

VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE

VTEI / 2026 / 3

- 4 / Druhové složení enterokoků v pitných vodách a možnosti jejich detekce
- 10 / Rekonstrukce povodně z července roku 1903 v povodí Opavy pomocí GIS a hydrologických modelů
- 28 / Metodika adaptivního řízení vodních nádrží během hydrologického sucha

Psali jsme před 60 lety

Níže uvedený článek „Pitná voda ze splašků“ vyšel ve VTEI č. 5 v roce 1966. Jde o doslovný přepis původního textu.

Název vypadá senzačně, ale jde jen o nahrazení dosavadního nepřímého způsobu znovu používání vody způsobem přímým. Odborníci ministerstva zdravotnictví, školství a sociální péče v USA usoudili, že městské odpadní vody, vyčištěné dosud běžným způsobem, obsahují 35krát méně solí než mořská voda, která je ostatně levně k dispozici pouze na pobřeží.

Proto se v městečku Lebanon, Ohio (7 000 obyv.) provádějí poloprovozní pokusy se získáváním pitné vody ze splašků. Investiční náklad na pokusné zařízení činil

150 000 dolarů. Část denního průtoku asi 4 000 m³ vyčištěných splašků se dále upravuje křemelinovou filtrací, adsorpcí na aktivním uhlí a elektrodialýzou. Ačkoliv takto upravená voda má jakost vody pitné, vypouští se nadále do řeky. Prakticky se má tento proces uplatnit až v některém větším městě, které trpí nedostatkem pitné vody a v němž by bylo možno takto upravovat asi 40 000 m³/den. Pro takový případ se náklady na výrobu pitné vody ze splašků odhadují na 0,106 dolarů/m³. Náklady na opatřování pitné vody z dosud obvyklých zdrojů činí v USA asi 0,04 dolarů/m³.

Z archivu VÚV TGM

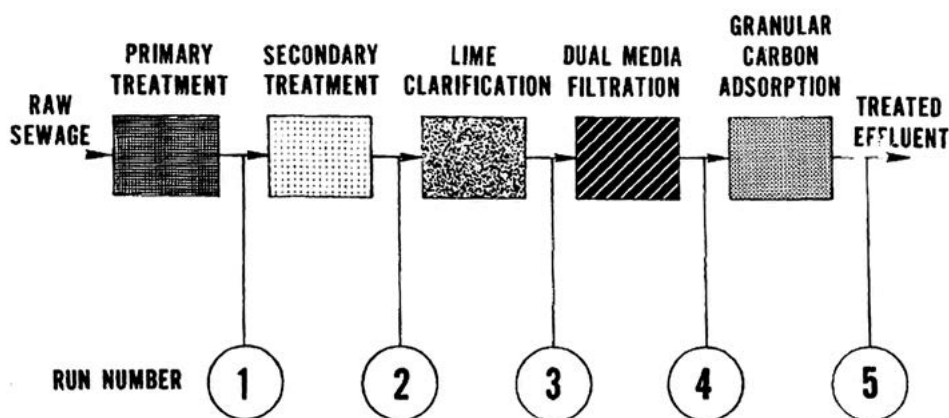


FIGURE 12
SCHEMATIC DIAGRAM OF WASTE STREAMS
LEBANON, OHIO

Obsah



3 Úvod

4 Druhové složení enterokoků v pitných vodách a možnosti jejich detekce

Dana Baudišová, Karel Kolář

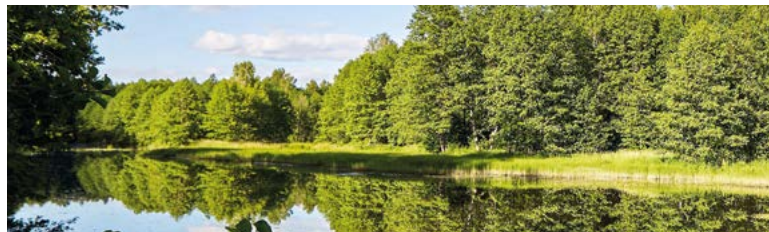


10 Rekonstrukce povodně z července roku 1903 v povodí Opavy pomocí GIS a hydrologických modelů

Jan Unucka, Martin Adamec, Olga Halášová, Tereza Holáňová, Kateřina Jurajdová Šťastná, Pavel Lipina, Irena Moravcová, Miloslav Müller, Irena Pavlíková, Petra Šutarová, Alexandra Trličíková, Matěj Wagner

20 Marketing vs. realita: využití baterie biotestů pro hodnocení akutní toxicity ekologicky šetrných detergentů

Pavla Kovaláková



28 Metodika adaptivního řízení vodních nádrží během hydrologického sucha

Pavel Fošumpaur, Tereza Kováčová



36 Systémy zachycování dešťové vody a hospodaření s povodňovými vodami ve venkovských oblastech: systematický přehled

Imane Belkaf, Mustapha Hasnaoui

48 Odhad změn návrhových srážek ve vybraných nepozorovaných lokalitách pomocí geostatistického modelu regionální frekvenční analýzy s využitím klimatických projekcí

Ivana Strnadová, Filip Strnad, Damián Heczko, Martin Hanel

60 Mikroplasty ve vodách: první akreditovaná laboratoř v České republice ve VÚV TGM

Barbora Loskotová, Marek Polášek, Michal Straka, Roman Jurnečka, Denisa Němejcová

64 XXVIII. konference Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství

Barbora Sedlářová



Vážení čtenáři,

červnové číslo VTEI vychází v období, kdy se voda dostává do středu pozornosti hned z několika úhlů – od krajiny a sucha až po velké říční systémy, které propojují státy, obory i instituce. A právě k červnu se vážou dvě významná data, jež stojí za krátké zastavení.

Tím prvním je Světový den boje proti suchu a rozšiřování pouští (17. června), jenž má pro vodohospodářskou praxi velmi konkrétní význam. Připomíná, že sucho není pouhá epizoda horkého léta, ale i dlouhodobý tlak na vodní zdroje, půdu a ekosystémy. A že skutečná odolnost vzniká kombinací opatření od práce s půdní vlhkostí a retencí v krajině přes chytré řízení nádrží až po realistické plánování odběrů a minimálních průtoků.

Tím druhým je Den Dunaje (29. června), tradiční oslava jedné z největších evropských řek. Dunaj v sobě nese silný symbol spolupráce napříč hranicemi i obory a současně je důkazem, že vodní režim a kvalita vody se v praxi nikdy „neřeší izolovaně“. Co se děje v povodí, se dříve či později projeví níže po toku, což platí stejně pro srážky, sucho, znečištění i adaptační opatření.

A právě o propojování souvislostí od detailů po širší rámec je i naše červnové číslo VTEI. V odborné části přinášíme pestrou sadu článků pokrývajících jakost vody, historii extrémních hydrologických jevů, ekotoxikologii, řízení vodních nádrží i dopady klimatické změny.

Začínáme velmi praktickým tématem z oblasti pitné vody. Článek Dany Baudišové (SZÚ) a Karla Koláře (PVK) se věnuje druhovému složení enterokoků v pitných vodách a možnostem jejich detekce. Text jde „k jádru“ toho, co v nové legislativě představuje jeden z klíčových mikrobiologických indikátorů, a zároveň střízlivě hodnotí vhodnost různých metod stanovení a riziko falešných výsledků.

Následuje příspěvek Jana Unucky a kol. (ČHMÚ), který přináší rekonstrukci povodně z července 1903 v povodí Opavy s využitím GIS a hydrologických modelů. Je to hezký příklad práce s nesourodou směsí historických podkladů od povodňových značek a dobových map až po kroniky a svědectví a také hledání cest, jak je ověřovat a smysluplně kombinovat pro dnešní interpretaci.

Třetí odborný článek Pavly Kovalákové (VÚV TGM) nese výmluvný titul „Marketing vs. realita“ a zaměřuje se na akutní toxicitu ekologicky šetrných detergentů měřenou pomocí biotestů. Závěry připomínají, že označení „EKO“ nemusí samo o sobě automaticky znamenat nižší akutní toxicitu finální směsi a že experimentální ověření má v hodnocení reálných dopadů nezastupitelné místo.

Velmi aktuální je také článek Pavla Fošumpaura a Terezy Kováčové (ČVUT), který představuje metodiku adaptivního řízení vodních nádrží během hydrologického sucha. Důraz je kladen na kombinaci modelování, klimatických scénářů a optimalizaci dispečerských postupů tak, aby bylo možné pružně reagovat na vývoj sucha a současně minimalizovat riziko poruch dodávek vody i nepříznivých dopadů na její kvalitu.

Zahraniční odborný příspěvek paní Imane Belkaf přináší systematický přehled k tématu zachycování dešťové vody a hospodaření s povodňovými vodami ve venkovských oblastech. Text shrnuje poznatky z posledních let a ukazuje, jak důležité je navrhovat systémy podle místních podmínek; současně nezaměňuje praktické bariéry, jež rozhodují o dlouhodobé funkčnosti.

Odbornou část červnového čísla uzavírá článek Ivany Strnadové a kol. (ČZU), který se věnuje odhadům změn návrhových srážek ve vybraných nepozorovaných lokalitách s využitím geostatistického modelu regionální frekvenční analýzy a klimatických projekcí. Přináší důležité kvantifikace i pohled na nejistoty – tedy přesně to, co je pro zodpovědné navrhování a dlouhou životnost infrastruktury klíčové.

V informativní části pak upozorňujeme na téma, jež v posledních letech získává mimořádnou pozornost: mikroplasty ve vodním prostředí. Článek Barbory Loskotové a kol. (VÚV TGM) představuje související kontext i významný milník – první akreditovanou laboratoř pro mikroplasty v ČR ve VÚV TGM.

Číslo uzavírá krátká reportáž Barbory Sedlářové z XXVIII. konference „Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství“, která se uskutečnila v dubnu 2026 v Českých Budějovicích a nabídla přehled aktuálních témat z oblasti monitoringu, legislativy i výzkumu radionuklidů ve vodním hospodářství.

Děkujeme autorům za kvalitní texty, recenzentům za jejich čas a odbornou pečlivost a čtenářům za přízeň i zpětnou vazbu, která nám pomáhá VTEI dále rozvíjet. Přejeme inspirativní čtení a klidné léto u vody, jíž bude v krajině i v našich nádržích pokud možno „tak akorát“.

Za redakci VTEI
Ing. Josef Nistler

Druhové složení enterokoků v pitných vodách a možnosti jejich detekce

DANA BAUDIŠOVÁ, KAREL KOLÁŘ

Klíčová slova: intestinální enterokoky – pitná voda – druhové složení – citlivost k volnému chloru

ABSTRAKT

Intestinální enterokoky jsou v „nové“ legislativě pitné vody jedním ze dvou klíčových mikrobiologických indikátorů, které by měly ukazovat na fekální znečištění. Musejí se stanovovat vždy, a to i v kráceném či orientačním rozboru pitné vody. Celkem bylo z provozních vzorků upravených, tj. pitných vod (nikoli však z neupravovaných studen a vrtů, u nichž se předpokládá vyšší riziko fekálního znečištění) vyšetřeno 134 kmenů enterokoků (*Enterococcus* spp.) a 93 kmenů, které byly identifikovány jako doprovodná mikroflóra, resp. potenciálně falešně pozitivní kmeny. Nejčastěji zachyceným druhem enterokoka byl *E. casseliflavus* (31 %), následovaný *E. faecium* (25 %). Absolutně nejčastějším druhem, který nepatří mezi intestinální enterokoky, byl shledán *Aerococcus viridans* (n = 80), a to ještě zdaleka ne všechny získané kmeny přežily první pasáž. Nejmenší citlivost (tj. největší rezistence) k volnému chloru byla zjištěna u druhu *E. hirae* a také u již zmiňovaného *A. viridans*. Všechny kmeny byly dále testovány na konfirmačním žluč-eskulin-azidovém agaru (ŽEA test) po dvou, čtyřech a 24 hodinách inkubace a na aktivitu β -D-glukosidázy (GLD) v selektivním prostředí (médiu Enterolert DW, IDEXX). Falešně negativní ŽEA test po dvou hodinách inkubace byl zaznamenán u 10 % enterokoků, falešně negativní výsledek u testů na GLD vykazovalo pouze 1 % kmenů enterokoků, ale dalších sedm kmenů (5,3 %) vykazovalo reakci slabou. Falešně pozitivní ŽEA test po dvou hodinách inkubace byl zaznamenán u 8 % kmenů doprovodné mikroflóry, falešně pozitivní test na GLD vykazovalo 14 % kmenů. Metoda dle normy ČSN EN ISO 7899-2 plně vyhovuje na stanovení intestinálních enterokoků v pitných vodách. Použití alternativních metod založených na detekci aktivity enzymu β -D-glukosidázy není zcela vhodné, protože se rozšiřuje skupina „intestinálních enterokoků“ na celý rod *Enterococcus* spp., a nález tak nemusí jednoznačně ukazovat na fekální znečištění.

ÚVOD

Stanovení intestinálních enterokoků se zdá být na první pohled jednoduché, ale i tak má svoje úskalí. Na jedné straně jsou intestinální enterokoky v „nové“ legislativě pitné vody jedním ze dvou klíčových mikrobiologických ukazatelů, které by měly ukazovat na fekální znečištění s nejvyšší mezní hodnotou (NMH), na druhé straně se o svoje „práva“ hlásí alternativní metody založené na detekci enterokoků na základě aktivity β -D-glukosidázy, kdy se cílová skupina rozšiřuje na všechny druhy enterokoků, tj. *Enterococcus* spp. O ekologii enterokoků zejména v pitných vodách se zatím ví velmi málo, což komplikuje interpretaci dosažených výsledků. Proto byla provedena tato studie a výsledky byly prezentovány na konferenci *Vodárenská biologie 2025* [1]. Zde je publikována upravená a doplněná verze.

PŘEHLED PROBLEMATIKY

Intestinální (střevní) enterokoky jsou grampozitivní kulovité nebo vejčité bakterie uspořádané do párů nebo řetězků a patří do rodu *Enterococcus* (řád Lactobacillales, kmen Firmicutes). Díky molekulárně genetickým metodám v taxonomii se počet popsanych druhů enterokoků neustále zvyšuje, např. v roce 1995 bylo známo jen 19 druhů, v současné době je platně popsáno 60 druhů [2]. Díky již celkem rozšířené metodě MALDI-TOF lze jednotlivé druhy identifikovat a pokusit se podrobněji interpretovat získané výsledky. Např. ze 101 izolátů z různých povrchových, technologických a pitných vod byly identifikovány druhy *E. faecalis* (26,7 %), *E. hirae* 20,8 %, *E. faecium* (18,8 %), *E. casseliflavus* (15,8 %), *E. durans* (11,8 %), *E. mundtii* a *E. moraviensis* (oba 2,3 %) [3].

Intestinální enterokoky jsou považovány za indikátory fekálního znečištění a jejich význam se v posledních letech zvýšil – podle nové legislativy [4, 5] jde společně s *Escherichia coli* o klíčový ukazatel a musí se stanovovat v každém typu rozboru (kráceném i úplném). S tím souvisí nejen vyšší počet analyzovaných vzorků, ale i počet pozitivních záchytů, které je třeba dobře interpretovat.

Frekvence záchytu v pitných vodách za posledních pět let v České republice (ČR) dle dat SZÚ (Zpráva o kvalitě pitné vody) [6] jsou uvedeny v *tab. 1*. V současné době se enterokoky stanovují i v rámci kráceného rozboru pitné vody, počet analýz, a tudíž i počet pozitivních záchytů tak stoupá (v *tab. 1* je vidět především výrazný rozdíl mezi lety 2023 a 2024). Vyšší počty zachycených enterokoků souvisejí zejména s vyšším počtem provedených testů. Jelikož se však stále jedná o relativně malá čísla, bude dobré tuto situaci nadále sledovat.

Oborné literatury na téma intestinálních enterokoků je opravdu mnoho, jde však převážně o studie popisující, odkud (z jakého zdroje) byly konkrétní druhy izolovány, nebo o popis a charakteristiku nových druhů. Pokud existují environmentální studie, jsou zaměřeny především na povrchové a koupací vody a dále na kaly či sedimenty. Výzkumy zabývající se hlubším průzkumem enterokoků izolovaných z pitných vod chybějí. Přestože tedy existuje řada studií [7, 8] na téma „kdo, kdy a odkud izoloval jakého enterokoka“, o vlastní ekologii se mnoho neví – a to zejména v souvislosti s pitnou vodou, úpravou pitné vody, přežíváním/množením se v biofilmech apod.

I když se všechny běžně identifikované druhy enterokoků vyskytují ve střevě člověka či teplokrevných živočichů, jsou vyčleněny druhy typicky fekální (*E. faecium*, *E. faecalis*, *E. hirae*, *E. durans*) a pak druhy, které bývají spojovány s možným pomnožením na rostlinném materiálu (*E. mundtii*, *E. casseliflavus*) [3]. Enterokoky jsou také často používaným ukazatelem při trasování mikrobiálního znečištění (Microbial Source Tracking – MST) a jsou popsány různé způsoby jejich eliminace z vodního prostředí. Také jsou považovány za významné přenašeče antibiotické rezistence (vankomycin, ampicilin). V prostředí se často vyskytují v nevirulentní formě VBNC (Viable But Not Culturable) kmenů.

Tab. 1. Záchyt intestinálních enterokoků v pitných vodách v ČR (kategorie: > 5 000 zásobovaných obyvatel, < 5 000 zásobovaných obyvatel, celkový počet analyzovaných vzorků, počet pozitivních vzorků, aritmetický průměr ze všech výsledků a maximální hodnota) v letech 2020–2024 (KTJ = kolonie tvořící jednotky)

Tab. 1. Detection of intestinal enterococci in drinking water in the Czech Republic (categories: > 5 000 population supplied, < 5 000 population supplied, total number of samples analysed, number of positive samples, arithmetic mean and maximum value) in 2020–2024 (CFU = colony forming units)

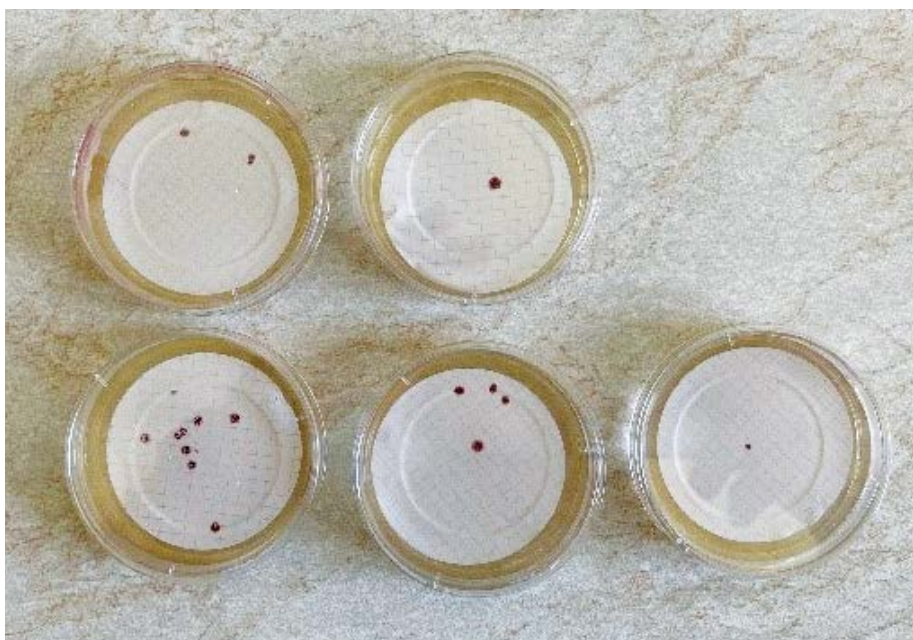
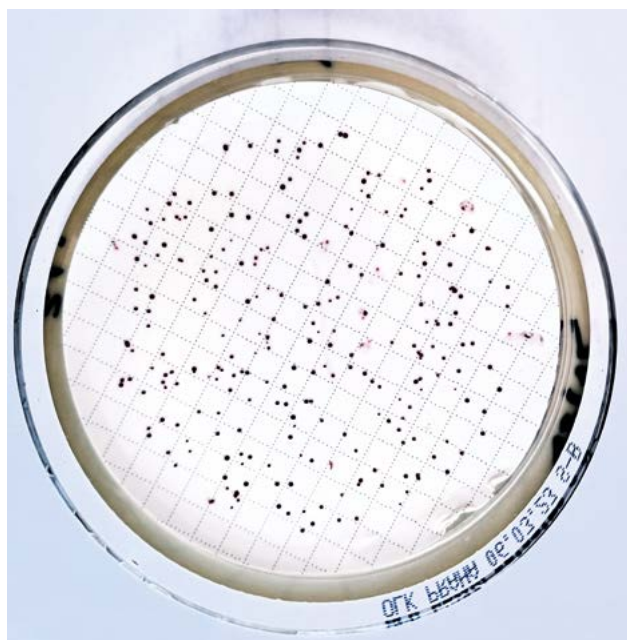
Rok	> 5 000 zásobovaných obyvatel				< 5 000 zásobovaných obyvatel			
	Počet vzorků	Počet pozitivních vzorků	Ar. průměr [KTJ/100 ml]	Max. [KTJ/100 ml]	Počet vzorků	Počet pozitivních vzorků	Ar. průměr [KTJ/100 ml]	Max. [KTJ/100 ml]
2020	4 079	6	0,009	20	9 169	198	0,3	100
2021	4 377	5	0,009	25	9 605	170	0,236	> 150
2022	4 356	15	0,013	12	9 978	222	0,212	> 100
2023	5 778	10	0,024	> 100	10 242	216	0,312	> 100
2024	11 582	57	0,053	> 80	22 340	359	0,211	> 100

Ke stanovení intestinálních enterokoků v pitných vodách se používá již léta osvědčená metoda dle ČSN EN ISO 7899-2 [9], která zahrnuje membránovou filtraci vzorků, kultivaci 48 hodin při 36 °C na agaru dle Slanetze a Bartleyové a potvrzení dvě hodiny při 44 °C na žluč-eskulinovém agaru s azidem sodným (dále ŽEA). Za intestinální enterokoky se považují červeně až vínově zbarvené kolonie (obr. 1), jež po přeočkování na konfirmační médium vykazují zčernání média pod kolonií. Tato metoda by měla zachytit převážně druhy enterokoků fekálního původu (*E. faecalis*, *E. faecium*, *E. durans* a *E. hirae*). S tím také souvisí zkrácení doby konfirmace ze čtyř na dvě hodiny v roce 2001, kdy se předpokládalo, že typické fekální enterokoky mají rychlejší a intenzivnější aktivitu ŽEA testu. Novější metody, které mají ambici stát se alternativními, jsou často založeny na aktivitě enzymu β -D-glukosidázy, což zahrnuje detekci všech druhů

enterokoků (*Enterococcus* spp.) [10]. To se nezdá být vhodné zejména proto, že nejde o indikátorový, nýbrž klíčový ukazatel s limitní hodnotou typu NMH. Naopak cesta pro lepší/podrobnější interpretaci výsledků stanovení enterokoků by měla vést zcela opačným směrem, tedy k identifikaci jednotlivých druhů.

METODIKA

Do této studie byly zahrnuty kmeny, které byly izolovány z upravených pitných vod (nikoli však studní), získané během dvou let z provozních hydroanalytických laboratoří. Kmeny byly přečištěny, identifikovány metodou MALDI-TOF (s aplikací kyseliny mravenčí) a zopakován byl konfirmační test s tím, že výsledky



Obr. 1 a, b. Vlevo: *Aerococcus viridans*, tvořící velmi drobné (většinou nečernající) kolonie; vpravo: detekce intestinálních enterokoků

Fig. 1 a, b. Left: *Aerococcus viridans*, forming very small (mostly non-blackening) colonies; right: detection of intestinal enterococci

byly odečítány po dvou, čtyřech a 24 hodinách. Navíc byly kmeny testovány na aktivitu β -D-glukosidázy v selektivním prostředí (médiu Enterolert DW firmy IDEXX, nově též dle ISO 7899-3 [11]).

V neposlední řadě byli zástupci nejčastěji izolovaných druhů testováni na citlivost k volnému chloru metodou, upravenou dle Přílohy 4 vyhlášky 409/2005 Sb. [12]. Do odměřeného objemu (1 000 ml) odstáté vodovodní vody o laboratorní teplotě byl přidán roztok chlornanu sodného tak, aby se obsah volného chloru pohyboval v rozmezí 0,15–0,17 mg/l. Poté se roztok uměle kontaminoval testovanými kmeny rodu *Enterococcus*. Výchozí počet KTJ testovacího kmene dosahoval hodnoty řádově 10^5 KTJ/ml. Před vlastní zkouškou byla kontaminovaná voda dokonale promíchána (např. protřepáním), aby se dosáhlo stejnoměrného rozptýlení mikroorganismů. Ve zkušebních intervalech jedna, pět a 30 minut se 0,5 ml takto připraveného vzorku roztoku naočkovalo na povrch pevného kultivačního média a po kultivaci po dobu 48 hodin při teplotě $(36 \pm 2)^\circ\text{C}$ se spočítaly kolonie, jež vyrostly na jeho povrchu. Během zkušební doby se zkušební roztok v baňce neustále promíchával. Zároveň byla naočkována původní suspenze, aby se získal výchozí počet enterokoků. My jsme provedli stanovení ve všech uvedených časových intervalech, ale hodnotili jsme pouze výsledky po jedné minutě (po pěti a 30 minutách byly již výsledky převážně negativní). Vždy byl u každého druhu paralelně testován kmen izolovaný z upravené pitné vody a kmen izolovaný z volného prostředí (koupací voda) a vše bylo očkováno duplicitně. Po inkubaci byl spočítán relativní úbytek testovaného druhu (kmenu) po jedné minutě působení volného chloru oproti kontrolnímu stanovení.

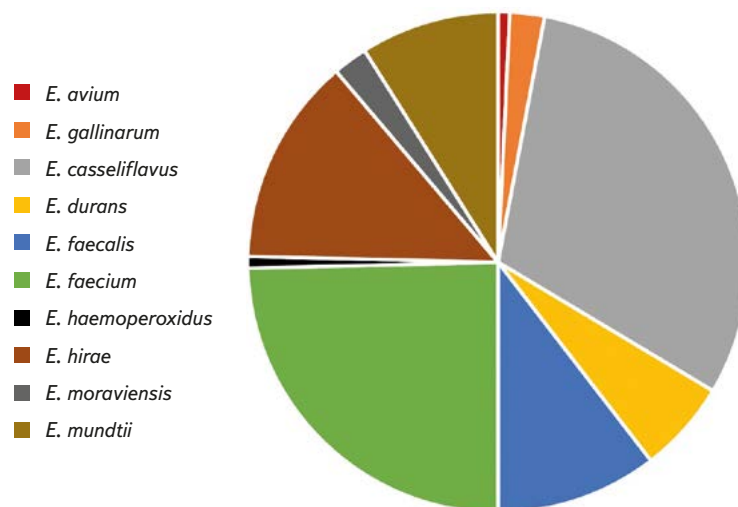
VÝSLEDKY A DISKUZE

Identifikace druhů

Celkem bylo zpracováno 227 kmenů izolovaných v pěti vodohospodářských laboratořích z pitných (upravených) vod s tím, že 134 bylo následně identifikováno jako druhy patřící do rodu *Enterococcus* (celkem 10 druhů) a 93 náleželo mezi další rody (s naprostou převahou druhu *Aerococcus viridans*).

Druhové složení enterokoků a jejich poměrné rozdělení je uvedeno na obr. 2. Nejčastěji identifikovaným druhem byl *E. casseliflavus* (31 %), následoval *E. faecium* (25 %), *E. hirae* (13 %), *E. faecalis* (10 %) a *E. mundtii* (9 %). Druhy enterokoků, které jsou dle ČSN EN ISO 7899-2 [9] považovány za fekální (*faecalis*, *faecium*, *hirae*, *durans*), celkem tvořily pouze 54 %. Pro srovnání – naše dřívější nepublikované výsledky identifikace 612 enterokoků z koupacích vod ukázaly, že nejčastějším identifikovaným druhem byl *E. faecium* (25,2 %), následoval *E. faecalis* (21,1 %), *E. durans* (17,3 %) a *E. casseliflavus* (14,4 %). Takové soubory lze samozřejmě srovnávat jen omezeně, nicméně jak je z toho patrné, jiná matrice dává jiné výsledky (bohužel literatura citovaná v úvodu [3] analyzovala enterokoky ze „směsí matric“). Že jde v případě koupací vody o zcela jinou matrici, je zjevné i z typu doprovodné mikroflóry. Nejčastějším druhem, který rušil stanovení intestinálních enterokoků v koupacích vodách, byl podle našich dřívějších výsledků a též v citované literatuře [3] druh *Lactobacillus plantarum*, zatímco v pitných vodách byl nejrozšířenějším druhem doprovodné mikroflóry *Aerococcus viridans*.

Nejvyšší výskyt druhu *E. casseliflavus* v pitné vodě zatím neumíme dobře interpretovat, je však nutno zmínit, že nebylo izolováno „hodně kmenů z jednoho vzorku“, jak tomu bývá často u vod koupacích, ale většinou šlo o průběžný výskyt. I v dříve uvedených publikacích se tento druh mnohdy spojuje s možným pomnožením na rostlinném materiálu. V pitné vodě jde především o to, jak se „chová“ např. v biofilmech či na pískových filtrech (což nevíme). Avšak na rozdíl od vzorků koupacích vod, kdy může dojít k pomnožení tohoto druhu třeba na rákosí a membránový filtr je pak plný těchto (spíše drobnějších) kolonií, zde se většinou o přerostlé filtry nejednalo. Pokud byl membránový filtr plný drobných kolonií, šlo výhradně o *A. viridans*.



Obr. 2. Zastoupení jednotlivých druhů intestinálních enterokoků izolovaných z pitných vod

Fig. 2. Occurrence of individual species of intestinal enterococci isolated from drinking water

Konfirmační a doplňující testy

V tab. 2 jsou uvedeny výsledky stanovení konfirmačních a doplňkových testů u jednotlivých druhů. Kromě absolutního počtu pozitivních reakcí u kmenů jednotlivých druhů je uveden relativní podíl falešně pozitivních (u doprovodné mikroflóry) a falešně negativních testů (u enterokoků).

Doba provádění ŽEA testu je podle stávající verze normy ČSN EN ISO 7899-2 [9] dvě hodiny, což bylo také bráno jako referenční čas. Další časy (původně používané čtyři hodiny a 24 hodin) byly testovány pro případnou diskuzi výsledků. Rozdíl mezi dvěma a čtyřmi hodinami byl však minimální. Falešně negativní ŽEA test (tedy po dvou hodinách inkubace) byl zaznamenán u 10 % enterokoků, nejvíce u druhů *E. gallinarum*, *E. casseliflavus* a *E. durans*. Falešně negativní výsledek u testů na β -D-glukosidázu vykazovalo pouze 1 % kmenů enterokoků, ale dalších sedm kmenů (5,3 %) vykazovalo reakci slabou. Není bohužel přesně známo, jak má pozitivní test na GLD vypadat, protože u Enterolert DW testu není dostupný žádný komparátor. Falešně pozitivní ŽEA test (po dvou hodinách inkubace) byl zaznamenán u 8 % kmenů doprovodné mikroflóry, u některých kmenů *A. viridans* pozitivní reakce během následných 20 hodin „vyledla“. Falešně pozitivní test na β -D-glukosidázu vykazovalo 14 % kmenů.

Citlivost enterokoků k volnému chloru

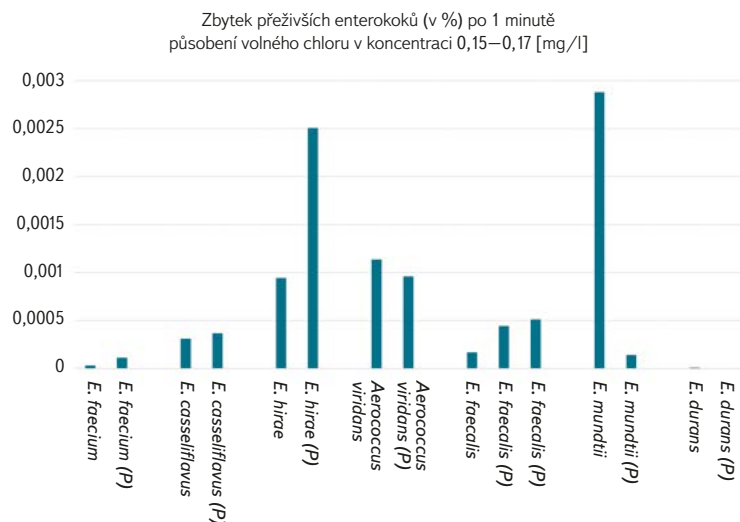
Nejčastěji izolované druhy enterokoků a nejčastější doprovodný druh *A. viridans* byly vybrány k testování na citlivost k volnému chloru. Traduje se, že enterokoky jsou méně citlivé k působení volného chloru než třeba koliformní bakterie, a i výsledky našeho provozního testování dezinfekčních činidel to potvrzují (komerční, nepublikované výsledky). Vždy byly testovány dva kmeny od jednoho druhu (u *E. faecalis* tři kmeny) s tím, že jeden kmen byl pokaždé izolován z upravené pitné vody (a dá se předpokládat, že se mohl s volným chlorem setkat) a druhý z typicky přírodního prostředí (koupací vody). Legislativně [12] jsou dány požadavky, aby počty enterokoků byly sníženy minimálně o tři řády, a to v koncentraci volného chloru 0,3 mg/l [12]. Naše studované kmeny toto víceméně splnily i při poloviční koncentraci volného chloru (0,15 mg/l). Výsledky jsou demonstrovány na obr. 3. Nejméně citlivé druhy byly *E. hirae*, *A. viridans* a kmen *E. mundtii*, který byl izolován z pitné (nikoli z koupací) vody. Naopak

Tab. 2. Výsledky doplňkových testů u kmenů jednotlivých druhů; je uveden počet vyšetřených kmenů (n), pozitivní výsledky ŽEA testu po dvou, čtyřech a 24 hodinách, pozitivní výsledky u testu na β-D-glukosidázu (GLD). Zvlášť jsou uvedeny falešné výsledky (falešně pozitivní u doprovodné mikroflóry či falešně negativní u enterokoků) u testů ŽEA po dvou hodinách a GLD v %
 Tab. 2. Results of additional tests for strains of individual species; the number of strains examined (n), positive results of the BEA test after 2, 4 and 24 hours, positive results of the β-D-glucosidase (GLD) test. False results (false positives for background microflora or false negatives for enterococci) for BEA tests after 2 hours and GLD are given separately [%]

		n	ŽEA 2 h	Falešné výsledky ŽEA 2 h [%]	ŽEA 4 h	ŽEA 24 h	GLD	Falešné výsledky GLD [%]
<i>Aerococcus</i>	<i>viridans</i>	80	7	9 %	8	5	12	15 %
<i>Carnobacterium</i>	<i>maltarum</i>	2	0	0 %	0	0	0	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>avium</i>	1	1	0 %	1	1	1	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>gallinarum</i>	3	1	67 %	1	1	2	33 %
<i>Enterococcus</i>	<i>casseliflavus</i>	41	34	17 %	34	41	41	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>durans</i>	8	6	25 %	8	8	8	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>faecalis</i>	14	14	0 %	14	14	14	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>faecium</i>	33	30	9 %	33	33	33	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>haemoperoxidus</i>	1	1	0 %	1	1	1	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>hirae</i>	18	18	0 %	18	18	18	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>moraviensis</i>	3	3	0 %	3	3	3	0 %
<i>Enterococcus</i>	<i>mundtii</i>	12	12	0 %	12	12	12	0 %
<i>Lactobacillus</i>	<i>lactis</i>	1	0	0 %	0	0	1	100 %
<i>Lactobacillus</i>	<i>plantarum</i>	1	0	0 %	0	0	0	0 %
<i>Staphylococcus</i>	<i>pasteuri</i>	1	0	0 %	0	0	0	0 %
<i>Staphylococcus</i>	<i>saprophyticus</i>	5	0	0 %	0	0	0	0 %
<i>Staphylococcus</i>	<i>warneri</i>	2	0	0 %	0	0	0	0 %
<i>Streptococcus</i>	<i>infantarius</i>	1	0	0 %	0	0	0	0 %

nejcitlivější druh byl *E. durans*. U 25 % kmenů druhu *E. durans* byla zaznamenána zpožděná reakce ŽEA testu (tab. 2), což by mohlo být způsobeno stresem kmenů z upravené vody. Určitá rezistence k volnému chloru u druhu *E. hirae* mohla způsobit, že se tento druh vyhoupl na třetí místo mezi identifikovanými kmeny, a taktéž určitá rezistence druhu *A. viridans* může vysvětlit jeho častý výskyt ve formě doprovodné mikroflóry. Nejvíce rezistentní kmen *E. hirae* je rovněž předepsán pro testování baktericidních vlastností dezinfekčních prostředků [13].

Až do posledního provedeného experimentu se zdálo, že přírodní kmeny mají vyšší citlivost k působení volného chloru (nejsou stresované?) než kmeny izolované z pitné vody, což se však absolutně nepotvrdilo u druhu *E. mundtii*, kde to bylo přesně naopak.



Obr. 3. Citlivost různých druhů enterokoků k volnému chloru; kmen označený (P) pochází z přírodního prostředí

Fig. 3. Sensitivity of different enterococci species to free chlorine; the strain marked (P) originates from the natural environment

ZÁVĚR

Ačkoli „sběr enterokoků“ trval minimálně dva roky, počet získaných kmenů není nikterak vysoký (enterokoky = 134 + doprovodná mikroflóra = 93). I tak byly ale získány cenné údaje. Nejčastěji izolovaným druhem z pitných vod byl *E. casseliflavus*, jenž bývá v přírodních vodách zastoupen méně a spíše nárazově. Tento výskyt zatím neumíme zcela interpretovat, nabízí se možnost jeho schopnosti přežívání v biofilmu (?). Tento druh bývá také spojován s možností pomnožení na rostlinném materiálu. Z doprovodné mikroflóry byl nejčastěji identifikován druh *A. viridans*, který má spolu s *E. hirae* zároveň nejmenší citlivost k volnému chloru. Metoda dle normy ČSN EN ISO 7899-2 plně vyhovuje na stanovení intestinálních enterokoků v pitných vodách. Používání alternativních metod založených na stanovení aktivity enzymu GLD není zcela vhodné, jelikož rozšiřuje skupinu „intestinálních enterokoků“ na stanovení *Enterococcus* spp., čímž rozšiřuje detekovanou skupinu i o druhy s ne zcela jasným fekálním původem. Navíc k hodnocení výsledků enterokoků se více hodí zcela opačný trend – identifikace kmenů a interpretace jejich výskytu v prostředí. Kromě toho nejčastěji detekovaný druh *A. viridans*, jenž patří mezi doprovodnou mikroflóru, vykazuje falešně pozitivní výsledky GLD v 15 %. Vzhledem k tomu, že jde o klíčový ukazatel s nejvyšší mezní hodnotou (NMH), by takové rozšíření „skupiny“ mohlo způsobit komplikace.

Poděkování

Vznik této publikace byl podpořen v rámci MZ ČR – RVO (Státní zdravotní ústav – SZÚ, IČ 75010330). Zvláštní poděkování patří pracovníkům laboratoří provozovatelů vodovodů, kteří nám zaslali kmeny ke studiu.

Literatura

- [1] BAUDIŠOVÁ, D. Enterokoky v pitných vodách. In: ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J., PETRÁKOVÁ KÁNSKÁ, K. (eds). *Sborník z konference Vodárenská biologie*. 2025, 29–30. 1. 2025. Praha: Vodní zdroje EKOMONITOR, Chrudim, 2025, s. 131–136. ISBN 978-80-88238-40-9.
- [2] SCHWARTZMAN, J. A., LEBRETON, F., SALAMZADE, R., SHEA, T., MARTIN, M. J., SCHAUFLE, K., URHAN, A., ABEEL, T., CAMARGO, I. L. B. C., SCARDIOLI, B. F., PRICHULA, J., GUEDES FRAZZON, A. P., GIRIGET, G., VAN TYNE, D., TREINISH, G., INNIS, Ch. J., WAGENAAR, J. A., WHIPPLE, R. M., MANSON, A. L., EARL, A. M. Global Diversity of Enterococci and Description of 18 Previously Unknown Species. *PNAS*. 2024, 121(10), e2310852121, s. [1–12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.2310852121>
- [3] TAUČER-KAPTEJN, M. *Occurrence of Enterococci in the Environment and Their Value As an Indicator of Water Quality*. Doctoral Thesis. Delft: TU Delft, 2017. Dostupné z: <https://doi.org/10.4233/uuid:e897f4b7-505e-4648-a2b9-acff485d8cea>
- [4] *Směrnice Evropského parlamentu a RADY (EU) 2020/2184 ze dne 16. prosince 2020 o jakosti vody určené k lidské spotřebě (přepřevaně znění)*.
- [5] *Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb., kterou se stanoví hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody*.
- [6] GARI, D. W., KOŽÍŠEK, F., JELIGOVÁ, H. *Zpráva o kvalitě pitné vody za rok 2020–2024*, Státní zdravotní ústav.
- [7] BYAPPANAHALLI, M. N., NEVERS, M. B., KORAJKIC, A., STALEY, Z. R., HARWOOD, V. J. Enterococci in the Environment. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2012, 76(4), s. 685–706. Dostupné z: <https://doi.org/10.1128/MMBR.00023-12>
- [8] ŠVEC, P. *Systematika rodu Enterococcus*. Habilitační práce. Brno: Masarykova univerzita Brno, 2019, s. 1–68.
- [9] ČSN EN ISO 7899-2 (757831). *Jakost vod. Stanovení intestinálních enterokoků. Metoda membránových filtrů*.
- [10] NIEGOWSKA, M., PITKÄNEN, T., SOMMER, R., BRANDAO, J., BONADONNA, L., BAUDIŠOVÁ, D., BURLION, N., GASSILLOU, B., PISSARIDES, N., PROKŠOVÁ, M., RUPEL, T., SCHAEFER, B., SCHETS, C., SLAPOKAS, T., VARGHA, M., LETTIERI, T. Recast Drinking Water Directive – State of Play: Guidance Note for the Analysis of Microbiological Parameters. *Publications Office of the European Union*, 2022. ISBN 978-92-79-53688-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.2760/14494>
- [11] ISO 7899-3:2025. *Water Quality – Enumeration of Intestinal Enterococci Part 3: Most Probable Number Method*.
- [12] *Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 409/2005 Sb., o hygienických požadavcích na výrobky přicházející do přímého styku s vodou a na úpravu vody*.
- [13] EN 1276:2009/AC: *Chemical Disinfectants and Antiseptics – Quantitative Suspension Test for the Evaluation of Bactericidal Activity of Chemical Disinfectants and Antiseptics Used in Food, Industrial, Domestic and Institutional Areas – Test Method and Requirements (Phase 2, Step 1)*.

Autoři

RNDr. Dana Baudišová, Ph.D.¹

✉ dana.baudisova@szu.gov.cz
ORCID:0000-0003-1879-0306

Mgr. Karel Kolář, Ph.D.²

✉ karel.kolar@pvk.cz
ORCID:0009-0008-9873-2117

¹Státní zdravotní ústav, Praha (Česká republika)

²Pražské vodovody a kanalizace, Praha (Česká republika)

Príspevek prešiel recenzným řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.001

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

SPECIES COMPOSITION OF ENTEROCOCCI IN DRINKING WATER AND DETECTION METHODS

BAUDIŠOVÁ, D.¹; KOLÁŘ, K.²

¹National Institute of Health, Prague (Czech Republic)

²Pražské vodovody a kanalizace, Prague (Czech Republic)

Keywords: intestinal enterococci — drinking water — species composition — sensitivity to free chlorine

Intestinal enterococci are one of the two “core” microbiological parameters in the “new” drinking water legislation that should indicate faecal contamination. They must be detected in all analyses of drinking water. A total of 134 strains of enterococci (*Enterococcus* spp.) and 93 strains that were identified as background microflora, or potentially false-positive strains, were examined from operational samples of treated, i.e. drinking water (but not from untreated wells and boreholes, which are expected to have a higher risk

of faecal contamination). The most frequently detected *Enterococcus* species was *E. casseliflavus* (31 %), followed by *E. faecium* (25 %). The absolutely most frequent species that does not belong to intestinal enterococci was found to be *Aerococcus viridans* (n = 80), but not all obtained strains survived the first passage. The least sensitivity to free chlorine was found in the species *E. hirae* and also in the already mentioned *A. viridans*. All strains were further tested at bile esculin azide confirmation medium (BEA test) after 2, 4 and 24 hours of incubation and for β -D-glucosidase (GLD) activity in a selective medium (Enterolert DW medium, IDEXX). A false-negative BEA test after 2 hours of incubation was recorded in 10 % of enterococci, most often in the species *E. gallinarum*, *E. casseliflavus* and *E. durans*. Only 1 % of *Enterococcus* strains showed a false negative results in GLD, but another 7 strains (5.3 %) showed a weak reaction. A false positive BEA test after 2 hours of incubation was recorded in 8 % of the background microflora strains, a false positive test for GLD was shown by 14 % of the strains. The method according to the EN ISO 7899-2 standard is fully suitable for the detection of intestinal enterococci in drinking water. The suitability of using alternative methods based on the determination of the activity of the enzyme β -D-glucosidase is not entirely appropriate, because it expands the group of “intestinal enterococci” to determine the entire *Enterococcus* genus and the detection may not clearly indicate fecal contamination.



