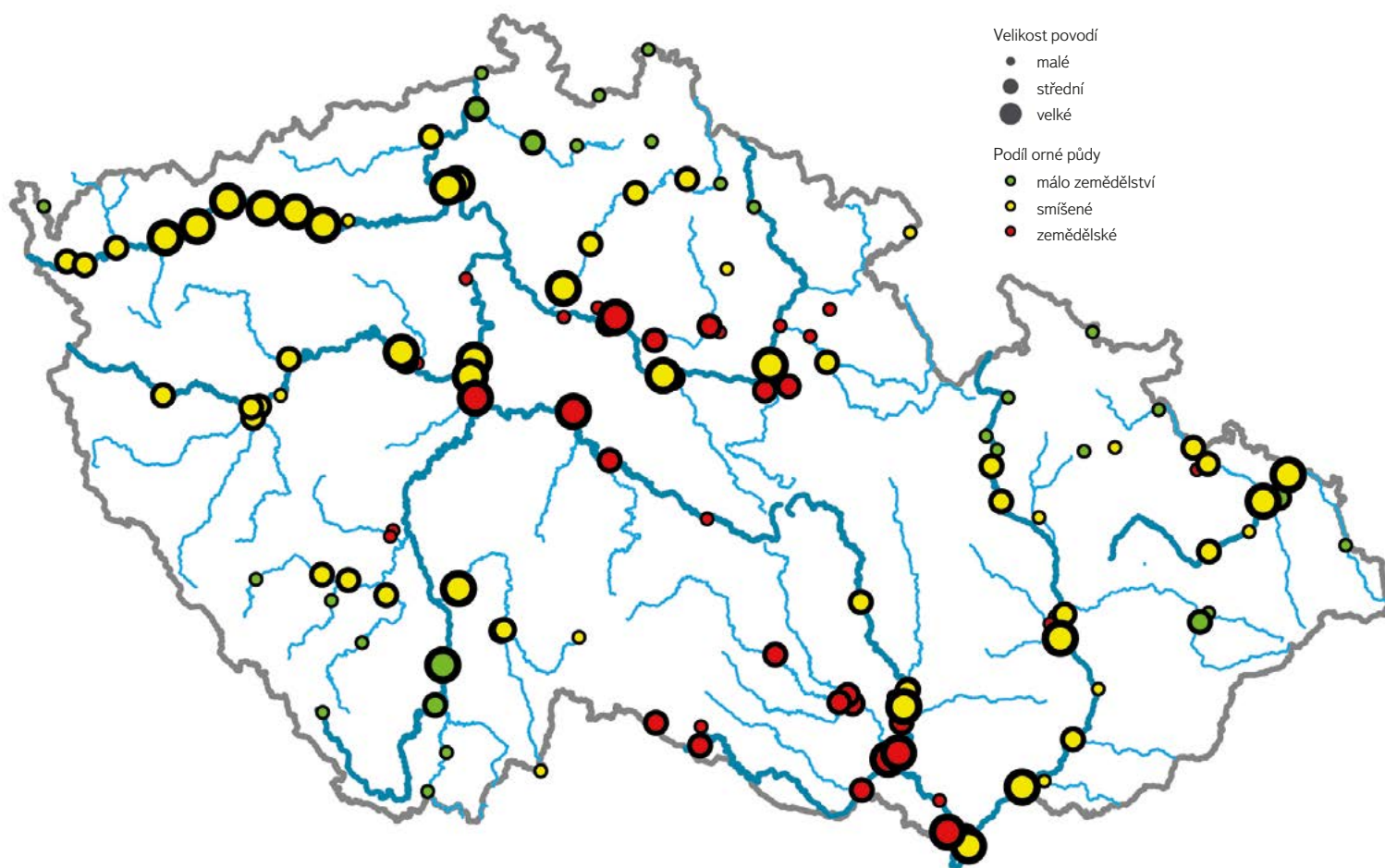
kde bylo měření jakosti realizováno v měsíčních krocích po dobu 10 let – kromě
všeobecných ukazatelů kyslíkových poměrů a živin byla k dispozici také měření
dalších látek – a kde bylo zároveň možné přiřadit hydrologické údaje. Pro zís-
kání hydrologických údajů byla každému jakostnímu profilu přiřazena 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

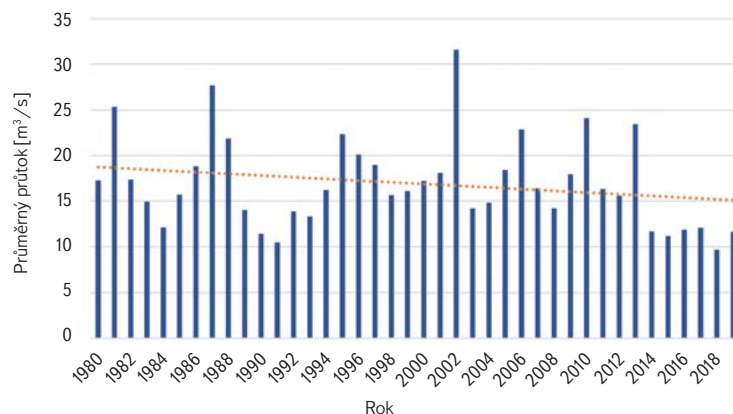
VÝSLEDKY

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. Proložený lineární trend je

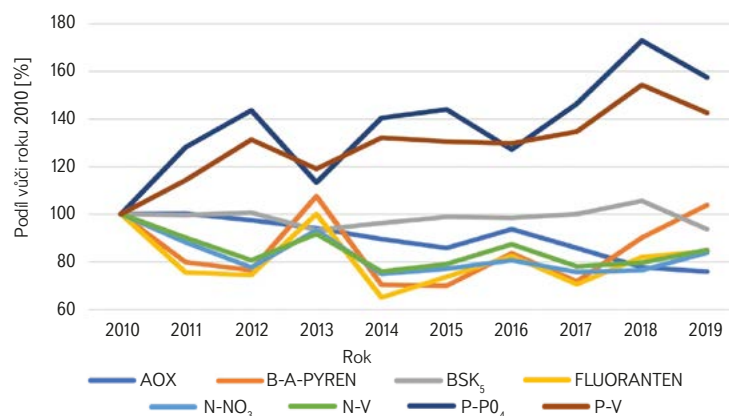
klesající, což ovšem může být zkresleno několika suchými roky na konci sledovaného období.

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)

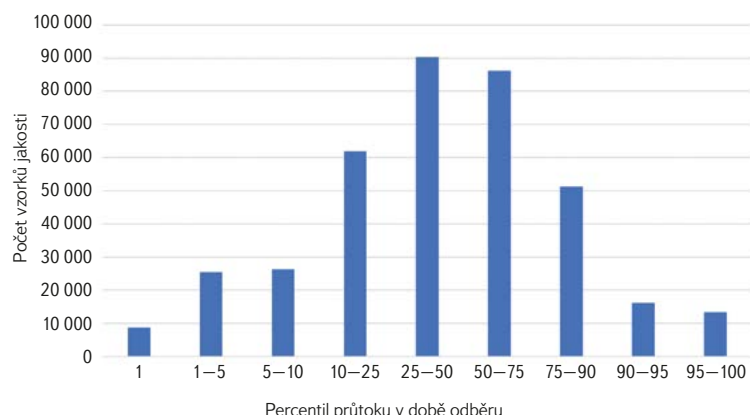


Obr. 3. Vývoj průměrných ročních koncentrací vybraných ukazatelů v testovaných profilech (v % roku 2010)

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

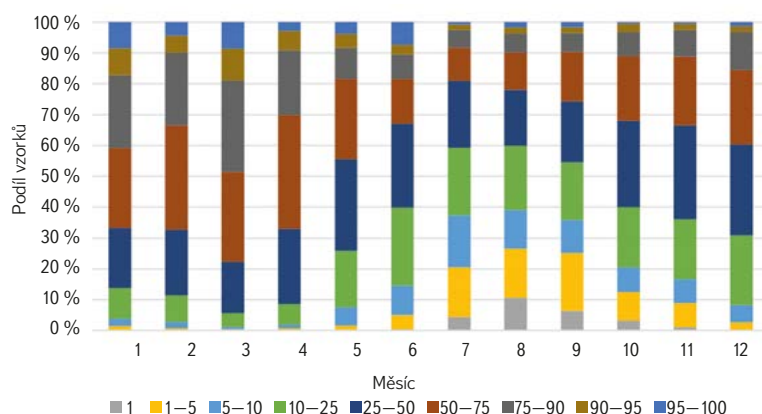
Sezonnost

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.



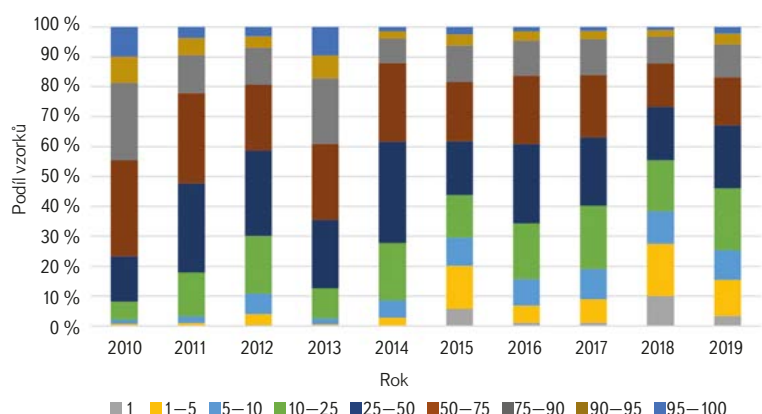
Obr. 4. Počet vzorků podle percentilu průtoku v době odběru

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

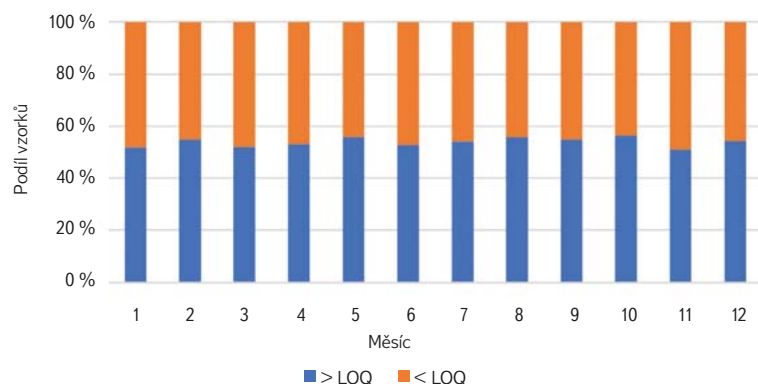


Obr. 6. Počet vzorků podle percentilu průtoku v době odběru podle jednotlivých let

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

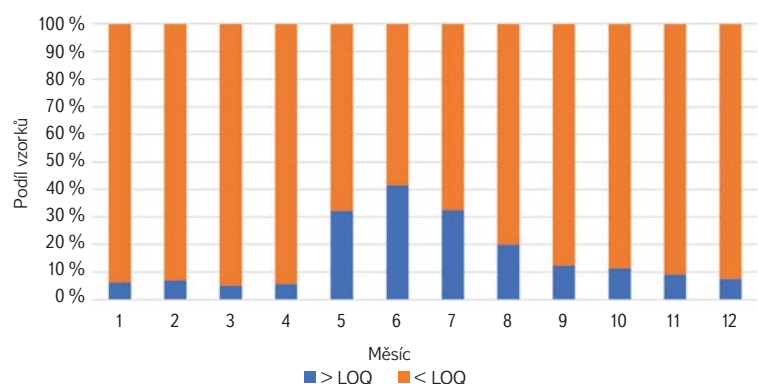
Sezonní výkyvy se rovněž týkají sledované jakosti. Potvrzeny byly vyšší koncentrace dusíku v zimě a fosforu v létě. Sezonní charakter má též výskyt pesticidů a některých jejich metabolitů. Dobře to dokládají grafy na obr. 7–9. Obr. 7 ukazuje výskyt metabolitů pesticidu alachlor (zakázán roku 2008) a 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.



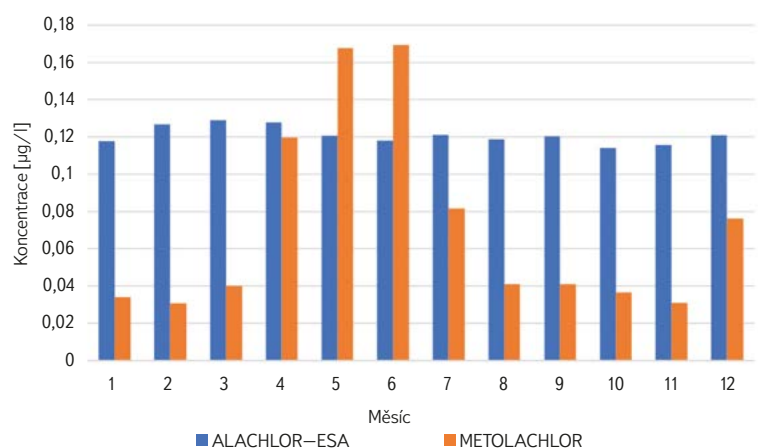
Obr. 7. Alachlor – ESA – počty záznamů pod a nad mezí stanovitelnosti v jednotlivých měsících

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

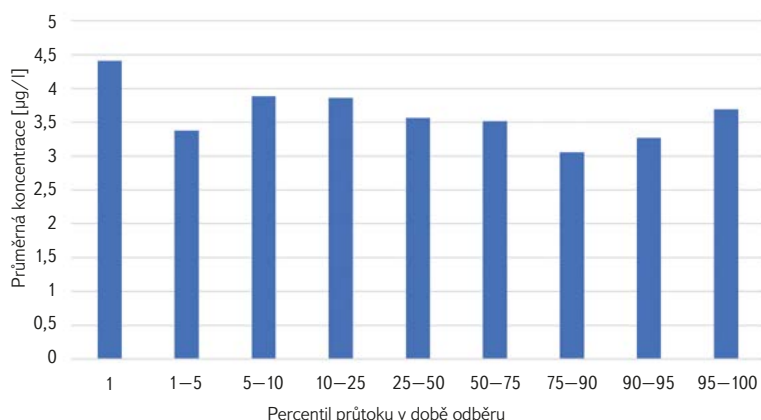
Pomocí metody C-Q slope můžeme vztahy mezi koncentrací a průtokem rozlišit na tři základní typy:

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).



