



Program TransAdapt

Translace poznatků a transfer postupů pro adaptaci
na klimatickou změnu do zemědělské a lesnické praxe
a veřejné správy: co-creative přístup

Aktivita 1.8

Analýza území s pomocí digitálního dvojčete povodí Želivky a vodní
nádrže Švihov s využitím modelu znečištění území, a to včetně
dynamiky chování nádrže

Pilotní studie – navazuje na aktivitu 1.6

Obsah

1	Úvod	3
2	Zpracování modelové bilance toku vybraných látek v povodí VN Švihov.....	7
2.1	Užívání vod a dopady antropogenní činnosti v povodí Želivky.....	7
2.2	Kontrola a zpracování vstupních dat	7
2.3	Výpočet bilančního toku vybraných látek pro profily sledování	11
2.3.1	Odhad vnosu látek z nebodových zdrojů	16
2.4	Sestavení struktury bilančního modelu v software MIKE BASIN.....	20
2.4.1	Výsledky kvalitativních simulací.....	21
2.5	Závěry, doporučení pro kvalitativní simulační nástroj pohybu látek v tocích	23
3	3D Simulační model nádrže Švihov.....	25
3.1	Úvod a dostupné podklady.....	25
3.2	Zpracování dostupných dat	26
3.3	Použitý diskrétní 3D model MIKE3 FM.....	26
3.3.1	Hydrodynamický model	26
3.3.2	Kalibrace 3D modelu	27
3.3.3	Závěr a doporučení pro užití 3D modelu nádrže Švihov z TA 1.6	27
3.4	WQ simulace pomocí modelu MIKE3 FM.....	28
3.4.1	Kalibrace WQ modulu.....	28
3.4.2	Výsledky simulací WQ modulu	31
3.5	Shrnutí k WQ modulu	35
4	Závěry.....	36
5	Seznam použitých zkratk	37
6	Použitá literatura.....	37

1 Úvod

Hlavním účelem vodárenské nádrže Švihov na Želivce, (dále VN Švihov) je zásobování pitnou vodou jednak hlavního města Prahy, jednak Středočeské kraje a části Jihočeského kraje a Kraje Vysočina. Z hlediska objemu vody v zásobním prostoru i z pohledu odebíraného množství je toto vodní dílo největší vodárenskou nádrží nejen v České republice, ale i ve střední Evropě. Součástí vodohospodářského komplexu jsou představné nádrže Trnávka na Trnávce, Němčice na Sedlickém potoce, a Sedlice na Želivce, jejichž účelem je zachycení splavenin a části znečištění přinášeného vodním tokem.

Povodí VN Švihov je hustě osídlené a intenzivně zemědělsky využívané (zhruba 58% představuje orná půda). Na rozsáhlých plochách se zde pěstují plodiny s kombinovaným využitím, částečně jako zdroj substrátů pro bioplynové stanice. Především se jedná o širokořádkové a technické plodiny, zejména kukuřici, řepku či brambory. Ve velkém měřítku se používají prostředky pro ochranu rostlin. Z hlediska dlouhodobého výhledu je přechod na pěstování technických plodin v povodí vodárenské nádrže značným rizikem s potenciálně závažnými důsledky pro kvalitu vody. Dlouhodobě byly signalizovány možné problémy s množstvím dusičnanů. Intenzivně se budovaly nové ČOV a intenzifikovali starší ČOV, aby se zmenšily dopady vnosu nejprve organických látek později fosforu. Řešily se problémy eroze i způsob zemědělského hospodaření obecně. V posledních desetiletích, také díky dostupnosti moderní analytické techniky, se do popředí dostává problém výskytu látek používaných na ochranu rostlin zejména tam, kde se na větších plochách pěstuje kukuřice a řepka. Důsledkem rozsáhlé zemědělské činnosti jsou zejména zvýšené koncentrace dusičnanů a pesticidních látek v drenážních a povrchových vodách. Spolu s živinami v odpadních vodách se do toku dostávají i další cizorodé látky, jako jsou například léčiva, hormonální přípravky, kosmetické přípravky, antikoroziva, bisfenol A a další. Pesticidní látky i léčiva se mění na jednotlivé metabolické produkty, které ve vodě v různých formách přetrvávají. S cílem snížit negativní dopad výše uvedených skutečností byl v povodí nádrže Švihov přijat program B4 a na vybraných lokalitách se začalo postupovat podle přijaté metodiky (Metodika hospodaření v OPVZ VN Švihov 2020)

Většinu bodových zdrojů znečištění v povodí vodního nádrž VN Švihov na Želivce představují komunální odpadní vody z obcí a měst. Průmyslové zdroje jsou zastoupeny pouze minoritně, nejvýraznějším zdrojem průmyslových odpadních vod je papírna CEREPA Červená Řečice. Většina zdrojů odpadních vod patří mezi zdroje znečištění do 500 ekvivalentních obyvatel velké zdroje nad 100 000 ekvivalentních obyvatel nejsou v povodí vodárenské nádrže na Želivce zastoupeny vůbec, mezi střední zdroje patří 2 zdroje komunální, města Pelhřimov a Pacov, a jeden zdroj průmyslový, zmíněný producent odpadních vod CEREPA. V celém povodí VN Švihov na Želivce byly v průběhu let vybudovány ČOV ve všech obcích nad 500 EO a některé z nich byly postupně intenzifikovány, ve 2 ochranném pásmu tohoto vodního zdroje byly vybudovány ČOV i v menších obcích. U největšího průmyslového zdroje organického znečištění v povodí, papírny CEREPA, bylo vybudováno v průběhu minulých let mechanické čištění s biologickým dočišťovacím stupněm a recirkulací technologické vody. Z hlediska eliminace specifických organických látek, jako jsou léčiva, některé pesticidy a další znečištění, nemají ČOV v povodí VN Švihov instalovaný žádné nadstandardní separační stupně.

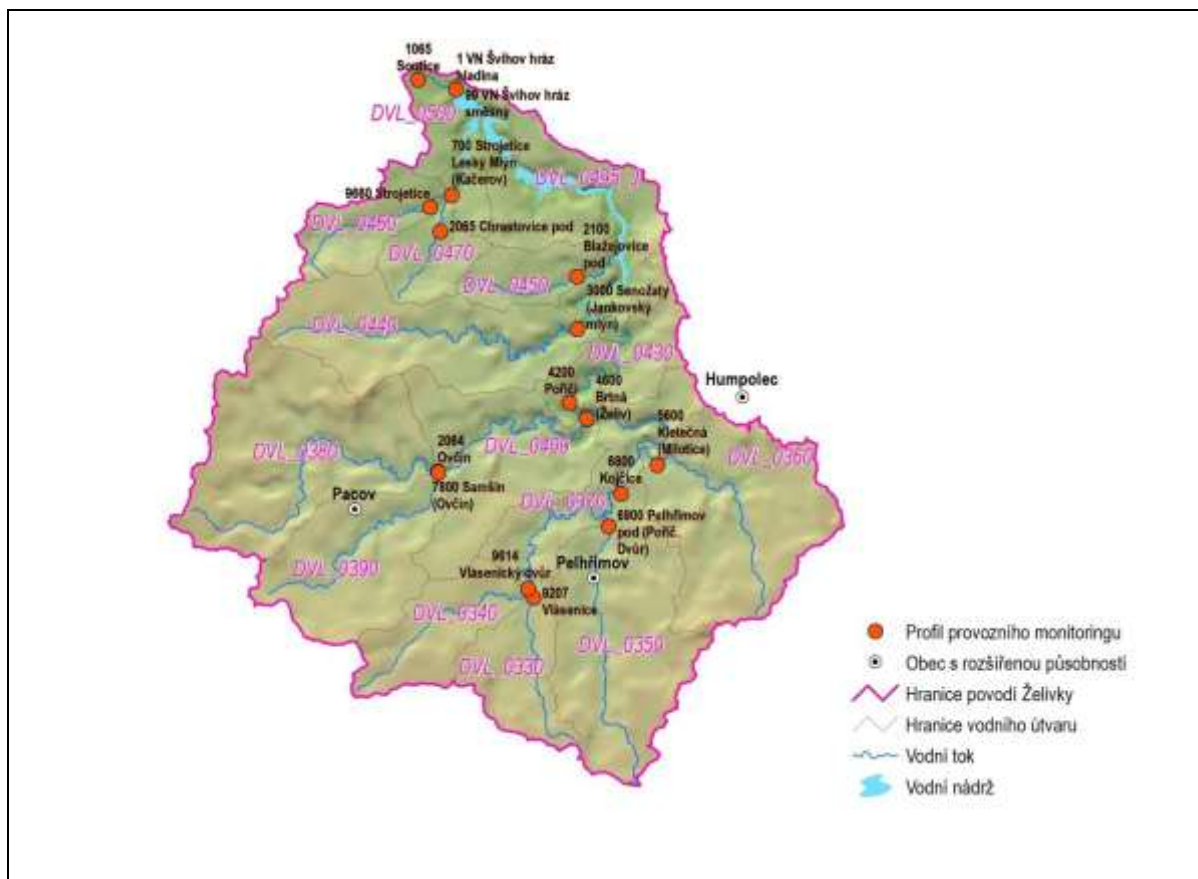
Zdroje znečištění, které se dostávají postupně do podzemních či povrchových vod a posléze do nádrží jsou tedy komplexní a v čase proměnné. Z hlediska hydrologického je podstatné, zda znečištění je vázáno na základní, hypodermický nebo přímý odtok z povodí, protože i mechanismus transportu a dynamika změn odpovídají fázi odtoku z povodí, nebo dílčího povodí.

V povodí Želivky je dlouhodobý **situační monitoring** provozován státním podnikem Povodí Vltavy (Aktualizace plánů dílčího povodí dolní Vltavy (2020)) v profilu Želivka – Poříčí a Želivka – VN Švihov – hráz. Při výběru monitorovacích míst se vycházelo ze sítě profilů existujících monitorovacích programů, které byly posouzeny z hlediska reprezentativnosti umístění profilů pro hodnocení chemického a ekologického stavu vodních útvarů a reprezentativnosti z hlediska významných vlivů působících na stav vodních útvarů.

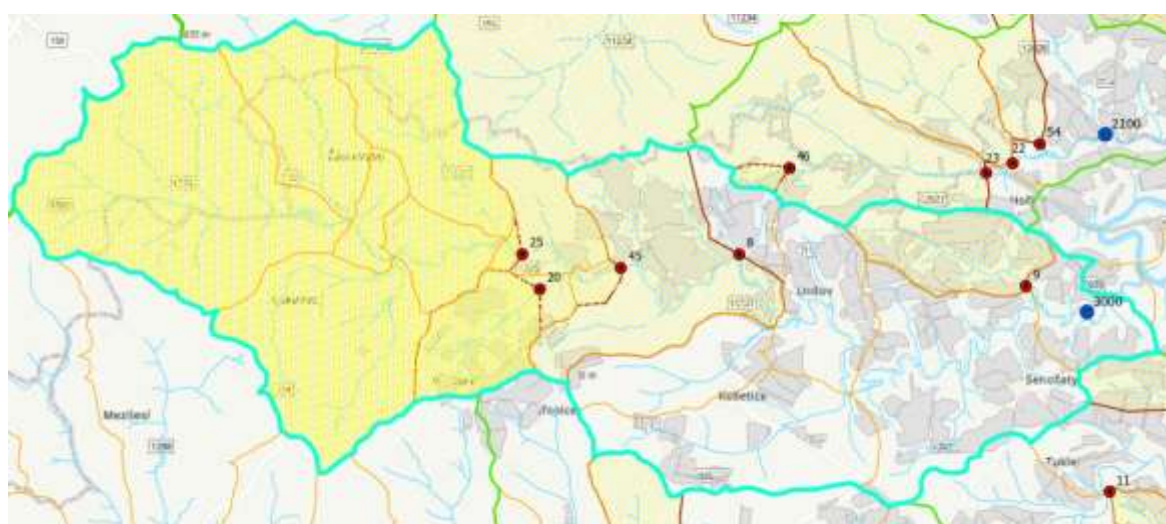
Program **provozního monitoringu** staví na existujících programech monitoringu, které účelově doplňuje a rozšiřuje s cílem naplnit požadavky Rámcové směrnice. Základ programu provozního monitoringu tvoří monitoring správce povodí. Monitorovací síť povrchových vod správce povodí je rozdělena na profily reprezentativní (zpravidla jeden pro každý vodní útvar) a na profily vložené (postihující další vlivy), současně však zahrnuje i profily stávající státní sítě sledování jakosti povrchových vod. Provozní monitoring dále zahrnuje monitoring chemického a ekologického stavu a je prováděn za účelem zjištění stavu těch útvarů povrchových vod, které byly identifikovány z hlediska dosažitelnosti environmentálních cílů jako rizikové. Celá monitorovací síť je navržena tak, aby poskytla souvislý a úplný přehled o stavu vod v dílčím povodí Dolní Vltavy, a tedy i v povodí Želivky. Profily provozního monitoringu v povodí Želivky jsou znázorněny na obr. 1.

Rozsah sledovaných ukazatelů a četnosti sledování pro každé monitorovací místo jsou navrženy tak, aby byly zajištěny dostatečné údaje pro spolehlivé vyhodnocení příslušné kvalitativní složky v matici voda a sedimenty. Sledovaný rozsah pokrývá také požadavky mezinárodního monitorovacího programu MKOL a požadavky na monitoring hraničních vod.

V povodí Želivky byl dále realizován výběrový monitoring na realizace opatření dle metodiky MZe (Metodika hospodaření v OPVZ VN Švihov s ohledem na prioritu ochrany a zlepšení kvality vod (2020)), který realizovalo Povodí Vltavy, s.p. Tento výběrový monitoring se zaměřil především na znečištění pesticidy a herbicidy podle obdobné metodiky jako je tomu u provozního monitoringu. Ukázka rozmístění monitorovacích míst v rámci výběrového monitoringu je na obr. 2.



Obr. 1 Profily provozního monitoringu v povodí Želivky (Aktualizace plánů dílčího povodí dolní Vltavy (2020))



Obr. 2 Ukázka lokalizace výběrového monitoringu k programu B4 – příklad: Martinický potok a Blažejovický potok – levostranné přítoky řeky Želivky – modré body měrné profily, červené body odběry WQ výběrového monitoringu PVL v období 2021-2024

Uvažované simulační nástroje pro analýzu kvality především povrchových vod a nádrží musí vycházet z kalibrovaných a verifikovaných modelů hydraulických a hydrologických

(detailně viz. zpráva TransAdapt 1.6, 2024), protože jejich proměnné popisující pohyb vody jsou nosičem pohybu kvalitativních parametrů. Druhým předpokladem úspěšné simulace průběhu parametrů kvality vody v čase a prostoru jsou datové zdroje, které vycházejí z realizovaného monitoringu na daném území. Lze konstatovat, že povodí Želivky disponuje velmi bohatou datovou sadou kvalitativních měření zaměřených na dlouhodobý a pravidelný monitoring ve vybraných profilech všech 3 typů zmíněných typů monitoringu.

Bohužel existují jen výjimečné epizodní datové sady – záznamy, které by byly zaměřené na dynamické změny v charakteristice znečištění v důsledku dynamických jevů (především v důsledku extrémních srážek). Tyto dynamické jevy, především v menších povodích, ovlivňují změny koncentrace znečišťujících látek v čase a v prostoru často dramaticky a mohou mít drastické dopady na kvalitu ekosystémů, které se opatřeními obecné povahy snažíme chránit. I tyto dynamické jevy lze s výhodou analyzovat s pomocí simulačních modelů, ale jejich procesní aparát musí být opět kalibrován a verifikován, a to na datech, která svým charakterem požadovaným simulacím odpovídají. Tato data nejsou až na výjimky k dispozici. Odběry s frekvencí jedenkrát měsíčně, či čtvrtletně, které jsou dodnes standardem, neposkytují dostatek podkladů pro kalibrace a verifikace kvalitářkách digitálních nástrojů s dynamickým průběhem koncentrace znečištění ve všech fázích odtoku z povodí ať z jakýchkoli zdrojů. To platí i o antropogenním znečištění z urbanizovaných povodí, kde typickým znečištěním s dynamickým průběhem je první splach z kanalizací přicházející do toků přes oddělovače. Druhý případ dynamického znečištění, který není zachycen monitoringem na bázi měsíční frekvence s pevným časem, jsou výtoky látek z drenážních systému, kterých je v povodí Želivky významné množství v aktivní formě. Kvítek a kol. (2018) se této problematice věnuje a upozorňuje na významný vnos znečištění prostřednictvím drenážní soustavy nejen pro fosfor a dusík, ale i pro pesticidy a herbicidy a jejich metabolismy.

