

Nature Connect Dyje/Thaya – Modelování teplot a analýza habitatů s přihlédnutím ke změně klimatu

INTERREG AT-CZ (ATCZ000167)

Interreg
Österreich – Tschechien

Kofinanziert von der
Europäischen Union

Autoři
Fabian Friedl
E-mail
fabian.friedl@afry.com

Paul Arminger
Lena Ferstl
Sarah Höfler
Roland Janisch
Philipp Knopf
David Monetti

Datum
08/07/2026

Report ID
V1

Zadavatel
via donau - Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH

Nature Connect Dyje/Thaya – Modelování teplot a analýza habitatů s přihlédnutím ke změně klimatu

INTERREG AT-CZ (ATCZ000167)

AFRY Austria GmbH
Kranichberggasse 4
1120 Wien
Rakousko

blattfisch e.U.
Leopold-Spitzer-Straße 26
4600 Wels
Rakousko

Skyability GmbH
GZO-Dienstleistungszentrum 5
7011 Siegendorf
Rakousko

Obsah

1 Úvod 6
1.1 Důvody a cíle 6
1.2 Uspořádání projektu 7
1.3 Postup 7

2 Měření teploty 9
2.1 Výchozí situace 9
2.2 Dataloggery 9
2.3 Termografie (drony) 26
2.4 Srovnání použitých metod 30
2.5 Shrnutí a závěr 34

3 Batymetrie 35
3.1 Výchozí situace 35
3.2 Provedení sběru dat pomocí zeleného laseru 35
3.3 Srovnávací měření a závěr 36

4 Hydrodynamické a termodynamické modelování 38
4.1 Metodika 38
4.2 Datová základna 38
4.3 Hydrodynamický model 42
4.4 Termodynamický model 44
4.5 Shrnutí a závěr 63

5 Analýza habitatů 65
5.1 Metodika 65
5.2 Dostupnost habitatů 67
5.3 Shrnutí a závěr 76

6 Zkoumání vlivu změny klimatu na teplotu vody 77
6.1 Podklady 77
6.2 Klimatické scénáře 78
6.3 Dopady na teplotu vody 80
6.4 Změny v dostupnosti habitatů 80

7 Závěry a výhled 84
7.1 Měření a modelování teploty 84
7.2 Dostupnost habitatů 84
7.3 Doporučená opatření 85

Literatura 88

A-1. A-1. Příloha – Křivky preferencí 91

A-2. Příloha – Výsledek modelování habitatů 93

Abstrakt

Hlavním cílem tohoto projektu je zlepšit naše chápání termodynamických procesů v Dyji a tím umožnit efektivnější řešení vodohospodářských úkolů, získat poznatky o dopadu změny klimatu na vodní flóru a faunu a vyvodit z toho možná opatření pro ochranu biodiverzity.

V prvním kroku byly zhodnoceny metody měření pro zjišťování a modelování teploty vody. Pomocí dat z dataloggerů umístěných v toku byl prokázán významný vliv VD Nové Mlýny na teplotu vody v Dyji, a to ohříváním a zmenšováním denní teplotní amplitudy. Dále byly získány důležité poznatky o termodynamice obou zkoumaných úseků. Ani ve zvláště hlubokých místech, jako například ve zkoumané velké tůni, nedochází k výraznější teplotní stratifikaci. Tyto lokality tak nemohou v horkých obdobích sloužit jako útočiště s vhodnější teplotou vody.

Kromě toho byl na hraničním úseku Dyje poprvé v Rakousku proveden plošný termografický výzkum teploty vody. Ukázalo se však, že aplikace této metody na vodní tok přináší značné problémy a zjištěné teploty nereprezentují průměrné teploty vody v Dyji. Tento postup proto není pro daný výzkumný úkol vhodný.

K zaměření koryta řeky byla úspěšně použita letecká laserová batymetrie („zelený laser"), následně byla porovnána s pozemním zaměřením provedeným firmou viadonau a byly identifikovány limity její aplikace. U projektů s ekologickým zadáním, kde je třeba posoudit citlivější habitaty, doporučujeme plošné měření místo zaměřování profilů. Nejistoty spojené s interpolací mezi profily způsobují vysokou nejistotu zejména u revitalizovaných toků. Oblasti, které nejsou dostatečně pokryty plošným měřením, by měly být předem posouzeny a zahrnuty do dalšího doplňkového zaměření.

Provedená klimatická studie ukazuje menší růst průměrné roční teploty vody než teploty vzduchu. V létě však teplota vody stoupá stejnou měrou jako teplota vzduchu. Vyhodnocení dat klimatického modelu a simulací teploty vody předpovídá zvýšení teploty vody v Dyji v létě o cca 1,2 °C až cca 2,3 °C do roku 2050.

Software použitý pro modelování teploty (BASEMENT V4.2) umožňuje velmi přesné znázornění jak časového průběhu teplot, tak prostorových rozdílů. Přesnost je řádově srovnatelná s přesností měření. To umožňuje modelovat dopady přítoku podzemní vody, vypouštění chladicí vody a procesy jejich mísení. Představuje tak cenný nástroj pro ekologické, ale i právní posuzování těchto otázek. Pro úspěšné použití teplotního modelu jsou však klíčová koordinovaná data a měřicí body pro konkrétní zadání a okrajové podmínky.

Nakonec byla na Dyji zjišťována prostorová a časová dostupnost termicky (teplota) a hydraulicky (hloubka a rychlost proudění) vhodných stanovišť v horkém letním dni při minimálním zůstatkovém průtoku. Tato analýza habitatů byla provedena pro čtyři druhy ryb a čtyři průtoky a odhaluje významné rozdíly v dostupnosti hydraulicky vhodných stanovišť mezi regulovaným a heterogenním úsekem. Revitalizace středních až velkých vodních toků sice nemůže zastavit ani kompenzovat oteplování způsobené změnou klimatu, je však důležitým prvkem k zajištění nezbytných stanovišť pro různé druhy a jejich vývojová stádia. Patří sem například prohlubně a úkrytové struktury, které mohou výrazně snížit stres působící na vodní flóru a faunu během nízkých průtoků v letních měsících. Vzhledem k silné závislosti teploty vody v hraničním úseku na stavu nádrže výše po toku jsou zcela nezbytná systémová opatření zaměřená na zmírnění těchto vlivů. Kromě zvýšení míry zastínění v dosud nezastíněných úsecích by se měla pozornost zaměřit na omezení přísunu živin do nádrže a na vývoj či testování možných opatření ke zmírnění výrazného oteplování nádrže a/nebo vypouštění silně ohřáté vody.

1 Úvod

1.1 Důvody a cíle

Globální oteplování patří mezi nejpronikavější změny životního prostředí za tisíce let. Od konce 19. století se v důsledku lidské činnosti zvýšila průměrná globální teplota vzduchu o 1,1 °C ve srovnání s předindustriální úrovní (1850–1900). Toto oteplování v posledních desetiletích značně zesílilo: rychlost nárůstu teploty mezi lety 1970 a 2020 překročila tempo v jakémkoli jiném 50letém období za poslední 2000 let. Bez podstatného snížení emisí překročí nárůst průměrné globální teploty v nadcházejících letech, nejpozději však do roku 2040, hranici 1,5 °C. S každým dalším nárůstem globální teploty značně zesilují extrémní povětrnostní jevy jako vlny veder, silné srážky a epizody sucha, což má dalekosáhlé důsledky pro přírodní a sociální systémy (IPCC, 2023).

Rakousko a Česká republika patří mezi evropské země nejvíce postižené změnou klimatu kvůli svým regionálním termodynamickým podmínkám. V roce 2024 byla průměrná roční teplota vzduchu v těchto zemích o 3,1 °C vyšší než předindustriální úroveň (1850–1900), přičemž dosavadní oteplování lze na území celé země považovat za téměř shodné. Počet horkých dnů v Rakousku se ve srovnání s obdobím 1961–1990 ztrojnásobil. Průměrné teploty v Rakousku ve všech ročních obdobích se budou s rostoucím globálním oteplováním výrazně zvyšovat (Huppmann et al., 2025).

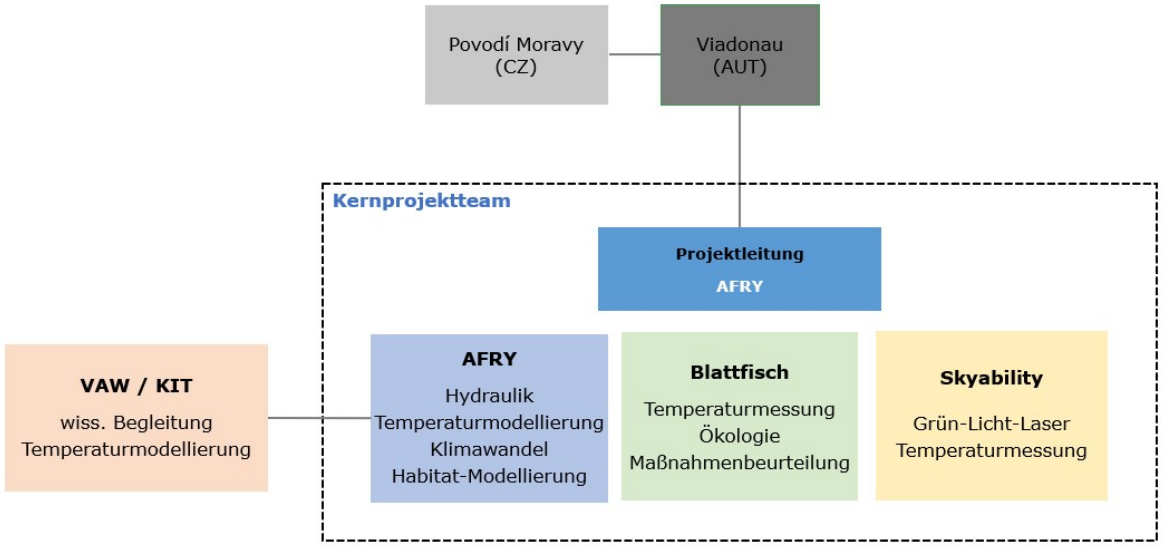
Spolu se zvyšováním teploty vzduchu lze očekávat i nárůst teploty vody v nádržích a tocích. Předchozí projekty (Ferstl, 2024; Blattfisch a AFRY, 2022) identifikovaly neustále stoupající teplotu vody v Dyji, hraniční řece mezi Rakouskem a Českem, jako rozhodující stresový faktor pro vodní flóru a faunu. Dopady klimatické změny v potamálních vodách východního Rakouska jsou již dnes jasně patrné. Na Dyji jsou umocněny a zesilovány lidskou činností, jako je minimální zůstatkový průtok (především z VD Nové Mlýny) a rozsáhlé oddělení dřívější říční nivy. Vzhledem k tomu, že na rozsáhlém území v bezprostřední blízkosti Dyje se dosud nacházejí zbytky původních stanovišť v podobě izolovaných slepých ramen a lužních lesů, je potenciál revitalizace obzvlášť vysoký.

Hlavním cílem projektu je optimalizovat hospodaření s vodou prostřednictvím lepšího pochopení termodynamických procesů v Dyji a tím zmírnit dopady změny klimatu na vodní flóru a faunu pro zachování biodiverzity. V rámci projektu budou hlouběji analyzovány zejména následující body:

(a) Které metody měření nebo výpočtu teploty jsou v praxi vhodné k poskytnutí potřebných datových podkladů pro zodpovězení následujících otázek?
(b) Jaká je aktuální prostorová a časová dostupnost termicky (teplota) a hydraulicky (hloubka a rychlost proudění) vhodných habitatů v horkých letních dnech při minimálním zůstatkovém průtoku v Dyji?
(c) Která (i) již provedená a (ii) budoucí revitalizační opatření jsou zvlášť vhodná pro zvýšení teplotní resilience řeky Dyje?
(d) Jak se mění prostorová a časová dostupnost termicky a hydraulicky vhodných stanovišť za působení různých vlivů (minimální zůstatkový průtok, změna klimatu nebo revitalizační opatření)?

1.2 Uspořádání projektu

Tento projekt realizovaly firmy Blattfisch, Skyability a AFRY. Vědeckou podporu při modelování teploty poskytly také ústavy VAW na ETH Curych a IWU na KIT v Karlsruhe.



Obr. 1-1: Uspořádání projektu

1.3 Postup

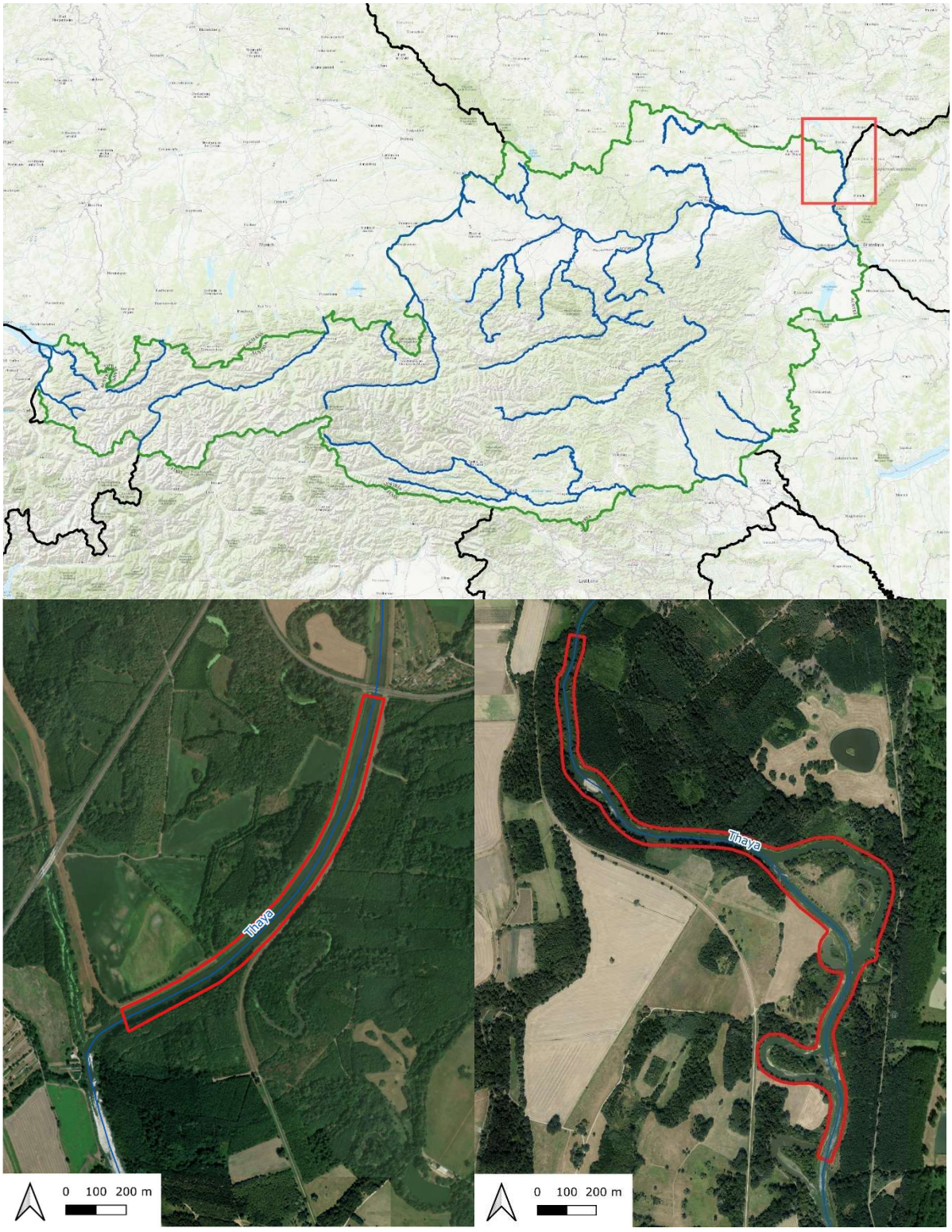
Tato studie detailně zkoumá rozložení a změny teplot v Dyji. Studie byla provedena za limitních hydroekologických podmínek, tj. v období minimálního zůstatkového průtoku, resp. za nízkého až středního stavu vody, a při vysokých letních teplotách.

V prvním kroku byla na několika místech po delší dobu měřena teplota vody lokálně pomocí teplotních loggerů a na hladině pomocí dronů ve třech časech (ráno, v poledne a večer) s vysokým prostorovým rozlišením. Nato byl na základě skenování zeleným laserem vytvořen podrobný výškový model. Byla posouzena vhodnost měření teploty pomocí dronů pro hydroekologická zkoumání.

Ve druhém kroku byl vytvořen dvourozměrný hydrodynamický model. Pomocí hydraulických parametrů a naměřených teplot, získaných v prvním kroku, byly identifikovány habitaty tepelně a hydraulicky vhodné pro letní měsíce. Dále byl posouzen přínos stávajících revitalizačních opatření k teplotní resilienci. Mimo jiné byl znovu přezkoumán koncept opatření z projektu „Thaya Wellendynamik" a je možné nově stanovit priority jejich s ohledem na teplotní režim Dyje.

Na základě hydrodynamického modelu vypracovaného ve druhém kroku byl v kroku č. 3 vytvořen termodynamický model Dyje. Model byl kalibrován na základě naměřených teplot. Pomocí modelu bylo možné posoudit prostorovou a časovou dostupnost termicky a hydraulicky vhodných habitatů za působení změny klimatu a změněných minimálních zůstatkových průtoků. Kromě toho bylo možné pomocí tohoto modelu hodnotit a optimalizovat budoucí opatření na Dyji s ohledem na teplotní resilienci.

Projekt byl realizován na dvou pilotních úsecích toku (regulovaný a heterogenní úsek) o délce 1 a 2 km. Mimoto byla provedena měření teploty na přítoku a odtoku z Nových Mlýnů za účelem posouzení vlivu vodního díla na teplotu řeky Dyje.



Obr. 1-2: Projektové území. Nahoře: Poloha v Rakousku, vlevo dole: regulovaný úsek, vpravo dole: heterogenní úsek

2 Měření teploty

2.1 Výchozí situace

Globální růst teploty vzduchu má dalekosáhlé dopady na všechny ekosystémy, zejména na vodní biotopy. Vodní toky na tyto změny reagují obzvlášť citlivě kvůli své těsné vazbě na klimatické a hydrologické procesy. Stoupající teplota vzduchu, měnící se rozložení srážek a častější extrémní jevy jako vlny veder nebo období nízkých průtoků vedou na mnoha místech k významnému zvýšení teploty vody (Arminger & Gumpinger, 2026; Johnson et al., 2024; Kędra, 2020; Krochta et al., 2025; Michel et al., 2021; Niedrist, 2023; Sun et al., 2024; van Vliet et al., 2011). Tyto změny ovlivňují fyzikálně-chemické, biologické a ekologické procesy ve vodách a přímo ovlivňují životní podmínky vodních organismů.

Teplota vody je klíčovým faktorem ovlivňujícím ekologické fungování vodních toků. S rostoucí teplotou se snižuje rozpustnost kyslíku ve vodě a současně se zvyšuje biologická spotřeba kyslíku vodními organismy (Caissie, 2006; Johnson et al., 2024). Zejména v letním období s nízkými průtoky to může vést ke kyslíkovému deficitu a kritickému znečištění. Vyšší teploty zároveň urychlují biochemické reakce, podporují mikrobiální aktivitu a mění koloběh uhlíku a živin (Brown et al., 2004; O'Gorman et al., 2012), což se může projevit například i zvýšeným výskytem řas, zejména sinic. Hydrologické změny vyplývající ze změny rozložení srážek a režimu tání sněhu vedou k delším obdobím nízkých průtoků a větším teplotním amplitudám, což dále zhoršuje životní podmínky mnoha druhů (Booker & Whitehead, 2022; Campbell et al., 2011; Krogh et al., 2022; Marx et al., 2018). Oteplování mimoto podporuje výskyt invazních a patogenních organismů, protože vyšší teploty vody umožňují mnoha patogenům a parazitům (např. *Ichthyophthirius multifiliis*, *Aeromonas hydrophila* nebo *Saprolegnia parasitica*) rychlejší proliferaci a na druhé straně se zhoršuje imunitní obrana mnoha druhů ryb (Bly & Clem, 1992; Prinz et al., 2009).