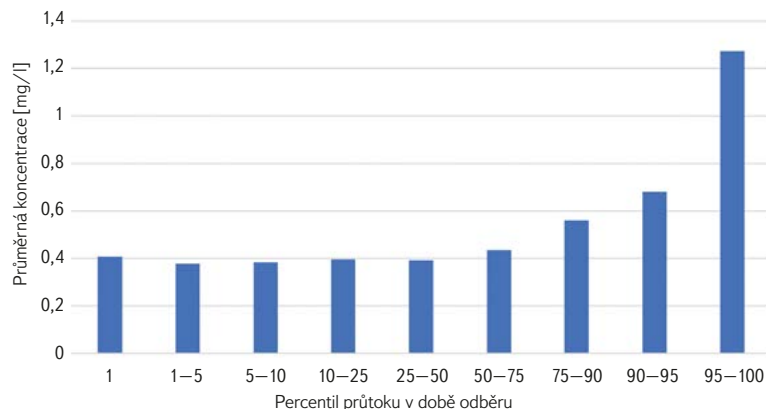
Obr. 10. Průměrné koncentrace arсенu (µg/l) podle kvantilu průtoku – ukázka chemostatického vztahu

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

Obhacení

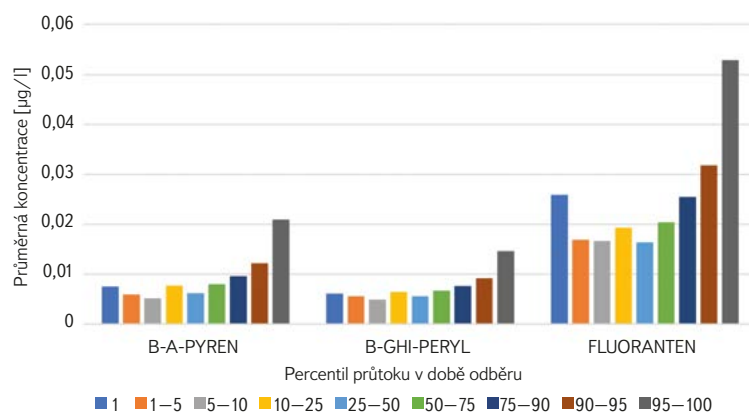
Obhacení je vztah, kdy s rostoucím průtokem roste i koncentrace. Typický je u látek vázaných na sediment a u těch, kde lze předpokládat výrazný vliv povrchového odtoku. Ze sledované množiny dat se ukázkový obraz obohacení objevuje u železa (obr. 11), jehož koncentrace jsou stále u podprůměrných a průměrných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

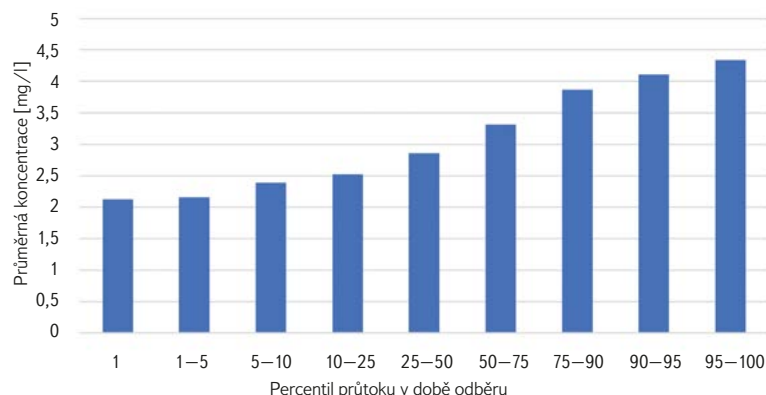
Fig. 11. Average iron concentrations (mg/L) by flow percentile – example of enrichment



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.

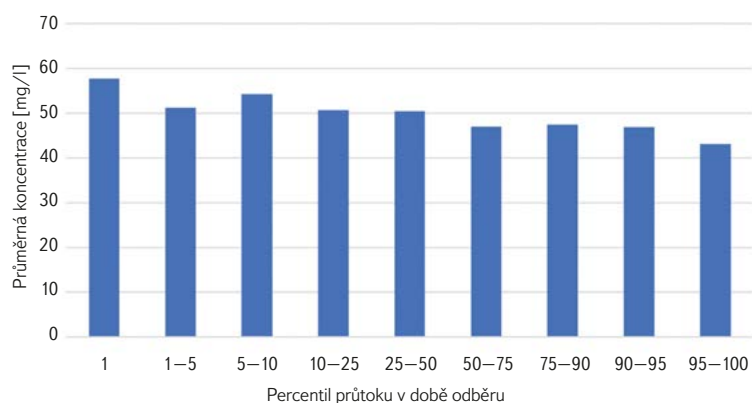


Obr. 13. Průměrné koncentrace dusičnanového dusíku (mg/l) podle kvantilu průtoku – ukázka jiného typu obohacení

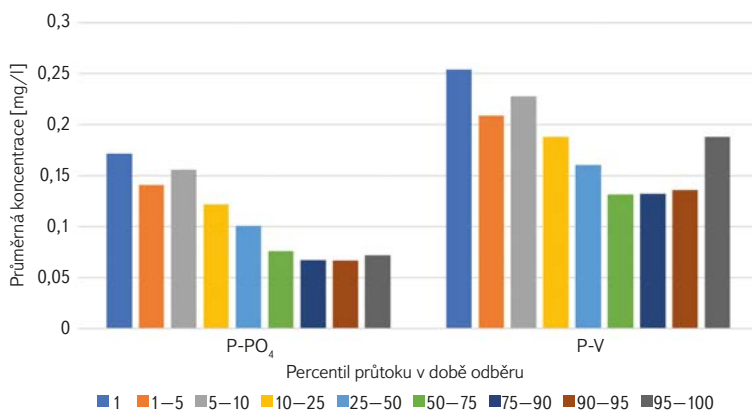
Fig. 13. Average nitrate nitrogen concentrations (mg/L) by flow percentile – example of another type of enrichment

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

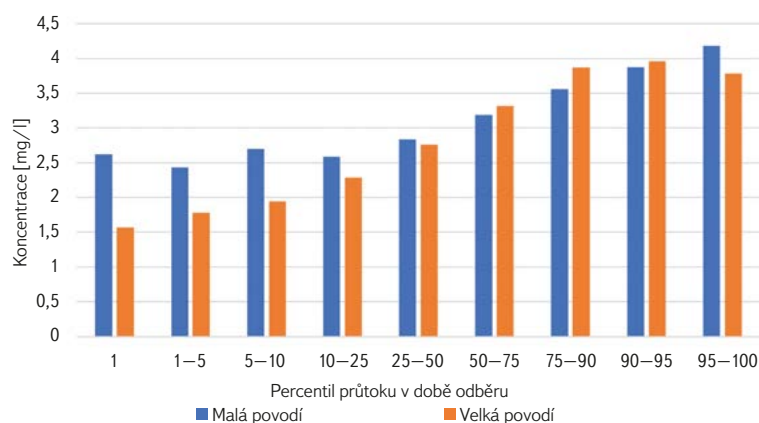
Kombinace

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.

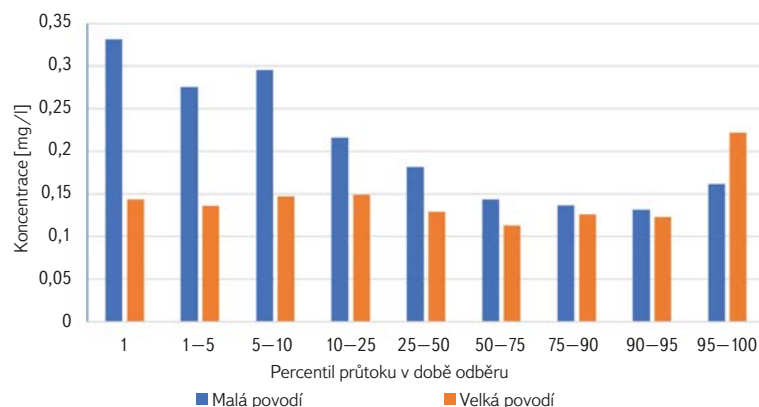
Vliv charakteristik povodí

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.

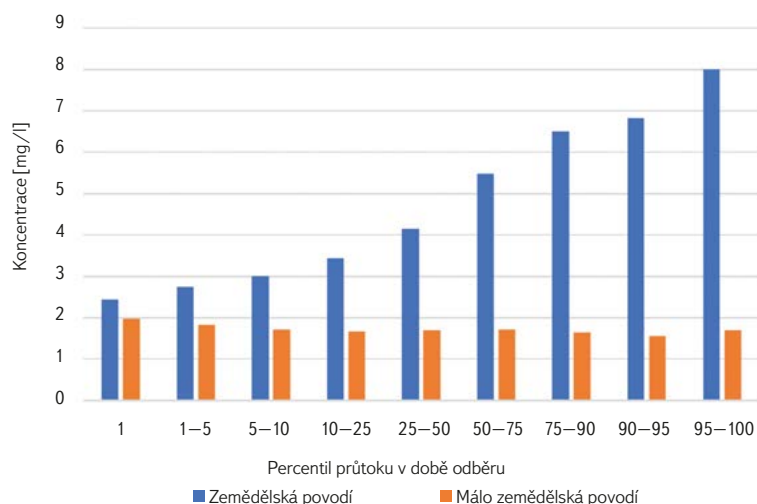


Obr. 16. Rozdíl C-Q slope pro dusičnanový dusík (mg/l) podle velikosti povodí
Fig. 16. Differences in the C-Q relationship for nitrate nitrogen (mg/L) by catchment size

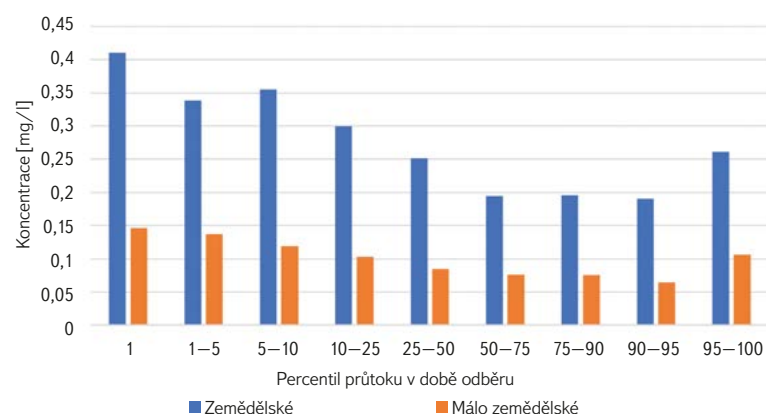


Obr. 17. Rozdíl C-Q slope pro celkový fosfor (mg/l) podle velikosti povodí
Fig. 17. Differences in the C-Q relationship for total phosphorus (mg/L) by catchment size

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.

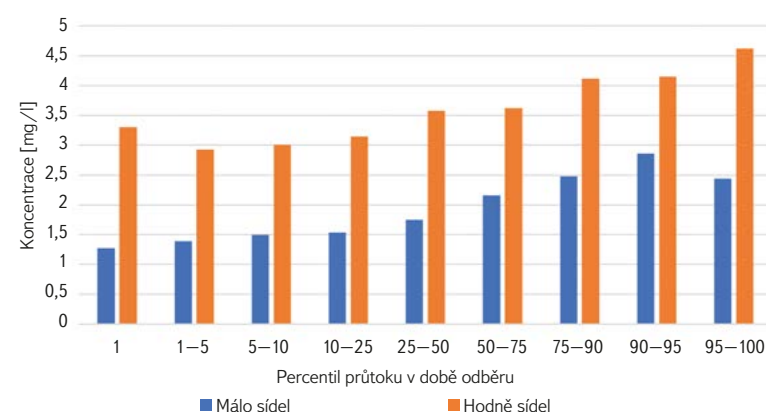


Obr. 18. Rozdíl C-Q slope pro dusičnanový dusík (mg/L) podle podílu orné půdy v povodí
Fig. 18. Differences in the C-Q relationship for nitrate nitrogen (mg/L) by proportion of arable land in the catchment

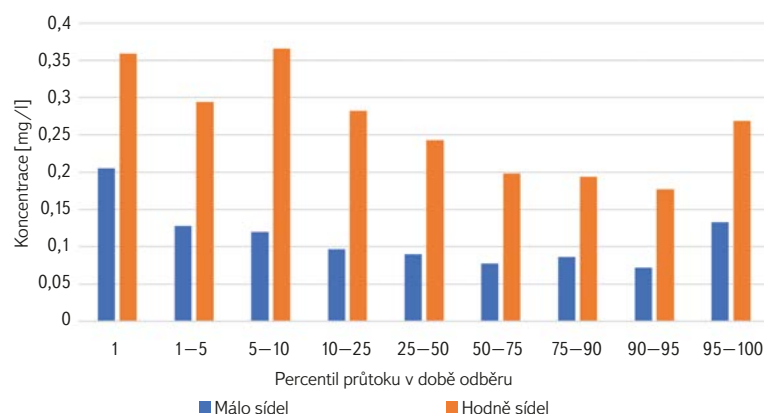


Obr. 19. Rozdíl C-Q slope pro celkový fosfor (mg/L) podle podílu orné půdy v povodí
Fig. 19. Differences in the C-Q relationship for total phosphorus (mg/L) by proportion of arable land in the catchment

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 vhodné 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)

Příspěvek 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.



Predikce BSK₅ na odtoku z čistírny odpadních vod pomocí strojového učení

NASSIMA LEKOUAGHET, LAKHDAR BOURAGBI, BRAHIM MAHFOUD

Klíčová slova: biochemická spotřeba kyslíku (BSK₅) – čištění odpadních vod – strojové učení – soft senzor – XGBoost – predikce BSK₅ – optimalizace procesů

ABSTRAKT

Přesná a rychlá predikce biochemické spotřeby kyslíku (BSK₅) na odtoku je důležitá pro dodržování legislativních požadavků a zlepšení provozu čistíren odpadních vod (ČOV). Tradiční laboratorní stanovení BSK₅ trvá několik dní, což způsobuje prodlevy při hodnocení kvality vody a optimalizaci provozu čistírny. Aby vyřešila tento problém, vyvíjí tato studie model strojového učení pro odhad BSK₅ na odtoku s využitím snadno dostupných provozních dat. Byl použit soubor dat z velkokapacitní ČOV zahrnující 12 klíčových proměnných z přítokových i odtokových dat, jako jsou pH, chemická spotřeba kyslíku (CHSK), vodivost, celkové nerozpuštěné látky (NL), BSK₅ a teplota, přičemž cílovou proměnnou byla BSK₅ odtokové vody. Data byla vyčištěna a zpracována pomocí metody interkvartilového rozpětí (IQR) za účelem odstranění odlehlých hodnot a byly odvozeny nové proměnné, které lépe odrážejí chování procesu. Z několika testovaných modelů vykázal nejlepší výsledky model XGBoost, který dosáhl hodnoty $R^2 = 0,9695$ a střední kvadratické chyby (MSE) 0,05 při rozdělení dat na trénovací a testovací část v poměru 80 % ku 20 % na základě časové posloupnosti. Studie ukazuje, že strojové učení může sloužit jako účinný nástroj pro predikci BSK₅, jenž významně zkracuje pětidenní prodlevu laboratorního stanovení a umožňuje rychlejší rozhodování založené na datech při řízení ČOV.

ÚVOD

Správné nakládání s komunálními a průmyslovými odpadními vodami a jejich čištění jsou nezbytné pro ochranu vodních zdrojů a zdraví lidí i ekosystémů. K nejčastěji využívaným ukazatelům mezi různými parametry používanými k hodnocení kvality odtoku patří pětidenní biochemická spotřeba kyslíku (BSK₅). Vyjadřuje množství kyslíku potřebného pro biologický rozklad organických znečišťujících látek ve vodě mikroorganismy během pětidenního období [1]. BSK₅ poskytuje přímou informaci o biologicky rozložitelném organickém zatížení, a proto je klíčovým ukazatelem pro hodnocení účinnosti čištění a dopadů na životní prostředí. Z tohoto důvodu regulační orgány po celém světě stanovily přísné limity vypouštění s cílem udržet přijatelné hodnoty BSK₅ ve vyčištěných odpadních vodách [2].

Navzdory své důležitosti má konvenční stanovení BSK₅ významná omezení. Standardní metoda vyžaduje pětidenní inkubační dobu, což zpožďuje zpětnou vazbu o účinnosti čištění a omezuje možnost včasného provozního rozhodování [3]. Přesnost a reprodukovatelnost měření mohou navíc negativně ovlivnit faktory, jako jsou toxicita vzorku, vliv nitrifikace, variabilita mikrobiální inokulace a problémy spojené s uchováváním vzorků [4–7]. Tyto nedostatky poukazují na potřebu rychlých, spolehlivých a kontinuálních metod odhadu BSK₅.

Strojové učení (Machine Learning, ML) a modelování pomocí soft senzorů se jeví účinnými nástroji pro rychlý odhad BSK₅, protože umožňují predikci na základě rutinně měřených provozních parametrů, jako jsou CHSK, pH, vodivost, teplota a NL [8, 9]. Na rozdíl od empirických nebo deterministických modelů [7, 8], jež často selhávají při proměnlivých podmínkách v důsledku složitých biochemických a hydrodynamických procesů v ČOV [10, 11], dokážou přístupy založené na ML zachytit nelineární interakce a dynamiku systému, a tím podpořit proaktivní řízení procesu, včasnou detekci anomálií a udržitelnější provoz čistíren.