Rekonstrukce povodně z července roku 1903 v povodí Opavy pomocí GIS a hydrologických modelů

JAN UNUCKA, MARTIN ADAMEC, OLGA HALÁSOVÁ, TEREZA HOLÁŇOVÁ, KATEŘINA JURAJDOVÁ ŠTASTNÁ, PAVEL LIPINA, IRENA MORAVCOVÁ, MILOSLAV MÜLLER, IRENA PAVLÍKOVÁ, PETRA ŠUTAROVÁ, ALEXANDRA TRLIČÍKOVÁ, MATĚJ WAGNER

Klíčová slova: Opava – povodeň 1903 – hydrologické modely – rekonstrukce historických povodní

ABSTRAKT

Povodeň z roku 1903 patřila bezesporu mezi nejvýraznější povodně 20. století na území Moravy a Slezska. Byť v tomto období na mnoha profilech započalo systematické pozorování vodních stavů, vzhledem k územním historickým změnám z hlediska politického (Prusko versus nynější ČR), krajinného (zastoupení lesa v tehdejší a dnešní krajině), morfologického (terén a zástavba dotčených území) i vodohospodářského (trasa koryta Opavy, stav náhonů v roce 1903 a nyní) lze jen stěží transformovat tehdejší hodnoty stavů v limnigrafických stanicích na nynější ekvivalenty. Dobrým (avšak ne vždy zcela spolehlivým) vodítkem jsou historické povodňové značky, fotodokumentace, dobové mapky a plánky, ale také zprávy v dobovém tisku, rodinné kroniky a vzpomínky mlynářů, pilařů a dalších řemeslníků využívajících vodní pohon. Tyto zdroje pak vytvářejí celkem nesourodou směsici podkladů a je nutné hledat cesty, jak je navzájem verifikovat a kombinovat. Jednou z možných cest je využít tato data v prostorových analýzách GIS a následně jako vstupy pro srážkoodtokové a hydraulické modelování. Vzhledem k tomu, že tým ČHMÚ s partnery už tyto analýzy prováděl (např. při rekonstrukci historické povodně z roku 1872 na Blšance), pokusil se o to i v případě povodně z roku 1903 v Opavě. Výsledky včetně dílčí analýzy nejistot jsou uvedeny v tomto článku.

ÚVOD

Rekonstrukce historických povodní mají jedno společné – poměrně velkou nejistotu dat a často i absenci hodnot průtoků či kót hladin. Podaří-li se najít v historických pramenech či v terénu (povodňové značky) nějaká data ke kulminačním hladinám, je to cenný zdroj a dost často i jediný. Přímé srovnání kulminačních hladin historických povodní s těmi z posledních desetiletí je však i přesto zatíženo nejistotou. Dost často se zástavba a morfologie inundačních území změnila natolik, že toto srovnání hladin může být uvažováno pouze jako orientační. Na druhé straně data a zejména technologie, jež jsou dostupné v dnešní době, umožňují rekonstruovat průběh historických povodní. Pomocí prostorových analýz GIS a hydrologických modelů (srážkoodtokových a hydrodynamických) byla už na ČHMÚ rekonstruována katastrofální historická povodeň na Blšance z roku 1872. Pro tuto analýzu historické povodně byly využity dostupné materiály v archívech, znovu zaměřeny povodňové značky (některé z nich byly za povodňové jen mylně považovány) a pomocí srážkoodtokových a hydrodynamických modelů

byl následně rekonstruován její možný průběh. Jedním z důležitých faktorů je i uvážení tehdejšího odtokového koeficientu dílčích povodí, protože zastoupení lesa a využití půdy v tehdejší krajině roku 1872 bylo bezesporu rozdílné ve srovnání s dneškem, což platí i pro povodeň z roku 1903 a další. Na druhou stranu při extrémních srážkách dochází k nasycení retenční kapacity půd a území, stoupá podíl povrchového odtoku a vliv land use na velikost odtoku postupně klesá. Tyto faktory byly uvažovány i při rekonstrukci povodně z roku 1903 v povodí Opavy s hlavním zaměřením na město Opavu. Povodeň z roku 1903 patří mezi nejvýznamnější povodňové události, které kdy město postihly, a to i ve srovnání s extrémními povodněmi z let 1997 a 2024. Kromě povodí Opavy jsou dokumentovány povodně a s nimi spojené škody prakticky na všech jesenických povodích (Bělá, Vidnávka, Desná apod.), ale i v beskydské části povodí Odry (Ostravice, pravostranné přítoky Odry), viz např. Brázdil, Kirchner et al. 2007 [1] nebo Brosch 2005 [2]. Při těchto analýzách bylo hlavní motivací co nejpřesněji rekonstruovat morfologii intravilánu Opavy a koryta řeky samotné spolu s tehdejšími náhony, z nichž se do dnešních dnů dochovala jen rezidua. V rámci vyhodnocení povodně ze září 2024 byla tato extrémní odtoková situace srovnána i s předešlými povodněmi a po tomto vyhodnocení se více pozornosti věnovalo také povodni z roku 1903, neboť mimo jiné iniciovala tehdejší diskuze a plány o vodním díle Nové Heřminovy. Dalším zajímavým momentem byly i změny v trase koryta samotné Opavy a postupný zánik náhonů v intravilánu města.

Cíle studie, výzkumné otázky a hypotézy

Cílem této studie je kvantitativně rekonstruovat průběh povodně z července roku 1903 v povodí Opavy s využitím kombinace historických pramenů, prostorových analýz v prostředí GIS a hydrologického a hydrodynamického modelování. Studie se zaměřuje zejména na zpřesnění odhadu kulminačního průtoků této události, který je v dostupné literatuře zatížen značnou nejistotou a vykazuje výrazný rozptyl hodnot v závislosti na použité metodice.

Dílčím cílem je dále ověřit použitelnost integrovaného přístupu (GIS-hydrologického) pro rekonstrukci historických povodní v podmínkách omezené dostupnosti přímých hydrologických měření. Tento přístup spočívá v kombinaci heterogenních datových zdrojů (historické mapy, povodňové značky, archivní dokumenty) a jejich využití jako vstupů do srážkoodtokových a hydrodynamických modelů.

Dalším cílem je zasadit rekonstruovanou událost do kontextu novodobých extrémních povodní v povodí Opavy, zejména povodní z let 1997 a 2024, a posoudit její relativní extrémnost z hlediska kulminačních průtoků, rozsahu zaplavení a dopadů na intravilán sídel.

Na základě výše uvedených cílů jsou formulovány následující výzkumné otázky:

1. Jaký byl realistický rozsah kulminačního průtoku povodně z roku 1903 v profilu Opava?
2. Do jaké míry lze kombinací historických dat a moderních modelových nástrojů rekonstruovat průběh historické povodně s dostatečnou mírou spolehlivosti?
3. Nakolik jsou výsledky modelování v souladu s dochovanými povodňovými značkami a kvalitativními popisy rozsahu zaplavení v historických pramenech?
4. Jak se povodeň z roku 1903 svou velikostí a charakterem vztahuje k povodním z let 1997 a 2024?
5. Jaký vliv mají nejistoty vstupních parametrů (např. využití území, infiltrační charakteristiky, morfologie koryta a inundací) na výsledky rekonstrukce?

Na základě dosavadních poznatků a dostupných podkladů jsou formulovány následující vstupní hypotézy, jejichž platnost je v rámci studie ověřována:

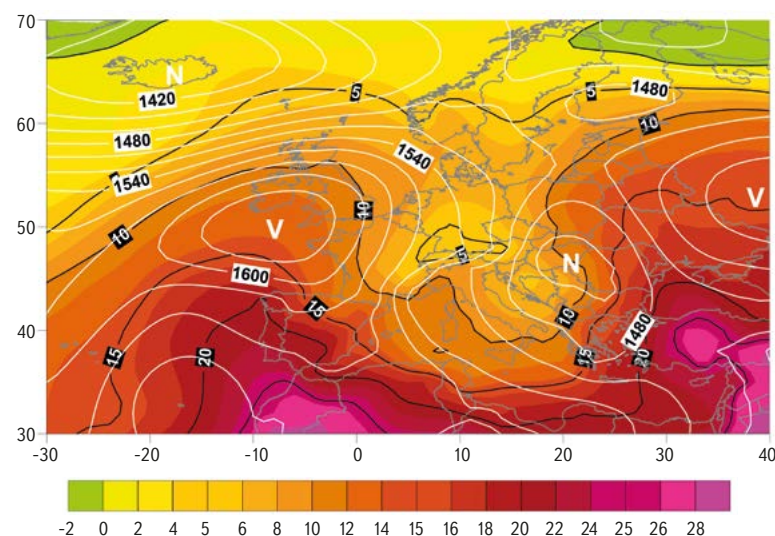
1. Kulminační průtok povodně z roku 1903 v profilu Opava byl významně vyšší než hodnoty odvozené z jednodušších historických výpočtových postupů a nacházel se přibližně v intervalu odpovídajícím extrémním průtokům (řádově stovky $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).
2. Kombinace prostorových analýz v prostředí GIS, srážkoodtokového modelování a hydrodynamického modelování (1D/2D) umožňuje přesnější a fyzikálně konzistentnější rekonstrukci historických povodní než přístupy založené pouze na empirických vztazích nebo zjednodušených hydraulických výpočtech.
3. Výsledky hydrologického a hydraulického modelování jsou v zásadním souladu s dochovanými povodňovými značkami a dokumentovaným rozsahem zaplavení, a lze je proto považovat za realistickou aproximaci průběhu povodně.
4. Povodeň z roku 1903 představovala extrémní hydrologickou událost, která byla srovnatelná – případně lokálně závažnější – než povodně z let 1997 a 2024 a překračovala běžně uvažované návrhové průtoky.
5. Při extrémních srážkových epizodách a vysoké předchozí nasycenosti povodí hraje dominantní roli meteorologický forcing a morfometrické charakteristiky povodí, zatímco vliv rozdílu ve využití území se postupně snižuje.
6. Nejistoty spojené s nedostatkem vstupních dat lze kvantifikovat pomocí stochastických přístupů (např. Monte Carlo simulací), přičemž tyto nejistoty významně ovlivňují výsledný interval odhadovaných kulminačních průtoků.

Formulované cíle, výzkumné otázky a hypotézy vytvářejí rámec pro následnou aplikaci modelových nástrojů a interpretaci výsledků rekonstrukce povodně z roku 1903.

Meteorologická situace

Pro vývoj povodně v červenci 1903 byla důležitá vysoká nasycenost povodí. Již červen roku 1903 byl v povodí Odry velmi deštivý. Např. jen v období od 11. do 16. června zde spadlo v průměru přes 60 mm srážek. Proto již k 6. červenci byla nasycenost povodí značná. Ve dnech 6. až 8. července se pak přes Slezsko a Moravu dál k jihu táhla vlněná studená fronta, která oddělovala studený vzduch na západě od teplého vzduchu na východě Evropy. Na Jesenícku tak v těchto dnech spadlo dalších cca 35 mm srážek, takže 9. července ráno byla nasycenost zdejších povodí téměř dvojnásobná oproti normálu pro danou roční dobu.

Na uvedeném frontálním rozhraní se v oblasti severní Itálie již 7. července vytvořila cyklona, jež v dalších dnech postupovala po tzv. dráze Vb k severovýchodu. Dne 9. července 1903 se nacházela nad jihovýchodní Evropou; po jejím východním a severním okraji proudil teplý a vlhký vzduch z východního Středomoří nad Moravu a Slezsko (obr. 1). Zde vál ve spodních hladinách severní vítr, který byl zesílen velkým horizontálním tlakovým gradientem mezi uvedenou cyklonou a anticyklonou se středem nad Britskými ostrovy. Kvůli tomu docházelo k výraznému orografickému zesílení srážek, jež měly těžiště na severním okraji Hrubého Jeseníku, přičemž většina tohoto území, kde úhrny přesáhly 100 mm, je odvodňována do Odry (zejména povodí Opavy, Bělé a Vídnávky) po dnešním českém či polském území. Svou roli sehrála i druhá anticyklona, která se prostírala nad východní Evropou a bránila odsunutí srážkotvorné cyklony.



Obr. 1. Synoptická situace 9. července 1903, vyjádřená výškou izobarické hladiny 850 hPa v gpm (bílé izohypsy) a teplotou vzduchu [°C] v této hladině (barevná škála); písmena jsou vyznačeny tlakové níže (N) a tlakové výše (V) (zdroj: Wetterzentrale.de)
Fig. 1. Synoptic situation on 9 July 1903, expressed by the height of the isobaric level of 850 hPa in gpm (white isohypsies) and the air temperature [°C] at this level (colour scale); the letters indicate the cyclone (N) and the anticyclone (V) (source: Wetterzentrale.de)

Při této události bylo na stanici Nová Červená Voda dne 9. července změřeno 240,2 mm srážek, tedy 240,2 litrů na m^2 , což je úhrn překonaný ve 20. století teprve v červenci 1997 na Studniční hoře v Krkonoších. Až do povodně v září 2024 to byl denní srážkový rekord pro Moravu, české Slezsko a Jeseníky. Tento vysoký denní úhrn srážek je pozoruhodný nízkou nadmořskou výškou stanice (310 m n. m.), která však stojí v severním předpolí horského hřebene, jehož nejvyšší vrchol Studniční vrch dosahuje 992 m n. m. Mimo to spadlo toho dne 200 mm srážek a více také na třech dalších stanicích, a to 221,0 mm

ve Starém Rejvízu (757 m n. m.), 217,7 mm na stanici Šumný potok (559 m n. m.) a 200 mm v Lázních Jeseník (625 m n. m.).

Mimořádné záplavy byly neobvykle ničivé, zvláště na Jesenicku, kde tehdejší škody byly až do roku 1997 považovány za největší v historii. Lze je připomenout dvěma dobovými ohlasy. „*Nad takovým neštěstím srdce krvácelo*,” zahájil pohnuté tohoroční zasedání slezského parlamentu v Opavě zemský hejtman hrabě Jindřich Larisch-Mönnich. Pohled „zdola“ pak mj. zachytila slezská prozaička Ludmila Hořká (1892–1966) ve své povídce „*Velká voda*“, která líčí soužití vesničanů s řekou: „*A Františka ještě vzpomíná i na tu velkou povodeň z roku 1903, kdy přes naši dědinu (u Kravař) jezdily čluny jako v Benátkách, kdy do chalup tekla voda oknem a kdy dvě z nich se rozsypany, jako by byly z perníku. Tenkrát se i vrchnost činila, vysílala vojáky na pomoc, odněkud přijeli i hasiči, ale tož to aby také hořelo, ale když žaden oheň nikdež nic, tož hasili alespoň žízeň.*“

Povodeň 1903 z hydrologického hlediska v historických a dalších pramenech

Povodeň ve dnech 10. a 11. července 1903 v povodí Odry, jež byla až do červenové povodně roku 1997 dosud nejničivější novodobou velkou vodou v této oblasti, představovala pro tento region velkou přírodní katastrofu. Byla způsobena extrémně vysokými dvoudenními úhrny srážek. Jejich těžiště se nacházelo dne 9. července v oblasti Hrubého Jeseníku a následujícího dne se přesunulo do Moravskoslezských Beskyd.

Ještě v témže roce někteří autoři podrobně popisují nastalou situaci v Jeseníkách, např. *Neu verbesserte Auflage der Hochwasser-Katastrophe am 10. und 11. Juli 1903 in politischen Bezirk Freiwaldau* (1903) [3], popř. [4], nebo *Landesanstalt für Gewässerkunde* (1904) [5]. K události se poté vracejí i další autoři, např. Zeman (1961) [6], Polách a Gába (1998) [7], Štekl a kol. (2001) [8] či Rezáčová a kol. (2003) [9]. 120 let od povodně na Jesenicku pak připomíná Halášová (2023) [10].

V povodí Bělé a toků vlévajících se do Kladské Nisy nemáme povodňové značky jako v Opavě. Výjimku tvoří socha sv. Floriána ve Vidnavě, na níž můžeme najít povodňové značky z roku 1903, 1997 a nově i z roku 2024. Socha se nachází na pravém břehu cca 70 m od vodního toku a cca 300 m od hydrologické stanice Vidnava (Vidnávka), která je umístěna na levém břehu níže po toku. Víme, že 7. července 1997 kulminovala Vidnávka na 370 cm a 15. září 2024 na 453 cm. Povodňová značka z roku 1903 je umístěna mezi nimi, takže s největší pravděpodobností Vidnávka překročila 400 cm. V té době řeka ještě nebyla výrazněji regulována, a to vkládá do odhadů další nejistotu. Ještě složitější situace je na řece Bělé, kde povodňové značky o jednotlivých událostech absentují. Pokud se podíváme na naměřená data, potom Bělá v Mikulovicích kulminovala 15. září 2024 na 475 cm a 7. července 1997 na 407 cm. Pro rok 1903 nemáme žádná naměřená data a můžeme se spoléhat pouze na popisy události v historických pramenech. Zeman (1961) [6] uvádí, že v České Vsi u mýtného mostu bylo naměřeno 598 cm. Jiné zdroje hovoří o necelých 6 metrech. Současná hydrologická stanice a most jsou od sebe vzdáleny 8 km vzdušnou čarou a korytem řeky je to cca 11 km. Výška hladiny naměřená u mostu mohla být ovlivněna právě mostem – resp. jeho zablokováním a vzedmutím hladiny. Nepochopitelným faktem dále je, že cca 700 m proti proudu řeky Bělé je jedno z nejužších míst na toku, což mohlo výrazně ovlivnit výšku hladiny při mostě. Rovněž je doloženo, že došlo na Staříči, tzn. proti proudu od mostu, k protržení hráze regulace. Vzhledem k výše zjištěnému a k obrovským materiálním škodám lze usuzovat, že v roce 1903 řeka Bělá kulminovala v Mikulovicích pravděpodobně nad 400 cm. Jestli to bylo výše, by si zasloužilo další a podrobnější analýzu.

Pokud se zaměříme na samotné město Opavu, v práci Kříže, Sochorce a Kříže (1963) [11] byla provedena pravděpodobně nejdetailnější analýza povodně z roku 1903. Autoři se soustředili zejména na hydrologicko-hydraulické vyhodnocení dle dochovaných údajů. Vzhledem k dataci studie je zřejmé, že nebylo možné využít GIS, matematických modelů nebo digitálních dat.

Soustavné pozorování vodních stavů započalo na profilu Opava v roce 1895. Do úpravy koryta Opavy a profilu (1912–1913) byl stav z 11. července 1903 nejvyšší se zaznamenanou hodnotou 525 cm. Hydrologickým oddělením v Opavě byl výpočetem z tehdejší konštruktivní křivky pro zaměřený profil Pilštský most vyhodnocen průtok $454,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. S touto hodnotou polemizují autoři studie [11] a dle vzorce pro střední profilovou rychlost s hodnotou 1,7 až $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a průtočnou plochu 138 m^2 navrhuji revidovanou hodnotu kulminačního průtoku 235 až $248 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Autoři však sami zdůrazňují, že v době vyhodnocení nedisponovali hodnotami ploch a rychlostí pro levou a pravou inundaci, což jsou zásadní údaje pro vyhodnocení extrémní povodně. Stejně tak autoři v následných výpočtech revidují hodnotu střední profilové rychlosti $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ během kulminace a dle Manningova vzorce navrhuji revidovanou hodnotu v rozmezí $2,32$ až $3,11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. S touto hodnotou pak navrhuji hodnotu kulminačního průtoku v rozmezí 283 až $404 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Střední hodnota $343,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pak víceméně koresponduje s hodnotou kulminačního průtoku $360 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ udávanou Broschem [2]. Ten uvádí pro povodeň z roku 1903 kulminační průtoky $750 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v profilu Ostravice / Moravská Ostrava, $400 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro profil Odra / Svinov a $1\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro profil Odra / Bohumín, u kterého se v pramenech objevují zmínky o největší povodňové katastrofě v historii města [4]. V rámci diskuze chybějících dat autoři rovněž poukazují na skutečnost, že chybějí údaje o spádu hladiny v korytě a inundačních územích, což lze v dnešní době úspěšně řešit hydraulickým modelováním v 1D a 2D. Ve studii [8] je ještě využit přístup založený na ukazateli předchozích srážek (UPS), kde jako maximální možný kulminační průtok odvozený pomocí tohoto výpočtu uvádějí $290 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což je opět hodnota, která je optikou simulace této epizody ve srážkoodtokových modelech s adekvátním UPS silně podhodnocená. Stejně tak nekoresponduje s rozdílem hladin v rámci dochovaných povodňových značek v Opavě. Pro dokreslení rozptylu odhadovaných hodnot lze uvést závěr autorského kolektivu pod vedením Brázdila a Kirchnera (2007) [1] nebo dřívější monografii Brázdila a kolektivu [12], kde se při rozboru této odtokové situace autoři přiklání k hodnotě kulminace korespondující s Q_{50} . Tato N -letost by však nezpůsobila tak katastrofální škody mezi Opavou a Děhylovem, jak jsou uváděny v dobových zdrojích.

Celou situaci ve městě Opavě dokresluje dobový regionální tisk, např. noviny *Grenzbote des nordwestlichen Mahrens* [13] (překlad z němčiny): *Také v Opavě byla situace velmi nebezpečná. Nejprve byly zaplaveny Kateřinky (Katharein), načež zasáhla místní hasičská jednotka a dobrovolní hasiči z Opavy. O hodinu později zaplavily vodní masy také předměstí Ratiboř (Ratiborer Vorstadt). Byla povolána rota pozemní obrany, která ve spolupráci s hasiči za svitu pochodní a luceren zahájila evakuaci obyvatel z domů ležících v nižších polohách. V pátek /10. července/ v noci voda v řece Opavě již stoupla až k mostu a každou chvíli se dalo očekávat, že řeka vystoupí z břehů. V tu chvíli dorazily k mostu další dvě roty císařské pěchoty. Třetí rota byla vyslána do cukrovaru v Kateřinkách, kde byla situace velmi kritická. Voda pronikla do mnoha domů a místy dokonce zakryla okna v přízemí, proto bylo nezbytné co nejrychleji evakuovat ohrožené obyvatele. Mnozí odmítali opustit své domovy a museli být evakuováni silou. Noviny Deutsches Volksblatt für Mähren und Schlesien (15. července 1903, č. 56, r. 27, s. 4): *Smutné jsou zprávy z Opavy. Odtud bylo 12. tohoto měsíce oznámeno: Ačkoli voda značně opadla, předměstí Ratiboř a sousední obec Kateřinky stále připomínají jedno rozlehlé jezero, z něhož vyčnívají polorozpadlé domy, kmeny stromů a nábytek. S pomocí ženijní roty, která sem včera pozdě večer dorazila z Krakova, se dnes za úsvitu podařilo proniknout i do těch částí předměstí Ratiboře, které byly dosud zcela odříznuty od vnějšího světa. Mezi nimi byla především Černá ulice (Schwarzgasse), která skýtá děsivý obraz utrpení. Předevčirem tam voda vnikla do přízemních bytů takovou rychlostí, že jejich obyvatelé stěží zachránili holý život. Mezitím vojenská správa vybavila zásobovací kolony, které na pontonech dopravovaly do domů postižených povodní chléb, rohlíky a mléko. Vedení první kolony převzal prezident země hrabě Thun-Hohenstein, který se také osobně, někdy až po prsa ve vodě, podílel na distribuci potravin. V průběhu dnešního dne se na Ratibořském předměstí zřítilo třináct domů, jejichž základové pilíře byly podemlely vodou, a mnoho dalších domů je na pokraji**



Obr. 2. Foto z povodně 1903 v prostoru Pekařské ulice (zdroj: Zemský archiv Opava, číslo archiválie cz227205010/1062/1/2/1/1/2//23+43)

Fig. 2. Photo from the 1903 flood in the area of Pekařská street (source: Provincial Archives of Opava, archival number cz227205010/1062/1/2/1/1/2//23+43)

zříčení. Pod troskami zříčeného domu našel smrt muž, jehož totožnost dosud nebyla zjištěna. Největší katastrofou, která v současné době způsobuje největší starosti, je nedostatek vody způsobený povodní, která od dnešního rána postihla Opavu. Poté, co vodárna, jak již bylo oznámeno, musela včera v důsledku záplav přerušit provoz, protože zásoby vody v ní byly znečištěny pronikající podzemní vodou. A tak je město od dnešního rána skutečně bez vody. Městský park a vojenská střelnice jsou zaplaveny, vodárna je pod vodou a musela přerušit provoz. V Kateřinkách a v Ratibořském předměstí voda způsobila velké škody. Žumpy v domech byly podemlely a vyzdvíženy. Nákladní ulice (Lastenstrasse) a všechny okolní domy a zahrady jsou zcela zaplaveny, v Pekařské ulici (Bäckergasse) se voda dostala až 400 kroků od Horního náměstí (Oberringu). V Parkstraße (prostor dnešní ulice Sadová) se zřítil jeden dům. Obyvatelé byli včas zachráněni. Mnohé obchody a kanceláře musely pracovat s výrazně omezeným počtem zaměstnanců, protože ti se nemohli dostat do města. Z tohoto důvodu a také proto, že tiskárna je pod vodou, nemohla vyjít „Freie Schles. Presse“. Lidové noviny podaly pak obecnější informace (1903, 12. července, č. 157, r. 11): Z Opavy: Kateřinky byly včera zaplaveny. Do Krňova (Krnova), který je pod vodou a zbaven všelikého železničního spojení, poslány včera další dvě setniny vojska na pomoc... Včera odpoledne o 4. hodině musela být doprava na dráze mezi Opavou a Krňovem zastavena, ježto stále stoupající vodou trať jest silně poškozena. O 5. hodině odpoledne učiněn byl pokus vypravit pomocný vlak se třemi prapory vojska do Krňova, ale vlak na stanici Úvalnu musil zastaviti a odtud mužstvo musilo jíti pochodem do Krňova. Opavské vojenské velitelství zažádalo v Krakově

o okamžité vyslání zákopnických sborů do ohrožených okresů. Dle došlých zpráv nabyla povodeň takových rozměrů, že nikdy ve Slezsku ještě podobné nebylo. Škody jest rozměrů obrovských... 14. července 1903, č. 158, roč. 159 ... Všechny obce na trati severní dráhy z Opavy do Svinova jsou zaplaveny.

Zajímavým zdrojem informací jsou vzpomínky pamětníků, kteří byli po 2. světové válce odsunuti do Německa. Dva příspěvky týkající se přímo povodně roku 1903 v Opavě byly zachyceny v časopise *Troppauer Heimat-Chronik* 1953 a 1963. Podle Franze [14] byla hladina řeky Opavy u „velkého mostu“ přibližně 1,7 m nad normálem. Tento stav byl zaznamenán v pátek 10. července v poledne. Autor bydlel přímo na Ratibořské ulici č. 40 /Ratiborer Straße 40/ v Opavě a téhož dne odpoledne /10. července/ dosahovala voda výšky střechy kůlny. „Voda však byla nechutná a strašně smrděla, protože byla smíchaná s obsahem žumpy a hnojště.“ Už od odpoledne se zdržovali na půdě domu. Přechod přes most už byl nemožný, jelikož voda proudila přes most jako divoká řeka. Druhý den ráno /11. července/ přesto na mostě pracovali hasiči, kteří se snažili vytáhnout trámy, jež uvízly v mostních příčkách, aby uvolnili průchod vodě. Voda v domě dosáhla výšky 167 cm /ráno 11. července/. „Noc na neděli 12. července 1903 jsme již strávili v klidu, protože déšť ustal a voda začala pomalu opadávat. V neděli postavili obecní stavební úřad a dobrovolníci na ulicích provizorní lávky. V neděli večer voda již natolik opadla, že náš dům byl bez vody. Každá místnost byla po pás pokryta blátem.“ Franz dále uvádí, že hrůzy povodní, které se hojně v historii Opavy vyskytovaly, dodnes připomíná neoficiální název předměstí Ratiboře:



Obr. 3. Situační plán Kateřinek a Ratibořského předměstí z roku 1826 (zdroj: Zemský archiv Opava, číslo archiválie 688, inv. č. 50, signatura 37/2)

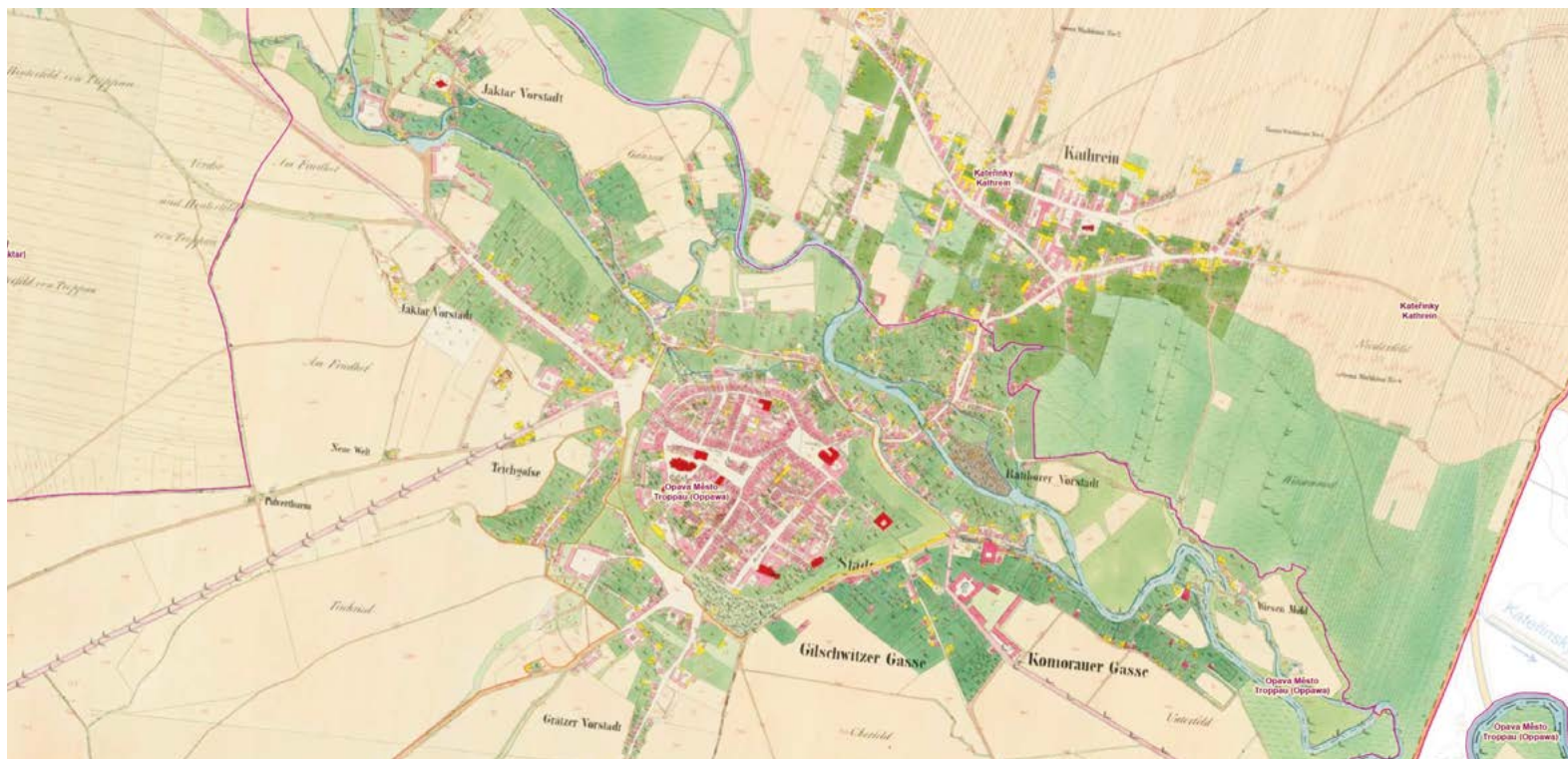
Fig. 3. Site plan of Kateřinky and Racibórz suburb from 1826 (source: Provincial Archives of Opava, archival number 688, inv. no. 50, signature 37/2)

„Nasses Viertel“ (Mokrá čtvrt). Druhý pamětník Otto Schreiber bydlel nedaleko na Ratibořské č. 30 /Ratiborer Straße 30/. Schreiber [15] popisuje, že mu voda tekla přímo 5 cm pod okny pokoje a několik dní museli bydlet v 1. patře u sousedů. Následně zmiňuje, že tato povodeň a následně i povodeň ze září 1910 vedly k rozsáhlé regulaci toku řeky Opavy.

Důležitým zdrojem informací zejména o topografii zájmového území jsou historické plány, nákresy a mapy. Na obr. 3 je situační plán části města Opavy se zaměřením na Ratibořské předměstí a Kateřinky z roku 1826 (Zemský archiv Opava), na němž je ve srovnání s Císařským povinným otiskem stabilního katastru (Morava a Slezsko byly mapovány v letech 1826 až 1836) patrný rozdíl v zákresu zástavby tehdejších Kateřinek, viz obr. 4. Stejně tak jsou viditelné rozdíly v zákresu budov na II. vojenském mapování (Morava a Slezsko byly mapovány v letech 1836 až 1840). Také je nutno uvážit skutečnost, že právě v roce 1826 zasáhla Opavu jedna z výraznějších povodní a následně došlo k jedné z historických regulací koryta Opavy, přičemž povodně se opakovaly i v letech 1829, 1831 a 1838 [1, 2].

Data a metody pro rekonstrukci hydrologické situace

Jak již bylo zmíněno v úvodu, hlavními nástroji pro rekonstrukci povodně byly programové prostředky GIS (ESRI ArcMap, ArchHydro, SAGA GIS, GRASS GIS), srážkoodtokové (HEC-HMS) a hydrodynamické (HEC-RAS, MIKE 11/21c) modely. Císařské povinné otisky stabilního katastru a II. vojenské mapování byly hlavními zdroji pro dobovou topografii a částečně výškopis. Z nejdůležitějších historických mapových podkladů poskytnutých Zemským archivem Opava byl použit zejména Situační plán města Opavy z roku 1826, Plánek odtokové situace cukrovaru v Opavě z roku 1854 a zejména pak *Plan der Landeshauptstadt Troppau mit der neuen Wasserleitung und den Stadterweiterungsgründen* od Eduarda Labitzkeho z roku 1876. Tyto podklady po převedení do souřadnicového systému S-JTSK za použití vílcovacích bodů posloužily pro digitalizaci odtokové sítě, konkrétně samotného koryta Opavy a tehdejších náhonů. Po digitalizaci v GIS byly tyto objekty převedeny do formátu schematizací hydrodynamických

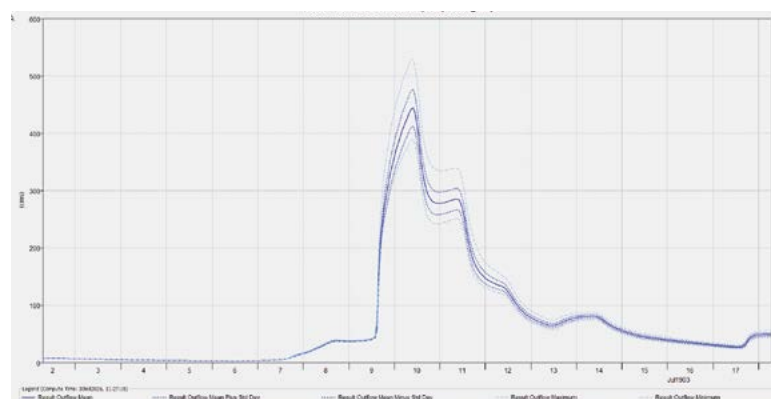


Obr. 4. Výřez Císařského povinného otisku stabilního katastru pro Kateřinky a Ratibořské předměstí (zdroj: ČÚZK)
 Fig. 4. Extract from the Imperial Imprint of the Stable Cadastre for Kateřinky and the Racibórz suburb (source: ČÚZK)

modelů DHI MIKE a HEC-RAS. Digitální model terénu byl poté zahluoben tehdejší trasou koryta Opavy pomocí sady nástrojů ArcHydro pro platformu ESRI a modulem r.carve pro GRASS GIS. Stejně tak byly do terénu zahluobeny i tehdejší náhony, nicméně k těmto útvarům absentují relevantní geodetická data s parametry koryt a rozdělovacích objektů (z vodních knih je možné zjistit i parametry koryt, ale jde o badatelsky a časově velmi náročnou práci, tedy i proto tento článek zdůrazňuje mnohem efektivnější možnosti využití prostředků GIS). Nicméně během takto extrémní povodně je vliv těchto vodohospodářských objektů na rozsah záplavového území spíše marginální. Navíc byla většina náhonů situována v pravobřežní zóně, kdežto nejvíce postižená oblast Kateřinek je v levobřežní zóně. Jedinou výjimkou byl náhon, který zhruba kopíroval trasu dnešních ulic Partyzánská, Holasická a Na Potůčku.

Citlivostní analýza pomocí metod Markov Chain Monte Carlo byla provedena primárně v rámci srážkoodtokového modelu HEC-HMS, a to konkrétně pro možné rozpětí hodnot infiltrace, CN křivek a času koncentrace, jež jsou odvislé od morfologie, ale i land use krajiny. V roce 1903 byly lesní plochy na povodí Opavy bezesporu zastoupeny méně než v dnešní době, proto byly CN křivky na jednotlivých subpovodích nastaveny v intervalu 65 (les, HSP A) až 92 (orná půda, HSP D) s 250 vzorky pro dané intervalové rozmezí. Protože jsou CN křivky primárně odvozeny pro zemědělský půdní fond, pro lesní půdní fond ve vrcholových partiích byly odvozeny dle nomogramů pro lesní plochy, viz např. Haan a kol. [16] nebo Mishra a Singh [17]. Parametr AMC (Antecedent Moisture Conditions) se neměnil vzhledem k tomu, že srážky a UPS byly známy. Zároveň se dle převodních vzorců z metody SCS-CN na metodu Green-Ampt (viz např. Mishra a Singh [17] nebo Bedient a kol. [18]) nastavil interval pro rychlost infiltrace.

Výsledky simulací v modelu HEC-HMS s citlivostní analýzou Markov Chain Monte Carlo jsou znázorněny na obr. 5. Kulminační průtok pro současný staniční profil Opava se pak pohybuje pro metodu SCS-CN (pro metodu Green-Ampt obdobně) v intervalu $389 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ až $529 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, průměrná kulminace pak $444 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, což je hodnota, která vcelku koresponduje s hodnotou kulminace odvozenou z tehdejší konsumpční křivky ($454 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).



Obr. 5. Srovnání simulace kulminační vlny povodně 1903 modelem HEC-HMS pro profil Opava s analýzou nejistot dle metody Markov Chain Monte Carlo
 Fig. 5. Comparison of the simulated flood peak of the 1903 flood using the HEC-HMS model for the Opava profile with uncertainty analysis using the Markov chain Monte Carlo method

Na simulaci ve srážkoodtokovém modelu HEC-HMS navazovaly simulace v hydraulických modelech MIKE a HEC-RAS v 1D (rekonstruovaná trasa a stav koryta dle dochovaných pramenů a map) a 2D (stav inundačních území dle dochovaných mapových podkladů a plánek). Pro verifikaci byly použity kóty dochovaných povodňových značek (Ratibořská ulice a průmyslový areál na Sadové ulici) a rozsah inundačních území ve srovnání s Q_{100} a povodněmi 1997 a 2024 (obr. 6). Z hlediska kóty povodňové značky na Ratibořské ulici nejlépe odpovídá simulovaná hladina pro průtok $438 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (obr. 7). Pakliže uvážíme i prameny popisující situaci v Kravařích a dalších obcích níže po toku, lze toto číslo uvažovat jako realistické, a to i ve srovnání s vyhodnoceným kulminačním průtokem $670 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pro povodeň 9/2024 (rozdíl kót hladin povodňové značky a úrovně povodně 9/2024 činí 23 cm).



Obr. 6. Výsledek simulace hladin a záplavových území v 1D a 2D hydraulických modelech HEC-RAS a DHI MIKE pro kulminační hladinu pro průtok $438 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Červená linie je hranice Q_{100} ($388 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pro současné koryto a inundaci. Podklad tvoří Labitzkyho plán Opavy z roku 1876

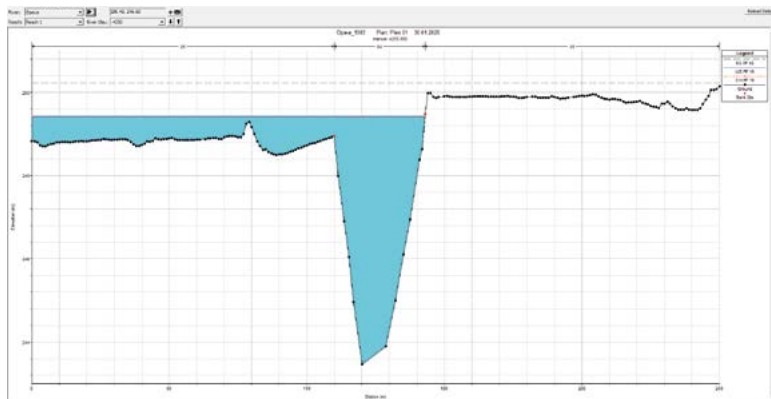
Fig. 6. Simulated water levels and flood extent in 1D and 2D hydraulic models (HEC-RAS and DHI MIKE) for the peak discharge of $438 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. The red line is the Q_{100} boundary ($388 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) for the present-day riverbed and floodplain. The base map is Labitzky's 1876 plan of Opava

DISKUZE

Rekonstrukce povodně z července 1903 v povodí Opavy je samozřejmě zatížena celou řadou nejistot, jež vyplývají především z omezené dostupnosti přírodních hydrologických měření, proměn morfologie toků a inundačních území a z výrazných změn ve využití krajiny od počátku 20. století do současnosti. Přesto lze na základě kombinace historických pramenů, povodňových značek, dobových svědectví a pozdějších hydrologických analýz konstatovat, že šlo o mimořádně extrémní událost, jejíž účinky byly srovnatelné, a v některých profilech pravděpodobně i závažnější, než u povodní z let 1997 a 2024. Výrazný rozptyl odhadovaných kulminačních průtoků na řece Opavě, uváděný v literatuře, ilustruje limity tradičních výpočtových postupů založených na zjednodušených hydraulických vztazích a neúplných datech. Zejména opomenutí průtoků inundací a nejistoty v odhadu střední profilové rychlosti a hydraulického sklonu hladiny mohly vést k podhodnocení kulminačních průtoků v některých studiích. Odhad kulminací pod úrovní Q_{50} (v současnosti $312 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) je v rozporu jak s rozsahem doložených škod v intravilánu Opavy a obcí níže po toku až po profil Děhylov, tak s dochovanými povodňovými značkami, stejně tak lze coby podhodnocenou uvažovat i hodnotu kulminačního průtoků $290 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, kterou ve své studii uvádějí jako minimální hodnotu v intervalu odhadů autoři Kříž

a kolektiv [11]. Současné nástroje pro hydrodynamické modelování, které umožňují explicitně zahrnout morfologické a hydraulické parametry inundačních území a prostorovou distribuci proudění v 1D a 2D, představují v tomto ohledu zásadní posun a nabízejí možnost zpřesnění historických odhadů. Naopak kombinace extrémních srážkových úhrnů, vysoké předchozí nasycenosti povodí a tehdejšího stavu říční sítě naznačuje událost blízkou extrémům s velmi nízkou pravděpodobností výskytu.