Na úrovni celých společenstev vedou tyto teplotní a metabolické posuny k hlubokým ekologickým změnám. Ryby jako studenokrevné organismy jsou ve svém způsobu života a rozšíření přímo závislé na teplotě vody. Každý druh má druhově specifické rozmezí teplotní tolerance, ve kterém je zajištěn jeho růst, rozmnožování (produkce spermií a vajíček) a přežití. Pokud je toto rozmezí překročeno, nastupuje fyziologický stres, zhoršená kondice a zvýšená úmrtnost (Caissie, 2006; Elliott & Elliott, 2010; Prinz et al., 2009; Verberk et al., 2016). Na tomto principu je založeno klasické dělení vodních toků na tzv. rybí pásma, která odrážejí charakteristická druhová společenstva a ekologické podmínky. V důsledku rostoucích teplot vodních toků a ztráty vhodných stanovišť pro studenovodní druhy, jako jsou lososovití, se rybí pásma posouvají k vyšším nadmořským výškám a zeměpisným šířkám. Výsledná homogenizace druhových společenstev vede k poklesu biodiverzity a k dominanci několika málo termicky tolerantních druhů (Buisson et al., 2008).

2.2 Dataloggery

2.2.1 Metodika

V obou úsecích byly v létě a na podzim roku 2025 na různých lokalitách po dobu několika týdnů umístěny teplotní sondy. Cílem bylo jednak doložit časovou a prostorovou variabilitu teploty vody v Dyji, jednak validovat teploty hladiny zjištěné termokamerou. Kromě toho byla ve stejném období provedena lokální měření teploty na vtoku a odtoku z VD Nové Mlýny, aby se posoudil vliv nádrží na teplotní režim úseku Dyje níže po proudu.

Za tímto účelem byly sondy instalovány v příčném profilu v různých polohách a až ve třech různých hloubkách: asi 10–20 cm nad dnem, v polovině hloubky vody a asi 10–20 cm pod hladinou. Mimoto

byly jednotlivé sondy umístěny v různých habitatech, např. v tůních, brodech, bočních ramenech a v místech s mrtvým dřevem.

Použité sondy jsou teplotní dataloggery ze sady na měření teploty Te.M.P. (Te.M.P.: blattfisch), vyvinuté firmou blattfisch e.U. ve spolupráci s Vyšší technickou školou Steyr (Höhere Technische Lehranstalt Steyr). Dataloggery mají velikost a tvar knoflíkové baterie a do toku se umisťují ve vejčité hliníkové kapsli se šroubovacím uzávěrem (Obr. 2-1). Lze je konfigurovat a odečítat pomocí speciálně vyvinutého softwaru v mobilní aplikaci nebo na PC.

Pro účely tohoto výzkumu byly dataloggery naprogramovány na hodinový záznam měřených hodnot s rozlišením měření 0,0625 °C a každému bylo přiděleno identifikační číslo pro jednoznačnou identifikaci.

Sondy byly rozmístěny 2. a 3. července 2025, a to ze člunu nebo ze břehu. Přesná poloha měřicích bodů a počet rozmístěných sond byly stanoveny na místě. Pro instalaci několika sond v různých hloubkách na jednom místě byly sondy připevněny k lanku (Ø 6 mm) vedenému svisle ve vodním sloupci. Na horní konec lanka byly jako plovák připevněny prázdné plastové kanystry nebo lahve, zatímco u dna sloužil velký kámen nebo olověná závaží jako zátěž bránící posunu způsobenému prouděním. Délka lanka byla zvolena tak, aby co nejvíc zátěž ležela na dně a lanko bylo napnuté, téměř kolmo k plovoucímu tělesu (Obr. 2-2).



Obr. 2-1: Teplotní datalogger ze sady na měření teploty Te.M.P. s vodotěsným pouzdrem.

Navíc byly jednotlivé hliníkové kapsle fixovány lankem ke stromům, pařezům nebo převislým větvím. Umístění a hloubka instalace byly zvoleny tak, aby se minimalizovalo riziko, že se sondy při nízké hladině ocitnou na suchu, nebo je utrhne případná povodeň.

Přesná poloha všech rozmístěných loggerů včetně hloubky byla zdokumentována v databázi GIS. Kromě toho byly na každém měřicím místě zjištěny a zaznamenány parametry relevantní pro výzkumné zadání, jako je hloubka vody, rychlost proudění a intenzita zastínění.

Dataloggery byly kontrolovány a odečítány v intervalu čtyř až šesti týdnů. Ztracené přístroje byly během této údržby byly nahrazeny novými sondami.

Zpracování a další analýza zjištěných dat byla provedena pomocí programu Microsoft Excel 365 a statistického softwaru R (verze 4.4.2, R Core Team, 2024) v programu Rstudio (verze 2024.12.1, Posit Software, PBC, Boston, USA).



Obr. 2-2: Vlevo nahoře: měřicí aparatura s lankem, závažím a plováky; vpravo nahoře: umisťování sond ze člunu; dole: měření teploty v profilu.

2.2.2 Výsledek

2.2.2.1 Umístěné sondy

Následující tabulka obsahuje časový průběh měření teploty. Zahrnuje všechny termíny umístění a vyzvednutí a také informace o počtu instalovaných a ztracených sond (Tabulka 2-1).

Tabulka 2-1: Termíny umístění a vyzvednutí a počty instalovaných a ztracených měřicích sond.

Datum	Činnost	Poznámky
2. a 3. července	umístění sond	35 sond na 18 lokalitách; 1 až 3 sondy na lokalitu
12. a 13. srpna	1. odečítání	2 nenalezené sondy (na 1 lokalitě) byly nahrazeny; navíc umístěno 12 sond na 5 lokalitách
9. a 10. září	2. odečítání	5 nenalezených sond (na 3 lokalitách) bylo nahrazeno
12. a 13. listopadu	3. odečítání a vyzvednutí sond	10 nenalezených sond (na 5 lokalitách)

Celkem bylo instalováno 47 teplotních měřicích sond na 23 různých lokalitách – z toho 35 sond v přírodě blízkém úseku, 8 sond v regulovaném úseku a po dvou sondách nad a pod VD Nové Mlýny.

Přehled měřicích míst a jejich přesná poloha v jednotlivých zkoumaných úsecích jsou uvedeny v Tabulka 2-2 a na Obr. 2-5.

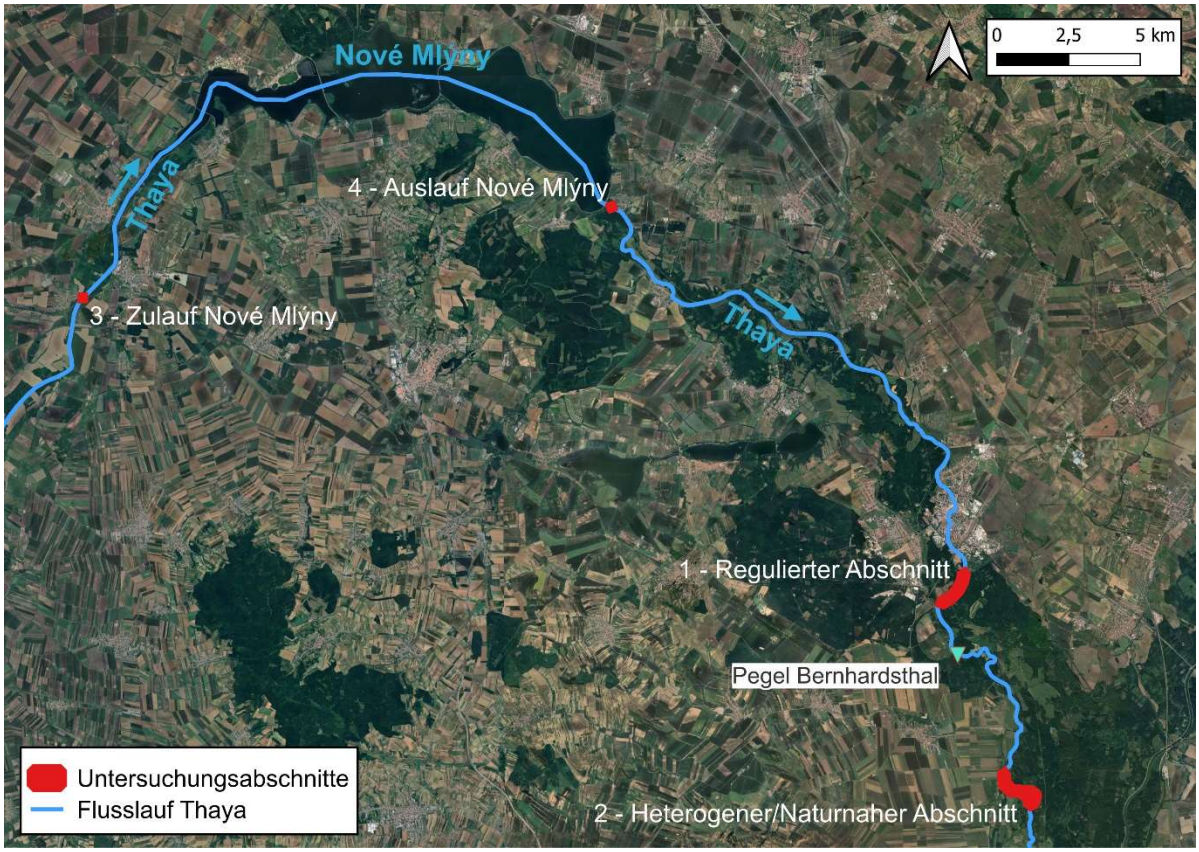
17 měřicích sond se nepodařilo během odečítání, resp. na konci výzkumu nalézt. Ztráta deseti z těchto sond byla s největší pravděpodobností způsobena driftem při povodni, která nastala těsně před posledním odečítáním. Ostatní sondy nebyly na svých místech již dříve a byly nejspíš svévolně odstraněny.

Celé měření trvalo od 4. července do 11. listopadu 2025 a pokrývalo tedy více než čtyři měsíce. Největší procento sond s úspěšně zjištěnými, souvislými teplotními řadami (~90 %) fungovalo v období od 13. srpna do 9. září, to bylo proto vybráno jako preferované zkoumané období pro další hodnocení a analýzy.

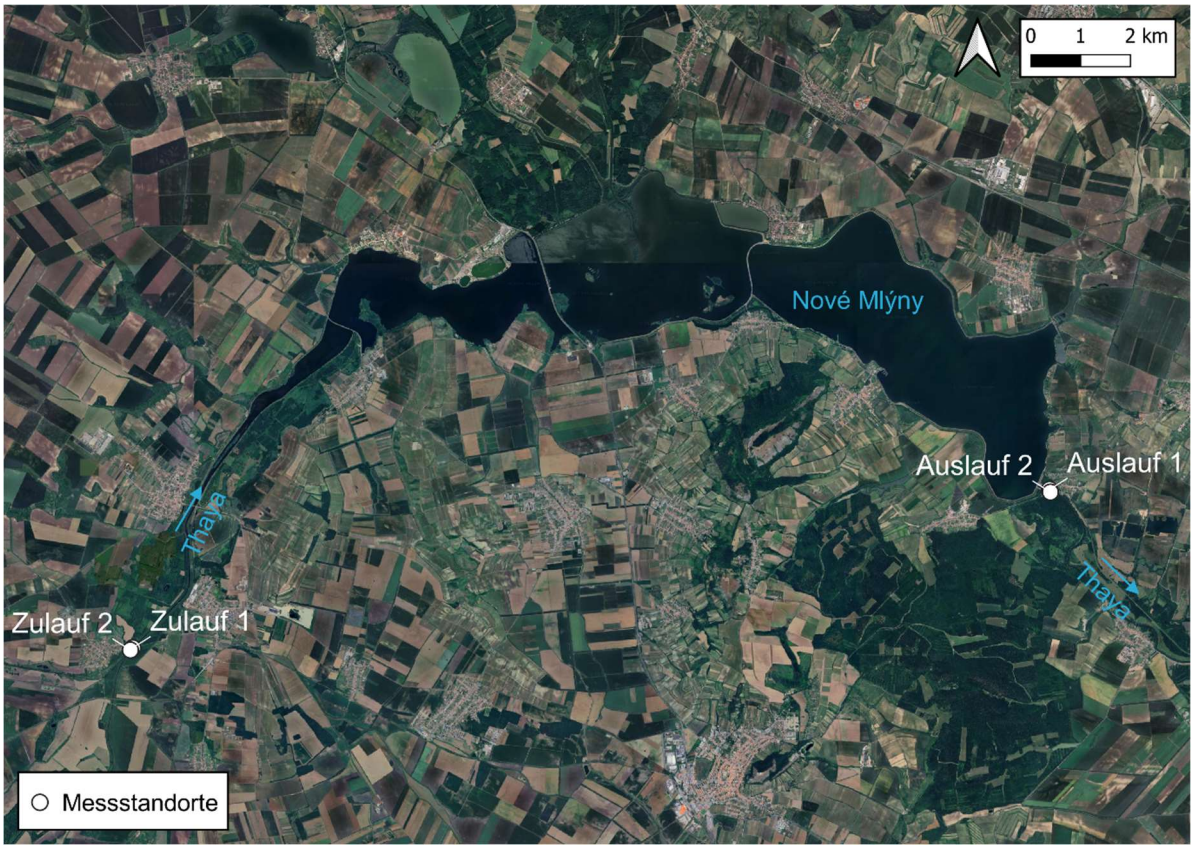
Navzdory určitým mezerám v datech lze celkovou datovou základnu považovat za dobrou, umožňuje řešit základní otázky výzkumu na odborně podložené úrovni.

Tabulka 2-2: Přehled zkoumaných měřicích míst v projektovém území, včetně informací o hloubce vody, rychlosti proudění, zastínění a počtu umístěných loggerů a zkoumaných hloubek.

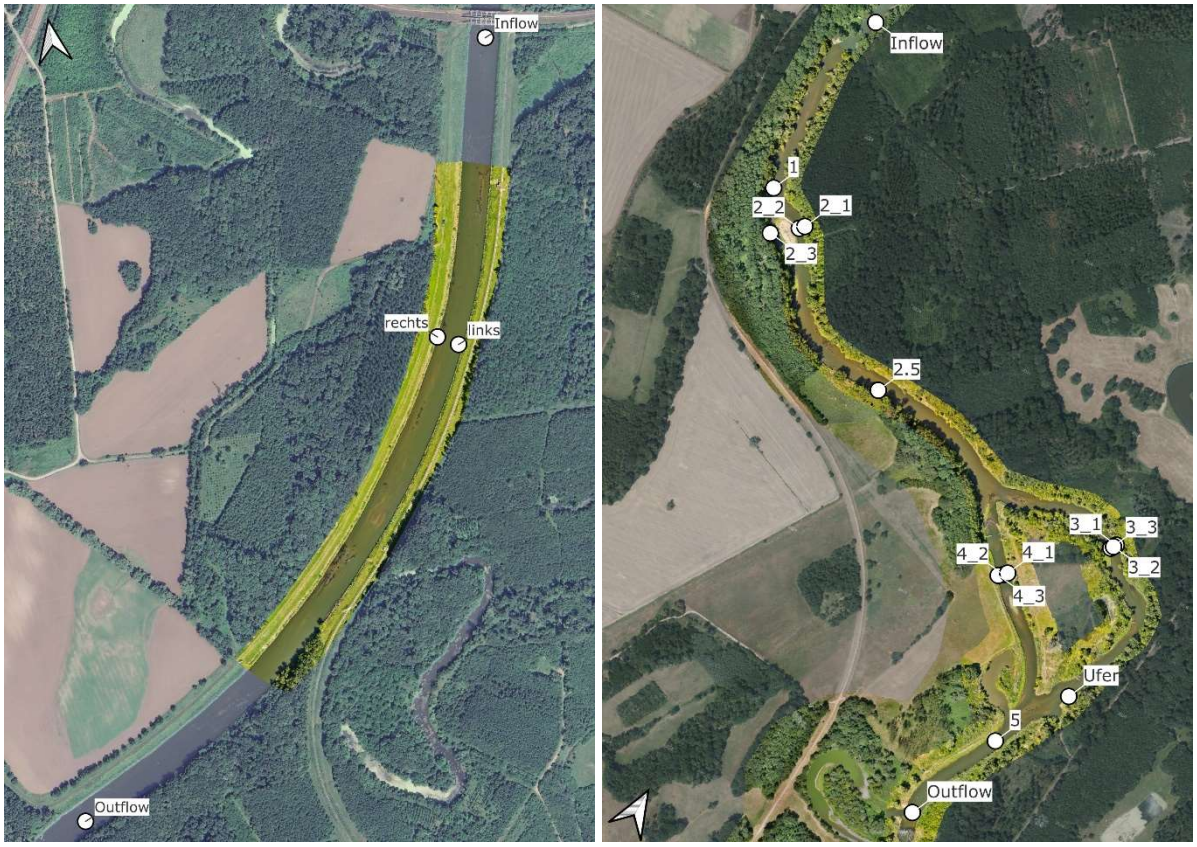
Číslo úseku	Název úseku	ID lokality	Název lokality	Hloubka vody [cm]	Rychlost proudění	Zastínění	Počet loggerů
1	Regulovaný úsek	Inflow	horní konec	70	střední	nezastíněné	2
		Vlevo	nejhlubší část koryta vlevo	115	pomalá	nezastíněné	2
		Outflow	dolní konec	60	střední	minimálně zastíněné	2
		Vpravo	vnitřní oblouk vpravo	60	velmi pomalá	nezastíněné	2
2	Heterogenní/přírodě blízký úsek	1	jednotlivé měření v tůni	570	velmi pomalá	minimálně zastíněné	3
		2_1	nejhlubší část koryta vlevo	130	rychlá	plně zastíněné	2
		2_2	poblíž ostrůvku vlevo	110	pomalá	nezastíněné	2
		2_3	boční rameno vpravo	80	střední	zčásti zastíněné	2
		3_1	meandr vlevo	150	střední	zčásti zastíněné	3
		3_2	meandr uprostřed	120	střední	nezastíněné	2
		3_3	meandr vpravo	55	střední	nezastíněné	2
		4_1	průkop vlevo	80	velmi pomalá	nezastíněné	2
		4_2	průkop uprostřed	130	velmi pomalá	nezastíněné	3
		4_3	průkop vpravo	100	velmi pomalá	nezastíněné	2
		5	pod soutokem	160	pomalá	nezastíněné	3
		Inflow	horní konec	120	střední	zčásti zastíněné	2
		Outflow	dolní konec	150	velmi pomalá	nezastíněné	3
		Mrtvé dřevo	jednotlivé měření mrtvé dřevo	100	pomalá	minimálně zastíněné	2
		Břeh	jednotlivé měření levý břeh	100	pomalá	nezastíněné	2
3	Přítok do VD Nové Mlýny	1	přítok 1	40	pomalá	nezastíněné	1
		2	přítok 2	10	pomalá	nezastíněné	1
4	Odtok z VD Nové Mlýny	1	odtok 1	40	pomalá	minimálně zastíněné	1
		2	odtok 2	10	pomalá	plně zastíněné	1