Nedávné studie ukazují, že moderní metody strojového učení mohou dosahovat velmi vysoké predikční úspěšnosti při odhadu BSK₅ a dalších parametrů kvality vody. Např. Dantas et al. [12] prokázali, že umělé neuronové sítě (ANN), tedy výpočetní modely inspirované způsobem zpracování informací biologickými neurony, dosahují dobrých výsledků při predikci BSK₅ a CHSK v ČOV v plném provozním měřítku. Zhang et al. [13] použili model Random Forest, tedy soubor mnoha rozhodovacích stromů společně zvyšujících přesnost predikce, pro odhad BSK₅ v říční vodě a dosáhli hodnoty R^2 přibližně 0,89. Jafar et al. [14] využili hluboké neuronové sítě (DNN), složitější formu architektury neuronových sítí, schopné zachytit vysoce nelineární vztahy, a zaznamenali hodnoty R^2 v rozmezí 0,89–0,93. Další studie prokázaly srovnatelné výsledky: modely XGBoost (Extreme Gradient Boosting), využívající gradientně posilované rozhodovací stromy, dosáhly v ekologických aplikacích hodnot R^2 kolem 0,92 [15], zatímco sítě RVFL (Random Vector Functional Link) vykázaly v podmínkách ČOV hodnotu $R^2 \approx 0,924$ [16]. Naproti tomu jednodušší modely často poskytují nižší přesnost. Např. Ali et al. [17] uvádějí hodnotu R^2 přibližně 0,88 při použití modelu CatBoost (Categorical Boosting), který umožňuje efektivní práci s kategoriálními i numerickými daty při minimálních nárocích na jejich předzpracování. Je třeba poznamenat, že modely lineární regrese nejsou při proměnlivých podmínkách čištění odpadních vod dostatečně robustní, protože často nedokážou zachytit nelineární interakce a složitou dynamiku systému [18].

Přesný a včasný odhad biochemické spotřeby kyslíku (BSK₅) zůstává v oblasti čištění odpadních vod trvalou výzvou, protože tradiční laboratorní analýzy vyžadují pětidenní inkubační dobu. Tato přirozená prodleva omezuje rychlost hodnocení procesu. K řešení tohoto problému studie navrhuje predikční rámec využívající algoritmus XGBoost, který byl zvolen díky své vysoké schopnosti pracovat s vysokodimenzionálními daty a nelineárními vztahy. Integrací robustního přístupu, který je založen na datech a tvorbě proměnných a vychází ze znalosti oboru, se model snaží přesně zachytit složitou dynamiku procesu čištění za reálných provozních podmínek. Hlavním cílem této práce je poskytnout spolehlivou alternativu pro rychlé hodnocení kvality odpadních vod, a tím umožnit rychlejší rozhodování a zlepšit reakci při řízení ČOV. Následující kapitoly podrobně popisují metodiku a proces vývoje modelu použité k dosažení těchto cílů.

METODIKA A VÝVOJ MODELU

Charakteristika lokality a sběr dat

Soubor dat použitý v této studii byl získán z komunální ČOV v provincii Skikda nacházející se v severovýchodním Alžírsku (36,89° s. š., 7,01° v. d.). Zařízení využívá aktivační proces se středním zatížením navržený pro zpracování proměnlivého organického zatížení z domácích a komunálních zdrojů. Projektovaná kapacita čistírny činí 46 000 m³/den a zařízení obsluhuje přibližně 279 700 ekvivalentních obyvatel.

Proces čištění zahrnuje mechanické předčištění, odstranění písku, primární sedimentaci, biologickou oxidaci v aktivačních nádržích, sekundární dosazování a konečnou dezinfekci (obr. 2). Systém je navržen pro průměrné přítokové zatížení BSK₅ přibližně 280 mg/l, což odpovídá 14 950 kg BSK₅ za den, 34 383 kg CHSK za den a 17 250 kg nerozpuštěných látek (NL) za den.

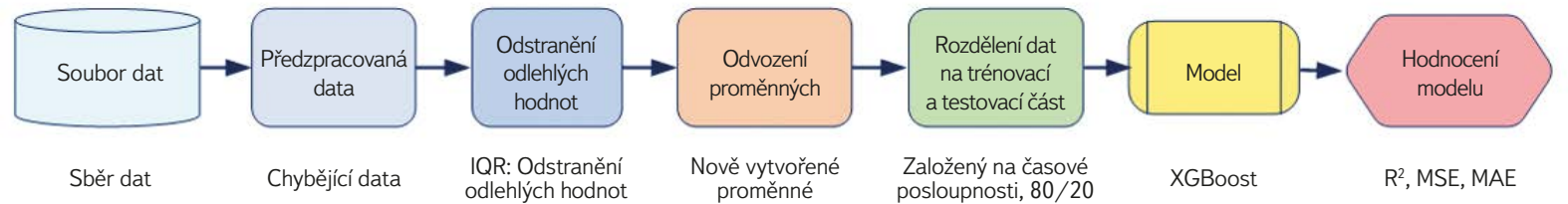
Vyčištěné odpadní vody jsou vypouštěny do řeky Oued Safsaf, citlivého vodního útvaru, který má v regionu významnou ekologickou funkci. Produkovaný přebytečný kal je odvodňován a následně využíván jako zemědělské hnojivo, což zdůrazňuje potřebu spolehlivé kontroly kvality odtoku. Nedostatečné odstranění organických látek zvyšuje množství zbytkové biologicky rozložitelné hmoty, jež vede ke zvýšení vlhkosti kalu a zhoršení jeho odvodnitelnosti, a tím ke snížení kvality výsledného biosolidu.

Informace o vzorcích použitých v této studii (2015–2024) byly digitalizovány z historických archivů ČOV. Soubor dat představuje průběžný monitoring přítoku a odtoku během všech 12 měsíců každého roku. Sledované parametry zahrnovaly biochemickou spotřebu kyslíku (BSK₅), chemickou spotřebu kyslíku (CHSK), celkové nerozpuštěné látky (NL), pH, teplotu, elektrickou vodivost a rozpuštěný kyslík (DO). Všechny analýzy byly prováděny v souladu se Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017) [4].

Postup práce a strategie modelování

Tato kapitola popisuje vývoj vysoce přesného modelu pro predikci BSK₅ na odtoku z ČOV. Přístup využívá reálný soubor provozních dat, na který byl aplikován algoritmus XGBoost za účelem optimalizace výkonnosti modelu.

Pro zvýšení přesnosti modelu byla použita tvorba proměnných vycházející ze znalosti oboru; rozdělení dat na trénovací a testovací část podle časové posloupnosti (80 % / 20 %) pak umožnilo realistické hodnocení modelu. Postup zahrnuje předzpracování dat (zpracování chybějících hodnot a odstranění odlehlých hodnot), tvorbu proměnných, trénování modelu a jeho hodnocení pomocí ukazatelů R², MSE a MAE. Obr. 1 znázorňuje kompletní pracovní postup od surových dat až po finální predikci a prezentuje datově orientovaný rámec pro odhad BSK₅ na odtoku.



Obr. 1. Vývojový diagram modelovacího postupu pro predikci BSK₅ na odtoku
Fig. 1. Flowchart of the modeling pipeline for predicting effluent BOD₅

Sběr, čištění a předzpracování dat

Sběr dat a úvodní kontrola dat

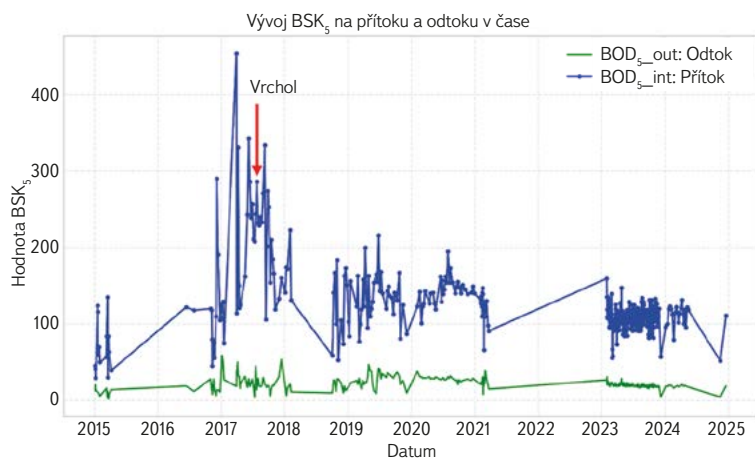
Soubor dat zahrnuje období devíti let (2015–2024) a obsahuje 410 platných záznamů, což odpovídá průměrně třem až čtyřem měřením za měsíc kvůli nepravidelné frekvenci odběru vzorků. Každý záznam obsahuje 15 provozních parametrů měřených jak na přítoku (vstupu), tak na odtoku (výstupu) z procesu čištění. Tyto proměnné byly vybrány na základě jejich významu pro účinnost biologického čištění a dostupnosti konzistentních dat.

Tab. 1. Data monitoringu procesu čištění odpadních vod
Tab. 1. Water treatment process monitoring data

Proměnné	Jednotka	Přítok	Odtok
Datum	dd/mm/rr	Datum	Datum
pH	-	pH_int	pH_out
Pětidenní biochemická spotřeba kyslíku (BSK ₅)	mg/l	BOD ₅ _int	BOD ₅ _out
Chemická spotřeba kyslíku (CHSK)	mg/l	COD_int	COD_out
Elektrická vodivost	μS/cm	Cond_int	Cond_out
Nerozpuštěné látky (NL)	mg/l	TSS_int	TSS_out
Teplota (T)	°C	Temp_int	Temp_out
Rozpuštěný kyslík (DO)	mg/l	O2_int	O2_out

Jako cílová proměnná byla zvolena BSK₅ na odtoku (BOD₅_out), jelikož představuje hlavní ukazatel kvality odpadní vody. Standardní pětidenní zkouška je pro operativní řízení považována za příliš pomalou; rychlý odhad však ve srovnání s konvenčními metodami měření umožňuje predikční modelování. Díky tomu lze problémy zachytit již v rané fázi a čistírnu provozovat efektivněji.

Obr. 2 znázorňuje časový vývoj koncentrací BSK₅ na přítoku a odtoku v období 2015–2025. Zatímco hodnoty na přítoku (BOD₅_int, modře) vykazují značnou proměnlivost s vrcholy v letech 2017–2018 v důsledku sezonních vlivů nebo hydraulických špiček, hodnoty na odtoku (BOD₅_out, zeleně) zůstávají od roku 2019 stabilní a nízké. Tato stabilita potvrzuje konzistentní účinnost čištění navzdory proměnlivému zatížení na přítoku. Výpadky dat v letech 2016, 2018 a 2022 způsobené problémy se senzory nebo záznamem dat byly řešeny během fáze předzpracování dat.

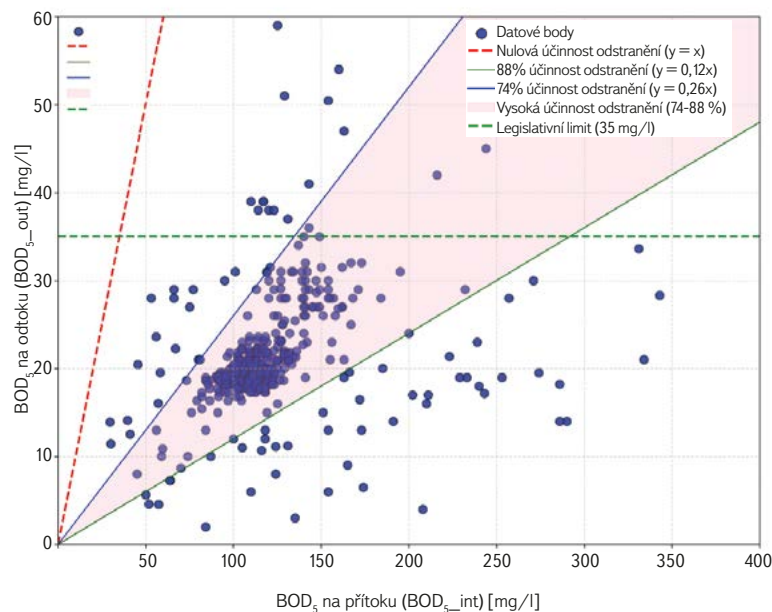


Obr. 2. Časová řada hodnot BSK_5 (= BOD_5) na přítoku a odtoku ukazuje stabilní účinnost čištění navzdory výrazným výkyvům zatížení na přítoku

Fig. 2. Time series of BOD_5 inflow and outflow showing consistent treatment performance despite significant fluctuations

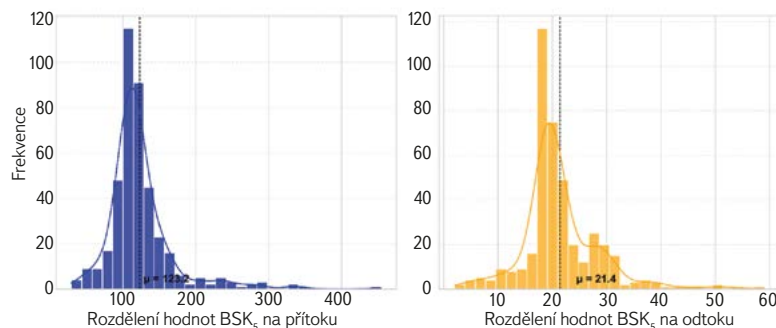
Obr. 3 ukazuje vztah mezi hodnotami BSK_5 na přítoku a odtoku s důrazem na celkovou účinnost odstraňování znečištění čistírenského systému v širokém rozsahu zatížení na přítoku. Hustý shluk datových bodů, kde se hodnoty BSK_5 na přítoku pohybují mezi 80 a 180 mg/l a koncentrace na odtoku zůstávají mezi 10 a 47 mg/l, ukazuje na stabilní a účinné snižování organického zatížení během provozních cyklů. To odpovídá odhadované účinnosti odstranění přibližně 74–88 %, jak je znázorněno na obr. 3 oblastí mezi přímkami ($y = 0,26x$) a ($y = 0,12x$), jež představují odstranění 74 %, resp. 88 %. Je pozoruhodné, že většina hodnot BSK_5 na odtoku zůstává pod legislativním limitem 35 mg/l pro vypouštění odpadních vod v souladu s alžírskými národními normami [19]. Pozorované nelineární rozložení odráží inherentní složitost biologických procesů čištění, a podporuje tak využití pokročilých metod strojového učení pro modelování účinnosti procesu. Jak je zjevné z obr. 3, několik izolovaných datových bodů se odchyluje od hlavního shluku a vykazuje relativně vysoké koncentrace BSK_5 na odtoku navzdory střednímu zatížení na přítoku. Tyto odchylky nejsou náhodné, ale pravděpodobně souvisejí s přechodnými provozními poruchami, jako jsou výkyvy teploty nebo hydraulické rázy (náhlé zvýšení průtoku nebo organického zatížení), které ovlivňují aktivitu mikroorganismů a účinnost čištění. Mohou také odrážet chyby měření nebo dočasné poruchy zařízení. Přesné určení příčiny těchto jevů je však obtížné vzhledem k absenci doplňkových dat, jako jsou podrobné údaje o průtocích, srážkové záznamy, teplota okolí nebo provozní záznamy z ČOV. Navzdory tomuto omezení přítomnost anomálií zdůrazňuje význam důkladného předzpracování dat, zejména v případě BSK_5 na odtoku. Současně poukazuje na potřebu adaptivních modelovacích přístupů schopných zachovat predikční přesnost i při proměnlivých a neideálních provozních podmínkách.

Histogramy BOD_{5_int} a BOD_{5_out} na obr. 4 vykazují pravoúhlé rozdělení, přičemž většina hodnot je soustředěna kolem centrálních maxim (např. kolem 200 mg/l pro BOD_{5_int}) a několik vysokých hodnot zasahuje do pravé části rozdělení (> 400 mg/l). Tyto extrémní hodnoty nemusí nutně představovat chyby; mohou odrážet skutečné události, jako jsou průmyslové vypouštění nebo přítok dešťových vod. Vyžadují však pečlivé zpracování ve fázi předzpracování dat, protože mohou zkreslit trénování modelu a ovlivnit jeho přesnost a věrohodnost. Byl použit vyvážený přístup: extrémní hodnoty spojené se skutečnými provozními poruchami byly ponechány, zatímco izolované odlehle hodnoty byly za účelem zajištění kvality dat odstraněny.