Z těchto důvodů byly realizovány bilanční modely znečištění, které mohly využít bohaté sady dat ze všech 3 forem monitoringu za podmínek kvazi-stacionární časové základny, které odpovídají formě a metodě sběru dat, které byly k dispozici. Pro ryze dynamické změny charakteru znečištění v důsledku extrémních událostí je nezbytné rozšířit monitoring o nové prvky on-line měření jednotlivých složek znečištění a následně doplnit dynamické simulační segmenty modelů kvality vod, všude tam, kde je to možné a účelné.

Na druhé straně 3D model kvantity a kvality vody v nádrži Švihov je připraven plnit simulační úlohy a být v budoucnu propojen s dynamickým modelem kvality, aby mohl dobře popsat transport potenciálního znečištění z lokality vzniku po celé nádrži.

Aktuální zpráva etapy TA 1.8 se zaměřila na simulaci kvalitativních parametrů povrchových toků a nádrže a jejich změny v závislosti na ročním období a na hydrologickém roce ve kterém se analýza realizovala.

2 Zpracování modelové bilance toku vybraných látek v povodí VN Švihov

V této části je popsáno sestavení, kalibrace a výsledky simulací zjednodušeného bilančního modelu, zahrnujícího plochu povodí Želivky nad VN Švihov. Model je zaměřen na bilanci množství vody (průtoky a odtoky z povodí) a množství živin (vyjádřené hodnotami koncentrací těchto látek: CHSK, BSK₅, N-NO₃, N-NO₄, P_{celk} a N_{celk}). Popsáno je zpracování dodaných dat, dále odhad koncentrací jmenovaných látek v odtoku z plochy povodí v závislosti na převažujícím způsobu využití území. Dále je dokumentována kalibrace bilančního modelu vůči měřeným datům v profilech pro 12 ustálených stavů odpovídajících mediánovým měsíčním průtokům za období 2015-2021.

2.1 Užívání vod a dopady antropogenní činnosti v povodí Želivky

Užívání vod obecně představuje lidskou činnost, jež má větší či menší vliv na stav a kvalitu vod. Z plánů dílčího povodí je možné identifikovat tyto vlivy, posoudit jejich významnost a dopad na stav vod a navrhnout vhodná opatření k eliminaci nepříznivých vlivů tak, aby se docílilo rovnováhy mezi požadavky na dosažení dobrého stavu a přínosy, které užívání vod umožňuje. Obecně je možno identifikovat čtyři hlavní skupiny vlivů:

- bodové zdroje znečištění
- plošné zdroje znečištění
- ovlivnění hydrologie vodních toků (odběry, převody, špičkování a akumulace vody)
- ovlivnění hydromorfologie koryt a niv vodních toků

Zatímco bodové zdroje znečištění a hydrologické ovlivnění lze identifikovat poměrně exaktně, plošné zdroje znečištění a hydromorfologie vykazují u některých ukazatelů značné nejistoty. Působení vlivů se projeví v hodnocení stavu vodních útvarů. Identifikace vlivů je součástí kapitol plánů dílčích povodí.

V rámci projektu TA 1.8 byla využita metodika pro simulaci kvality vod, která je používána pro potřeby plánování v oblasti vod správců povodí. Základem jsou data ze situačního, provozního a výběrového specifického monitoringu v rámci projektu B4.

2.2 Kontrola a zpracování vstupních dat

Správcem povodí byly dodány časové řady ve 21 stanicích (průtoky, vodní stavy), řady koncentrací látek v 54 profilech a dále data o množství (odběry povrchové a podzemní, vypouštění do povrchových toků) a koncentracích látek (vypouštění do povrchových toků) z evidence hlášení podniku Povodí Vltavy, s. p. Časové řady byly dodány pro období 1999-2020 a posléze doplněny i o rok 2021.

Zpracování průtokových dat v profilech měření

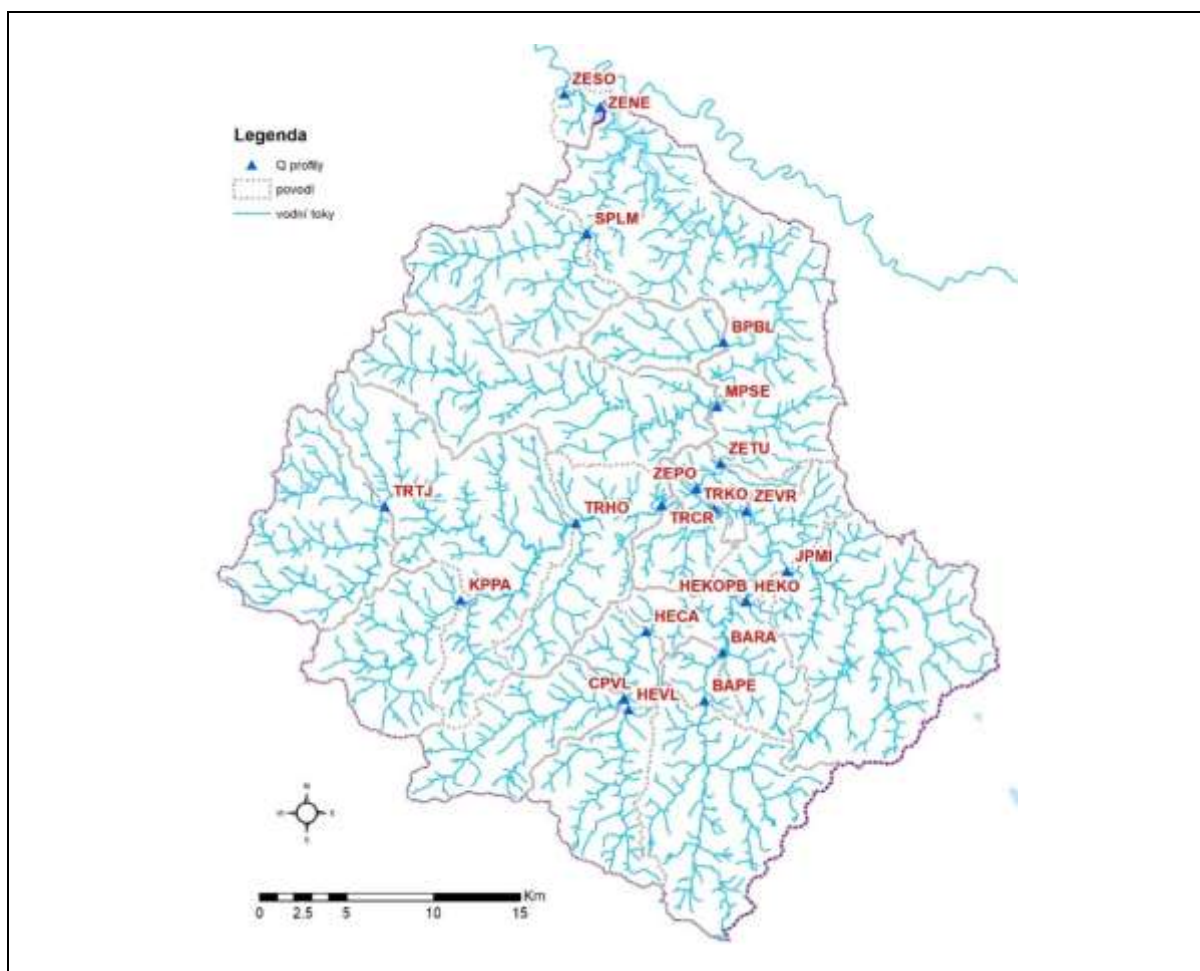
Jako vstup byla využita dodaná data, tj. časové řady průměrných hodinových průtoků ve 20 místech měření a řada průměrných hodinových vodních stavů v jednom profilu měření v rozsahu let 2000-2021.

Zpracování dat koncentrací látek v profilech sledování jakosti

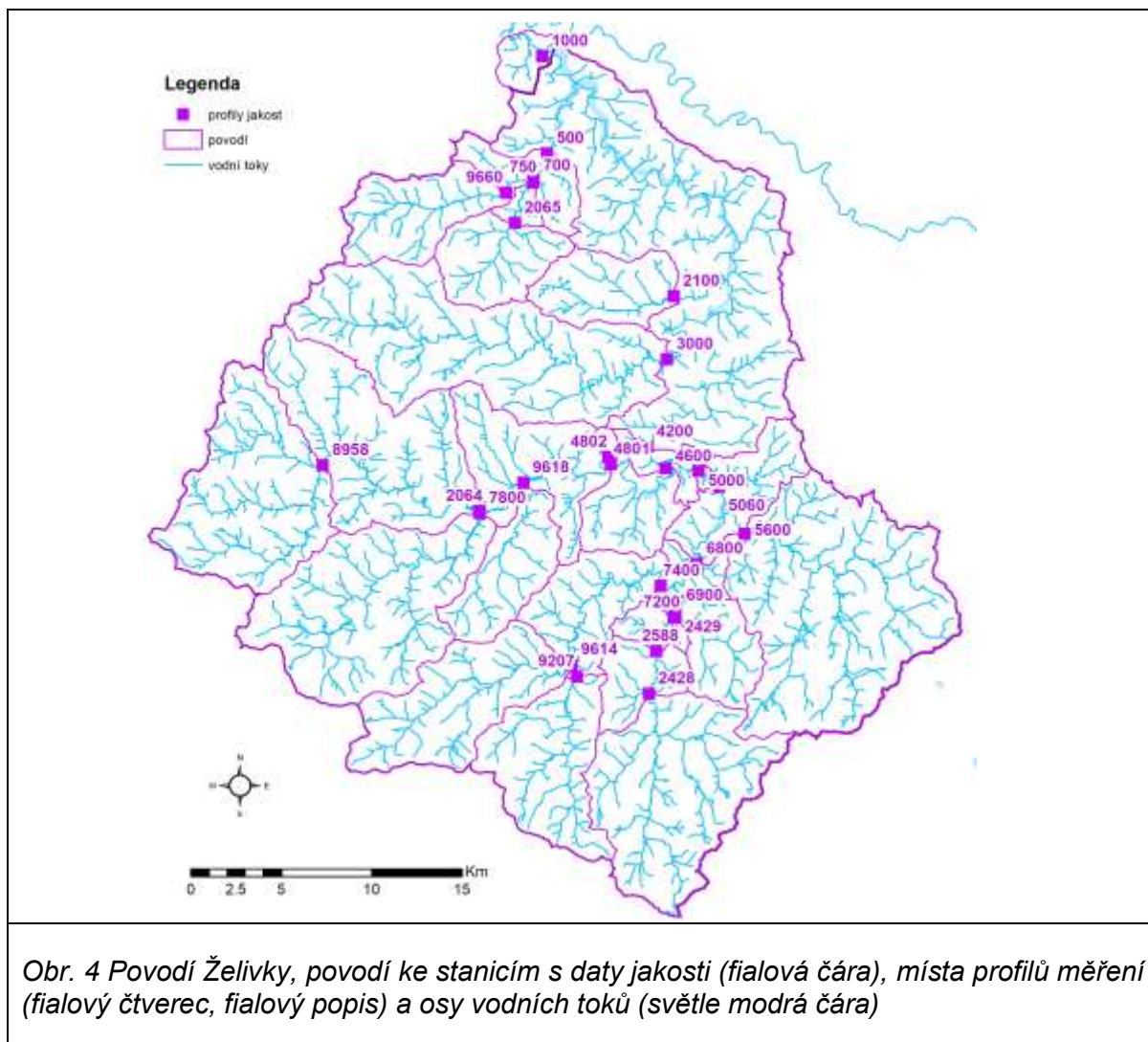
V 54 profilech na vodních tocích byly k dispozici různé počty jednotlivých měření (odběrů) koncentrací látek za rok (v období 1999-2021). Pro další zpracování byly vybrány okamžité koncentrace látek obdobných jako v případě předchozích projektů (v rámci procesu Plánování v oblastech povodí), tedy BSK₅, CHSK, N_{celk}, N-NO₃, N-NO₄, P_{celk} a zpracováno období 2015-2021. Z dodaných dat bylo zřejmé, že profily měření lze rozdělit na dvě skupiny – pravidelně měřené po celé období a profily s nízkým počtem měření (nepoužity pro další analýzy).

Vymezení povodí k jednotlivým profilům měření průtoku a jakosti

Ke dvaceti profilům s průtokovými daty byly na základě povodí IV. řádu a delineace podle výšek terénu vytvořeny polygony povrchových rozvodnic dílčích povodí mezi jednotlivými profily. Přehled je uveden v následujících mapách.



Obr. 3 Povodí Želivky, povodí ke stanicím s průtokovými daty (šedá čára), místa profilů měření (modrý trojúhelník, červený popis) a osy vodních toků (světle modrá čára)



Bilance průtoků v profilech

V dalším kroku zpracování byly doplněné průměrné denní průtoky v jednotlivých průtokoměrných stanicích přepočteny na průměrné měsíční a roční průtoky pro řešené období 2015-2021 a ty vzájemně bilančně porovnány podle polohy stanice v říční síti. Tímto způsobem byly zjištěny bilanční rozdíly mezi profilem a následně upraveny časové řady denních průtoků pro další zpracování.

Tab. 1 Vypočtené průměrné roční průtoky v profilech měření použitých k dalšímu zpracování

označení	místo profilu	poznámka	plocha km ²	průměrný roční průtok (m ³ /s)						
				2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
BAPE	Pelhřimov		93.7	0.15	0.20	0.22	0.19	0.24	0.29	0.33

BARA	Radětín		12.3	0.35	0.46	0.46	0.29	0.43	0.55	0.65
BPBL	Blažejovice		27.5	0.05	0.08	0.09	0.06	0.08	0.08	0.11
HECA	Čakovice	vč. CPVL a HEVL	73.4	0.42	0.55	0.54	0.36	0.53	0.63	0.70
HEKO	Kojčice (LB)		46.1	0.99	1.22	1.22	0.78	1.11	1.56	1.60
JPMI	Milotice-Kletečná		128.5	0.43	0.56	0.69	0.35	0.55	0.85	0.85
KPPA	Pacov		55.9	0.32	0.32	0.16	0.25	0.17	0.19	0.38
MPSE	Senožaty		113.3	0.44	0.34	0.42	0.27	0.36	0.53	0.55
SPLM	Kačerov-Leský mlýn		71.6	0.14	0.17	0.18	0.11	0.14	0.16	0.35
TRCR	Červená Řečice		57.8	1.17	1.11	1.19	0.75	1.07	1.41	1.48
TRHO	Hořepník		128.1	0.97	1.03	1.11	0.69	1.06	1.23	1.46
TRKO	Želiv-Kocanda		22.3	1.26	1.23	1.40	0.87	1.13	1.30	1.68
TRTJ	Těchobuz- Jetřichovec		75.8	0.34	0.32	0.35	0.22	0.31	0.41	0.43
ZONE	Nesměřice		174.6	1.43	1.52	1.47	0.62	0.53	1.34	4.03
ZEPO	Poříčí		8.4	2.97	3.10	3.39	2.05	2.82	3.84	4.30
ZESO	Soutice		7.8	1.50	1.67	1.62	0.77	0.68	1.32	3.90
ZEVR	Želiv-Vřesník		29.6	1.66	1.87	1.98	1.18	1.68	2.53	2.61

CPVL	Vlásenice C	nepoužito	54.5	0.30	0.40	0.41	0.31	0.41	0.52	0.55
HEVL	Vlásenice H	nepoužito	47.8	0.13	0.18	0.20	0.10	0.11	0.23	0.29
ZETU	Tukleky	nepoužito	12.3	2.84	3.22	3.57	2.31	3.06	3.87	4.49