Obr. 2-3: Řešené území s tokem Dyje a polohou čtyř úseků zkoumaných pomocí teplotních sond



Obr. 2-4: Místa měření a sond na přítoku a odtoku VD Nové Mlýny



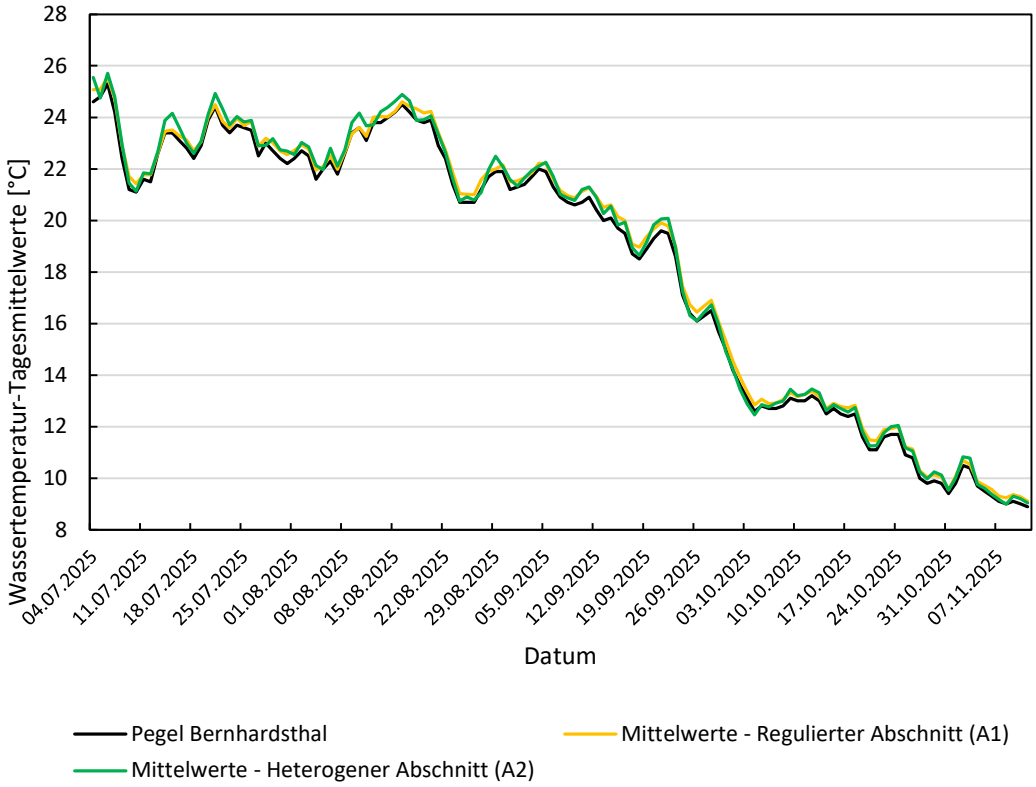
Obr. 2-5: Poloha umístění loggerů: vpravo: regulovaný úsek, vlevo: heterogenní úsek

2.2.2.2 Vývoj teplot podél toku

Obr. 2-6 ukazuje vývoj teploty vody v regulovaném a heterogenním úseku. Data jsou zobrazena jako průměrné denní hodnoty zprůměrované ze všech měřicích stanic za celé sledované období. Dále jsou zobrazena data z limnigrafické stanice Bernhardsthal – ta se nachází mezi regulovaným úsekem (přibližně 2 km po proudu) a heterogenním úsekem (přibližně 7 km proti proudu). Převážně paralelní průběh všech tří časových řad naznačuje značně vysokou věrohodnost naměřených hodnot.

Vývoj teplot vody ukazuje, že nejvyšší hodnoty byly v červenci a srpnu. Toto období je proto obzvláště vhodné pro posuzování teplotní resilience řeky Dyje a dostupnosti vhodných stanovišť v horkých letních dnech. Až do poloviny září se průměrné denní teploty držely trvale nad 20 °C, než během několika týdnů klesly pod 14 °C.

Porovnání hodinových měření v obou úsecích v období od 4. července do 31. srpna (Obr. 2-7) odhaluje rozdíly ve velikosti denních výkyvů teploty. Přestože teplota vody v přirozeném toku od pramene k ústí zpravidla postupně roste, maximální denní teploty v přirozeném úseku byly během zkoumaného období opakovaně výrazně nižší než v regulovaném úseku. Za určitých podmínek by mohla dráha toku mezi oběma úseky tlumit teplotní špičky.

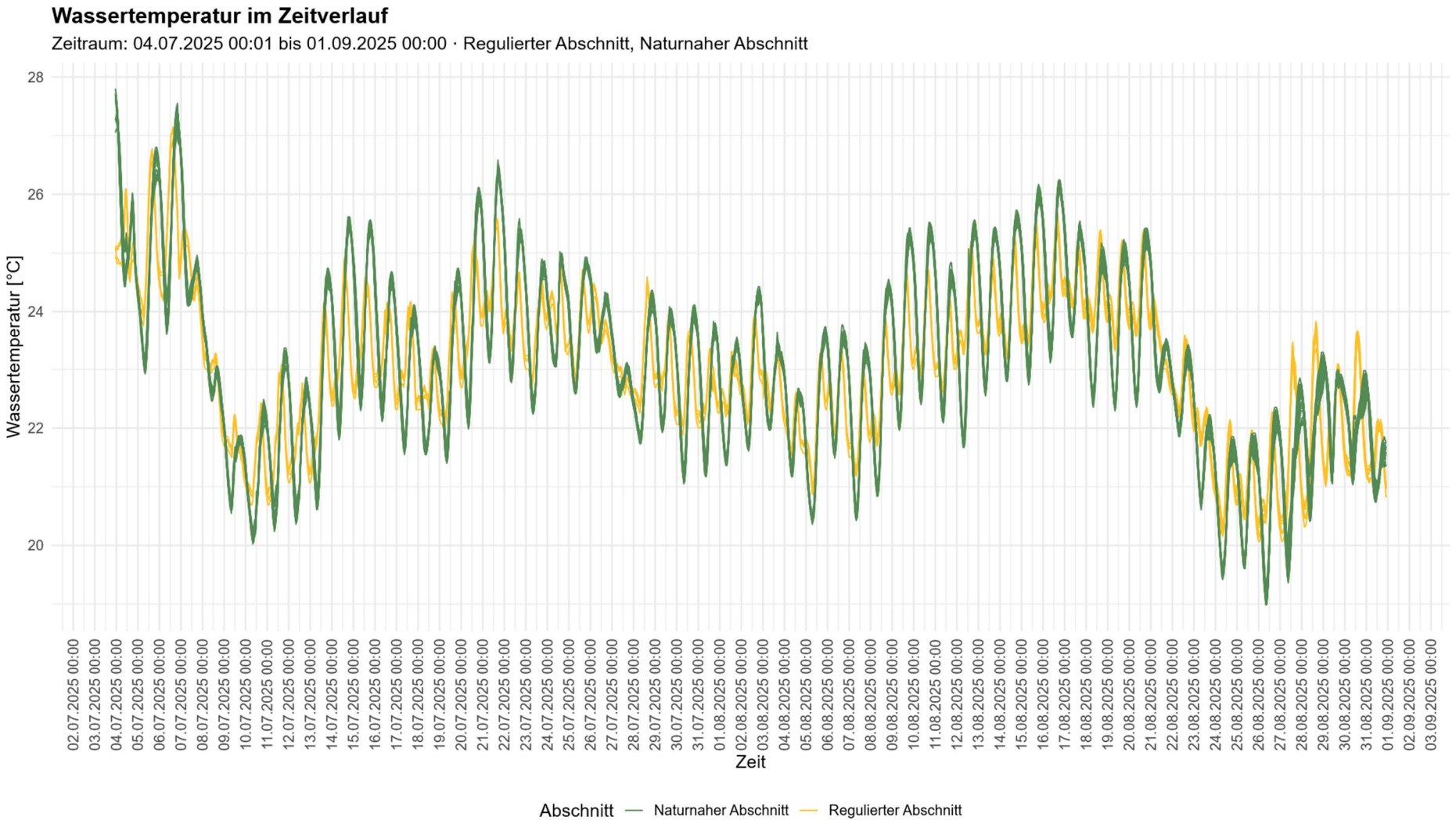


Obr. 2-6: Vývoj průměrné denní teploty vody v regulovaném a heterogenním úseku a na limnigrafické stanici Bernhardsthal (viadonau) v období 4. července až 11. listopadu 2025.

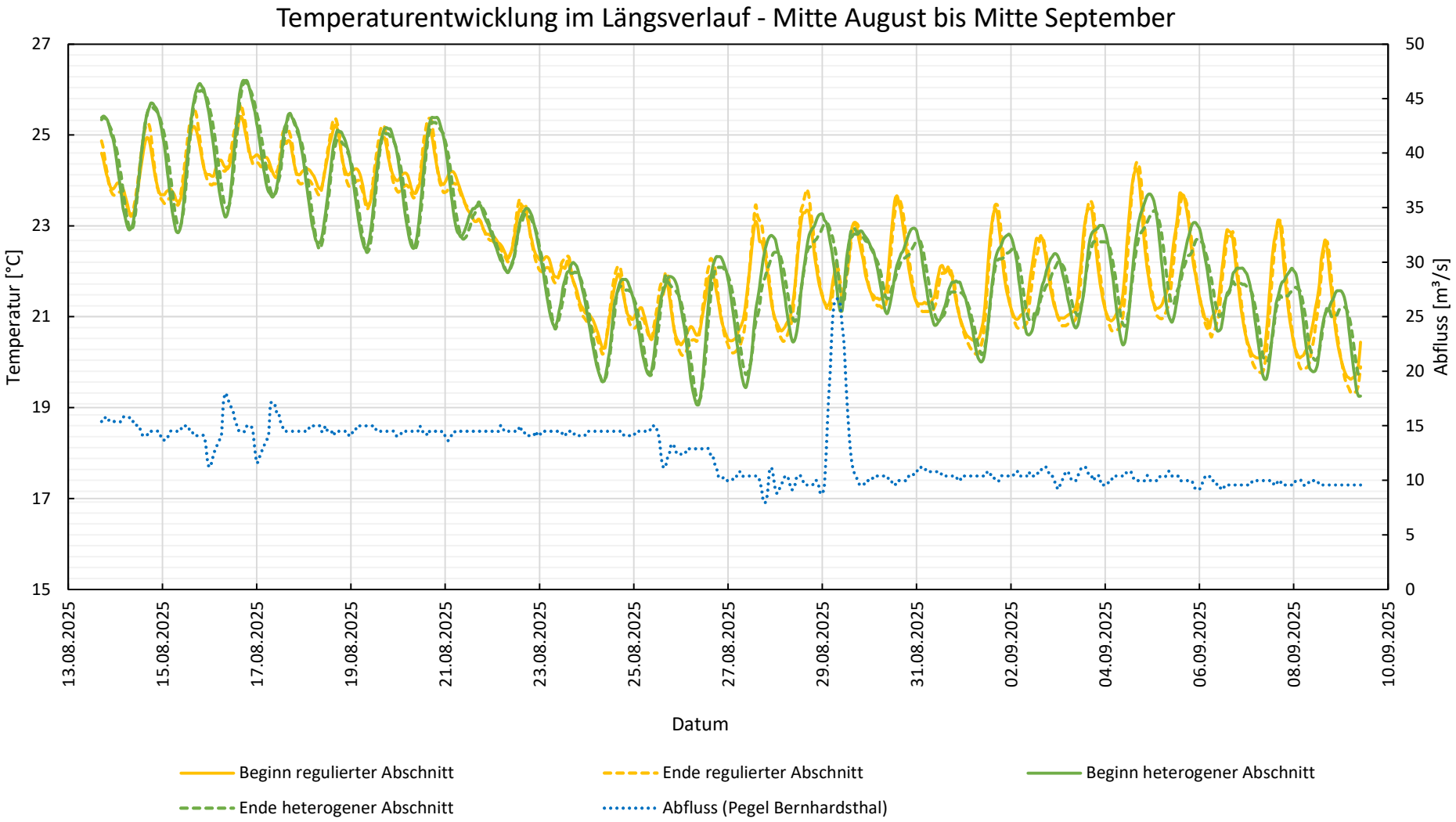
Zejména noční minimální teploty vody v heterogenním úseku jsou obvykle výrazně nižší než v úseku regulovaném (Obr. 2-7) a rozdíl mezi oběma úseky je zde také výraznější než u maxim. Kromě toho je v regulovaném úseku během ochlazení v nočních hodinách patrné také nové oteplování. To je pravděpodobně způsobeno tím, že se bezprostředně nad regulovaným úsekem nachází břeclavská čistírna odpadních vod a její výpusti mají značný termický vliv. Na základě získaných údajů nelze jednoznačně určit, zda jsou pozorované poklesy teploty mezi oběma úseky způsobeny skutečným ochlazovacím působením v mezilehlém úseku Dyje, nebo primárně lokálním vlivem čistírny odpadních vod.

Porovnání s údaji o průtoku na Obr. 2-8 ukazuje, že k redukci teplotních špiček docházelo především ve fázi poměrně malého průtoku. Zdá se proto pravděpodobné, že konstantně vypouštěné odpadní vody z čistírny při zvýšeném podílu na celkovém objemu vody v tomto období způsobovala větší oteplování regulovaného úseku. Tato interpretace představuje pouze jedno z možných vysvětlení a nelze ji na základě dostupných údajů definitivně verifikovat. Dále je třeba předpokládat, že zjištěné teplotní rozdíly v tomto období lze alespoň částečně připsat rozdílům v zastínění zkoumaných úseků nebo kombinaci několika účinných ovlivňujících faktorů. Spolehlivá kvantifikace příspěvku jednotlivých ovlivňujících faktorů k pozorovanému teplotnímu průběhu není na základě aktuálně dostupných údajů možná.

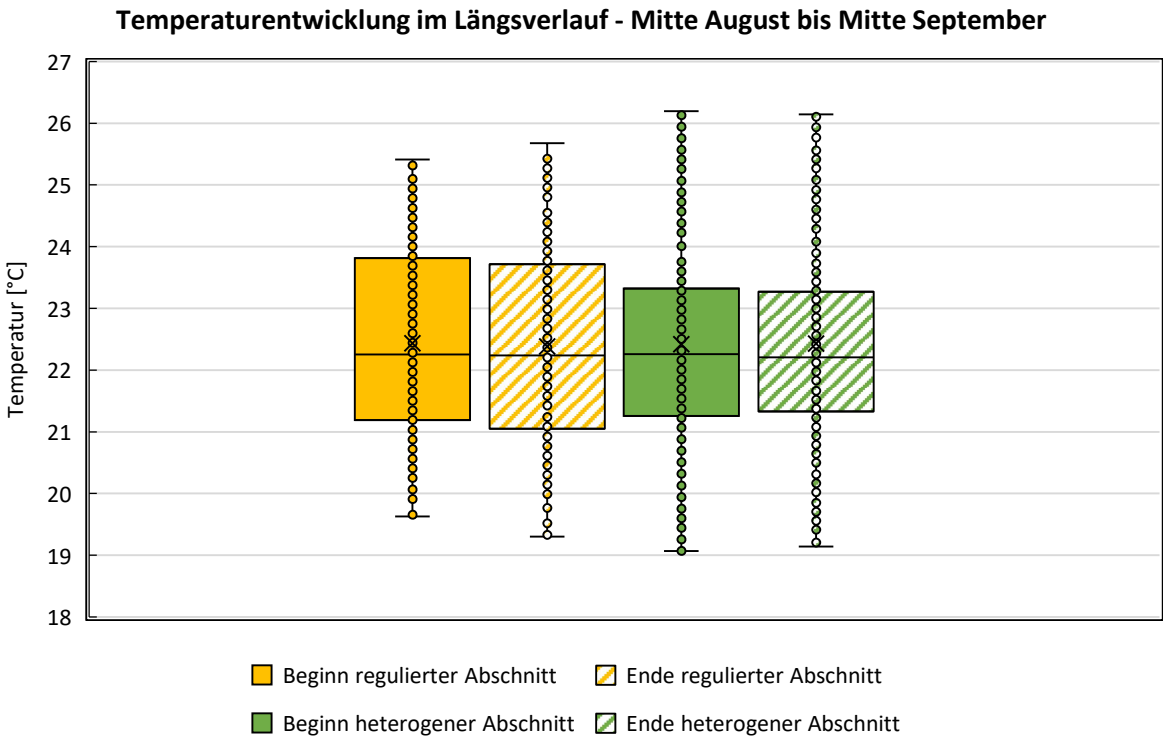
Pro ilustraci vývoje teploty v obou zkoumaných úsecích jsou na Obr. 2-8 znázorněna hodinová měření z vybraných sond na horním a dolním konci příslušných úseků. Při tom se ukazuje, že přírodě blízký úsek zejména ve dnech s malým průtokem vykazoval významné snížení teplotních špiček až o cca 0,5 °C. Naproti tomu v regulovaném úseku docházelo po většinu zobrazeného období k mírnému nárůstu maximálních teplot. Navzdory rozdílným denním výkyvům krabicové grafy na Obr. 2-9 nevykazují po celou dobu pozorování významné rozdíly v průměrných teplotách vody.



Obr. 2-7: Vývoj hodinových naměřených teplot vody ve zkoumaném regulovaném a heterogenním úseku (vždy všechny měřicí body) v období od 4. července do 31. srpna 2025.



Obr. 2-8: Vývoj hodinových naměřených teplot vody z vybraných sond na horním a dolním konci zkoumaného regulovaného a heterogenního úseku, včetně hodinových hodnot průtoku na limnigrafické stanici Bernhardsthal v období od 13. srpna do 9. září 2025.



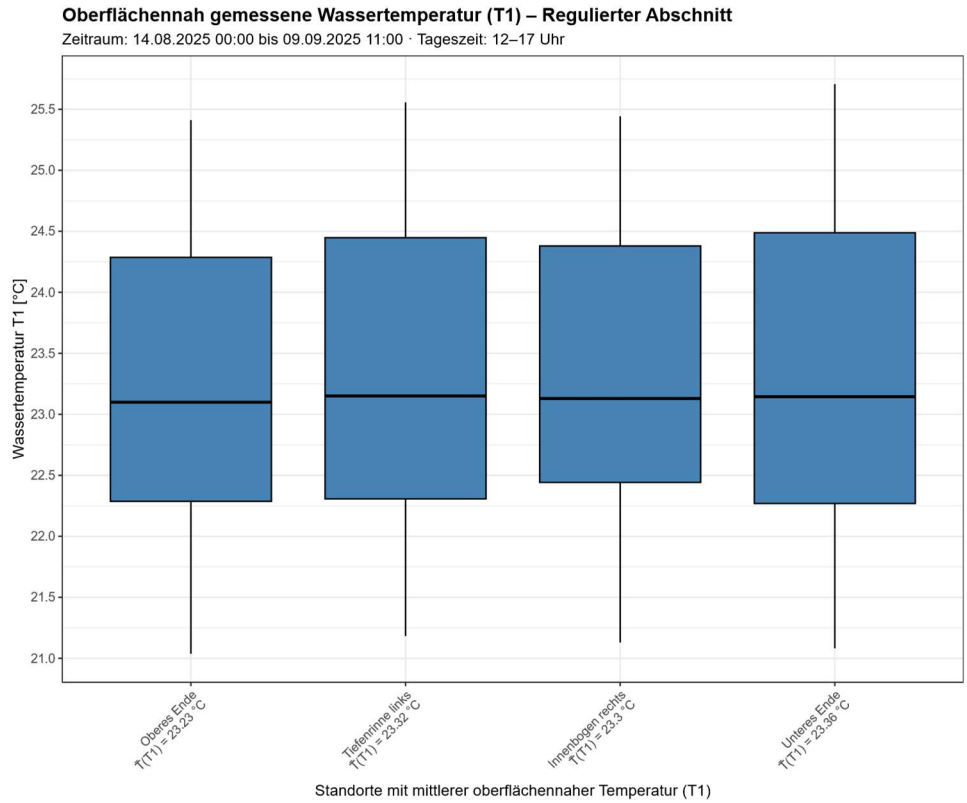
Obr. 2-9: Krabicový graf hodinových měření teploty vody z vybraných sond na horním a dolním konci zkoumaného regulovaného nebo heterogenního úseku v období od 13. srpna do 9. září 2025.