Obr. 3. Bodový graf vztahu BSK_5 na odtoku a BSK_5 na přítoku

Fig. 3. Scatter plot of effluent versus influent BOD_5



Obr. 4. Rozdělení hodnot BSK_5 na přítoku a odtoku v období 2015–2024; je patrné shlukování kolem středních hodnot s pravoúhlými konci rozdělení, což ukazuje na výskyt vzácných událostí s vysokým zatížením

Fig. 4. Distribution of influent and effluent BOD_5 values between 2015 and 2024; there is a clustering around central values with right-skewed tails, which indicates the occurrence of rare, high-load events

Prvotní zpracování dat

Surová data vykazovala v důsledku problémů s měřením a záznamem dat chybějící hodnoty, nekonzistence a odlehle hodnoty. Pro zlepšení kvality dat byl použit strukturovaný postup předzpracování zahrnující zpracování chybějících dat, detekci odlehle hodnot a časovou synchronizaci dat.

Zpracování chybějících dat

Úvodní analýza souboru dat ukázala, že chybějící hodnoty byly označeny symbolem '/'; zejména u proměnných rozpuštěného kyslíku (O_{2_int} a O_{2_out}). Více než 62 % pozorování v těchto sloupcích chybělo, pravděpodobně v důsledku výpadků senzorů, údržby zařízení nebo přerušovaného záznamu dat, a proto nebyla pro spolehlivé modelování vhodná. Ponechání těchto proměnných by vedlo k významnému zkreslení nebo by vyžadovalo rozsáhlou imputaci, která by mohla narušit skutečný charakter procesu. Z tohoto důvodu byly v zájmu zachování integrity dat obě proměnné z analýzy odstraněny.

Po nahrazení všech položek '/' hodnotou NaN a převedení zbývajících měření na přítoku (int) a odtoku (out) do numerického formátu bylo zjištěno,

že ostatní proměnné (pH, BSK₅, CHSK, TSS, teplota a datum záznamu) jsou úplné a neobsahují chybějící hodnoty. Je zřejmé, že počet proměnných byl snížen z 15 (datum odběru, 7 vstupních a 7 výstupních proměnných uvedených v tab. 1) na 13 po vyřazení rozpuštěného kyslíku (DO) z dat měřených na přítoku i odtoku. Současně nebyly identifikovány žádné další chybějící hodnoty vyžadující imputaci. Tyto prediktory byly proto přímo použity v procesu modelování.

Je třeba zdůraznit, že DO představuje základní provozní parametr aktivních systémů, protože přímo ovlivňuje aktivitu mikroorganismů a účinnost nitrifikace [11]. Jeho vyloučení z této analýzy bylo způsobeno značnou ztrátou dat přesahující 60 %, nikoli sníženým významem DO pro samotné procesy čištění.

Detekce a odstranění odlehlých hodnot

Odlehlé hodnoty cílové proměnné, tedy BSK₅ na odtoku (BOD₅_out), byly identifikovány pomocí metody interkvartilového rozpětí (IQR), což je robustní statistický přístup běžně používaný při analýze environmentálních dat [20].

Interkvartilové rozpětí (IQR) je definováno jako:

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (1)$$

kde:

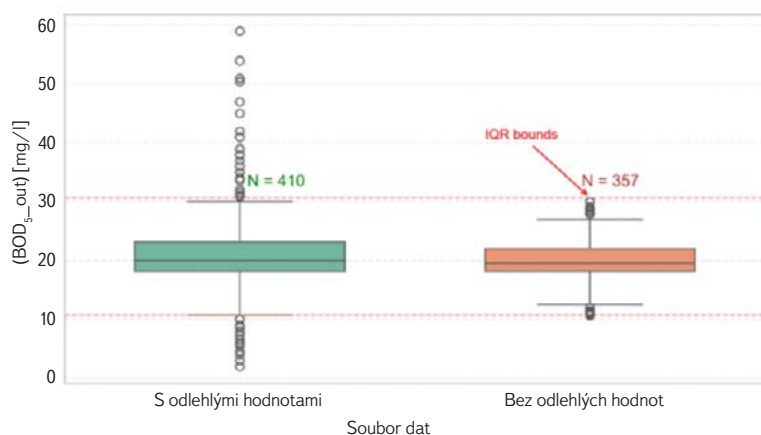
Q_1 a Q_3 představují 25. a 75. percentil.

Za odlehlé hodnoty byla považována pozorování nacházející se mimo následující meze:

$$\text{Lower Bound} = Q_1 - 1,5 \times IQR \quad (2)$$

$$\text{Upper Bound} = Q_3 + 1,5 \times IQR \quad (3)$$

Pro BOD₅_out činily hodnoty $Q_1 = 18,18$ mg/l a $Q_3 = 28,63$ mg/l, což odpovídá hodnotě $IQR = 10,45$ mg/l. Dolní a horní mez byly následně vypočítány na 2,50 mg/l, resp. 44,30 mg/l. Použití tohoto kritéria vedlo k odstranění 53 extrémních pozorování, včetně neobvykle vysokých hodnot (např. 59 mg/l), jež byly pravděpodobně způsobeny chybami měření nebo občasnými provozními poruchami. Tím se velikost souboru dat snížila ze 410 na 357 vzorků.



Obr. 5. Porovnání krabicových diagramů BOD₅_out před a po odstranění odlehlých hodnot

Fig. 5. Box plot comparison of BOD₅_out before and after outlier filtering

Následně byly odstraněny řádky obsahující chybějící hodnoty buď v cílové proměnné, nebo v klíčových prediktorech. Finální upravený soubor dat použitý pro modelování obsahoval $N = 357$ úplných vzorků. Jak ukazuje obr. 5, tyto kroky předzpracování zlepšily symetrii rozdělení a snížily jeho rozptyl, čímž posílily robustnost a zobecnitelnost predikčních modelů.

Časová synchronizace dat

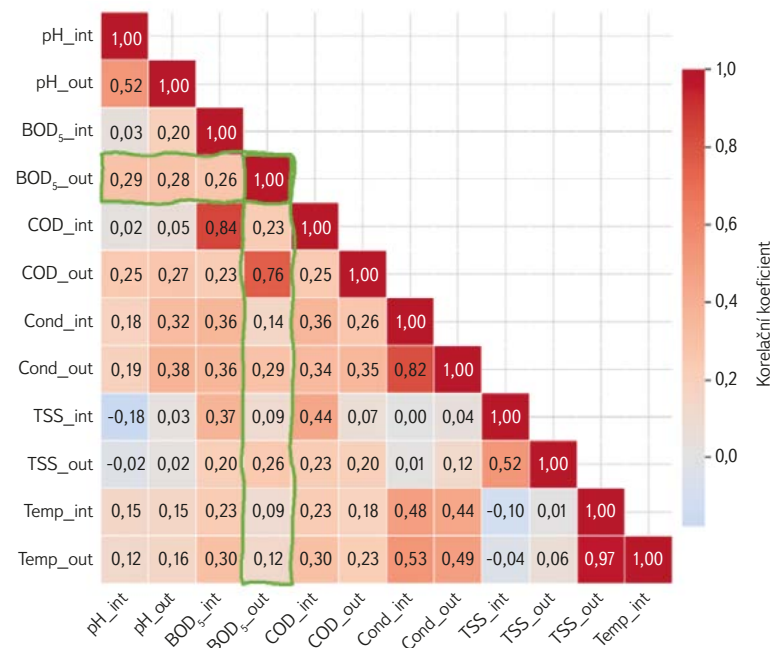
Sloupec s datem byl převeden do formátu datetime a použit k chronologickému seřazení souboru dat. Tento přístup byl zvolen za účelem zachování časových závislostí, což umožnilo realistické ověření modelu.

Rozšíření proměnných a výběr cílové proměnné pro zlepšení predikce

Při vývoji modelu strojového učení se ukázalo, že původní soubor dat obsahoval nedostatečný počet proměnných pro dosažení vysoké predikční přesnosti. K překonání tohoto omezení byl prostor proměnných rozšířen pomocí cílené tvorby nových proměnných a pečlivého výběru nejrelevantnějších vstupních a výstupních parametrů. Tato podkapitola popisuje proces vytváření nových proměnných a definování cílové proměnné za účelem zlepšení výkonnosti modelu.

Výběr proměnných a cílové proměnné

V prediktivním modelování lze za potenciální vstupy považovat všechny dostupné systémové parametry, avšak ne všechny přispívají stejnou měrou k výkonnosti modelu. Výběr a tvorba informativních proměnných jsou proto zásadní, neboť nerelevantní proměnné mohou snižovat přesnost modelu [21]. Za účelem zvýšení predikční schopnosti byly jako vstupy zahrnuty také parametry na odtoku, což je strategie, která v podobných aplikacích prokazatelně zvyšuje přesnost modelu.



Obr. 6. Matice Pearsonových korelačních koeficientů

Fig. 6. Pearson correlation matrix

Obr. 6 zobrazuje matici Pearsonových korelačních koeficientů znázorňující lineární vztahy mezi provozními proměnnými v souboru dat. Silné kladné korelace (červeně) označují proměnné, jež rostou společně (např. COD_int a BOD₅_int), zatímco záporné korelace (modře) vyjadřují opačné trendy. Podle očekávání

BSK₅ a CHSK na přítoku vykazují silnou kladnou korelaci ($r = 0,84$) a vysokou korelaci je možné pozorovat také mezi BSK₅ a CHSK na odtoku ($r = 0,76$). Teplota a TSS_{int} vykazují slabé korelace s ostatními proměnnými, což naznačuje jejich malý vliv na krátkodobé změny BSK₅. Teplota (Temp_{int}, Temp_{out}) a nerozpuštěné látky (TSS_{int}) vykazují slabé korelace se zbývajících proměnnými (obr. 6). Tyto proměnné však byly ponechány, aby bylo možné zachytit jemnější vlivy na BSK₅ a zvýšit přesnost modelu. Celkový počet proměnných použitých ve finální architektuře modelu tak činí 13.

Tvorba proměnných: vytváření nových prediktivních vstupních proměnných

Tvorba proměnných převádí surová data na informativní proměnné, které zvyšují interpretovatelnost modelu, jeho predikční výkonnost a schopnost zobecnění [20, 21]. V souladu s principy čištění odpadních vod byly odvozeny proměnné založené na znalostech oboru, jež lépe vystihují dynamiku procesů čištění. Bylo odvozeno šest dalších proměnných: ukazatele účinnosti odstranění, poměrové ukazatele a ukazatele rychlosti změny. Tím se původní sada 13 proměnných rozšířila na celkem 18 prediktorů, s výjimkou data odběru vzorků. Předběžné hodnocení potvrdilo, že tyto oborově specifické proměnné zvýšily přesnost modelu, zejména pro účely řízení procesů. Všechny odvozené proměnné jsou shrnuty v tab. 2, včetně jejich matematických definic a fyzikální interpretace. U každé proměnné byla posouzena její fyzikální smysluplnost a analyzována korelace s cílovou proměnnou BOD₅out.

Tab. 2. Odvozené proměnné a jejich matematický popis
Tab. 2. Engineered features and their mathematical descriptions

Odvozená proměnná	Vzorec	Poznámky
COD_removal_eff	$\frac{COD_{int} - COD_{out}}{COD_{int}} \quad (4)$	Účinnost odstranění CHSK; vyšší hodnoty indikují účinnější odstranění znečištění
pH_change	$pH_{out} - pH_{int} \quad (5)$	Rozdíl pH mezi přítokem a odtokem; ukazatel neutralizačních procesů
COD_BOD ₅ _ratio_int	$\frac{COD_{int}}{BOD_{5int}} \quad (6)$	Poměr CHSK/BSK ₅ na přítoku; vysoké hodnoty indikují nízkou biologickou rozložitelnost
COD_out_BOD ₅ _int_ratio	$\frac{COD_{out}}{BOD_{5int}} \quad (7)$	Poměr CHSK/BSK ₅ na odtoku a přítoku; ukazatel změny biologické rozložitelnosti a zbytkového znečištění během procesu čištění
BOD ₅ _int_pH_int	$BOD_{5int} \times pH_{int} \quad (8)$	Vliv pH na biologický rozklad organických látek (BSK ₅)
Cond_ratio	$\frac{Cond_{out} - Cond_{int}}{Cond_{int}} \quad (9)$	Změna elektrické vodivosti (Cond _{int} , Cond _{out}) mezi přítokem a odtokem

Strategie rozdělení na trénovací a testovací sadu

Jelikož datový soubor zahrnuje téměř desetileté období (2015–2024) a obsahuje časově označená sekvenční měření, byla data rozdělena na trénovací a testovací sadu podle časové posloupnosti, aby bylo zachováno chronologické uspořádání a zabránilo se úniku informací. Na rozdíl od náhodného rozdělení, které může vést k časovému zkreslení tím, že umožňuje budoucím datům ovlivnit proces trénování, tento přístup chronologicky přiřadil prvních 80 % vzorků (286 pozorování, leden 2015 až prosinec 2022) do trénovací/validační sady a zbývajících 20 % (71 pozorování, leden 2023 až květen 2024) do testovací sady. Tím byla simulována situace z reálného provozu, kdy jsou modely trénovány na historických datech a následně vyhodnocovány na datech z pozdějšího období [22, 23].

Tento přístup umožňuje hodnotit model za realistických podmínek predikce, jež zohledňují jak sezonní variabilitu, tak dlouhodobé provozní trendy. Výkonnostní metriky použité v této studii, včetně koeficientu determinace R² (který udává, jakou část variability BSK₅ na odtoku je model schopen vysvětlit), střední kvadratické chyby (MSE, jež zdůrazňuje přítomnost velkých chyb predikce) a střední absolutní chyby (MAE, která vyjadřuje průměrnou odchylku mezi predikovanými a naměřenými hodnotami), tak poskytují smysluplný obraz o skutečné predikční schopnosti modelu. Přísným oddělením testovacích dat od fází trénování a ladění modelu zůstává hodnocení nezaujaté a reprezentativní pro reálné využití.

Zvolený model: architektura a hyperparametry XGBoostu

XGBoost (Extreme Gradient Boosting) byl zvolen pro svou vysokou výpočetní efektivitu a vynikající schopnost pracovat s nelineárními biologickými daty. Jde o vysoce optimalizovanou implementaci gradientního boostingu, která aditivním způsobem kombinuje rozhodovací stromy a využívá gradientní sestup k minimalizaci chyby predikce. Efektivitu trénování a výkonnost modelu zvyšuje prostřednictvím:

- gradientů druhého řádu (optimalizace založené na Hessově matici), jež umožňují rychlejší konvergenci,
- vestavěné regularizace L1 (Lasso) a L2 (Ridge), které regulují složitost modelu a omezují přeučení,
- podvzorkování sloupců a řádků, jež zlepšuje schopnost zobecnění modelu.

Díky své robustnosti, rychlosti a vysoké predikční přesnosti patří XGBoost mezi nejpoužívanější algoritmy v soutěžích strojového učení (např. Kaggle) i v reálných aplikacích napříč technickými obory, financemi a environmentálními vědami [24, 25].

Pro trénování modelu XGBoost byly v této studii použity následující hyperparametry:

- `n_estimators = 200`: počet boostingových iterací (stromů),
- `learning_rate = 0,05`: míra učení (learning rate) pro omezení přeučení,
- `max_depth = 5`: omezuje hloubku stromů s cílem vyvážit flexibilitu modelu a jeho interpretovatelnost,
- `subsample = 0,8`: pro každý strom využívá 80 % vzorků, čímž zavádí prvek náhodnosti a zvyšuje robustnost modelu,
- `colsample_bytree = 0,8`: při každém dělení náhodně vybírá 80 % proměnných, čímž zvyšuje rozmanitost modelu,
- `reg_alpha = 0,1`, `reg_lambda = 0,1`: používá mírnou regularizaci L1 a L2 k omezení velikosti koeficientů.