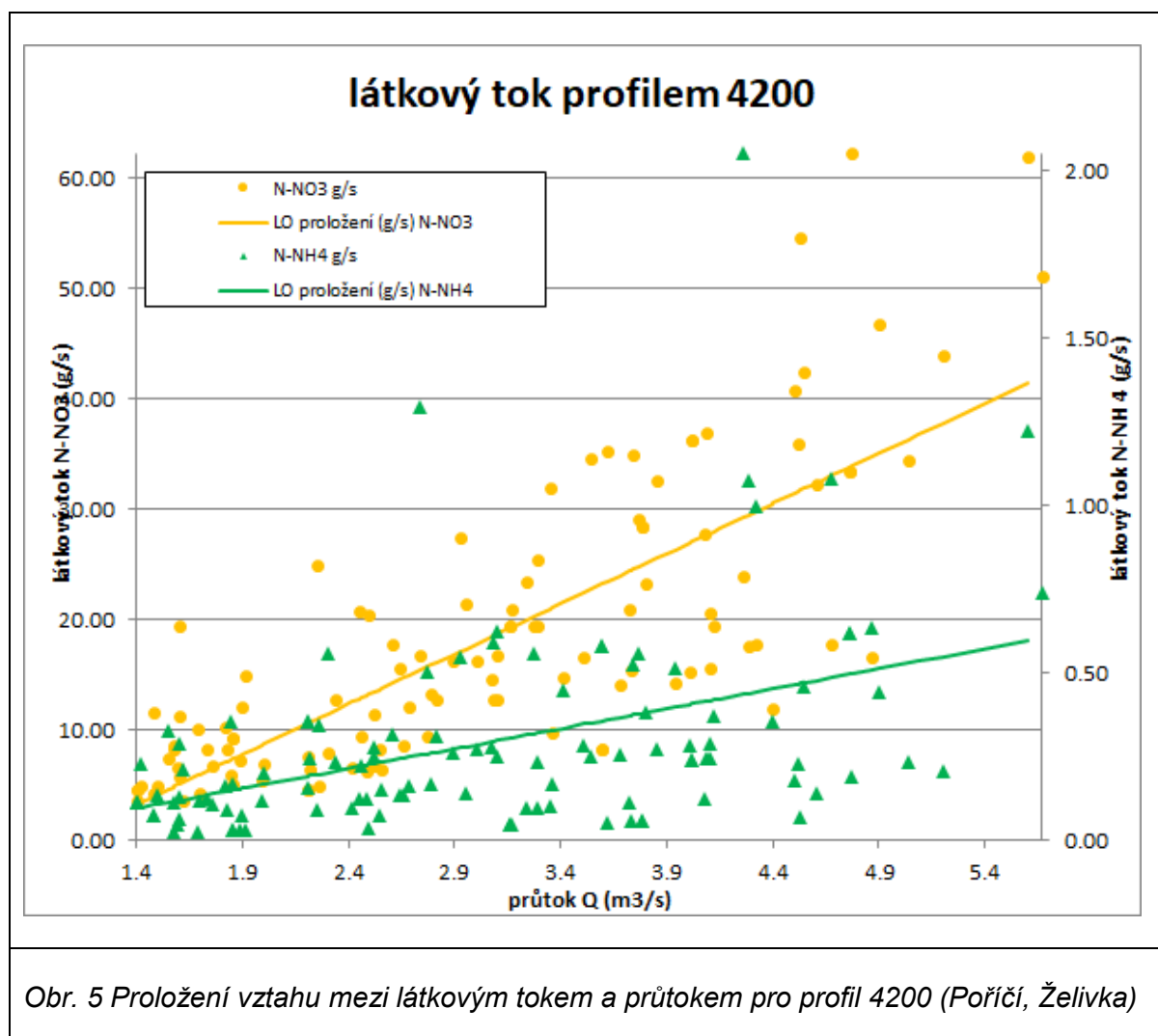
Vytvoření průtokových řad v profilech měření jakosti vody

Pro výpočet toku látek v profilech měření jakosti bylo nutno odvodit řady denních průměrných průtoků v profilech měření jakosti v těch případech, kde není měření průtoků přímo v profilu k dispozici. Odvození bylo provedeno kombinací dvou přístupů: podle poměru plochy povodí k blízkému profilu s měřením a pomocí bilance profilů výše a níže po toku.

2.3 Výpočet bilančního toku vybraných látek pro profily sledování

Postupem odvozeným v předchozích projektech v rámci plánování v oblastech povodí byly ustaveny závislosti mezi okamžitým průtokem a látkovými toky (vypočtenými ze součinu průtoku a koncentrací) v profilech sledování jakosti. V případě, že okamžitá koncentrace látky byla pod mezí stanovitelnosti, do zpracování byla tato hodnota zahrnuta jako polovina této mezní hodnoty.

Ukázka proložení vztahu mezi okamžitým látkovým tokem a průtokem pro vybrané profily je na následujícím obrázku. Body znázorňují hodnoty odvozené z okamžitého měření koncentrací a průměrného denního průtoku v den měření, čára znázorňuje lineární proložení. Z tohoto proložení jsou pro hodnoty charakteristických (mediánových) měsíčních průtoků odečteny odpovídající hodnoty charakteristických měsíčních látkových toků jednotlivých látek. Rozsah zobrazených hodnot je přizpůsoben hodnotám měsíčních charakteristických průtoků a látkových toků, tedy nejsou zahrnuty nejnižší a nejvyšší hodnoty.



Bilance toku látek v profilech sledování jakosti

Na základě lineárního proložení vztahu mezi průtokem a látkovým tokem, popsaným v předchozí podkapitole, je možné odhadnout tok jednotlivých látek (množství v t/rok) pro jednotlivé charakteristické (mediánové měsíční) hodnoty průtoku. Jejich průměr pak považujeme za odhad proteklého množství látky profilem za rok. Zde je nutno zdůraznit, že tento odhad platí pro běžné průtokové podmínky a nezahrnuje epizodní odnos látek při zvýšených průtocích. Celkový tok látek lze předpokládat vyšší, mnohdy i značně. Lze však tímto způsobem provést srovnání a bilanci látkového odnosu mezi jednotlivými profilem za srovnatelných podmínek, které se vyskytují po většinu roku. Tok látek (CHSK, BSK₅, N-NO₃, N-NO₄, P_{celk} a N_{celk}) podle dodaných okamžitých koncentrací a výše popsané metodiky byl vyčíslen pro 26 profilů sledování jakosti vody, ve kterých byla k dispozici dostatečná data za období 1.1.2015 - 31.12.2021.

Bodové odběry vody z povrchových vod

Zadavatelem byly dodány podklady pro odhad odebíraného množství vody z povrchových vodních toků a nádrží. Jde o data ohlášených množství z vodohospodářské evidence podniku Povodí Vltavy, s.p. za období 1999-2021. Data obsahovala identifikátor (číslo VHB), polohu uživatele, dále odebíraná množství v měsíčním kroku. Pro zájmové území,

povodí Želivky, bylo z dostupných dat vybráno 12 bodových odběrů povrchové vody, u kterých byly k dispozici hodnoty pro období 2015-2021. Na základě dat tohoto období byly vypočteny průměrné měsíční hodnoty pro každého uživatele. V souboru se nachází jeden velmi významný odběr (vodárenský odběr z nádrže Švihov, v průměru 3.03 m³/s) jeden významnější odběr (CEREPA, Červená Řečice, v průměru 11.3 l/s). Součet ostatních odběrů nepřesahuje v průměru 5 l/s.

Bodové zdroje znečištění, vypouštění do povrchových vod

Zadavatelem byly dále dodány podklady pro odhad vypouštěného množství vody a také koncentrace látek ve vypouštěných vodách. Jde o data ohlášených množství a koncentrací z vodohospodářské evidence podniku Povodí Vltavy, s.p. za období 1999-2021 pro celkem 109 bodových zdrojů. Data obsahovala identifikátor (číslo VHB), polohu uživatele, dále vypouštěná množství v měsíčním kroku. Pro potřeby projektu byly dále využity koncentrace ve vypouštěných vodách (BSK₅, CHSK, N-NH₄, N_{anorg} a P_{celk}), u kterých byly k dispozici hodnoty 1x za rok. Pro zájmové území, povodí Želivky, bylo z dostupných dat vybráno 100 bodových uživatelů povrchové vody, u kterých byly k dispozici hodnoty vypouštění pro období 2015-2021.

Vzhledem k tomu, že v datech bodových uživatelů vody nebyly k dispozici koncentrace N_{celk} a N-NO₃, ale pouze N_{anorg}, byly hodnoty N_{celk} a N-NO₃ aproximovány na základě analýzy podrobnějších dat poskytnutých Povodí Vltavy s. p. pro 8 velkých bodových zdrojů.

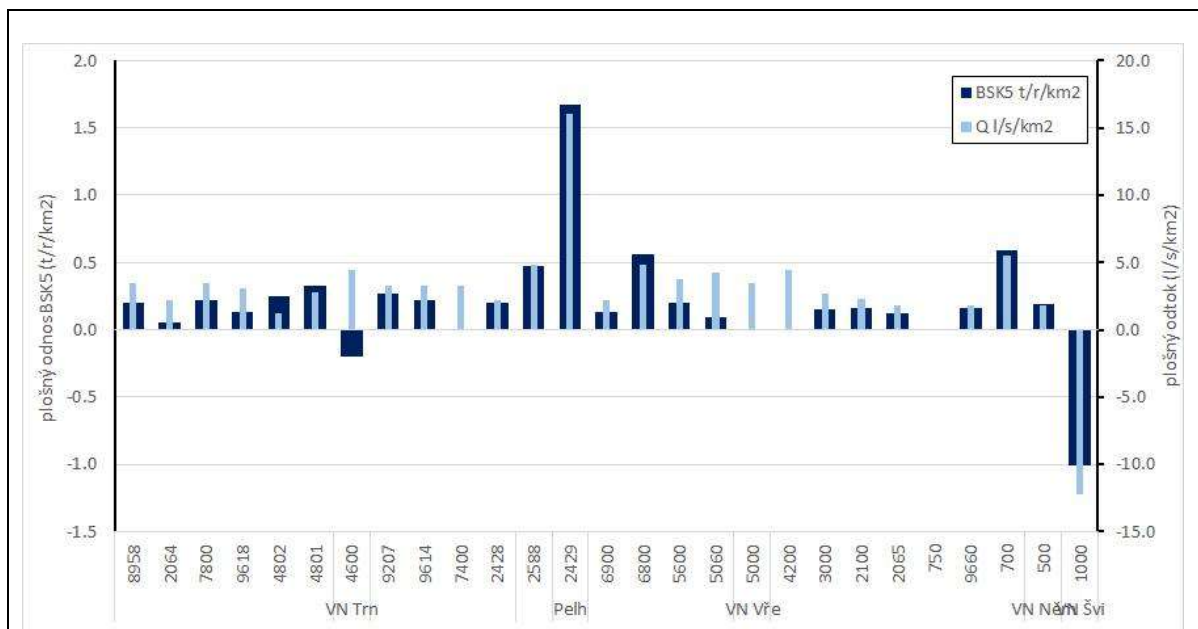
Z dodaných dat byly vypočteny odhady

- Průměrného měsíčního průtoku vypouštěných vod za období 2015-2021
- Látkového toku pro jednotlivé měsíce (součin průměrného měsíčního průtoku a hodnoty koncentrace látky v daném roce)

Přestože jde o odhady, které nekorespondují zcela s podrobností dat jakosti vody v profilech sledování, bylo nutno vycházet z dat, která byla k dispozici, podrobnější data v době zpracování nebyla. Zdaleka nejvýznamnějším bodovým zdrojem podle zpracovaných dat je ČOV Pelhřimov, s odstupem následují ČOV Pacov, CEREPA Červ. Řečice a ČOV dalších měst a obcí.

Bilance odnosu látek mezi profily sledování jakosti

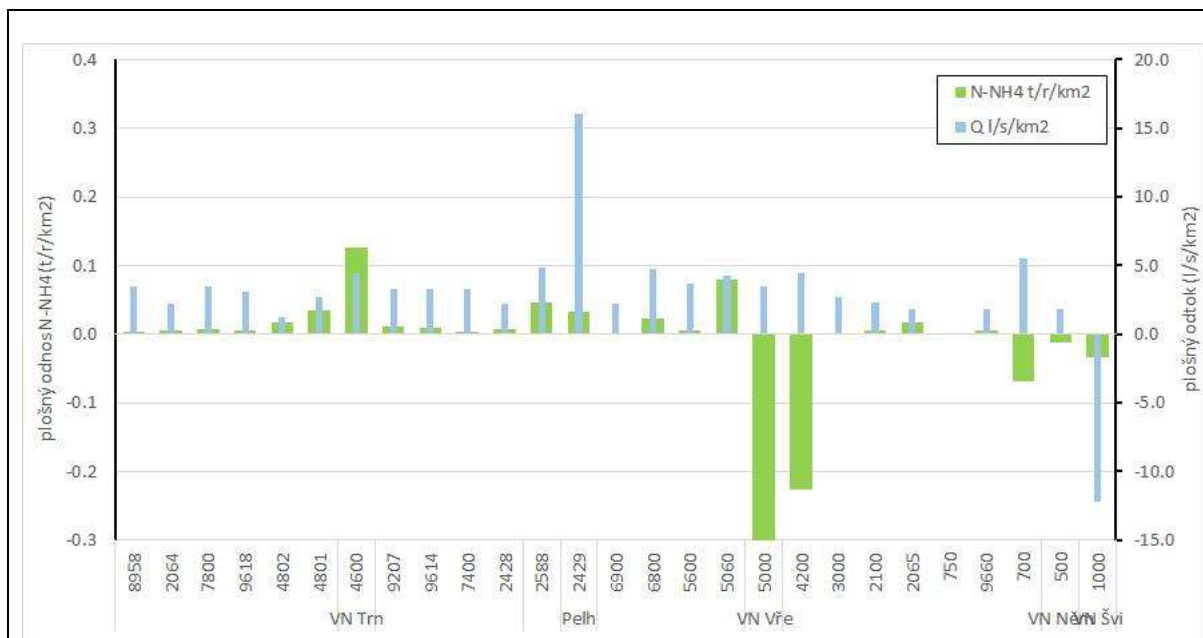
Pro účely porovnání látkového odnosu z území povodí mezi profily sledování jakosti byl proveden přepočet látkového toku profily sledování na plochu mezipovodí mezi těmito profily a tato hodnota byla snížena o vnos látek z bodových zdrojů ležících v příslušném mezipovodí. Ukázky porovnání pro jednotlivé sledované látky jsou na následujících obrázcích. Čísla na vodorovné ose označují identifikátory profilů sledování jakosti. Na levé svislé ose jsou hodnoty vypočteného plošného odnosu dané látky, na pravé svislé ose hodnoty plošného odtoku (světle modré sloupce v grafu).



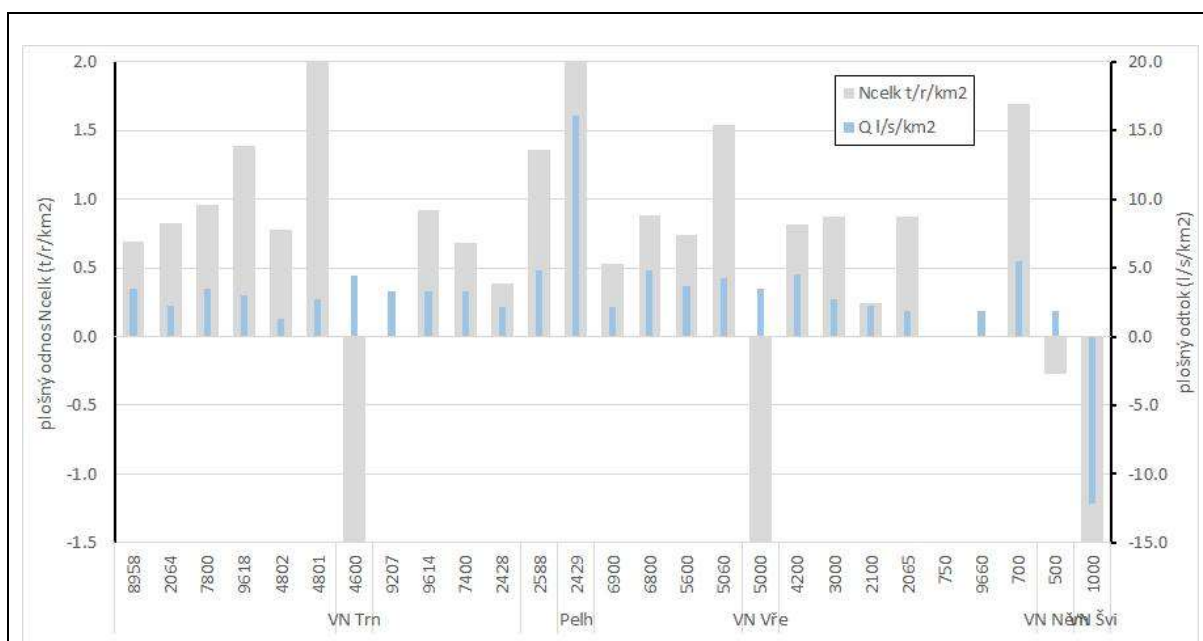
Obr. 6 Plošný odtok Q (l/s/km²) a plošný odnos BSK_5 (t/r/km²) v jednotlivých mezipovodích profilů sledování jakosti vody