Zobrazení průměrných teplot vody v blízkosti hladiny na jednotlivých měřicích stanicích, uspořádaných ve směru proudění, mezi 12:00 a 17:00 (Obr. 2-10 a Obr. 2-11) umožňuje podrobně analyzovat vývoj teploty v průběhu toku v období vysokých teplot vzduchu. Při tom se ukazuje, že teploty v regulovaném úseku jsou v tuto denní dobu v průměru o něco vyšší než v úseku blízkému přírodě. V obou úsecích jsou však rozdíly mezi jednotlivými měřicími stanicemi malé, většinou pod 0,5 °C. Není patrný žádný jasný trend kontinuálního zvyšování nebo snižování teploty vody podél toku.

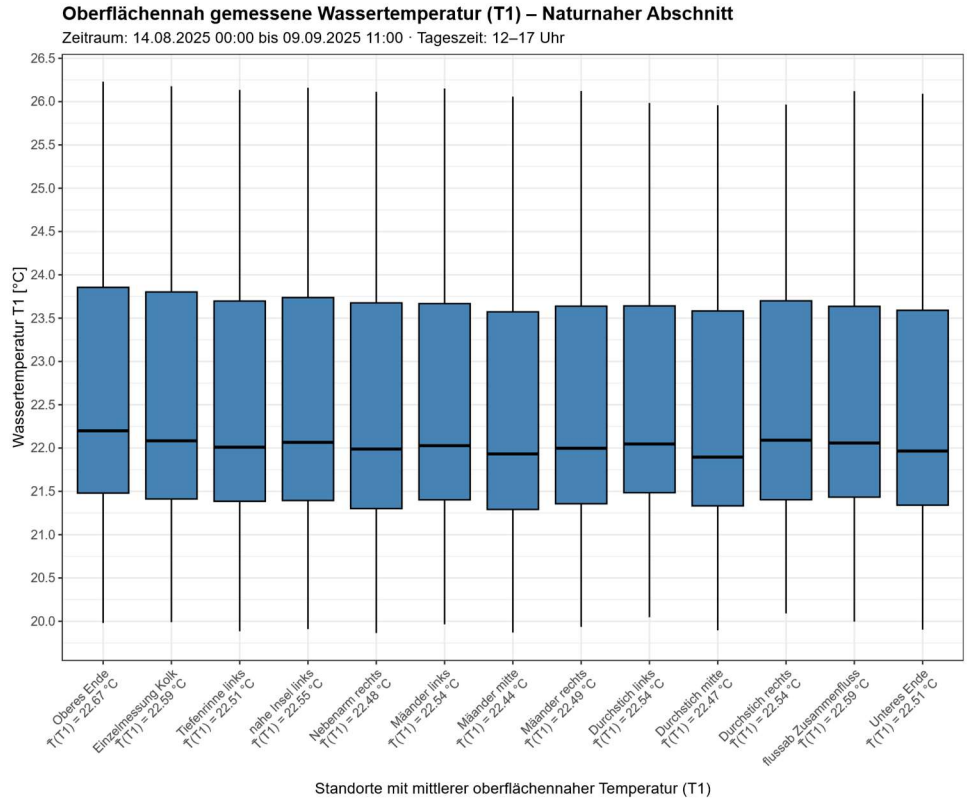
2.2.2.3 Vliv nádrží VD Nové Mlýny

Porovnání teplotních údajů na přítoku a odtoku z novomlýnských nádrží (Obr. 2-12 a Obr. 2-13) ukazuje na výrazné zvýšení teploty vody v Dyji vlivem nádrží. Během zkoumaného období činil tento nárůst v průměru cca 2,3 °C. V období zvlášť vysokých teplot kolem poloviny srpna teplota vody v odtoku dokonce krátce překročila teplotu vody ve dvou zkoumaných úsecích položených výrazně dále po proudu. Nápadná je také silně omezená nebo dokonce sotva patrná denní teplotní amplituda pod nádrží, kterou lze připsat nepřetržitému vypouštění teplé vrchní vody s téměř konstantní teplotou.

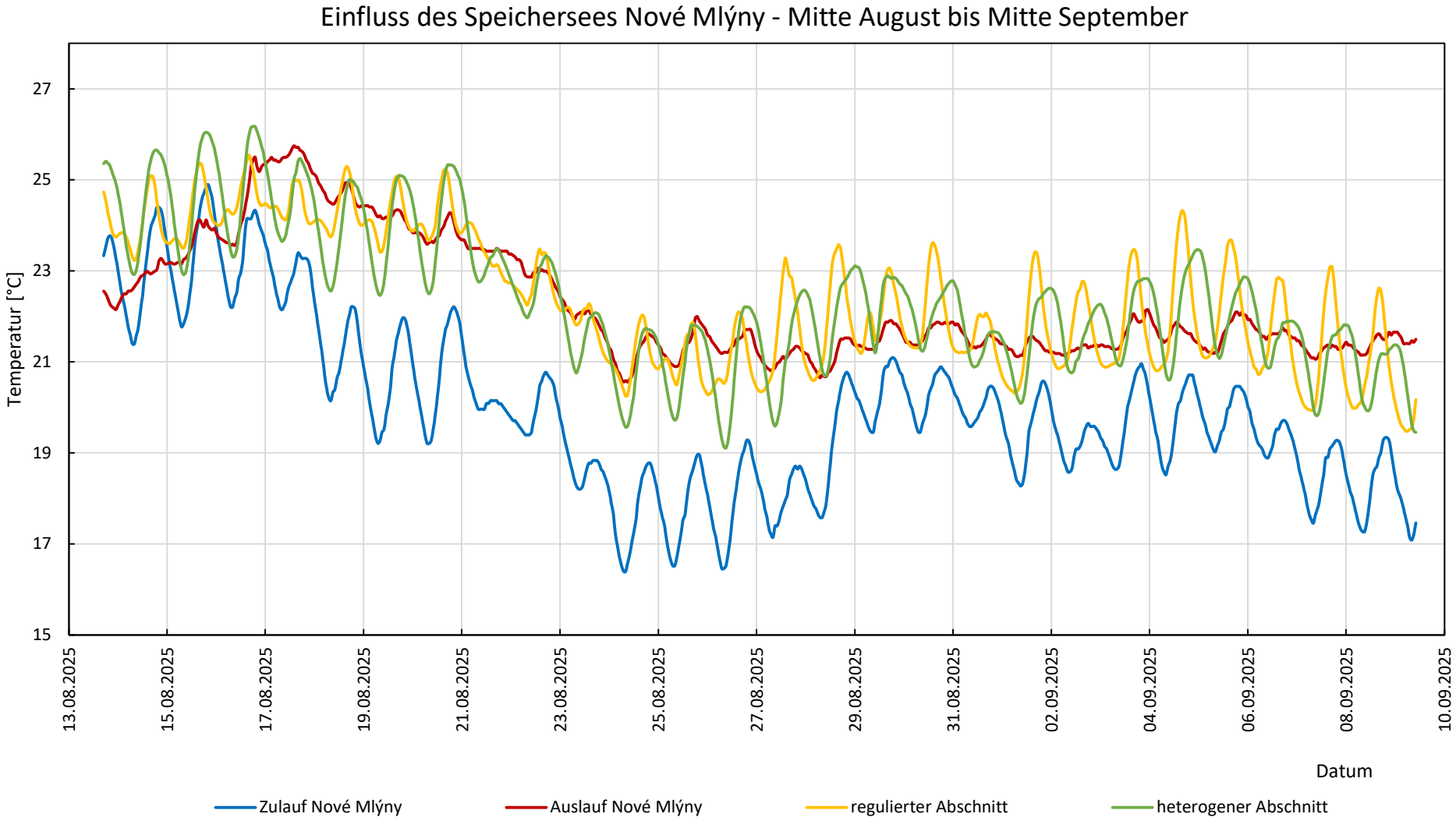
Celkově lze konstatovat, že novomlýnské nádrže mají silný vliv na teplotní dynamiku řeky Dyje. Ačkoli nejsou k dispozici příslušná měření, snížená denní teplotní amplituda naznačuje, že tento vliv je v bezprostřední blízkosti výrazně silnější. S rostoucí vzdáleností od VD se tato dynamika opět zvyšuje. Celkový nárůst teploty nicméně přetrvává i dále po proudu.



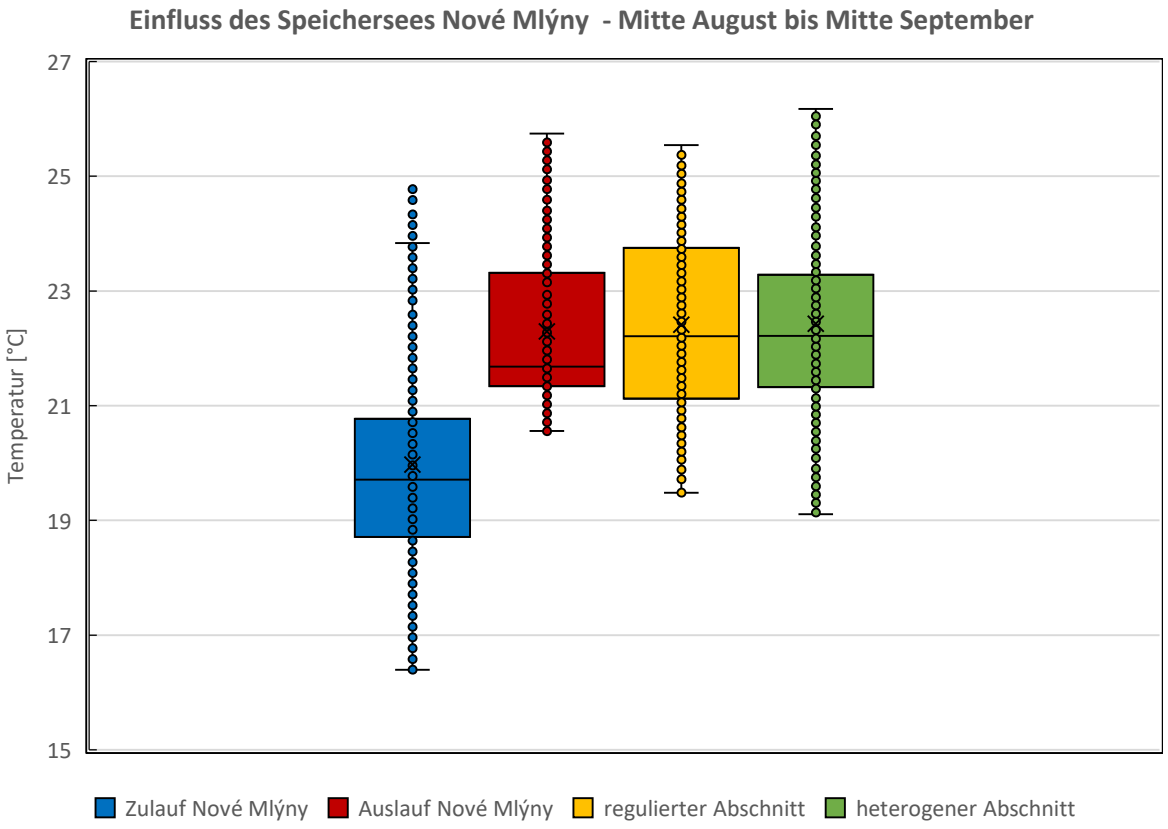
Obr. 2-10: Krabicový graf hodinových měření teploty vody v blízkosti hladiny na všech měřicích stanicích v regulovaném úseku (seřazeno ve směru proudění) v období od 14. srpna do 9. září 2025.



Obr. 2-11: Krabicový graf hodinových měření teploty vody v blízkosti hladiny na všech měřicích stanicích v přírodě blízkém úseku (seřazeno ve směru proudění) v období od 14. srpna do 9. září 2025.



Obr. 2-12: Vývoj průměrných hodinových měření teploty vody na přítoku a odtoku z VD Nové Mlýny a v obou zkoumaných úsecích níže po toku v období od 13. srpna do 9. září 2025.



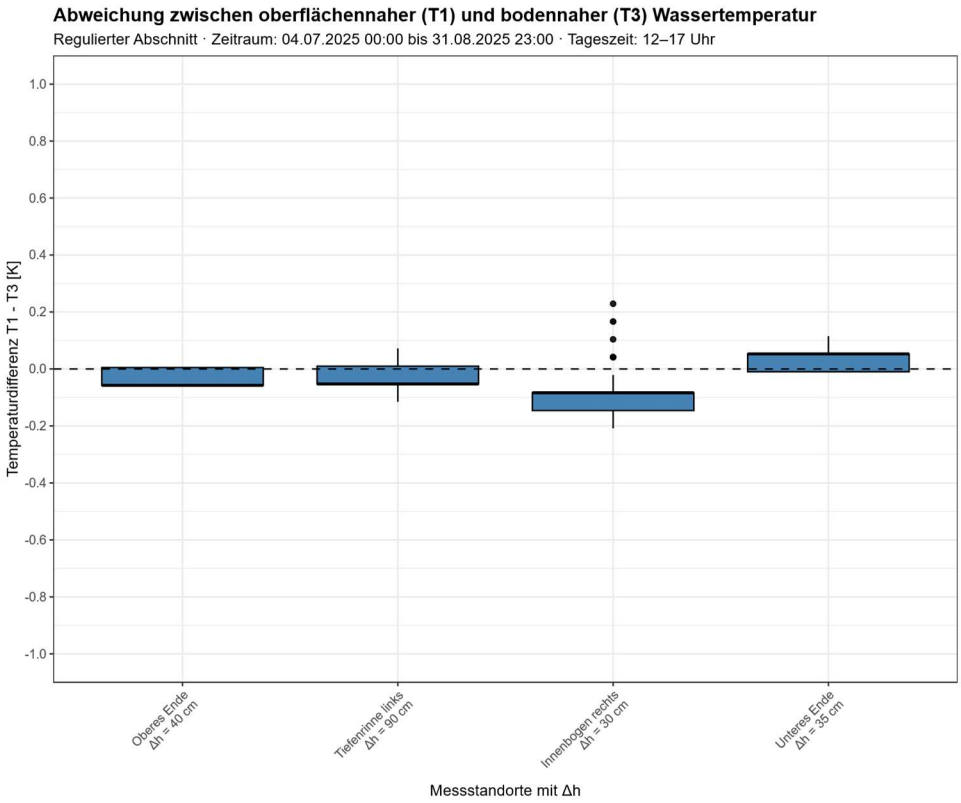
Obr. 2-13: Krabicový graf průměrných hodinových měření teploty vody na přítoku a odtoku z VD Nové Mlýny a v obou zkoumaných úsecích níže po toku v období od 13. srpna do 9. září 2025.

2.2.2.4 Vliv hloubky vody

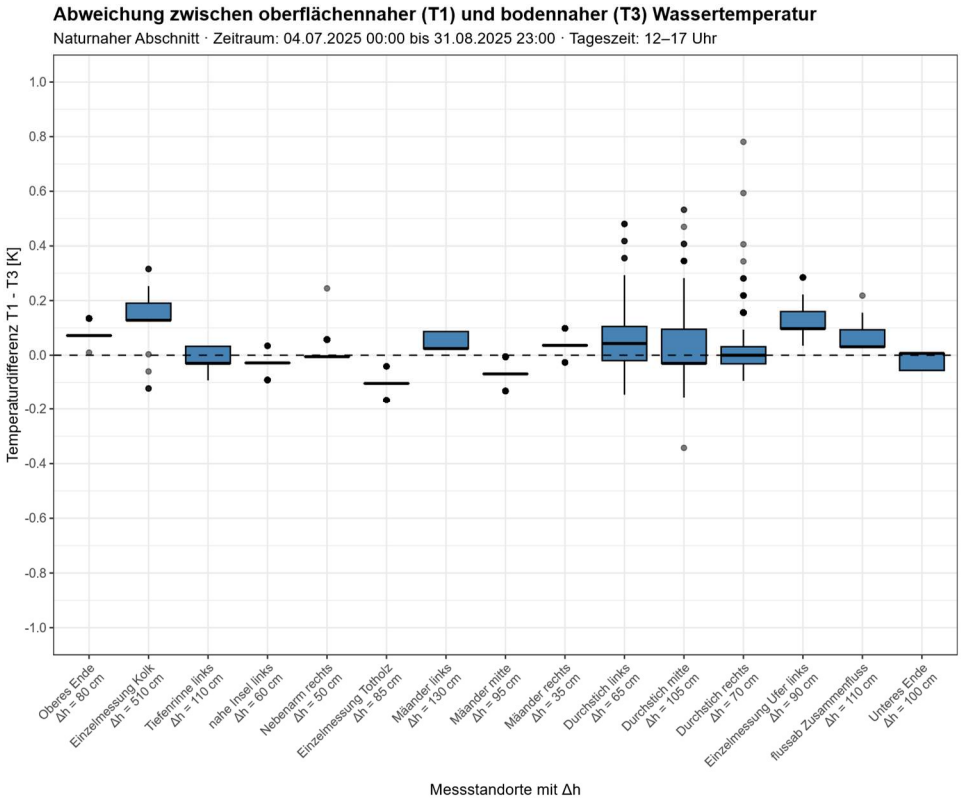
Pro analýzu vlivu hloubky vody na vertikální teplotní průběh ve zkoumaných úsecích řeky Dyje znázorňuje Obr. 2-14 a Obr. 2-15 průměrné rozdíly mezi hodnotami naměřenými blízko hladiny a u dna na jednotlivých místech během fází vysokých teplot vzduchu (12:00–17:00). V obou úsecích byly pozorovány pouze mírné hloubkou podmíněné teplotní rozdíly. Průměrné odchylky byly zpravidla menší než 0,2 °C a jen ve výjimečných případech tuto hodnotu překračovaly.

Největší rozdíly se vyskytly v tůni hluboké asi 5 m v přírodě blízkém úseku a naznačují mírné ochlazení vody u dna. Byly také pozorovány krátkodobé stratifikační efekty, zejména v průkopu v přírodě blízkém úseku. S největší pravděpodobností byly způsobeny velmi nízkou rychlostí proudění a příslušně omezeným promícháváním.