Tyto parametry byly vybrány na základě předchozích experimentů a odpovídají osvědčeným postupům používaným při řešení regresních úloh. Model byl implementován pomocí knihovny XGBoost pro Python (verze 1.7.6).

Metriky hodnocení výkonnosti modelu

Predikční výkonnost modelu byla hodnocena pomocí tří standardních regresních metrik: střední absolutní chyby (MAE), střední kvadratické chyby (MSE) a koeficientu determinace (R^2). Jejich matematické definice jsou uvedeny níže:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (10)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (12)$$

kde:

y_i	je	pozorovaná hodnota BOD_{5_out}
$\hat{y}_i$		predikovaná hodnota
$\bar{y}$		aritmetický průměr pozorovaných hodnot
n		počet pozorování v testovací sadě

MAE vyjadřuje průměrnou velikost chyb predikce bez ohledu na jejich směr, přičemž všechny odchylky hodnotí stejně, a poskytuje tak srozumitelný ukazatel celkové přesnosti modelu. Díky své snadné interpretovatelnosti je široce využívána, zejména v environmentálním a geoprostorovém modelování. MSE naproti tomu před výpočtem průměru umocňuje jednotlivé chyby na druhou, čímž přikládá větší váhu velkým odchylkám, a je proto účinná při identifikaci modelů náchylných k vytváření výrazných odlehlých hodnot [26]. Koeficient determinace R^2 tyto metriky doplňuje tím, že vyjadřuje podíl variability cílové proměnné vysvětlený modelem. Hodnota blízká 1 svědčí o velmi dobré shodě modelu s daty, zatímco nižší hodnoty ukazují na slabší schopnost modelu vysvětlit variabilitu cílové proměnné. Všechny metriky výkonnosti byly vypočítány na vyčleněné testovací sadě (leden 2023 až květen 2024), což zajistilo nezkreslené hodnocení schopnosti modelu zobecňovat na nová data.

VÝSLEDKY A DISKUZE

Tato kapitola prezentuje výkonnost jednotlivých základních modelů a stohovaného ansámblu při predikci BSK_5 na odtoku (BOD_{5_out}). Analýza zahrnuje kvantitativní výsledky, vizualizace a jejich interpretaci v kontextu řešeného problému s cílem zdůraznit přesnost, robustnost a praktickou využitelnost modelů.

Analýza výkonnosti modelů

Predikční výkonnost modelu XGBoost byla hodnocena po důkladném čištění dat a odvození proměnných. Z původního datového souboru zůstalo pro analýzu 357 vysoce kvalitních vzorků, které byly rozděleny na trénovací sadu ($n = 286$) a testovací sadu ($n = 71$).

Model byl sestaven s využitím 18 proměnných, jež zahrnovaly jak surová data ze senzorů, tak i odvozené ukazatele, jako jsou účinnost odstraňování znečištění a poměry $CHSK/BSK_5$. Z nich 17 parametrů sloužilo jako vstupní proměnné, včetně 11 původních parametrů přítoku a odtoku a šesti odvozených proměnných. Zbývající proměnná ($BSK_{5_výstup}$) byla určena jako cílový výstup. Metriky výkonnosti pro testovací datovou sadu jsou shrnuty v tab. 3.

Výsledky prokazují vysokou míru predikční přesnosti. Hodnota R^2 ve výši 96,95 % naznačuje, že model účinně zachycuje nelineární dynamiku procesu

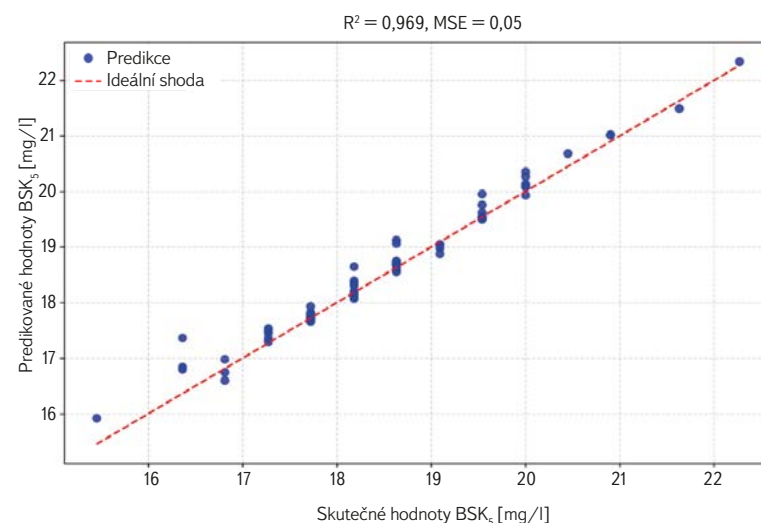
čištění. Nízká hodnota MAE (0,146) je obzvláště významná, protože ukazuje, že průměrná chyba predikce modelu je zanedbatelná ve vztahu k legislativním limitům pro BSK_5 .

Tab. 3. Výsledky modelu XGBoost při predikci BSK_5

Tab. 3. XGBoost performance metrics for BOD_5 prediction

Metrika	Hodnota
Střední kvadratická chyba (MSE)	0,05
Střední absolutní chyba (MAE)	0,146
Koeficient determinace (R^2)	96,95 %

Obr. 7 ukazuje těsnou shodu mezi skutečnými a predikovanými hodnotami BSK_5 . Model přesně sleduje jak stabilní období, tak i kolísání hodnot a zachovává vysokou přesnost i během období se zvýšeným zatížením. Tato výkonnost překonává výsledky dosažené v předchozích studiích [13–16]. Použití validace založené na časovém rozdělení dat navíc zajišťuje, že model je spolehlivý pro reálný provoz a není zatížen únikem informací mezi datovými sadami.



Obr. 7. Skutečné a predikované hodnoty BOD_{5_out} ; červená přerušovaná čára představuje ideální predikci ($y = x$)

Fig. 7. Actual vs. predicted BOD_{5_out} values; the red dashed line represents perfect prediction ($y = x$)

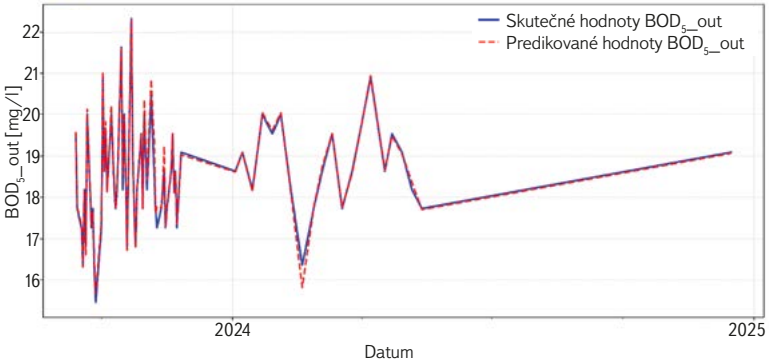
Význam proměnných a poznatky o procesu

Zařazení celkem 17 proměnných bylo pro úspěšnost modelu klíčové. Zejména začlenění proměnných založených na znalostech oboru, jako jsou $COD_removal_eff$, $COD_out_BOD_{5_int_ratio}$, $BOD_{5_int_x_pH}$ a změna vodivosti vyjádřená ukazatelem $Cond_ratio$ (rovnice 4, 7, 8 a 9 v tab. 2), poskytlo modelu hlubší kontext o biologickém stavu systému. Nízká hodnota MSE (0,05) dále potvrzuje stabilitu modelu a ukazuje, že model nevytváří velké, nahodilé chyby (odlehlé hodnoty).

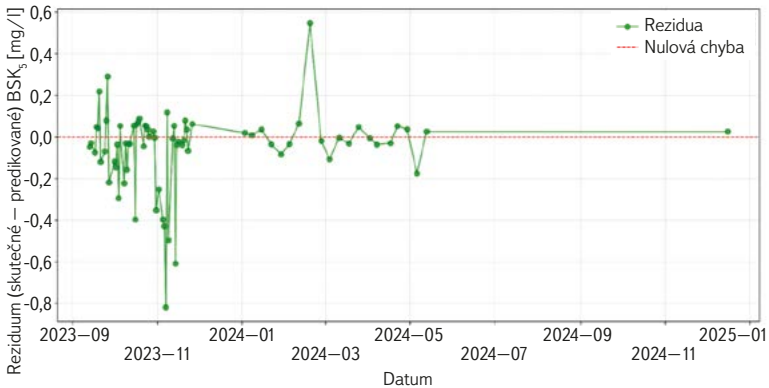
Tato robustnost je zásadní pro spolehlivé monitorování za provozních podmínek, protože umožňuje obsluze ČOV důvěřovat predikovaným hodnotám na odtoku a využívat je k proaktivnímu řízení a optimalizaci procesu.

Časová přesnost predikce

Obr. 8 znázorňuje časový vývoj skutečných a predikovaných hodnot BSK₅ během testovacího období. Model přesně sleduje dynamické chování procesu čištění, včetně krátkodobých výkyvů i postupných trendů. Navzdory drobným odchylkám model rychle reaguje na změny a nadále poskytuje přesné sledování vývoje hodnot. Analýza reziduí dále potvrzuje stabilní výkonnost modelu. Jak ukazuje obr. 9, rezidua jsou náhodně rozložena kolem nulové hodnoty, a to bez zjevného trendu nebo nárůstu rozptylu v čase. Svědčí to o homoskedasticitě chyb a absenci systematického zkreslení, což jsou klíčové vlastnosti pro spolehlivé využití modelu v reálných monitorovacích systémech.



Obr. 8. Časové porovnání skutečných a predikovaných hodnot BSK₅ na odtoku během testovacího období
Fig. 8. Temporal comparison of actual and predicted effluent BOD₅ over the test period



Obr. 9. Rezidua během testovacího období; chyby jsou soustředěny kolem nulové hodnoty bez systematického posunu
Fig. 9. Residuals over the test period; errors are centered around zero, with no systematic drift

Porovnání s odbornou literaturou

Tab. 4 porovnává výsledky této studie s nedávno publikovanými pracemi zaměřenými na predikci BSK₅/CHSK na ČOV. Náš model překonává několik dosavadních přístupů z hlediska hodnoty R². Je třeba poznamenat, že řada předchozích studií používala náhodné rozdělení dat na trénovací a testovací sadu, což může vést k nadhodnocení výkonnosti modelu v důsledku časového úniku informací. Naproti tomu tato studie využívá striktní chronologické rozdělení dat v poměru 80 %/20 %, jež zachovává časovou strukturu dat a zajišťuje schopnost modelu zobecňovat výsledky v podmínkách reálného využití. Náš model tak dosahuje vysoké přesnosti při současném použití přísných validačních postupů a zajištění plné reprodukovatelnosti výsledků.

Tab. 4. Srovnání výkonnosti modelů pro predikci BSK₅ podle publikovaných studií
Tab. 4. Comparative performance of BOD₅ prediction models in recent literature

Studie	Metoda	R ² [%]
Zhang et al. (2025) [13]	Random Forest	~89 %
Jafar et al. (2022) [14]	Deep Neural Network	89–93 %
Sethy et al. (2025) [15]	XGBoost	~93 %
Ali et al. (2025) [17]	CatBoost	~88 %
Tato studie	XGBoost (time-split)	96,95 %

Zobecnitelnost a přenositelnost modelu

Navzdory vysoké výkonnosti dosažené na studované lokalitě (R² = 0,9695) zůstává použitelnost modelu mimo tento kontext omezena jeho závislostí na datech specifických pro danou lokalitu, použitých při trénování. Predikční výkonnost je významně ovlivněna charakteristikami přítoku, provozními podmínkami a environmentálními faktory, které jsou obsaženy v trénovacím datovém souboru. Lze proto očekávat, že model bude spolehlivě fungovat především na čistírnách s obdobnou technologickou konfigurací a podobným provozním režimem.

Faktory omezující přenositelnost modelu zahrnují rozdíly ve složení přítoku, hydraulickém zatížení a technologickém uspořádání procesu (např. strategii provzdušňování, stáří aktivovaného kalu a stupně odstraňování živin), stejně jako regionální podmínky, jako jsou klimatická variabilita a charakter průmyslových odpadních vod. Využití modelu na ČOV s výrazně odlišnými charakteristikami bez jeho předchozí recalibrace může vést ke snížení přesnosti predikce nebo ke zvýšení nejistoty výsledků. Model je navíc primárně určen pro provozy se středním zatížením a nemusí být přímo použitelný na čistírnách s nízkým zatížením.

Budoucí výzkum by se měl zaměřit na validaci modelu na více lokalitách a na integraci metod doménové adaptace nebo transfer learningu, které by zvýšily robustnost modelu a umožnily jeho širší využití v různorodých systémech čištění odpadních vod.

ZÁVĚR

Tato studie ukazuje, že samostatný model XGBoost umí docílit vysoce přesné predikce BSK₅ na odtoku (BOD_{5_out}) na základě téměř desetileté řady provozních dat (2015–2024) z ČOV v plném provozním měřítku. Při hodnotách R² = 96,95 %, MSE = 0,05 a MAE = 0,146 mg/l dosažených na chronologicky vyčleněné testovací sadě vykazuje model mimořádnou výkonnost, aniž by bylo nutné využívat složité strategie ansámblového slučování modelů.

Klíčovým zjištěním je, že této úrovně přesnosti bylo dosaženo kombinací tvorby proměnných založené na znalostech oboru, zahrnující např. účinnost odstranění CHSK, změny pH a poměry CHSK/BSK₅, spolu s důslednou validací založenou na časovém rozdělení dat, která zajišťuje realistické hodnocení modelu v podmínkách predikce.

Přestože datový soubor neobsahoval údaje o rozpuštěném kyslíku (DO), model si zachoval vysokou predikční výkonnost, což naznačuje, že běžně monitorované proměnné, jako jsou CHSK na odtoku, vodivost a pH na přítoku,

poskytovaly dostatečné informace o provozních podmínkách a biologické aktivitě systému. Ačkoli je zásadní význam rozpuštěného kyslíku pro kinetiku procesů čištění nesporný, výsledky této studie naznačují, že vysoce korelované provozní parametry mohou při prediktivním modelování do určité míry kompenzovat absenci přímých měření DO.

Ještě důležitější je, že model funguje jako praktický virtuální senzor a poskytuje téměř okamžité odhady BSK₅ na základě přímých měření. Nahrzení pětidenní prodlevy laboratorního stanovení okamžitou predikcí vytváří podmínky pro využití BSK₅ nejen ke kontrole plnění emisních limitů, ale také k operativnímu řízení procesu. To zajišťuje:

- Včasnou detekci provozních poruch: Průběžná predikce BSK₅ umožňuje včas odhalit zhoršení biologické účinnosti způsobené změnami zatížení nebo hydraulickými poruchami, což přispívá k přijetí provozních opatření ještě před zhoršením kvality odtoku.
 - Optimalizaci spotřeby energie na provzdušňování: Predikované hodnoty BSK₅ umožňují přesnější řízení provzdušňování a zajišťují, že přívod kyslíku odpovídá aktuálnímu organickému zatížení. Tím se omezuje plýtvání energií způsobené nadměrným provzdušňováním při zachování vysoké účinnosti procesu.
 - Proaktivní úpravy provozu pro zajištění souladu s legislativními požadavky: Predikce BSK₅ umožňuje přijímat preventivní provozní opatření v situacích, kdy se očekávané hodnoty blíží limitům pro vypouštění odpadních vod. Tím je zaručeno trvalé plnění legislativních požadavků a současně se předchází vysokým pokutám i environmentálním a ekonomickým škodám.
- Tato studie ukazuje, že i relativně jednoduchý model může docílit vynikající přesnosti. Při správném zpracování dat a využití znalostí oboru může vhodně nastavený model XGBoost dosahovat srovnatelných nebo lepších výsledků než složitější metody, a zároveň je rychlejší, snáze interpretovatelný i využitelný. Díky tomu představuje perspektivní řešení pro škálovatelné aplikace v oblasti řízení a provozu systémů čištění odpadních vod.