Zajímavým aspektem je srovnání povodně z roku 1903 s povodněmi z let 1997 a 2024. Přestože se dnešní krajina od krajiny v povodí Opavy na počátku 20. století výrazně liší (mimo jiné procentuální rozlohou lesa, vyšším podílem zástavby a technických úprav toků, výskytem vodních děl na Moravici), při překročení infiltrační či retenční kapacity území extrémními srážkami se vliv těchto historických rozdílů postupně vytrácí a dominuje povrchový odtok. Pak je vhodné se zaměřit spíše na fluvialní část dynamiky povodně a tehdejší stav koryt toků, vliv náhonů a dalších historických vodních děl a zejména na morfologii a proměny zástavby inundačních území, což může být zajímavým tématem dalšího výzkumu. Tyto faktory také podporují vstupní hypotézu, že při takto extrémních událostech hraje klíčovou roli především meteorologický forcing a také morfo-metrické a hydrologické charakteristiky povodí.



Obr. 7. Vizualizace hladiny v modelu HEC-RAS pro hodnotu kulminace $438 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ v prostoru Ratibořské ulice. Nadmořská výška povodňové značky na domě č. p. 43 je $249,45 \text{ m n. m.}$ (zdroj: vlastní geodetická měření)

Fig. 7. Simulated water level in the HEC-RAS model for a peak discharge of $438 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ in the area of Ratibořská street. The elevation of the flood mark on building no. 43 is $249,45 \text{ m}$ above sea level (source: own geodetic measurements)

Výsledky této diskuze zároveň podtrhují význam historických povodní pro současné vodohospodářské plánování. Povodeň z roku 1903 sehrála důležitou roli v historických úvahách o protipovodňových opatřeních a její detailnější kvantitativní rekonstrukce může mimo jiné přispět k objektivnějšímu posouzení návrhových parametrů vodohospodářských úprav a staveb, jako je vodní dílo Nové Heřminovy, i k lepšímu pochopení skutečného povodňového rizika v povodí Opavy.

ZÁVĚR

Povodeň z července 1903 v povodí Odry a Opavy představuje bezpochybně extrémní hydrologickou událost, jejíž kvantitativní popis je zatížen významnou nejistotou vyplývající z absence přímých měření průtoků, z neúplných údajů o hydraulických poměrech a z výrazných změn v morfologii toků a inundačních území od počátku 20. století. Přesto analýza historických pramenů v kombinaci s výsledky srážkoodtokového a hydrodynamického modelování umožňuje stanovit realistický rozsah možných kulminačních průtoků a průběh povodňové vlny. Výsledky srážkoodtokových simulací potvrzují klíčovou roli extrémních dvoudenních srážkových úhrnů a míry předchozí nasycenosti povodí, přičemž při těchto podmínkách dochází k rychlému nasycení retenční kapacity půd a ke snížení významu rozdílů ve využití území. Modelové výpočty zároveň ukazují, že přístupy založené výhradně na jednoduchých ukazatelích předchozích srážek nebo na zjednodušených empirických vztazích vedou nezdědká k chybě ve stanovení kulminačních průtoků a objemů povodňových vln. Hydrodynamické modelování v 1D a 2D prostředí se pak v tomto kontextu jeví coby nezbytný nástroj pro rekonstrukci historických povodní, neboť umožňuje zahrnout průtoky inundačními územími, prostorovou variabilitu rychlostí proudění a vliv lokálních zúžení koryta, mostních objektů či historických náhonů. Právě tyto faktory mohly mít při povodni v roce 1903 zásadní vliv na výšku hladin v intravilánech obcí (zejména v Opavě a v Kravařích) a vysvětlují nesoulad mezi některými dřívějšími odhady průtoků a doloženým rozsahem zaplavení. Modelové scénáře rovněž naznačují, že povodeň z roku 1903 pravděpodobně překročila charakteristiky běžně uvažovaných návrhových událostí (např. Q_{50}) a blížila se extrémům s velmi nízkou pravděpodobností výskytu (obecně Q_{100} a více). Tyto závěry jsou v souladu jak s dochovanými povodňovými značkami, tak s kvalitativními popisy rozsahu škod v historických pramenech. Srovnání s povodněmi z let 1997 a 2024 navíc ukazuje, že při extrémních srážkových situacích dochází k typologicky obdobné odezvě povodí bez ohledu na rozdíly v současném

využití území (postupné zvyšování poměru až k naprosté dominanci povrchového odtoku v rámci přímého a celkového odtoku z povodí), což je jeden z dalších argumentů pro význam hydrologického modelování zaměřeného na extrémní scénáře. Úplným závěrem lze konstatovat, že kombinace historických dat s prostorovými analýzami území v GIS spolu se srážkoodtokovými a hydrodynamickými modely představuje efektivní cestu ke zpřesnění rekonstrukce historických povodní a k lepšímu pochopení jejich časových a prostorových atributů. Tyto poznatky mají přímý význam pro současné vodohospodářské plánování, zejména pro stanovení návrhových průtoků, kalibraci extrémních scénářů a odborné posouzení účinnosti protipovodňových opatření v povodí Opavy.

Poděkování

Autoři by rádi poděkovali projektům NAZV č. QL24010054 „Dopady klimatické změny na malá lesní povodí a možnosti jejich zmírnění prostřednictvím lesnického managementu a vodohospodářských opatření“ a „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku, PERUN“ (č. SS02030040), bez jejichž podpory by článek vznikl mnohem déle a komplikovaněji. Stejně tak patří poděkování DKRVO (Dlouhodobá koncepce rozvoje výzkumné organizace na období 2023–2027) ČHMÚ, zejména výzkumným oblastem 6 a 12.

Literatura

- [1] BRÁZDIL, R., KIRCHNER, K. *Vybrané přírodní extrémy a jejich dopady na Moravě a ve Slezsku*. Brno: Masarykova univerzita, 2007. ISBN 978-80-210-4173-8.
- [2] BROSCH, O. *Povodí Odry*. Ostrava: Anagram, 2005. 323 s. ISBN 9788073420482.
- [3] *Hochwasser-Katastrophe am 10. und 11. Juli 1903 im politischen Bezirk Freiwaldau*. Neue verbess. u. vermehr. Aufl. Freiwaldau: A. Blažek [1903], 56 s.
- [4] TITZE, B. *Die Wasserkatastrophe am 10. Juli 1903*. 2. verbess. und vermehr. Aufl., 3. verbess. und vermehr. Ausg. Freiwaldau: B. Titze [1903], 60 s.
- [5] *Landesanstalt für Gewässerkunde. Das Hochwasser im Oder und Weichselgebiet vom Juli 1903*. Berlin, 1904, 175, s. 2 638–2 662, 2 680.
- [6] ZEMAN, V. *Povodeň v Jeseníku v r. 1903. Severní Morava*. Šumperk, 1961, s. 65–67.
- [7] POLÁCH, D., GÁBA, Z. *Historie povodní na šumperském a jesenickém okrese. Severní Morava*. Šumperk, 1998, s. 3–30.
- [8] ŠTEKL, J., BRÁZDIL, R., KAKOS, V., JEŽ, J., TOLASZ, R., SOKOL, Z. Extrémní denní srážky na území České republiky v období 1879–2000 a jejich synoptické příčiny. In: *Národní klimatický program ČR*, 31. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2001. 140 s.
- [9] ŘEZÁČOVÁ, D., HANSLIAN, D., KAKOS, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., PEŠICE, P., SOKOL, Z. *Posouzení hydrometeorologických podmínek vzniku významných letních povodní na území ČR na základě porovnávací situace ze srpna 2002 s vybranými srážkovými epizodami a extrémními podmínkami*. Výzkumná zpráva. Praha: Ústav fyziky atmosféry AV ČR, 2003. 79 s.
- [10] HALÁSOVÁ, O. *Povodně na Jeseníku v roce 1903. Jesenícko*, 2023, s. 152–157.
- [11] KRÍŽ, V., SOCHOREC, R., KRÍŽ, H. Opakování velkých vod v povodí Olše. *Sborník prací Hydrometeorologického ústavu*. 1964, 5. 127 s.
- [12] BRÁZDIL, R. *Historické a současné povodně v České republice. Historie počasí a podnebí v českých zemích*. Brno: Masarykova univerzita, 2005. ISBN 80-210-3864-0.
- [13] *Deutsches Volksblatt für Mähren und Schlesien, Grenzbote des nordwestlichen Mahrens. Lidové noviny*. 1903, 29(57), 18. 7. 1903.
- [14] FRANZ, M. Das Hochwasser in Troppau im Juli 1903. *Troppauer Heimat-Chronik*. 1963, 162, s. 158–162.
- [15] SCHREIBER, O. Hochwasser in Troppau, *Troppauer Heimat-Chronik*. 1953, 44, s. 4–6.
- [16] HAAN, C. T., BARFIELD, B. J., HAYES, J. C. *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. London, Academic Press, Inc., 1994. 588 s. ISBN: 978-0123123404.
- [17] MISHRA, S. K., SINGH, V. P. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 2003. 513 s. ISBN: 1-4020-1132-6.
- [18] BEDIANT, P. B., HUBER, W. C., VIEUX, B. C. *Hydrology and Floodplain Analysis*. 5th ed. Upper Saddle River, Pearson, 2013. 815 s. ISBN: 978-0-273-77427-3.

Autoři

Doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D.¹

✉ jan.unucka@chmi.cz

ORCID: 0000-0003-4339-0726

RNDr. Martin Adamec, Ph.D.¹

✉ martin.adamec@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-1732-0102

Mgr. Olga Halášová, Ph.D.²

✉ olga.halaso@upol.cz

ORCID: 0000-0002-0584-2210

Mgr. Tereza Holáňová¹

✉ tereza.holanova@chmi.cz

Ing. Kateřina Jurajdová Šťastná^{1,3}

✉ katerina.jurajdovastastna@chmi.cz

ORCID: 0009-0003-3728-6858

Ing. Pavel Lipina¹

✉ pavel.lipina@chmi.cz

ORCID: 0009-0000-8788-4918

PhDr. Irena Moravcová⁴

✉ i.moravcova@zao-archives.cz

RNDr. Miloslav Müller, Ph.D.⁵

✉ muller@ufa.cas.cz

ORCID: 0000-0002-3643-9643

Ing. Irena Pavlíková^{1,3}

✉ irena.pavlikova@chmi.cz

ORCID: 0000-0001-6409-7532

Ing. Petra Šutarová, Ph.D.¹

✉ petra.sutarova@chmi.cz

ORCID: 0000-0002-5918-3396

Bc. Alexandra Trličíková^{1,6}

✉ alexandra.trlicikova@chmi.cz

Mgr. Matěj Wagner^{1,2}

✉ matej.wagner@chmi.cz

ORCID: 0009-0000-8035-7883

¹Český hydrometeorologický ústav, pobočka Ostrava (Česká republika)²Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci (Česká republika)³Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (Česká republika)⁴Zemský archiv v Opavě (Česká republika)⁵Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha (Česká republika)⁶Matematický ústav, Slezská univerzita v Opavě (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.002

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

RECONSTRUCTION OF THE JULY 1903 FLOOD IN THE OPAVA RIVER BASIN USING GIS AND HYDROLOGICAL MODELS

UNUCKA, J.¹; ADAMEC, M.¹; HALÁSOVÁ, O.²; HOLÁŇOVÁ, T.¹; JURAJDOVÁ ŠŤASTNÁ, K.^{1,3}; LIPINA, P.¹; MORAVCOVÁ, I.⁴; MÜLLER, M.⁵; PAVLÍKOVÁ, I.^{1,3}; ŠUTAROVÁ, P.¹; TRLIČÍKOVÁ, A.^{1,6}; WAGNER, M.^{1,2}

¹Czech Hydrometeorological Institute, Ostrava (Czech Republic)²Palacky University Olomouc, Faculty of Science (Czech Republic)³VSB – Technical University of Ostrava (Czech Republic)⁴Provincial Archives in Opava (Czech Republic)⁵Institute of Atmospheric Physics, CAS, Prague (Czech Republic)⁶Mathematical Institute in Opava, Silesian University (Czech Republic)

Keywords: Opava – 1903 flood – hydrological models – reconstruction of historical floods

The flood of 1903 was undoubtedly one of the most significant floods of the 20th century in Moravia and Silesia. Although systematic observation of water levels began in many gauging profiles during this period, due to territorial historical changes in terms of politics (Prussia versus the present-day Czech Republic), landscape (representation of forests in the then and present-day landscape), morphology (terrain and urban development of the affected areas) and water management (route of the Opava riverbed, condition of the water flumes in 1903 and now), it is difficult to transform the values of the water levels at gauging stations at that time into current equivalents. A good (but not always completely reliable) guide are historical flood marks, photo documentation, historical maps and plans, and also reports in the period press. These sources then create a rather disparate mixture of sources, and it is necessary to find ways to verify and combine them with each other. One possible way is to use these data in spatial GIS analyses and subsequently as inputs for rainfall-runoff and hydraulic modelling. Since the CHMI team and partners had already carried out these analyses (e.g. during the reconstruction of the historical flood of 1872 on the Blšanka river), they attempted to do the same in the case of the flood of 1903 in Opava. The results, including a partial uncertainty analysis, are presented in this article.



Marketing vs. realita: využití baterie biotestů pro hodnocení akutní toxicity ekologicky šetrných detergentů

PAVLA KOVALÁKOVÁ

Klíčová slova: akutní toxicita – detergenty – tenzidy – EU Ecolabel – perloočka *Daphnia magna* – bakterie *Vibrio fischeri* – řasa *Desmodesmus subspicatus* – baterie ekotoxikologických biotestů – environmentální riziko

ABSTRAKT

Používání detergentů v domácnostech představuje významný zdroj komplexních směsí antropogenních látek vstupujících do systémů komunálních odpadních vod a následně do vodních recipientů. Tato studie se zaměřuje na komparativní hodnocení akutní ekotoxicity konvenčních detergentů a jejich ekologicky certifikovaných variant (EU Ecolabel) pomocí baterie biotestů reprezentujících různé trofické úrovně. K testování byly využity luminiscenční bakterie *Vibrio fischeri*, perloočky *Daphnia magna*, zelené řasy *Desmodesmus subspicatus* a semena hořčice bílé *Sinapis alba*.

Stanovené hodnoty EC_{50} a úrovně inhibice při koncentraci 100 mg/l prokázaly značnou variabilitu v toxických účincích finálních formulací, která často nekorelovala s marketingovým označením „EKO“. Nejvýraznějším zjištěním byla vysoká akutní toxicita ekologicky certifikovaného pracího gelu vůči řasám (72h EC_{50} 3,93 mg/l) a perloočkám (48h EC_{50} 5,49 mg/l), která o řád převyšovala toxicitu konvenčního produktu. Tento efekt lze pravděpodobně vysvětlit vysokým celkovým obsahem tenzidů v ekoproduktu (až 50 %) a možným synergickým působením dalších aditiv, např. enzymů. Naopak v kategorii šamponů se ekologická varianta ($EC_{50} > 100$ mg/l) ukázala jako environmentálně šetrnější díky nahrazení sulfátových tenzidů neiontovými surfaktanty na bázi coco glukosidu.

Z metodologického hlediska studie potvrdila vysokou citlivost organismů *Daphnia magna* a *Desmodesmus subspicatus* vůči detergentní zátěži, zatímco semena *Sinapis alba* vykazovala vůči akutní expozici výrazně vyšší toleranci. Výsledky zdůrazňují význam experimentálního testování finálních formulací detergentů, neboť regulatorní kritéria ekoznačky EU Ecolabel zaměřená primárně na biologickou rozložitelnost složek nezaručují nižší akutní toxicitu směsi. V důsledku masového a kontinuálního používání se detergenty v hydrosféře mohou chovat jako pseudoperzistentní polutanty, jejichž toxický tlak na vodní biotu zůstává relativně stálý navzdory jejich teoretické biologické rozložitelnosti.

ÚVOD

Užívání detergentů v domácnostech představuje kontinuální zdroj antropogenních chemických látek vstupujících do systémů komunálních odpadních vod a následně do vodních recipientů [1, 2]. Tyto produkty, zahrnující např. prostředky na ruční mytí nádobí, prací gely, tablety do myček nádobí či šampony, jsou definovány jako komplexní směsi záměrně přidaných látek, vedlejších produktů a nečistot [3, 4]. Dominantní složku těchto formulací tvoří povrchově

aktivní látky (tenzidy), které představují přibližně 15–40 % celkové hmotnosti detergentu [2, 5]. Kromě tenzidů obsahují detergenty řadu dalších aditiv, např. bělidla, enzymy, konzervační látky a vonné složky, jež mohou vykazovat vlastní toxické účinky [6, 7].

Přestože moderní čistírny odpadních vod (ČOV) odstraňují běžné tenzidy s vysokou účinností, často přesahující 90 %, část těchto látek a jejich metabolitů může přecházet do recipientů [5, 8, 9]. V důsledku masového a nepřetržitého používání detergentů se tyto látky v hydrosféře chovají jako tzv. pseudoperzistentní polutanty. Ačkoli jsou jednotlivé složky biologicky rozložitelné, jejich koncentrace v životním prostředí zůstává v důsledku kontinuálního přísunu z komunálních odpadních vod relativně stabilní. Tento jev představuje pro vodní organismy dlouhodobý toxický tlak [9]. Expozice detergentům může vyvolávat negativní biologickou odezvu zejména prostřednictvím narušení integrity buněčných membrán a ovlivnění metabolických procesů organismů [5, 6, 8, 10].

Environmentální rizika konvenčních detergentů mohou dále zvyšovat některá aditiva. Patří mezi ně např. fosfáty a fosfonáty přispívající k eutrofizaci vodních ekosystémů [2, 7], perzistentní chelatační činidla, jako je EDTA, nebo konzervační látky ze skupiny isothiazolinonů. K potenciálně problematickým složkám lze zařadit také enzymy, např. subtilisin, které mohou vykazovat vysokou akutní toxicitu pro vodní organismy [3, 11–14].

V reakci na environmentální dopady detergentů byla v Evropské unii zavedena ekoznačka EU Ecolabel (Nařízení /ES/ č. 66/2010) [15]. Kritéria této certifikace jsou založena na vědeckých principech a zaměřují se především na biologickou rozložitelnost složek (aerobní i anaerobní) a na omezení celkového toxického zatížení vodního prostředí prostřednictvím výpočtu kritického objemu zředění (Critical Dilution Volume, CDV). Součástí kritérií je rovněž omezení nebo zákaz používání látek vzbuzujících mimořádné obavy (SVHC) a látek s vysokou perzistencí či bioakumulačním potenciálem.

Navzdory těmto regulatorním požadavkům, jež se primárně zaměřují na environmentální osud jednotlivých složek, nemusí marketingové označení „EKO“ vždy přímo korelovat s nízkou akutní toxicitou finální formulace pro všechny trofické úrovně [5]. V rámci kritérií EU Ecolabel jsou totiž povoleny i látky klasifikované jako vysoce toxické pro vodní prostředí, pokud splňují stanovené limity a požadavky na účinnost a biologickou rozložitelnost. V komplexní matici finálního produktu navíc může docházet k synergickým interakcím mezi tenzidy a dalšími aditivy, což může modifikovat výsledný toxický účinek nad úroveň předpokládanou z vlastností jednotlivých složek [5, 16, 17].

Pro objektivní hodnocení reálného dopadu detergentů na biotu byla v této práci využita baterie biotestů reprezentující různé trofické úrovně vodních

i terestrických ekosystémů. Testovací sada zahrnovala luminiscenční bakterie *Vibrio fischeri*, které představují standardní indikátor mikrobiální toxicity, citlivý na široké spektrum polutantů. Bakterie navíc plní v akvatických ekosystémech významnou funkci destruentů organické hmoty. Dalším použitým organismem byla zelená řasa *Desmodesmus subspicatus*, jednobuněčný primární producent citlivý na lytické účinky detergentů a zároveň náchylný k růstové stimulaci v přítomnosti nutrientů. Vzhledem k jejich postavení na základně potravního řetězce představují řasy klíčovou trofickou úroveň vodních ekosystémů. Pro hodnocení toxicity na úrovni konzumentů byly využity perloočky *Daphnia magna*, jež patří mezi nejcitlivější modelové organismy pro testování tenzidů. Tito planktonní korýši představují významnou složku zooplanktonu a tvoří důležitý článek potravního řetězce sladkovodních ekosystémů. Testovací baterii doplňoval test fytotoxicity na semenech hořčice bílé (*Sinapis alba*), který slouží jako modelový indikátor potenciálních rizik pro terestrické organismy, např. při využívání odpadních vod nebo kalů v zemědělství.

Cílem studie bylo ověřit, nakolik marketingová deklarace ekologické šetrnosti odpovídá reálnému dopadu na vodní biotu. Práce testuje hypotézu, že certifikované detergenty vykazují nižší akutní nebezpečnost než běžné produkty, a to s přihlédnutím k synergickému působení všech složek v testovaných směsích.

MATERIÁLY A METODY

Testované látky a příprava vzorků

V rámci studie bylo testováno osm komerčně dostupných detergentů pro domácnost ve čtyřech kategoriích (mýcí prostředky, prací gely, tablety do myčky a šampony) v konvenční (dále v textu označována jako Normal) a ekologicky certifikované variantě. Charakteristika vzorků včetně pH a složení je uvedena v tab. 1. Základní pracovní roztoky o koncentraci 1 g/l byly připravovány rozpuštěním přesně naváženého množství produktu v demineralizované vodě a následně naředěny na požadovanou koncentraci. Pro finální testy byla využita logaritmická řada koncentrací začínající na koncentraci 100 mg/l. Tato hodnota byla v této studii stanovena jako horní limit testování, neboť produkty s hodnotami EC₅₀ přesahující tuto hranici již nepodléhají klasifikaci jako látky akutně toxické pro vodní prostředí podle Globálního harmonizovaného systému (GHS) a evropského nařízení CLP. Testování vyšších koncentrací navíc postrádá environmentální relevanci, jelikož běžné koncentrace tenzidů (tedy účinných látek v detergitech obsažených) v komunálních odpadních vodách dosahují typicky pouze 1–10 mg/l a po průchodu ČOV s vysokou účinností odstranění jsou v recipientu dále významně ředěny [8, 18, 19].

Tab. 1. Charakteristika testovaných detergentů a jejich deklarované složení

Tab. 1. Characteristics of tested detergents and their declared composition

Typ produktu	Eko značka	Složení	pH v koncentraci 1 g/l	Bezpečnostní list
Prací gel EKO	EU Ecolabel	15–30 % neiontové povrchově aktivní látky, 5–15 % aniontové povrchově aktivní látky. Méně než 5 % mýdlo. Obsahuje konzervační činidla (phenoxyethanol), parfémy, enzymy (subtilisin, amyláza, celulóza, mananáza)	7,3	není dostupný
Prací gel	Normal	5–15 % aniontové povrchově aktivní látky, < 5 % neiontové povrchově aktivní látky, < 5 % fosfonáty, vůně (hexyl cinnamal), konzervační látky (2-bromo-2-nitropropan-1,3-diol metylchloroisothiazolinon, metylchloroisothiazolinon), enzymy	6,1	H319 H412
Tablety do myčky EKO	EU Ecolabel	5 % nebo více, avšak méně než 15 %: bělicí činidla na bázi kyslíku, polykarboxyláty; méně než 5 %: neiontové povrchově aktivní látky; enzymy	9,8	H319
Kapsle do myčky	Normal	15–30 % bělicí činidla na bázi kyslíku, 5–15 % neiontové povrchově aktivní látky, < 5 % fosfonáty, polykarboxyláty, enzymy, parfémy, citronello, limonene, linalool	10,2	H318
Mýcí prostředek EKO	EU Ecolabel	5–15 % aniontové povrchově aktivní látky; < 5 % neiontové povrchově aktivní látky, amfoterní povrchově aktivní látky; phenoxyetanol; benzoát sodný; parfémy. Laurylamine dipropylendiamin, benzisothiazolinon, metylisothiazolinon (sodium laureth sulfate 10–25 %, cocamidopropyl betaine 1–3 %, alkyl, C10-16, polyglucoside 0,1–1 %)	5	H319
Mýcí prostředek	Normal	obsahuje méně než 5 % aniontové povrchově aktivní látky, konzervační látky (2-bromo-2-nitropropane-1,3-diol), parfém a barvivo	5,5	H319
Šampon EKO	Certifikovaná přírodní kosmetika*	voda, coco-glucoside, glycerin, sodium coco-sulfate, <i>Helianthus annuus</i> hybrid oil, xanthanová guma, kofein, inulin, hydrolyzovaný kukuřičný protein, sodná sůl PCA, kyselina mléčná, hydrolyzovaný pšeničný protein, hydrolyzovaný sójový protein, levulinát, levulin, kyselina sodná, sodná sůl denat., <i>Lactobacillus ferment</i> , extrakt z listů <i>Thymus vulgaris</i> , mentol, sacharóza, glukóza, fruktóza, extrakt z ovoce <i>Piper nigrum</i> , parfém, limonene, linalool, citral, geraniol, benzylsalicylát	6,1	není dostupný
Šampon	Normal	voda, sodium laureth sulfate, sodium xylenesulfonate, cocamidopropyl betaine, sodium citrate, parfém, citrát sodný, cocamide MEA, glycol distearate, piroctone olamine, dimethiconol, chlorid sodný, guar hydroxypropyltrimonium chloride, dimethicon, benzoan sodný, TEA-dodecylbenzensulfonate, salicylát sodný, hexyl cinnamal, linalool, tetrasodium EDTA, hydroxid sodný, trideceth-10, glycerin, niacinamid, panthenol, tocopheryl acetate, kyselina octová, benzylalkohol, triethylenglykol, propylenglykol, CI 42090, CI 17201	5,6	není dostupný

*Značka Natrue.org neobsahuje syntetické vonné, barvicí ani konzervační látky, látky na bázi minerálních olejů, geneticky modifikované složky a silikony. 98 % složek je klasifikováno jako biologicky rozložitelných. H318, H319 – způsobuje vážné podráždění očí; H412 – škodlivý pro vodní organismy, s dlouhodobými účinky.

pH pracovních roztoků bylo dle potřeby upraveno pomocí 0,1 M NaOH a HCl na hodnotu $7,5 \pm 0,5$ v souladu s kritérii validity standardizovaných zkušebních protokolů. Tímto krokem byl eliminován vliv extrémní acidity či alkalinity produktů, který by mohl vyvolávat nespécifickou toxickou odezvu nezávislou na účinku obsažených látek.

Biotesty byly provedeny v akreditované laboratoři s implementovaným systémem kontroly kvality, zahrnujícím pravidelné stanovení toxicity referenční látky (dichroman draselný) pro ověření kondice testovacích organismů. Výsledky referenčních testů potvrdily, že citlivost použitých kultur odpovídala požadavkům příslušných norem.

Test inhibice luminiscence bakterií *Vibrio fischeri*

Akutní toxicita vůči mořským luminiscenčním bakteriím byla stanovena podle normy ISO 11348-2 s využitím kmene *Vibrio fischeri* [20]. Test byl prováděn pomocí měřicího systému LumiStox 300 (DrLange), který zahrnuje inkubační jednotku a luminometr. Osmotický tlak vzorků byl upraven přidávkem NaCl na finální koncentraci 2 %. Expozice probíhala při stabilní teplotě $15 \pm 0,2$ °C a pH 7,0 po dobu 15 a 30 minut. Cílovým parametrem byla hodnota EC_{50} , představující koncentraci způsobující 50% pokles intenzity světelné emise bakterií ve srovnání s kontrolou, vypočítaná ze šesti koncentračních bodů v rozpětí 1–200 mg/l.

Test akutní toxicity na perloočce *Daphnia magna*

Stanovení akutní imobilizace sladkovodního koryše *Daphnia magna* (Straus) bylo provedeno v souladu s metodikou ČSN EN ISO 6341 [21]. K testování bylo použito 20 jedinců mladších 24 hodin. Testy probíhaly ve statickém uspořádání po dobu 48 hodin v nádobách s 50 ml testovacího roztoku bez krmení a provzdušňování. Teplota byla udržována v rozmezí 18–20 °C s fotoperiodou 16 hodin světla a osm hodin tmy. Jako cílový parametr byly stanoveny hodnoty EC_{50} po 24 h a 48 h, definované jako koncentrace produktu způsobující imobilizaci u 50 % exponovaných jedinců. Pro stanovení bylo využito pět až šest koncentračních hodnot v rozpětí 0,1 až 100 mg/l.

Test inhibice růstu řas *Desmodesmus subspicatus*

K hodnocení vlivu na primární producenty byl použit růstový test se sladkovodní řasou *Desmodesmus subspicatus* dle metodiky ČSN EN ISO 8692 [22]. Expozice probíhala v Erlenmeyerových baňkách s počáteční hustotou 10 000 buněk/ml v kultivačním ISO médiu po dobu 72 hodin. Kultivace probíhala při teplotě 23 ± 1 °C za kontinuálního osvětlení o intenzitě $9\,000 \pm 1\,000$ luxů a stálého míchání. Hustota řasových buněk byla měřena po 72 hodinách pomocí počítací komůrky. Výsledkem byla hodnota EC_{50} , vyjadřující 50% inhibici specifické rychlosti růstu řasové kultury, která byla vypočtena z pěti hodnot v rozpětí koncentrací 1–100 mg/l.

Test fyto toxicity na semenech *Sinapis alba*

Test na semenech hořčice bílé byl proveden podle *Metodického pokynu odboru odpadů ke stanovení ekotoxicity odpadů* [23]. Semena (30 ks/koncentrace/miska) byla ve dvou opakováních umístěna na filtrační papír v Petriho miskách a navlhčena 5 ml testovaného roztoku o požadované koncentraci. Inkubace probíhala v termostatu bez přístupu světla po dobu 72 ± 2 hodin, při teplotě 20 ± 2 °C. Sledovaným parametrem testu byla průměrná délka kořenů semen hořčice bílé po 72 hodinách, z níž byla vypočítána inhibice růstu.

Výpočet koncentrace tenzidů ve vzorku

Vzhledem k tomu, že složení produktů je uváděno v procentuálních rozmezech, bylo pro účely diskuze vypočítáno maximální teoretické množství tenzidů (tzv. worst-case scenario), přičemž tento výpočet představuje pouze teoretický odhad na základě deklarací na obalech, nikoli analyticky stanovenou hodnotu (tab. 1).

Vzorec pro výpočet koncentrace tenzidů v testovaném vzorku (C_{tenzid}):

$$C_{\text{tenzid}} [\text{mg/l}] = EC_{50} (\text{výrobku}) [\text{mg/l}] \times \text{obsah tenzidu} [\%]/100$$

Statistické zpracování dat

Testy byly provedeny ve třech nezávislých opakováních. Statistická analýza zahrnovala výpočet průměrů měření a směrodatných odchylek. Hodnoty EC_{50} byly vypočteny v programu GraphPad Prism (GraphPad Software) pomocí čtyřparametrické logistické křivky využívající nelineární regresí. Statistická významnost rozdílů mezi průměrnou hodnotou inhibice u testovaných roztoků a negativní kontrolou byla posuzována na hladině významnosti $\alpha = 0,05$ ($p < 0,05$) pomocí Studentova t-testu.

VÝSLEDKY

Validita biotestů a celkový ekotoxikologický profil

Z výsledků stanovení hodnot EC_{50} (tab. 2) a inhibice při limitní koncentraci 100 mg/l (tab. 3) vyplývá, že citlivost testovaných organismů k detergentní zátěži klesala v pořadí: perloočka *Daphnia magna* > řasa *Desmodesmus subspicatus* > bakterie *Vibrio fischeri* > hořčice *Sinapis alba*.

V rámci provedené baterie biotestů vykazovala semena hořčice bílé (*Sinapis alba*) nejvyšší míru tolerance k testovaným produktům. U žádného z osmi hodnocených vzorků nebylo v testovaném koncentračním rozmezí dosaženo 50% inhibice růstu kořene, a všechny hodnoty EC_{50} jsou proto definovány jako > 100 mg/l. Podle klasifikačních standardů GHS a CLP tak testované produkty z hlediska fyto toxicity nesplňují kritéria pro klasifikaci jako akutně nebezpečné pro tento indikátor.

Při nejvyšší testované koncentraci 100 mg/l byla zaznamenána velmi nízká průměrná odezva, která nepřesáhla hranici 13 %. Výsledky statistického vyhodnocení pomocí Studentova t-testu prokázaly, že se naměřené hodnoty statisticky významně nelišily od negativní kontroly ($p > 0,05$). Tato statistická nevýznamnost je dána především vyšší variabilitou naměřených dat, kdy hodnoty směrodatných odchylek (SD) často převyšovaly průměrný inhibiční efekt.

U poloviny testovaných vzorků byla při koncentraci 100 mg/l zaznamenána negativní inhibice, tedy mírná stimulace růstu kořene. Nejvýraznější stimulační efekt byl pozorován u tablet do myčky EKO ($-12,8 \pm 18,3$ %) a kapslí do myčky Normal ($-6,17 \pm 12,2$ %). Tato odezva pravděpodobně souvisí s živinovým efektem některých složek (např. fosfonátů či rostlinných proteinů) při nízkých koncentracích, který u odolnějších organismů, jako je *S. alba*, stírá rozdíl oproti růstu v kontrolním médiu.

Zjištěná vysoká tolerance a absence negativního vlivu na počáteční vývojové fáze jsou v plném souladu s výzkumy, jež potvrzují, že detergenty v běžných koncentracích klíčivost semen neovlivňují [7, 24, 25]. Studie Uzma et al. (2018) [24] na kukuřici prokázala, že detergenty v rozmezí 1–500 mg/l nemají na klíčivost žádný statisticky významný vliv. Podobně Khan et al. (2018) [25] uvádějí, že koncentrace tenzidů do 100 mg/l neovlivňují klíčení salátu ani řeřichy.

Tab. 2. Výsledky testů akutní ekotoxicity vyjádřené hodnotou EC_{50} [mg/l] pro vybrané bioindikátory
 Tab. 2. Results of acute ecotoxicity tests expressed as EC_{50} [mg/L] for selected bioindicators

	Prací gel EKO	Prací gel Normal	Tablety do myčky EKO	Kapsle do myčky Normal	Mycí prostředek EKO	Mycí prostředek Normal	Šampon EKO	Šampon Normal
DS 72 h	3,93	25,3	73,3	> 100	> 100	> 100	> 100	17,3
DM 24 h	8,39	61,8	75,1	73,5	> 100	> 100	> 100	49,4
DM 48 h	5,49	20,1	76,5	52,3	> 100	> 100	59,5	19,8
SA 72 h	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100	> 100
VF 30 min	21,5	79,6	>100	> 100	> 100	> 100	> 100	54,5

DS – řasa *Desmodesmus subspicatus*, DM – perloočka *Daphnia magna*, SA – klíčení rostlin *Sinapis alba*, VF – bakterie *Vibrio fischeri*.

Tab. 3. Výsledky testů akutní ekotoxicity vyjádřené jako inhibiční účinek [%] při koncentraci 100 mg/l (průměr ± SD)
 Tab. 3. Results of acute ecotoxicity tests expressed as inhibitory effect [%] at a concentration of 100 mg/L (mean ± SD)

	Prací gel EKO	Prací gel Normal	Tablety do myčky EKO	Kapsle do myčky Normal	Mycí prostředek EKO	Mycí prostředek Normal	Šampon EKO	Šampon Normal
DS 72 h	99,0 (±1,27)	93,2 (± 6,16)	89,6 (± 8,80)	14,7 (± 20,1)	24,6 (± 11,3)	4,68 (± 8,12)	-59,5 (± 59,5)	99,9 (± 0,09)
DM 24 h	100 (± 0,0)	70,0 (± 30,8)	100 (± 0,0)	75,0 (± 20,7)	40,0 (± 49,0)	6,7 (± 11,5)	43,3 (± 27,3)	100 (± 0,0)
DM 48 h	100 (± 0,0)	84,0 (± 15,2)	100 (± 0,0)	94,0 (± 8,94)	46,0 (± 50,8)	13,3 (± 23,1)	86,0 (± 11,4)	100 (± 0,0)
SA 72 h	-0,07 (± 4,91)	7,77 (± 3,29)	-12,8 (± 18,3)	-6,17 (± 12,2)	5,48 (± 9,02)	7,03 (± 14,0)	13,0 (± 25,4)	8,18 (± 9,08)
VF 30 min	89,1 (± 0,33)	55,0 (± 1,25)	16,1 (± 3,16)	10,1 (± 0,20)	11,6 (± 6,92)	9,10 (± 6,18)	12,6 (± 5,87)	78,5 (± 1,60)

DS – řasa *Desmodesmus subspicatus*, DM – perloočka *Daphnia magna*, SA – klíčení rostlin *Sinapis alba*, VF – bakterie *Vibrio fischeri*.

Tato odolnost je v odborné literatuře připisována bariérové funkci osemení, které účinně chrání rostlinné embryo před průnikem toxických látek z vnějšího prostředí [25].

Komparativní hodnocení produktů

Prací gely

Kategorie pracích gelů přinesla nejvíce překvapivé výsledky, kdy ekologicky certifikovaný produkt (prací gel EKO) vykázal významně vyšší toxicitu než varianta konvenční (prací gel Normal). Prací gel EKO byl klasifikován jako vysoce toxický pro řasy (72h EC_{50} 3,93 mg/l) i perloočky (48h EC_{50} 5,49 mg/l), což představuje přibližně čtyřnásobně vyšší toxický tlak ve srovnání s konvenčním gelem, jehož hodnoty EC_{50} se pohybovaly v rozmezí 20,1–25,3 mg/l. Při limitní koncentraci 100 mg/l způsobil prací gel EKO totální imobilizaci perlooček (100 %) i inhibici růstu řas (99 %), což ve spojení s nízkými hodnotami EC_{50} prokazuje vysokou míru akutní nebezpečnosti tohoto ekoprojektu.

Šampony

U kategorie šamponů byl trend opačný a potvrdil environmentální šetrnost certifikované kosmetiky. Šampon EKO vykázal nízkou akutní toxicitu s hodnotami EC_{50} u většiny organismů nad 100 mg/l (pouze perloočky 48h EC_{50} 59,5), zatímco šampon Normal byl toxický pro řasy (EC_{50} 17,3 mg/l) i perloočky (48h EC_{50} 19,8 mg/l).

U EKO šamponu byla u řas v koncentraci 100 mg/l zaznamenána růstová stimulace (-59,5 %), což indikuje živinový efekt obsažených rostlinných extraktů a proteinů (např. hydrolyzovaný kukuřičný, pšeničný a sójový protein).

Konvenční varianta naproti tomu obsahovala sodium laureth sulfát (SLES), který přispívá k vysoké inhibiční síle. Literatura uvádí EC_{50} SLES pro *Daphnia magna* 2–20 mg/l [26, 27]. Obsah SLES v šamponu není znám, jelikož legislativa nevyžaduje uvádění procentuálních rozmezí tenzidů na obale a bezpečnostní list není pro tento typ produktu dostupný (tab. 1, tab. 4).

Prostředky do myček nádobí

Produkty určené do myček vykazovaly v rámci baterie biotestů střední míru toxicity, přičemž byly identifikovány významné rozdíly v citlivosti jednotlivých organismů. Nejcitlivějším indikátorem pro tuto kategorii byla perloočka *Daphnia magna*, u níž se hodnoty 48h EC_{50} pohybovaly v rozmezí 52,3 mg/l (kapsle do myčky Normal) až 76,5 mg/l (tablety do myčky EKO). Při limitní koncentraci 100 mg/l způsobil oba produkty celkovou imobilizaci perlooček (94 % u konvenčních kapslí a 100 % u EKO tablet), což naznačuje vysoké riziko pro vodní bezobratlé v případě lokálního přetížení recipientu.

Výrazný rozdíl byl zaznamenán v účinku na řasy *Desmodesmus subspicatus*. Zatímco konvenční kapsle vykazovaly při 100 mg/l pouze mírnou inhibici (14,7 %), EKO varianta vyvolala silné potlačení růstu (89,6 %), což koresponduje s naměřenou hodnotou EC_{50} 73,3 mg/l. Tento paradox je pozoruhodný, neboť konvenční produkt obsahuje teoreticky vyšší nálož tenzidů (15 %) i bělicích činidel (15–30 %) než EKO tablety (5 % tenzidů a 5–15 % bělicidel). Toxicita EKO varianty je pravděpodobně ovlivněna jinými specifickými aditivy, která jsou pro řasy stresovým faktorem.

U bakterií *Vibrio fischeri* byla akutní toxicita u obou vzorků zanedbatelná, v koncentraci 100 mg/l byla inhibice nižší než 16 %, a tudíž hodnoty EC_{50} > 100 mg/l.

Tab. 4. Výpočet teoretického maximálního obsahu tenzidů v produktech a normalizace toxicity (EC_{50}) na účinnou složku pro *Daphnia magna*
 Tab. 4. Calculation of theoretical maximum surfactant content in products and normalization of toxicity (EC_{50}) to active ingredient for *D. magna*

Typ produktu	Prací gel EKO	Prací gel Normal	Tablety do myčky EKO	Kapsle do myčky Normal	Mycí prostředek EKO	Mycí prostředek Normal	Šampon EKO	Šampon Normal
Aniontové tenzidy [%]	5–15	5–15	neuveďeno	neuveďeno	10–25 (SLES)	< 5	přítomny*	přítomny*
Neiontové tenzidy [%]	15–30	< 5	< 5	5–15	0,1–1	neuveďeno	přítomny*	neuveďeno
Ostatní tenzidy (mýdlo, amfoterní) [%]	< 5 (mýdlo)	neuveďeno	neuveďeno	neuveďeno	1–3 (amfoterní)	neuveďeno	neuveďeno	přítomny*
Celkový max. obsah tenzidů [%]	50	20	5	15	29	5	N/A**	N/A**
Koncentrace čistých tenzidů při EC_{50} [mg/l] pro <i>D. magna</i>	2,75	4,02	3,83	7,85	NS***	NS***	NS***	NS***

* Látky jsou uvedeny v seznamu složek bez procentuálního rozmezí. ** U kosmetických přípravků (šampony) legislativa nevyžaduje uvádění procentuálních rozmezí tenzidů na obale, proto nelze celkový obsah tenzidů vyčíslit. *** Nelze stanovit.

Mycí prostředky

Prostředky na ruční mytí nádobí byly identifikovány jako environmentálně nejšetrnější kategorie v rámci celé studie. U všech testovaných trofických úrovní byly stanovené hodnoty EC_{50} konzistentně vyšší než 100 mg/l, což tyto produkty podle kritérií nařízení CLP klasifikuje jako látky bez akutní nebezpečnosti pro vodní prostředí.

Při nejvyšší testované koncentraci 100 mg/l byly naměřeny pouze nízké úrovně inhibice: u perlooček vyvolal konvenční prostředek inhibici pouze 13,3 %, zatímco EKO varianta 46 %. Vyšší efekt u mycího prostředku EKO lze přisoudit vyššímu deklarovanému obsahu aniontových tenzidů SLES (až 25 %) ve srovnání s konvenčním vzorkem (< 5 %).

Výsledky testů pro bakterie a řasy ukazují, že u obou typů produktu se inhibice pohybovala v rozmezí 4,6–24,6 %, přičemž nejnižší odezva byla zaznamenána u bakterií *Vibrio fischeri* (9,1–11,6 %).

Statistické vyhodnocení pomocí Studentova t-testu potvrdilo, že u většiny organismů (s výjimkou perlooček u EKO varianty) se naměřený efekt při koncentraci 100 mg/l statisticky významně neliší od negativní kontroly ($p > 0,05$). Výsledky potvrzují, že i přes přítomnost látek jako SLES nebo konzervačních látek (isothiazolinony) je finální toxicita těchto směsí díky zředění v pracovních roztocích velmi nízká.

DISKUZE

Výsledky této studie ukázaly výrazný rozdíl v akutní toxicitě mezi jednotlivými kategoriemi detergentů, přičemž nejvýraznější efekt byl zaznamenán u pracích gelů. Ekologicky certifikovaný prací gel vykázal o řád vyšší toxicitu vůči testovaným vodním organismům než jeho konvenční varianta. Hlavním faktorem této zvýšené toxicity však pravděpodobně nebyla samotná povaha „EKO“ formulace, nýbrž především vysoký celkový obsah tenzidů, který u EKO varianty dosahoval teoretického maxima až 50 %, zatímco u konvenčního produktu přibližně 20 % (tab. 4).