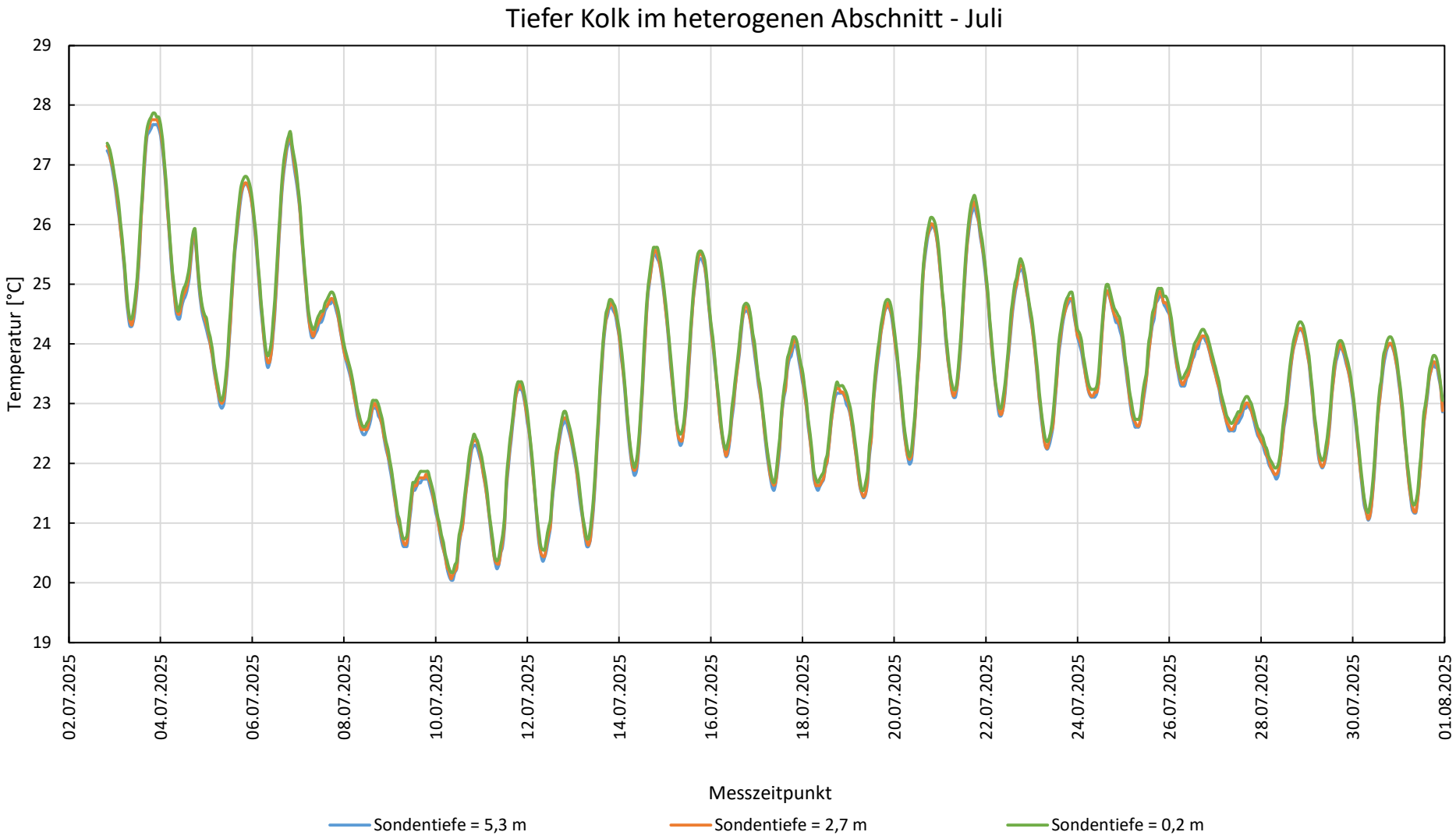
Z porovnání naměřených řad ze tří sond umístěných v různých hloubkách zmíněné hluboké tůně během zvlášť teplého července (Obr. 2-16 a Obr. 2-17) vyplývá mírné slábnutí kolísání teplot s rostoucí hloubkou vody. Během fází zvláště vysokých teplot vody (≥ 25 °C), které se vyskytovaly především mezi 16:00 a půlnocí, činil průměrný rozdíl mezi hodnotami naměřeními u hladiny a u dna přibližně 0,15 °C. Vzhledem k rozdílu hloubky sond až 5 m však tento chladicí efekt musíme hodnotit jako velmi malý. Nijak významně nepřispívá k teplotní resilienci Dyje.



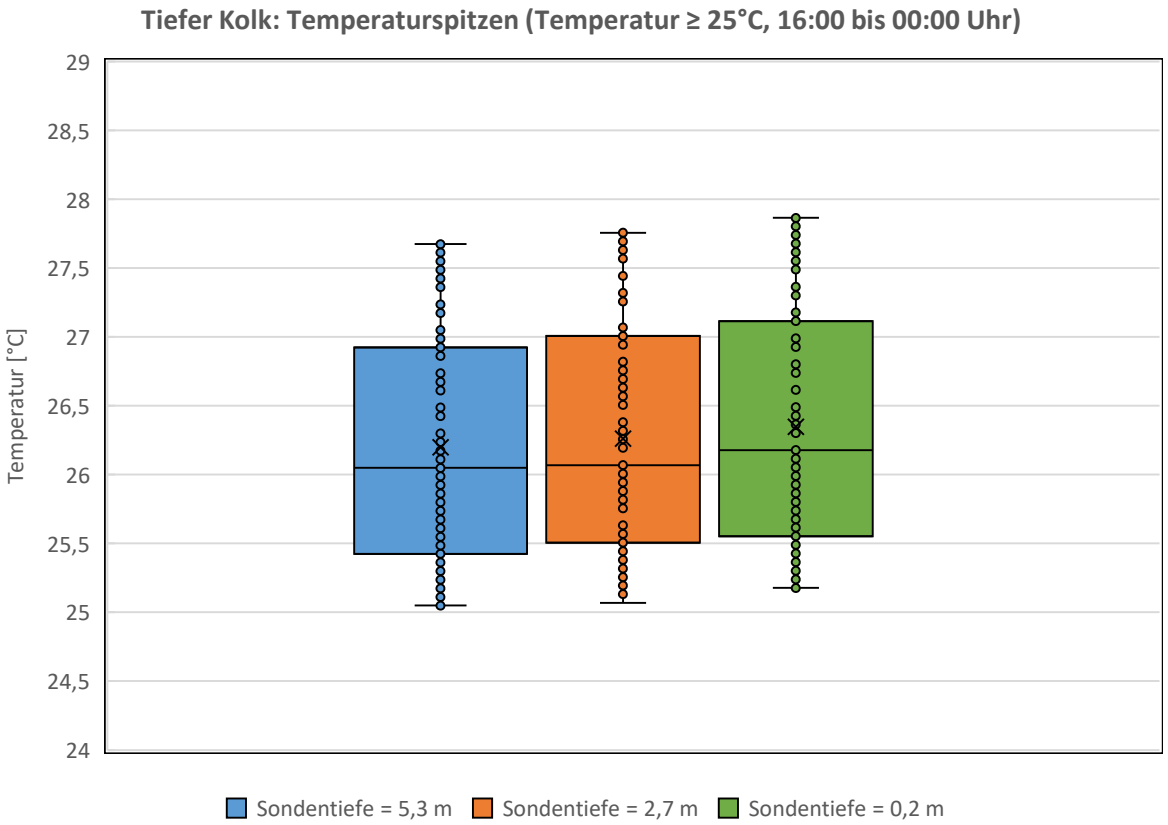
Obr. 2-14: Krabicový graf rozdílů hodinových měření teploty vody v blízkosti hladiny a u dna na všech měřicích stanicích v regulovaném úseku (seřazeno ve směru proudění) v období od 4. července do 31. srpna 2025.



Obr. 2-15: Krabicový graf rozdílů hodinových měření teploty vody v blízkosti hladiny a u dna na všech měřicích stanicích v přírodě blízkém úseku (seřazeno ve směru proudění) v období od 4. července do 31. srpna 2025.



Obr. 2-16: Vývoj hodinových měření teploty vody v cca 5 m hluboké tůni v přírodě blízkém úseku (ID lokality 1) v blízkosti hladiny, ve střední hloubce a u dna v období od 2. července do 1. srpna 2025.

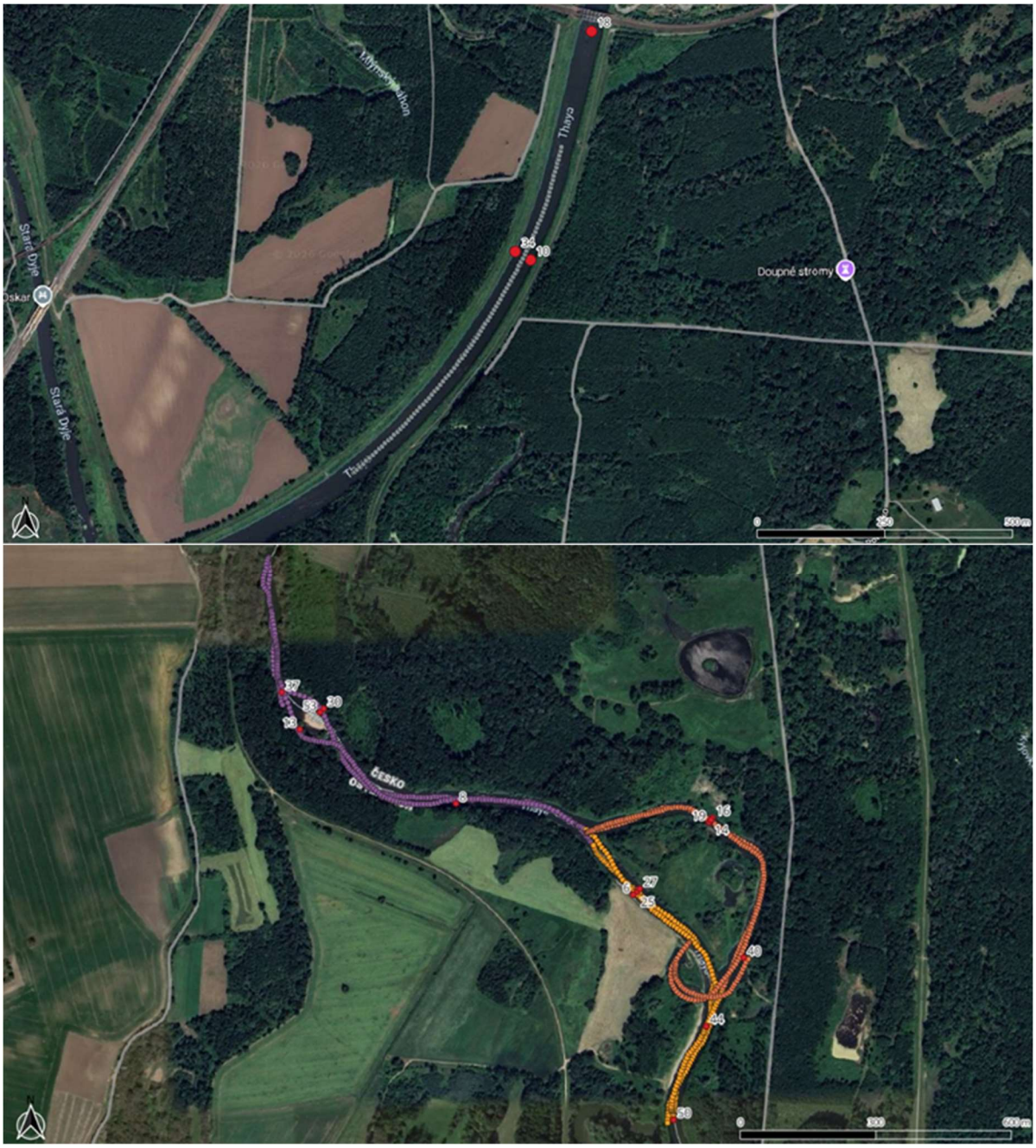


Obr. 2-17: Krabicový graf rozdílů hodinových měření teploty vody v cca 5 m hluboké tůni v přírodě blízkém úseku (ID lokality 1) v blízkosti hladiny, ve střední hloubce a u dna během fází obzvlášť vysokých teplotních špiček (≥25 °C) (mezi 16:00 a 00:00 hod) v období od 2. července do 1. srpna 2025.

2.3 Termografie (drony)

2.3.1 Metodika

Cílem leteckého průzkumu bylo zaznamenat prostorové rozložení povrchové teploty na Dyji ve dvou úsecích a zobrazit jejich vývoj v průběhu dne. Termografický záznam teplot vodní hladiny byl proveden pomocí bezpilotního dronu DJI M350 vybaveného termokamerou H30T. Termografický senzor má rozlišení 1280 × 1024 pixelů s roztečí pixelů 12 µm a zaznamenává radiometrická obrazová data ve formátu R-JPEG. Kamera má tepelnou citlivost (NETD) ≤ 50 mK při f/1,0. Pro měření byl použit rozsah měření teploty s vysokým zesílením od −20 °C do 150 °C.



Obr. 2-18: Letový plán: nahoře: regulovaný úsek, dole: heterogenní úsek; červeně = pozice dataloggerů

Letový plán byl navržen tak, aby v co nejkratším čase zachytil celou šířku toku Dyje. Aby se minimalizovaly časové nehomogenity ve vývoji teploty během letu, byla zkoumaná oblast rozdělena do čtyř sekcí, které byly nalétávány postupně (srov. Obr. 2-18). Lety byly prováděny ve výšce přibližně 90 m nad zemí, což odpovídá prostorovému rozlišení na zemi (Ground Sampling Distance, GSD) cca 4,75 cm. Mezi jednotlivými snímky bylo dosaženo překrytí přibližně 80 %, aby bylo zajištěno úplné pokrytí a následné fotogrammetrické sloučení obrazových dat.

První let dne byl původně plánován před východem slunce, aby se co nejvíc eliminoval vliv přímého slunečního záření a stínů na měřenou povrchovou teplotu. Majitelé pozemků však tento let za svítání zakázali, aby se zabránilo potenciálnímu možnému rušení volně žijících živočichů. Proto se všechny lety – včetně vzletu a přistání – uskutečnily až po východu slunce, resp. v době očekávaných maximálních teplot. Teplota prostředí během letů:

- ráno (07:00) 18 °C,
- poledne (13:00) 30 °C
- odpoledne (16:00) 30 °C.

Vyhodnocení termografických dat proběhlo v několika krocích. Zjištěná obrazová data byla původně ve formátu R-JPEG (radiometrické snímky JPEG) s kódováním DJI. Tento formát obsahuje radiometrická teplotní data, ale neumožňuje přímé zpracování v běžném GIS nebo v programech pro zpracování obrazu. Proto byly všechny datové sady po jednotlivých sektorech převedeny do formátu .TIFF, který umožňuje další analýzu a odvození teplotních produktů.

Hlavní součástí následného zpracování bylo systematické porovnání parametrů získaných letecky s daty ze stacionárních teplotních loggerů. Ta sloužila jako absolutní reference – i když i zde může vzniknout určitá nepřesnost, protože loggery jsou umístěny těsně pod hladinou vody. Na základě toho proběhla iterativní kalibrace nezpracovaných termických dat, přičemž byly postupně upravovány zejména parametry emisivita a odražená teplota. Cílem tohoto procesu bylo minimalizovat nekonzistence a dosáhnout co nejhomogennějšího rozložení teploty v různých podmínkách záznamu (zejména zastíněné vs. slunečné oblasti a lety ráno a během dne).

Parametry stanovené během iterace byly následně aplikovány na nezpracovaná obrazová data a zohledněny při převodu z formátů JPEG do TIFF, čímž vznikla nízkoztrátová a dále zpracovatelná databáze. Na základě jednotlivých homogenizovaných a radiometricky upravených snímků byly v dalším kroku generovány plošné termografické ortofoto snímky (rastrové datové sady). Ty tvoří základ pro následnou vizualizaci a odbornou interpretaci. Georeferencované rastrové datové sady teplot vodní hladiny mají prostorové rozlišení 0,5 m a zobrazují rozložení teploty vodní hladiny v celé oblasti. Příklady těchto rastrových datových sad jsou znázorněny na Obr. 2-19 a Obr. 2-20.

Pro zpracování naměřených dat byly použity softwarové programy Thermoconverter 1.6.1 a Pix4D Mapper (V4.9).

2.3.2 Výsledky

Obr. 2-19 a Obr. 2-20 znázorňují výsledky termografie pro oba úseky a tři časy.

Regulovaný úsek: V regulovaném úseku je při každém snímkování velmi homogenní rozložení teplot. V ranním přeletu však vykazují vyšší hodnoty než na pozdějších, poledních snímcích (srovnání snímků pořízených kolem 10:05 a 12:05). Tento průběh je v rozporu s očekávanou denní teplotní amplitudou teploty vody, která obvykle vykazuje nárůst teploty během dne. Jediným nekvantifikovatelným zjištěním je, že v ranních hodinách je přímo na hladině silný vliv odpařování. To však relativizuje skutečnost, že tento jev nebyl pozorován v heterogenních úsecích.

Současně pořízená obrazová data RGB nepřinášejí žádné důkazy o výrazných korelacích mezi teplotami na jedné straně a vlivem zastínění, přímého slunečního záření nebo odraženého záření na straně druhé. Daný úsek řeky vykazuje homogenní osvětlení, proto je nepravděpodobné, že by příčinou byly lokální rozdíly v osvětlení a zastínění. Vzhledem k tomu, že teplotní průběh heterogenního úseku je hodnověrný, musíme předpokládat chybu měření pro polední a/nebo ranní lety v regulovaném úseku.

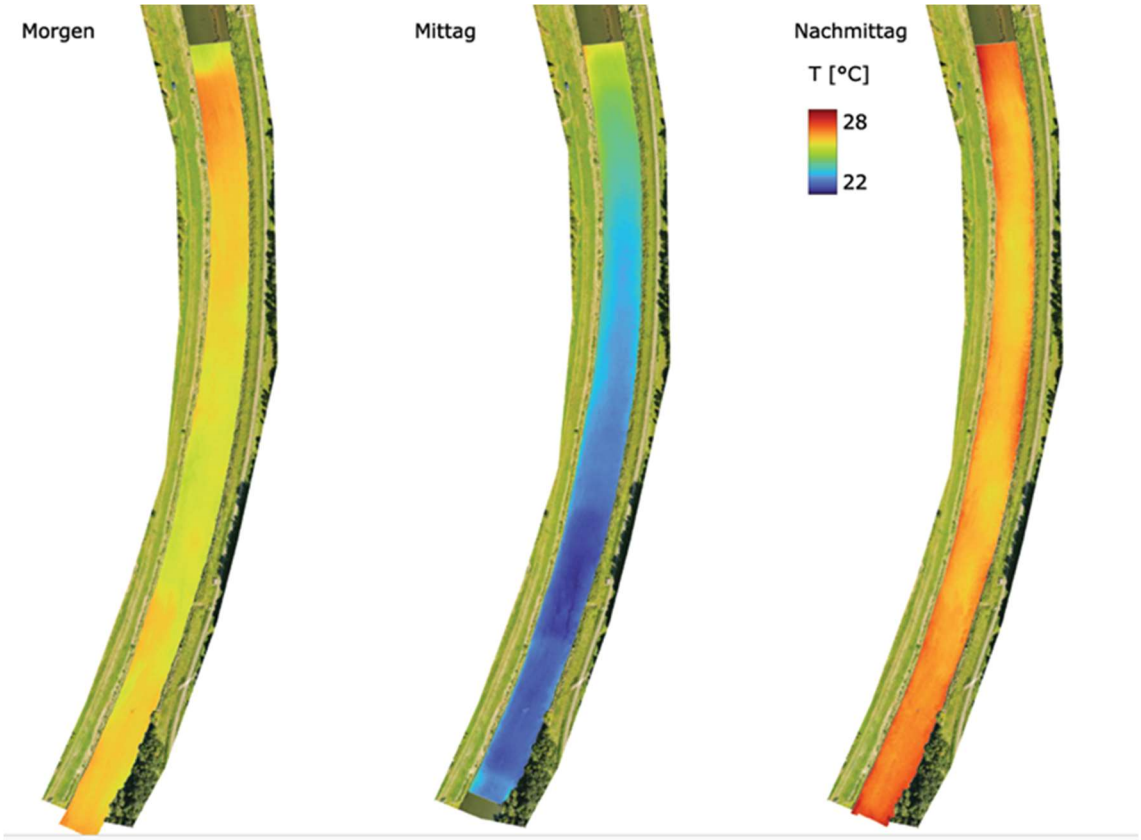
Heterogenní úsek: Vyhodnocení heterogenního úseku ukazuje očekávaný nárůst teploty v průběhu dne. Na přechodech mezi jednotlivými přelety se však někdy vyskytují významné teplotní rozdíly mezi sousedními snímanými pásy, které nelze připsat skutečným teplotním gradientům. Ostrý přechod mezi průkopem a meandrem s velkými teplotními rozdíly není fyzikálně věrohodný. Podobně v horním sektoru jsou patrné výrazné rozdíly s ostrou hranicí v oblasti středového nánosu, což je rovněž nutné hodnotit jako nepravděpodobné.