Literatura

- [1] METCALF & EDDY, Inc., TCHOOBANOGLOUS, G., STENSEL, H. D., TSUCHIHASHI, R., BURTON, F. L. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. 5. vyd. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-340118-8. Dostupné z: <https://www.mheducation.com/highered/product/wastewater-engineering-treatment-and-resource-recovery-metcalf-and-eddy.html?viewOption=student>
- [2] YOUNG, J. C., CLARK, J. W. Second-Order Analysis of BOD. *Journal of the Sanitary Engineering Division*. 1965, 91(1). Dostupné z: <https://doi.org/10.1061/JSEDAI.0000532>
- [3] PAINTER, H. A. A Review of Literature on Inorganic Nitrogen Metabolism in Microorganisms. *Water Research*. 1970, 4(6), s. 393–450. ISSN 0043-1354. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(70\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(70)90051-5)
- [4] APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 23rd ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2017. ISBN 9780875532875.
- [5] JOUANNEAU, S., RECOULES, L., DURAND, M. J., BOUKABACHE, A., PICOT, V., PRIMAULT, Y., LAKEL, A., SENGELIN, M., BARILLON, B., THOUAND, G. Methods for Assessing Biochemical Oxygen Demand (BOD): A Review. *Water Research*. 2014, 49, s. 62–82. ISSN 0043-1354. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.066>
- [6] OLSSON, G., NIELSEN, M., YUAN, Z., LYNNGAARD-JENSEN, A., STEYER, J.-P. *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems*. IWA Publishing. 2005, 4. ISBN electronic 9781780402680. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/9781780402680>
- [7] CHING, P. M. L., SO, R. H. Y., MORCK, T. Advances in Soft Sensors for Wastewater Treatment Plants: A Systematic Review. *Journal of Water Process Engineering*. 2021, 44, 102367. ISSN 2214-7144. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102367>
- [8] SHYU, H. Y., CASTRO, C. J., BAIR, R. A., LU, Q., YEH, D. H. Development of a Soft Sensor Using Machine Learning Algorithms for Predicting the Water Quality of an Onsite Wastewater Treatment System. *ACS Environmental Au*. 2023, 3(5), s. 308–318. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsenvironau.2c00072>
- [9] PATTNAIK, B. S., PATTANAYAK, A. S., UDGATA, S. K., PANDA, A. K. Machine Learning Based Soft Sensor Model for BOD Estimation Using Intelligence at Edge. *Complex & Intelligent Systems*. 2021, 7, s. 961–976. ISSN 2198-6053. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40747-020-00259-9>
- [10] JU, F., GUO, F., YE, L., XIA, Y., ZHANG, T. Metagenomic Analysis on Seasonal Microbial Variations of Activated Sludge from a Full-Scale Wastewater Treatment Plant over 4 Years. *Environmental Microbiology Reports*. 2014, 6(1), s. 80–89. ISSN 1758-2229. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12110>

- [11] HENZE, M., GUJER, W., MINO, T., VAN LOOSDRECHT, M. *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*. IWA Publishing. 2000, 5. ISBN 1900222248. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/9781780402369>
- [12] DANTAS, M. S., CHRISTOFARO, C., OLIVEIRA, S. C. Artificial Neural Networks for Performance Prediction of Full-Scale Wastewater Treatment Plants: A Systematic Review. *Water Science and Technology*. 2023, 88(6), s. 1 447–1 470. ISSN 0273-1223. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/wst.2023.276>
- [13] ZHANG, X., ZHANG, Y., YANG, X., WANG, Z., LIU, X. Biochemical Oxygen Demand Prediction Based on Three-Dimensional Fluorescence Spectroscopy and Machine Learning. *Sensors*. 2025, 25(3), 711. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s25030711>
- [14] JAFAR, R., AWAD, A., JAFAR, K., SHAHROUR, I. Predicting Effluent Quality in Full-Scale Wastewater Treatment Plants Using Shallow and Deep Artificial Neural Networks. *Sustainability*. 2022, 14(23), 15598. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su142315598>
- [15] SETHY, K., MUDHOLKAR, M., MUDHOLKAR, P. K., BEHERA, P. K., KARTHIK, B., BALAMURALITHARAN, S. Predicting Water Quality Using Ensemble Machine Learning Models and Remote Sensing Data. *International Journal of Environmental Sciences*. 2025, 11(16s), s. 166–175. ISSN 2229-7359. Dostupné z: <https://doi.org/10.64252/cw5pq178>
- [16] ELMAADAWY, K., ABD ELAZIZ, M., ELSHEIKH, A. H., MOAWAD, A., LIU, B., LU, S. Utilization of Random Vector Functional Link Integrated with Manta Ray Foraging Optimization for Effluent Prediction of Wastewater Treatment Plant. *Journal of Environmental Management*. 2021, 298, 113520. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113520>
- [17] ALI, A., ZHOU, G., TAN, Y., ANTEZANA LOPEZ, F. P. Biochemical Oxygen Demand Estimation Using Explainable Ensemble Learning Methods. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2025, 41, 101835. ISSN 2352-9385. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101835>
- [18] GULSHIN, I., KUZINA, O. Machine Learning Methods for the Prediction of Wastewater Treatment Efficiency and Anomaly Classification with Lack of Historical Data. *Applied Sciences*. 2024, 14(22), 10689. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app142210689>
- [19] Algerian Executive Decree No. 06-141 of 19 April 2006 establishing the limit values for liquid industrial effluent discharges (official French text: *Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels*). *Journal Officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire (JORA)*, No. 26, 23 April 2006, pp. 4–6 (in French). Dostupné z: <https://www.joradp.dz/FTP/jo-francais/2006/F2006026.pdf>
- [20] KOUKARAS, P., TJORTJIS, C. Data Preprocessing and Feature Engineering for Data Mining: Techniques, Tools, and Best Practices. *AI*. 2025, 6(10), 257. ISSN 2673-2688. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ai6100257>
- [21] ZHENG, A., CASARI, A. *Feature Engineering for Machine Learning: Principles and Techniques for Data Scientists*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2018. ISBN 978-1491953242. Dostupné z: <https://www.oreilly.com/library/view/feature-engineering-for/9781491953235/>
- [22] BÜYÜKKEÇECİ, M., OKUR, M. C. A Comprehensive Review of Feature Selection and Feature Selection Stability in Machine Learning. *Gazi University Journal of Science and Technology*. 2023, 36(4), s. 1 506–1 520. Dostupné z: <https://doi.org/10.35378/gujs.993763>
- [23] HYNDEMAN, R. J., ATHANASOPOULOS, G. *Forecasting: Principles and Practice*. 3. vyd. Melbourne, Australia: OTexts, 2021. ISBN 9780987507136. Dostupné z: <https://otexts.com/fpp3/fpp2/>
- [24] GÉRON, A. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow*. 2. vyd. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2019. ISBN 978-1492032649. Dostupné z: <https://www.amazon.com/Hands-Machine-Learning-Scikit-Learn-TensorFlow/dp/1492032646>
- [25] CHEN, T., GUESTRIN, C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. New York, NY: ACM, 2016, s. 785–794. ISBN 978-1450342322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>
- [26] ROBESON, S. M., WILLMOTT, C. J. Decomposition of the Mean Absolute Error (MAE) into Systematic and Unsystematic Components. *PLOS ONE*. 2023, 18(2), e0279774. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0279774>

Autoři

Dr. Nassima Lekouaghet¹
ORCID: 0000-0003-1694-1430

Dr. Lakhdar Bouragbi^{2, 3}
ORCID: 0009-0002-3170-1275

Dr. Brahim Mahfoud³
✉ b.mahfoud@univ-bouira.dz
ORCID: 0000-0002-0709-8958

¹Laboratoř stavebního a hydraulického inženýrství,
Univerzita 8. května 1945, Guelma (Alžírsko)

²Katedra procesního inženýrství, Fakulta technologií,
Univerzita 20. srpna 1955, Skikda (Alžírsko)

³Laboratoř energetiky a mechaniky (LEM), Fakulta aplikovaných věd,
Univerzita Bouira (Alžírsko)

Originál příspěvku v angličtině prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.05.003

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

PREDICTING EFFLUENT BOD₅ IN WASTEWATER TREATMENT USING MACHINE LEARNING

LEKOUAGHET, N.¹; BOURAGBI, L.^{2, 3}; MAHFOUD, B.³

¹Laboratory of Civil Engineering and Hydraulics,
University of 8th May 1945, Guelma (Algeria)

²Department of Process Engineering, Faculty of Technology,
University 20 août 1955, Skikda (Algeria)

³Energy and Mechanics Laboratory (LEM), Faculty of Applied Science,
University of Bouira (Algeria)

Keywords: Biochemical Oxygen Demand (BOD₅) –
wastewater treatment – machine learning – soft sensor –
XGBoost – BOD₅ prediction – process optimization

Accurate and quick prediction of effluent Biochemical Oxygen Demand (BOD₅) is important for maintaining regulatory standards and improving the operation of wastewater treatment (WWT) plants. Traditional laboratory tests for BOD₅ take several days, causing delays in assessing water quality and adjusting plant performance. To overcome this issue, this study develops a machine learning model to estimate effluent BOD₅ using easily available plant data. A dataset from a large-scale wastewater treatment plant was used, comprising 12 variables from both influent and effluent data, such as pH, Chemical Oxygen Demand (COD), conductivity, Total Suspended Solids (TSS), BOD₅, and temperature, with effluent BOD₅ as the target variable. The data were cleaned and processed using the Interquartile Range (IQR) method to remove outliers, and new features were created to better reflect process behavior. Among several tested models, XGBoost showed the best performance, achieving an R² of 0.9695 and a Mean Squared Error (MSE) of 0.05, based on a time-based train/test split (80 %/20 %). The study demonstrates that machine learning can serve as a powerful predictive tool for BOD₅ estimation, significantly reducing the five-day analytical lag of laboratory testing and supporting faster, data-driven decision-making in WWT management.





Autoři VTEI

Dr. Nassima Lekouaghet

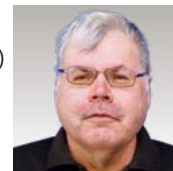
Laboratoř stavebního a hydraulického inženýrství,
Univerzita 8. května 1945, Guelma (Alžírsko)



Dr. Nassima Lekouaghet získala doktorát v oboru hydraulického inženýrství; její výzkum byl zaměřen na návrh jednostupňového koagulačně-usazovacího systému úpravy pitné vody a na jeho hydraulické modelování. V současnosti působí jako docentka na Katedře stavebního a hydraulického inženýrství Univerzity 8. května 1945 v Guelmě v Alžírsku. Ve své práci se zaměřuje na úpravu vody a čištění odpadních vod, hydraulické modelování, analýzu environmentálních dat a využití strojového učení v environmentálním inženýrství s důrazem na strategie udržitelného hospodaření s vodou.

Ing. Petr Šercl, Ph.D.

Český hydrometeorologický ústav, Praha (Česká republika)
✉ petr.sercl@chmi.cz
www.chmi.cz



Ing. Petr Šercl, Ph.D., pracuje jako hydrolog v ČHMÚ od roku 1989, nyní v pozici vedoucího oddělení povrchových vod. Vystudoval obor Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze a v roce 2007 ukončil doktorský studijní program Fyzická geografie a geoekologie na Katedře fyzické geografie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze. Specializuje se na využití GIS v hydrologii, na srážkoodtokové modelování a extrémní hydrologické jevy, zejména přívalové povodně.

RNDr. Hana Prchalová

VÚV TGM, v. v. i., Praha (Česká republika)
✉ hana.prchalova@vuv.cz
www.vuv.cz



RNDr. Hana Prchalová pracuje ve VÚV TGM, v. v. i., již více než 35 let. Vzděláním je hydrogeolog (Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze), většinu své profesní dráhy řeší ochranu podzemních vod. Od roku 1999 se zaměřila na implementaci evropských směrnic o vodě v ČR. Od roku 2002 se věnuje hlavně Rámcové směrnici o vodách a zpracování plánů povodí, postupně rozšířila svoje aktivity i na povrchové vody a problematiku emisí ve vodě. Jako členka několika mezinárodních skupin expertů se aktivně účastní vyjednávání a mezinárodní spolupráce, posledních více než deset let také pracovala v European Topic Centre on Inland, Coastal and Marine waters pro European Environmental Agency.

Ing. Petr Vyskoč

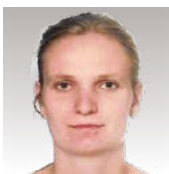
VÚV TGM, v. v. i., Praha (Česká republika)
✉ petr.vyskoc@vuv.cz
www.vuv.cz



Ing. Petr Vyskoč je zaměstnancem VÚV TGM, v. v. i., od roku 1989. V roce 1987 ukončil inženýrské studium na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze, obor Vodní hospodářství a vodní stavby. Dlouhodobě se zabývá problematikou informatiky ve vodním hospodářství, a to zejména v souvislosti s provozem a vývojem Hydroekologického informačního systému, plánováním v oblasti vod, vodohospodářskou bilancí a řešením vodohospodářských soustav.

Mgr. Silvie Semerádová

VÚV TGM, v. v. i., Praha (Česká republika)
✉ silvie.semeradova@vuv.cz
www.vuv.cz



Mgr. Silvie Semerádová vystudovala kartografii a geoinformatiku na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Od roku 2005 pracuje ve VÚV TGM, v. v. i., v oddělení Hydroekologického informačního systému, kde se podílí na správě a aktualizaci datových sad a na provozu a rozvoji systému. Od roku 2008 se zabývá problematikou Rámcové směrnice o vodách a reportingem datových sad do evropských systémů. Při přípravě podkladů pro reporting emisí do vodního prostředí vyvstala potřeba rozšířit datovou základnu, což vedlo k účasti na několika projektech zaměřených tímto směrem. Problematicou emisí se zabývá také jako externí expert při European Topic Centre on Biodiversity and Ecosystems pro European Environment Agency.



Rozhovor s Ing. Jiřím Jílkem, projektantem a stavitelem vodních staveb

Ing. Jiří Jílek patří k výrazným osobnostem českého vodního stavitelství. V průběhu své profesní dráhy navrhl, realizoval a dozoroval řadu vodohospodářských staveb, revitalizací vodních toků i městských vodních ploch, jako jsou například soustava jezírek v parku Stromovka, včetně unikátního voru na ostrov, vodní plocha na Letenské pláni, Branický vodní biotop, revitalizace požárních nádrží v Lysolajích, Radonicích a v Dolních Chabrech, první revitalizace Rokytky, Botiče, Říčanského, Motolského a Šáreckého potoka a aktuálně probíhající projekt využití dešťových a podzemních vod ze štol na Petříně. V rozhovoru mluví o zkušenostech z velkých staveb, významu praktické znalosti terénu, práci s kamenem i o tom, proč by vodní dílo mělo být nejen funkční, ale také citlivě zasazené do konkrétního místa.

Pane inženýre, zhruba před osmi lety jsem objevil vaše jezírko na Lysolajském potoce. Co vás k této krásné práci a vodě přivedlo?

Pocházím z východních Čech, konkrétně z Vysokého Mýta, a tam je nejstarší vodohospodářská škola v českých zemích. Byla založena roku 1897 a už v roce 1903 nesla název Zemědělsko-lukařská. Již tehdy měla u odborníků velmi dobrý zvuk, byli tam výborní profesori i skvělý kolektiv. Ačkoli jsem byl spíše technický, manuálně zručný typ a nebyl jsem žádný super student, ta škola byla fantastická a mohl jsem tam načerpat spoustu technických informací.

Takže bylo už tehdy jasné, že vaše cesta povede k vodě?