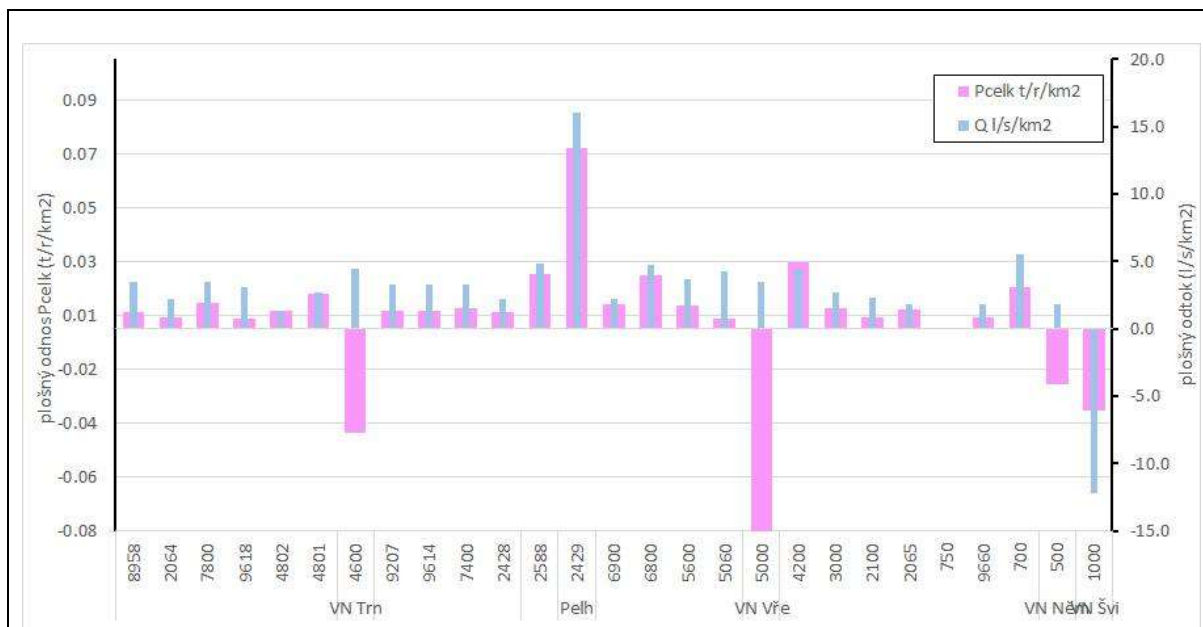
Obr. 7 Plošný odtok Q (l/s/km²) a plošný odnos $N-NO_3$ (t/r/km²) v jednotlivých mezipovodích profilů sledování jakosti vody



Obr. 8 Plošný odtok Q (l/s/km²) a plošný odnos $N-NH_4$ (t/r/km²) v jednotlivých mezipovodích profilů sledování jakosti vody



Obr. 9 Plošný odtok Q (l/s/km²) a plošný odnos N_{celk} (t/r/km²) v jednotlivých mezipovodích profilů sledování jakosti vody



Obr. 10 Plošný odtok Q ($l/s/km^2$) a plošný odnos P_{celk} ($t/r/km^2$) v jednotlivých profilech mezipovodí sledování jakosti vody

Z porovnání hodnot v jednotlivých povodích lze usuzovat, že

- Je zřejmý vliv vodních nádrží (4600: VN Trnávka, 5000: VN Vřesník, 500: VN Němčice, 1000: VN Švihov). U většiny sledovaných látek je bilance záporná, tedy dochází ke snížení toku látek pod nádrží. Oproti předpokladům pod VN Trnávka (profil 4600) byl vypočten vyšší látkový tok N-NH₄. V datech, které byly k dispozici pro tento rozdíl nebylo nalezeno vysvětlení.
- Je zřejmý vliv největšího města v území, Pelhřimova (profil 2429). V tomto profilu byl vypočten vysoký plošný odtok i látkové toky BSK, CHSK, Ncelk, N-NO₃ a Pcelk, které významně převyšují hodnoty v ostatních povodích.
- Záporné hodnoty bilance N-NH₄ v profilech 4200 a 700 souvisí s významně zvýšenými hodnotami látkového toku N-NH₄ v profilech výše proti toku, tj. 4600 a 2065. Z analýzy dat není zřejmá jejich příčina.

Uvedené vypočtené hodnoty reprezentují mezipovodí mezi profily sledování jakosti jako celek. Pro podrobnější rozlišení je nutno provést další analýzy a využít modelovací techniky, popsané v následujících kapitolách.

2.3.1 Odhad vnosu látek z nebodových zdrojů

Na základě literární rešerše byly odhadnuty koncentrace řešených látek ve vodě odtékající z území podle jednotlivých typů využití území. Tyto hodnoty charakterizují celkový vliv všech ostatních zdrojů, mimo vymezené bodové zdroje, řešené v předchozích kapitolách. Pro porovnání s hodnotami z literatury bylo provedeno statistické zpracování měřených koncentrací (na datech Povodí Vltavy s.p. pro rozšířené období 2000-2021) na dalších

vybraných deseti profilech sledování jakosti, mimo předchozí skupinu profilů sledování jakosti. Výběr zahrnoval 10 povodí o malé rozloze s minimem bodových zdrojů (podle databáze hlášení). V dalším kroku byla na základě těchto odhadů provedena další optimalizace hodnot odhadů koncentrací pro jednotlivé typy využití území tak, aby výsledné koncentrace odpovídaly hodnotám ze zpracování dat profilech sledování jakosti. Pomocí těchto korigovaných hodnot koncentrací byly následně vypočteny látkové toky, přiřazené posléze v modelu jednotlivým výpočetním povodím.

Polygony využití území

Pro účely této analýzy byla plocha jednotlivých mezipovodí mezi profily sledování jakosti vody rozdělena na 8 kategorií využití území, na základě zjednodušení kategorizace produktu dálkového průzkumu Země Corine Land Cover CLC 2018. Použité kategorie jsou: urbanizované země (1), orná půda (2), louky a trvalé travní porosty (3), smíšené lesy (4), jehličnaté lesy (5), vodní plochy, skály a nepropustné plochy (6), drenáž na orné půdě (7), odvodněné louky (8).

Odhad koncentrací z analýzy dat z 10 malých povodí

V souboru dat měření koncentrací za období 2000-2021 (Povodí Vltavy s.p.) bylo vybráno 10 profilů s malou plochou povodí, minimálním počtem bodových zdrojů a výrazným podílem některé kategorie využití území. Ve většině z těchto profilů obvykle neprobíhá měření koncentrací každoročně, ale opakuje se ve víceletých cyklech.

Tab. 2 Základní charakteristiky povodí k 10 profilům s malou plochou a minimem bodových zdrojů. Podíl plochy kategorií využití území v procentech.

ID profilu	plocha	urb. území	Orná	louky	smíšené lesy	jehličnaté lesy	vodní pl. skály	drenáž orná	odvod. louky	bodové zdroje
	km ²	1	2	3	4	5	6	7	8	
2202	1.6	0	39	0	0	54	0	7	0	0
9227	31.3	1	43	10	4	30	0	7	5	1BZ
9231	5.4	4	75	7	0	10	0	4	0	1BZ
9265	4.9	5	49	14	0	15	0	14	3	0
9266	13.8	0	39	3	0	48	0	10	0	0

9267	2.6	1	40	1	0	38	0	20	0	0
9289	23.7	1	43	8	2	34	2	6	4	1BZ
9616	19.2	2	65	7	0	13	0	9	4	1BZ
9630	13.2	0	38	8	0	45	0	7	2	0
9631	7.8	5	71	0	0	11	0	13	0	0

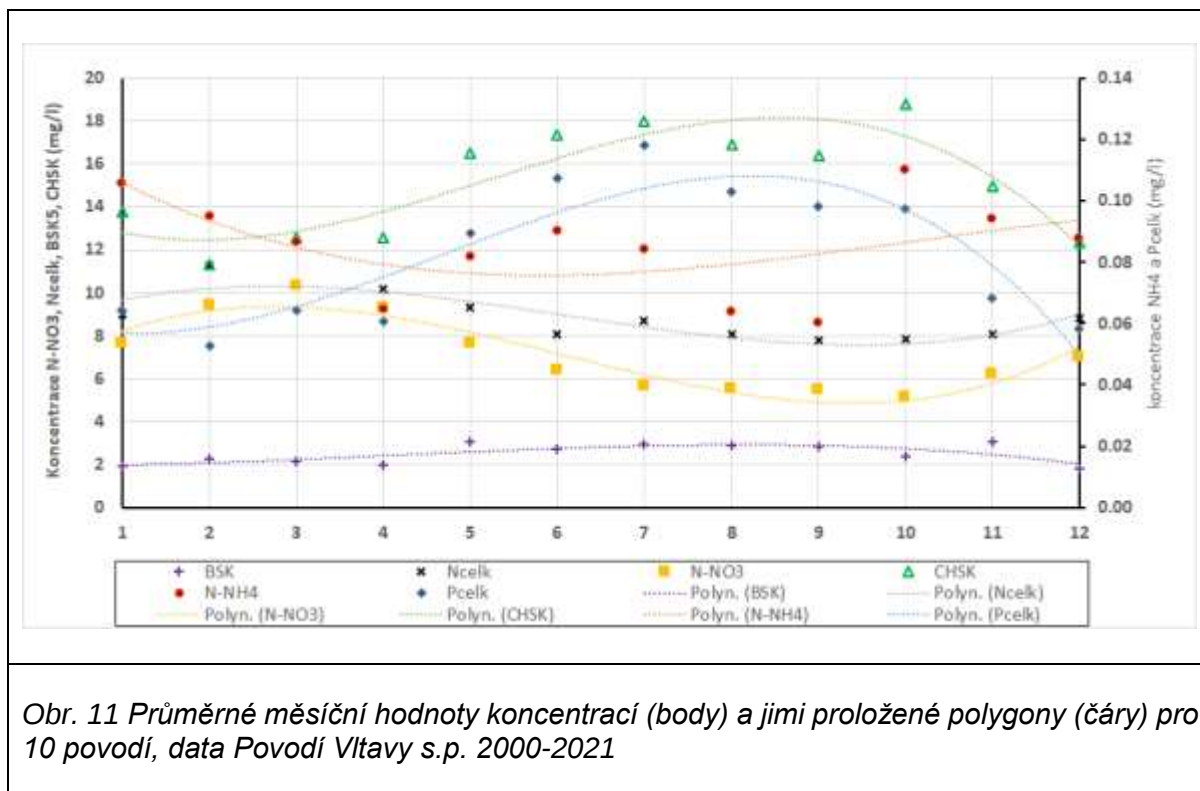
V souboru jsou obsažena 4 povodí s významným podílem lesa (v Tab. zeleně) a 6 povodí s významným podílem orné půdy (oranžově) případně v kombinaci s drenáží (šedě).

Z měřených okamžitých hodnot koncentrací byly dále vypočteny průměrné koncentrace jednotlivých látek za celé období 2000-2021. V případě Ncelk jsou k dispozici hodnoty pouze pro 3 profily, pro BSK5 jen pro 7 profilů.

Pomocí metody minima čtverců, při započtení podílů ploch jednotlivých typů využití území, byly provedeny odhady koncentrací pro jednotlivé kategorie využití území tak, aby byl minimalizován rozdíl mezi průměrnou koncentrací v profilu sledování z dat a z výpočtu pomocí váženého průměru (váhou je procentní podíl území).

Při optimalizaci metodou nejmenších čtverců měla shoda odhadů s daty všech povodí stejnou váhu. Pro to, aby v povodích s vyšším podílem plochy orné půdy a drenáže (a také urbanizovaného území) byla dosažena dobrá shoda s měřením, jsou optimalizované koncentrace těchto látek pro jmenované kategorie značně vysoké. Naopak, aby bylo dosaženo dobré shody s měřenými koncentracemi pro povodí s vyšším podílem lesních ploch a travních porostů, bylo nutno u těchto kategorií použít odhady koncentrací velmi nízké či nulové.

Kromě ročních průměrných hodnot byla také provedena analýza rozdělení hodnot koncentrací během roku na základě vypočtených průměrných hodnot koncentrací pro jednotlivé měsíce. Na následujícím obr. 11 jsou vykresleny pro jednotlivé látky průměrné měsíční hodnoty koncentrací (body) a jimi proložené polygony (čáry). Jde o průměrné hodnoty za celou skupinu 10 povodí. Na základě těchto proložených polygonů (2 a 3 řádu) byly vypočteny poměrné koeficienty měsíčních průměrných koncentrací (relativně k roční průměrné koncentraci).



Z průběhu měsíčních průměrných hodnot lze pozorovat dva typické průběhy: s maximem v jarních měsících (Ncelk, N-NO3) nebo s maximem v letních měsících (CHSK, Pcelk, BSK5).

Odhad koncentrací na základě literární rešerše

Na základě literární rešerše údajů z dostupné literatury v podmínkách ČR byly nezávisle na předchozí analýze odhadnuty typické koncentrace dusíku a fosforu z jiných povodí (Fiala a Rosendorf, 2011; Hejzlar a kol. 2009, 2010; Kvítek et al. 2012; Hanák a Ryšavý 2015).

Výpočet látkového odnosu z jednotlivých povodí IV. řádu

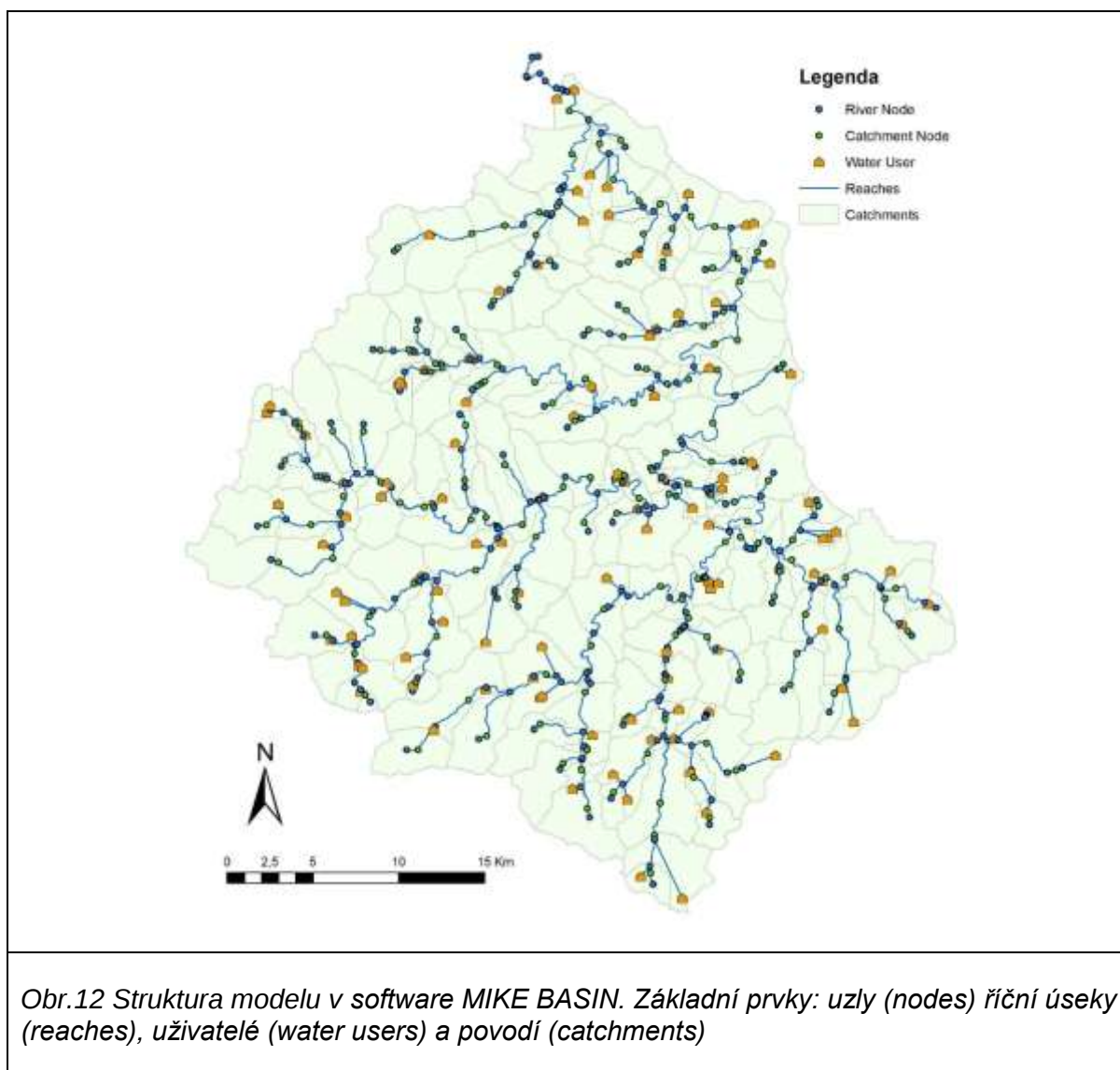
Hodnoty mediánu měsíčních průtoků v profilech sledování jakosti byly převedeny na plošné odtoku (vydělením velikostí plochy mezipovodí). Dále byly vypočteny vážené koncentrace jednotlivých látek a podílu plochy jednotlivých kategorií využití území, také pro jednotlivá mezipovodí k profilům sledování jakosti. Pomocí součinu hodnoty plošného odtoku a koncentrací pro jednotlivé dílčí plochy byl odhadnut látkový odnos z plochy jednotlivých mezipovodí mezi profily sledování jakosti pro každý měsíc.