Po přepočtu hodnot EC_{50} na koncentraci čistých tenzidů se toxický profil obou produktů výrazně přiblížil. Pro *Daphnia magna* dosahovala koncentrace tenzidů při EC_{50} hodnoty přibližně 2,75 mg/l u EKO gelu a 4,02 mg/l u konvenční varianty. Tento výsledek naznačuje, že povrchově aktivní látky představují v obou typech formulací dominantní faktor určující akutní toxicitu směsi. Zjištění zároveň potvrzuje, že i látky s relativně příznivou biologickou rozložitelností mohou

při vysoké koncentraci ve finálním produktu vyvolávat významný toxický tlak na vodní organismy. Naměřené hodnoty EC_{50} se navíc blíží environmentálně relevantním hladinám tenzidů, které se obvykle na odtocích ČOV pohybují pod hodnotou 1 mg/l [8, 18, 31], ale naměřeny byly i hodnoty aniontových tenzidů přes 8 mg/l [18]. Literatura uvádí, že k chronickým toxickým účinkům na vodní biotu dochází u tenzidů už při koncentracích kolem 0,1 mg/l, což naznačuje reálné riziko akutního i chronického toxického vlivu již při mírném lokálním přetžení recipientu.

Nicméně výsledky normalizace toxicity na čistý tenzid je nutné interpretovat s vědomím značné nejistoty, která vyplývá z praxe výrobců deklarovat složení pouze v širokých procentuálních rozmezích. Použitý odhad (Worst-Case Scenario) počítající s maximální možnou koncentrací může vést k teoretickému nadhodnocení obsahu tenzidů. Tato netransparentnost složení u komerčních směsí, kombinovaná s nemožností vyčíslit obsah tenzidů u šamponů, potvrzuje, že pro vodohospodářskou praxi je validnějším nástrojem přímé testování finálních formulací jako celku, které jako jediné dokáže zachytit synergické interakce všech aditiv.

Mírně vyšší toxicitu EKO gelu i po přepočtu na obsah tenzidů lze pravděpodobně přičíst synergickému působení dalších aditiv, zejména enzymů. Např. proteolytický enzym subtilisin je klasifikován jako látka vysoce toxická pro vodní organismy (H400) a literatura uvádí jeho schopnost poškozovat buněčné struktury již při relativně nízkých koncentracích [6]. Tyto výsledky podporují předpoklad, že výsledná toxicita detergentních formulací je určována nejen koncentrací tenzidů, ale také komplexními interakcemi mezi jednotlivými složkami směsi.

Nezbytnost testování finálních produktů jako celku, nikoli pouze jejich izolovaných složek, potvrzuje i paradox pozorovaný u tablet do myčky. Zde EKO varianta vyvolala u řas silnou inhibici (89,6 %), zatímco konvenční kapsle pouze mírnou (14,7 %), a to navzdory faktu, že konvenční produkt obsahuje trojnásobně vyšší nálož tenzidů (15 % vs. 5 %). To dokládá, že v komplexních směsích dochází k synergickým interakcím, jež mohou výsledný toxický účinek zesílit nad úroveň predikovanou z vlastností jednotlivých komponent.

V kontextu diskuze o environmentálních dopadech detergentů hraje zásadní roli interpretace označení „EKO“, které spotřebitelé vnímají jako příslib nižší toxicity a vysoké biologické rozložitelnosti [5, 27]. Průzkumy trhu naznačují, že více než 50 % zákazníků je ochotno si za takové produkty připlatit. Přesto však v literatuře panuje oprávněná skepse vůči marketingovým tvrzením, jež nejsou podložena nezávislou certifikací, neboť proprietární složení produktů často neumožňuje veřejnou kontrolu všech obsažených látek [5].

Navzdory přísným regulačním požadavkům pro udělení ekoznačky EU Ecolabel, které se primárně zaměřují na biologickou rozložitelnost a environmentální osud jednotlivých složek, výsledky této studie potvrzují, že environmentální označení nemusí být absolutní zárukou nižší akutní toxicity finální formulace pro všechny trofické úrovně. Toto zjištění je v souladu se závěry Graye (2022), jenž rovněž dokumentoval případy, kdy byly „EKO“ produkty pro vodní bezobratlé toxicitější než jejich konvenční alternativy [5]. Shodu lze nalézt i u Igos (2014), která uvádí, že u tablet do myček nevykazovala formulace s ekoznačkou významnou výhodu oproti standardním bezfosfátovým produktům, přičemž jejich ekotoxický potenciál byl téměř identický [28].

Tato zjištění potvrzují nutnost testování celých směsí, neboť synergické interakce mezi povolenými aditivami (např. enzymy, vonnými látkami či konzervanty) mohou modifikovat výslednou toxicitu nad úroveň predikovanou z jednotlivých složek [6, 16].

Předložená studie se primárně zaměřuje na akutní ekotoxicitu finálních formulací, což představuje nezbytný základní krok pro hodnocení environmentálních rizik, avšak s určitými metodickými limitacemi. Hlavní omezení spočívá v absenci dat o chronické toxicitě, která je pro detergenty jakožto pseudo-perzistentní polutanty klíčová; dlouhodobá expozice subletálními koncentracím v recipientu může totiž ovlivňovat reprodukci, růst a fyziologické funkce bioty způsobem, který krátkodobé testy nedokážou zachytit [9, 29]. Studie se dále nezabývala hodnocením genotoxicity a mutagenity, přičemž odborná literatura potvrzuje, že komplexní směsi tenzidů a specifických aditiv mohou indukovat poškození DNA nebo zvyšovat frekvenci mikrojader i při koncentracích, jež nezpůsobují okamžitý úhyn [6, 16, 30]. Dalšími limitujícími faktory jsou neprobádaný potenciál pro endokrinní disrupci [31, 32] a absence sledování toxicity biodegradabilních meziproduktů, které mohou v některých případech vykazovat vyšší nebezpečnost než mateřské látky [11, 16]. Je rovněž vhodné uvést, že v rámci jednotlivých kategorií byl testován omezený počet přípravků, což může do určité míry limitovat zobecnitelnost získaných výsledků; pozorované rozdíly proto nelze jednoznačně interpretovat jako obecně platný trend. Rozšíření baterie testů o výše zmíněné aspekty bude předmětem navazujících studií, která umožní vytvořit komplexnější obraz o dlouhodobém environmentálním dopadu moderních detergentů.

ZÁVĚR

Z výsledků této studie vyplývá, že pro vodohospodářskou praxi a hodnocení environmentálních rizik je nezbytné testovat finální produkty jako celek, nikoli spoléhat pouze na teoretické výpočty (např. kritický objem zředění – CDV) nebo marketingová označení [16]. Experimentální data potvrzují, že označení „EKO“ nelze automaticky ztotožňovat s nízkou akutní toxicitou, což je v souladu se zjištěními dřívějších studií, jež rovněž dokumentovaly případy vyšší toxicity „zelených“ produktů pro vodní organismy [5]. Zatímco certifikace EU Ecolabel garantuje lepší biodegradabilitu a omezení perzistentních látek, v případě nárazového úniku neředěných produktů do recipientu nemusí tento benefit znamenat nižší riziko pro biotu. Hlavním faktorem ovlivňujícím toxicitu zůstávají vysoce koncentrované formulace, u nichž je vnitřní nebezpečnost směsi dána extrémní náloží tenzidů (až 50 %) a přítomností specifických aditiv, která mohou kvůli synergickým interakcím poškozovat buněčné membrány i při nízkých koncentracích. Studie tak potvrzuje nezbytnost využívání baterie biotestů pro validaci environmentálních tvrzení výrobců v rámci regulačních procesů, neboť pouze přímé testování komplexních směsí umožní zachytit reálný toxický tlak na vodní ekosystémy [16].

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci dlouhodobých výzkumných aktivit VÚV TGM podpořených z prostředků institucionální podpory Ministerstva životního prostředí ČR pro dlouhodobou koncepci rozvoje výzkumné organizace.

Literatura

- [1] GHEORGHE, S. et al. Comparative Toxicity Effects of Cleaning Products on Fish, Algae and Crustacea. In: *International Symposium „The Environment and the Industry“; SIMI 2019 Proceedings Book*. Bucharest, Romania, September 26–27, 2019. 2019, s. 165–171.
- [2] MNIF, I. et al. Biosurfactants as Emerging Substitutes of Their Synthetic Counterpart in Detergent Formula: Efficiency and Environmental Friendly. *Journal of Polymers and the Environment*. 2023, 31, 1–13. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02778-1>
- [3] Evropský parlament a Rada. Nařízení (ES) č. 1272/2008 o klasifikaci, označování a balení látek a směsí (CLP). *Úřední věstník Evropské unie*. L 353/1.
- [4] Evropský parlament a Rada. Nařízení (ES) č. 1907/2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek (REACH). *Úřední věstník Evropské unie*. L 396/1.
- [5] GRAY, A. D. et al. Are Green Household Consumer Products Less Toxic than Conventional Products? An Assessment in Fresh and Saltwater Using *Daphnia magna* and *Americamysis bahia*. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2022, 41(10), s. 2 444–2 453. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/etc.5435>
- [6] SOBRINO-FIGUEROA, A. S. Toxic Effect of Commercial Detergents on Organisms from Different Trophic Levels. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018, 25, s. 13 283–13 291. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7861-0>
- [7] TKACHUK, N., ZELENA, L. Phytotoxicity of the Aqueous Solutions of Some Dishwashing Detergents for Dishwashers with Phosphonates and without Phosphates. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2025, 59(11–14), s. 574–582. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10934529.2025.2450920>
- [8] BADMUS, S. O. et al. Environmental Risks and Toxicity of Surfactants: Overview of Analysis, Determination, and Remediation Techniques. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021, 28, s. 62 085–62 104. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16483-w>
- [9] LIANG, W. et al. Prediction of Freshwater Ecotoxicological Hazardous Concentrations of Major Surfactants Using the QSAR–ICE–SSD Method. *Environment International*. 2024, 185, 108472. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108472>
- [10] LECHUGA, M. et al. Acute Toxicity of Anionic and Non-Ionic Surfactants to Aquatic Organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016, 125, s. 1–8. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jecoenv.2015.11.027>
- [11] RICHARDSON, S. D., KIMURA, S. Y. Emerging Environmental Contaminants: Challenges Facing Our Next Generation. *Environmental Technology & Innovation*. 2017, 8, s. 40–56. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.04.002>
- [12] Evropská komise. Rozhodnutí Komise (EU) 2017/1214, kterým se stanoví ekologická kritéria pro udělování ekoznačky EU mycím prostředkům pro ruční mytí nádobí. *Úřední věstník Evropské unie*, 2017. L 180/1.
- [13] Evropská komise. Rozhodnutí Komise (EU) 2017/1216, kterým se stanoví ekologická kritéria pro udělování ekoznačky EU mycím prostředkům do myček nádobí. *Úřední věstník Evropské unie*, 2017. L 180/31.
- [14] Evropská komise. Rozhodnutí Komise (EU) 2017/1218, kterým se stanoví ekologická kritéria pro udělování ekoznačky EU pracím prostředkům. *Úřední věstník Evropské unie*, 2017. L 180/63.
- [15] Evropský parlament a Rada. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 66/2010 ze dne 25. listopadu 2009 o ekoznačce EU. *Úřední věstník Evropské unie*, 2009. L 27/1.
- [16] PEDRAZZANI, R. et al. Biodegradability, Toxicity and Mutagenicity of Detergents: Integrated Experimental Evaluations. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2012, 84, s. 274–281. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jecoenv.2012.07.023>
- [17] BAVCON KRALJ, M. et al. Dish Handwashing: An Overlooked Source of Contamination. *Environmental Chemistry Letters*. 2019, 18, s. 181–185. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00918-5>
- [18] TABAK, H. H. et al. Measurement of Nonionic Surfactants in Aqueous Environments. *EPA Municipal Environmental Research Laboratory Report*, 1972.
- [19] MÖSCHE, M., MEYER, U. Toxicity of Linear Alkylbenzene Sulfonate in Anaerobic Digestion: Influence of Exposure Time. *Water Research*. 2002, 36(13), s. 3 253–3 260. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00034-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00034-9)
- [20] ČSN EN ISO 11348-2 *Jakost vod – Stanovení inhibičního účinku vzorků vody na světelnou emisi Vibrio fischeri (Zkouška na luminescenčních bakteriích) – Část 2: Metoda s kapalně sušenými bakteriemi*.
- [21] ČSN EN ISO 6341:2013. *Jakost vod — Stanovení inhibice pohyblivosti Daphnia magna Straus (Cladocera, Crustacea) — Zkouška akutní toxicity*.
- [22] ČSN EN ISO 8692:2012. *Jakost vod – Zkouška inhibice růstu sladkovodních řas s jednobuněčnými zelenými řasami*.

[23] Ministerstvo životního prostředí. Metodický pokyn odboru odpadů ke stanovení ekotoxicity odpadů. *Věstník Ministerstva životního prostředí*. 2007, XVII(4), s. 1–25.

[24] UZMA, S. et al. Phytotoxic Effects of Two Commonly Used Laundry Detergents on Germination, Growth, and Biochemical Characteristics of Maize (*Zea mays* L.) Seedlings. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2018, 190, 651. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7031-6>

[25] KHAN, A. H. et al. Uptake and Phytotoxic Effect of Benzalkonium Chlorides in *Lepidium sativum* and *Lactuca sativa*. *Journal of Environmental Management, Volume 206*, 2018, s. 490–497. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.077>

[26] SAYEED, S. Y., GOYAL, A. Eco-Friendly Biosurfactants in Shampoo – Green Chemistry Innovations for Sustainable Personal Care. *Journal of Dermatologic Science and Cosmetic Technology*. 2025, 2(3), 100105. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jdsct.2025.100105>

[27] KANYAMA, T. et al. Natural Soap is Clinically Effective and Less Toxic and More Biodegradable in Aquatic Organisms and Human Skin Cells than Synthetic Detergents. *PLoS One*. 2025, 20(6), e0324842. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324842>

[28] IGOS, E. et al. Development of USEtox Characterisation Factors for Dishwasher Detergents Using Data Made Available. *Chemosphere*. 2014, 100(8), s. 160–166. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.11.041>

[29] LAVORGNA, M. et al. Toxicity and Genotoxicity of the Quaternary Ammonium Compound Benzalkonium Chloride (BAC) Using *Daphnia magna* and *Ceriodaphnia dubia* As Model Systems. *Environmental Pollution*. 2016, 210, s. 34–39. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.042>

[30] HOROZAL, A., AKSOY, Ö. Evaluation of the Genotoxicity of Some Standard and Eco-Friendly Detergents with *Vicia faba*. *Caryologia*. 2020, 73(4), s. 129–139. Dostupné z: <https://doi.org/10.13128/caryologia-856>

[31] ISIDORI, M. et al. Toxicity on Crustaceans and Endocrine Disrupting Activity on *Saccharomyces cerevisiae* of Eight Alkylphenols. *Chemosphere*. 2006, 64(1), s. 135–143. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.10.047>

[32] SEELAND, A. et al. Acute and Chronic Toxicity of Benzotriazoles to Aquatic Organisms. *Environmental Science and Pollution Research*. 2011, 19, 1781–1790. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0705-z>

Autorka

Mgr. Pavla Kovaláková, Ph.D.

✉ pavla.kovalakova@vuv.cz

ORCID: 0000-0001-8294-5101

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

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.004

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

MARKETING VS. REALITY: USING A BATTERY OF BIOASSAYS TO ASSESS THE ACUTE TOXICITY OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY DETERGENTS

KOVALÁKOVÁ, P.

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

Keywords: acute toxicity – detergents – surfactants – EU Ecolabel – water flea *Daphnia magna* – bacterium *Vibrio fischeri* – green alga *Desmodesmus subspicatus* – battery of bioassays – environmental risk

Household detergents represent an important source of complex mixtures of anthropogenic substances entering municipal wastewater systems and subsequently aquatic receiving environments. This study presents a comparative assessment of the acute ecotoxicity of conventional detergents and their environmentally certified counterparts (EU Ecolabel) using a battery of bioassays representing different trophic levels. The tests included the luminescent bacterium *Vibrio fischeri*, the water flea *Daphnia magna*, the green alga *Desmodesmus subspicatus*, and seeds of white mustard *Sinapis alba*.

The determined EC_{50} values and inhibition levels at a concentration of 100 mg/L revealed substantial variability in the toxic effects of the final formulations, which often did not correlate with the “eco” marketing label. The most notable finding was the high acute toxicity of an environmentally certified laundry gel towards algae (72h EC_{50} 3.93 mg/L) and daphnia (48h EC_{50} 5.49 mg/L), exceeding the toxicity of the conventional product by an order of magnitude. This effect can likely be explained by the high total surfactant content in the eco-product (up to 50 %) and potential synergistic interactions with additional additives such as enzymes. In contrast, within the shampoo category, the eco-variant ($EC_{50} > 100$ mg/L) showed lower toxicity due to the replacement of aggressive sulfate surfactants with non-ionic surfactants based on Coco-Glucoside.

From a methodological perspective, the study confirmed that *Daphnia magna* and *Desmodesmus subspicatus* are the most sensitive bioindicators of detergent exposure, while *Sinapis alba* seeds exhibited a considerably higher tolerance to acute exposure. The results highlight the importance of experimental testing of complete product formulations, as regulatory criteria of the EU Ecolabel primarily focused on biodegradability do not necessarily guarantee lower acute toxicity of the mixture. Due to their widespread and continuous use, detergents may behave as pseudopersistent pollutants in aquatic environments, maintaining a relatively constant toxic pressure on aquatic biota despite the theoretical biodegradability of their individual components.



Metodika adaptivního řízení vodních nádrží během hydrologického sucha

PAVEL FOŠUMPAUR, TEREZA KOVÁČOVÁ

Klíčová slova: adaptivní řízení — vodní nádrž — hydrologické sucho — klimatická změna — dispečerský graf — zabezpečení odběru

ABSTRAKT

Článek představuje metodiku adaptivního řízení vodních nádrží určenou pro zajištění spolehlivého zásobování vodou v podmínkách hydrologického sucha a změny klimatu. Navržený přístup kombinuje hydrologické modelování, scénáře klimatické změny a optimalizaci dispečerských grafů s regulačními stupni. Systém řízení umožňuje flexibilní omezení vodárenských odběrů a úpravu minimálních zůstatkových průtoků v závislosti na aktuálním stavu nádrže. Pilotní ověření metodiky proběhlo na vybraných českých nádržích (Švihov, Klíčava, Žlutice, Obecnice, Pilská, Láz, Vrchlice) pro současné klimatické podmínky a výhledy do roku 2050 a 2100, přičemž hydrologické vstupy byly modelovány pomocí modelů GR4J a CemaNeige, kalibrovaných na historických datech a korigovaných pro budoucí klimatické scénáře. Výsledky ukazují, že adaptivní řízení významně zvyšuje zabezpečení vodárenských odběrů a minimalizuje riziko hlubokých poruch dodávek vody, přičemž snižuje kolísání hladiny v nádržích s příznivými dopady na kvalitu vody. Oproti klasickému řízení na konstantní odběry umožňuje tento přístup včasnou a postupnou regulaci odběrů, čímž se rozkládají dopady sucha v čase a zvyšuje se robustnost provozu nádrží. Navržený rámec představuje univerzálně aplikovatelné nestrukturální opatření, plně kompatibilní se stávající legislativou, podporující dlouhodobě udržitelné hospodaření s vodními zdroji a poskytující praktický nástroj pro úpravy manipulačních řádů vodních nádrží.

ÚVOD

Hydrologické sucho představuje v podmínkách střední Evropy jednu z nejvýznamnějších výzev současného vodního hospodářství. Hydrologické sucho je charakterizováno dlouhodobým poklesem průtoků, snížením zásob podzemních vod a omezenou obnovou akumulovaných zdrojů. Jeho dopady jsou zvláště citelné u vodárenských nádrží, jejichž provoz je založen na předpokladu relativně stabilního hydrologického režimu a dlouhodobé statistické stacionarity vstupních řad. Tento předpoklad je však v posledních desetiletích systematicky narušován probíhající klimatickou změnou.

Projekce regionálních klimatických modelů indikují pro území České republiky (ČR) postupný nárůst teploty vzduchu, změny sezonního rozdělení srážek a zvýšení evapotranspirace. Tyto změny se promítají do poklesu průměrných letních průtoků, častějšího výskytu víceletých suchých epizod a vyšší variability odtoku. Extrémní období let 2014–2020 ukázalo, že i v tradičně vodohospodářsky stabilních oblastech může dojít k výraznému poklesu hladin vodárenských nádrží a k ohrožení zabezpečení odběrů. Z hlediska legislativního rámce je problematika adaptace na sucho akcentována např. implementací Rámcové směrnice o vodách, která zdůrazňuje princip udržitelného nakládání s vodními

zdroji a potřebu integrovaného řízení povodí. Současně národní strategie adaptace na změnu klimatu kladou důraz na posilování odolnosti vodohospodářské infrastruktury vůči extrémním hydrologickým jevům. V tomto kontextu nabývá na významu nejen výstavba nových vodních děl, ale především optimalizace provozu stávajících nádrží. Tradiční manipulační řády vodárenských nádrží jsou obvykle založeny na pevných odběrech a předem definovaných dispečerských křivkách, jejichž parametry vycházejí z historických dat. Takový přístup je relativně robustní v podmínkách stacionárního klimatu, avšak při systematickém poklesu přítoků může vést k nárůstu nedostatkových objemů, k porušení požadované zabezpečení odběrů a k výraznému kolísání hladiny. Tyto poklesy hladiny mají sekundární dopady nejen na vodárenské využití, ale i na morfologii břehové zóny, tepelný a kyslíkový režim nádrže a procesy eutrofizace. Kolísání hladiny tak může negativně ovlivnit jakost surové vody a zvýšit nároky na její úpravu.

Motivací předkládaného výzkumu je potřeba nalézt metodický rámec, jenž umožní pružnou reakci na měnící se hydrologické podmínky bez nutnosti nákladných stavebních zásahů. Adaptivní řízení vodních nádrží představuje perspektivní nestrukturální opatření spočívající v odstupňované regulaci odběrů a případné úpravě minimálních zůstatkových průtoků v závislosti na aktuálním stavu zásobního prostoru a očekávaném vývoji přítoků. Kromě zvýšení zabezpečení odběrů má tento přístup také potenciál stabilizovat kolísání hladiny v nádrži. Postupné a včasné omezení odběrů může zabránit hlubokým poklesům hladiny v závěru suchých období, čímž se omezuje rozvoj nežádoucích fyzikálně-chemických a biologických procesů ovlivňujících jakost vody. Cílem tohoto výzkumu je navrhnout a ověřit metodiku adaptivního řízení vodárenských nádrží během hydrologického sucha, založenou na kombinaci hydrologického modelování, scénářů klimatické změny a optimalizaci manipulačních pravidel. Dílčími cíli jsou: (1) kvantifikace dopadů výhledových klimatických scénářů na zabezpečení odběrů, (2) návrh systému regulačních stupňů a dispečerských křivek umožňujících postupné omezování odběrů a (3) porovnání účinnosti klasického a adaptivního provozního režimu z hlediska zabezpečení i stability hladiny. Výsledkem by měl být metodický nástroj aplikovatelný na různé typy vodárenských nádrží, který podpoří dlouhodobě udržitelné hospodaření s vodními zdroji v podmínkách zesilujícího hydrologického sucha a současně přispěje ke stabilizaci vnitřního prostředí nádrží z hlediska jakosti vody.

SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Adaptivní řízení vodních nádrží je v odborné literatuře reflektováno jako reakce na rostoucí hydrologickou nejistotu vyvolanou změnou klimatu, proměnlivými průtoky a narůstající frekvencí víceletých suchých období. Tradiční přístupy k řízení nádrží, které zachovávají konstantní manipulační pravidla odvozená

z historických hydrologických řad, poskytují dobrou vodohospodářskou stabilitu v podmínkách relativně stacionárního klimatu. Nicméně již od osmdesátých až devadesátých let se objevovaly první metodické práce, jež ve vodohospodářském kontextu začaly uvažovat flexibilitu provozu a pravidla pro omezení odběrů v obdobích sucha za účelem rovnoměrného rozložení vodních deficitů v čase. Tyto koncepce byly odvozeny z ekonomických teorií a následně aplikovány na ověřování strategií provozu nádrží v klimaticky proměnlivých situacích [1]. Pravidla řízení často optimalizují ztrátovou funkci, která reprezentuje celkové finanční ztráty odběratelů z nedodávky vody. Již v roce 1982 prokázali Hashimoto a kol. [2], že při nelineární ztrátové funkci je včasné omezování odběrů výhodné, protože jednorázová hluboká nedodávka vody způsobuje větší škody než několik menších nedostatků rozložených v čase, jež dohromady představují stejný nedostatek [3]. Modely adaptivního řízení nádrží a vodohospodářských soustav byly v ČR poprvé studovány na Fakultě stavební ČVUT v Praze zásluhou Nacházela a Patery [4, 5].

Studie autorů Ahmadi, Haddad a Loaiciga [6] představuje jeden z prvních komplexních modelů adaptivního řízení pravidel provozu nádrží s ohledem na dopady klimatické změny. Autoři využili klimatické projekce pro střední a pozdní část 21. století a následně optimalizovali dispečerská pravidla tak, aby zvýšili spolehlivost a snížili zranitelnost provozu vodárenské nádrže při dlouhodobých suchých obdobích. Princip adaptace využil pro strategické řízení vodohospodářských soustav také Marton a kol. [7, 8].

V současné době se adaptivní řízení stalo předmětem širší pozornosti, zejména v kontextu kombinace klimatických scénářů, hydrologického modelování a optimalizačních metod. Výzkumy aplikují různé principy, včetně heuristických algoritmů, modelové prediktivního řízení a optimalizačních přístupů zaměřených na spolehlivost plnění zásobní funkce při budoucích hydrologických podmínkách [9]. Studie ukazují, že adaptivní provozní pravidla mohou významně zlepšit spolehlivost dodávek vody během sucha a současně omezit extrémní kolísání zásobních hladin [10].

Dalším významným směrem je výzkum optimalizačních strategií pro řízení víceúčelových nádrží. Např. studie [11] ukazuje, jak lze modifikovat pravidla řízení s využitím regulačních stupňů v reakci na víceleté suché periody, a tím zlepšit operativní účinnost systému. Moderní přístupy se také obracují k využití modelů strojového učení pro rozhodování o řízení nádrží, které reflektují komplexní interakce hydrologických vstupů a provozních omezení [12].

V ČR je implementace adaptivního řízení nádrží podpořena legislativními a strategickými dokumenty. Základ tvoří vodní zákon č. 254/2001 Sb., který stanoví zásady nakládání s vodami a manipulační řády vodních děl včetně povinnosti zohledňovat minimalizaci negativních dopadů sucha a nedostatku vody. Dále jsou řešeny na krajské a národní úrovni Plány pro zvládání sucha a nedostatku vody, které operativními opatřeními doplňují plány povodí v souladu s požadavky Rámcové směrnice EU o vodách 2000/60/ES.

Tyto normy podporují adaptivní přístupy, jež mohou být realizovány v rámci manipulačních řádů a plánování minimálních zůstatkových průtoků, s důrazem na zásobování pitnou vodou jako prioritní funkci. Tyto možnosti jsou u nás již často testovány nebo provozně uplatňovány správci povodí. Příkladem je systém adaptivního řízení nádrží v Povodí Odry, který vychází ze studie [13].

METODIKA ŘEŠENÍ

Základní podstatou adaptivního řízení nádrží je nahrazení rigidního provozu s konstantními odběry flexibilním systémem řízení, který průběžně reaguje na vývoj hydrologické situace. Klíčovým prvkem tohoto přístupu je optimalizace dispečerských grafů (řídících křivek), jež vymezují regulační stupně zásobního prostoru pro jednotlivé kalendářní měsíce. S poklesem náplně zásobního objemu pod definované úrovně dochází k postupnému omezování odběrů podle předem stanovených priorit jednotlivých uživatelů a současně k řízené úpravě

minimálních zůstatkových průtoků pod hrázemi nádrží. Tento flexibilní režim umožňuje včas reagovat na nastupující sucha a rozložit dopady nedostatku vody v čase tak, aby se zabránilo náhlým a hlubokým poruchám v dodávkách.

V rámci výzkumu byl navržen systém dispečerských křivek a regulačních stupňů, které stanovují optimální odběry a minimální zůstatkové průtoky pro jednotlivé měsíce a klimatické podmínky. Pilotní ověření metodiky proběhlo na vybraných vodárenských nádržích v ČR, zejména na nádrži Švihov, Klíčava, Žlutice, Obecnice, Pílská, Láz a Vrchlice.

Klimatické podmínky

Ověření navrženého postupu adaptivního řízení vodárenských nádrží bylo provedeno pro současné klimatické podmínky a pro výhledové podmínky odpovídající časovým horizontům přibližně roku 2050 a 2100. V případě nádrže Švihov byl pro optimalizaci adaptivního řízení využit tzv. Střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v ČR vyvinutý VÚV TGM v roce 2019 [14]. Pro ostatní nádrže vycházejí klimatická data z aktuálních výsledků projektu „Centrum Voda“. V jeho rámci byla vytvořena veřejně dostupná databáze HYMOD [15], která poskytuje detailní výsledky hydrologického modelování a analýzy hydrologické bilance povodí (vodních útvarů) pro současné a výhledové klimatické podmínky. Databáze je dostupná prostřednictvím webové aplikace (<https://shiny.vuv.cz/HYMOD-KZ/>) a poskytuje ucelený soubor klimatických a hydrologických charakteristik odvozených z více klimatických modelů. Na základě podrobné analýzy klimatických scénářů obsažených v databázi HYMOD byly pro jednotlivá zájmová povodí stanoveny změny základních meteorologických veličin, zejména teploty vzduchu a srážkových úhrnů, a to pro budoucí časové horizonty do konce 21. století. Databáze zahrnuje výsledky celé řady globálních a regionálních klimatických modelů, mimo jiné MEAN (průměr všech modelů), CMCC-ESM2, EC-EARTH3, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, TAIESM1 a regionální klimatický model ALADIN-CLIMATE/CZ, které reprezentují široké spektrum možného vývoje budoucího klimatu.

Pro účely ověřování adaptivního řízení vodárenských nádrží bylo z metodických důvodů zvoleno využití jednoho reprezentativního klimatického scénáře. Jako nejvhodnější základ byl vybrán regionální klimatický model ALADIN-CLIMATE/CZ pro scénář SSP5-8.5, který pro území ČR předpokládá postupný nárůst průměrné roční teploty vzduchu přibližně o 1,0 až 1,4 °C do roku 2050 a přibližně o 3,1 až 3,8 °C do roku 2085 (respektive 2100). Uvedené hodnoty přibližně také odpovídají dlouhodobému trendu pozorovaného oteplování od osmdesátých let 20. století. Naproti tomu predikované změny ročních srážkových úhrnů se v rámci většiny modelů pohybují v relativně úzkém rozmezí a ve srovnání se změnami teploty nejsou z hlediska celkové vodní bilance považovány za dominantní faktor.

Volba jednoho klimatického scénáře byla vedena skutečností, že cílem výzkumu nebyla projekce budoucího klimatu ani hodnocení nejistot klimatických modelů, ale především testování robustnosti navrženého systému adaptivního řízení nádrží při systematicky zhoršovaných hydrologických podmínkách. Vybraný scénář umožňuje ověřit vliv oteplení na hydrologickou odezvu povodí, zajistit konzistentní vstupy do vodohospodářských simulací a jednoznačně interpretovat chování provozních a regulačních pravidel nádrží. Použití svazku více globálních klimatických modelů by naopak vedlo k výraznému rozšíření nejistot a ztížilo by vyhodnocení účinnosti konkrétních opatření v oblasti řízení zásobní funkce nádrží.

Takto definovaný klimatický scénář byl následně využit k úpravě vstupních hydrologických řad a k simulacím provozu vybraných vodárenských nádrží pro současné i výhledové klimatické podmínky. Výsledky těchto simulací poskytly konzistentní základ pro posouzení účinnosti adaptivního řízení jako nestrukturálního opatření pro zmírnění dopadů klimatické změny na zabezpečení vodních zdrojů.

Hydrologický model

Pro simulaci hydrologických podmínek v povodích vybraných vodárenských nádrží byl použit hydrologický model umožňující zachytit základní procesy odtoku a akumulace vody v povodí včetně vlivu sněhové pokrývky. Hlavním nástrojem byla aplikace hydrologického modelu GR4J [16], doplněného modulem CemaNeige [17], který umožňuje simulovat sněhové zásoby a jejich postupné tání. Model GR4J je konceptuální model hydrologického cyklu, jenž transformuje denní srážky a potenciální evapotranspiraci na odtok z povodí pomocí čtyř základních parametrů. Tyto parametry zachycují retenci vody v povodí, rychlou i pomalou složku odtoku, a tím umožňují realistickou simulaci denních průtoků v profilu hráze nádrže. Modul CemaNeige je využit pro zachycení sněhové akumulace a tání, které významně ovlivňuje jarní průtoky. Povodí byla rozdělena do pěti výškových zón podle nadmořské výšky, aby bylo možné zohlednit rozdílné podmínky tání a sněhové akumulace ve vyšších a nižších polohách. Pro každý den se vypočítával přebytek srážek a odtávání sněhu v jednotlivých zónách, přičemž výsledný odtok do nádrže je součtem příspěvků z jednotlivých výškových pásem.

Kalibrace modelu byla provedena s využitím přirozených průtokových řad, odvozených v měsíčním kroku z měřených průtoků v profilu hráze každé nádrže. Tyto řady byly očištěny o vlivy řízeného odběru, vypouštění a provozní manipulace s vodou, s využitím detailních provozních záznamů převážně za období 1981 až 2024. Denní hodnoty srážek a teploty vzduchu byly použity jako vstupní meteorologické údaje, přičemž výpočet odtoku probíhal rovněž v denním kroku. Pro potřeby kalibrace byly denní odtoky agregovány do měsíčního kroku, aby se minimalizovala denní variabilita a umožnilo porovnání s agregovanými měsíčními průtokovými řadami. Kvalita kalibrace byla hodnocena

pomocí kombinace standardních kritérií Kling-Gupta Efficiency (KGE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) a PBIAS, která vyjadřují shodu simulovaných a pozorovaných hodnot průtoků, variabilitu průběhu a systematické odchylky. Hodnoty těchto kritérií pro jednotlivé nádrže jsou uvedeny v *tab. 1* a potvrzují dobrou shodu mezi simulovanými a referenčními průtoky.

Pro kalibraci bylo využito kritérium KGE, jež potvrdilo velmi dobrou kvalitu modelu s hodnotami od 80,1 % do 89,5 %. Hodnoty NSE se pohybují v rozmezí od 60,0 % do 80,2 %. Kritérium PBIAS se pro všechna povodí pohybuje v intervalu velmi dobrého hodnocení. Tyto hodnoty, konkrétně od -0,4 % do 1,6 %, naznačují, že model nevykazuje významnou tendenci k nadhodnocování ani podhodnocování celkového objemu průtoků. Lze tedy konstatovat, že optimalizované parametry jsou spolehlivé a vhodné pro následné využití.

Po kalibraci byly simulované řady pro časové horizonty 2050 a 2100 korigovány o systematické chyby pomocí multiplikativní metody, která upravuje odtokové řady proporcionálně tak, aby reflektovaly historické rozdíly mezi modelovanými a pozorovanými průtoky. Tento postup zajišťuje, že simulované řady zachovávají realistickou dynamiku průtoků a současně umožňují testování adaptivního řízení nádrží při scénářích postupně zhoršovaných hydrologických podmínek vyplývajících z klimatického modelu. Výsledné hydrologické řady tvoří konzistentní vstup pro simulace provozu vybraných nádrží s aplikací adaptivního řízení a umožňují komplexní hodnocení účinnosti navržených regulačních pravidel jak pro současné klimatické podmínky, tak pro výhledové podmínky odpovídající rokům 2050 a 2100. Tento přístup zajišťuje, že testování adaptivního řízení probíhá na realistických, klimaticky a provozně podložených scénářích, přičemž zachovává srozumitelnou interpretaci výsledků a umožňuje jednoznačně kvantifikovat přínos jednotlivých regulačních opatření.

Tab. 1. Kritéria úspěšnosti kalibrace hydrologického modelu pro povodí zájmových nádrží

Tab. 1. Performance criteria for hydrological model calibration for the catchments of the selected reservoirs

Nádrž	Klíčava	Žlutice	Obecnice, Pilská, Láz	Vrchlice
Období	01. 11. 1980 – 31. 10. 2024	01. 11. 1980 – 31. 10. 2020	01. 11. 1981 – 31. 10. 2024	01. 11. 1985 – 31. 10. 2024
Hodnotící kritéria				
NSE [%]	65,9	80,2	60,0	70,9
KGE [%]	82,9	89,5	80,1	85,2
PBIAS [%]	-0,1	1,6	-0,4	0,6

Tab. 2. Podmínky pro stanovení dispečerských křivek

Tab. 2. Conditions for defining rule curves

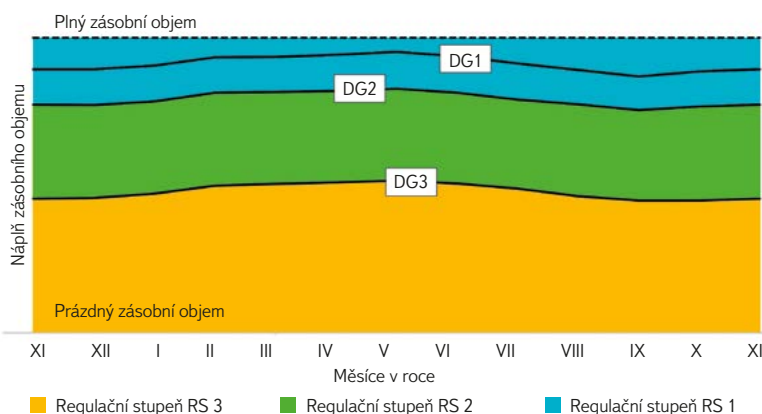
Dispečerský graf	Klima	Vodárenský odběr (Op)	Minimální zůstatkový průtok (MZP)	Požadovaná zabezpečení dle trvání
DG1	současné klima	Op1 – dle povolení k nakládání	MZP1 – dle povolení k nakládání	
DG2	klima 2050	Op2	MZP2	98,5 % nebo 99,5 % dle významu nádrže
DG3	klima 2100	Op3 – skutečný odběr za posledních 5 let	MZP3	

Metodika adaptivního řízení

Prvním a zásadním krokem v rámci adaptivního řízení je sestavení dispečerských grafů. Dispečerský graf představuje klíčovou pomůcku pro řízení odtoku z nádrže, neboť definuje vztah mezi velikostí nadlepeného odtoku v závislosti na aktuálním stavu naplnění nádrže v průběhu roku. V zásobním prostoru zájmových nádrží byly vymezeny tři dispečerské křivky DG1, DG2 a DG3 a současně tři regulační stupně, které tento prostor vertikálně rozdělují dle obr. 1 na:

- regulační stupeň RS1 – je shora omezen plným zásobním objemem a zespodu řídicí úrovní DG2,
- regulační stupeň RS2 – je shora omezen řídicí úrovní DG2 a zespodu řídicí úrovní DG3,
- regulační stupeň RS3 – je shora omezen řídicí úrovní DG3 a zespodu kótou stálého nadržení.

Dispečerské křivky byly stanoveny tak, aby platily požadované zabezpečení pro vodárenský odběr (Op) a minimální zůstatkový průtok (MZP) pod hrází vodního díla za předpokladu různých časových horizontů klimatické změny dle tab. 2.



Obr. 1. Schéma dispečerských křivek a regulačních stupňů pro omezování vodárenského odběru a minimálního zůstatkového průtoku

Fig. 1. Diagram of rule curves and operation levels for reducing water supply withdrawals and minimum residual flow

Z obr. 1 a popisu vyplývá, že dispečerská křivka DG1 v tomto uspořádání neplní funkci aktivního řídicího prvku pro přechod mezi jednotlivými regulačními stupni. Prakticky při hladině v nádrži nad DG1 lze přistoupit k řízenému předvypuštění zásobního prostoru na úroveň DG1 bez ohrožení zabezpečení zásobní funkce, např. z důvodu zvýšení ochrany před povodněmi nebo optimalizace hydroenergetického využití.

Pro výpočet dispečerských křivek byla sestavena funkce, která pracuje na principu iterativního hledání minimálních hladin v nádrži. Jeho cílem je najít nejnižší bezpečnou hladinu v nádrži pro každý měsíc v roce tak, aby byla stále dodržena požadovaná zabezpečení. Algoritmus pro každý klimatický scénář generuje samostatnou dispečerskou křivku na základě zadaných cílových hodnot odběru Op a minimálního zůstatkového průtoku MZP.

Podstata adaptivního řízení v tomto algoritmu spočívá v dynamické reakci na aktuální stav naplnění nádrže. Zatímco klasické řízení počítá s fixním odběrem, tento model aktivně mění své cíle podle situace. Na základě porovnání aktuálního objemu vody v zásobním prostoru s křivkami dispečerského grafu dochází pro vodárenský odběr Op k okamžitému přepínání mezi třemi režimy:

- plný provoz – pokud je vody dostatek, tedy pokud je aktuální objem v pásmu prvního regulačního stupně, odebírá se maximum Op1 a MZP1 dle platného povolení k nakládání,

- omezený provoz – při poklesu hladiny do pásma druhého regulačního stupně se automaticky sníží nároky odběru na Op2 a MZP2,
- minimální provoz – při poklesu hladiny do pásma třetího regulačního stupně se automaticky sníží nároky odběru na Op3 a MZP3, čímž je zajištěno, že se nádrž zcela nevyčerpá a je schopna zajistit alespoň minimální dodávku po delší dobu.

Pro každou z řešených nádrží byly limitní hodnoty Op1 až Op3 stanoveny v rozmezí od povoleného odběru dle platného povolení k nakládání s vodami až po úroveň skutečně realizovaných odběrů. Tento přístup umožnil testovat adaptivní reakci systému v reálném rozptylu provozních potřeb konkrétního vodního díla. Obdobným způsobem bylo přistupováno k hodnotám MZP, kde byla snaha zachovat první i druhou úroveň na jeho plné výši. K redukcí na nižší hodnotu docházelo teprve při poklesu do pásma třetího regulačního stupně, aby byla v krizových situacích maximálně podpořena ochrana zbývajících zásob vody v nádrži.

Vyhodnocení účinnosti adaptivního řízení

Navržený metodický postup je podrobněji demonstrován pro řízení nádrže Klíčava. Vodní nádrž Klíčava se nachází v povodí Vltavy na potoce Klíčava, který je levostranným přítokem Berounky. Hráz vodního díla je situována v km 3,1 v katastru obce Zbečno ve Středočeském kraji. Rozdělení prostorů nádrže Klíčava je uvedeno v tab. 3.

Tab. 3. Rozdělení prostorů v nádrži Klíčava

Tab. 3. Division of storage zones in Klíčava reservoir

Prostor	od [m n. m.]	do [m n. m.]	Objem [mil. m ³]
Stálé nadržení	259,60	267,60	0,119
Zásobní	267,60	293,70	7,860
Ochranný ovladatelný	293,70	294,60	0,537
Ochranný neovladatelný	294,60	296,91	1,598
Celkový	259,60	296,91	10,150

Vodní nádrž Klíčava zajišťuje svou funkcí následující účely, které jsou seřazeny podle důležitosti:

1. Hlavním účelem je akumulace vody pro úpravnu vody Klíčava, kterou provozují Středočeské vodárny, a. s. Průměrný povolený odběr vody činí $110 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální $140 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Vodárenský odběr je realizován etážovým vodárenským zařízením, jehož průtok je regulován místním uzávěrem v objektu úpravny vody.
2. Zajištění MZP v profilu pod hrází, jehož hodnota odpovídá $Q_{364d} = 12 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Podle dlouhodobých pozorování dochází v povodí Klíčavy často k úplnému vyschnutí přítoků, které může trvat několik dnů až týdnů, výjimečně i měsíců.
3. Zlepšení hygienických podmínek a kvality vody v toku pod hrází prostřednictvím manipulačních zásahů.
4. Snížení povodňových průtoků pomocí retenčního prostoru. Neškodný průtok pod vodním dílem je stanoven na $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

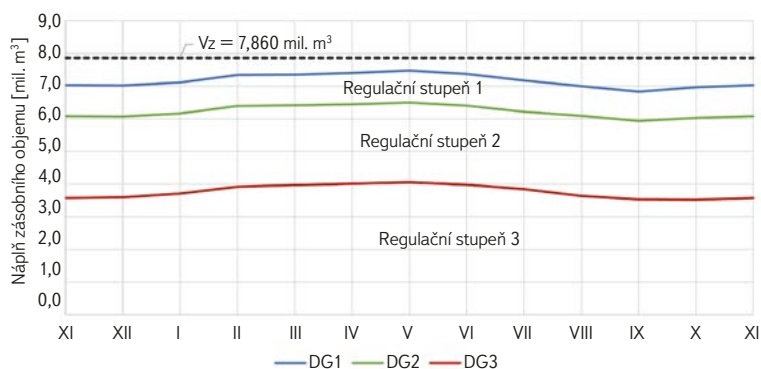
Nádrž zásobuje pitnou vodou méně než 50 000 obyvatel a zajišťuje MZP pod hrází. Z pohledu normy ČSN 75 2405 [18] je nádrž Klíčava dle významu zařazena do kategorie B a je nutné zajistit požadovanou zabezpečenost dle trvání alespoň $pt \geq 98,5\%$.