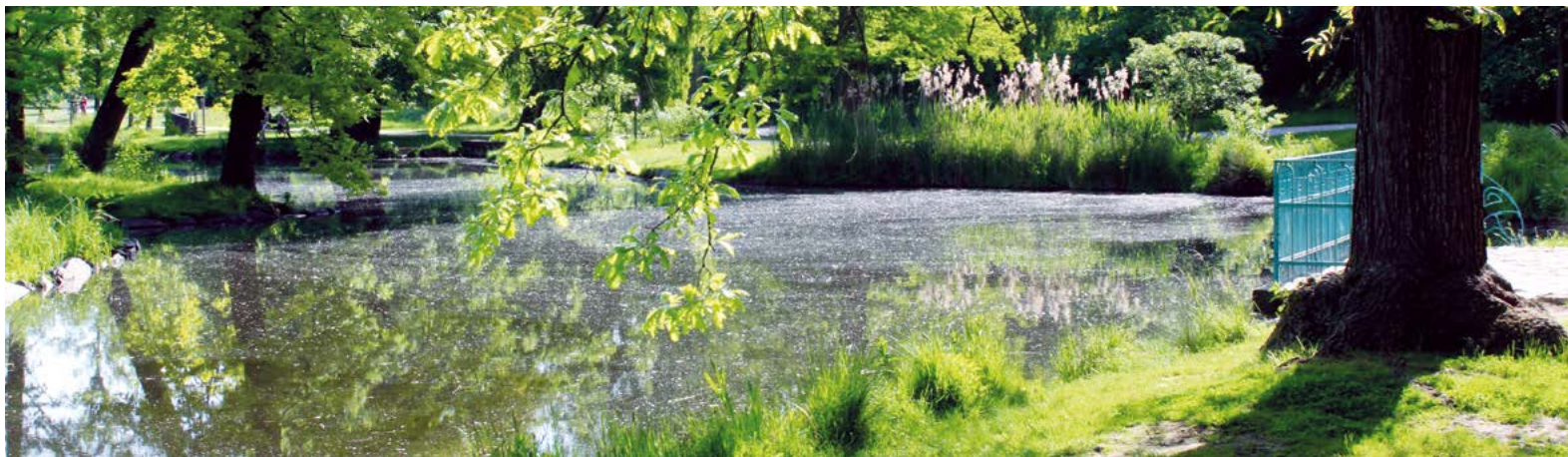
Po maturitě mě třídní učitel Jiří Muzikant přesvědčil, že musím ve studiu pokračovat, a tak jsem se přihlásil na Fakultu stavební ČVUT na obor Vodní stavby – vodní hospodářství, kde byli odborníci na jezy, přehrady a úpravy vodních toků. Díky tomu jsem se do oboru dostával stále hlouběji. Je to podle mě mimořádně zajímavá disciplína, která úzce souvisí se životem a fungováním civilizace.

Vždycky jsem byl trochu kreativnější typ a nemám rád, když se člověk schovává jen za normy a předepsané postupy. Normy jsou samozřejmě potřebné, ale každé místo i každá stavba jsou jiné a mělo by se k nim tak přistupovat.

Po fakultě byla volba zaměstnání jasná – nastoupil jsem do Hydroprojektu, což už tehdy byla obrovská firma, která měla pobočky u nás i na Slovensku a byly v ní prakticky všechny profese od architektů a strojařů až po geology. Právě tam jsem nasál mnoho zkušeností, které dnes už člověk často ani nemá kde získat.

To bylo v osmdesátých letech?

V roce 1974. Už tenkrát mě překvapilo, že když jsem jako mladý elév nastoupil do tak velkého podniku, byla tam mezi odborníky výrazná věková a generační mezera. Já byl čerstvý absolvent a kolem mě se pohybovali většinou padesátníci a starší. To tehdy nebylo běžné.



Obr. 1. Soustava vzájemně propojených vodních zdrží a atrakcí v parku Stromovka, obnovená po povodních z roku 2002. Kromě zdrží byla součástí projektu obnova koryt vodních toků, propustků a tůň, stejně jako výstavba nových mostů a chodníků přes vodu, pontonu kachny, voru na ostrov, brouzdaliště, ústředního vodotrysku a renovace fontány

Nejvíce mě zajímala takzvaná velká voda. Dostal jsem se do střediska, kde se dělaly různé typy vodohospodářských staveb – od úprav a revitalizací potoků až po jezy, elektrárny a přehrady.

Na jakém projektu jste tenkrát začínal?

Prakticky jako nejmladší jsem hned začal pracovat na přehradě Josefův důl, což je dnes významná vodárenská nádrž. Zpočátku jsem tam dělal de facto všechno. Tenkrát nebyly tak velké týmy jako dnes, taková stavba se připravovala doslova v několika lidech, samozřejmě pod dohledem zkušených specialistů. Nejenže jsem projektoval, ale také jsem vázal zprávy, cyklostyloval, kompletoval dokumentaci a dával všechno dohromady. Byl to velký termínový drill, ale pro mladého člověka mimořádná škola.

Občas jsem tam dokázal lidi překvapit trochu jiným přístupem. Například jsem kreslil výztuže zrcadlově, což nebylo úplně běžné. Když ale kolegové viděli technickou logiku toho řešení, velmi dobře to přijali.

V Hydroprojektu tehdy pracovali odborníci soustředění na konkrétní typ práce a bylo zjevné, že své profesi opravdu rozumějí. To považuji za velmi důležité. Dnes se často stává, že jeden člověk dělá téměř všechno, ale nemusí mít pro každou část dostatek zkušeností. A právě z nedostatku zkušeností pak někdy vznikají řešení, která nejsou úplně šťastná.

V Hydroprojektu jste zůstal ještě po roce 1989. Jak jste se pak dostal k vlastní projekční činnosti?

Byl jsem tam do roku 1992. Vždycky se říkalo, že lidi nejsou problém, že se seženu. Mám na to opačný názor. Myslím si, že důležité jsou právě lidé, kteří něco umějí. Do vedení se získat dají, ale najít ty, kteří to skutečně odpracují, je mnohem složitější.

Hodně se tehdy začalo mluvit o ekologii, tak jsme se s novými lidmi, které jsem si mohl vybrat, pustili do oblasti skládek. Bylo to v té době velmi aktuální téma. Ze západní Evropy se k nám dostávaly zcela nové těsnicí systémy, a dokonce se dělaly normy, jak by se skládky měly budovat a financovat – prostě celý ekosystém, know-how. Zde jsem v technických řešeních, výstavbě i posudcích působil relativně dlouhou dobu.

A od skládek jste se potom dostal k „velké vodě“?

Ano, protože po čase mi to začalo připadat trochu jednotvárné. Člověk musel lidem pořád vysvětlovat, že ne vždy se vyplatí skládku budovat. Každý si myslí, že je to velký byznys, ale ono záleží na konkrétních podmínkách.

Postupně mě to omrzelo. Mě baví kreativita, aby každá práce byla trochu jiná. A to revitalizace vodních toků umožňují. Mám raději složitější a netypická území, kde je potřeba opravdu přemýšlet, jak s prostorem pracovat.

Jelikož jsem měl vždy blízko ke staticce, mechanice zemin a geologii, dělal jsem zároveň různé sanace. Nejen sanace skládek, ale i sanace hrází, například tam, kde jimi prosakovala voda – v Praze třeba Černý Most, Nové Butovice nebo Čimice.

Z toho, co říkáte, jste zjevně stále velmi vytížený. Na kolika projektech v současnosti pracujete?

Poptávka je samozřejmě větší, než mohu v požadované kvalitě obsáhnout, už mám nějaký věk. Momentálně dělám asi na třech větších věcech.

A pak některé projekty zachraňujete...

Mimo to, že dělám dozor na svých i jiných stavbách, se snažím napravovat chyby, které u cizích projektů vidím, když mě objednatel nebo stavitel po neuspokojivém výsledku v zoufalství osloví. Někdy je to méně složité, jindy více.

Faktem je, že technická úroveň v některých relevantních oborech začíná slábnout. Chybějí lidé s hlubší praxí a zkušeností. Nejhorší odpověď pro mě je: „My jsme to vždycky dělali takhle.“ To je přístup, který nemám rád, protože každé řešení by mělo vycházet z konkrétního místa, konkrétní stavby a konkrétních podmínek. Nelze k tomu přistupovat paušálně.

Když vidím, že navržené řešení není šťastné, snažím se do projektu vstoupit a pomoci, jak nejlépe dovedu. Samozřejmě nikdo nemá patent na rozum, ale praxe je v tomto oboru velmi důležitá. V dnešní době už není mnoho aktivních lidí, kteří za sebou mají zkušenost s několika velkými přehradami a zároveň dlouholetou praxí se stavbami, dodavateli i subdodavateli.

Máte nějaký oblíbený projekt, který si stále pamatujete a kam se i po letech rád vracíte?

Nedávno jsem jel vlakem a při jeho zastávkách jsem si uvědomil, kde všude jsem něco dělal, protože těch staveb je šílené kvantum. Ale nejzajímavější se mi asi jeví Stromovka. Tenkrát jsem moc nevěřil, že tu zakázku v soutěži získám. Chtěl jsem to území zpustošené po povodni 2002 řešit přírodně. Daly se tam dobře zužtkovat jednoduché konstrukce s funkcí flexibility.

Malá říčka byla po povodni úplně zničená a já jsem nabídl, že bych to dal dohromady. Udělal jsem nový jez a kaskádový nátok z plavebního kanálu, lidé tam rádi chodí. Není to běžná konstrukce, žádné obdélníky, čtverečky, pravé úhly. Takto je to pro přírodu přijatelnější.



Obr. 2. Romantický vor na ostrov v jedné z mnoha nádrží v parku Stromovka musel být jako jedna z hlavních atrakcí dodatečně posílen pro provoz s dospělými osobami

Rozšířením vodních ploch v bývalém Rudolfově rybníku vznikly další výzvy se zapracováním hodnotných ploch. Významný strom ponechaný na ostrůvku si říkal o netradiční přístup, o návrh něčeho zajímavého, aby se tam lidé mohli dostat i jinak než přes lávku. Napadl mě vor na laně. Původně jej měly držet dvě velké loutky, ale ty nakonec neprošly a byly nahrazeny variantou se sloupy. Nejříve jsem totiž počítal s tím, že to bude víceméně hračka pro děti, ale pak jsem se dostal do problémů, protože takové věci musejí mít certifikace. Nakonec jsem tedy celý vor po dohodě s magistrátem posílil na vztlaku, protože na něm jezdili i dospělí, a dnes je to provozní zařízení.

Zmínil jste certifikace. Z vlastní zkušenosti vím, že jste v dobrém slova smyslu stará škola. Komplikuje vám dnešní přebyrokratizovaná doba vodohospodářský život a stavební proces jako takový? Trvá dnes déle něco postavit než před třiceti, čtyřiceti lety?

Bohužel ano. Všechno chceme zařadit do jakýchsi škatulek, ale tudy cesta podle mě nevede. Je to jakási unifikace, která je pak ve finále na škodu věci. Dá se to poznat i z historie, co stavěly předchozí civilizace. Na to žádné šablony nebyly, vždy šlo o originální řešení. Stavěly to týmy lidí, kteří byli ve svém oboru profesionálové. Dnes se bohužel ta profesionalita trochu ztrácí. Specializace dodavatelských firem na jednotlivé druhy staveb již prakticky není, a to se projevuje i v dílech samých.

K tomu se přidává sešňěrování normami a předpisy, které prostor pro vlastní úvahu ještě více zužují. Stavitelé pak někdy fungují spíše jako skládači předem daných dílků a chybí jim kreativita.

Souvisí to podle vás i se způsobem, jakým se dnes technici připravují na praxi?

Velký problém vidím v tom, že se v projektech často nezohledňují všechny podmínky, které je potřeba znát. Investor samozřejmě není vždy schopen přesně postihnout všechno, co má od projektanta chtít. Projektant by se ale neměl jen ptát, co tam má být, nýbrž sám aktivně přemýšlet, co je pro dané místo a stavbu důležité, a promítnout to do projektu.

Není dobré se později vymlouvat, že něco nešlo, že to investor chtěl nebo nechtěl, případně že jsme o něčem nevěděli. Takový přístup je špatný. A souvisí s tím i podoba dokumentace. Často v ní popisujeme spoustu věcí velmi podrobně, ale ne vždy s reálným užitekem. Vyplňuje se mnoho položek, které mají spíše administrativní než skutečně technický význam.

Máte nějaký osvědčený tým spolupracovníků? Viděl jsem na vašich stavbách bagristu, který byl schopen posadit kámen přesně tam, kam jste potřeboval, a práce mu šla neskutečně od ruky.

Dodavatelů je samozřejmě spousta, ale ne každý má takové zázemí strojníků, techniků a dělníků, kteří jsou ve své profesi špičkoví. Naštěstí se ještě vyskytují lidé, kteří jsou opravdu mimořádně kreativní, šikovní a nechají si poradit. S takovými lidmi se mi spolupracuje dobře – dá se s nimi mluvit, vědí hned, o co jde, co po nich chci a proč se to má dělat. A je jedno, jestli jsou to Češi, Ukrajinci nebo kdokoli jiný. Na stavbách potkáváte různé profese. Jsou mezi nimi třeba i inženýři, kteří se nakonec vrhli na práci s těžkou technikou a dělají ji výborně, protože je to pro ně zajímavější než sedět celý život za prknem.

Setkal jste se při výstavbě vodních děl s nějakými vysloveně technickými obtížemi? Dá se vůbec vše dopředu predikovat?

Že by se dalo vše stoprocentně predikovat, to ani nejde. I když máte dokonalý geologický průzkum, stále jde do určité míry o bodové informace, jež se potom aplikují na širší okolí. K těm chybám tedy může vzácně dojít. Jednou jsem měl výraznější problém, když do syrové stavby přišla povodeň, proti čemuž se nedá více méně bránit. Ale i s tím by měl projektant do určité míry počítat a upozornit dodavatele, kde je nebezpečnost z hlediska povodňové výšky.

V mém případě šlo o speciální jímku na Labi u Opatovické elektrárny a povodeň nám tenkrát rozpracovanou část stavby prakticky rozebrala. Ale i na to se můžete dopředu pojistit a raději počítat s jistou většou rezervou.

Existuje podle vás nějaký obecný postup, jak navrhnout dobrou revitalizaci? Víám vás například, že rád používáte v opevnění lomový kámen, například čedič.

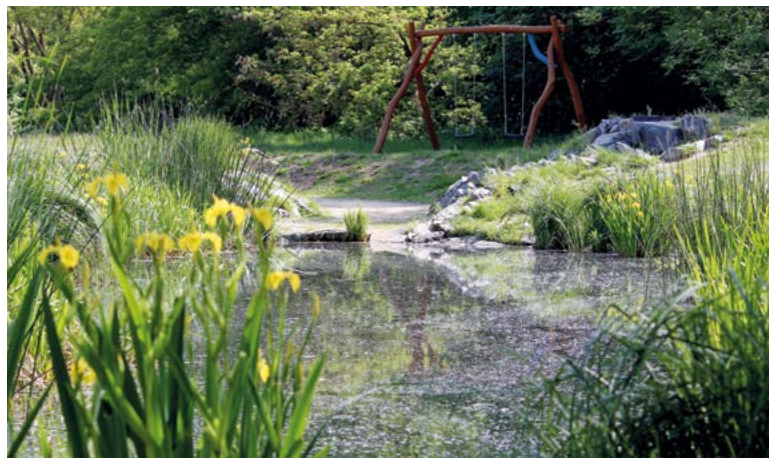
Podle mě je nejdříve důležité dobře znát prostor, ve kterém má revitalizace vzniknout. Nestačí vědět jen rozlohu pozemku. Člověk musí místo navnímat a teprve potom přemýšlet, co s územím a potokem udělat, aby řešení bylo funkční, zajímavé a zároveň přirozeně zapadlo do okolí.

Nemám rád, když se revitalizace omezí jen na několik pravidelných „vlnek“ v korytě, nebo když vznikne přímé lichoběžníkové koryto či rybník ve tvaru obdélníku. I to se bohužel někdy při revitalizacích děje, ale z mého pohledu to většinou nepůsobí dobře. Stavba se musí přizpůsobit prostředí, do kterého je zasazena.