Dále byla provedena kontrolní bilance látkových toků z plochy povodí a z bodových zdrojů vůči hodnotám vypočteným z měření v profilech sledování jakosti. Bylo zjištěno, že v řadě profilů je hodnota plošného odtoku podhodnocena (prostým součtem odnosu z povodí a hodnot z bodových zdrojů byla vypočtena hodnota významně nižší než z měření v profilu sledování). Pro mezipovodí k profilům sledování byly hodnoty odnosu upraveny individuálně pro jednotlivé látky tak, aby popsáný rozdíl byl odstraněn. Takto upravené hodnoty byly převedeny na specifické látkové toky ($\text{g/m}^2/\text{s}$) a spolu s plošným odtokem (l/s/km^2) připraveny jako vstup do matematického modelu.

2.4 Sestavení struktury bilančního modelu v software MIKE BASIN

Z důvodu možnosti srovnání výsledků s předchozími projekty byl pro modelování využit stejný software jako v případě bilančních studií prováděných správcem vodních toků v rámci procesu plánování v oblastech povodí. V této kapitole je popsáno vytvoření struktury modelu.

Model se skládá ze základních funkčně propojených prvků: úseků vodních toků, bodových uživatelů (vypouštění a odběry) a připojených polygonů povodí. Model sestává ze 430 úseků vodních toků o celkové délce 482 km, dále ze 100 připojených bodových vypouštění a 12 připojených bodových odběrů. Celkem 159 výpočetních povodí má celkovou plochu 1179 km² (tj. v průměru asi 7.4 km²). Grafické znázornění struktury modelu je na obr. 12. Modrou čarou jsou znázorněny osy vodních toků a připojení bodových uživatelů, oranžovým pětiúhelníkem poloha bodových zdrojů. Modrým kolečkem jsou vyznačeny uzly na vodním toku (soutok, připojení), zeleným kolečkem uzel připojení plochy povodí. Zelené polygony (s šedivým obrysem) jsou modelová sub-povodí.

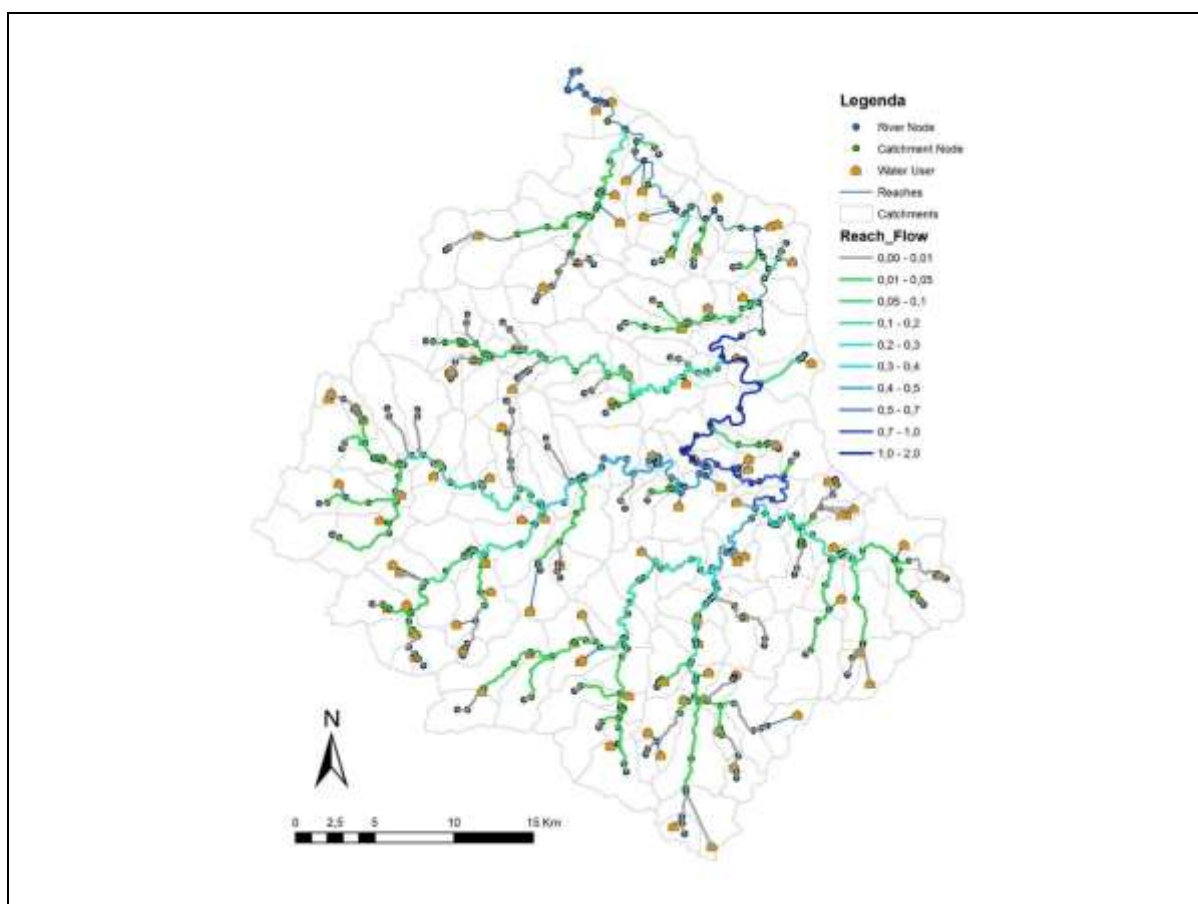


V řešeném povodí se nachází na vodních tocích řada nádrží, které významně mění koncentrace simulovaných látek. Vzhledem k tomu, že tyto změny není možno popsat zjednodušeně, s využitím v současnosti dostupných dat a schematizací v modelu, byly největší nádrže (VN Vřesník, VN Trnávka, VN Němčice, VN Švihov) schematizovány v modelu pomocí přerušení toku. Veškerý průtok a látkový tok vstupující do nádrže byl z modelu odebrán a pod nádrží, v místě profilu sledování jakosti, byla do modelu zavedena okrajová podmínka, obsahující průtok a koncentrace vypočtené z hodnot měření v profilu sledování jakosti. V případě VN Sedlice nebyla k dispozici data měření bezprostředně pod nádrží, proto nebyl tento postup použit. V modelu se pouze upravily parametry tak, aby byla zohledněna delší doba zdržení v nádrži oproti korytu vodního toku.

K prvkům modelu (povodí, bodová uživatelé) byly připojeny datové vstupy popsané v předchozích kapitolách (hodnoty plošného odtoku a odnosu, resp. hodnoty průtoku a koncentrací) a to ve formě dvanácti měsíčních charakteristických hodnot.

2.4.1 Výsledky kvalitativních simulací

Po vložení vstupních dat do struktury modelu byla provedena kontrolní simulace a porovnány simulované průtoky s hodnotami vypočtenými z měřených časových řad v profilech měření průtoku.



Obr. 13 Simulovaný průtok v říčních úsecích z modelu MIKE BASIN, povodí Želivky charakteristické hodnoty pro průměrný měsíc srpen (Reach_Flow: Q – průtoky, m^3/s).

Kalibrace koncentrací a toku látek

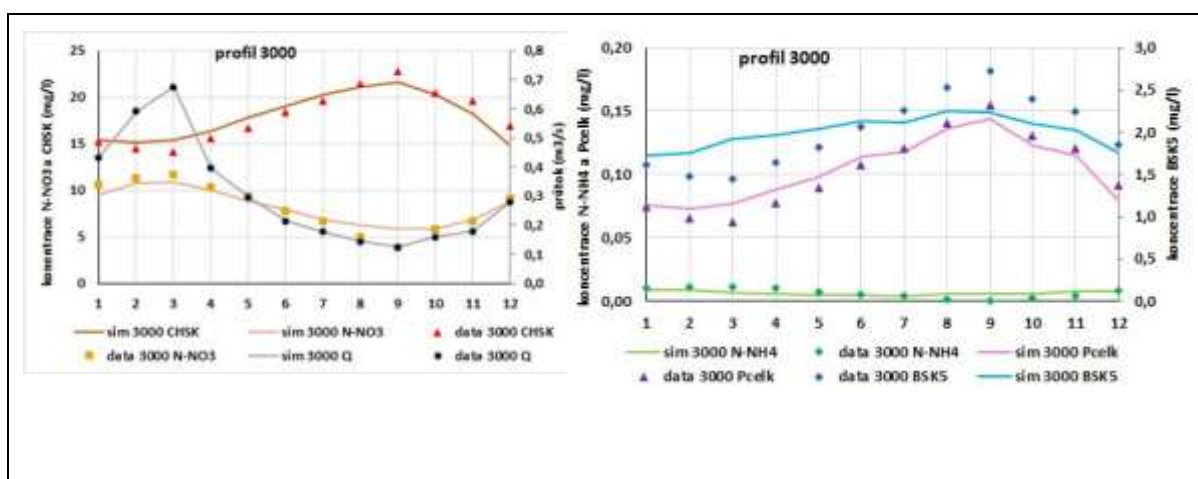
V dalším kroku byly pomocí úprav koeficientu rozpadu jednotlivých látek nastaveny hodnoty v jednotlivých mezipovodích mezi profily sledování jakosti tak, aby se simulované koncentrace v profilech co nejvíce blížily charakteristickým koncentracím ze zpracování měřených dat. Kalibrace byla provedena celkem pro 23 profilů sledování jakosti. Z porovnání simulovaných a z dat zpracovaných koncentrací plyne, že pro roční průměrné hodnoty koncentrací se rozdíl v celém souboru profilů pohybuje v rozsahu -1.4 až +2.5%, v průměru 0.1%. Porovnání jednotlivých měsíčních simulovaných a z dat zpracovaných koncentrací bylo provedeno pomocí mediánových hodnot pro všech 23 profilů. Vzhledem k množství faktorů, které ovlivňuje měsíční variabilitu a v modelu nejsou zahrnuty a vzhledem k nutným zjednodušením považujeme mediánové hodnoty rozdílu v rozsahu 9 až 15% za přijatelné, Tab. 3.

Tab. 2 Porovnání měsíčních charakteristikách koncentrací a simulovaných koncentrací, medián z 12 měsíců, soubor 23 profilů. Vyčísleno jako % hodnoty koncentrace.

ukazatel	BSK5	N-NH4	N-NO3	Pcelk	CHSK
rozdíl (%)	11.4	15.0	13.9	10.3	9.0

Porovnání koncentrací ve vybraných profilech

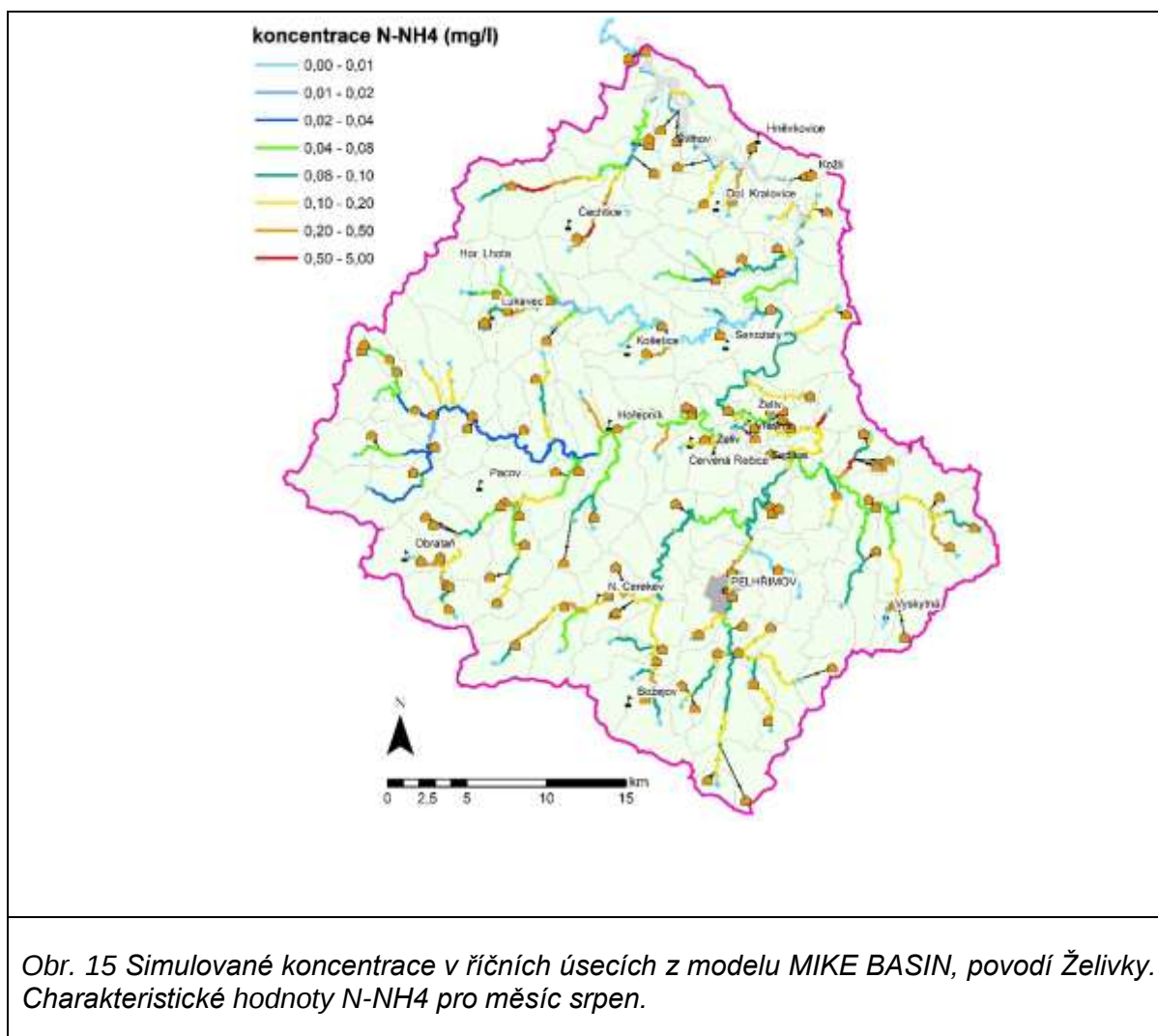
Na následujících obrázcích je znázorněno porovnání měřených (body) a simulovaných (čáry) měsíčních charakteristických koncentrací a měsíčních charakteristických průtoků pro vybraný profil.



Obr. 14 Měsíční charakteristické koncentrace a průtok ve vybraném profilu sledování jakosti 3000. Body: hodnoty z analýzy měřených dat, čáry: simulace modelem

Simulované koncentrace látek ve vodních tocích

Výstupem z modelu MIKE BASIN jsou, kromě hodnot ve vybraných místech sítě vodních toků, také mapy změn koncentrací v jednotlivých úsecích vodních toků, pro každý z měsíců. Jde o mapy simulovaných koncentrací Pcelk, N-NO₃, N-NH₄, BSK₅ a CHSK pro každý měsíc. Pro každý úsek jsou znázorněny simulované hodnoty na jeho konci. Následuje ukázka jednoho ukazatele pro jeden konkrétní měsíc, srpen – obr. 15.



2.5 Závěry, doporučení pro kvalitativní simulační nástroj pohybu látek v tocích

Byly zpracovány vybrané ukazatele jakosti vody v profilech sledování, průtoky v profilech měření a dále zpracována data pro odhad odnosu látek z plochy povodí. Pomocí matematického modelu MIKE BASIN byly odhadnuty koncentrace těchto ukazatelů podél významných vodních toků (vyjma nádrže) a to pro 12 měsíců v roce. Vzhledem k dostupným datovým podkladům a nutným zjednodušením daným metodou zpracování, je třeba upozornit, že jde o odhad platný pouze pro obvyklé podmínky, střední průtoky. Během epizod s nízkými a vysokými průtoky mohou být látkové toky významně odlišné. Přesto lze z presentovaných

výstupů získat obrázek o časovém a prostorovém rozdělení koncentrací a toků látek v ploše povodí Želivky. Tyto závěry jsou významné především pro případné užití digitálního dvojčete Želivky pro dopady vlivu klimatických změn a predikci budoucí situace.