Pro nádrž Klíčava byla stanovena pravidla jednotlivých regulačních stupňů (tab. 4) tak, že první stupeň zajišťuje odběr dle povolení k nakládání s vodami, zatímco třetí stupeň omezuje odběr pro úpravu vody na skutečnou průměrnou hodnotu za posledních pět let provozu. Druhý stupeň je zvolen jako přechodný. V prvním a druhém stupni je zachován MZP v plné výši a ve třetím regulačním stupni je MZP redukován na poloviční hodnotu. Výslednou podobu dispečerských grafů a regulačních stupňů znázorňuje obr. 2.

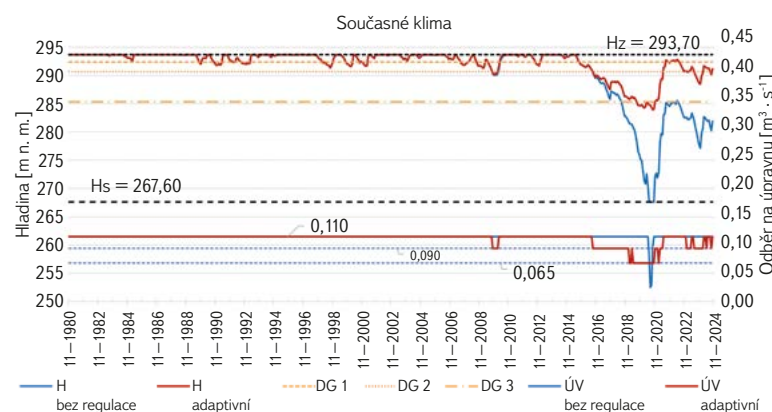
Tab. 4. Regulační stupně s omezeními vodárenského odběru (Op) a minimálního zůstatkového průtoku (MZP)

Tab. 4. Operating levels with restrictions on water supply withdrawals (Op) and minimum residual flow (MZP)

Regulační stupeň	Op [$l \cdot s^{-1}$]	MZP [$l \cdot s^{-1}$]
RS 1	110	12
RS 2	90	12
RS 3	65	6



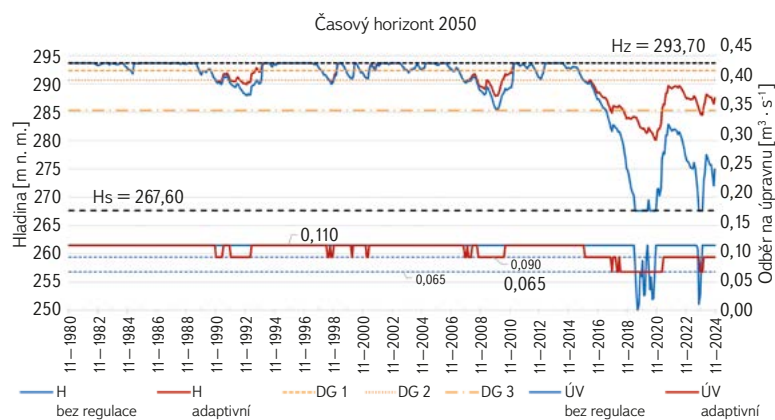
Obr. 2. Dispečerský graf a regulační stupně pro nádrž Klíčava
Fig. 2. Rule curves (DG) and operation levels for Klíčava reservoir



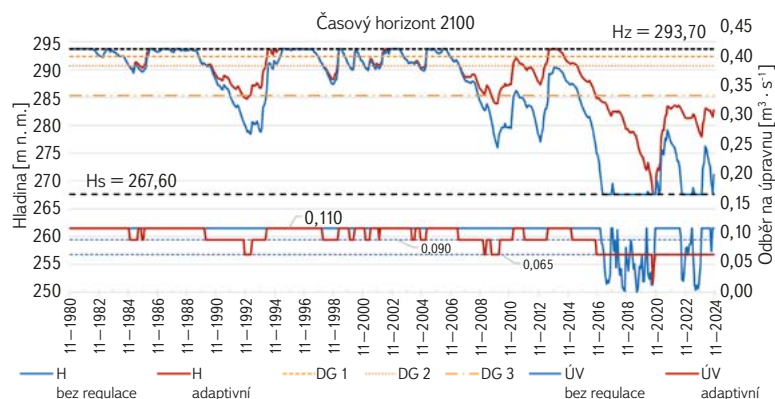
Obr. 3. Porovnání průběhu hladiny a odběru na úpravnu vody při řízení na konstantní odběr a adaptivním řízení nádrže Klíčava – současné klima
Fig. 3. Comparison of water levels and water supply to the treatment plant under constant withdrawal and adaptive reservoir management of Klíčava reservoir under current climate conditions

Pro názornost byly zařazeny grafy průběhu hladiny vody v nádrži a vodárenských odběrů pro řízení nádrže na konstantní odběr a MZP bez omezení dle povolení k nakládání a při adaptivním řízení. Grafy jsou znázorněny na obr. 3 pro současné klimatické podmínky, na obr. 4 pro klimatické podmínky časového horizontu 2050 a na obr. 5 pro klima časového horizontu 2100. Z průběhů hladin a vodárenských odběrů je patrné, že adaptivní řízení přispělo k výraznému zmírnění kolísání hladiny, přičemž reálný odběr pro úpravu vody $65 l \cdot s^{-1}$ zůstává zajištěn až k roku 2100. Oproti tomu v režimu klasického řízení lze pozorovat, že v několika případech dodávka vody klesla hluboko pod úroveň současných požadavků, a to zejména pro vzdálené časové horizonty klimatické změny.

Rozdíly mezi řízením na konstantní odběr dle povolení k nakládání a adaptivním řízením kvantifikuje také tab. 5. Tabulka obsahuje hodnoty zabezpečenosti dle trvání pt pro nádrž Klíčava a pro další analyzované nádrže: Obecnice, Láz, Pílská, Vrchlice a Švihov. Zvýrazněné jsou buňky, kde je zajištěna požadovaná zabezpečenost odběru. V případě nádrže Švihov bylo adaptivní řízení připraveno s využitím dvou regulačních stupňů na podkladě tzv. středního klimatického scénáře pro vodní hospodářství v ČR [14]. Návrh řízení byl zpracován v rámci studie [19] a odvozená pravidla pro adaptivní omezení odběru byla implementována do manipulačního řádu nádrže. Pro optimalizaci dispečerských náplní byly využity také generované syntetické řady délky 1 000 let odvozené pro podmínky současného klimatu a klimatu časového horizontu 2041–2060 dle [14].



Obr. 4. Porovnání průběhu hladiny a odběru na úpravnu vody při řízení na konstantní odběr a adaptivním řízení nádrže Klíčava – klima 2050
Fig. 4. Comparison of water levels and water supply to the treatment plant under constant withdrawal and adaptive reservoir management of Klíčava reservoir under 2050 climate conditions



Obr. 5. Porovnání průběhu hladiny a odběru na úpravnu vody při řízení na konstantní odběr a adaptivním řízení nádrže Klíčava – klima 2100
Fig. 5. Comparison of water levels and water supply to the treatment plant under constant withdrawal and adaptive reservoir management of Klíčava reservoir under 2100 climate conditions

Tab. 5. Porovnání zabezpečení vodárenských odběrů při řízení na konstantní odběr a MZP dle povolení k nakládání a při adaptivním řízení pro studované nádrže
 Tab. 5. Comparison of water supply reliability under constant withdrawal and minimum residual flow according to water use permits and under adaptive management for the studied reservoirs

Zabezpečení pt [%] vodárenského odběru		Současné klima		Klima 2050		Klima 2100	
Nádrž	Řízení	Povolený odběr	Skutečný odběr	Povolený odběr	Skutečný odběr	Povolený odběr	Skutečný odběr
Klíčava	Klasické	99,1	99,5	96,1	97,4	88,9	91,7
	Adaptivní	85,3	99,9	68,8	99,9	48,8	99,5
Obecnice	Klasické	99,1	99,7	97,7	99,5	93,9	98,3
	Adaptivní	93,7	99,9	89,2	99,9	79,5	99,7
Láz	Klasické	99,9	99,9	99,9	99,9	99,5	99,5
	Adaptivní	99,9	99,9	99,5	99,9	98,3	99,9
Pílská	Klasické	99,9	99,9	99,7	99,9	96,6	97,2
	Adaptivní	99,9	99,9	98,5	99,9	87,1	99,5
Vrchlice	Klasické	92,2	94,5	88,1	90,9	81,5	86,6
	Adaptivní	65,9	99,9	60,1	99,9	48,2	99,6
Švihov	Klasické	99,3	99,6	97,1	97,8		
	Adaptivní	97,0	100,0	90,6	99,5		

Pro časový horizont roku 2100 nebyla pravidla adaptivního řízení do řešení uvažována, protože se předpokládá jejich budoucí aktualizace.

Výsledky shrnuté v tab. 5 dokumentují účinnost navrženého adaptivního řízení, které bylo otestováno na souboru vybraných vodárenských nádrží. Ve všech případech je možné díky včasnému omezení odběrů zajistit požadovanou spolehlivost vodárenského odběru pro všechny posuzované horizonty klimatické změny. Simulace dále ukazují, že přínos adaptivního řízení se s rostoucím horizontem klimatické změny zvyšuje. Zatímco při současných hydrologických podmínkách jsou rozdíly mezi klasickým a adaptivním řízením relativně malé, v podmínkách scénářů pro rok 2050 a zejména 2100 se adaptivní přístup stává klíčovým nástrojem pro zachování přijatelné úrovně zabezpečení vodárenských odběrů. Tento trend potvrzuje, že význam nestrukturálních opatření bude v budoucnu pravděpodobně narůstat. Je však třeba zdůraznit, že výsledky simulací jsou zatíženy určitými nejistotami vyplývajícími z použitých klimatických a hydrologických modelů. V této studii byl z metodických důvodů použit jeden reprezentativní klimatický scénář, který umožňuje konzistentní interpretaci chování navrženého systému řízení. V budoucnu by však bylo vhodné uvažovat širší soubor klimatických scénářů a provést analýzu robustnosti navržených pravidel vůči nejistotám budoucího vývoje klimatu.

ZÁVĚR

Z dosažených výsledků vyplývá, že adaptivní řízení představuje klíčový a nezbytný nástroj pro budoucí provozování vodárenských nádrží v podmínkách klimatické změny. Umožňuje nalézt provozně přijatelný kompromis mezi požadavky odběratelů a reálnými možnostmi vodních zdrojů, zvyšuje provozní

bezpečnost vodních děl a přispívá k dlouhodobé udržitelnosti vodního hospodářství. Současně má adaptivní řízení příznivý dopad na jakost vody v nádržích, neboť omezením hlubokých a dlouhodobých poklesů hladiny přispívá ke stabilnějšímu teplotnímu a kvalitativnímu poměru v nádrži. Tím se snižuje riziko rozvoje eutrofičních procesů a zhoršování kvality surové vody, které lze v podmínkách oteplujícího se klimatu očekávat častěji. Navržený přístup lze současně chápat jako účinné nestrukturální adaptační opatření, které je plně slučitelné se stávajícími legislativními rámci a poskytuje praktický základ pro úpravy manipulačních řádů vodních nádrží v ČR. Zároveň je však třeba připravovat nové vodní nádrže a rozšiřovat kapacity akumulace zejména v deficitních oblastech, aby bylo možné dlouhodobě zajistit dostatek vody pro budoucí odběry a zvýšenou variabilitu hydrologických podmínek v důsledku klimatické změny.

Poděkování

Príspevek vznikl za podpory Technologické agentury ČR v rámci financování výzkumného projektu č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda)“, řešeného v letech 2020–2026.

Literatura

- [1] NEELAKANTAN, T. R., SASIREKA, K. Review of Hedging Rules Applied to Reservoir Operation. *International Journal of Engineering and Technology*. 2015, 7(5), s. 1 571–1 580. ISSN 0975-4024.
- [2] HASHIMOTO, T., STEDINGER, J. R., LOUCKS, D. P. Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation. *Water Resources Research*. 1982, 18(1), s. 14–20. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>

[3] MOY, W. S., COHON, J. L., REVELLE, C. S. A Programming Model for Analysis of Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir. *Water Resources Research*. 1986, 22(4), s. 489–498. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR022i004p00489>

[4] NACHÁZEL, K., PATERA, A. Citlivost adaptivního řízení sezonních nádrží v reálném čase na typ zráťové funkce a dobu předstihu předpovědi. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 1988, 36(6), s. 608–638.

[5] NACHÁZEL, K., PATERA, A. Možnosti využití principu adaptivity pro řízení nádrží v reálném čase. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 1988, 36(3), s. 237–285.

[6] AHMADI, M., HADDAD, O. B., LOÁICIGA, H. A. Adaptive Reservoir Operation Rules under Climatic Change. *Water Resources Management*. 2015, 29(4), s. 1 247–1 266. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0871-0>

[7] MARTON, D., KNOPPOVÁ, K. Developing Hydrological and Reservoir Models under Deep Uncertainty of Climate Change: Robustness of Water Supply Reservoir. *Water Supply*. 2019, 19(8), s. 2 222–2 230. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/ws.2019.102>

[8] MARTON, D., MENŠÍK, P., STARÝ, M. Using Predictive Model for Strategic Control of Multi-Reservoir System Storage Capacity. *Procedia Engineering*. 2015, 119, s. 994–1 002. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.991>

[9] FU, G., NI, G., ZHANG, C. (eds.). Adaptive Catchment Management and Reservoir Operation [on-line]. *Water*. 2018, 10(10). Dostupné z: https://www.mdpi.com/journal/water/special_issues/Adaptive_Catchment_Reservoir_Operation

[10] ESPANMANESH, V., GUILPART, E., BOURGAULT, M.-A., TILMANT, A. Adapting Reservoir Operation to Climate Change in Regions with Long-Term Hydrologic Persistence [on-line]. *Climate Risk Management*. 2024, 45, 100623. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2024.100623>

[11] KIM, G. J., SEO, S. B., KIM, Y. O. Adaptive Reservoir Management by Reforming the Zone-Based Hedging Rules Against Multi-Year Droughts. *Water Resources Management*. 2022, 36(10), s. 1–16. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03214-0>

[12] TABAS, S. S., SAMADI, V. Fill-and-Spill: Deep Reinforcement Learning Policy Gradient Methods for Reservoir Operation Decision and Control [on-line]. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2024, 150(7), 04024022. Dostupné z: <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6089>

[13] FOŠUMPAUR, P. *Vodohospodářské řešení vodohospodářské soustavy povodí Odry v podmínkách klimatické změny. Závěrečná zpráva*. Praha, 2020.

[14] VIZINA, A., HANEL, M. et al. *Střední scénář klimatické změny pro vodní hospodářství v České republice. Zprávy pro státní podniky povodí*. Praha: VUV TGM, v. v. i., 2019.

[15] VIZINA, A., GEORGIOVÁ, 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. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2024.09.003>

[16] PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V. Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation. *Journal of Hydrology*. 2003, 279(1–4), s. 275–289. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7)

[17] VALÉRY, A., ANDRÉASSIAN, V., PERRIN, C. “As Simple as Possible but Not Simpler”: What is Useful in a Temperature-Based Snow-Accounting Routine? Part 2 – Sensitivity Analysis of the CemaNeige Snow Accounting Routine on 380 Catchments. *Journal of Hydrology*. 2014, 517, s. 1 176–1 187. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.058>

[18] ČSN 75 2405. *Vodohospodářská řešení vodních nádrží*. Praha: Český normalizační institut, 2017.

[19] FOŠUMPAUR, P. *Vodohospodářské řešení zásobní funkce nádrže Švihov na Želivce*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2020.

METHODOLOGY FOR ADAPTIVE MANAGEMENT OF WATER RESERVOIRS DURING HYDROLOGICAL DROUGHT

FOŠUMPAUR, P.; KOVÁČOVÁ, T.

Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague (Czech Republic)

Keywords: adaptive management — water reservoir — hydrological drought — climate change — rule curve — supply reliability

The article presents a methodology for adaptive water reservoir management designed to ensure reliable water supply in conditions of hydrological drought and climate change. The proposed approach combines hydrological modelling, climate change scenarios, and optimization of operational curves with regulation levels. The management system allows for flexible restrictions on water withdrawals and adjustment of minimum residual flows depending on the current state of the reservoir. A pilot verification of the methodology was carried out on selected Czech reservoirs (Švihov, Klíčava, Žlutice, Obecnice, Pilská, Láz, Vrchlice) for current climate conditions and outlooks for 2050 and 2100, with hydrological inputs modelled using GR4J and CemaNeige models, calibrated on historical data and corrected for future climate scenarios. The results show that adaptive management significantly increases the reliability of water supply, and minimizes the risk of severe water supply disruptions, while reducing water level fluctuations in reservoirs with beneficial effects on water quality. Compared to conventional control based on constant withdrawals, this approach allows for timely and gradual regulation of withdrawals, thereby spreading the effects of drought over time and increasing the robustness of reservoir operation. The proposed framework represents a universally applicable non-structural measure, fully compatible with existing legislation, supporting long-term sustainable water resource management and providing a practical tool for adjusting water reservoir management rules.

Autoři

doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

✉ fosumpaur@fsv.cvut.cz

ORCID: 0000-0001-6702-5235

Ing. Tereza Kováčová

✉ kovacter@student.cvut.cz

Fakulta stavební ČVUT v Praze (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.005

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



Systemy zachycování dešťové vody a zvládnání povodňových průtoků ve venkovských oblastech: systematický přehled

IMANE BELKAF, MUSTAPHA HASNAOUI

Klíčová slova: klima — sucho — suché a polosuché oblasti — hydraulické systémy — dešťová voda — zachycování dešťové vody (RWH) — povodeň — vodní eroze

ABSTRAKT

V klimatu charakterizovaném dlouhodobým suchem, pozorovaným především v suchých a polosuchých oblastech, se instalace vodních systémů pro zachycování a akumulaci dešťové vody ve venkovských a izolovaných lokalitách stává nezbytností pro zachování chovu hospodářských zvířat a zajištění vodní bezpečnosti místního obyvatelstva. Za tímto účelem syntetizuje tato přehledová studie nedávné výzkumy zaměřené na různé vodní systémy využívané pro zachycování dešťové vody (rainwater harvesting, RWH) ve venkovských oblastech na podporu zemědělství, chovu hospodářských zvířat a domácností. Přehled zahrnuje 66 relevantních studií publikovaných v časopisech indexovaných v databázích ScienceDirect a Scopus v období pěti let (leden 2021 až prosinec 2025). Zdůrazňuje význam návrhu založeného na specifických charakteristikách jednotlivých lokalit či zemí, kritéria výběru lokalit pro realizaci, dopady systémů RWH na zemědělství, chov hospodářských zvířat a venkovské domácnosti. Identifikuje též stávající výzvy a navrhuje obecná doporučení pro udržitelné hospodaření s dešťovou vodou a snižování povodňových rizik.

ÚVOD

Tlak na vodní a přírodní zdroje ve světě, umocněný změnou klimatu, ohrožuje zemědělství, chov hospodářských zvířat a zvyšuje chudobu v suchých a polosuchých oblastech, zejména ve venkovských a izolovaných lokalitách. V tomto kontextu získávají systémy zachycování dešťové vody (rainwater harvesting, RWH) na mezinárodní úrovni v významu jako udržitelné řešení hospodaření s dešťovou vodou.

RWH je proces sběru dešťových srážek nebo odtoku a jejich akumulace v nádržích, rezervoárech či jiných akumulačních systémech. Zachycená dešťová voda může být následně využívána pro různé lokální účely vzhledem k jejímu omezenému objemu. Srážková voda může být zachycována z různých zdrojů. Systémy RWH (RWHS) jsou navrhovány tak, aby zadržovaly povrchový odtok ze strmých a řídké zalesněných horských svahů a odváděly jej do zemědělských oblastí [1]. Tyto systémy tak plní dvojí funkci: zajišťují zásobování vodou a zároveň přispívají k managementu povodňových vod, což je činí specifickými a výjimečnými [2]. Okello et al. [3] uvádějí, že kromě zvyšování dostupnosti vody přispívá RWH k obnově okolních zdrojů podzemní vody a vytváří pracovní příležitosti v místních komunitách. V důsledku toho přispělo široké zavádění RWH jako strategického řešení nedostatku vody ke snížení odběrů podzemní

vody. RWH je využíváno nejen k řešení narůstající nerovnováhy mezi nabídkou a poptávkou po vodě, ale také k podpoře sociálního, environmentálního a ekonomického rozvoje, což v konečném důsledku zlepšuje kvalitu života v suchých a polosuchých oblastech [4–7].

V průběhu posledních desetiletí projevila řada výzkumníků zájem o technologie a postupy RWH a zároveň mnoho zemí po celém světě využívá RWHS jako alternativní opatření k zajištění vody pro domácí a zemědělské účely v suchých a izolovaných oblastech. Tyto RWHS se však liší v závislosti na lokalitě podle řady kritérií, jako jsou geografická poloha, konfigurace reliéfu, hydrografická síť, účel využití dešťové vody, socioekonomická situace, preference místního obyvatelstva a environmentální podmínky. Výzkumníci se proto snaží tato kritéria kombinovat při návrhu a realizaci vhodného RWHS pro konkrétní lokalitu.

Současné přehledové studie se zaměřují především na přínosy RWHS při řešení nedostatku vody v oblastech ohrožených suchem [8, 9], modernizaci tradičních RWHS [10, 11], jejich potenciální využití v zemědělství a chovu hospodářských zvířat [12, 13] a integraci nových technologií za účelem maximalizace výkonnosti RWHS [14, 15]. Tyto přehledy však využívají odlišné metodologické přístupy a často zahrnují zdroje s rozdílnou úrovní vědecké rigoróznosti (odborné zprávy, kapitoly z knih). Některé studie se navíc úzce zaměřují na specifický aspekt RWH nebo jsou omezeny na určité regiony, jako je Blízký východ a severní Afrika (MENA) nebo země s nízkými a středními příjmy (LMICs). Tento roztržštěný pohled omezuje komplexní porozumění globálnímu významu a různorodým aplikacím RWHS napříč různými sektory. Aby napravila tyto nedostatky, provádí tato studie systematický přehled literatury založený na rámci Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) a zaměřuje se výhradně na recenzované články publikované v databázích Scopus a ScienceDirect v období od ledna 2021 do prosince 2025. Tato strukturovaná a transparentní metodika zvyšuje reprodukovatelnost a poskytuje ucelenou syntézu výzkumu na globální úrovni. Na rozdíl od dřívějších přehledů zaměřených na RWHS (např. [7, 16–19]) je tato studie uspořádána tak, aby usnadnila porozumění komplexní struktuře RWHS, a je vedena klíčovými otázkami zaměřenými na identifikaci vědeckého pokroku v oblasti RWH, analýzu různých výzkumných přínosů v oblasti RWH a určení výzev v politikách hospodaření se srážkovými vodami a povodňovými průtoky. V rámci tohoto výzkumného úsilí studie poskytuje podrobnou syntézu hlavních principů, technik, aplikací a postupů RWH, které existují po celém světě. Zdůrazňuje rovněž nedávný pokrok a budoucí perspektivy udržitelného hospodaření s vodními zdroji.

Tento příspěvek je strukturován následovně: první část představuje metodiku studie a zdůrazňuje kritéria použitá pro výběr zdrojů a studií v rámci

systematického přehledu literatury založeného na metodice PRISMA. Druhá část obsahuje literární rešerši, která shrnuje výsledky všech recenzovaných článků. Tato část je členěna do několika oddílů: nejprve je uveden přehled historických a tradičních technik RWH v suchých a polosuchých oblastech; následně je prezentován technický přehled RWHS, včetně jejich typů, návrhových hledisek, lokalit realizace a postupů údržby. Následující část se zabývá dopady RWH na zemědělství, chov hospodářských zvířat a obživu ve venkovských oblastech, jakož i jeho úlohou při řízení potravinové bezpečnosti a vodní eroze. Závěrečná část se věnuje politikám hospodaření s vodou a institucionálním mechanismům podpory.

METODY

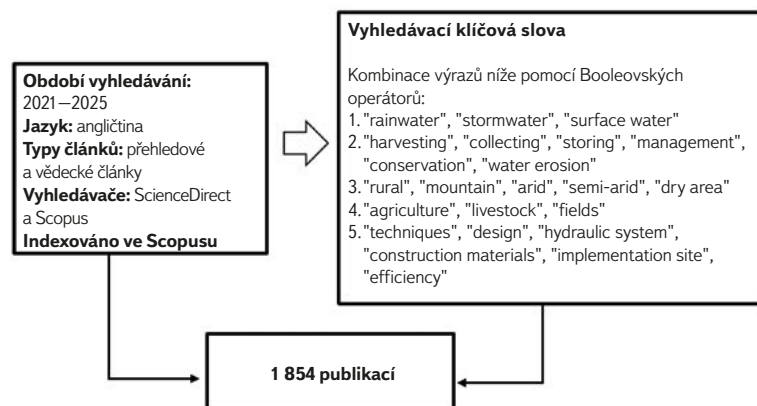
Pro účely této studie byla zvolena metodika systematické literární rešerše ke sběru, analýze a hodnocení určitého počtu vědeckých prací zaměřených na RWH ve světě. K zajištění systematického a transparentního výběrového procesu byla použita metodika PRISMA. Moher et al. [20] představili metodiku PRISMA jako soubor doporučení zaměřených na zvýšení transparentnosti a úplnosti prezentace systematických přehledů prostřednictvím definovaného postupu zahrnujícího identifikaci studií, jejich screening, posouzení způsobilosti a konečné zařazení.

Kritéria způsobilosti

RWH se od počátku 21. století stalo významným tématem, přičemž počet publikací v průběhu let narůstá [16]. S ohledem na tento rozsáhlý objem publikací byly studie zahrnuté do tohoto přehledu pečlivě vybrány na základě předem stanovených kritérií způsobilosti s cílem zajistit jejich relevanci a konzistentnost. Tato kritéria způsobilosti zahrnovala recenzované články psané v angličtině, publikované v období od ledna 2021 do prosince 2025, indexované v databázi Scopus a dostupné ve ScienceDirect a Scopusu a zaměřené na RWH ve venkovských oblastech.

Strategie vyhledávání

Pro vyhledávání článků sloužily bibliografické databáze ScienceDirect a Scopus. V rámci tohoto vyhledávání byla použita specifická klíčová slova a termíny související s RWH ve venkovských oblastech (*obr. 1*). Vyhledávací dotaz byl strukturován následovně: („rainwater“ OR „stormwater“ OR „surface water“) AND („harvesting“ OR „collecting“ OR „storing“ OR „management“ OR „conservation“ OR „water erosion“) AND („rural“ OR „mountain“ OR „arid“ OR „semi-arid“ OR „dry area“) AND („agriculture“ OR „livestock“ OR „fields“) AND („techniques“ OR „design“ OR „hydraulic system“ OR „construction materials“ OR „implementation site“ OR „efficiency“). Pomocí této vyhledávací strategie byl získán počáteční soubor 1 854 publikací.



Obr. 1. Strategie použitá při vyhledávání v bibliografických databázích
Fig. 1. Strategy used in the search of bibliographic databases

Proces screeningu a výběru studií

Správa referencí

Všechny publikace získané vyhledáváním byly importovány do Zotero, což je software pro správu bibliografických citací [21], za účelem identifikace a odstranění duplicitních záznamů. V této fázi bylo ze souboru odstraněno 79 publikací z důvodu duplicity (*obr. 2*).

Proces výběru studií

Po odstranění všech duplicitních záznamů byl na zbývajících 1 775 záznamů aplikován druhý filtr založený na názvech článků z důvodu zajištění relevantního obsahu. V souladu s tím byly z databáze vyloučeny články, které neobsahovaly předem definovaná klíčová slova (*obr. 1*) v názvu. Tímto způsobem bylo odstraněno 1 579 článků a počet záznamů se v této fázi snížil na 196. Za účelem dalšího zpřesnění tohoto souboru byl následně aplikován třetí, manuální filtr založený na abstraktech článků, jehož cílem bylo zahrnout pouze články odpovídající těmto třem hlavním tématům:

- postupy a technologie RWH v zemědělství, zachování chovu zvířat v hospodářstvích a ve venkovských domácnostech;
- hospodaření s povodňovými průtoky a zvládnání vodní eroze ve venkovských oblastech;
- politika správy vodních zdrojů.

Tento proces prováděli oba autoři, přičemž nejasné případy byly podrobněji analyzovány a diskutovány až do dosažení konsenzu.

Na konci tohoto procesu bylo po přečtení abstraktů vyřazeno 96 článků a 100 článků bylo vybráno k dalšímu zpracování (*obr. 2*).

Kritéria pro zařazení/vyřazení

Po podrobném prostudování plných textů článků splňujících počáteční aspekty screeningu byla stanovena jasná kritéria pro zařazení a vyřazení s cílem potvrdit jejich soulad s hlavními tématy výzkumu (*tab. 1*). Podle výsledku tohoto procesu bylo vybráno 89 článků k dalšímu hodnocení. Celý proces screeningu byl dokumentován pomocí nástroje Zotero a tabulek v Excelu, včetně relevantních poznámek ke každému článku.

Tab. 1. Kritéria pro zařazení a vyřazení

Tab. 1. Inclusion and exclusion criteria

Kritéria pro zařazení**Zařazené články se zabývaly:**

RWHS ve venkovských oblastech: návrhem, lokalitami realizace, postupy a technologiemi;

RWHS využívanými ke zlepšení kvality zemědělství, chovu hospodářských zvířat a života ve venkovských domácnostech;

hospodařením s povodňovými průtoky a zvládnáním vodní eroze ve venkovských oblastech prostřednictvím instalace RWHS;

politikou správy vodních zdrojů související s RWH.

Kritéria pro vyřazení**Vyřazené články se týkaly:**

RWHS v urbanizovaných oblastech;

RWH zaměřeného na doplňování zásob podzemní vody;

kvality dešťové vody;

kombinovaných systémů: RWH a solární energie.

Proces sběru dat

Veškerá data týkající se 89 vybraných článků byla pečlivě extrahována a uspořádána do tabulky v Excelu. Tento získaný soubor dat zahrnuje klíčové informace, konkrétně jména autorů, názvy článků, roky publikace, lokality studií, hlavní témata, abstrakty, výzkumné metodiky a výsledky. Tento strukturovaný postup usnadnil analýzu a zajistil lepší přístup k detailům jednotlivých článků pro účely porovnání a přehledu.

Hodnocení kvality

Kvalita metodiky všech zařazených článků byla hodnocena na základě dvou hlavních kritérií:

- srozumitelnost výzkumné metodiky;
- relevance a validita výsledků.

Toto hodnocení bylo provedeno manuálně oběma autory a poznámky k omezením jednotlivých článků byly zaznamenány do tabulek v Excelu. Na základě těchto stanovených kritérií bylo osm článků vyřazeno z důvodu slabé metodiky a 15 článků bylo vyřazeno z důvodu nedostatečné relevance a validity výsledků. Po tomto hodnocení splnilo stanovená kritéria 66 článků, jež byly zařazeny do finálního výběru.

Hodnocení zkreslení

Po hodnocení kvality bylo u zbývajících 66 článků provedeno hodnocení zkreslení pomocí kontrolního seznamu Critical Appraisal Skills Program (CASP). Toto hodnocení se zaměřilo na srozumitelnost výzkumného procesu, přítomnost odkazů na zdroje, empirická data a validitu zjištění. Na rozdíl od předchozího hodnocení kvality nebyly v této fázi na základě posouzení zkreslení vyřazeny

žádné články, což znamená, že všechny zahrnuté studie vykazovaly přijatelnou úroveň kontroly zkreslení a transparentnosti.

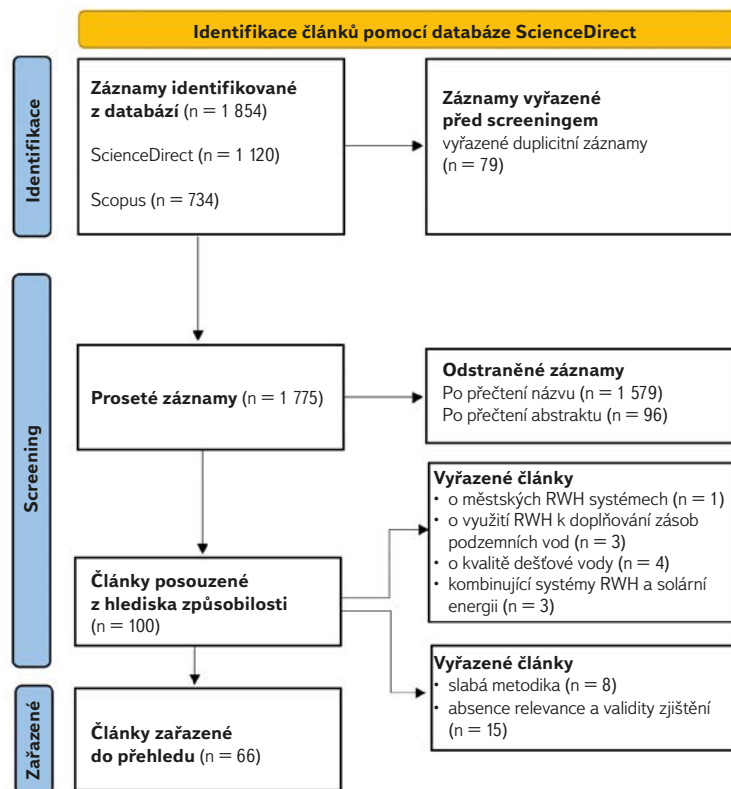
Syntéza dat

Konečný soubor obsahující 66 článků byl analyzován pomocí kvalitativního syntetického přístupu, který umožnil identifikaci, uspořádání a analýzu zjištění a výsledků jednotlivých studií. V průběhu tohoto procesu byly výsledky studií shrnuty, porovnány a byla hodnocena jejich heterogenita. Následně byly články kategorizovány podle svého zaměření do hlavních podtémat, včetně RWH v historických a moderních stavbách, aplikací RWH ve venkovském prostředí, hospodaření s povodňovými průtoky a zvládnání vodní eroze a politik správy vodních zdrojů. Tato klasifikace poskytla systematický přehled existující literatury.

Vývojový diagram PRISMA

Na závěr tohoto procesu byl manuálně vytvořen vývojový diagram PRISMA (obr. 2), který znázorňuje celý průběh výběru studií od počáteční identifikace záznamů až po jejich finální zařazení.

Tento strukturovaný postup zajišťuje transparentnost a zvyšuje reprodukovatelnost přehledu.



Obr. 2. Vývojový diagram Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)

Fig. 2. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) flow diagram

VÝSLEDKY A DISKUZE

Zjištěné poznatky syntetizují informace z vybrané literatury a zdůrazňují reprezentativní příklady z různých regionů. Vzhledem k heterogenitě geografických kontextů a metodologických přístupů se síla důkazů mezi hodnocenými studii liší, což může ovlivnit zobecnitelnost závěrů. Celkovou míru důvěryhodnosti důkazů lze proto považovat za střední. Výsledky je proto třeba interpretovat s opatrností s ohledem na inherentní omezení dostupných důkazů.

Pro usnadnění komplexní analýzy byly články zařazené do finálního výběru klasifikovány a uspořádány do pěti podtémat pomocí nástroje Zotero:

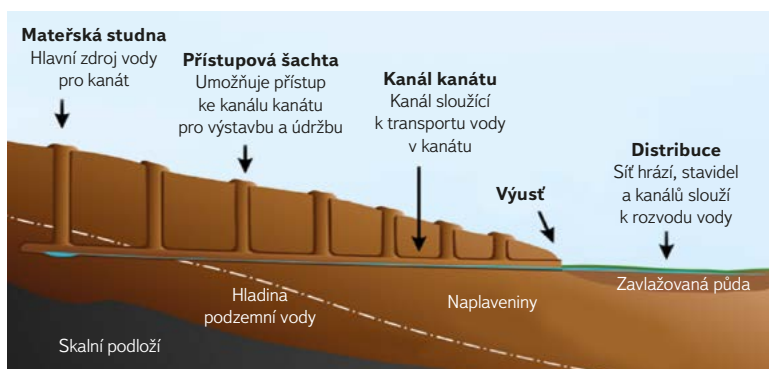
- historické a tradiční techniky RWH v suchých a polosuchých oblastech;
- hlavní charakteristiky RWHS;
- dopady RWHS na zemědělství, chov hospodářských zvířat a život ve venkovských domácnostech;
- hospodaření s povodňovými průtoky a zvládnání vodní eroze ve venkovských oblastech;
- politika správy vodních zdrojů související s RWH a hospodařením s povodňovými průtoky.

Historické a tradiční techniky RWH v suchých a polosuchých oblastech

RWH dlouhodobě představuje základní pilíř hospodaření s vodou v suchých a polosuchých oblastech a odráží vynalézavost a kulturní odolnost komunit čelících nedostatku vody. Tato část syntetizuje nedávné studie, které společně zdůrazňují funkci a rozmanitost těchto tradičních postupů RWH a jejich kulturní význam napříč Blízkým východem, Asií, severní Afrikou a subsaharskou Afrikou.

Podzemní kanály

Podzemní kanály představují jednu z nejvyspělejších tradičních praktik RWH v regionu MENA, navrženou tak, aby omezovala výpar a zvyšovala efektivitu. Tyto podzemní vodní systémy se v jednotlivých zemích liší jak technikami, tak názvoslovím, např. kanát, falaj (aflaj) nebo foggara [5]. Systémy využívají gravitaci k transportu vody z výše položených zvodní do níže položených zemědělských oblastí. Tato technika nejen zajišťuje přívod vody do oblastí s omezenou dostupností povrchové vody, ale také snižuje ztráty vody výparem. Na druhé straně, podle Weerahewa et al. [22] představuje aflaj hydraulický systém inspirovaný místními tradicemi a islámskými principy rovnosti, které zajišťují spravedlivé rozdělování vody na Arabském poloostrově.



Obr. 3. Průřez systémem kanát (zdroj: [5])

Fig. 3. Cross-section of qanat system (source: [5])

Cisterny

Tyto systémy akumulace vody umožňují zachycování vody v období dešťů za účelem jejího využití během dlouhodobého sucha. Cisterny se liší v závislosti

na lokalitě z hlediska typologie i použitých stavebních materiálů a mohou mít podobu otevřených nádrží, jako např. v Sele na jižní transjordánské plošině [23], nebo podzemních objektů, jako jsou **sarniç**, tedy tradiční cisterny využívané na ostrově Bozcaada (Turecko) k zajištění vody při jejím nedostatku [24].



Obr. 4. Starověká cisterna ve středním Maroku (zdroj: autoři)

Fig. 4. Ancient Cistern in central Morocco (source: authors)

Tradiční techniky zachycování povrchové vody

Zachycování povrchové vody a zachycování povodňových průtoků může být rovněž označeno jako RWH. Tato metoda je založena na sběru a akumulaci dešťových srážek nebo povodňových průtoků v půdě, přírodních nádržích nebo v podzemí pro pozdější využití. Podle Ben Hassen et al. [5] je tato starobylá technika široce využívána v mnoha suchých a polosuchých oblastech po celém světě:

- V Tunisku se **jessour** využívají jako tradiční objekty pro zachycování vody, tvořené malými zemními hrázkami vybudovanými napříč údolnicemi za účelem zadržení dešťové vody. Hlavní funkcí jessour je zachycovat srážkovou vodu z ojedinělých epizod a následně ji převádět prostřednictvím terasového systému, což umožňuje pěstování plodin, jako jsou olivovníky a mandloně, v suchých podmínkách.



Obr. 5. Systém jessour v Tunisku (zdroj: [5])

Fig. 5. The jessour system in Tunisia (source: [5])

- Starobylou a tradiční metodu hospodaření s vodou v Jemenu, např. ve **vádích**, představuje **závlaha povodňovou vodou** (spate irrigation). Pomocí zemních konstrukcí jsou gravitačně přeměrovány povodňové průtoky z horských povodí na zemědělské pozemky, aby je bylo možné rychle zavlažit [5].



Obr. 6. Zavlažovací systém založený na zachycení povodňových průtoků v Jemenu (zdroj: [5])

Fig. 6. Spate irrigation system in Yemen (source: [5])

- V Keni a Tanzanii se využívají **pískové hráze** (sand dams) k ukládání dešťové vody v písku během období dešťů, čímž se omezuje výpar a zároveň zvyšuje doplňování podzemních vod [3].



Obr. 7. Průřez systémem pískové hráze (zdroj: autoři)

Fig. 7. Cross-section of a sand dam system (source: authors)

Hlavní charakteristiky RWHS: inovace, návrh, realizace a udržitelnost

Modernizace tradičních systémů RWHS

Systémy zachycování dešťové vody (RWHS) jsou po staletí využívány k hospodaření s vodními zdroji a dokládají důmyslnost a moudrost tradičních venkovských komunit. Na jejich základě se současní vědci stále více zaměřují na modernizaci tradičních RWHS prostřednictvím integrace nových technologií a pokroků s cílem vyvíjet udržitelná řešení nedostatku vody.

Ačkoli evropský přístup považuje dešťovou vodu za odpadní vodu, Madomguia et al. [11] zdůrazňují, že dešťová voda je udržitelným vodním zdrojem,

odlišným od povrchových i podzemních vod. Nedávná studie Madomguia et al. [11] poukazuje na významnou roli RWHS v pohoří Mandara v Kamerunu. V této oblasti jsou místními obyvateli obnovovány starobylé RWHS nazývané **biefs**, které slouží jako malé hráze. Kromě toho jsou kamenné terasové systémy udržovány prostřednictvím instalace zelených bambusových stěn. Tyto postupy nejen zvyšují výnosy plodin v terasovém zemědělství, ale také přispívají ke zmírnění povodňových rizik a zajištění potravinové a vodní bezpečnosti v této horské oblasti.

Podobně Carrion-Mero et al. [25] zdůrazňují využití hydrogeologických a geomorfologických analýz prostřednictvím GIS k efektivnější identifikaci vodních děl a odvodňovacích oblastí na svazích sopky Chimborazo v Ekvádoru. Výzkum podporuje modernizaci tradičních RWHS označovaných jako **camello-nes** s cílem zvýšit jejich účinnost a podpořit udržitelné hospodaření s vodou.

V Tunisku slouží systém **tabias** jako tradiční objekt RWHS určený ke kontrole povodní. Tyto vodní systémy se skládají z kamenných bariér propojených do terasovitě obhospodařovaných pozemků (např. jessour), které zachycují odtok, čímž chrání zemědělskou půdu před zaplavením a zároveň poskytují vodu pro závlahu. S ohledem na jejich zásadní význam pro zemědělství a protipovodňovou ochranu tuniská vláda mnoho tradičních tabias odstranila a vybudovala je znovu za použití moderních stavebních nástrojů a technik [10].

Typy, návrhy a určování vhodných lokalit pro RWHS

RWHS se vyznačují rozmanitostí typů a návrhů v závislosti na geografické poloze, hydrologických podmínkách, sociokulturním prostředí uživatelů a účelu jejich využití. V důsledku toho bylo v posledních letech provedeno mnoho studií zaměřených na zkoumání těchto systémů a na přesné určení jejich optimálních budoucích lokalit.