Příkladem může být revitalizace návesního rybníka na Točné v Praze 12, na níž teď pracuji. Chtěl jsem, aby z toho nebyl jen běžný rybník. Použil jsem čedič i na chodníky, vznikl tam zajímavě řešený břeh a celé je to trochu netypické. Když jsme se tam sešli asi ve dvaceti lidech, včetně ředitelky z PVK, dostal jsem ústní pochvalu (*směje se*). To mě opravdu potěšilo, protože většinou lidé takové věci přejdou a ani si jich nevšimnou.



Obr. 3. Vodní nádrž v západní části parku na Letné (návrh), realizace nátoky s kaskádou pod kovanou mříží s rotací nátoky vody do jezera vyznačujícího se celoročně nadprůměrně čistou vodou



Obr. 4. Vodní biotop Braník, netypicky napájený podzemní vodou, vznikl na jaře 2023 nejen jako krajinný prvek na zelené louce, ale ve spojení s naučnou minizetzkou i jako součást environmentálního vzdělávání Pražanů; dnes hostí stovky skokanů zelených, čolky obecné, užovky obojkové a na 27 druhů vodních a mokřadních rostlin



Obr. 5. Revitalizace požární nádrže na Lysolajském potoce a horní části jeho koryta pod jedním z nejvydatnějších pramenů v Praze – tzv. Zázračnou studánkou, z níž je dnes rekreační biotop napájen a řadí se tak k nejchladnějším vodním nádržím v Praze



Obr. 6. Přípravovaná komplexní revitalizace dnes vyschlé vodní nádrže v nuselském parku Jezerka, včetně vyvedení vody do korytka a přemostění části přítoku pod piazzettou stejnojmenného divadla. Součástí projektu bude i podzemní akumulační nádrž s retardační funkcí, umožňující zásobovat vodní prvky dešťovou vodou ze střech divadla i v bezsrážkovém období

Vím, že jste si pro Branický vodní biotop osobně vybral v lomu speciální kámen tak, aby na první pohled upoutal pozornost. Je pro vás výběr materiálu hodně důležitý?

To byl pro změnu rohovec. Když se kámen v lomu odstělí, podle struktury konkrétní horniny může vzniknout velmi zajímavý a originální tvar, který by měl být pro danou lokalitu následně použit. Proto často říkám dodavatelům, když jedou pro kameny, ať si je nenechávají někým jen tak naložit, ale že se nejprve dohodneme, odkud co brát, aby se nám do projektu hodily, případně konkrétní kámen osobně vybereme. Už předem musíme myslet na to, jak kameny vyskládat, jak budou lícovat a na první pohled vypadat, jak budou barevně ladit s daným místem. Do určité míry jde samozřejmě i o můj estetický pocit.

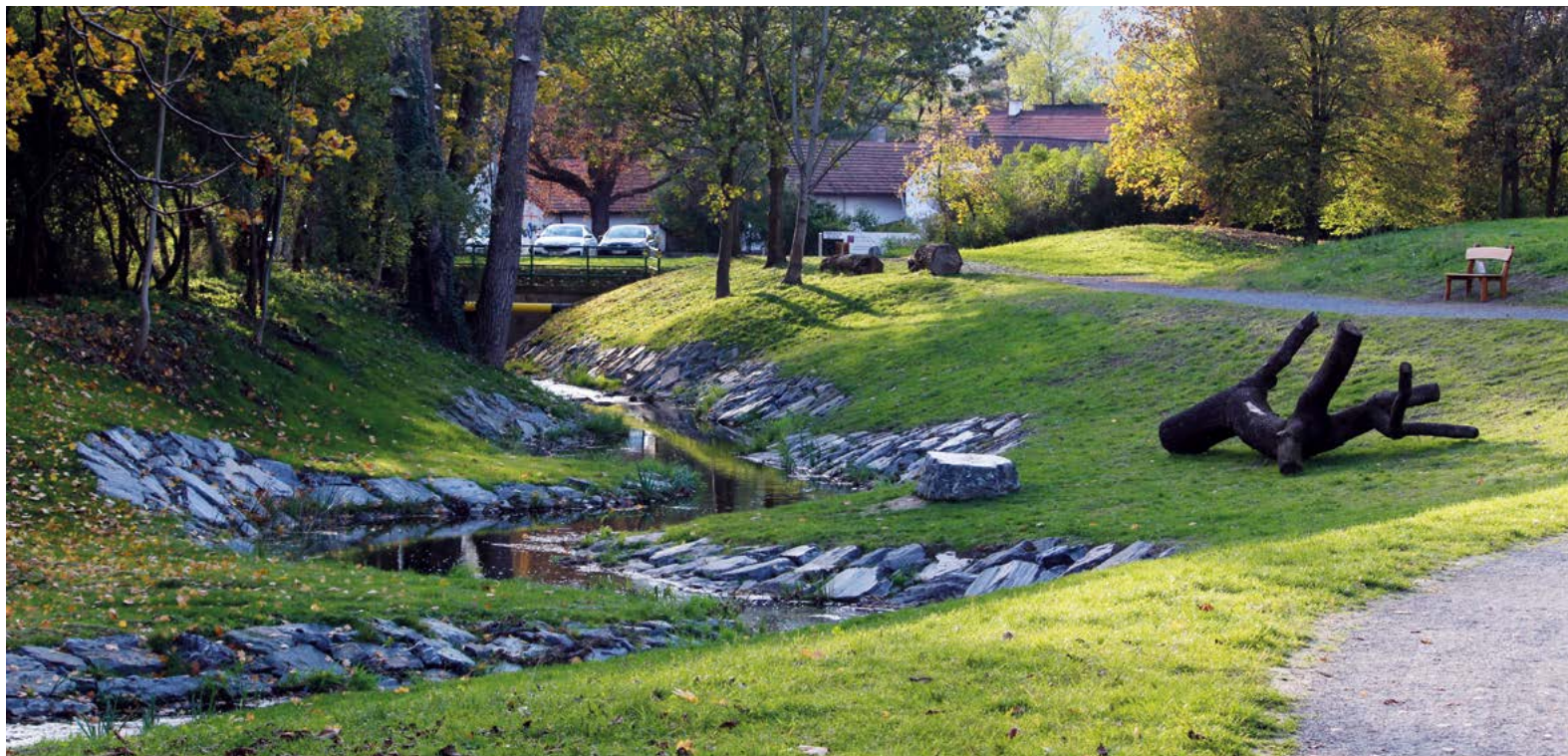
Není účelem, aby vodohospodář násilně přeměňoval celé území. Měla by se měnit jen ta část, kde se řeší samotné vodní dílo. Možnosti kamenů a hornin jsou jistě větší, ale z hlediska jemných nuancí povrchů a lícování je čedič nebo rohovec skvělý. Žula není špatná, ale není tak zajímavá, dost se u ní liší zrnitost a barevnost, a hlavně má jinou, takovou ostrou odlučnost, štípe se po rovinách a já prostě nejsem přítelem kostiček.

Jak vidíte budoucnost vodního stavitelství? Říkal jste, že už při vašem nástupu do Hydroprojektu byla v oboru velká generační mezera. Vidíte dnes své nástupce?

Bohužel, historie se opakuje, opět dochází k věkové propasti. Nejsou tu žádné zástupy techniků, kteří by uměli plynule navázat na naši práci. Nehledě na to, že do technických škol už se moc lidí nehlásí, protože bývají náročné. Problém spočívá v tom, že spousta středních technických škol je dnes sice zakončena maturitou, ale zároveň mizí učební obory, které dávaly lidem praktickou zručnost. A ta je pro vodní stavitelství velmi důležitá.

Co vám vodařina dala a co vzala?

Je to práce, která mě opravdu baví, což asi nemůže říct každý. Spousta lidí chodí do práce, aby byli zaměstnaní a vydělávali peníze. A pak se to na jejich výkonu podepisuje. Technici a lidi od vody si už za komunistů dobře rozuměli, politika v tom nehrála žádnou roli. A hlavně rozuměli řemeslu. K vodě se prostě nedá přistupovat povrchně.



Obr. 7. Magistrální revitalizace dolní části Kunratického potoka v Braníku v parku Za mlýnem (dozor stavby) ve spolupráci s Městskou částí Praha 4; součástí velkorysé revitalizace je i práce s pohledovými kameny a mrtvým dřevem

Také se mi nelíbí, když někdo propaguje: máte málo peněz, tak běžte do jiného zaměstnání. Kde se chceme naučit dokonalosti, když budeme pořád měnit zaměstnání jenom za cenu vyššího platu? Tak se dokonalosti v daném oboru nikdy nedobereme. Je fakt, že peníze nejsou úplně všechno, jen se na ně bohužel všechno měří.

A co mi voda vzala? Čas, hlavně čas, jsem obětí termínů...

Zastavme se ještě u aktuálního projektu revitalizace jezírka v parku Jezerka. Těšíte se na tuto práci, nebo máte spíše obavy z možných komplikací?

Myslím, že to dopadne dobře. Když se ohlédnu zpět, většina věcí, které jsem dělal, byla okolím vnímána pozitivně, a věřím, že i Jezerce revitalizace prospěje.

Šel jsem do toho právě proto, že nejde o úplně běžnou činnost. Není to jen koryto, cesta nebo samostatný technický objekt. Jde o práci s povrchovou i podzemní vodou, s parkovým prostorem a s celkovým charakterem místa. Když se to podaří dobře propojit, může vzniknout smysluplný celek, který zvýší hodnotu celého území s vazbou na divadlo, restauraci a pobytový prostor parku.

Samozřejmě bude záležet na výsledném provedení. U takových staveb je podle mě důležité, aby technické řešení, práce s vodou i estetická stránka působily dohromady přirozeně. Věřím, že se to na Jezerce podaří.

A když zrovna nejste u vody nebo na stavbě, čemu se věnujete?

Mám rád pohyb i práci rukama. Dlouho jsem hrál volejbal, dnes mě baví lyžování, i když už si musím dávat větší pozor. Od mládí mám také blízko ke dřevu, kovářskému řemeslu, sochaření a malování. Na chalupě jsem si opravil a vybudoval převážnou část objektu sám s pomocí přítelkyně. Stejně řeším i výběr doplňků. Dělat schody, podlahy či obklady mi nečiní problém.

Myslím, že i toto člověku v projektování a ve stavební praxi pomáhá. Když má reálnou zkušenost s materiálem a s tím, jak se konstrukce skutečně dělají,

lépe si představí, co lze navrhnout a co je jen hezká myšlenka na papíře, která se bude v praxi obtížně realizovat.

Moc děkuji za rozhovor a přeji mnoho dalších originálních výzev a projektů.

RNDr. Tomáš Hrdinka, Ph.D.

Ing. Jiří Jílek

Ing. Jiří Jílek se narodil 6. dubna 1950 ve Vysokém Mýtě. Po absolvování Střední průmyslové školy stavební ve Vysokém Mýtě pokračoval ve studiu na Českém vysokém učení technickém v Praze, obor Vodní stavby – vodní hospodářství. V roce 1974 nastoupil do firmy Hydroprojekt Praha, kde působil do roku 1992. V témže roce si založil koncesovanou živnost na projektovou činnost Hydro-Natur a následně i vlastní projekční kancelář Ekotechnik-Inženýring, s. r. o. Je autorem více než 300 nových vodohospodářských a ekologických staveb, řešil opravy a případné sanace starých staveb či nápravy cizích projektů s realizací po celém Česku a Slovensku. V posledních letech pracuje především v Praze a jejím okolí. Kromě projektování se aktivně účastní i samotných realizací a působí jako stavební dozor. Jeho osobní zálibou je práce se dřevem, jakákoliv ruční práce, umění, cestování, historie stavitelství a od roku 2000 i chalupaření. Do 65 let hrál aktivně volejbal, dodnes se věnuje lyžování. Žije v Praze na Chodově, je vdovec a má tři děti.





Obr. 8. Revitalizace středního toku Rokytky a Svěpravického potoka v nivě suchého poldru Čihadla, včetně zřízení průtočných tůní na podporu biodiverzity ve vodním a mokřadním prostředí



VTEI/2026/4

Od roku 1959

**VODOHOSPODÁŘSKÉ
TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE
WATER MANAGEMENT
TECHNICAL AND ECONOMICAL INFORMATION**

Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti vodního hospodářství.
Je uveden v Seznamu recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v ČR.
VTEI je součástí databází Scopus a DOAJ.

Ročník 68

Vydává: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka,
veřejná výzkumná instituce, Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6

Redakční rada:

Ing. Libor Ansorge, Ph.D., RNDr. Jan Daňhelka, Ph.D., doc. Ing. Michaela Danáčová, Ph.D.,
doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur, prof. Ing. Silvie Heviánková, Ph.D., Mgr. Róbert Chriateľ,
Mgr. Vít Kodeš, Ph.D., Ing. Jiří Kučera, PharmD. Markéta Marvanová, Ph.D., BCGP, BCPP, FASCP,
prof. Juraj Parajka, Ing. Martin Pavel, Ing. Jana Poárová, Ph.D., Mgr. Martin Pták,
Mgr. Hana Sezimová, Ph.D., Dr. Ing. Antonín Tůma, Mgr. Lukáš Záruba, Ing. Marcela Zrubková, Ph.D.

Vědecká rada:

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D., prof. RNDr. Bohumír Janský, CSc.,
prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., RNDr. Petr Kubala, Ing. Tomáš Mičaník, Ph.D.,
Ing. Michael Trnka, CSc., Dr. rer. nat. Slavomír Vosika

Šéfredaktor:

Ing. Josef Nistler (josef.nistler@vuv.cz)

Odborné redaktorky:

Mgr. Zuzana Řehořová (zuzana.rehoro@vuv.cz)
Mgr. Hana Beránková (web) (hana.berankova@vuv.cz)

Zdroje fotografií tohoto čísla:

VÚV TGM, 123RF.com, doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D., RNDr. Tomáš Hrdinka, Ph.D.,
Mgr. Zuzana Řehořová, Milan Blšťák

Grafická úprava, sazba, tisk:

ABALON s.r.o., www.abalon.cz

Náklad 400 ks. Časopis VTEI vychází od roku 2022 v anglické mutaci,
která je k dispozici na <https://www.vtei.cz/en/>

Příští číslo časopisu vyjde v říjnu. Pokyny autorům časopisu jsou uvedeny na www.vtei.cz

CC BY-NC 4.0
ISSN 0322-8916
ISSN 1805-6555 (on-line)
MK ČR E 6365



VTEI.cz



CHYBA PAVOUKEM

Mám moc rád krajinu a přírodu Českého středohoří a speciálně oblast okolo Sloupu v Čechách. Nebo ještě výše položenou chráněnou krajinnou oblast Lužické hory. To jsou místa, kam se fotograf může vydat s vědomím, že pravděpodobně celý den nepotká člověka. Zvláště ráno jsou louky mokré od rosy a slunce je ještě nízko, takže kapky nestačí vysušit. Tenkrát se léto blížilo ke konci a nastávalo to právě „babí léto“, jež je zákonitě plné poletujících vláken a pavučin pokrytých rosou – ráj pro makrofotografii. Tato pavučina však byla na první pohled zvláštní a právě její asymetrie mě zaujala. Při nastavování fotoaparátu a hledání vhodného úhlu jsem o tom dlouze přemýšlel – co asi pavoučka tak vykolejilo, že vyrobil takovou zvláštnost? Sám jsem měl za sebou dlouhou noc s kamarády, s dobrým jídlem a pitím, tak možná slyšel z dálky náš zpěv a kytary a do rána slavil s námi. Proto jsem se ani nedivil, že mu to prostě trochu „ujelo“. :-)

Text a fotografii dodal Milan Blšták, www.macro4you.cz

**VÝZKUMNÝ ÚSTAV
VODOHOSPODÁŘSKÝ
T.G. MASARYKA**

veřejná výzkumná instituce

VTEI.cz