Zjednodušený model kvality vod ve vodních tocích je klíčovým segmentem integrovaného systému simulačních nástrojů v povodí Želivky, protože umožňuje analyzovat zjednodušeným způsobem integrovaná data z monitoringu povodí Želivky a je vhodným doplňkem digitálního komplexu simulačních modelů. Zjednodušený model kvality vod umožňuje zjednodušenou analýzu dat z monitoringu a slouží jako efektivní doplněk ke komplexním simulačním modelům. Pro přesnější simulace dynamického zatížení znečištěním, zejména v reakci na extrémní jevy jako jsou přívaleové srážky, by bylo ideální využití pokročilých hydrodynamických a hydrologických modelů (tzv. digitálních dvojčat). Jejich kalibrace a verifikace však vyžaduje hustou datovou sadu z kontinuálního on-line monitoringu, která v současnosti není k dispozici z důvodu vysokých finančních nákladů a chybějících legislativních požadavků. Je však třeba dodat, že technologie pro on-line monitoring vybraných polutantů jsou již technicky dostupné.

Výstupy aplikovaného modelu indikují, že současná situace v kvalitě povrchových vod je stabilizovaná, což koresponduje se závěry práce Kvítek (2018). Pro budoucí období, kdy klimatická změna bude ovlivňovat negativně vodní bilanci však bude potřeba hledat taková adaptační opatření, aby se kvalita vod zlepšila, v nejhorším případě stagnovala. Analýza dále ukázala, že významným zdrojem lokálního znečištění jsou pravděpodobně malé urbanizované celky do 500 obyvatel, kde přetrvává řešení odpadních vod pomocí žump a septiků bez moderních systémů čištění s dávkou technologické nebo procesní nekázně.

Zásadním limitem stávajícího přístupu je, že současný kvazistacionární model a systém monitoringu s měsíční frekvencí odběrů zachytí epizodní jevy pouze náhodně. Je vysoce pravděpodobné, že významná krátkodobá znečištění, jako jsou následky erozních jevů, první splachy z jednotných kanalizací či zvýšené odtoky z drenážních systémů, uniká pozornosti a není v bilancích adekvátně zohledněno, případně jen nějakou částí dopadu epizody.

3 3D Simulační model nádrže Švihov

Podrobný popis dostupných dat a jejich zpracování, provedené analýzy jsou popsány ve zprávě TransAdapt úkol 1.6. Následuje pouze velmi stručná sumarizace celého procesu.

3.1 Úvod a dostupné podklady

Vodní nádrž Švihov představuje největší zásobárnu pitné vody ve střední Evropě. Byla vybudována na 4,29. říčním kilometru řeky Želivky, těsně před jejím soutokem se Sázavou. Maximální provozní hladina dosahuje výšky 377 metrů nad mořem. Celkový objem nádrže činí 309 milionů m³ a její vodní plocha zaujímá 1397 hektarů. Vzduť sahá až 39,1 kilometru proti proudu Želivky od hráze, přičemž obvod nádrže při této hladině dosahuje 112 kilometrů. Jedná se o nádrž s víceletým režimem řízení odtoku.

Pro modelování proudění a kvality vody v celé nádrži od hráze až po konec vzduť slouží 3D simulační model vytvořený v systému MIKE 3 FM (DHI Software). Tento model umožňuje sledovat hydrodynamiku, hydrologické a hydraulické jevy, stejně jako některé chemické a biologické procesy probíhající v nádrži.

Vymezení zájmové oblasti modelu

Do 3D modelu byla zahrnuta oblast od lokality Bělský Mlýn na přítoku Želivky až po konce vzduť hlavních přítoků, kterými jsou Martinický potok a Blažejovický potok. Sedlická zátoka je součástí modelu až po hráz vodní nádrže Němčice. Celý model pokrývá oblast vodní nádrže ve všech hloubkových úrovních, včetně přilehlých břehů až do nadmořské výšky 383 metrů.

Podklady topologické

Základním topologickým podkladem pro vytvoření modelu dna nádrže je bodové pole dna, získané pomocí echolotu z měřicí lodi Povodí Vltavy, s.p. Pro modelování břehových partií nad hladinou byla využita data z digitálního modelu reliéfu DMR 5G poskytovaného ČÚZK. Model dále vychází z různých doplňkových podkladů, zejména z dokumentace a ručního doměření objektů v nádrži (realizovaného ÚVGZ AV ČR, v. v. i.), manipulačních řádů (Povodí Vltavy, a. s.) a ortofotomapy.

Hydrologická a klimatická data

Hydrologická a klimatická data představují klíčové vstupní parametry pro tvorbu hydrodynamického modelu. Pro sestavení 3D numerického modelu vodní nádrže Švihov byly využity časové řady měření z limnigrafických stanic.

Kvalita vody – datové vstupy

Na vodní nádrži Švihov, v jejích přednádržích i na přítocích probíhá rozsáhlý a dlouhodobý monitoring kvality vody, který zajišťuje Povodí Vltavy, s. p. Veškeré údaje získané z tohoto monitoringu byly poskytnuty zpracovatelskému týmu na základě uzavřené dohody o spolupráci.

3.2 Zpracování dostupných dat

Data z dlouhodobého monitoringu kvality vody byla dodána v časových řadách od r. 1999 až do r. 2023. Tato data jsou pořizována zpravidla jednou měsíčně, a to v zonačních profilech a na přítocích do nádrže. V průběhu sledování je měřeno přes 290 ukazatelů, z nichž některé nejsou měřeny v souvislých řadách. V rámci neustálého zkvalitňování monitoringu jsou průběžně zařazovány nové látky a časové řady měření jsou tak kratší, některé parametry nejsou měřeny pravidelně atp. V zimních měsících (listopad až březen) nejsou měřeny hodnoty v zonačních profilech, vyjma profilu u hráze. Data tak nejsou zcela konzistentní pro celý časový úsek. Bylo třeba vyvinout metodu pro doplnění chybějících dat na přítocích pro vytvoření kontinuálních okrajových podmínek pro epizodní simulace.

Měrné kampaně, rekognoskace

V rámci pořízení dat pro kalibraci modelu proběhly 3 měrné kampaně ve spolupráci s Povodím Vltavy, s.p. na profilech v Sedlické zátoce, v horní části nádrže, pod Bělským Mlýnem a v oblasti Vojslavic.

3.3 Použitý diskrétní 3D model MIKE3 FM

Detailní popis stavby modelu a jeho kalibrace a verifikace je uveden ve zprávě úkolu TransAdapt 1.6. V této kapitole jsou proto velmi stručně popsány základní části modelu a jednotlivé úkony.

3.3.1 Hydrodynamický model

K posouzení charakteristik proudění v nádrži Švihov a následně šíření znečišťujících látek, byl sestaven 3D matematický model v software MIKE3 FM, který umožňuje modelovat stratifikaci teplot v nádrži včetně teplotní výměny mezi vodou v nádrži a proudícím vzduchem nad hladinou 0. Teplotní stratifikace včetně charakteristik proudění v jednotlivých vrstvách „po hloubce“ je významně ovlivňována větrem nad nádrží. Matematický model simuluje vliv účinku větru – do výpočtu vstupuje směr a rychlost větru a tlak vzduchu (jako proměnná veličina v čase i v prostoru nad nádrží). Model MIKE 3 FM zohledňuje i vlhkost vzduchu a intenzitu slunečního záření, resp. i poměrné „zastínění“ vodní hladiny.

Matematický model MIKE 3 FM je založen na řešení Navier-Stokesových pohybových rovnic numerickou metodou konečných objemů. Zásadní význam při použití vícerozměrných matematických modelů hraje použitý „turbulentní model“, který popisuje vnitřní turbulenci proudění a přenos hybností mezi jednotlivými vrstvami (elementy) 3rozměrné výpočetní sítě. Použitý turbulentní model pro 3D numerický model proudění v nádrži Želivka je výsledkem kalibrace modelu.

Z výše uvedeného je zřejmé, že matematický model MIKE3 FM je mocný simulační prostředek pro výpočet charakteristik typicky třírozměrného proudění, jakým je proudění a transport znečišťujících látek v nádrži Švihov. Použití však klade značné nároky na dostupná data, bez nichž není možné dosáhnout odpovídajících a správných výsledků.

3.3.2 Kalibrace 3D modelu

Kalibrace modelu byla zaměřena na nastavení klíčových parametrů ovlivňujících výpočet hydrodynamických charakteristik proudění. Mezi hlavní kalibrované parametry patřily zejména:

- Turbulentní viskozita – ve vodorovném i svislém směru, určující intenzitu turbulentního mísení v nádrži,
- Hydraulická drsnost dna a břehů – s důrazem na mělké zóny nádrže, často zarostlé vodní vegetací,
- Účinek větru – tj. třecí síla větru působící na vodní hladinu, ovlivňující cirkulaci vody,
- Disperze – ve vodorovném i svislém směru, významná pro transport látek v nádrži,
- Teplotní výměna – mezi vodním tělesem a proudícím vzduchem nad hladinou, která ovlivňuje teplotní stratifikaci a dynamiku proudění.

Pro kalibraci HD modelu byly převážně využity výsledky provedených terénních měření na VN Švihov.

Pro kalibraci teplotní stratifikace byly využity vybrané časové epizody z dostupných monitorovacích dat. Při jejich výběru byly rozhodujícími kritérii frekvence měření v zonačních profilech a na přítocích, stejně jako hodnoty sledovaných teplotních a chemických ukazatelů. Dále byl výběr epizod proveden s ohledem na velikost průtoků a roční období, aby bylo možné zahrnout různorodé hydrologické a klimatické podmínky, které se v nádrži v průběhu roku vyskytují. Tento přístup umožnil zohlednit sezónní změny a variabilitu procesů ovlivňujících vertikální teplotní rozvrstvení vody v nádrži.

3.3.3 Závěr a doporučení pro užití 3D modelu nádrže Švihov z TA 1.6

V rámci úkolu TA 1.6 byly ověřeny konceptualizace a vzájemná provázanost modelových nástrojů na platformě DHI MIKE, a to s využitím společných datových formátů pro předávání okrajových podmínek mezi jednotlivými moduly. Modely byly kalibrovány na základě dostupných monitorovacích dat poskytovaných organizacemi Povodí Vltavy (PVL), ČHMÚ, VÚMOP a CZGL. Kalibrace probíhala jak pro vybraná dílčí povodí Želivky s různým prostorovým rozlišením, tak přímo pro vodní nádrž Švihov.

Shrnutí použitých nástrojů a modelových přístupů:

- Proudění vody v ploše povodí (včetně povrchové a podpovrchové domény, toků a menších nádrží): MIKE SHE WM – schematizace a komplexní popis vodního režimu
- Bilanční popis pohybu látek v ploše povodí: MIKE BASIN – schematizace a popis pohybu látek
- Proudění vody ve vodní nádrži Švihov: MIKE 3FM – 3D hydrodynamická schematizace

V závěru dílčí zprávy 1.6 byly definovány návrhy aktivit pro navazující etapy projektu TA. Jedná se o rozvoj a další využití sestaveného 3D modelu pro VN Švihov, kde hlavním definovaným úkolem byla kalibrace WQ modulu na vybrané epizody šíření látek znečištění.

3.4 WQ simulace pomocí modelu MIKE3 FM

Šíření znečišťujících látek ve vodárenské nádrži Švihov bylo schematizováno dvěma přístupy:

- transportním modulem MIKE 3 FM za zjednodušujícího předpokladu konzervativního šíření znečišťujících látek, tj. během doby simulace nedochází k rozpadu či přeměně těchto látek. Modul pracuje na principu „advection – dispersion“, AD
- kombinací transportního modulu s nastavbovým modulem ECOLab – použit pro simulaci transportu a šíření znečišťujících látek nekonzervativního charakteru tedy včetně vybraných chemických či biologických procesů

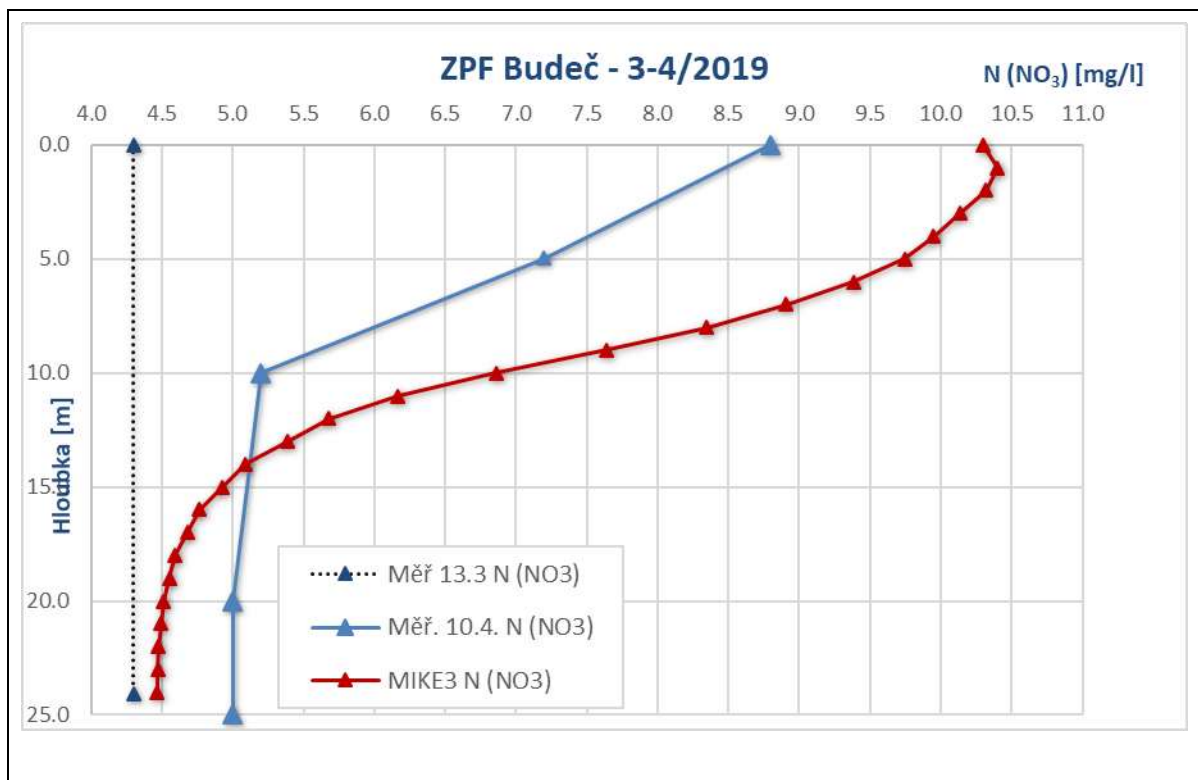
3.4.1 Kalibrace WQ modulu

Základem pro adekvátní popis vývoje chemických a biochemických procesů v nádrži je odpovídající teplotní profil – stratifikace teploty vody v nádrži. Detaily kalibrace teplotních profilů byla popsána v předcházející etapě TA 1.6. Na tomto místě je vhodné zopakovat jednotlivé kalibrační scénáře jak pro teplotní stratifikaci, tak pro WQ modul.