- **Vhodné metody výběru lokalit:** Výběr vhodných lokalit pro realizaci RWHS je klíčovým krokem k zajištění dlouhodobé udržitelnosti a účinnosti těchto vodních děl [26]. Proces výběru potenciálních lokalit obvykle zahrnuje následující kroky:
- **Vymezení zájmového území a sběr dat:** Vymezit zájmové území a shromáždit relevantní prostorová i neprostorová data, včetně topografických map, geologických a hydrologických údajů, meteorologických záznamů, družicových snímků Landsat 8 (RS) a socioekonomických dat [4, 27–30].
- **Stanovení kritérií a zpracování dat:** Určit klíčová kritéria na základě rešerše literatury, terénních zkušeností a předpokládaného využití zachycené vody. Shromážděná data a kritéria jsou zpracována a převedena do tematických vrstev v prostředí GIS. Mezi běžné vrstvy patří sklon svahu, řád vodních toků, hustota odvodnění, srážky, typ půdy, využití krajiny/pokryv území (LULC) a silniční síť. Tyto tematické vrstvy jsou následně reklasifikovány [26, 28] a standardizovány pomocí fuzzy funkcí příslušnosti pro numerická data a krokových funkcí pro kategoriální data [29]. Zpracované vrstvy slouží jako vstupy do GIS pro vytvoření výsledné mapy vhodnosti.
- **Hydrologické modelování:** Pro zpřesnění mapy vhodnosti lze využít hydrologické modely, jako je model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [27] nebo metoda Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) [28, 29], k simulaci odtoku, infiltrace a odnosu sedimentů. Přestože je hydrologické modelování doporučováno řadou vědců, při určování vhodných lokalit pro realizaci RWHS zůstává krokem volitelným.
- **Vážení kritérií a vícekritériální rozhodovací analýza (MCDA):** Přiřadit jednotlivým kritériím váhy pomocí metod, jako je Analytic Hierarchy Process (AHP) [27] nebo fuzzy AHP [29]. Pro zvýšení robustnosti výsledků některé studie kombinují techniky MCDA se statistickou analýzou prostorových vazeb, např. metodou Weight of Evidence (WOE) [28], nebo využívají metodu VšeKriterijumska Optimizacija (VIKOR) k hodnocení alternativ na základě subjektivních posouzení expertů [29].

Tab. 2. Typy RWHS a jejich návrhové přístupy
Tab. 2. RWH types and their design approaches

Typ RWHS	Návrhový přístup	Země	Literatura
Přehrady a přehrážky	Komplexní vodní dílo různorodých tvarů a retenčních kapacit. Jeho výstavba výrazně upřednostňuje využití lokálně dostupných materiálů. Návrh je přizpůsoben podmínkám dané lokality a zamýšlenému účelu.	Irák; Egypt; Maroko; Pákistán; Indie	[1, 4, 9, 27, 28, 31]
Rybníky, vsakovací nádrže a malé nádrže	Jednoduché vodní dílo různých tvarů, navržené za účelem podpory doplňování podzemních vod a sloužící jako zásobárna vody pro zemědělství a napájení hospodářských zvířat. Jeho návrh a rozměry jsou úzce přizpůsobeny specifickým charakteristikám lokality, jako jsou sklon, typy půd a poloha vodních toků.	Pákistán; Srí Lanka; Džibutsko	[28, 29, 32]
Dešťový trychtýř	Metoda RWH spočívající v instalaci plachty z potravinářského polypropylenu, která umožňuje přímé zachycování dešťové vody bez kontaktu s nečistotami.	Indie	[37]
Silniční technologie RWH	Spočívá ve výstavbě betonových cisteren podél horských silnic, které umožňují gravitační přivádění dešťové vody a jejich plnění.	Čína	[35, 36]
Bioinspirované jednorozměrné (1D) struktury	Inspirováno přirozenými mechanismy zachycování vody, např. u osin pšenice, na povrchu pavoučího vlákna, listu araukárie či trnů kaktusů.	Čína	[15]

- **Tvorba a vizualizace mapy vhodnosti:** Integrovat vážená kritéria v prostředí GIS za účelem vytvoření mapy vhodnosti, která klasifikuje zájmové území do kategorií, jako jsou velmi vysoká, vysoká, střední, nízká a velmi nízká vhodnost [1, 4, 9, 27–29, 31, 32].
- **Validace a vazba na politiky:** Ověřit výsledky hodnocení vhodnosti jejich propojením s cíli udržitelného rozvoje (SDGs) a posoudit jejich soulad s místními vládními politikami v zájmové oblasti [27, 29]. Pro tvorbu map vhodnosti RWH byly využity různé modelovací nástroje. Patří mezi ně model SWAT založený na GIS pro hodnocení subdenního hydrologického vlivu RWH na závlahu krajiny [33]; metoda AHP realizovaná v GIS; algoritmy strojového učení [28] a Markovův řetězec odhadující pravděpodobnosti přechodů mezi hydrologickými stavy za účelem optimalizace výběru lokalit pro RWH [34]. Tyto nástroje společně slouží k podpoře tvůrců politik a zainteresovaných aktérů při vytváření rámců udržitelného hospodaření s vodou.
- **Typy RWH a jejich návrhové přístupy:** RWHS vykazují širokou škálu návrhů, formovaných jejich uplatněním v různorodých kulturních a prostorových kontextech. Tab. 2, sestavená na základě přehledu řady studií publikovaných celosvětově v letech 2021–2025, shrnuje návrhové přístupy spojené s jednotlivými existujícími typy RWH. Za pozornost stojí, že inovativní struktury a metody RWH jsou vyvíjeny především v Číně, např. bioinspirované jednorozměrné (1D) struktury [15] a technologie RWH založené na silniční infrastruktuře [35, 36]. Naopak nedávný výzkum v Indii zdůrazňuje RWHS zaměřené na minimalizaci kontaminace vody, což dokládají návrhy, jako je tzv. rain saucer („dešťový trychtýř“) [37].

V suchých a polosuchých venkovských oblastech v Pákistánu, na Srí Lance a v Džibutsku jsou běžné tradiční RWHS, jako jsou rybníky, vsakovací nádrže a malé vodní nádrže. Tyto stavby slouží jako malé povrchové zásobníky vody pro místní využití, např. pro závlahu a napájení hospodářských zvířat, a zároveň přispívají k doplňování podzemních vod. Jejich návrh je obecně jednoduchý, což odráží nízké nároky na stavební materiály. Tyto RWHS jsou obvykle umístovány na mírných svazích, zpravidla se sklonem menším než 5 %, přičemž půdní podmínky jsou přizpůsobeny jejich funkci: jílovité nebo hlinité půdy u rybníků pro minimalizaci průsaků a propustné půdy (písčité nebo rozpukané horninové formace) u vsakovacích nádrží, aby byla umožněna infiltrace vody do zvodní

a zajištěno doplňování podzemních vod [28, 29]. Malé nádrže jsou často vzájemně propojeny do kaskádových systémů s cílem co nejvíce zvýšit distribuci vody a snížit ztráty způsobené výparem [32].

V zemích Blízkého východu jsou přehrady a přehrážky (check dams) považovány za klíčová řešení nedostatku vody. Jejich návrh a výstavba jsou výrazně ovlivněny místními podmínkami, zejména geologií a hydrologií, které určují optimální tvar, retenční kapacitu a použité stavební materiály. Ty jsou zpravidla získávány z místních zdrojů, jako jsou šterk, jíla a vápencové horniny, aby se snížily náklady na výstavbu a zvýšila jejich odolnost. Návrh těchto objektů je rovněž určován jejich hlavním účelem; přehrážky slouží především ke kontrole eroze a k zachycování dešťové vody (RWH), zatímco přehrady plní více funkcí, včetně protipovodňové ochrany, akumulace vody pro zemědělské, domácí a průmyslové využití a výroby energie [1, 4, 9, 27, 28, 31].

Tyto integrované návrhové přístupy, kombinující tradiční postupy s moderními modelovacími nástroji, pomáhají tvůrcům politik a investorům identifikovat vhodné lokality pro realizaci RWHS a zvolit odpovídající návrhy RWH pro jednotlivé lokality, čímž zvyšují účinnost a udržitelnost těchto řešení [28, 29, 32].

Kromě toho byly jako doplněk k RWHS zavedeny membránové technologie. Ty jsou obvykle instalovány za objekty RWH jako forma úpravy dešťové vody, která zajišťuje její kvalitu před opětovným využitím pro domácí a zemědělské účely. Tato metoda spočívá ve filtraci dešťové vody pomocí různých typů membrán (povrchové membrány, gravitačně poháněné membránové procesy a membránový bioreaktor) [14].

Požadavky na údržbu a udržitelnost

Trvanlivost RWHS je vysoce žádoucí, zejména s ohledem na jejich pozitivní dopady na více úrovních. Udržitelnost RWH zahrnuje následující aspekty:

— Plné a dlouhodobé zapojení všech aktérů

Úspěch projektu RWH v konečném výsledku závisí na angažovanosti všech aktérů vodního hospodářství, včetně vládních institucí, investorů, zemědělců a venkovského obyvatelstva jako celku. Tato spolupráce by usnadnila výstavbu, ochranu a údržbu objektů RWH [38]. Tito aktéři hrají klíčovou roli při realizaci projektu – od jeho návrhu přes instalaci až po uvedení do provozu.

Pala et al. [18] dále zdůrazňují význam vzdělávání a zvyšování povědomí mezi venkovskými komunitami o ochraně RWHS a doporučují prosazování právních předpisů a jejich úprav s cílem zachovat tato vodní díla.

— Údržba objektů RWH

Vzhledem k vysokým počátečním nákladům moderních objektů RWH je nutné již ve fázi proveditelnosti a koncepčního návrhu zohlednit náklady na jejich údržbu a požadavky spojené s provozem, aby byla zajištěna jejich dlouhodobá životnost [7, 39]. Pravidelná údržba je zásadní pro zachování funkčnosti RWHS [40]. Zahrnuje čištění nádrží na vodu, rybníků, cisteren a povodí; sledování zápachu, barvy a chemických vlastností akumulované vody; úpravu stojaté vody před jejím využitím a opravy poškozených částí RWHS [17]. Dostatečná a pravidelná údržba přispívá k zachování funkčnosti těchto objektů a zajišťuje kontinuitu jejich pozitivních přínosů.

— Environmentální udržitelnost

Projekty RWH prokázaly pozitivní environmentální dopady, zejména tím, že přispívají ke snížení spotřeby energie, k doplňování podzemních vod, zmírňování povodní, a tím i k částečné obnově přirozeného vodního cyklu [19]. To zahrnuje podporu udržitelného využívání vodních zdrojů a ochranu místních ekosystémů.

— Socioekonomické a environmentální hodnocení RWHS

Ačkoliv je základní princip techniky RWH jednoduchý – zachycování, akumulace a poskytování vody –, výběr vhodných lokalit pro realizaci RWHS zůstává pro výzkumníky a rozhodovací orgány náročným úkolem, protože závisí na socioekonomických a environmentálních parametrech.

Socioekonomické problémy představují hlavní překážku pro původní obyvatele při zajišťování vody nebo investování do vodohospodářských staveb [6]. Proto RWHS přináší znevýhodněným komunitám nesporné sociální a ekonomické přínosy [41]. Rodrigues de Sá Silva et al. [7] v této souvislosti zdůrazňují pozitivní socioekonomické dopady využívání RWHS v zemědělství a domácnostech v suchých a polosuchých oblastech na Sprásové plošině v Číně, přičemž uvádějí roční úsporu vody ve výši 75,8 m³ na domácnost a roční úsporu energie 138,6 kWh na domácnost. Podobná studie provedená Richards et al. [42] v Indii zjistila, že instalace RWHS ve venkovských veřejných školách by mohla ušetřit přibližně 25 % vody využívané pro nepitné účely. Khanal et al. [43] dále zdůrazňují význam povědomí uživatelů RWHS o udržitelných postupech hospodaření s vodou a doporučují začlenění témat souvisejících s dešťovou vodou do univerzitních studijních programů s cílem rozšířit znalosti v této oblasti. Xue et al. [44] však upozorňují, že ekonomické přínosy využívání RWHS se výrazně liší v závislosti na klimatických podmínkách daného regionu.

Socio-environmentální proměnné, jako jsou topografické, klimatologické, hydrologické, zemědělské, geologické, pedologické a antropogenní faktory, jsou zásadní pro úspěšný výběr potenciálních lokalit RWHS ve velkoplošných územích [45]. V tomto kontextu Teston et al. [19] navrhli analýzu potenciálního umístění RWHS, jež zohledňuje environmentální dopady těchto systémů pomocí nástrojů hodnocení životního cyklu (LCA) a modelování vodní bilance.

RWHS VYUŽÍVANÉ KE ZLEPŠENÍ KVALITY ZEMĚDĚLSTVÍ, CHOVU HOSPODÁŘSKÝCH ZVÍŘAT A ŽIVOTA VE VENKOVSKÝCH DOMÁCNOSTECH

Dopad RWH na zemědělství ve venkovských oblastech

Venkovské zemědělství je ohroženo nedostatkem vody v důsledku klimatické změny a nadměrného odběru podzemních vod [13]. Tato situace je dále zhoršována nepravidelným rozložením srážek a neefektivními zavlažovacími systémy,

zejména v suchých a polosuchých oblastech. V této souvislosti se RWH jeví jako účinné řešení pro zvýšení efektivity využívání vody a posílení odolnosti venkovských zemědělských systémů. RWH je klíčové pro zajištění dostatečného množství vody pro produkci plodin, což přispívá ke zlepšení venkovské ekonomiky [12, 30]. Dále jsou na základě recenzovaných článků uvedeny konkrétní příklady přínosů RWH pro výnosy plodin.

V suchých a polosuchých oblastech Číny bylo provedeno několik studií zaměřených na pěstování vojtěšky v systémech RWH typu ridge-furrow (metoda, která využívá střídání vyvýšených pásů, tzv. hřebenů/hrůbků, a snížených pásů, tzv. brázdy/žlabů přímo na poli nebo pozemku) v kombinaci s biočarem (Wang et al. [46]) a s nasekanou slámou (Zhao et al. [47]). Tyto studie prokázaly významný pozitivní dopad na produktivitu plodin a optimalizaci zásobování vodou. To zároveň potvrzuje odolnost plodin s vysokou hodnotou vůči suchu. Podobně Chen et al. [48] poukazují na výrazné zvýšení výnosů kukuřice na farmách využívajících RWHS typu ridge-furrow, což přispívá ke zlepšení životních podmínek místních zemědělců.

V okrajových oblastech Zimbabwe ukázala nedávná studie Kubiku et al. [49], zaměřená na dvě odrůdy čiroku jako hlavní potravinářské plodiny v jižní Africe, že RWHS na okrajích polí představují perspektivní nízkonákladový přístup k hospodaření s vodou a živinami v dešťově závislých systémech pěstování čiroku, což zvyšuje produktivitu plodin a posiluje potravinovou bezpečnost.

V polosuché oblasti tureckého regionu Černého moře provedli Yıldırım et al. [50] výzkum zaměřený na vliv RWHS typu ridge-furrow na růst, výnos a kvalitu červené papriky. Výsledky ukazují, že RWHS zlepšily produkci červené papriky a přispěly k dosažení udržitelného čistého příjmu zemědělců v tomto regionu.

V suchých degradovaných oblastech Jordánska byly v regionu Badia zavedeny dva typy RWHS (Vallerani a Marab) za účelem zachycování dešťové vody a podpory růstu vegetace. Studie zdůrazňuje významnou roli RWHS při obnově krajiny a podpoře udržitelného zemědělství [51].

V Indii [52] se doporučuje využít RWH na farmách jako strategický přístup ke zvýšení výnosů druhé sklizně a ke zlepšení hospodaření s vodou v malých zemědělských komunitách.

Dopad RWH na hospodářská zvířata a kvalitu jejich produktů

Nedostatek vody výrazně ovlivňuje produktivitu hospodářských zvířat, zejména v suchých oblastech, kde je nedostatek vody hlavním stresovým faktorem pro skot. Zvířata vystavená vodnímu stresu si totiž často udržují tělesnou vodu snížením příjmu krmiva, což negativně ovlivňuje jejich zdravotní stav, reprodukční výkonnost, růst a kvalitu produkce. Chikwanha et al. [53] uvádějí, že ovce, které mají omezený přístup k vodě, ztrácejí mezi 1,2 a 21,5 % své tělesné hmotnosti, což má dopad na kvalitu i množství masa. Podobně Halimani et al. [54] zjistili, že drobní chovatelé ovcí v suchých oblastech jižní Afriky vnímají nedostatek vody jako zásadní riziko, což je vede k zavádění různých strategií hospodaření s vodou (např. RWHS) s cílem zmírnit stres zvířat.

Instalace RWH se v suchých a polosuchých oblastech stávají nezbytností pro zlepšení kvality chovu skotu tím, že zajišťují dodatečný zdroj vody v období sucha. Podle Chikwanha et al. [53] a Halimani et al. [54] má přístup k RWH pozitivní vliv na produktivitu hospodářských zvířat a následně i na drobné chovatele ovcí, a to zvyšováním vodní bezpečnosti a udržení produkce i během období sucha. RWHS umožňují zemědělcům, zejména znevýhodněným skupinám, investovat do doplňkového krmení a využívat vhodně přizpůsobená plemena, čímž se zlepšuje růst, zdravotní stav a kvalita masa zvířat. Muhirirwe et al. [55] dále zdůrazňují význam RWHS pro mléčnou produkci, kdy dochází ke zvýšení dojivosti a kvality mléka díky snížení závislosti na sezonních zdrojích vody a podpoře přežívání hospodářských zvířat. RWHS tak zajišťují stabilní zásobování vodou jak pro zvířata, tak pro pěstování plodin, čímž zvyšují nutriční i ekonomickou hodnotu živočišných produktů.

RWH a kvalita života ve venkovských domácnostech

RWH významně přispívá k přeměně venkovských domácností tím, že zmírňuje nedostatek vody, zvyšuje zemědělskou produktivitu a posiluje odolnost zdrojů obživy v oblastech s nedostatkem vody. Z tohoto pohledu nedávná studie Waqas et al. [40] ukázala, že využití objektů RWH k doplňkové závlaze na polích zvýšilo potravinovou bezpečnost na plošině Potohar v Pákistánu. Podobně Gebru et al. [56] zdůrazňují klíčovou roli technologií RWH při zajišťování potravinové bezpečnosti domácností v suchých a polosuchých oblastech Etiopie. Tyto technologie umožňují využívat dešťovou vodu k pěstování plodin během období sucha a přispívají k diverzifikaci zemědělské produkce.

V lokalitách, kde jsou domácnosti vystaveny záplavám a špatnému odvodnění, jako je např. Asunción (Paraguay), jsou RWHS považovány za klíčové řešení pro řízení rizik spojených s tímto přírodním jevem [57].

Prostřednictvím RWHS je postupně zajišťováno zásobování domácností pitnou vodou ve venkovských suchých a polosuchých oblastech. García-Avila et al. [17] provedli přehled systémů zachycování a skladování dešťové vody a jejich potenciálu poskytovat bezpečnou pitnou vodu ve venkovských domácnostech a zdůraznili význam sledování kvalitativních parametrů akumulované vody, jako jsou pH, zákal a *E. coli*, pro ochranu veřejného zdraví. V jiné studii Osayemwenre & Osibote [58] podali přehled zdravotních rizik spojených s využíváním dešťové vody zachycené z různých typů střech (např. zelené střechy, konvenční střechy a fotovoltaické střechy). Výzkum identifikoval potenciální kontaminanty, jako jsou mikroorganismy a těžké kovy, jež mohou negativně ovlivnit zdraví venkovského obyvatelstva, pokud nejsou správně řízeny. García-Avila et al. [17] proto zdůrazňují zásadní význam pečlivého výběru materiálů, pravidelné dezinfekce a údržby RWHS pro zajištění bezpečného využívání těchto systémů.

Navzdory přínosům pro zemědělství, chov hospodářských zvířat a kvalitu života ve venkovských domácnostech čelí zavádění RWHS řadě výzev. Muhirirwe et al. [55] upozorňují na vysoké počáteční náklady inovativních struktur RWH, a to i přes jejich dlouhodobé přínosy. Chikwanha et al. [53] a Halimani et al. [54] dále poukazují na to, že hlavními překážkami instalace RWHS u malých zemědělců jsou omezené finanční zdroje, nedostatek technických znalostí a nedostatečná institucionální podpora.

HOSPODAŘENÍ S POVODŇOVOU VODOU A ŘÍZENÍ EROZE VE VENKOVSKÝCH OBLASTECH

RWH a řízení vodní eroze

Vodní eroze je považována za hlavní hrozbu pro zemědělskou půdu na celé planetě. Ovlivňuje udržitelnost zemědělských pozemků i pastevních ploch. Podle Firoozi & Firoozi [59] dochází k vodní erozi působením hydrodynamických sil, kdy dešťová voda odtéká po povrchu nebo infiltruje do půdy, čímž uvolňuje a transportuje půdní částice. Tento proces postupně mění krajinu a vede ke ztrátě obdělávatelné půdy. Pro kontrolu vodní eroze Yu et al. [60] zdůrazňují nutnost studia srážkového režimu, protože intenzita srážek je považována za hlavní faktor uvolňování půdních částic. Haddad et al. [61] proto představují RWH jako účinné řešení pro zachycování a akumulaci povrchového odtoku, čímž se snižují účinky eroze a podporuje se růst místní vegetace v pastevních oblastech Jordánska. Podobně systémy RWH s přehrazenými hrůbky (tied ridges) zpomalují erozní odtok během extrémních srážkových epizod a zároveň zachycují vodu při slabších srážkách v Tanzanii [62].

RWH a zvládání povodňových průtoků

V návaznosti na změny klimatu, charakterizované po sobě jdoucími roky sucha, nepravidelnými srážkami a nepředvídatelnými povodňovými událostmi, se udržitelné řízení těchto rizik stává stále důležitějším, zejména v suchých a polosuchých oblastech. V tomto kontextu RWH představuje dvojí řešení, které umožňuje zmírňovat dopady povodní a zároveň akumulovat přebytečnou vodu pro její opětovné využití v činnostech, jako je závlaha plodin, napájení hospodářských zvířat a domácí využití. Ansari et al. [63] uvádějí konkrétní příklad pozitivního dopadu realizace objektů RWH v Pákistánu, konkrétně přehradu Mangla. Od svého uvedení do provozu dokáže tato přehrada snížit intenzitu povodní v povodí horního toku řeky Jhelum o 20 %, přestože jejím hlavním účelem je akumulace vody pro závlahu a výrobu energie. Podobně Raoufi & Tsubaki [2] navrhuje inovativní RWHS, jež transformují povodně na prostředek zmírnění sucha v jihozápadních provinciích Íránu. Tento přístup zahrnuje obnovu tradičních RWHS (např. kanát, Ab-Anbar) s cílem efektivně řídit a akumulovat povodňové průtoky pro využití v obdobích sucha. Zemědělci v jordánské poušti využívají povodňové průtoky k podpoře zemědělství prostřednictvím metody známé jako „floodwater farming“. Tato technika je založena na tradičních RWHS, jako jsou systémy zdí a kanálů, které slouží k přivádění, rozvádění, akumulaci a využívání vody z povodní pro závlahu plodin [64]. Ve stejném duchu Ndayiragije et al. [39] zdůrazňují význam zachycování a opětovného využívání povodňových průtoků pro podporu socioekonomického rozvoje. Tato praxe výrazně snižuje energetickou náročnost čerpání podzemní vody a zároveň zajišťuje udržitelný zdroj vody pro zemědělské činnosti.

Celkově analyzované studie ukazují, že RWH představuje účinnou strategii hospodaření s půdou a vodou, která současně zmírňuje erozi a snižuje rizika povodní. RWHS zvyšují infiltraci vody a pomáhají chránit zemědělskou půdu před degradací. Zachycená povodňová voda může být dále využívána pro nepitné účely, jako je závlaha nebo chov hospodářských zvířat, čímž se posiluje odolnost v suchých a polosuchých oblastech. Souhrnně lze říci, že odborná literatura mluví ve prospěch zavádění technik RWH s cílem podpořit udržitelné zemědělství a zlepšit životní podmínky ve venkovských oblastech.

Vodohospodářská politika ve vztahu k RWH a zvládání povodňových průtoků

S ohledem na současnou globální situaci charakterizovanou po sobě jdoucími roky sucha a nepravidelnými srážkovými režimy, zejména v suchých a polosuchých oblastech, dále zhoršovanou jevy, jako jsou vodní eroze a povodně, se začlenění RWH v jeho různých podobách do politik hospodaření s vodními zdroji stává pro jednotlivé státy nezbytností. Toto začlenění má za cíl zajistit udržitelné hospodaření s vodou v zemědělství a efektivnější řízení rizik spojených s vodní erozí a povodněmi.

Saúdská Arábie trpí výrazným nedostatkem vody v důsledku vysokého výparu a nízkých srážek, stejně jako vysoké spotřeby vody v zemědělství (87 % celkové spotřeby vody v zemi). V důsledku toho byla vláda Saúdské Arábie nucena přijmout pokročilé strategie v zemědělském sektoru, jako jsou zavádění precizní závlahy, podpora plodin méně náročných na vodu a posilování objektů RWH a sběru vody z mlhy [65]. Podobně Egypt čelí závažným problémům s nedostatkem vody, včetně přívalových povodní a zasolování podzemních vod. Tyto výzvy zdůrazňují nutnost identifikace vhodných lokalit pro RWH a kombinování této technologie s hydrologickým modelováním s cílem snížit rizika přívalových povodní a podpořit doplňování zvodní, a tím zajistit vodu pro zemědělské i domácí potřeby [38]. Podobně je v Indii zapojení komunit a posilování RWHS považováno za strategický přístup k řízení rizik spojených s nadměrnými srážkami a povodněmi [66]. V Tunisku byla zavedena hydrosociální strategie založená na investicích do půdní a vodohospodářské infrastruktury s cílem zlepšit zachycování a opětovné

využívání srážkové vody [67]. Bangladéš se rovněž potýká s extrémními meteorologickými podmínkami a nekontrolovaným využíváním vody, což vyžaduje zavádění komunitně založených RWHS (CBRWHS) a podporu ze strany státu ve formě finanční i technické pomoci s cílem rozšířit instalace RWH v pobřežních oblastech [68]. Dále začlenění RWHS do strategií hospodaření s vodou a posílení role místní správy při navrhování a údržbě těchto vodních děl v zemích s nízkými a středními příjmy (LMICs) přispěje ke snížení negativních dopadů povodní, sucha a nepředvídatelné dostupnosti vody v těchto regionech [8]. Navíc zavádění přírodě blízkých řešení pro obnovu degradované vodohospodářské infrastruktury a zapojení místních komunit do politik hospodaření s vodou v suchých a polosuchých oblastech Afriky povede ke snížení degradace půdy a ke zlepšení zásobování vodou pro zemědělské i domácí využití [3]. Navzdory rozdílům ve správě, klimatických podmínkách a technologiích napříč regiony odborná literatura doporučuje, aby začlenění RWHS do širších strategií adaptace na změnu klimatu a zajištění vodní bezpečnosti účinně podpořilo udržitelný rozvoj v oblastech s nedostatkem vody. Úspěch těchto iniciativ však do značné míry závisí na aktivní účasti všech aktérů, včetně tvůrců politik, výzkumníků, investorů a místních komunit, při plánování, realizaci a správě těchto vodních děl.

ZÁVĚR

Předložený článek představuje systematický přehled studií zaměřených na RWHS s využitím přístupu PRISMA. Přehled zahrnuje publikace z období od ledna 2021 do prosince 2025, získané z databází ScienceDirect a Scopus, se zaměřením na články indexované ve Scopusu.

Na základě komplexní analýzy 66 vybraných článků byla zpracována podrobná literární rešerše, která zdůrazňuje různé aspekty RWHS a jejich zásadní roli v hospodaření s vodními zdroji, zejména v suchých a polosuchých oblastech postižených výrazným suchem a nedostatkem vody.

Studie syntetizuje tradiční postupy RWH a zkoumá jejich kulturní význam na Blízkém východě, v Asii, severní Africe a subsaharské Africe. Zároveň přináší poznatky o jejich modernizaci, zejména o integraci nových technologií a inovací při vývoji udržitelných řešení nedostatku vody a řízení povodní.

Tento přehled zdůrazňuje význam inovativních metod využívaných po celém světě k identifikaci potenciálních lokalit pro objekty RWH s ohledem na rozmanitost typů, návrhů a socioekonomických i environmentálních parametrů. Takový přístup pomáhá rozhodovacím orgánům a investorům při výběru vhodných lokalit pro realizaci různých typů RWHS.

Navzdory dvojímu přínosu RWHS, spočívajícímu v zajištění vody pro podporu zemědělství, chovu hospodářských zvířat a venkovských zdrojů obživy, stejně jako ve zmiřování povodní a vodní eroze, nejsou tyto systémy dosud plně integrovány do politik hospodaření s vodními zdroji v řadě zemí trpících nedostatkem vody. Výzvy pro udržitelné hospodaření s vodními zdroji prostřednictvím RWHS zahrnují zvyšování povědomí a vzdělávání venkovských komunit o využívání a ochraně těchto vodních děl, stejně jako budování silných institucionálních podpůrných mechanismů.

Závěrem lze konstatovat, že budoucí výzkum by se měl zaměřit na hodnocení vládních a institucionálních rámců s cílem rozšířit zavádění RWHS v suchých a polosuchých oblastech a posílit jejich roli jako udržitelné techniky pro zmiřování nedostatku vody.

LITERATURA

- [1] BAKHTYAR, A. A., SALAR, S. G., SHAREEF, A. J. An Integrated New Approach for Optimizing Rainwater Harvesting System with Dams Site Selection in the Dewana Watershed, Kurdistan Region, Iraq. *Heliyon*. 2024, 10(6), e27273. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27273>
- [2] RAOUFI, A., TSUBAKI, K. Reviving Ancestral Water Management Practices: A Sustainable and Resilient Design Approach Addressing the Flood-Drought Paradox in Rural Ahvaz, Iran. *Journal of Environmental Management*. 2025, 385, 125476. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125476>

- [3] OKELLO, C., GITHIORA, Y. W., SITHOLE, S., OWUOR, M. A. Nature-Based Solutions for Water Resource Management in Africa's Arid and Sem-Arid Lands (ASALs): A Systematic Review of Existing Interventions. *Nature-Based Solutions*. 2024, 6, 100172. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2024.100172>
- [4] AMIRI, M., BOUGUELBA, S., SBAI, A., GHZAL, M., QADEM, Z., SALEM, A. Identification of Suitable Sites for Rainwater Harvesting Using AHP and GIS in the Middle and High Moulouya Basin, Morocco. *E3S Web of Conferences*. 2025, 607, 02001. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560702001>
- [5] BEN HASSEN, T., EL BILALI, H., ALLAHYARI, M. S., CHATTI, C. B. Traditional Irrigation Knowledge for Sustainable Water Resource Management in Arid Environments: Insights from the MENA Region. *Journal of Arid Environments*. 2025, 231, 105466. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105466>
- [6] OLMEDO, S. I., VALEGGIA, C. R., PALAVECINO, C., PEREZ-ESCAMILLA, R. I Never Don't Have Water Because I Collect Rainwater: Domains of Water Insecurity and Their Sociocultural Correlates in an Indigenous Community of Northern Argentina. *Current Developments in Nutrition*. 2025, 9(9), 107519. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cdnut.2025.107519>
- [7] RODRIQUES DE SÁ SILVA, A. C., BIMBATO, A. M., BALESTIERI, J. A. P., VILANOVA, M. R. N. Exploring Environmental, Economic and Social Aspects of Rainwater Harvesting Systems: A Review. *Sustainable Cities and Society*. 2022, 76, 103475. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103475>
- [8] LEBU, S., LEE, A., SALZBERG, A., BAUZA, V. Adaptive Strategies to Enhance Water Security and Resilience in Low- and Middle-Income Countries: A Critical Review. *Science of the Total Environment*. 2024, 925, 171520. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171520>
- [9] HALDER, S., BOSE, S. Addressing Water Scarcity Challenges through Rainwater Harvesting: A Comprehensive Analysis of Potential Zones and Model Performance in Arid and Semi-Arid Regions – A Case Study on Purulia, India. *HydroResearch*. 2024, 7, s. 201–212. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydres.2024.04.001>
- [10] AKLAN, M., FRAITURE, C. de, HAYDE, L. G. Why We Should Revitalize Indigenous Water Harvesting Systems: Lessons Learned. *International Soil and Water Conservation Research*. 2025, 13(1), s. 152–163. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2024.05.004>
- [11] MADOMGUIA, D., NYA, E. L., NJOMOU-NGOUNOU, E. L., GATCHA-BANDJUN, N., MWAMILA, T. B., BALNA, J., HALIMASSIA, E., METSEBO, J., NZOUEBET, W. A. L., TCHOUMBE, R. R. et al. Revisiting Water Resources Management in the Mandara Mountains. *Heliyon*. 2025, 11(1), e41692. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41692>
- [12] LEAL PACHECO, F. A., TARLÉ PISSARA, T. C. Water Security in the Agriculture and Cattle Grazing Activities: A Systematic Review. *Water Security*. 2025, 26, 100191. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2025.100191>
- [13] INGRAO, C., STRIPOLI, R., LAGIOIA, G., HUISINGH, D. Water Scarcity in Agriculture: An Overview of Causes, Impacts and Approaches for Reducing the Risks. *Heliyon*. 2023, 9(8), e18507. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507>
- [14] LIU, X., REN, Z., NGO, H. H., HE, X., DESMOND, P., DING, A. Membrane Technology for Rainwater Treatment and Reuse: A Mini Review. *Water Cycle*. 2021, 2, s. 51–63. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.08.001>
- [15] WANG, X., LUO, H., LUO, N., WEI, H., ZHOU, X., QIN, B., MEI, Y., CAO, M., ZHANG, Y. Bioinspired 1D Structures for Water Harvesting: Theory, Design and Application. *Chemical Engineering Journal*. 2025, 506, 159917. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159917>
- [16] YILDIRIM, G., ALIM, M. A., RAHMAN, A. Review of Rainwater Harvesting Research by a Bibliometric Analysis. *Water*. 2022, 14(20), 3200. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w14203200>
- [17] GARCÍA-AVILA, F., GUANOQUIZA-SUARÉZ, M., GUZMÁN-GALARZA, J., CABELLO-TORRES, R., VALDIVIEZO-GONZALES, L. Rainwater Harvesting and Storage Systems for Domestic Supply: An Overview of Research for Water Scarcity Management in Rural Areas. *Results in Engineering*. 2023, 18, 101153. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101153>
- [18] PALA, G. K., PATHIVADA, A. P., VELUGOTI, S. J. H., YERRAMSETTI, C., VEERANKI, S. Rainwater Harvesting – A Review on Conservation, Creation & Cost-Effectiveness. *Materials Today: Proceedings*. 2021, 45(7), s. 6 567–6 571. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.593>
- [19] TESTON, A., SCOLARO, T. P., MAYKOT, J. K., GHISI, E. Comprehensive Environmental Assessment of Rainwater Harvesting Systems: A Literature Review. *Water*. 2022, 14(17), 2716. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w14172716>
- [20] MOHER, D., LIBERATI, A., TETZLAFF, J., ALTMAN, D. G., The PRISMA Group. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *Plos Medecine*. 2009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jisu.2010.02.007>
- [21] KRATOCHVÍL, J. Comparison of the Accuracy of Bibliographical References Generated for Medical Citation Styles by EndNote, Mendeley, RefWorks and Zotero. *The Journal of Academic Librarianship*. 2017, 43(1), s. 57–66. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.acalib.2016.09.001>
- [22] WEERAHEWA, J., TIMSINA, J., WICKRAMASINGHE, CH., MIMASHA, S., DAYANANDA, D., PUSPAKUMARA, G. Ancient Irrigation Systems in Asia and Africa: Typologies, Degradation and Ecosystem Services. *Agricultural Systems*. 2013, 205, 103580. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agjsy.2022.103580>
- [23] MARSAL, R. Early Water Management Systems on the Southern Transjordan Plateau. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2023, 47, 103795. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103795>
- [24] ŞAMILOĞLU, B., BABA, A., CUEVAS, R. M., GÜNDÜZ, O. Nature-Based Solutions in Island Water Management: A Case Study from Bozcaada (Türkiye). *Journal of Environmental Management*. 2025, 394, 127348. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127348>

- [25] CARRIÓN-MERO, P., TIVINO, I., HERVAS, E., JAYA-MONTALVO, M., MALAVÉ-HERNANDEZ, J., SOLÓRZANO, J., BERREZUETA, E., MORANTE-CARBALLO, F. Water Sowing and Harvesting Application for Water Management on the Slopes of a Volcano. *Heliyon*. 2023, 9(5), e16029. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16029>
- [26] PREETI, P., SHENDRYK, Y., RAHMAN, A. Identification of Suitable Sites Using GIS for Rainwater Harvesting Structures to Meet Irrigation Demand. *Water*. 2022, 14(21), 3480. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w14213480>
- [27] ABDALLA, M. A. I. GIS-Based Identification of Optimal Rainwater Harvesting Sites to Support Irrigation in Egypt's Northwestern Coastal Region. *Sustainable Geosciences: People, Planet and Prosperity*. 2025, 1, 100004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.susgeo.2025.100004>
- [28] DU, X., TARIQ, A., ISLAM, F., AZIZ, S., WASEEM, L. A., AHMAD, M. N., AMIN, M., AMIN, N. U., ALI, S., ASLAM, M., SOUFAN, W. Integrated Study of GIS and Remote Sensing to Identify Potential Sites for Rainwater Harvesting Structures. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2024, 134, 103574. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103574>
- [29] MOUHOUMED, R. M., EKMEKÇIOĞLU, Ö., ÖZGER, M. A Holistic Multi-Tiered Decision Framework for Evaluating Rainwater Harvesting Potential in Arid Regions: A Case Study of the Southeastern Basin of Djibouti. *Groundwater for Sustainable Development*. 2024, 25, 101090. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101090>
- [30] ZHENG, X., SARWAR, A., ISLAM, F., MAJID, A., TARIQ, A., ALI, M., GULZAR, S., KHAN, M. I., ALI, M. A. S., ISRAR, M. et al. Rainwater Harvesting for Agriculture Development Using Multi-Influence Factor and Fuzzy Overlay Techniques. *Environmental Research*. 2023, 238(2), 117189. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117189>
- [31] ALY, M. M., SAKR, S. A., ZAYED, M. S. M. Selection of the Optimum Locations for Rainwater Harvesting in Arid Regions Using WMS and Remote Sensing. Case Study: Wadi Hodein Basin, Red Sea, Egypt. *Alexandria Engineering Journal*. 2022, 61(12), s. 9 795–9 810. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.046>
- [32] LOPANE, F. D., AYLING, S., HOO, Y. R., SHAMSUDDUHA, M., WANG, Q., JOSEPH, G., BAHUGUNA, A. Optimising Water Storage for Climate Resilience: Geospatial Targeting for Small Tanks Rejuvenation in Sri Lanka. *Journal of Environmental Management*. 2025, 374, 124031. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124031>
- [33] LI, S., LIU, Y., HER, Y., NGUYEN, A. H. Enhancing the SWAT Model for Creating Efficient Rainwater Harvesting and Reuse Strategies to Improve Water Resources Management. *Journal of Environmental Management*. 2024, 366, 121829. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121829>
- [34] NOP, C., FADHIL, R. M., UNAMI, K. A Multi-State Markov Chain Model for Rainfall To Be Used in Optimal Operation of Rainwater Harvesting Systems. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 285, 124912. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124912>
- [35] FU, Z., LIANG, P., BEHZAD, H. M., FANG, R., WANG, S., ZHAO, J., CHEN, H. Enhancing Rainwater Harvesting Efficiency in Karst Terrains: The Role of Road Intercepted Soil-Epikarst Lateral Flow. *Journal of Environmental Management*. 2025, 373, 123730. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123730>
- [36] LIU, F., JIANG, G., WANG, G., GUO, F., WANG, J., WANG, Q., SHI, J., CAI, J., WANG, M. Surface-Subsurface Hydrological Processes of Rainwater Harvesting Project in Karst Mountainous Areas Indicated by Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes. *Science of the Total Environment*. 2022, 831, 154924. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154924>
- [37] MADGUNDI, M. M., KUMBHAR, A. P., LELE, G. M., KOMBLE, S. P., MARANE, Y. H., MATE, A. R. Design and Investigation on Rain Saucer: The Technique of Roofless Rainwater Harvesting. *Materials Today: Proceedings*. 2023, 72(3), s. 1 084–1 088. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.169>
- [38] EZZELDIN, M., KONSTANTINOVICH, S. E., IGOREVICH, G. I. Determining the Suitability of Rainwater Harvesting for the Achievement of Sustainable Development Goals in Wadi Watir, Egypt Using GIS Techniques. *Journal of Environmental Management*. 2022, 313, 114990. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114990>
- [39] NDAYIRAGIJE, J. M., FANG, H., ABIDUHAYE, N., NDUWIMANA, L., MBOHANKUYE, S., SHI, M., LI, Y., LIU, N. Exploring Socio Environmental Benefits of Floodwater Utilization in a Changing Climate World. *iScience*. 2025, 28(11), 113646. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2025.113646>
- [40] WAQAS, M. S., BAYABIL, H. K., HAILEGNAW, N. S., HUSSAIN, S., TARIQ, A., ABUBAKAR, S. Drought Mitigation and Livelihood Improvement Options through Rainwater Harvesting Structures in a Rainfed Agricultural System. *Agricultural Systems*. 2025, 230, 104469. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jagsy.2025.104469>
- [41] ALBARRACÍN, M., RAMÓN, G., GONZÁLEZ, J., IÑIGUEZ-ARMIJOS, C., ZAKALUK, T., MARTOS-ROSILLO, S. The Ecohydrological Approach in Water Sowing and Harvesting Systems: The Case of the Paltas Catacocha Ecohydrology Demonstration Site, Ecuador. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2021, 21(3), s. 454–466. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.07.007>
- [42] RICHARDS, S., RAO, L., CONNELLY, S., RAJ, A., RAVEENDRAN, L., SHIRIN, S., JAMWAL, P., HELLIWELL, R. Sustainable Water Resources through Harvesting Rainwater and the Effectiveness of a Low-Cost Water Treatment. *Journal of Environmental Management*. 2021, 286, 112223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112223>
- [43] KHANAL, G., MARASENI, T., THAPA, A., DEVKOTA, N., PAUDEL, U. R., KHANAL, C. K. Managing Water Scarcity Via Rainwater Harvesting System in Kathmandu Valley, Nepal: People's Awareness, Implementation Challenges and Way Forward. *Environmental Development*. 2023, 46, 100850. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2023.100850>
- [44] XUE, CH., XIONG, F., LI, J., LI, X., LI, J., WANG, Y., LI, X., CUI, Z. Economic Feasibility Assessment and Parameter Sensitivity Analysis of Rainwater Harvesting Systems in Different Climatic Zones of China. *Water-Energy Nexus*. 2025, 8, s. 6–17. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2025.01.001>
- [45] DARABI, H., MORADI, E., DAVUDIRAD, A. A., EHTERAM, M., CERDA, A., HAGHIGHI, A. T. Efficient Rainwater Harvesting Planning Using Socio-Environmental Variables and Data-Driven Geospatial Techniques. *Journal of Cleaner Production*. 2021, 311, 127706. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127706>
- [46] WANG, Q., WANG, X., ZHANG, D., ZHOU, X., MAK-MENSAH, E., ZHAO, X., ZHAO, W., GHANNEY, P., HAIDER, F. U., LIU, Q., LI, G., LI, X., LI, Y., MAJIED, Y. Selection of Suitable Type and Application Rate of Biochar for Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Productivity in Ridge-Furrow Rainwater-Harvesting in Semiarid Regions of China. *Field Crops Research*. 2022, 277, 108428. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108428>
- [47] ZHAO, X., WANG, Q., QADEER, A., SUN, Y., AZIM, R., AWUKU, I., MASOUMKHANI, F., MA, W., LIU, Q., CUI, X., DONG, H., LI, X., LIU, B. Optimized Length and Application Rate of Chopped Straw for Alfalfa Production in Ridge-Furrow Rainwater-Harvesting in Semi-Arid Regions in China. *Agricultural Water Management*. 2025, 311, 109393. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109393>
- [48] CHEN, G., WU, P., WANG, J., ZHANG, P., JIA, Z. Ridge-Furrow Rainfall Harvesting System Helps to Improve Stability, Benefits and Precipitation Utilization Efficiency of Maize Production in Loess Plateau Region of China. *Agricultural Water Management*. 2022, 261, 107360. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107360>
- [49] KUBIKU, F. N. M., MANDUMBU, R., NYAMADZAWO, G., NYAMANGARA, J. Field Edge Rainwater Harvesting and Inorganic Fertilizers for Improved Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) Yields in Semi-Arid Farming Regions of Marange, Zimbabwe. *Heliyon*. 2022, 8(2), e08859. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08859>
- [50] YILDIRIM, D., CEMEK, B., UNLUKARA, A. The Effect of Mulched Ridge and Furrow Micro Catchment Water Harvesting on Red Pepper Yield and Quality Features in Bafra Plain of Northern Turkey. *Agricultural Water Management*. 2022, 262, 107305. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107305>
- [51] HADDAD, M., WORQLUL, A. W., STROHMEIER, S., HAMMOUR, D. A., MAHASNEH, L., HADDAD, N. Suitability Mapping of Micro and Meso Scale Rain Water Harvesting for Vegetation-Based Restoration in Arid Degraded Areas of Jordan. *Catena*. 2024, 246, 108461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108461>
- [52] DEO, A., KARMAKAR, S., ARORA, A. Rainwater Harvesting and Water Balance Simulation-Optimization Scheme to Plan Sustainable Second Crop in Small Rain-Fed Systems. *Journal of Environmental Management*. 2022, 323, 116135. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116135>
- [53] CHIKWANHA, O. C., MUPFIGA, S., OLAGBEGI, B. R., KATIYATIYA, CH. L. F., MOLOTSI, A. H., ABIODUN, B. J., DZAMA, K., MAPIYE, C. Impact of Water Scarcity on Dryland Sheep Meat Production and Quality: Key Recovery and Resilience Strategies. *Journal of Arid Environments*. 2021, 190, 104511. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104511>
- [54] HALIMANI, T., MARANDURE, T., CHIKWANHA, O. C., MOLOTSI, A. H., ABIODUN, B. J., DZAMA, K., MAPIYE, C. Smallholder Sheep Farmers' Perceived Impact of Water Scarcity in the Dry Ecozones of South Africa: Determinants and Response Strategies. *Climate Risk Management*. 2021, 34, 100369. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100369>
- [55] MUHIRIRWE, S. C., KISAKYE, V., BRUGGEN, B. V. d. Reliability and Economic Assessment of Rainwater Harvesting Systems for Dairy Production. *Resources, Conservation & Recycling Advances*. 2022, 14, 200079. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2022.200079>
- [56] GEBRU, T. A., BRHANE, G. K., GEBREMEDHIN, Y. G. Contributions of Water Harvesting Technologies Intervention in Arid and Semi-Arid Regions of Ethiopia, in Ensuring Households' Food Security, Tigray in Focus. *Journal of Arid Environments*. 2021, 185, 104373. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104373>
- [57] ORTIZ, S., DE BARROS BARRETO, P., CASTIER, M. Rainwater Harvesting for Domestic Applications: The Case of Asunción, Paraguay. *Results in Engineering*. 2022, 16, 100638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100638>
- [58] OSAYEMWENRE, G., OSIBOTE, O. A. A Review of Health Hazards Associated with Rainwater Harvested from Green, Conventional and Photovoltaic Rooftops. *International Journal of Environmental Science and Development*. 2021, 12(10), s. 289–303. Dostupné z: <https://doi.org/10.18178/ijesd.2021.12.10.1353>
- [59] FIROOZI, A. A., FIROOZI, A. A. Water Erosion Processes: Mechanisms, Impact, and Management Strategies. *Results in Engineering*. 2024, 24, 103237. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103237>
- [60] YU, Y., ZHU, R., MA, D., LIU, D., LIU, Y., GAO, Z., YIN, M., BANDALA, E. R., RODRIGO-COMINO, J. Multiple Surface Runoff and Soil Loss Responses by Sandstone Morphologies to Land-Use and Precipitation Regimes Changes in the Loess Plateau, China. *Catena*. 2022, 217, 106477. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106477>
- [61] HADDAD, M., STROHMEIER, S. M., NOUWAKPO, K., RIMAWI, O., WELTZ, M., STERK, G. Rangeland Restoration in Jordan: Restoring Vegetation Cover by Water Harvesting Measures. *International Soil and Water Conservation Research*. 2022, 10(4), s. 610–622. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.001>
- [62] ESCOBAR JARAMILLO, D., ARATA, L., MAUSCH, K., SCKOKAI, P., FASSE, A., ROMMEL, J., CHOPIN, P. Linking Innovations Adoption with Farm Sustainability: Empirical Evidence from Rainwater Harvesting and Fertilizer Micro-Dosing in Tanzania. *World Development*. 2024, 183, 106732. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106732>