2.3.3 Závěr

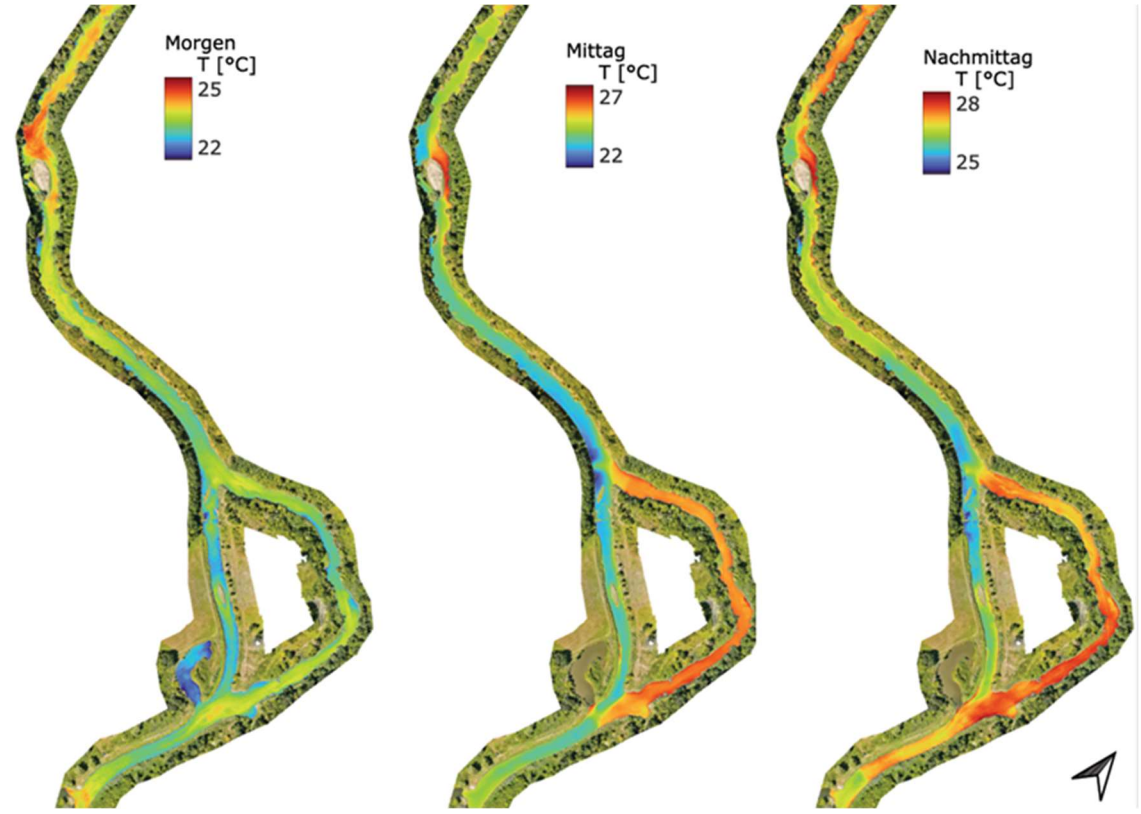
V zásadě se ukazuje, že plošný termografický záznam teplot vody lze interpretovat jen omezeně kvůli množství potenciálních ovlivňujících faktorů. V homogenně snímkovaných oblastech jsou však hodnověrně patrné průběhy denní teplotní amplitudy. Ovlivňující faktory tak mohou způsobovat, že se odražená teplota hladiny, zaznamenaná termografickou kamerou, bude výrazně lišit od průměrné teploty vody v toku. Mezi tyto fyzikální a geometrické faktory patří mimo jiné:

- různé reflektované teploty na vodní hladině v důsledku vyzařování z oblohy a okolí (vegetace),
- proměnlivé úhly dopadu slunečního záření během dne,
- drsnost hladiny vody (vlny) v důsledku proudění nebo větru,
- lokální zastínění například břehovou vegetací,
- geometrie toku, která má za následek různé úhly kamery vůči hladině během letu tam a zpět, nebo
- různé rychlosti proudění vody.

Možným zlepšením budoucích měření by mohlo být létání v noci nebo v časných ranních hodinách před východem slunce, protože v těchto časech jsou radiační podmínky výrazně homogennější. Mohly by být zvoleny i vyšší letové výšky, aby se snížil vliv drobných povrchových struktur a dosáhlo se homogennějších podmínek záznamu. Vždy je však nutné zohlednit právní rámec pro provoz dronů.



Obr. 2-19: Vypočtená teplota – rastrová data regulovaného úseku. Zleva doprava jsou zobrazeny různé časy snímání.



Obr. 2-20: Vypočtená teplota – rastrová data heterogenního úseku (dole). Zleva doprava jsou zobrazeny různé časy snímání.

2.4 Srovnání použitých metod

Pro posouzení kvality termografického měření byly výsledky měření porovnány s údaji z dataloggerů. Obr. 2-21 až Obr. 2-24 obsahují srovnání výsledků z termografie a z loggerů. Znázorňují teplotu na hladině zjištěnou v příslušném čase termografií a teploty z dataloggerů v různých hloubkách. Nejvýše uvedená hodnota představuje teplotu na hladině z termografu (černé orámování). Pod ní jsou teploty naměřené dataloggerem v hloubce „T1" až „T3". „T1" znamená logger u hladiny a „T3" u dna. Všechna schémata používají jednotnou barevnou stupnici. Obsahují výsledky měření provedených ráno, v poledne a odpoledne

V regulovaném úseku se termograficky zjištěné hodnoty odchylují od hodnot z loggerů o 0,54 až 0,74 °C. Pravděpodobné chyby měření z poledních a ranních leteckých snímání nebyly zohledněny.

V Tabulka 2-3 jsou srovnány termograficky zjištěné teploty s daty z dataloggerů v heterogenním úseku. Termograficky zjištěné hodnoty se zde liší od hodnot z loggerů o -0,40 až 2,82 °C. Jak nárůst teploty během dne, tak i rozdíly mezi zkoumanými úseky řeky vykazují srovnatelný trend. Nárůsty teploty zjištěné termograficky jsou však v průměru o cca 30 % vyšší než u loggerů, přičemž maximální rozdíl ve zvýšení teploty činí přibližně 55 %. Je nápadné, že termograficky zjištěné nárůsty teploty jsou ve většině případů vyšší než údaje z loggerů. Výjimkou je sonda u hladiny v tůni ve 2. úseku (ID lokality 1), kde je nižší počáteční teplota zaznamenaná termografem pravděpodobně způsobena bezprostřední blízkostí husté břehové vegetace a s tím spojený zastíněním.

Rozdíly jsou obzvlášť zřetelné ve dvou profilech v meandru a průkopu. V severně položeném meandru je nárůst teploty zjištěný termografií přibližně o 25 % vyšší než v průkopu. To naznačuje možné nehomogenity v termografickém sběru dat. Při ranním letu jsou však rozdíly menší.

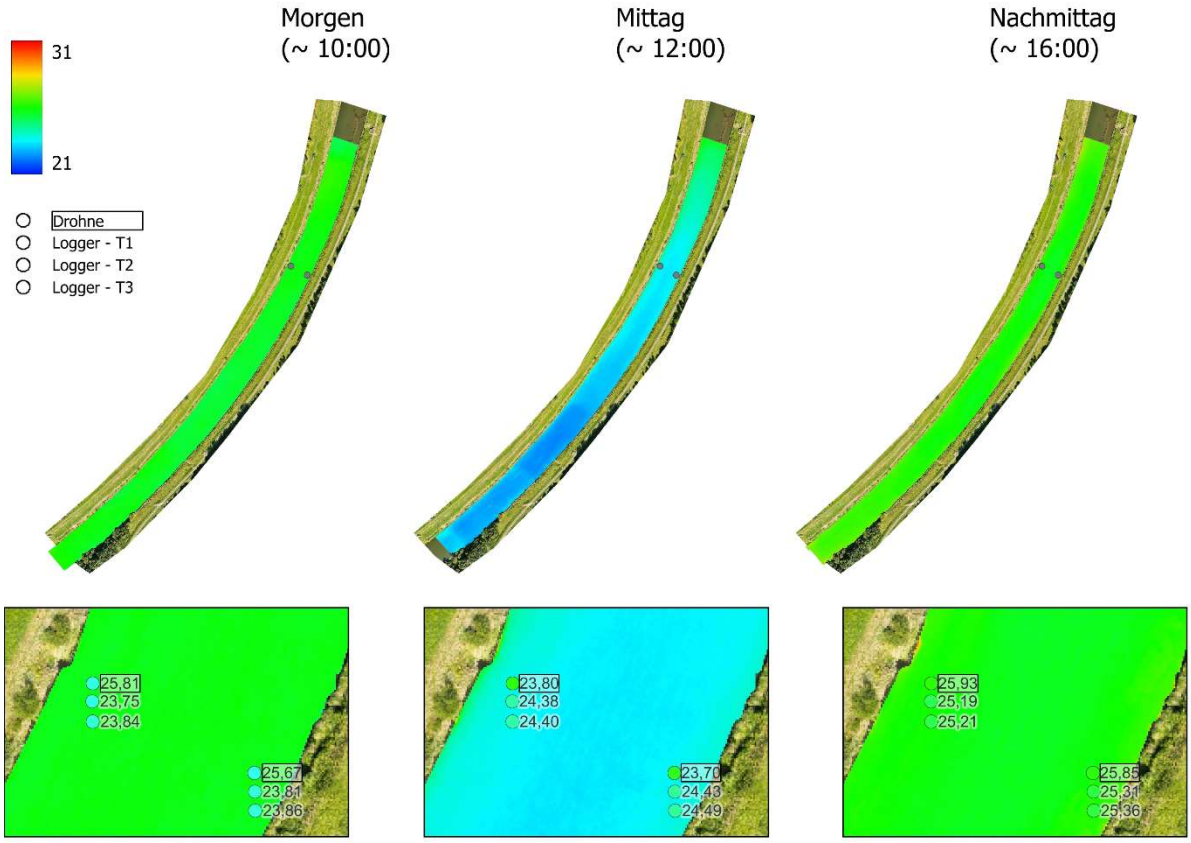
Hlavním důvodem rozdílů mezi oběma metodami měření je to, že použité dataloggery měří teplotu vody pod hladinou, takže jsou do značné míry nezávislé na krátkodobých účincích slunečního záření a odrazu. Rozdíly mezi metodami měření se s postupujícím dnem zvětšují. Z toho lze usoudit, že termografická měření jsou silněji ovlivněna proměnlivými podmínkami sběru dat. Mezi nejdůležitější ovlivňující faktory patří:

atmosférické faktory
- sluneční záření a proměnlivé úhly dopadu
- teplota a vlhkost vzduchu

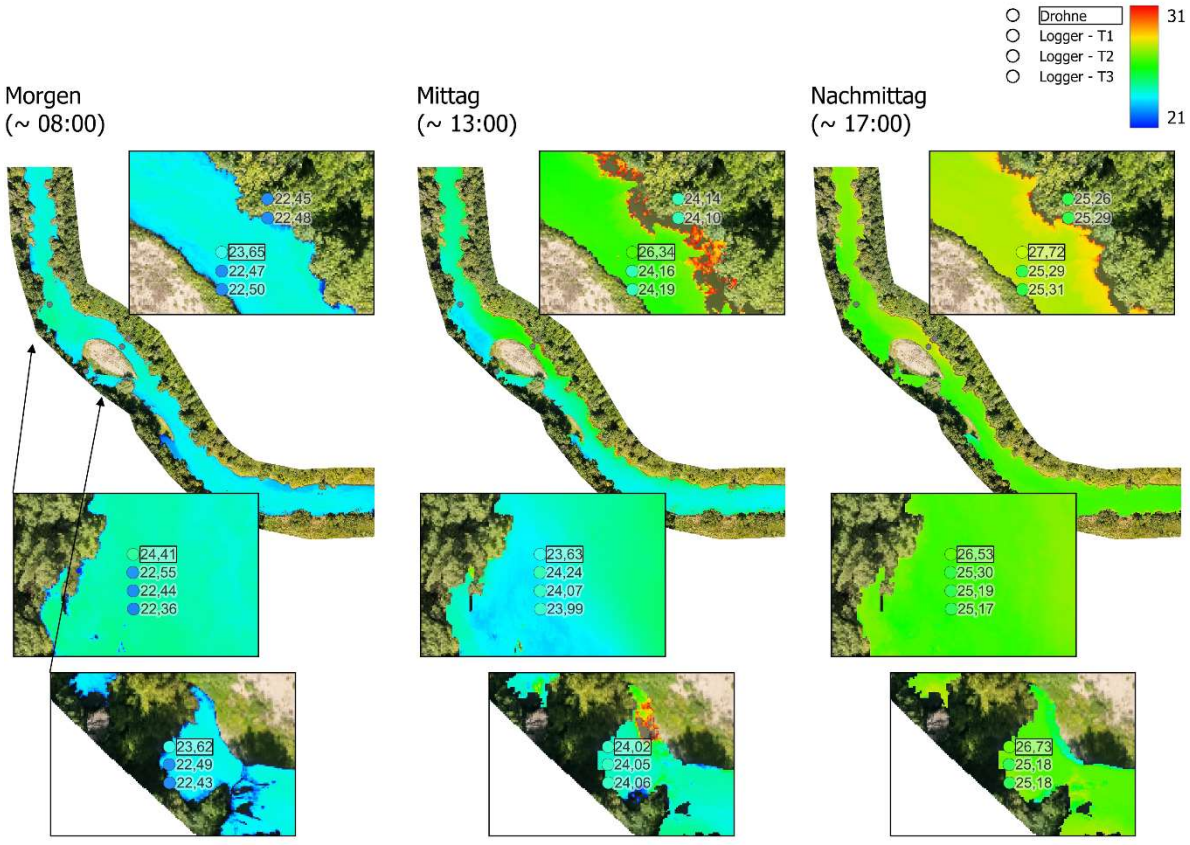
faktory související s vodním tokem
- drsnost vodní hladiny (např. vlnění)
- rychlost proudění a promíchávání

vliv břehové vegetace
- zastínění vodní hladiny
- nehomogenní odraz a emise z vegetace, vytvářející prostorově heterogenní radiační podmínky

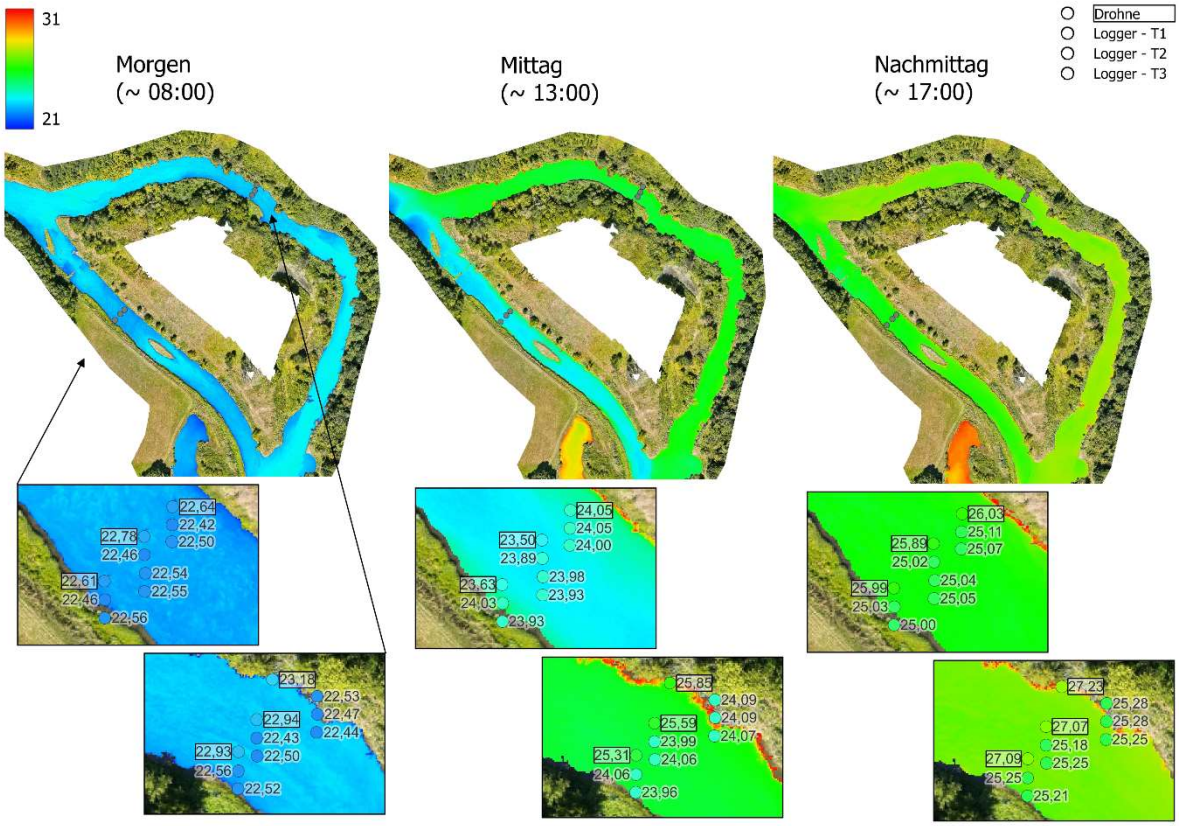
faktory měření a snímání
- proměnlivý úhel kamery v důsledku zakřiveného toku řeky
- časové rozdíly během letu nad jednotlivými sekcemi