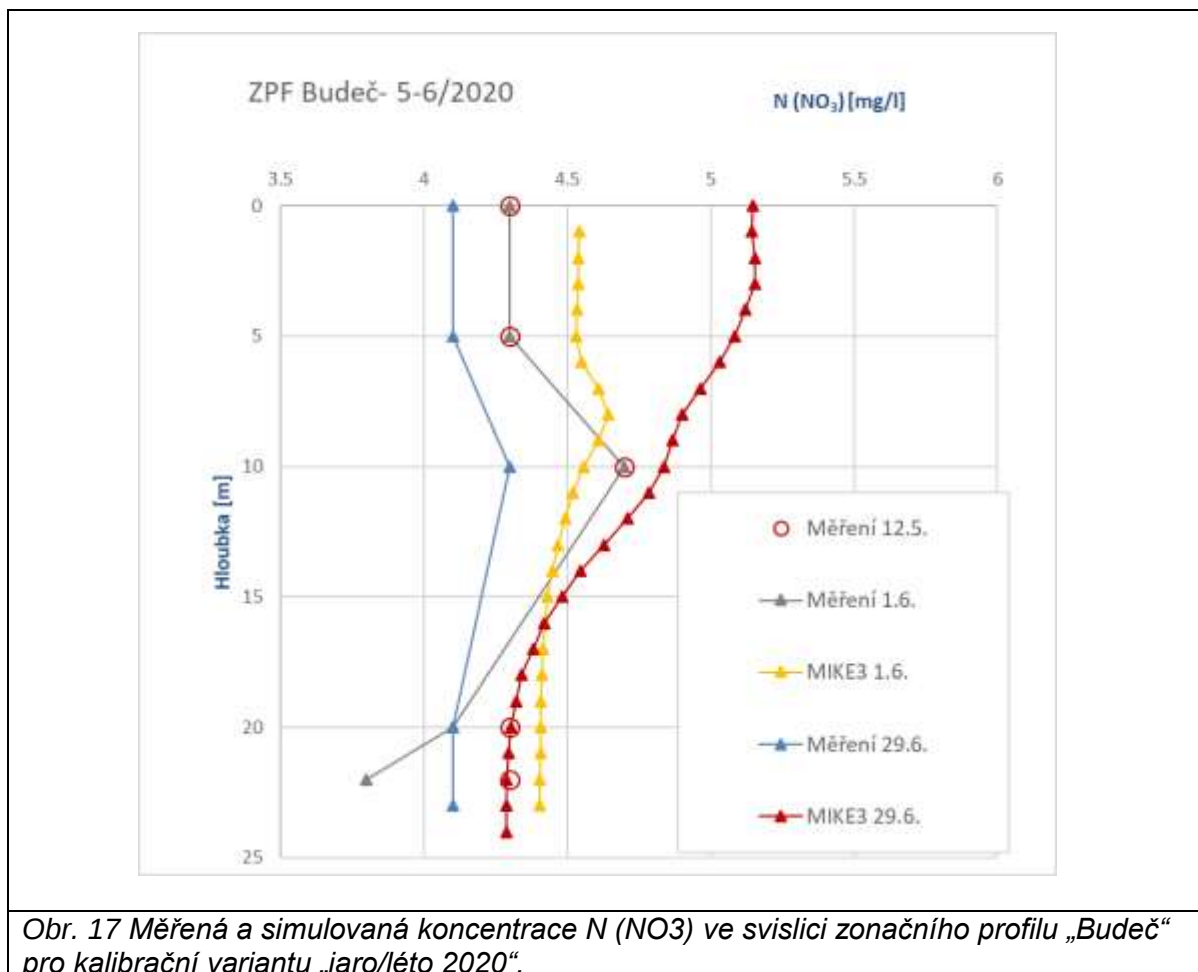
Tab. 3 Kalibrační epizody pro WQ modul

Období/rok	Kalibrační epizoda Datum měření v zon. profilech		Sledovaný ukazatel
		Počet dnů	
Zima/Jaro 2019	13.3. – 10.4.	28	N (NO ₃)
Jaro 2016	25.4. – 23.5.	28	TP
Jaro/Léto 2020	12.5. – 1.6. – 29.6.	20 + 28	N (NO ₃)
Léto 2018	16.7. – 13.8.	28	TP

Ukázky **kalibrace transportního modulu AD** pro vybrané zónační profily a vybraná období jsou na následujících obrázcích.



Obr. 16 Měřená a simulovaná koncentrace N (NO₃) ve svislici zonačního profilu „Budeč“ pro kalibrační variantu „zima/jaro 2019“.

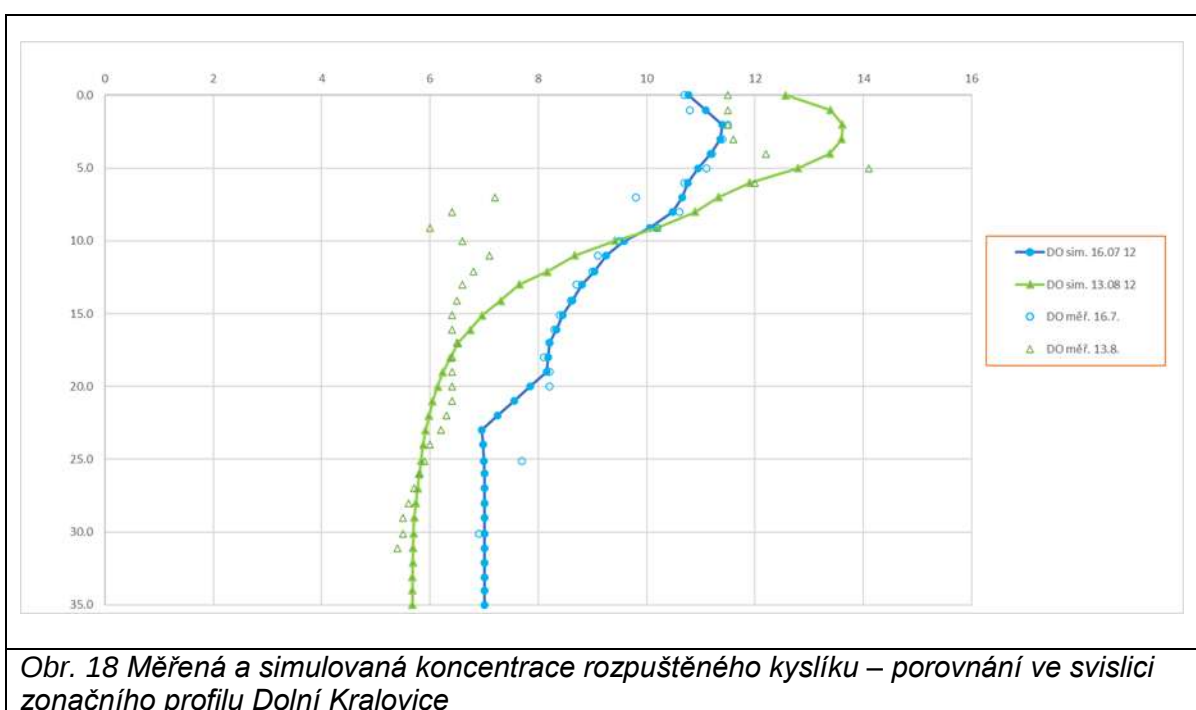


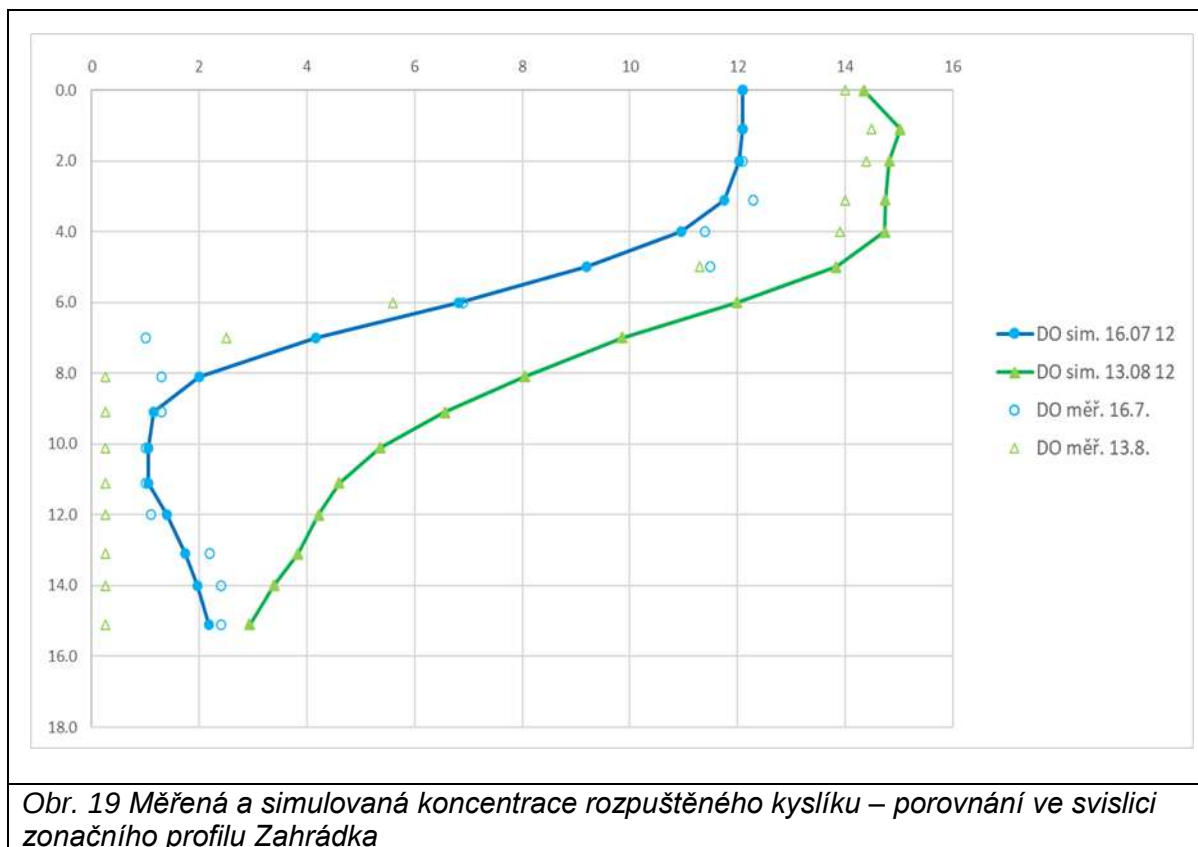
Obr. 17 Měřená a simulovaná koncentrace N (NO₃) ve svislici zonačního profilu „Budeč“ pro kalibrační variantu „jaro/léto 2020“.

Kalibrace modelu ECOLab

Kvalita výsledků modulu ECOLab je podmíněna úspěšnou kalibrací HD modulu, především dosažením teplotní stratifikace, která co nejvíce odpovídá skutečnosti – množství rozpuštěného kyslíku do značné míry závisí na teplotě vody. Výsledky ověřovací simulace (v rozsahu celé nádrže Švihov) pro parametr rozpuštěný kyslík jsou uvedeny na obrázcích níže, viz obr. 18.

Obecně je třeba uvést, že kalibrace a správné nastavení všech parametrů modulu ECOLab jsou velmi náročné a citlivé na správnost vstupních dat, která jsou většinou pořizovaná jen v měsíčním cyklu pravidelného monitoringu a jejich změny během celého měsíce nejsou známy. I když se podaří ECOLab úspěšně zkalibrovat na určitou vybranou epizodu, je použití takto zkalibrovaného modelu na jinou epizodu (jarní, zimní) nesnadné až problematické a dosažené výsledky se mohou od reality odlišovat.





3.4.2 Výsledky simulací WQ modulu

Na zkalibrovaném a verifikovaném 3D modelu proudění a transportu látek byly simulovány vybrané scénáře potenciálních ekologických havárií a významného šíření polutantů ve vodní nádrži. Základní parametry těchto scénářů jsou uvedeny v Tab. 4.

Výpočty probíhaly v základní 3D modelové síti o 118 623 horizontálních elementech a přibližně 33 vertikálních vrstvách, což představuje přibližně 1,3 milionu prostorových výpočetních buněk. Simulace byly prováděny spřaženým hydrodynamickým a transportním modulem, přičemž výstupy zahrnují detailní charakteristiky proudění a teplotní stratifikace v celé nádrži, a dále šíření polutantu z místa jeho uvolnění.

Počáteční a okrajové podmínky (teplotní profil, přítoky, klimatická data) byly převzaty z měsíčních kalibračních období, zahrnujících konec zimy, jaro a typické letní podmínky. Pro každý scénář byly voleny situace, kdy je šíření polutantu směrem k odběrnému objektu nejpravděpodobnější a nejrychlejší.

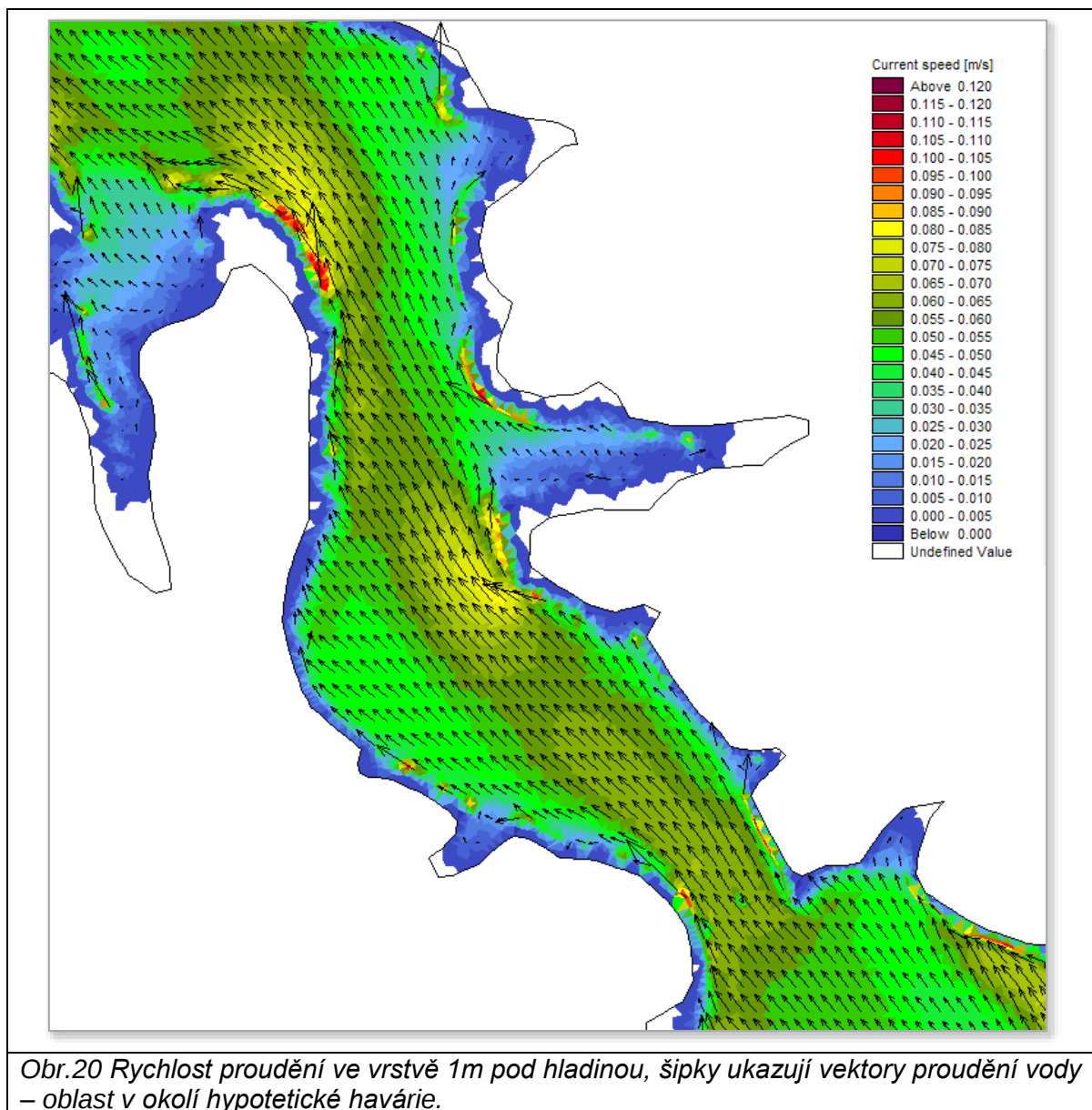
Tab. 4 Výpočetní scénáře pro HD a WQ simulace