[63] ANSARI, R., LIAQAT, M. U., GROSSI, G. Improving Flood, Drought Management in Transboundary Upper Jhelum Basin-South Asia. *Science of The Total Environment*. 2024, 945, 174044. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174044>

[64] FRIEDMAN, H., ADAMS, R., ANDERSON, J., BYRNE, P., GILBERTSON, D., GRATTAN, J., HAYLOCK, K., HOLMAN, L., HUNT, C. O., TOLAND, H. Floodwater Farming and Quarrying at Jabal Hamra Arlbiq in the Jordanian Desert: Economic Support for the Classical Period Faynan Orefield. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2022, 42, 103056. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103056>

[65] MIR, M. A., ASHRAF, M. W. The Challenges and Potential Strategies of Saudi Arabia's Water Resources: A Review in Analytical Way. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2023, 20, 100855. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100855>

[66] KUMAR, S., GOYAL, M. K. Water Policy Review: Ensuring Sustainable Water Management for India. *Journal of Environmental Management*. 2025, 388, 125823. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125823>

[67] NICOLAS-ARTERO, CH., KARAOULI, F., DHAOUADI, L., ALI, Z., KHELIF, N., ZAIED, M. B., OUESSAR, M., BRESCI, E., RULLI, M. C. Water (In)Security in Gafsa, Tunisia: A Hydrosocial Approach. *Agricultural Water Management*. 2025, 317, 109650. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109650>

[68] MUKARRAM, M. M. T., KAFY, A.-A., RUKIYA, Q. U., ALMULHIM, A. I., DAS, A., FATTAH, M. A., RAHMAN, M. T., CHOWDHURY, M. A. Perception of Coastal Citizens on the Prospect of Community-Based Rainwater Harvesting System for Sustainable Water Resource Management. *Resources, Conservation & Recycling*. 2023, 198, 107196. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107196>

Autoři

Imane Belkaf

✉ belkaf.imane@usms.ac.ma

Mustapha Hasnaoui

✉ m.hasnaoui@usms.ma

Laboratoř environmentálního, ekologického a agroprůmyslového inženýrství, Fakulta věd a technologií, Univerzita Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal (Maroko)

Originál příspěvku v angličtině prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.006

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

RAINWATER HARVESTING SYSTEMS AND FLOOD WATER MANAGEMENT IN RURAL AREAS: A SYSTEMATIC REVIEW

BELKAF, I.; HASNAOUI, M.

Environmental, Ecological and Agro-Industrial Engineering Laboratory, Faculty of Science and Technology, Sultan Moulay Slimane University, Beni Mellal (Morocco)

Keywords: climate – drought – arid, semi-arid areas – hydraulic systems – rainwater – rainwater harvesting (RWH) – flood – water erosion

In a climate marked by prolonged drought, observed mainly in arid and semi-arid areas, the installation of hydraulic systems for rainwater collection and storage in rural and isolated areas is becoming a necessity to preserve livestock and ensure water security for the local population. For this purpose, this review synthesizes recent studies on the various hydraulic systems used for rainwater harvesting (RWH) in rural areas to support agriculture, livestock, and households. This review examines 66 relevant studies published in journals indexed in ScienceDirect and Scopus over a period of five years (January 2021 – December 2025). It emphasizes the importance of design based on the specific characteristics of each location or country, the criteria for selecting implementation sites, the impact of RWH systems on agriculture, livestock, and rural households, existing challenges, and proposes some guidelines for sustainable rainwater management and flood reduction.



Odhad změn návrhových srážek ve vybraných nepozorovaných lokalitách pomocí geostatistického modelu regionální frekvenční analýzy s využitím klimatických projekcí

IVANA STRNADOVÁ, FILIP STRNAD, DAMIÁN HECZKO, MARTIN HANEL

Klíčová slova: extrémní srážky – IDF, GEV, RFA – rozptyl ensamble – klimatická změna – CORDEX

ABSTRAKT

Studie kvantifikuje změny krátkodobých návrhových srážek s dobou opakování 100 let v nepozorovaných pilotních lokalitách České republiky a analyzuje strukturu nejistoty těchto odhadů v podmínkách klimatické změny. Referenční IDF křivky byly odvozeny pomocí regionální frekvenční analýzy založené na index-flood konceptu s využitím GEV rozdělení a odhadu parametrů metodou L-momentů. Budoucí změny byly stanoveny z vícemodelového ensamble regionálních klimatických projekcí CORDEX pro scénáře RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5 v obdobích 2035–2065 a 2070–2100.

Ve scénáři RCP8.5 (2070–2100) činí průměrná relativní změna 100letého hodnového kvantilu přibližně 52 %, přičemž interval 5.–95. percentilu dosahuje hodnot -7 % až +126 %. V období 2035–2065 jsou rozdíly mezi emisními scénáři menší než vnitřní modelová variabilita, zatímco ve druhé polovině století se emisní trajektorie stává dominantním zdrojem divergence projekcí. Relativní zesílení je vyšší pro kratší doby trvání, což naznačuje disproporční citlivost krátkodobých extrémů.

Analýza ukazuje, že nejistota vysokých dob opakování je významně ovlivněna odhadem tvarového parametru GEV rozdělení, jehož malé rozdíly vedou k nelineárnímu růstu extrapolovaných kvantilů. Zjištěné zesílení extrémních srážek je konzistentní s očekávaným termodynamickým zesílením hydrologického cyklu, avšak rozptyl ensamble poukazuje na značnou strukturální nejistotu regionálních klimatických modelů.

Výsledky indikují, že použití historických IDF křivek bez zohlednění klimatické změny může vést k systematickému podhodnocení návrhových hodnot, zejména při dlouhé životnosti infrastruktury.

ÚVOD

Extrémní srážkové události představují jeden z nejdůležitějších hydro-meteorologických jevů ovlivňujících bezpečnost obyvatelstva, funkčnost technické infrastruktury i ekonomickou stabilitu regionů [1]. V podmínkách střední Evropy jsou přívalové povodně a lokální zaplavení dlouhodobě spojovány především s krátkodobými intenzivními dešti, jejichž dopady jsou zesilovány urbanizací a změnou využití krajiny. Rostoucí podíl nepropustných ploch, úpravy vodních toků a koncentrace zástavby vedou ke zrychlení odtokové odezvy povodí a zvyšují citlivost území na extrémní srážkové epizody.

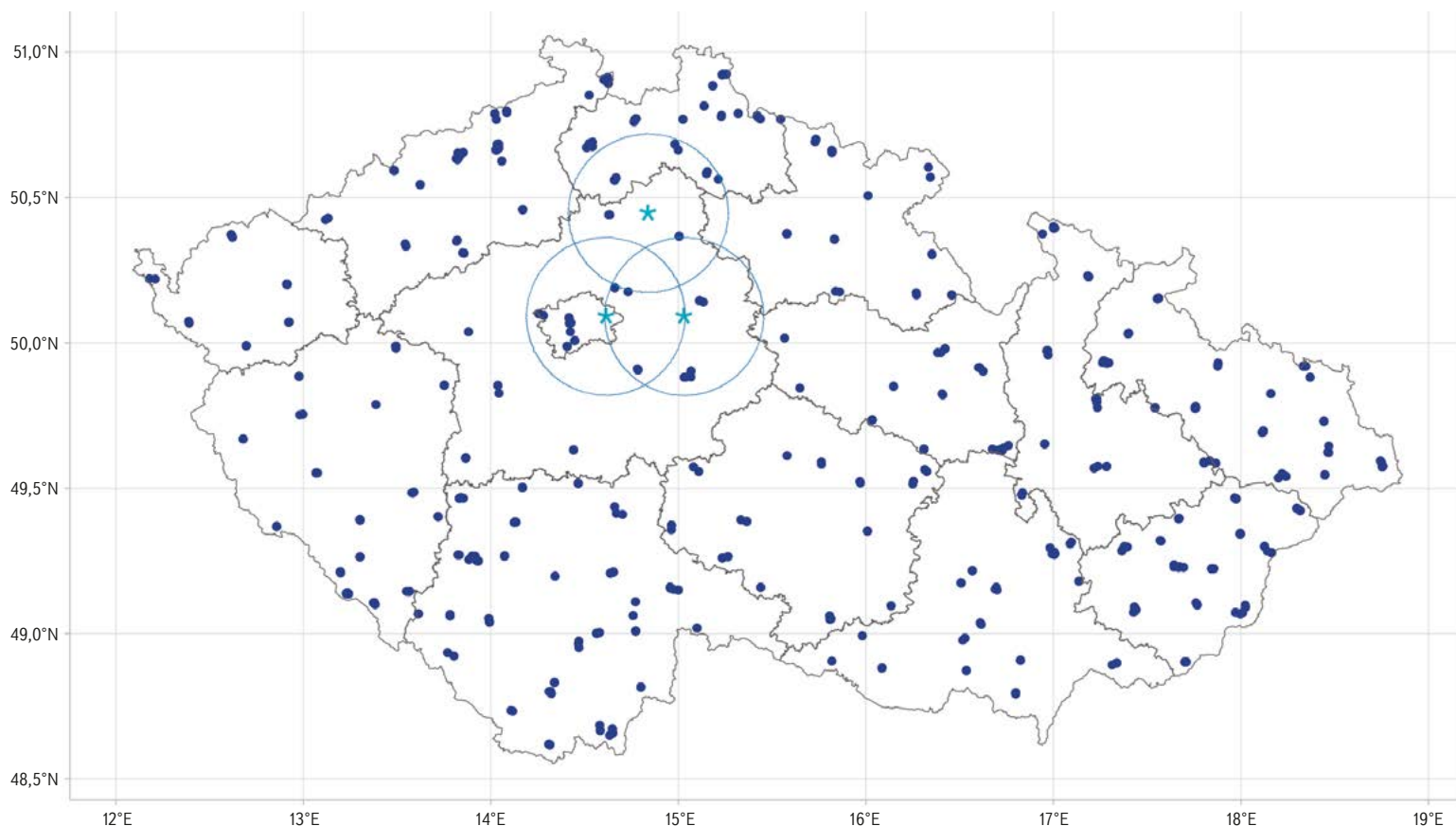
Návrh technických opatření, jako jsou kanalizační systémy, retenční nádrže, poldry či prvky modro-zelené infrastruktury, je proto založen na statistickém popisu extrémních srážek [2]. V praxi jsou používány návrhové kvantily vyjádřené prostřednictvím křivek intenzita–doba trvání–četnost (IDF), které představují základní nástroj dimenzování vodohospodářských staveb [3, 4]. Tyto křivky jsou obvykle odvozovány z historických časových řad srážek a implicitně předpokládají stacionární klimatický režim [3].

Předpoklad stacionarity však v kontextu probíhající klimatické změny přestává být obhajitelný [1]. Rostoucí koncentrace skleníkových plynů vede k oteplování atmosféry, které je spojeno se změnami hydrologického cyklu [5]. Klimatické modely i pozorované trendy indikují zesilování extrémních srážek v mnoha regionech světa [1, 6]. Fyzikální základ tohoto zesílení je spojen s Clausius–Clapeyronovou závislostí, podle níž roste maximální obsah vodní páry v atmosféře přibližně o 7 % na 1 K oteplení [5, 6]. Vyšší obsah vodní páry vytváří potenciál pro intenzivnější srážkové události, zejména konvektivního charakteru [6].

Přestože je fyzikální mechanismus zesílení extrémních srážek relativně dobře pochopen, jeho kvantifikace na regionální a lokální úrovni je zatížena značnou nejistotou [1]. Ta vyplývá z několika zdrojů, jsou to: strukturální rozdíly mezi klimatickými modely, nejistota emisního scénáře a vnitřní klimatická variabilita [7]. Z hlediska vodohospodářské praxe je však zásadní nejen průměrná změna návrhového kvantilu, ale především jeho horní hranice, která reprezentuje potenciální riziko poddimenzování infrastruktury.

Dalším významným problémem je omezená dostupnost dlouhodobých kvalitních měření srážek. V mnoha lokalitách není k dispozici dostatečně dlouhá časová řada umožňující spolehlivý odhad vysokých dob opakování. Extrapolace 100letého nebo 200letého kvantilu z krátké časové řady je statisticky nestabilní a citlivá na jednotlivé extrémní události [2, 8]. Regionální frekvenční analýza (RFA) představuje metodický přístup, který tento problém zmiřňuje sdílením informace mezi klimaticky podobnými lokalitami [9]. Oddělením regionálního tvaru rozdělení od lokálního měřítka umožňuje robustnější odhad extrémních kvantilů i v oblastech bez přímého měření nebo s omezenou dostupností dat [9].

V literatuře existuje řada studií zabývajících se změnami extrémních srážek v kontextu klimatické změny, avšak méně prací systematicky propojuje regionální frekvenční analýzu s vícemodelovým ensemblem klimatických projekcí a explicitně kvantifikuje nejistotu vysokých dob opakování [3, 10, 11]. Zvláště nedostatečně je diskutována otázka, jak velká je nejistota 100letého návrhového



Obr. 1. Výběr stanic pro RFA – body vyznačené hvězdičkou jsou pilotní lokality, body značené tečkou jsou srážkoměrné stanice ČHMÚ a kružnice představují 30km buffer
 Fig. 1. Selection of stations for RFA – locations marked with a star indicate pilot sites, points marked with a dot represent rain gauge stations CHMI, and circles denote the 30km buffer

kvantilu a jak se její struktura mění v závislosti na časovém horizontu a emisním scénáři [7].

Předložená studie si klade za cíl tuto mezeru částečně zaplnit. Dále popsaná metodika byla aplikována na tři pilotní lokality (Bukovno, Pečky a Běchovice). Hlavní výzkumné otázky lze formulovat následovně:

- Jaká je velikost změny návrhové srážky s dobou opakování 100 let v budoucím klimatu?
- Jak velký je rozsah ensemblu klimatických projekcí a jak se mění v čase?
- Je pozorované zesílení extrémních srážek konzistentní s teoretickým Clausius-Clapeyronovým scalingem?

Odpovědi na tyto otázky mají přímý význam pro dimenzování vodohospodářské infrastruktury i pro strategické plánování adaptačních opatření. Studie proto kombinuje regionální frekvenční analýzu s vícemodelovým ensemblu regionálních klimatických projekcí a zaměřuje se nejen na odhad budoucích IDF křivek, ale zejména na systematickou kvantifikaci jejich nejistoty [7, 10, 11].

DATA

Pozorovaná srážková data

Ke konstrukci referenčních IDF křivek pro tři pilotní lokality byla využita pozorovaná data krátkodobých srážkových úhrnů ze sítě stanic Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) [12, 13]. Do analýzy byly zahrnuty pouze stanice s délkou časové řady přesahující 30 let, což představuje minimální délku potřebnou pro robustnější odhad vysokých dob opakování v rámci blokové analýzy

maxim [2, 8]. Výběr stanic byl dále omezen na lokality s dostatečnou kontinuitou měření a s minimálním podílem chybějících dat.

Primárním kritériem pro výběr stanic byla jejich prostorová blízkost k analyzovaným lokalitám, definovaná jako kruhový buffer o poloměru 30 km. Do regionální analýzy byly zahrnuty pouze stanice nacházející se uvnitř tohoto okruhu, jež zároveň splňovaly podmínku časové řady ročních maxim alespoň 30 let. Minimální délka záznamu byla zvolena s ohledem na stabilitu odhadu parametrů GEV (obecného rozdělení extrémních hodnot; z angl. General Extreme Value) rozdělení a na omezení nejistoty extrapolace vysokých dob opakování. Tento postup předpokládá, že stanice splňující obě kritéria vykazují dostatečnou klimatickou podobnost a statistickou robustnost pro aplikaci regionální frekvenční analýzy. Použité stanice jsou zobrazeny a popsány na obr. 1 a v tab. 1.

Tab. 1. Meteorologické stanice použité pro RFA, jejich vzdálenosti k pilotním lokalitám a délka časové řady ročních maxim

Tab. 1. Meteorological stations used for RFA, their distances to the pilot locations, and the length of the annual maxima time series

Lokalita	ID stanice	Vzdálenost [m]	Počet let	První rok	Poslední rok
Bukovno	P2CDUB01	27 831	48	1957	2022
	P2SEMC01	14 603	35	1986	2022
	P2TURN01	27 367	49	1951	2022
	U2DOKY01	18 074	60	1963	2022
Pečky	H3PODE01	8 629	37	1951	2022
	P2BRAN01	28 639	36	1986	2022
	P2NVES01	23 383	33	1986	2022
Běchovice	P1PBRA01	14 740	45	1961	2008
	P1PKAR01	13 792	61	1961	2022
	P1PKLE01	14 024	55	1961	2022
	P1PLIB01	15 041	51	1972	2022
	P1PRUZ01	24 845	37	1986	2022
	P2BRAN01	11 440	36	1986	2022
	P2NVES01	12 665	33	1986	2022
	P3ONDR01	23 791	37	1986	2022

Pro aplikaci teorie extrémních hodnot byla použita metoda blokových maxim [2, 8]. Pro každou dobu trvání (5 minut až 24 hodin) byla z časové řady extrahována roční maxima. Tento přístup je konzistentní s klasickou formulací EVT (teorie extrémních hodnot; z angl. Extreme Value Theory) a umožňuje přímé použití GEV rozdělení [8]. Výsledný soubor ročních maxim tvořil vstup pro regionální frekvenční analýzu a pro odhad parametrů GEV rozdělení v referenčním období [8, 9].

Klimatické projekce CORDEX

Budoucí změny návrhových srážek byly odvozeny z regionálních klimatických projekcí iniciativy CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) [14]. Byly využity modely v evropských doménách EUR-11 (horizontální rozlišení přibližně 11 km) a EUR-22 (rozlišení přibližně 22 km) [15]. Vyšší prostorové rozlišení umožňuje detailnější reprezentaci orografie a regionálních cirkulačních procesů, které ovlivňují extrémní srážky.

Ensemble zahrnoval více kombinací globálních klimatických modelů (GCM) a regionálních klimatických modelů (RCM). Tento vícemodelový přístup umožňuje zachytit strukturální nejistotu vyplývající z rozdílů v dynamickém jádru modelů, parametrizaci oblačnosti, konvekce a interakce atmosféry s povrchem [7, 16]. Každá kombinace GCM–RCM představuje jednu realizaci budoucího klimatu, přičemž soubor všech realizací tvoří ensemble. Souhrn kombinací použitých ensembleů znázorňuje *tab. 2*.

Tab. 2. Složení ensemble použitých projekcí (počet unikátních kombinací GCM–RCM podle scénáře RCP a domény

Tab. 2. Composition of the ensemble of projections used (number of unique GCM–RCM combinations) by RCP scenario and domain

RCP	EUR-11 (11 km)	EUR-22 (22 km)
RCP2.6	4	2
RCP4.5	5	0
RCP8.5	23	3

Byla hodnocena tři časová období:

- referenční historické období (modelový běh odpovídající minulému klimatu),
- blízké budoucí období 2035–2065,
- vzdálenější budoucí období 2070–2100.

Pro budoucí projekce byly analyzovány emisní scénáře RCP2.6, RCP4.5 a RCP8.5, které reprezentují různé trajektorie vývoje koncentrací skleníkových plynů [17, 18]. Scénář RCP2.6 předpokládá rychlou stabilizaci emisí, RCP4.5 střední stabilizační trajektorii a RCP8.5 scénář pokračujícího růstu emisí [18].

Z klimatických modelů byla použita hodinová data srážek v jednotkách $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, která byla převedena na úhrny a následně agregována na požadované doby trvání. Pro každý gridový bod odpovídající analyzovaným pilotním lokalitám byla z regionálních modelů extrahována časová řada ročních maxim analogickým postupem jako u pozorovaných dat [8].

Aby byl omezen vliv systematických chyb modelů, byla budoucí změna návrhového kvantilu vyjádřena v relativní formě [3]:

$$\Delta = \frac{Q_{\text{future}} - Q_{\text{historical}}}{Q_{\text{historical}}} \quad (1)$$

Tento přístup předpokládá, že systematická chyba modelu je do značné míry konzistentní mezi historickým a budoucími obdobími, a umožňuje tak zaměřit analýzu na relativní změnu extrémů spíše než na jejich absolutní hodnotu [16]. Relativní změny byly následně aplikovány na referenční IDF křivky odvozené z pozorovaných dat, čímž byly získány budoucí návrhové hodnoty pro jednotlivé emisní scénáře pro obě výhledová období [12, 13]. Tímto postupem bylo možné propojit lokální statistické chování extrémních hodnot pozorovaných dat s projekcemi budoucího klimatu a zároveň systematicky kvantifikovat rozptyl ensemblu (ensemble spread) jako míru modelové nejistoty [7].

Teoretický rámec

Teorie extrémních hodnot

Teorie extrémních hodnot (EVT) představuje statistický přístup založený na asymptotických vlastnostech extrémů, určený k modelování chování maxim náhodných veličin [2, 8]. Zatímco klasická centrální limitní věta popisuje limitní chování součtů, EVT se zaměřuje na limitní vlastnosti extrémů. Pro nezávislé a identicky rozdělené náhodné veličiny X_1, \dots, X_n platí, že pro vhodně normovaná maxima $M_n = \max(X_1, \dots, X_n)$ konverguje jejich distribuční funkce k zobecněnému rozdělení extrémních hodnot (GEV) [8].

Distribuční funkce GEV je dána vztahem:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \kappa \left(\frac{x - \xi}{\alpha} \right) \right]^{-\frac{1}{\kappa}} \right\} \quad (2)$$

kde:

ξ	je	parametr polohy
$\alpha > 0$		parametr měřítka
κ		parametr tvaru [8]

Parametr tvaru κ určuje tloušťku pravého chvostu rozdělení. Pro $\kappa > 0$ má rozdělení těžký chvost (Fréchetův typ), pro $\kappa = 0$ přechází do Gumbelova typu a pro $\kappa < 0$ má konečný horní limit (Weibullův typ) [8]. Odhad tohoto parametru je klíčový pro extrapolaci vysokých kvantilů, protože malé změny κ mohou vést k výrazným rozdílům při odhadu 100letého nebo 200letého extrému [2, 8].

Kvantily GEV rozdělení lze vyjádřit inverzí distribuční funkce:

$$Q(T) = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \left[\left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{\kappa} - 1 \right] \quad (3)$$

kde:

T	je	doba opakování [8].
-----	----	---------------------

Tato explicitní formulace umožňuje přímý výpočet návrhových hodnot po odhadu parametrů.

Regionální frekvenční analýza

Regionální frekvenční analýza (RFA) je metodika vyvinutá pro zvýšení robustnosti odhadu extrémních kvantilů v situaci omezené délky časových řad [9].

Základní myšlenkou je sdílení informace mezi stanicemi, jež vykazují podobné statistické chování extrémů [9].

Index-flood koncept předpokládá:

$$Q_i(F) = \mu_i q(F) \quad (4)$$

kde:

$Q_i(F)$	je	kvantil v lokalitě
μ_i		lokální škálovací faktor
$q(F)$		bezrozměrná regionální růstová křivka společná pro celý region [9]

Škálovací faktor je typicky definován jako první L-moment (analogický výběrovému průměru) ročních maxim [9, 19]. Pro pilotní lokality bez přímého měření byl škálovací faktor odhadnut metodou IDW (inverzní vzdálenostní váhy; z angl. Inverse Distance Weighting). Tato metoda umožňuje interpolaci kvantilových hodnot z okolních měřených stanic na základě váženého průměru hodnot, přičemž váha jednotlivých stanic je inverzně úměrná vzdálenosti k analyzovanému místu. Vzdálenosti jednotlivých použitých stanic pro tři pilotní lokality byly představeny v *tab. 1*. Normalizací dat jednotlivých stanic jejich lokálním měřítkem vzniká bezrozměrný soubor, z něhož je následně odhadnut regionální tvar rozdělení [9].

Homogenita regionu byla hodnocena v rámci regionální frekvenční analýzy založené na L-momentech dle [9]. Pro každou dobu trvání byly nejprve vypočteny L-momentové poměry jednotlivých stanic a následně byla pomocí Monte Carlo simulací (1 000 realizací) odhadnuta očekávaná variabilita homogenního regionu stejné velikosti. Na tomto základě byly stanoveny H-statistiky (H_1, H_2, H_3) – sumarizace se nachází v *tab. 3* –, které kvantifikují odchylku pozorované mezi-staniční variability od variability simulovaného homogenního regionu.

Podle interpretačních kritérií [9] platí, že $H < 1$ indikuje homogenní region, $1 \leq H < 2$ slabou heterogenitu a $H \geq 2$ heterogenní region.

K identifikaci potenciálně nesouladných stanic byla použita míra diskordance, jejíž hodnoty zůstaly ve většině případů pod kritickou mezí (1,33 pro tříčlenný subregion, resp. 2,33 pro širší region), což neindikuje přítomnost výrazného outlieru v L-momentovém prostoru. Celkově lze region považovat za dostatečně homogenní pro aplikaci regionální frekvenční analýzy, s vědomím mírně zvýšené variability u delších dob trvání.

Tab. 3. Souhrn regionálních statistik pro regiony Bukovno, Pečky a Běchovice; uvedeny jsou intervaly hodnot metrik heterogenity

Tab. 3. Summary of regional statistics for the Bukovno, Pečky, and Běchovice regions; ranges of heterogeneity metrics are reported

Statistika	Běchovice	Pečky	Bukovno
Diskordance (D)	<0,02; 2,48>	<0,06; 1,33>	<0,02; 1,33>
H_1	<-1,32; 2,13>	<-1,19; 0,66>	<-0,91; 2,47>
H_2	<-1,62; 2,82>	<-0,60; 1,93>	<-1,24; 1,41>
H_3	<-1,33; 2,56>	<-1,05; 2,04>	<-1,12; 2,00>

Souhrnné hodnocení ukazuje, že oblast Bukovna je z hlediska regionální frekvenční analýzy převážně homogenní, avšak s lokálně zvýšenou heterogenitou, zejména podle statistiky H_1 a okrajově H_3 . Oblast Peček působí jako nejhomogennější ze všech tří lokalit, bez překročení kritické meze diskordance

a pouze s náznaky slabé až mírné heterogenity u H_2 a H_3 . Naopak Běchovice vykazují nejvyšší míru prostorové nehomogenity, a to jak ojedinělým překročením kritické meze diskordance, tak zvýšenými hodnotami statistik H_2 a H_3 .

VÝSLEDKY

Teoretický rámec založený na GEV rozdělení a regionální frekvenční analýze umožnil převést klimatické projekce do změn návrhových kvantilů extrémních srážek. Následující sekce proto prezentuje kvantifikaci těchto změn se zaměřením na velikost 100letého kvantilu a strukturu nejistoty vyplývající z vícemodového ensmbly.

Změna 100letého hodinového kvantilu

Relativní změna 100letého hodinového kvantilu Q_{100} vykazuje systematickou závislost na emisním scénáři i časovém horizontu. V období 2035–2065 jsou rozdíly mezi scénáři RCP menší než vnitřní variabilita mezi jednotlivými realizacemi v rámci téhož scénáře. Ve vzdáleném období 2070–2100 dochází k výrazné divergenci scénářů.

Ve scénáři RCP8.5 (2070–2100) činí průměrná relativní změna Q_{100} 52 % se směrodatnou odchylkou 41 %. Interval mezi 5. a 95. percentilem dosahuje hodnot -7 % až 126 %. Medián změny je přibližně 47 %. Zhruba 80 % realizací vykazuje kladnou změnu.

Pro scénář RCP2.6 (2070–2100) činí průměrná změna přibližně 19 % a interval nejistoty je výrazně užší. Rozdíl mezi průměrnými změnami scénářů RCP8.5 a RCP2.6 ve druhé polovině století přesahuje 30 procentních bodů.

Hodnoty přesahující 100 % jsou generovány omezeným počtem realizací a odpovídají případům s kladným tvarovým parametrem κ , který implikuje těžký pravý chvost GEV rozdělení. Rozdělení změn napříč scénáři a obdobími je

znázorněno na obr. 2, jenž ilustruje výrazné rozšíření rozpětí ensmbly ve scénáři RCP8.5 (2070–2100).

Závislost na době trvání

Relativní změna extrémních srážek vykazuje klesající trend s rostoucí dobou trvání. Ve scénáři RCP8.5, který představuje vysoký emisní scénář používaný zejména k ilustraci horní meze klimatických dopadů (2070–2100), činí průměrná změna přibližně:

- 1 h: 52 %,
- 6 h: 39 %,
- 24 h: 28 %,
- 48 h: 28 %.

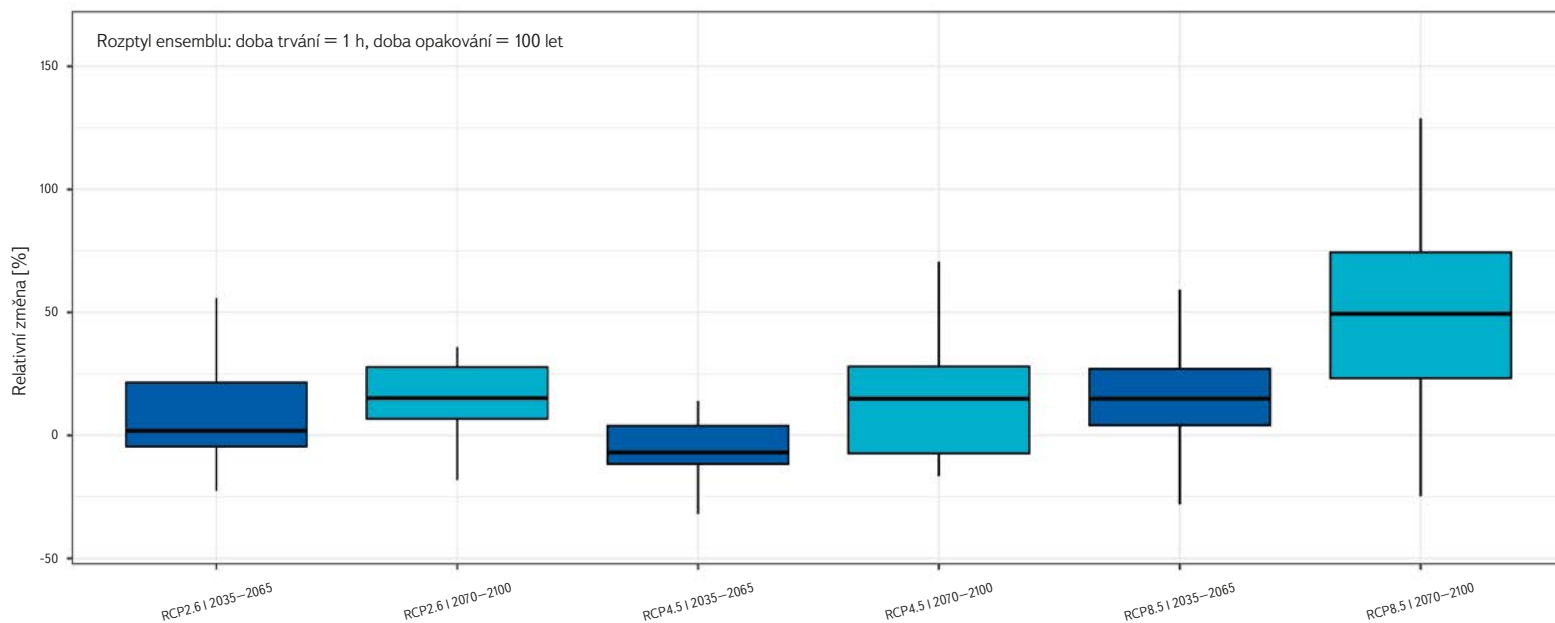
Tento gradient je patrný i z IDF křivek pro stejnou variantu scénáře na obr. 3, kde je zesílení výraznější pro kratší doby trvání.

Rozpětí mezi 5. a 95. percentilem je širší u kratších dob trvání. Relativní nejistota tedy roste s intenzitou extrému.

Vliv tvarového parametru κ

Citlivost vysokých kvantilů na tvarový parametr κ roste s dobou opakování T . Z kvantilové funkce GEV (3) vyplývá, že $\partial Q / \partial \kappa$ roste s T . Malé rozdíly v odhadu tak vedou k výrazným rozdílům ve vysokých dobách opakování.

Realizace s $\kappa > 0$ generují rychlejší růst $Q(T)$ a vysvětlují horní část rozptylu ensmbly. Tento efekt představuje strukturální zdroj nejistoty extrapolace. Růst relativní nejistoty s dobou opakování je dokumentován na obr. 4, kde se rozpětí projekcí systematicky zvětšuje s rostoucí dobou opakování.



Obr. 2. Relativní změna 100letého hodinového kvantilu (Q_{100} , 1 h) napříč scénáři RCP a časovými horizonty pro tři pilotní lokality. Box-ploty reprezentují jednotlivé realizace GCM–RCM kombinací (celkem 37) v intervalu 5.–95. percentilu, box znázorňuje mezikvartilové rozpětí a černé čáry představují medián. Barevně jsou rozlišeny časové horizonty – tmavě modré (2035–2065), světle modré (2070–2100). Rozptyl ensmbly je výrazně širší ve scénáři RCP8.5 (2070–2100), kde horní hranice přesahuje 100 %

Fig. 2. Relative change in the 100-year hourly quantile (Q_{100} , 1 h) across RCP scenarios and time horizons for three pilot areas. Box plots represent individual GCM–RCM realizations (37 in total) within the 5th–95th percentile range; the box indicates the interquartile range and the black line denotes the median. Time horizons are distinguished by colour – dark blue (2035–2065) and light blue (2070–2100). The ensemble spread is substantially wider under the RCP8.5 scenario (2070–2100), where the upper bound exceeds 100 %

DISKUZE

Dominantní zdroje nejistoty

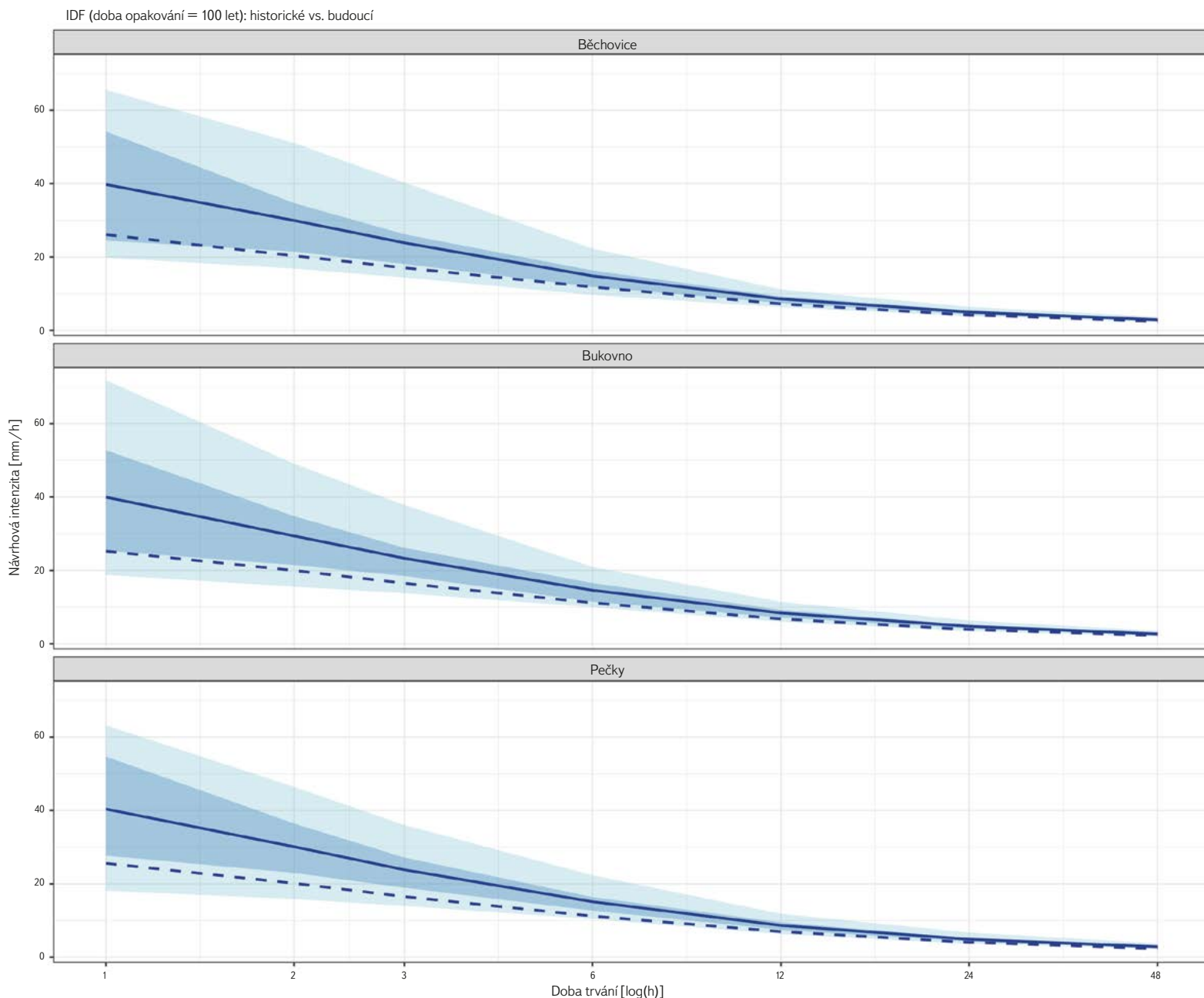
Charakter nejistoty se liší podle časového horizontu. V blízkém období je dominantní strukturální modelová variabilita, zatímco ve vzdáleném období nabývá na významu divergence emisních scénářů. Tento výsledek je konzistentní s obecnými závěry klimatických projekcí.

Je třeba zdůraznit, že prezentované rozpětí zahrnuje pouze variabilitu mezi modelovými realizacemi. Nejistota odhadu parametrů GEV (např. intervaly

spolehlivosti κ) zde není explicitně kvantifikována a může dále rozšiřovat celkovou nejistotu.

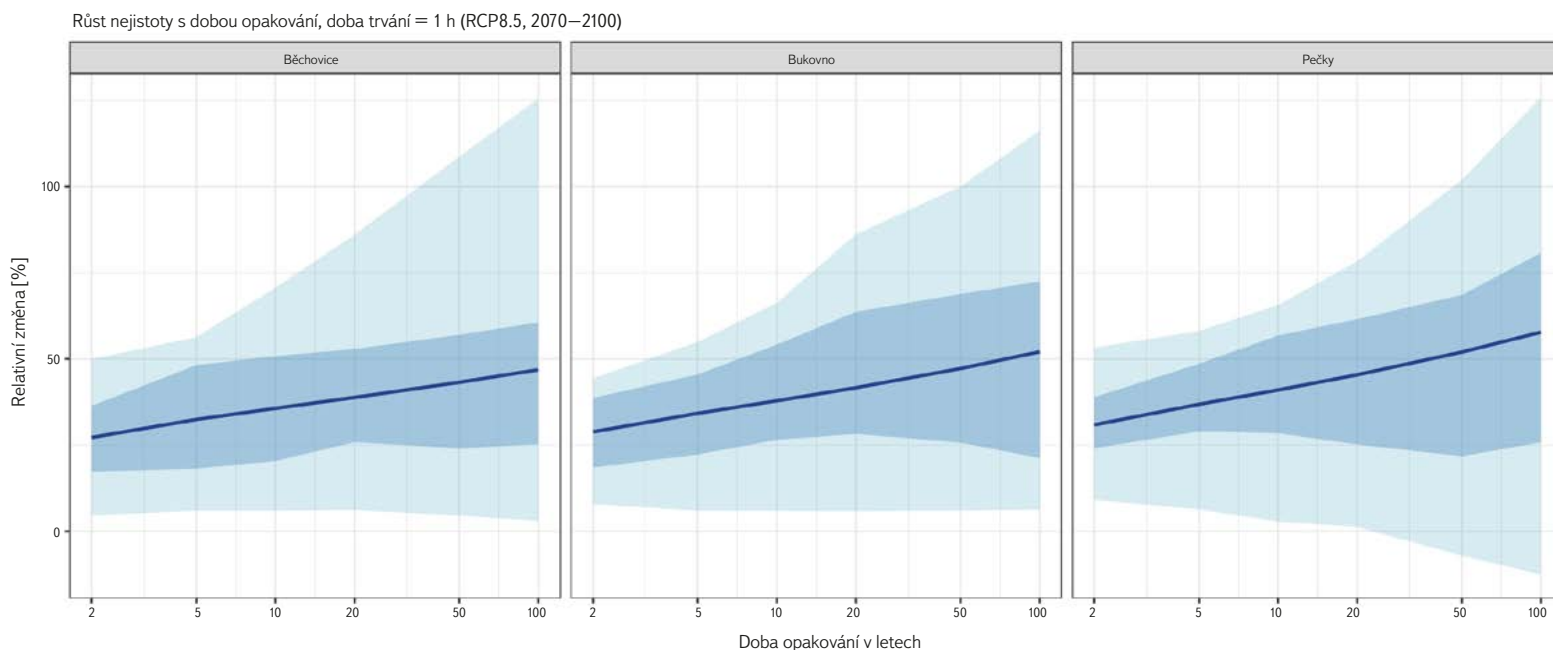
Interpretace vysokých relativních změn

Relativní změny přesahující 100 % představují horní část rozdělení projekcí a nejsou reprezentativní pro střed ensemblu. Jejich výskyt je spojen s kombinací silného klimatického signálu a kladného κ .