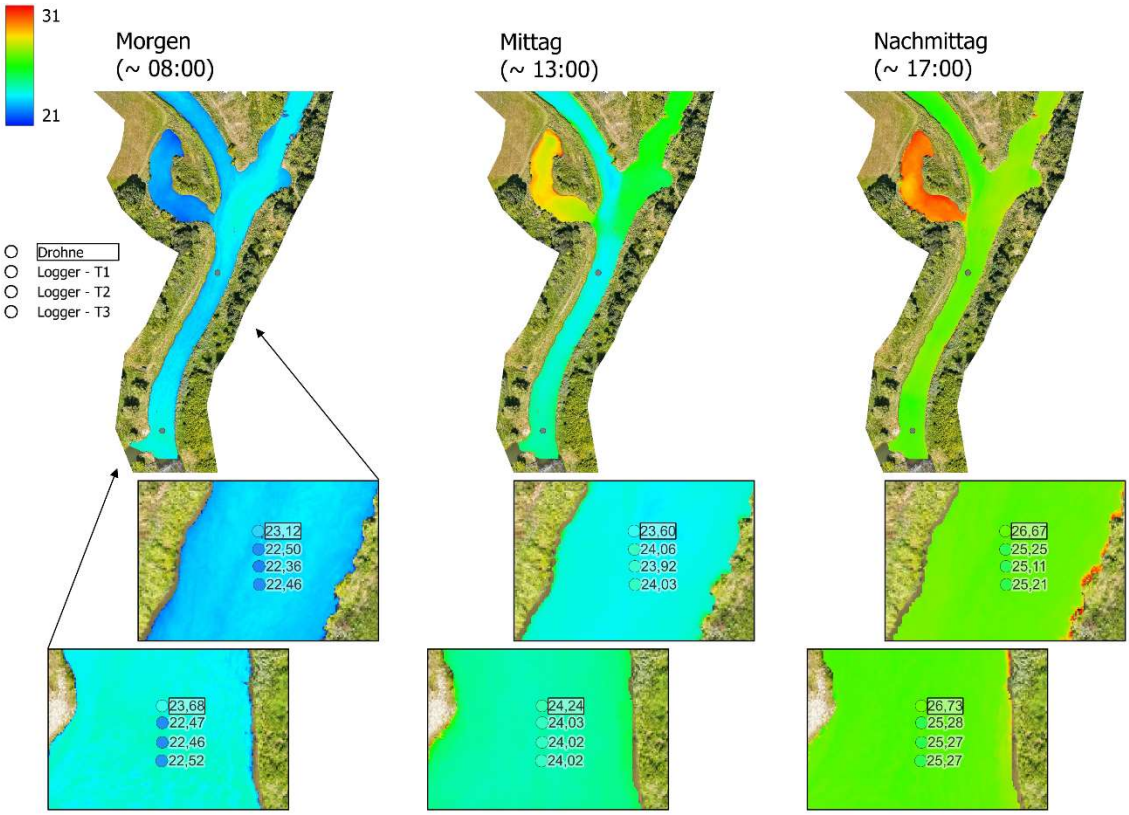
Obr. 2-21: Porovnání termografických dat z dronů a loggerů v regulovaném úseku



Obr. 2-22. Porovnání termografických dat z dronů a loggerů v heterogenním úseku, severní část



Obr. 2-23: Porovnání termografických dat z dronů a loggerů v heterogenním úseku, meandr D9



Obr. 2-24: Porovnání termografických dat z dronů a loggerů v heterogenním úseku, jižní část

Tabulka 2-3: Přehled dat z přírodě blízkého úseku, Obr. 2-22 až Obr. 2-24 (srovnání termografie a sond u hladiny)

	ráno			**poledne**			**odpoledne**			**nárůst teploty**		
ID lokality	termo-grafie [°C]	logger [°C]	ΔT [°C]	termo-grafie [°C]	logger [°C]	ΔT [°C]	termo-grafie [°C]	logger [°C]	ΔT [°C]	termo-grafie [°C]	logger [°C]	rozdíl nárůstu teploty termografie / logger
4_3	22,61	22,46	0,15	23,63	24,03	-0,40	25,99	25,03	0,96	3,38	2,57	32 %
4_2	22,78	22,46	0,32	23,5	23,89	-0,39	25,89	25,02	0,87	3,11	2,56	21 %
4_1	22,64	22,42	0,22	24,05	24,05	0.00	26,03	25,11	0,92	3,39	2,69	26 %
ΔT_{max} [°C] průkop			**0,32**			**-0,40**			**0,96**			
3_3	22,93	22,56	0,37	25,31	24,06	1,25	27,09	25,25	1,84	4,16	2,69	55 %
3_2	22,94	22,43	0,51	25,59	23,99	1,60	27,07	25,18	1,89	4,13	2,75	50 %
3_1	23,18	22,53	0,65	25,85	24,09	1,76	27,23	25,28	1,95	4,05	2,75	47 %
ΔT_{max} [°C] meandr			**0,65**			**1,76**			**1,95**		**2,75**	
2_2	23,65	22,47	1,18	26,34	24,16	2,18	27,72	25,29	2,43	4,07	2,82	44 %
2_1	x	22,45		x	24,14		x	25,26			2,81	
1	24,41	22,55	1,86	23,63	24,24	-0,61	26,53	25,3	1,23	2,12	2,75	-23 %
2_3	23,62	22,49	1,13	24,02	24,05	-0,03	26,73	25,18	1,55	3,11	2,69	16 %
5	23,12	22,5	0,62	23,3	24,06	-0,76	26,67	25,25	1,42	3,55	2,75	29 %
odtok	23,68	22,47	1,21	24,24	24,03	0,21	26,73	25,28	1,45	3,05	2,81	9 %
ΔT_{max} [°C]			**1,86**			**2,18**			**2,43**		**2,82**	
$\Delta T_{max,celk.}$ [°C]			**1,86**			**2,18**			**2,43**		**2,82**	

2.5 Shrnutí a závěr

Měření pomocí loggerů odhalila pouze nepatrné rozdíly v teplotě vody mezi oběma zkoumanými úseky řeky Dyje, které se manifestovaly především v různých denních teplotních amplitudách. Zatímco v přírodě blízkém úseku bylo v některých fázích pozorováno tlumení letních teplotních špiček, pozorované ochlazovací účinky byly obecně malé a částečně maskované antropogenním tepelným přínosem z čistírny odpadních vod Břeclav.

Jako nejvýznamnější faktor ovlivňující teplotu vody ve zkoumané oblasti se projevila nádrž VD Nové Mlýny, která způsobuje výrazné a trvalé ohřívání Dyje a současně podstatně mění přirozenou teplotní dynamiku řeky. Tento vliv významně převyšuje lokální ochlazovací účinky ve zkoumaných úsecích.

Vertikální teplotní gradienty vyplývající z větší hloubky vody nebo hlubokých tůní byly pouze slabé, takže hlubší úseky řeky ve zkoumané oblasti neslouží jako významná tepelná refugia.

Výsledky celkově ukazují, že morfologicky přírodě blízké struktury toku sice mohou mít lokální pozitivní vlivy na teplotní režim, jejich dopad ve zkoumané oblasti je však významně omezen celkovým tepelným zatížením – zejména vlivem VD Nové Mlýny a lokálními antropogenními tepelnými vstupy.

Plošné zobrazení povrchových teplot v termografii ukazuje, že podél profilu a osy vodního toku byly ve vzdálenosti několika málo metrů někdy zaznamenány, resp. vypočítány několikastupňové rozdíly. Platí to i pro plně osluněné sekce. Tak velké teplotní rozdíly na malých plochách nejsou ve vodním toku pravděpodobné. Výše popsané ovlivňující faktory vedly při tomto leteckém průzkumu k výsledkům, které nemohly být na základě jednotlivých měření celkově ověřeny, a proto ani zahrnuty do modelování habitatů.

Pro redukci některých výše uvedených ovlivňujících faktorů by se budoucí letecké průzkumy měly provádět za co nejhomogennějších rámcových podmínek. Jako vhodné se jeví zejména dva časy snímkování:

1. před východem slunce, kdy je teplota vody nejnižší a sluneční vlivy jsou minimální,
2. krátce po západu slunce, jako kompromis mezi předchozím oteplením vody a poměrně homogenními radiačními podmínkami.

Kromě toho by se mohla provádět referenční měření absolutní teploty, například pomocí referenčního tělesa se známou emisivitou (např. černá referenční plocha). Užitečný by byl i doplňkový průzkum v oblastech se slabým prouděním, kde by bylo možné vývoj teploty dále validovat pomocí dataloggerů. Taková referenční měření by mohla poskytnout informace o přesnosti stanovení absolutní teploty pomocí termografie a pomohla by lépe kvantifikovat zbývající nejistoty dané metody měření.

Obecně nabízí plošné termografické snímkování oproti bodovému měření výhodu vizualizace prostorových teplotních vzorců a lokálních variací v rámci toku. Pokud by výsledky byly validní, mohly by se takové informace použít například pro analýzu ekologie habitatů.

Pro tento výzkum je nicméně třeba poznamenat, že teploty vodní hladiny plošně zjišťované pomocí termografie nejsou reprezentativní pro průměrné teploty vody v řece Dyji. Za podmínek daného projektu proto není tato metoda vhodná pro zjišťování hydroekologicky relevantního působení teploty vody ani pro posouzení jejích dopadů.

3 Batymetrie

3.1 Výchozí situace

Za ideálních podmínek umožňuje průzkum vodního toku batymetrickým laserovým skenerem vytvořit kompletní a celistvý digitální model terénu. Tato data lze použít pro různé scénáře modelování průtoku při nízkých až vysokých stavech vody, ale i pro výpočet morfologických vlastností vodního toku, jako jsou hloubky tůní. Plošné zaměření dna je zvláště důležité pro ekologické výzkumy, jako například modelování habitatů.

Ideálními podmínkami pro snímkování zeleným laserem jsou měsíce bez vegetace, co nejnižší teplota vody a slabý průtok s minimálním zákalem.

Tyto podmínky však často nejsou z různých důvodů splněny (mj. časové vymezení projektu, vlastnosti vodního toku). Na Dyji často nepanují ideální podmínky, přesto může být i krátkodobé plošné zaměření říčního dna přínosné pro různá výzkumná zadání, a to i v nepříznivých obdobích. Například po povodni, aby se daly rychle posoudit změny toku, nebo aby se snížila závislost na vnějších limitujících podmínkách a tím zlepšila časová flexibilita při realizaci projektů.

V tomto projektu byl sběr dat naplánován na letní měsíce ze dvou důvodů. Zaprvé to vyžadoval časový harmonogram výzkumu v rámci projektu Interreg a zadruhé se tento výzkum zaměřuje na posouzení maximálních teplot vody v letních měsících. Proto zaměřování probíhalo za nepříznivých podmínek. Hustý břehový porost a velmi kalná voda vlivem přemnožení sinic ve výše položené nádrži představovaly výzvu a lze je považovat za zátěžový test pro tuto metodu.

3.2 Provedení sběru dat pomocí zeleného laseru

Podrobný popis provedených prací je uveden v závěrečné zprávě o letecké laserové batymetrii (Airborne Laser Bathymetrie, ALB) (příloha 1).

Sběr dat byl proveden v jednom letovém dni, 11. července 2025, pomocí vrtulníku vybaveného batymetrickým laserovým skenerem RIEGL VQ-840-GL.

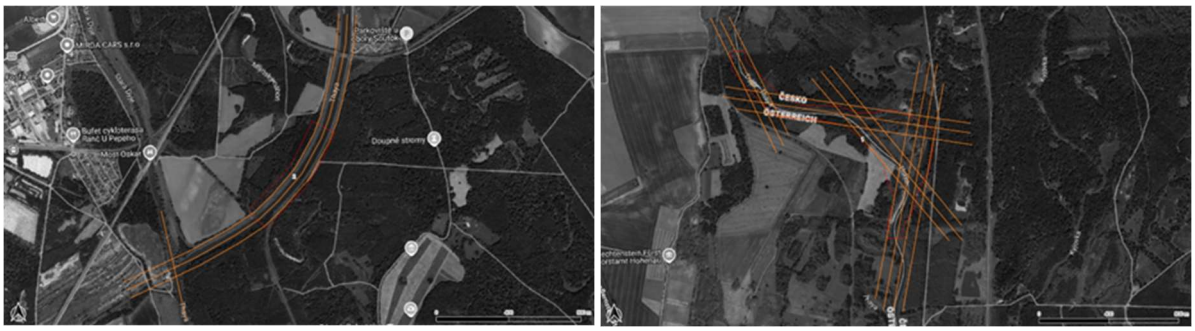
Pro dosažení optimálního pokrytí zkoumaného území byly podél osy vodního toku vytyčeny tři, resp. čtyři skenovací linie, podepřené ve strmém úhlu „registračními pásy“, aby bylo zajištěno stabilní vyrovnání mezi pásy (Obr. 3-1).

Jako nosná platforma sloužil vrtulník AS350 s maximálním užitečným zatížením 100 kg, maximální rychlostí 270 km/h a maximálním doletem 600 km.

V terénu byla provedena úvodní kontrola kvality. Již během letu byly potvrzeny nepříznivé podmínky (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.). Hustá vegetace zastiňovala velké části břehů. Voda byla také zhodnocena jako velmi zakalená, což může ztěžovat celistvé snímkování.

V prvním kroku byl pomocí komerčního softwaru („RiPROCESS“, LASTools) proveden postprocesing prvotních dat, odpovídající stavu techniky (výpočet trajektorií, úprava pásů a určení oblastí pokrytí, georeferencování a transformace).

V dalším kroku byl mračno bodů klasifikováno za účelem získání modelu vodní hladiny s velikostí buňky 2 m a byla provedena korekce refrakce (lomu laserového paprsku na vodní hladině).



Obr. 3-1: Vlevo: letový pás v regulovaném úseku, vpravo: letový pás v heterogenním úseku

3.3 Srovnávací měření a závěr

Pro ověření georeference byly zaměřeny dva referenční body poskytnuté zadavatelem. Při tom se ukázalo, že měření musí být výškově upraveno o 2 cm.

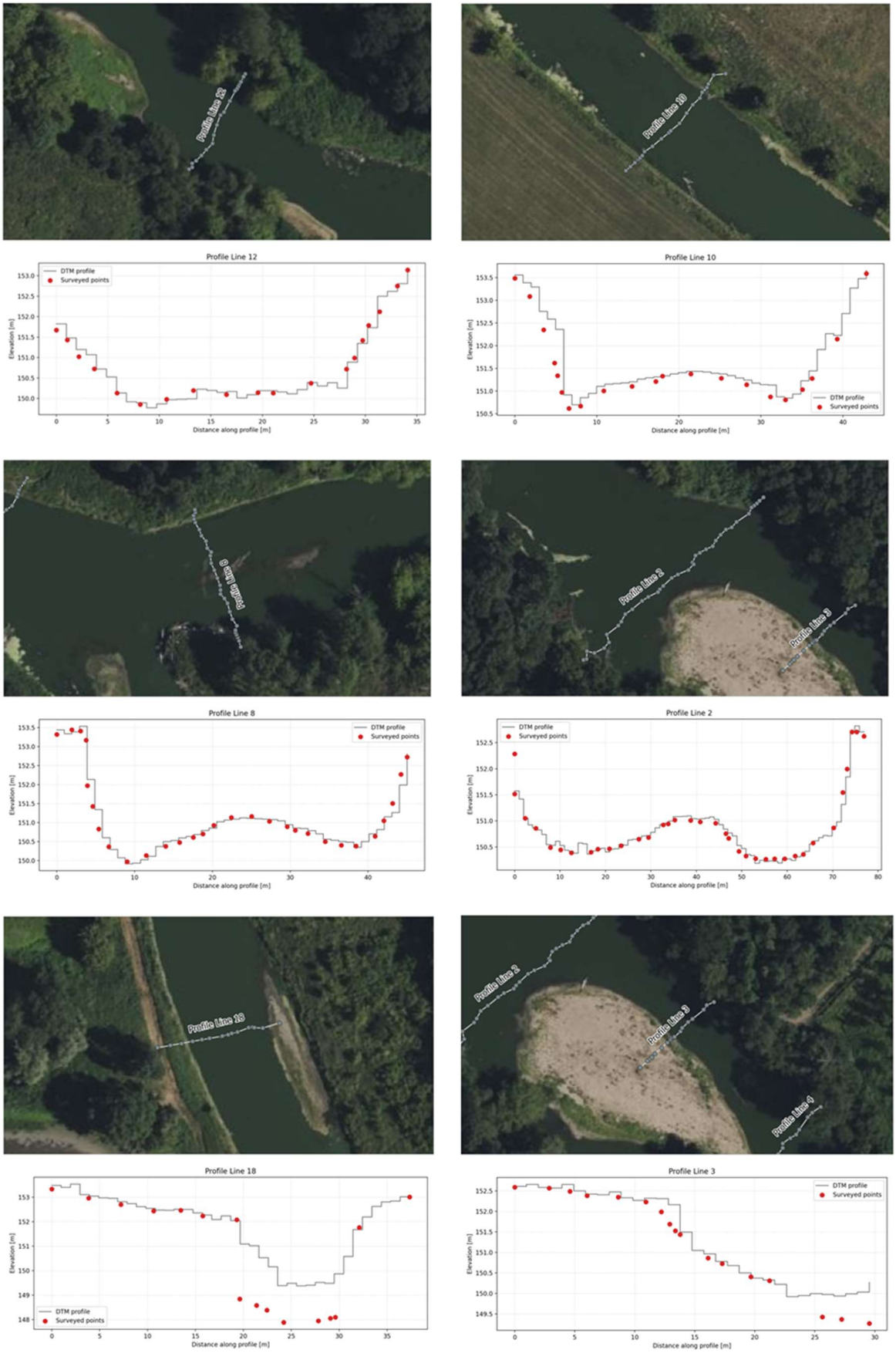
Jako reference sloužily také profily současně terestricky zaměřované firmou viadonau, což znamená, že nedošlo k žádný změnám vodního toku mezi leteckým snímkováním a zaměřováním, například v důsledku povodně. Zaměření bylo omezené na oblasti, kam se geodet mohl dostat pěšky. Oblasti s hlubokou vodou proto nemohly být zaznamenány. Poznámka: Chyba měření v terestrickém zaměřování, která vznikla v důsledku nesprávně zadané výšky tyče, byla v datové sadě opravena.

Digitální model terénu byl převeden do rastrových dat. V několika málo místech byly vyplněny mezery v plošném zaměření. Ty se omezovaly na jednotlivé oblasti s velmi hustou břehovou vegetací a oblasti s velkou hloubkou vody (tj. tůně).

Obr. 3-2 ukazuje řezy digitálním modelem terénu, sestaveným pomocí laseru, a porovnává je s body z terestrického zaměření. Toto srovnání obou datových sad ukazuje, že jednotlivě vznikly relevantní výškové odchylky. Celkově však můžeme konstatovat srovnatelnou přesnost. Z tohoto srovnání lze vyvodit následující omezení.

Vzhledem k panujícímu zákalu je hloubka průniku laserového skeneru omezena přibližně na 1,5 m. Pod touto hloubkou nelze ve vodě zaznamenat žádné relevantní body dna. Hustá vegetace na březích navíc brání spolehlivému zaměření stanovišť, která jsou často ekologicky hodnotná. Strmé břehy s nátržemi nejsou v rastrovém zobrazení kvůli velikosti rastru dostatečně znázorněny. Doporučujeme odvodit nátrže z mračna bodů, pokud je pro zadání výzkumu vyžadována vysoká přesnost (např. numerické modelování). Lze však předpokládat, že za chladnějších podmínek, s menším podílem plavenin ve vodě a s menším množstvím břehové vegetace je možné úplnější zaměření dna.

U projektů s ekologickými aspekty, kde se musí posuzovat citlivější habitaty, nicméně obecně doporučujeme plošné zaměření místo zaměřování příčných profilů. Nejistoty spojené s interpolací mezi profily způsobují značné nepřesnosti, zejména u revitalizovaných toků. Oblasti, které nejsou dostatečně pokryty plošným zaměřením, by se měly předem posoudit a pokrýt současným doplňkovým zaměřením.



Obr. 3-2: Srovnání digitálního modelu terénu (Skyability) a terestrického zaměření (viadonau)

4 Hydrodynamické a termodynamické modelování

4.1 Metodika

Numerické modelování bylo provedeno pomocí programu BASEMENT V4.2 (Vetsch et al., 2024). Topografickým podkladem pro všechny simulace bylo zaměření zeleným laserem, provedené v rámci tohoto projektu, a také data zaměření dna od viadonau z roku 2023.

Celkem byly vytvořeny tři modely: po jednom pro každý z obou pilotních úseků. Dále byla vytvořena síť propojující regulovaný a heterogenní úsek. Síť úseku mezi limnigrafickou stanicí Bernhardsthal a heterogenním úsekem byla vytvořena s využitím dat ze zaměření v roce 2023.[1]

V prvním kroku byly modely hydraulicky kalibrovány. Ve druhém kroku byly úseky kalibrovány pro teplotu a byla provedena analýza citlivosti. Nakonec byly poznatky z analýzy citlivosti aplikovány na úseky a na celkový model. V posledním kroku byl model použit k posouzení scénářů.