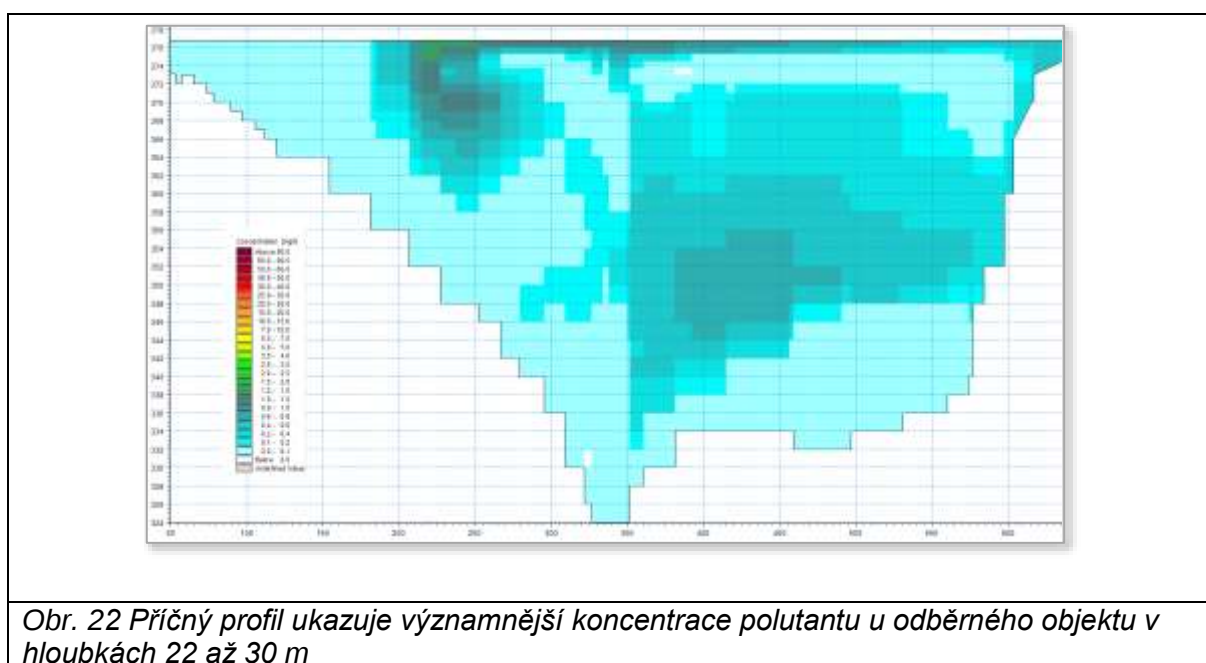
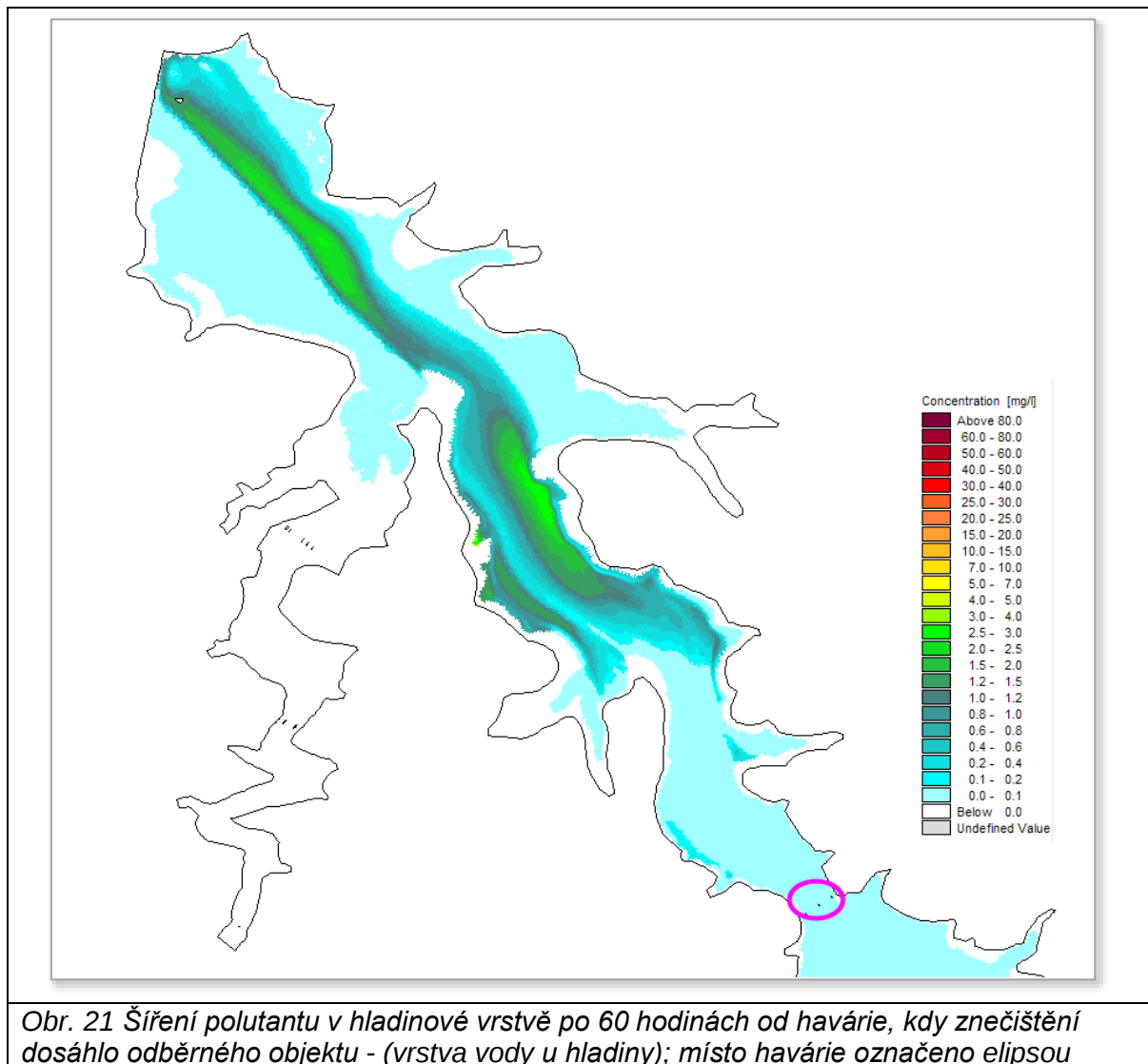
HD scénáře - návrh					WQ nadstavba – potenciální znečištění		
Q přítoky do nádrže	H hladina	Vítr směr rychlost	Teplotní stratifikace v nádrži	Odběr ze sdruženého objektu	Lokalita kde dojde k potencionál. vnosu	Charakter znečištění (konzervativní)	Typ znečištění (způsob vnosu)
nízké	plná nádrž	Z	$T_{znoč} < T_{vody}$	běžný (IV. odběr?)	určí PVI (most)	konz. látka klesající transport	bodový
nízké	plná nádrž	V	$T_{znoč} > T_{vody}$	běžný (I. odběr?)	určí PVI (most)	konz. látka, hladinový transport <i>např. ropné látky</i>	bodový
vysoké	plná nádrž	-	letní	běžný	vybrané přítoky	konz. látka <i>např. produkty z požárů*</i>	plošný ze břehu
vysoké/běžné – na přítoku <i>Korelace Q a koncentracie, určí PVI</i>	zakleslá/běžná	-	letní $T_{znoč} = T_{vody}$ <i>v homí vrstvě</i>	běžný/změna	Sedlice Bělský Mlýn	konz. látka <i>ze zemědělství -původně plošný</i>	bodový na přítoku
vysoké/běžné – na přítoku	zakleslá/běžná	-	letní $T_{znoč} = T_{vody}$ <i>v homí vrstvě</i>	běžný/změna	Sedlice Bělský Mlýn	konz. látka <i>havárie z bodového zdroje</i>	bodový na přítoku

Ukázka výstupů pro jeden vybraný scénář

Charakteristika: Ekologická havárie na mostu silnice II/150 u Bernartic – bodové znečištění na hladině

Tento scénář představuje modelovou ekologickou havárii, při níž do nádrže uniká 36 m³ polutantu z cisterny na mostě (průtokem 10 l/s) a šíří se po hladině nádrže. Simulace byla provedena pro zimní období s nízkými přítoky, při výšce hladiny 376,80 m n. m. a za převládajícího jihovýchodního větru. Směr a rychlost proudění v úseku od mostu silnice II/150 u Bernartic směrem k hrázi, v hloubce 1 m pod hladinou, při konstantním větru 140°, ilustrují následující obr. 20, 21 a 22.





3.5 Shrnutí k WQ modulu

V této etapě projektu se podařilo úspěšně splnit všechny stanovené cíle, které byly průběžně upřesňovány na výrobních výborech. Konkrétně se jedná o dva hlavní cíle:

- Byla provedena **simulace potenciálního šíření vybraných znečišťujících látek** z povodí Blažejovického a Sedlického potoka. Byl ověřen vliv různých hloubek odběru, průtokových a povětrnostních podmínek a odlišné počáteční teplotní stratifikace v nádrži na vertikální rozložení koncentrace znečišťující látky u vodárenského odběru.
- **Byla ověřena konceptualizace a propojení nástrojů na platformě DHI MIKE**, a to s využitím společných formátů souborů pro předávání okrajových podmínek. Jednotlivé popisy proudění a procesy šíření látek se kalibrovali na aktuálně dostupných monitorovacích datech z PVL, CZGL a VUMOP pro různá prostorová rozlišení ve vybraných podpovodích Želivky a zároveň v samotné nádrži Švihov.

Náměty pro další rozvoj

Pro další rozvoj a využití sestaveného 3D modelu proudění a šíření znečišťujících látek ve VN Švihov se doporučuje **podrobně analyzovat směry a rychlosti proudění větru** nad nádrží s využitím dalších výsledků měření. Cílem je maximálně zpřesnit jejich hodnoty (prostorově i časově) pro kalibrační epizody. S těmito výsledky pak podrobit detailnějšímu rozboru vliv účinku větru na pohyb vody v hladinových vrstvách nádrže, aby bylo možné dosáhnout lepší shody simulovaných rychlostí s hodnotami získanými při polních měřeních.

4 Závěry

Spoluprací expertů vznikla jedna z důležitých částí integrovaného simulačního nástroje pro analýzu dopadu adaptačních opatření a dopadů klimatické změny na vodní bilanci, a to v povodí Želivky, která je se svojí vodárenskou nádrží primární strategický vodní zdroj v ČR.

Mezi hlavní výstupy této etapy patří:

- **Bilanční model kvality vody:** Byl dokončen a zprovozněn jednodušší kvazistacionární model kvality vody, který je napojen na plně distribuovaný hydrologický model MIKE SHE pro celé povodí až po profil hráze VN Švihov.
- **3D hydrodynamický model nádrže:** Byl plně zprovozněn, zkalibrován a verifikován 3D hydrodynamický a kvalitativní model nádrže Švihov, který poskytuje uspokojivé výsledky pro simulace šíření znečištění.
- **Základy digitálního dvojčete:** Byly vytvořeny základní prvky, které v budoucnu umožní simulovat i dynamické a epizodní jevy, jako jsou např. dopady extrémních srážek.

Aplikace modelů přinesla klíčová zjištění. Potvrdilo se, že kvalita vody v povodí je v současnosti stabilizovaná, což je v souladu s dřívějšími studiemi (Kvítek, 2018). Model však také identifikoval významné lokální zatížení odpadními vodami z malých obcí (do 500 obyvatel), kde přetrvávají nedostatečné systémy čištění (žumpy, septiky). Bylo zjištěno, že stávající systém monitoringu s měsíční frekvencí odběrů není schopen spolehlivě zachytit krátkodobé epizodní jevy, jako jsou erozní splachy či odtoky z jednotných kanalizací, které tak mohou být v celkové bilanci podceněny.

Vytvořený komplexní systém modelů představuje sofistikovaný nástroj pro ověřování různých scénářů vývoje vodní bilance a kvality vody. Umožňuje řešitelskému týmu pokračovat dle harmonogramu v rámci projektu TransAdapt a rozšířit kvantitativní modely o simulaci pohybu a osudu vybraných látek v celém povodí.

Realizace této odborně i technicky náročné úlohy by nebyla možná bez nadstandardního přístupu, odborné erudice a aktivního zapojení všech spolupracovníků. Jejich koordinovaná práce umožnila překonat komplikované procesní a datové vazby a úspěšně dokončit dílo.

Zásadní poděkování patří správci povodí, společnosti Povodí Vltavy, státní podnik, a dalším spolupracujícím organizacím. Jejich aktivní účast a poskytnutí kvalitně verifikovaných datových souborů byly klíčové pro úspěšné sestavení, kalibraci a ověření celého simulačního systému a představují základní předpoklad pro vysokou úroveň modelové reprezentace reálných procesů.

V Brně dne 13.6.2025

doc. Ing. Evžen Zeman, CSc. a kolektiv

5 Seznam použitých zkratek

AD – Advection - dispersion

ČHMÚ - Český hydrometeorologický ústav

DPZ - dálkový průzkum země

DisALEXI - disaggregated Atmosphere-Land Exchange

DIBAVOD - Digitální BÁze VOdohospodářských Dat

DMR5G - Digitální model reliéfu České republiky 5. generace v S-JTSK, Bpv

ET_o - potenciální evapotranspirace

ET_{ref} - referenční evapotranspirace

HPV - hladina podzemní vody

K_c - vegetační koeficient

KPP - komplexní průzkum půd

KZ – klimatické změna

LAI - leaf area index - index listové plochy

MODIS - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

RD - root depth - kořenová hloubka

TA – TransAdapt

VH - vodní hospodářství

WQ – water quality – kvalita vody

6 Použitá literatura

Aktualizace plánů dílčího povodí dolní Vltavy (2020) – Stav útvarů povrchových vod v povodí Želivky a program opatření v povodí VN Švihov, Plány povodí Vltavy, Povodí Vltavy, s.p.,

Fiala, D., Rosendorf, P., David, V., Dvořáková, T., Krása, J. (2011): Modelový výpočet hydrologické odezvy pro potřeby zpřesnění odhadu odnosu fosforu ze zemědělského mikropovodí, borník "Hydrologie malého povodí 2011", Ústav pro hydrodynamiku AV ČR: https://www.ih.cas.cz/wp-content/uploads/2023/02/HMP_2011.pdf (str. 85-92)

Fischer, M., Zeman, E., Vizina, A., Hanel, M., Bernsteinová, J. et al (2023 a) Metodika pro stanovení hlavních poruch vodohospodářské bilance a optimalizace adaptačních opatření v podmínkách změny klimatu, Certifikovaná metodika, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. 2023, ISBN 978-80-87902-37-0

Fischer, M., Zeman, E., Bernsteinová, J., Vizina, A., Hanel, M., et al (2023 b) Metodika pro rychlé, komplexní, nezávislé rozhodování o potřebnosti, efektivitě a interakci adaptačních opatření v povodích v podmínkách změny klimatu, Certifikovaná metodika, Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i. 2023, ISBN 978-80-87902-38-7

Hanák R., Ryšavý S. (2015): Jakostní model povodí VD Vranov. In: KOSOUR, Dušan et al., ed. Vodní nádrže 2015: 6.–7. října 2015, Brno, Česká republika. Brno: Povodí Moravy, s.p., 2015. ISBN 978-80-260-8726-7.

Hejzlar J. (2009) Metodika bilanční analýzy zdrojů živin v povodí. BC AV ČR

Kráska, J. a kol (2013) Hodnocení ohroženosti vodních nádrží sedimentem a eutrofizací podmíněnou erozí zemědělské půdy certifikovaná metodika pro praxi Metodika je připravena ve spolupráci institucí v rámci projektu QI102A265. Vydalo ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2013 ISBN: 978-80-01-05428-4

Kvítek T., Bystřický V., Peterková J., Žlábek P. a Moravcová J. (2012): Dynamika koncentrací a interakce odnosu dusičnanů a fosforu na malých zemědělsko lesních subpovodích v povodí VN Švihov na Želivce, Vodní hospodářství 6/2012

Kvítek T. a kol. (2018): Retence a jakost vody v povodí vodárenské nádrže Švihov na Želivce, Povodí Vltavy, s.p., Praha, 2018, ISBN:978-80-270-5244-8

Mendiguren, G., Koch, J., and Stisen, S.: Spatial pattern evaluation of a calibrated national hydrological model – a remote-sensing-based diagnostic approach, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 5987–6005, <https://doi.org/10.5194/hess-21-5987-2017>, 2017.

Metodika hospodaření v OPVZ VN Švihov s ohledem na prioritu ochrany a zlepšení kvality vod (2020), Příloha č. 7 Pravidel MZe č.j. 2953/202-MZE-15150, Praha , 2020, MZe ČR

MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. DHI Software Documentation, 2021

MIKE 3 Flow Model FM, ECO Lab / Oil Spill Module, User Guide. DHI Software Documentation, 2021

Zabezpečení jakosti vody v nádrži FLÁJE – studie proudění v nádrži Fláje se zaměřením na možnosti odklonění proudění z přítoku s vysokým obsahem huminových látek od odběrného objektu. DHI a.s., Praha, prosinec 2008

Zeman, E. Jiřinec, P, Ingeduldova, E. a kol (2024); „Předpovědní model nádrže Švihov pro operativní řízení vodárenské nádrže v důsledku významného znečištění vod“; pp 9-17, Městské vody 2024, Velké Bílovice, Ardec 602 00 Brno, Česká republika, 2024, ISBN: 978-80-86020-00-6