Obr. 3. Srovnání historických a budoucích IDF křivek ($T = 100$ let) pro pilotní lokality Bukovno, Pečky a Běchovice. Plná čára představuje medián projekcí scénáře RCP8.5 (2070–2100), přerušovaná čára referenčního období. Světle modrá plocha znázorňuje rozpětí 5.–95. percentilu ensemblu, tmavší modrá plocha rozpětí 25.–75. percentilu

Fig. 3. Comparison of historical and future IDF curves ($T = 100$ years) for the pilot locations Bukovno, Pečky, and Běchovice. The solid line represents the median of the RCP8.5 (2070–2100) projections, while the dashed line corresponds to the reference period. The lighter blue area indicates the 5th–95th percentile range of the ensemble, and the darker blue area shows the 25th–75th percentile range



Obr. 4. Závislost relativní změny návrhového kvantilu na době opakování (logaritmická osa) pro dobu trvání 1 h, scénář RCP8.5 (2070–2100). Plně čárý představují průměr změn, světle modrá plocha znázorňuje rozpětí 5.–95. percentilu ensamble, tmavší modrá plocha rozpětí 25.–75. percentilu. Rozptyl mezi realizacemi roste s dobou opakování, což odráží citlivost extrapolace na tvarový parametr κ

Fig. 4. Dependence of the relative change in the design quantile on return period (logarithmic scale) for a 1-hour duration under the RCP8.5 scenario (2070–2100). Solid lines represent the mean change, the light blue area indicates the 5th–95th percentile range of the ensemble, and the darker blue area shows the 25th–75th percentile range. The spread among realizations increases with return period, reflecting the sensitivity of the extrapolation to the shape parameter κ

Z čistě termodynamického hlediska by Clausius–Clapeyronův scaling při oteplení přibližně 4 K implikoval zesílení kolem 28 % [5, 6]. Průměrná hodnota 52 % ve scénáři RCP8.5 (2070–2100) tento jednoduchý scaling převyšuje, což naznačuje, že vedle termodynamického zesílení mohou hrát roli i dynamické změny cirkulace, změny konvektivní organizace nebo nelineární odezva extrémů.

Vzhledem k tomu, že studie neprovádí explicitní analýzu dynamických mechanismů, je však třeba tuto interpretaci chápat jako hypotézu konzistentní s literaturou, nikoli jako přímý důkaz.

Implikace pro návrh infrastruktury

Použití historických IDF křivek bez zohlednění klimatické změny vede při vyšších emisních scénářích k systematickému podhodnocení objemů extrémních srážek.

Zároveň však nelze považovat průměr ensamble za dostatečný reprezentant rizika. Návrhové hodnoty by měly reflektovat celé rozpětí projekcí a být posuzovány v kontextu akceptovatelné úrovně rizika a životnosti infrastruktury.

Aplikační rámec studie

Metodika i výběr pilotních lokalit zároveň přímo navazují na zadání projektu „Adaptace urbanizovaných území na přívalové povodně a sucho“ (SrUrb, č. SS06010386), financovaného Technologickou agenturou ČR v programu Prostředí pro život. Cílem projektu je podpora rozhodovacích procesů při adaptaci urbanizovaných území na extrémní hydrometeorologické jevy, což předurčilo výběr lokalit s vysokou mírou urbanizace a přímou praktickou relevancí pro návrh opatření.

Zvolený 30km prostorový buffer a regionální frekvenční přístup byly proto koncipovány primárně jako nástroj aplikovatelného odhadu návrhových hodnot v konkrétních projektových územích, nikoli jako obecná klimatologická regionalizace na národní úrovni. Tento aplikační rámec vysvětluje pragmatickou volbu prostorových kritérií i zaměřením na 100letý návrhový kvantil, který je klíčový pro dimenzování městské infrastruktury.

Limity metodického řešení

Přestože studie poskytuje systematickou kvantifikaci změn IDF, je nutné zdůraznit několik omezení. Studie je založena na hodinových výstupech regionálních klimatických modelů, které neumožňují explicitní zachycení subhodinových extrémů. Krátkodobé intenzivní srážky s dobou trvání pod jednu hodinu proto mohou být v modelových projekcích podhodnoceny či zanedbány. Použitý GEV model byl aplikován stacionárně na jednotlivá časová období, aniž by byla implementována explicitní nestacionární parametrizace s časově proměnnými parametry. Rovněž nebyla provedena formální dekompozice variance na složku modelovou, scénářovou a interní variabilitu. Uvedené aspekty představují omezení studie a současně potenciální směr dalšího metodického rozvoje.

Dále je potřeba zmínit, že regionální klimatické modely jsou zatíženy systematickými biasy [16]. Přestože byla použita relativní změna vůči historickému běhu modelu, nelze vyloučit strukturální chyby v reprezentaci extrémních procesů [16]. Současně regionální frekvenční analýza předpokládá homogenitu oblasti [9]. Ačkoli byla homogenita statisticky testována, reálné klimatické pole může vykazovat prostorové gradienty, které tento předpoklad částečně porušují [9].

Výsledky je proto vhodné interpretovat především jako podporu rozhodování v projektových územích a jako ilustraci možného rozsahu změn extrémních srážek, nikoli jako plošnou klimatickou charakteristiku celé České republiky.

Navzdory těmto omezením poskytuje studie robustní rámec pro kvantifikaci změn návrhových srážek a jejich nejistoty.

ZÁVĚR

Cílem předložené studie bylo kvantifikovat změny návrhových srážek v nepozorovaných lokalitách a systematicky vyhodnotit nejistotu 100letého návrhového kvantilu v podmínkách klimatické změny. Kombinace regionální frekvenční analýzy a vícemodulového ensemblu regionálních klimatických projekcí umožnila propojit lokální statistický odhad extrémů s globálním a regionálním klimatickým kontextem [9, 14, 15].

Výsledky ve většině realizací indikují zesílení extrémních srážek napříč hodnocenými scénáři, přičemž velikost změny obecně roste s emisní trajektorií i s časovým horizontem [1, 18]. Ve scénáři RCP8.5 dosahuje průměrná relativní změna 100letého hodinového kvantilu do konce století hodnot přibližně 30–50 %, zatímco horní hranice rozpětí ensemblu může indikovat i více než zdvojnásobení extrémů. Současně však interval nejistoty zahrnuje i realizace s menší nebo nevýraznou změnou, což odráží přetrvávající modelovou variabilitu emisních scénářů. Tyto výsledky mají významné implikace pro dimenzování infrastruktury s dlouhou životností, zejména při rozhodování v podmínkách velkých nejistot [7].

Analýza nejistoty ukázala, že v blízkém horizontu (2035–2065) dominuje modelová variabilita mezi jednotlivými regionálními klimatickými modely [7]. Ve vzdálenějším horizontu (2070–2100) se však významně projevuje divergence emisních scénářů [7, 18]. To znamená, že rozhodování o adaptačních opatřeních musí zohlednit nejen průměrnou projekci, ale i rozpětí možného vývoje a související emisní trajektorii.

Zjištěné zesílení extrémů je fyzikálně konzistentní s očekávaným Clausius-Clapeyronovým scalingem přibližně 7 % na 1 K oteplení [5, 6]. Mírně vyšší zesílení ve scénáři RCP8.5 může odrážet kombinaci termodynamických a dynamických změn v atmosférické cirkulaci a konvekci [1, 6].

Z hlediska vodohospodářské praxe výsledky naznačují, že použití historických IDF křivek bez zohlednění klimatické změny může vést k systematickému poddimenzování infrastruktury [1, 3]. Rozptýl ensemblu zároveň ukazuje, že návrh založený pouze na průměrné projekci nemusí být z hlediska řízení rizika dostatečný [7]. Budoucí adaptivní přístup by měl pracovat s intervalem možných změn a explicitně zohledňovat nejistotu.

Studie představuje metodický rámec, který lze aplikovat i na další regiony s omezenou hustotou měření. Další výzkum by měl směřovat k využití nestacionárních modelů extrémních hodnot, k aplikaci konvekčně-permitujících klimatických modelů s vyšším časovým rozlišením a k hlubší integraci klimatických projekcí do rozhodovacích procesů v oblasti hospodaření se srážkovými vodami [6, 20].

Poděkování

Príspevek vznikl v rámci projektu č. SS06010386 „Adaptace urbanizovaných území na přívalové povodně a sucho“ pod záštitou Technologické agentury ČR a současně s podporou projektu č. 42200-1312-3158 „Climate Model-Based Estimation of Intensity-Duration-Frequency Curve Changes“ podpořeného Interní grantovou agenturou FŽP.

Literatura

- [1] SENEVIRATNE, S. I., ZHANG, X., ADNAN, M., BADI, W., DERECZYNSKI, C., DI LUCA, A., GHOSH, S., ISKANDAR, I., KOSSIN, J., LEWIS, S. et al. Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021, s. 1513–1766. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- [2] KATZ, R. W., PARLANGE, M. B., NAVEAU, P. Statistics of Extremes in Hydrology. *Advances in Water Resources*. 2002, 25(8–12), s. 1287–1304. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00056-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00056-8)
- [3] KOURTIS, I. M., TSIHRINTZIS, V. A. Update of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves under Climate Change: A Review. *Water Supply*. 2022, 22(5), s. 4951–4974. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.152>
- [4] LANGOUSIS, A., VENEZIANO, D. Intensity-Duration-Frequency Curves from Scaling Representations of Rainfall. *Water Resources Research*. 2007, 43(2), W02422. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2006WR005245>
- [5] ALLEN, M. R., INGRAM, W. J. Constraints on Future Changes in Climate and the Hydrologic Cycle. *Nature*. 2002, 419, s. 224–232. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nature01092>
- [6] WESTRA, S., FOWLER, H. J., EVANS, J. P., ALEXANDER, L. V., BERG, P., JOHNSON, F., KENDON, E. J., LENDERINK, G., ROBERTS, N. M. Future Changes to the Intensity and Frequency of Short-Duration Extreme Rainfall. *Reviews of Geophysics*. 2014, 52(3), s. 522–555. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
- [7] HAWKINS, E., SUTTON, R. T. The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2009, 90(8), s. 1095–1108. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>
- [8] COLES, S. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer, 2001. ISBN 978-1-85233-459-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- [9] HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. ISBN 9780521019408. Dostupné z: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529443>
- [10] HAILEGEORGIS, T. T., THOROLFSSON, S. T., ALFREDESEN, K. Regional Frequency Analysis of Extreme Precipitation with Consideration of Uncertainties to Update IDF Curves for the City of Trondheim. *Journal of Hydrology*. 2013, 498, s. 305–318. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.019>
- [11] VAN DE VYVER, H. Bayesian Estimation of Rainfall Intensity–Duration–Frequency Relationships. *Journal of Hydrology*. 2015, 529(Part 3), s. 1451–1463. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.036>
- [12] CRHOVÁ, L., BLIŽŇÁK, V., KAŠPAR, M., MÜLLER, M., SVOBODA, V., ŠERCL, P., ŠTĚPÁNEK, P. SS02030040-V46. *Souhrnná výzkumná zpráva (VSOUHRN). Návrhové hodnoty srážek*. 2023. Dostupné z: <https://www.perun-klima.cz/results/navrhSrAzekZprava.pdf>
- [13] KAVKA, P., KAŠPAR, M., CRHOVÁ, L., PAVEL, M., MÜLLER, M., BLIŽŇÁK, V., HULEC, F., STROUHAL, L., LANDA, M., WEYSKRABOVÁ, L., KUBÁT, J.-F., STEHLÍK, M., PECHA, M., SVOBODA, V. *Metodika. Krátkodobé srážky pro hydrologické modelování a navrhování drobných vodohospodářských staveb v krajině*. Praha: ČVUT, ÚFA AV ČR, ČHMÚ, Sweco Hydroprojekt, a. s., Fsv ČVUT, 2023. ISBN: 978-80-01-07115-1. Dostupné z: https://rain.fsv.cvut.cz/data/files/metodika_N_srazky_2023_web.pdf
- [14] GUTOWSKI, W. J., GIORGI, F., TIMBAL, B., FRIGON, A., JACOB, D., KANG, H.-S., RAGHAVAN, K., LEE, B., LENNARD, C., NIKULIN, G., O'ROURKE, E., RIXEN, M., SOLMAN, S., STEPHENSON, T., TANGANG, F. WCRP Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX): A Diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016, 9(11), s. 4087–4095. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4087-2016>
- [15] JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUJ, L., NIKULIN, G. et al. EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research. *Regional Environmental Change*. 2014, 14, s. 563–578. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- [16] KOTLARSKI, S., KEULER, K., CHRISTENSEN, O. B., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GOBIET, A., GOERGEN, K., JACOB, D., LÜTHI, D., VAN MEIJGAARD, E., NIKULIN, G., SCHÄR, C., TEICHMANN, C., VAUTARD, R., WARRACHSAGI, K., WULFMEYER, V. Regional Climate Modeling on European Scales: A Joint Standard Evaluation of the EURO-CORDEX RCM Ensemble. *Geoscientific Model Development*. 2014, 7(4), s. 1297–1333. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014>
- [17] MOSS, R. H., EDMONDS, J. A., HIBBARD, K. A., MANNING, M. R., ROSE, S. K., VAN VUUREN, D. P., CARTER, T. R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T. et al. The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*. 2010, 463, s. 747–756. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- [18] VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G. C., KRAM, T., KREY, V., LAMARQUE, J.-F., MASUI, T., MEINSHAUSEN, M., NAKICENOVIC, N., SMITH, S. J., ROSE, S. K. The Representative Concentration Pathways: An Overview. *Climatic Change*. 2011, 109, 5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- [19] HOSKING, J. R. M. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1990, 52(1), s. 105–124. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x>
- [20] SARHADI, A., SOULIS, E. D. Time-Varying Extreme Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves in a Changing Climate. *Geophysical Research Letters*. 2017, 44(5), s. 2454–2463. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/2016GL072201>

Autoři

Ing. Ivana Strnadová¹

✉ strnadovai@fzp.czu.cz

ORCID: 0009-0003-4058-1815

Ing. Filip Strnad, Ph.D.¹

✉ strnadf@fzp.czu.cz

ORCID: 0000-0003-4669-2869

Bc. Damián Heczko¹

✉ xhecd001@studenti.czu.cz

ORCID: 0009-0005-0499-5732

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D.^{1,2}

✉ hanel@fzp.czu.cz

ORCID: 0000-0001-8317-6711

¹Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí
(Česká republika)

²Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha (Česká republika)

Průspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.03.003

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

ESTIMATION OF CHANGES IN DESIGN PRECIPITATION AT UNGAUGED LOCATIONS USING A GEOSTATISTICAL MODEL OF REGIONAL FREQUENCY ANALYSIS WITH CLIMATE PROJECTIONS

STRNADOVÁ, I.¹; STRNAD, F.¹; HECZKO, D.¹; HANEL, M.^{1,2}

¹Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Environmental Sciences (Czech Republic)

²T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague (Czech Republic)

Keywords: extreme precipitation – IDF, GEV, RFA – ensemble spread – climate change – CORDEX

The study quantifies changes in the 100-year design quantile of short-duration precipitation at ungauged locations in the Czech Republic and analyzes the uncertainty structure of these estimates under climate change conditions. Reference IDF curves were derived using regional frequency analysis based on the index-flood concept, employing the GEV distribution with parameter estimation by the method of L-moments. Future changes were determined from a multi-model ensemble of CORDEX regional climate projections for the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios over the periods 2035–2065 and 2070–2100.

Under the RCP8.5 scenario (2070–2100), the mean relative change in the 100-year hourly quantile is approximately 52 %, with the 5th–95th percentile range spanning from -7 % to +126 %. In the period 2035–2065, differences among emission scenarios are smaller than internal model variability, whereas in the second half of the century the emission trajectory becomes the dominant source of projection divergence. The relative amplification is higher for shorter durations, indicating a disproportionate sensitivity of short-term extremes.

The analysis shows that uncertainty at high return periods is strongly influenced by estimation of the GEV shape parameter, where small differences lead to nonlinear growth of extrapolated quantiles. The detected intensification of extreme precipitation is consistent with the expected thermodynamic amplification of the hydrological cycle; however, the ensemble spread highlights substantial structural uncertainty in regional climate models.

The results indicate that the use of historical IDF curves without accounting for climate change may lead to systematic underestimation of design values, particularly for infrastructure with long service life.





Autoři VTEI

RNDr. Dana Baudišová, Ph.D.

Státní zdravotní ústav, Praha (Česká republika)

✉ dana.baudisova@szu.gov.cz

www.szu.cz



RNDr. Dana Baudišová, Ph.D., v roce 1988 ukončila obor Obecná biologie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy a v roce 2000 na téže fakultě doktorandské studium mikrobiologie. Od roku 1993 pracovala 23 let ve VÚV TGM, v. v. i., kde se zabývala mikrobiologií vody (metody mikrobiologických analýz, mikrobiální kontaminace povrchových a odpadních vod, výzkum mikrobiálního znečištění, jeho zdrojů a eliminace). Od roku 2017 pracuje v oddělení hygieny vody Státního zdravotního ústavu se zaměřením na mikrobiologii pitných, koupacích a recyklovaných vod.

Ing. Imane Belkaf

Laboratoř environmentálního, ekologického a agropřemyslového inženýrství, Fakulta věd a technologií, Univerzita Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal (Maroko)

✉ belkaf.imane@usms.ac.ma



Ing. Imane Belkaf je v současnosti doktorandkou v Laboratoři environmentálního, ekologického a agropřemyslového inženýrství na Fakultě věd a technologií Univerzity Sultan Moulay Slimane v Beni Mellal (Maroko). Od roku 2019 působí na Ministerstvu zemědělství, rybolovu, rozvoje venkova a vodního a lesního hospodářství Maroka. V roce 2016 získala titul v oboru venkovského inženýrství na Agronomickém a veterinárním institutu Hassana II. v Maroku. Její odborné zaměření se soustředí především na hospodaření s vodou ve venkovských oblastech, na aplikaci GIS v hydrologii a hydraulické stavby.

doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur

Fakulta stavební ČVUT v Praze (Česká republika)

✉ fosumpaur@fsv.cvut.cz



Doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur vystudoval obor Vodní hospodářství a vodní stavby na Fakultě stavební ČVUT v Praze, kde je také zaměstnan na Katedře hydrotechniky. Specializuje se na hydrotechnické stavby, nádrže a vodohospodářské soustavy, vodní cesty a na fyzikální a matematické modelování. Je předsedou Českého plavebního a vodocestního sdružení, členem výboru České vědeckotechnické vodo-hospodářské společnosti a Českého národního výboru pro hydrologii. V roce 2013 získal se svým týmem diplom akademika Theodora Ježdíka za soubor výzkumných prací zaměřených na řešení hydraulických problémů vodních děl v rámci obnovení Vltavské vodní cesty mezi Týnem nad Vltavou a Českými Budějovicemi. Od roku 2014 vedl hydraulický výzkum projektu zlepšení plavebních podmínek na Labi v úseku mezi Ústím nad Labem a státní hranicí ČR/SRN včetně přípravy plavebního stupně Děčín. Je autorem vodohospodářského řešení hydrických rekultivací povrchových lomů po těžbě hnědého uhlí v Ústeckém kraji a koncepce propojení VD Nechranice a jezera Libouš. Zpracoval vodohospodářské řešení nádrží Vltavské kaskády a soustavy nádrží v povodí Odry včetně připravované nádrže Nové Heřminovy.

Mgr. Pavla Kovaláková, Ph.D.

VÚV TGM, v. v. i., Ostrava (Česká republika)

✉ pavla.kovalakova@vuv.cz

www.vuv.cz



Mgr. Pavla Kovaláková, Ph.D., působí od roku 2019 ve VÚV TGM, v. v. i. Od roku 2025 zastává pozici vedoucí oddělení hydrobiologie na pobočce v Ostravě. V roce 2013 absolvovala magisterské studium v oboru Chemie životního prostředí v Centru pro výzkum toxických látek v prostředí (RECETOX) Masarykovy univerzity. Doktorské studium v programu Životní prostředí a zdraví na téže fakultě dokončila v roce 2020, přičemž výzkumná část byla realizována v Botanickém ústavu AV ČR, v. v. i., v oddělení experimentální fykologie a ekotoxikologie a na Texas A&M University v USA. Odborně se zaměřuje na ekotoxikologické hodnocení látek a jejich směsí ve vodním prostředí, zejména v povrchových a odpadních vodách, a na využití ekotoxikologických metod při hodnocení účinnosti technologií čištění vod a posuzování jejich vlivu na vodní organismy. Jako hlavní řešitelka nebo členka řešitelského týmu se podílela na několika výzkumných projektech.

doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D.

Český hydrometeorologický ústav, Ostrava (Česká republika)

✉ jan.unucka@chmi.cz

www.chmi.cz



Doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D., v současnosti pracuje na ostravské pobočce ČHMÚ jako vedoucí Oddělení hydrologie a pracovník vědy a výzkumu. Studoval obory Fyzická geografie a geoekologie a Environmentální geografie na PÍF OU v magisterském a následně doktorském studijním programu. Poté se habilitoval na VŠB-TU Ostrava v oboru Geoinformatika. Profesně se zaměřuje zejména na problematiku lesnické hydrologie, využití GIS v hydrologii a hydroinformatiku. Podílel se a podílí na řešení výzkumných projektů a také provozu experimentálních povodí v Beskydech, Jeseníkách a Orlických horách ve spolupráci s VÚLHM, v. v. i. Mezi hlavní koníčky patří příroda a její fotografování, hudba a pastervecká plemena psů.

Ing. Ivana Strnadová

Fakulta životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze (Česká republika)

✉ strnadovai@fzp.czu.cz

www.fzp.czu.cz



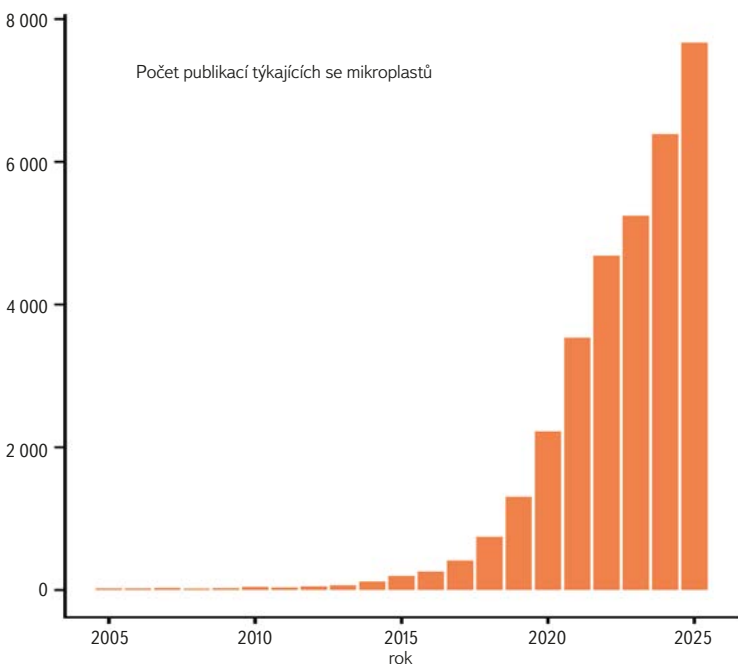
Ing. Ivana Strnadová je studentkou doktorského studia programu Environmentální vědy o Zemi se specializací Environmentální modelování. V roce 2024 ukončila inženýrské studium na Fakultě životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze, obor Environmentální modelování. Doktorské studium v oblasti environmentálního a stochastického modelování doplňuje několikaletá praxe v aplikaci hydroinformatických nástrojů ve vodním hospodářství. Podílí se na projektu „*Adaptace urbanizovaných území na přívalové povodně a sucho*“.

Mikroplasty ve vodách: první akreditovaná laboratoř v České republice ve VÚV TGM

Mikroplasty, definované jako částice syntetických polymerů o velikosti menší než 5 mm, představují jeden z nejsledovanějších environmentálních fenoménů současnosti (obr. 1). Tyto všudypřítomné částice vznikající především mechanickou abrazí, fragmentací či průmyslovým zpracováním plastů se dostávají do životního prostředí ve velkém množství. Zatímco počáteční výzkum se soustředil na moře a oceány, nyní se pozornost přesouvá na sladkovodní ekosystémy a pitnou vodu, kde představují významné environmentální a zdravotní riziko [1, 2]. Účinky mikroplastů na organismy jsou komplexní – působí jako vektory pro sorbované kontaminanty z prostředí, uvolňují chemická aditiva přidávaná do plastů záměrně – jako jsou změkčovadla a retardanty hoření – a mohou mechanicky narušovat tkáně a způsobovat chronické záněty [3]. V důsledku jejich pomalého rozkladu snadno vstupují do potravních řetězců a akumulují se v biotě na všech trofických úrovních [4].

Zvýšený výzkumný zájem o oblast mikroplastů se odráží i v legislativní sféře. Evropská legislativa ukládá povinnost implementovat monitoring mikroplastů v pitných vodách doplněním směrnice EU o jakosti vod určených k lidské spotřebě (Rozhodnutí Komise 2024/1441). Podobné požadavky se brzy očekávají pro povrchové vody po zavedení příslušné směrnice Evropského parlamentu a Rady, kterou se mění Směrnice 2000/60/ES (Rámcová směrnice o vodní politice). V reakci na tento kontext a s cílem poskytnout spolehlivé analytické zázemí byla v brněnské pobočce Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka (VÚV TGM) založena specializovaná Laboratoř analýzy mikroplastů, jež se dané problematice intenzivně věnuje od roku 2023.

V oblasti analýz mikroplastů jsou klíčové dvě skupiny metod, lišící se primárně detekčním limitem a výstupem. Vibrační spektroskopie, zejména infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR), a Ramanova spektroskopie



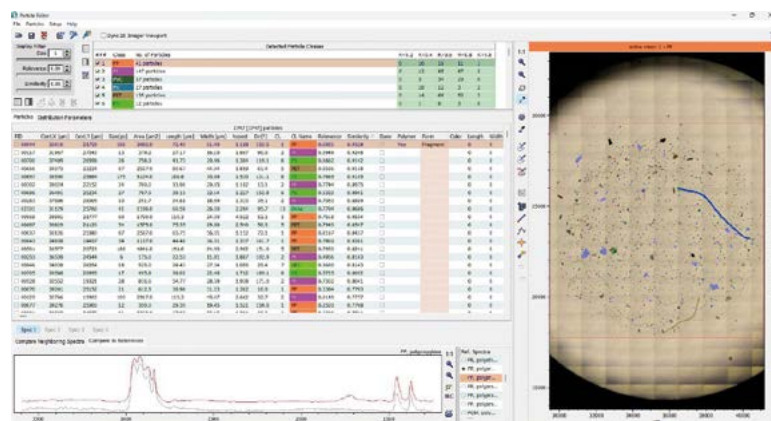
Obr. 1. Kumulativní počet vědeckých publikací v databázi Scopus s klíčovým slovem „microplastic“

jsou hojně užívané nedestruktivní metody pro analýzu vzorků mikroplastů. Plošným skenováním připraveného vzorku lze získat tzv. chemickou mapu a odečíst přesné informace o počtu, velikosti, tvaru a chemickém složení nalezených částic (obr. 2). Metoda FTIR je vhodná pro kvantifikaci i kvalifikaci částic od velikosti 5 μm [5], zatímco Ramanova spektroskopie dokáže odhalovat částice až do velikosti 300 nm [6], čímž otevírá možnost detekce nanoplastů. Další možnou metodou zjištění přítomnosti mikroplastů je např. pyrolýza s plynovou chromatografií a hmotnostní spektrometrií, která však vede k destrukci analyzovaného vzorku a poskytuje informaci pouze o celkové hmotnosti jednotlivých typů polymerů v daném vzorku [7].

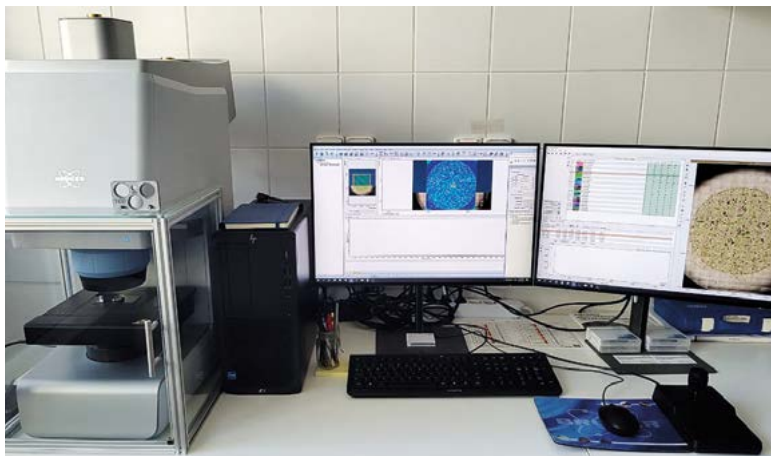
Informace o velikostní distribuci a tvaru, získané spektroskopicky, jsou navíc zásadní pro posouzení rizik pro organismy, a proto je tato metoda zároveň stěžejní pro splnění legislativních požadavků. V Laboratoři analýzy mikroplastů ve VÚV TGM jsme jako detekční metodu zvolili FTIR spektroskopii. Laboratoř byla vybavena μFTIR spektroskopem LUMOS II firmy Bruker (obr. 3). Toto zařízení umožňuje plně automatickou analýzu celých ploch (typicky filtru o průměru 25 mm) a vytvoření chemické mapy analyzované plochy. Z vytvořené mapy pak lze pomocí výpočetních metod automaticky identifikovat plastové částice, jejich tvar, velikost a zejména chemické složení – tedy typ plastu.

Vlastní analýze však nejprve předchází relativně komplikovaný proces odběru vzorku – v případě vody pomocí kaskády filtrů a případně čerpadla (obr. 4) – a jeho přípravy. Příprava vzorku pro analýzu zahrnuje oxidativně-digestivní procesy vedoucí k eliminaci organických zbytků ze vzorků z environmentálních matric (viz např. [8, 9]), doplněné o hustotní separaci k odstranění zbytků anorganické frakce [10].

Celý proces zpracování a analýzy byl standardizován a optimalizován a v roce 2025 laboratoř nejprve získala certifikát od Střediska pro posuzování způsobilosti laboratoří (ASLAB) a následně akreditaci od Českého institutu pro akreditaci (ČIA). Obě tyto certifikace se vztahují na stanovení mikroplastů ve vodách metodou infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací a na odběr vzorků vod za účelem určení obsahu mikroplastů. VÚV TGM tak v současné době disponuje první a dosud jedinou certifikovanou laboratoří v České republice s akreditací ČIA a posouzením ASLAB pro vzorkování a analýzy množství, velikosti a chemického složení mikroplastů specificky ve vzorcích



Obr. 2. Chemická mapa analyzovaného vzorku mikroplastů vizualizovaná v softwaru Microplastic Finder (Purity)



Obr. 3. Zleva: zpracovávající vzorek v μ FTIR spektroskopu LUMOS II, proces zpracování v programu OPUS, vyhodnocování obsahu a typu mikroplastů v softwaru Microplastic Finder

pitné vody. Zároveň byl za tímto účelem upraven i laboratorní informační systém (LIS) LABSYSTEM pro příjem vzorků a evidenci výsledků. V procesu akreditace byly bezprostředně zužitkovány zkušenosti získané při řešení národních a mezinárodních projektů, na nichž se laboratoř v současné době aktivně podílí (viz Infobox).

VÚV TGM Brno nabízí své analytické služby širokému okruhu zájemců – výzkumným organizacím, laboratořím, provozovatelům vodovodů a čistíren odpadních vod, orgánům státní správy i široké veřejnosti v rámci komerčních zakázek. Díky našim zkušenostem z mezinárodních i národních projektů a certifikované kvalitě nabízíme komplexní služby od odběru vzorků přes jejich analýzu až po interpretaci výsledků.

Systematický monitoring mikroplastů ve vodním prostředí je nezbytným předpokladem pro identifikaci cest jejich vnosu, hodnocení ekologických rizik a vytvoření strategie pro snižování jejich množství v životním prostředí. Naše pracoviště je připraveno poskytnout kvalifikovanou podporu v této důležité oblasti ochrany vodních zdrojů a lidského zdraví.



Obr. 4 a, b. Vlevo: detail filtrační aparatury; vpravo: čerpání a filtrace vody z proudnice k analýze obsahu mikroplastů

Přehled aktuálně řešených projektů ve VÚV TGM, pobočka Brno, s tematikou detekce mikroplastů z environmentálních vzorků



Projekt „Mikroplast-IKA“; Grantová podpora: TA ČR, Program Prostředí pro život II, č. SS07010295

Cílem projektu je kvantifikace mikroplastů v povrchových vodách a identifikace jejich hlavních transportních cest do vodních toků. První fáze se zaměřuje na vývoj a standardizaci metodik pro odběr a procesní zpracování vzorků z komplexních matic, konkrétně vody, sedimentů a bioty. Navazující monitoring je cílen na kritické zdroje kontaminace, jako jsou výstupy z ČOV a odlehčovací komory, a na retenční oblasti typu vodních nádrží. Výstupy projektu poskytnou exaktní podklady pro hodnocení antropogenní zátěže povrchových vod mikroplasty a umožní efektivní cílení nápravných opatření v kritických bodech povodí.

Interreg
Danube Region



Projekt „MicroDrink“; Grantová podpora: Program Interreg Danube, č. DRP0200442

Hlavním cílem projektu je posílení institucionálních kapacit a procesů řízení pro prevenci znečištění zdrojů pitné vody mikroplasty v dunajském regionu. Projekt propojuje vědeckou komunitu se subjekty s rozhodovací pravomocí a provozovateli vodohospodářské infrastruktury za účelem standardizace postupů při monitoringu a minimalizaci rizik. Klíčovým výstupem je sdílení a praktické zhodnocení poznatků v oblasti vzorkování a analýzy mikročásteček v prostředí pitných vod. Výsledky podpoří koncepční rozhodování a implementaci preventivních opatření na nadnárodní úrovni, čímž přispějí k ochraně vodních zdrojů v osmi participujících zemích.



Projekt „Joint Danube Survey 5“; Grantová podpora: TA ČR, Dlouhodobé environmentální a klimatické perspektivy („Centrum Voda“), č. SS02030027

Pátý ročník mezinárodního průzkumu Dunaje (JDS5) představuje unikátní vědeckou expedici zaměřenou na komplexní hodnocení kvality vody a biodiverzity ve 14 zemích povodí Dunaje a jeho hlavních přítocích. Hlavním cílem je získání srovnatelných dat o prioritních polutantech a nově se objevujících kontaminantech, které nejsou zahrnuty v běžných národních monitorovacích programech. Inovace JDS5 spočívá v integraci pokročilých metod, jako je analýza environmentální DNA (eDNA) a systematický monitoring mikroplastů v celém profilu vodního toku. Výsledky průzkumu slouží k harmonizaci postupů v souladu s Rámcovou směrnicí o vodách a poskytují vědecký základ pro aktualizaci Plánu managementu povodí Dunaje.

Literatura

- [1] WRIGHT, S. L., THOMPSON, R. C., GALLOWAY, T. S. The Physical Impacts of Microplastics on Marine Organisms: A Review. *Environmental Pollution*. 2013, 178, s. 483–492. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.031>
- [2] TALBOT, S., CHANG, B. V. Microplastics in freshwater: A global review of factors affecting spatial and temporal variations. *Environmental Pollution*. 2022, 292, 118393. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118393>
- [3] CASTRO-CASTELLON, A. T., HORTON, A. A., HUGHES, J. M. R., RAMPLEY, C., JEFFERS, E. S., BUSSI, G., WHITEHEAD, P. (2022). Ecotoxicity of microplastics to freshwater biota: Considering exposure and hazard across trophic levels. *Science of The Total Environment*, 816, 151638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151638>
- [4] HARTMANN, N. B., HÜFFER, T., THOMPSON, R. C., HASSELLÖV, M., NIPPER, B., BAUN, A. Microplastics as Vectors for Environmental Contaminants: Exploring Sorption, Desorption, and Transfer to Biota. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2017, 13(3), s. 488–493. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ieam.1904>
- [5] YANG, L., ZHANG, Y., KANG, S., WANG, Z., WU, C. Microplastics in freshwater sediment: A review on methods, occurrence, and sources. *Science of The Total Environment*. 2021, 754, 141948. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141948>
- [6] ANGER, P. M., VON DER ESCH, E., BAUMANN, T., ELSNER, M., NIESSNER, R., IVLEVA, N. P. Raman microspectroscopy as a tool for microplastic particle analysis. *Trends in Analytical Chemistry*. 2018, 109, s. 214–226. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.010>
- [7] LI, J., LIU, H., CHEN, P. J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*. 2018, 137, s. 362–374. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>
- [8] PFEIFFER, F., FISCHER, E. K. Various Digestion Protocols within Microplastic Sample Processing - Evaluating the Resistance of Different Synthetic Polymers and the Efficiency of Biogenic Organic Matter Destruction. *Frontiers in Environmental Science*. 2020, 8, 572424. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.572424>
- [9] REINECCIUS, J., BRESIEN, J., WANIEK, J. J. Separation of Microplastics from Mass-Limited Samples by an Effective Adsorption Technique. *Science of The Total Environment*. 2021, 788, 147881. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147881>
- [10] CRUTCHETT, T. W., BORNT, K. R. A Simple Overflow Density Separation Method that Recovers > 95% of Dense Microplastics from Sediment. *MethodsX*. 2024, 12, 102638. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102638>

Autoři

Mgr. Bc. Barbora Loskotová, Ph.D.

✉ barbora.loskotova@vuv.cz

Mgr. Marek Polášek, Ph.D.

✉ marek.polasek@vuv.cz

Mgr. Michal Straka, Ph.D.

✉ michal.straka@vuv.cz

Ing. Roman Jurnečka

✉ roman.jurnecka@vuv.cz

RNDr. Denisa Němejcová

✉ denisa.nemejcova@vuv.cz

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

Informativní článek, který nepodléhá recenznímu řízení.

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



XXVIII. konference Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství

Další ročník tradiční konference „Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství“ se uskutečnil ve dnech 21. a 22. dubna 2026 v hotelu Clarion v Českých Budějovicích. Odbornými garantkami byly Ing. Barbora Sedlářová, Ing. Eva Juranová, Ph.D., RNDr. Diana Marešová, Ph.D. (VÚV TGM, v. v. i.), a organizačním garantem Jan Kříž (ČVTVHS, z. s.). Konference se zúčastnilo 63 odborníků, z toho 59 z České republiky a čtyři ze Slovenské republiky.

Konference nabídla pestrý odborný program zaměřený na aktuální výzkum, monitoring a legislativní aspekty spojené s výskytem radionuklidů v životním prostředí, zejména ve vodách.

Program konference zahrnoval široké spektrum témat od problematiky monitorování radiační situace a legislativních změn v oblasti atomového práva až po aplikovaný výzkum zaměřený na chování radionuklidů v hydrosféře. Významná pozornost byla věnována např. problematice tritia ve vodách, jež byla diskutována jak z hlediska analytických metod, tak i v kontextu aktuální legislativy.

Odborné příspěvky se dále zaměřily na hydrogeologický a hydrochemický monitoring vybraných lokalit pro hlubinné úložiště radioaktivních odpadů v České republice, včetně hodnocení proudění a transportu radionuklidů v těchto prostředích. Prezentovány byly také výsledky výzkumu důlních vod na zatápěném uranovém ložisku Rožná či problematika nakládání s materiálem se zvýšeným obsahem přírodních radionuklidů při stavbě dálnice D11.

Další blok přednášek byl věnován laboratorním a experimentálním studiím, např. sorpci radionuklidů na nanosorbentech, vyluhovatelnosti přírodních radionuklidů z odpadních materiálů nebo optimalizaci analytických metod pro stanovení vybraných radionuklidů v komplexních matricích. Zazněly též příspěvky zaměřené na stanovení radionuklidů v hydrosféře v okolí jaderných zařízení.

Součástí konference byla rovněž posterová sekce, kde byly prezentovány např. statistické analýzy obsahu radionuklidů v pitných vodách, monitorování radionuklidů v okolí jaderných elektráren či nové přístupy ke stanovení izotopů ve vzduchu a vodách.

Konference opět potvrdila svůj význam jako platforma pro sdílení nejnovějších poznatků, diskusi aktuálních problémů a navazování odborné spolupráce mezi institucemi z České republiky i zahraničí. Široké spektrum prezentovaných témat a vysoká odborná úroveň příspěvků přispěly k odborné diskusi a výměně



Obr. 2. Z exkurze do historického centra Českých Budějovic (foto: T. Bouda)

zkušeností v oblasti sledování radionuklidů a radiační ochrany ve vodním hospodářství.

Sborník z konference je dostupný na: https://www.vuv.cz/wp-content/uploads/2026/04/SBORNIK_Radionuklidy2026.pdf

Autorka

Ing. Barbora Sedlářová

✉ barbora.sedlarova@vuv.cz

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

Informativní článek, který nepodléhá recenznímu řízení.

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



Obr. 1. Blok přednášek z konference „Radionuklidy a ionizující záření ve vodním hospodářství“ (foto: E. Juranová)

VTEI/2026/3

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 Ansoerge, Ph.D., RNDr. Jan Daňhelka, Ph.D., doc. Ing. Michaela Danáčová, PhD, 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.rehorova@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., Ing. Eva Juranová, Ph.D., Ing. Tomáš Bouda, Milan Blížák

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 srpnu. 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



ROLNÍČKY (JIŽNÍ ČECHY, LÉTO 2016)

Rád a často jezdím do jižních Čech, a to nejen kvůli fotografování. Příroda tam má zvláštní kouzlo a krásná zákoutí, kde civilizace je stále nezvaným hostem. A když padne mlha, je tak hustá, že by se dala krájet. Z mlhy se pak rodí malé klenoty, které jako by čekaly na zachycení fotoaparátem. Je to nádherný kontrast – v makrosvětě všechno hraje barvami, zatímco okolní svět je šedý a skoro neprůhledný. Ležím na promáčené karimatce, za krk se mi plíživě vkrádají mokré prstíky, ale v objektivu se otevírá okno do světa, kde tiše cinkají rolničky a každá kapka je jako dětský pokojíček plný barev. Dlouho hledám ten správný úhel záběru a světla. Většinou se přitom objektivem pohybuji ve vzdálenosti dvou až osmi centimetrů od motivu, a tak musím dávat velký pozor, abych se neopatrným pohybem nedotkl okolních stébel a vláken. Protože jedno tukunutí – a celá ta plejáda kapiček sklouzne dolů. Když po hodině focení vstávám, jsem ztuhlý, mokrý, ale stejně se rovnou přesouvám o metr dál, protože tento orosený svět má v sobě tisíce dalších překvapení. Dopoledne je ještě dlouhé a louka plná mlhy a rosy je pro makrofotografii prostě dar.

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

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

veřejná výzkumná instituce

VTEI.cz