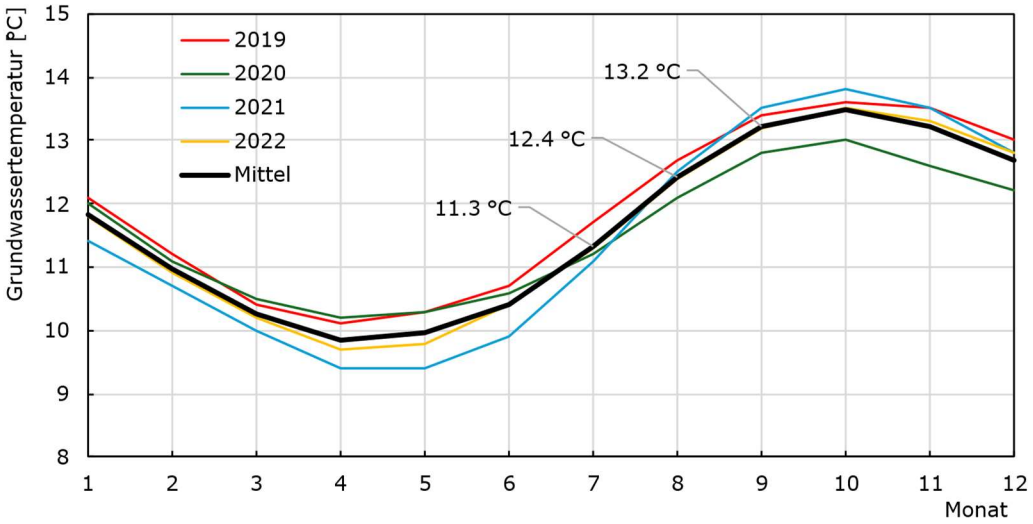
4.2 Datová základna

4.2.1 Batymetrie

K vytvoření modelu byla použita data shromážděná v rámci tohoto projektu na obou úsecích (viz kapitoly Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. a 3). Pro mezilehlý úsek bylo použito zaměření od viadonau z roku 2023. Tato datová sada zahrnuje napojení ramen (meandrů) z let 2016 až 2025 (Obr. 4-2). Pro úsek mezi regulovaným úsekem a Bernhardsthalem bylo interpolováno koryto.

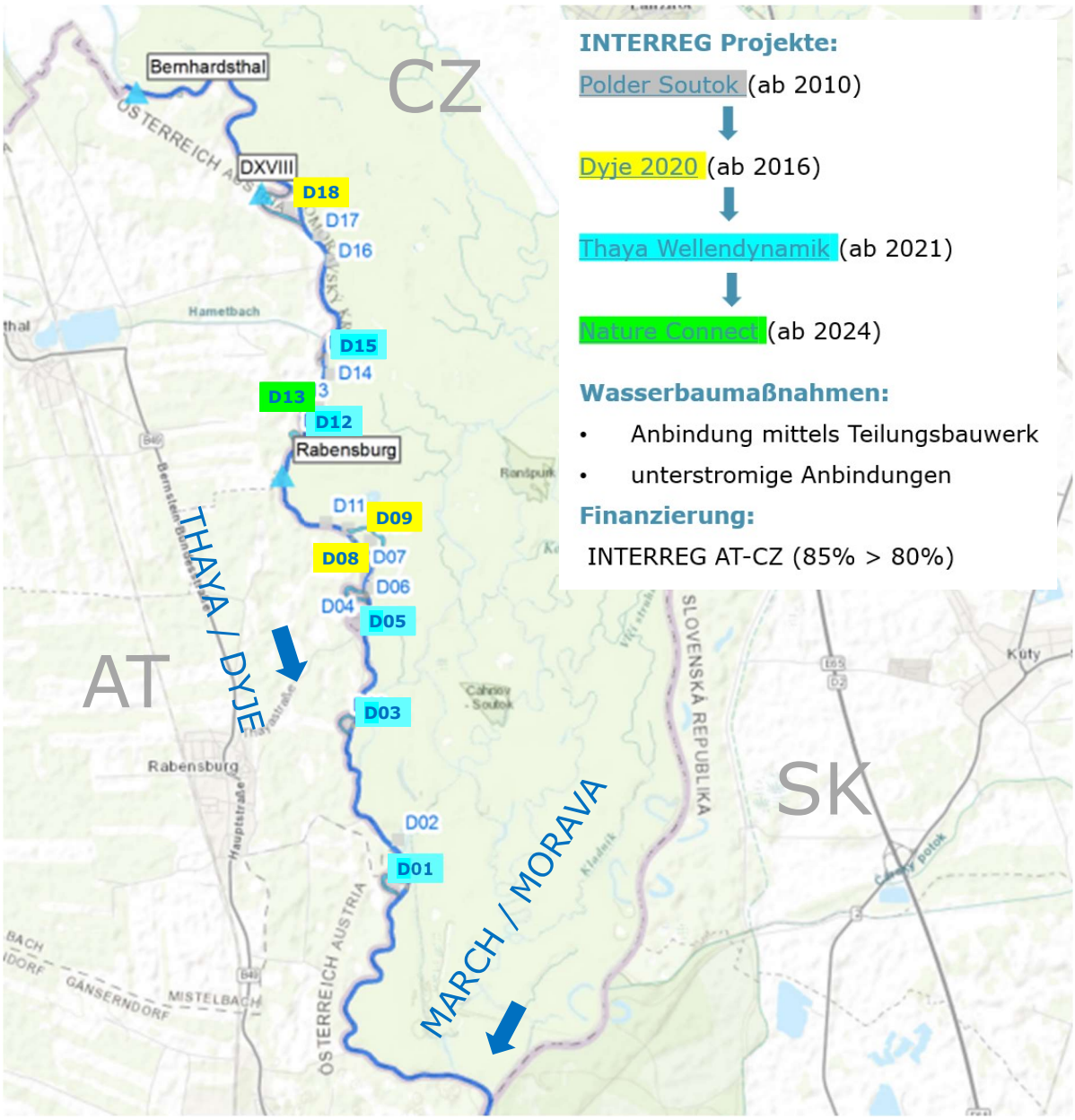
4.2.2 Údaje o podzemní vodě

Pro tento projekt byla využita data z monitorovací stanice podzemní vody v Bernhardsthalu (326629). Data byla k dispozici za roky 2019 až 2022 (Obr. 4-1). Průměrné měsíční hodnoty vykazují výrazný sezónní průběh s pouze nepatrnými rozdíly v jednotlivých měsících. Od července do září se teplota pohybuje od 11 °C do 13 °C.



Obr. 4-1 Teplota podzemní vody na monitorovací stanici podzemní vody Bernhardsthal

[1] Vytvoření tří modelů nebylo původně plánováno, ale vyplynulo z dynamického průběhu projektu. Ukázalo se, že z obou pilotních úseků lze vypracovat robustní modely. Vzhledem k tomu, že mezi limnigrafickou stanicí Bernhardsthal a heterogenním úsekem byla k dispozici data s vysokým rozlišením, bylo po dohodě se zadavatelem rozhodnuto model prodloužit, aby se získaly další poznatky a hlubší pochopení procesů na Dyji.



Obr. 4-2 Napojená odstavená ramena Dyje: 2016 až 2025 (zdroj: viadonau)

4.2.3 Zastínění

Zastínění hraje klíčovou roli pro teplotu vodní plochy (Melcher et al., 2016) a je hlavním parametrem pro kalibraci numerického modelu. Počáteční klasifikace pro oba úseky byla provedena pomocí ortofoto snímků (viz Obr. 2-5).

Regulovaný úsek: Délka toku v regulovaném úseku mezi dataloggery na přítoku a odtoku je 1388 m. Na levém břehu se v 70 % délky nachází přibližně 25 m široký pás bez porostu (hráz), který přiléhá k lesu. Na zbývajících 30 % délky les sahá až k řece Dyji. Na pravém břehu se po celé délce nachází pás bez porostu široký kolem 25 metrů, na který navazuje z 66 % les a z 34 % louka, resp. zemědělská půda. Využití půdy podél Dyje v regulovaném úseku je tedy:

- 15 % bezprostředně přilehlý les
- 17 % louka nebo zemědělská půda
- 68 % 25 metrů široký pás bez porostu navazující na les

Šířka hladiny je jednotná kolem 42 m.

Heterogenní úsek: Délka toku v heterogenním úseku mezi dataloggery na přítoku a odtoku podél meandru činí 2245 m. Na levém břehu je na 79 % délky les a na 21 % tvoří louka nebo lesní výsadba s nízkými stromy. Na pravém břehu je 64 % délky zalesněno a 36 % tvoří louky s rozptýlenými stromy. Využití půdy podél Dyje v heterogenním úseku je tedy:

- 72 % bezprostředně přilehlý les
- 28 % louka s několika stromy / lesní výsadba

Podél průkopu je pak z cca 84 % louka a z 16 % les.

Šířka hladiny se pohybuje mezi 30 m a 71 m (včetně středového nánosu nebo součtu průkopu a meandru).

Zastínění je zvlášť důležité pro teplotu vody v malých a středních vodních tocích. V takových vodách může střední zastínění (40 až 60 procent plochy) obecně bránit dalšímu ohřívání, zatímco střední až silné zastínění (60 až 100 procent) způsobuje při střední až vysoké počáteční hodnotě dokonce ochlazení (Mende & Sieber, 2022). Vzhledem k velikosti vodního toku a stávající břehové vegetaci tak nelze v současné době a priori předpokládat, že se Dyje v řešeném území bude ochlazovat nebo alespoň nebude dále oteplovat.

4.2.4 Průtok a teplota vody (limnigrafická stanice Bernhardsthal)

Na limnigrafické stanici Bernhardsthal (státní hranice, bod IX) zaznamenává společnost viadonau teplotu vody a výšku hladiny a odvozuje z toho průtok. Tato data s rozlišením 1 hodiny v příslušném období dala společnost viadonau k dispozici.

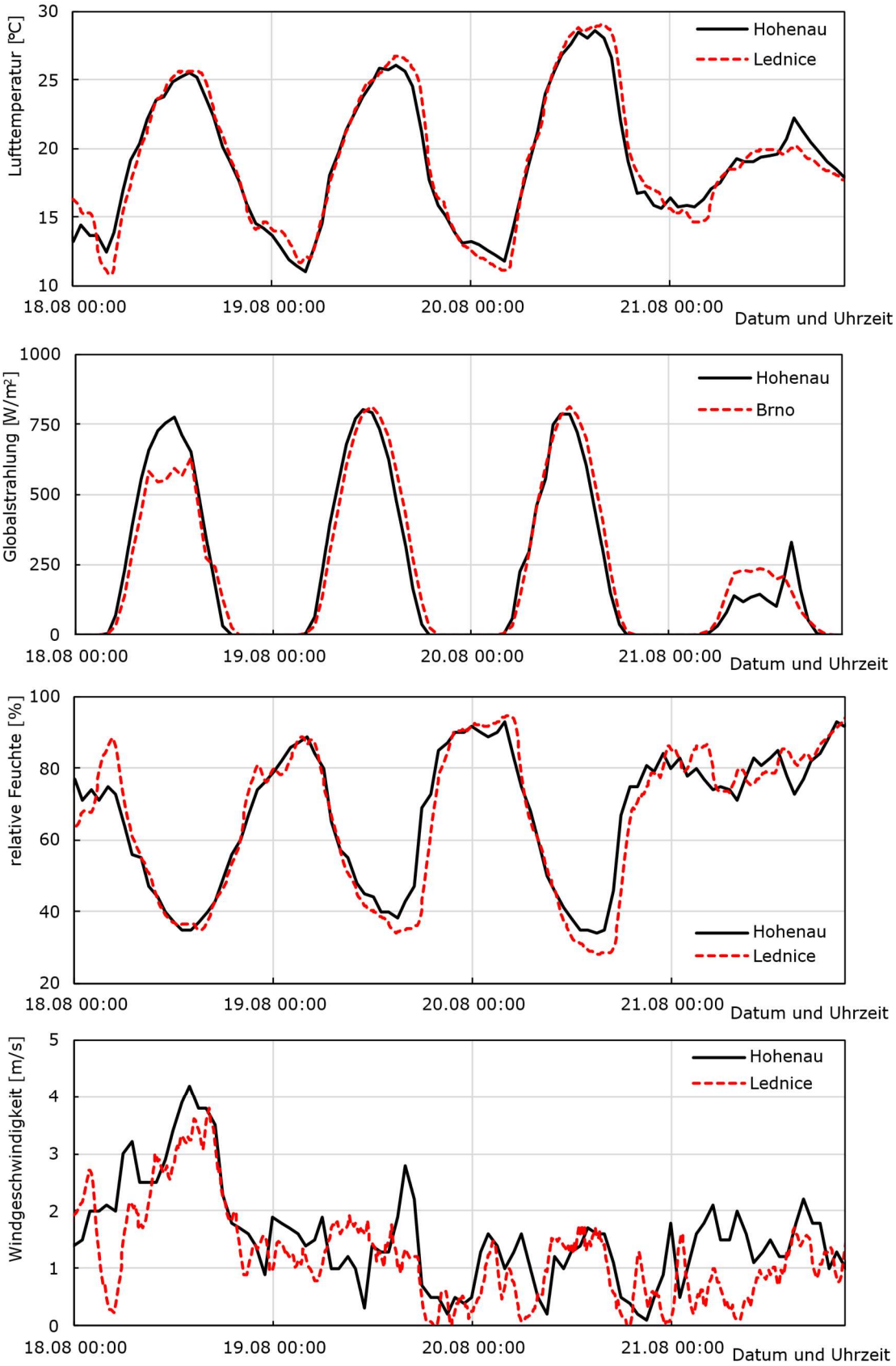
4.2.5 Meteorologická data

Pro zobrazení meteorologických poměrů ve zkoumané oblasti byla od společnosti GeoSphere Austria získána data z meteorologické stanice Hohenau za období od 1. 7. 2025 do 30. 11. 2025.

Pro modelování teploty vody byly zohledněny hodinové průměrné hodnoty teploty vzduchu, globálního záření, relativní vlhkosti a rychlosti větru.

Pro ověření, do jaké míry jsou naměřená data z Hohenau reprezentativní pro řešené území, byla použita také data od ČHMÚ z měřicí stanice Lednice. Vzhledem k tomu, že globální záření se na stanici Lednice neměří, byla pro tento parametr použita navíc stanice Brno.

Obr. 4-3 ukazuje srovnání meteorologických dat (teplota vzduchu, globální záření, relativní vlhkost a rychlost větru) ze stanic Hohenau, Lednice a Brno v období od 18. srpna 2025 do 22. srpna 2025. Hodnoty ze stanic pro všechny čtyři parametry se velmi dobře shodují. Vítr sice může být značně proměnlivý jak v prostoru, tak v čase, data přesto vykazují vysokou shodu. Rozdíly v globálním záření ke dni 18. srpna mohou být způsobeny lokálně omezenými vlivy, například oblačností. Data pro další dva dny se však velmi dobře shodují. Lze tedy předpokládat, že měření ze stanice Hohenau jsou pro řešené území reprezentativní.



Obr. 4-3 Srovnání meteorologických dat (teplota vzduchu, globální záření, relativní vlhkost a rychlost větru) pro stanice Hohenau, Lednice a Brno.

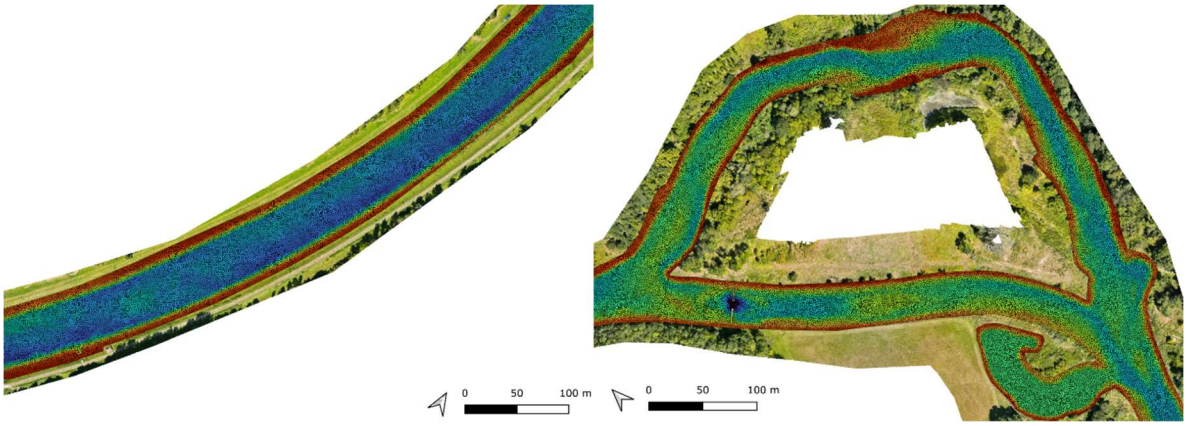
4.3 Hydrodynamický model

4.3.1 Perimetr

Perimetr zkoumaných úseků zahrnuje oba pilotní úseky. Prostorový rozsah je určen umístěním hrany břehů, tzn. modelována byla pouze oblast mezního průtoku. Pro oblast mezi regulovaným úsekem a Bernhardsthalem, nacházející se v ČR, nebyla k dispozici žádná data pro dno. Proto byl tento úsek interpolován. Vzhledem k velmi homogennímu vzhledu Dyje v této oblasti se neočekávají žádné významné chyby.

4.3.2 Vytvoření sítě

Pro co nejlepší zobrazení geometrie a jejích maloplošných variací byla výpočetní síť konstruována z nepravidelných trojúhelníkových prvků s průměrnou plochou 1,3 m². Výpočetní síť pro regulovaný úsek obsahuje přibližně 85.000 výpočetních buněk a síť pro heterogenní úsek přibližně 70.000. Celkový model obsahuje přibližně 575.000 výpočetních buněk. Analýza citlivosti ověřila také vliv velikosti buněk (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.).



Obr. 4-4: Výpočetní síť pro regulovaný úsek (vlevo) a heterogenní úsek (vpravo)

4.3.3 Okrajové podmínky

Hydraulické okrajové podmínky: Pro přítok do modelů byl jako horní limit použit odtok na limnigrafické stanici Bernhardsthal. Na dolním konci každého úseku byla v rámci kalibrace zjištěna podmínka normálního odtoku se stanoveným spádem.

Přítoky: Jediný přítok v řešeném území, Hammelbach (resp. Hametbach), byl z hlediska průtoku a teploty považován za nevýznamný, a proto nebyl zohledněn.

Výše nad Břeclaví z Dyje odbočuje odlehčovací kanál (Poštorná). Tento odlehčovací kanál ústí zpět do Dyje na dolním konci regulovaného úseku. Podle Povodí Moravy nejsou pro tento kanál k dispozici žádné údaje o průtoku. Lze však předpokládat, že za nízkých až středních průtoků tímto kanálem neprotéká více než 0,5 m³/s. Proto bylo pro všechny simulace regulovaného úseku od průtoku v Bernhardsthalu odečteno 0,5 m³/s. Protože model regulovaného úseku zahrnuje soutok odlehčovacího koryta s Dyjí, byl zde předpokládán konstantní přítok 0,5 m³/s.

4.3.4 Hydrodynamická kalibrace

Kalibrace obou úseků byla provedena podle průtoku k okamžiku měření zeleným laserem a podle bodů v laserovém skenu klasifikovaných jako voda. Dále byla provedena vizuální kontrola s využitím smáčené plochy na ortofotu, přičemž linie zaplavení ortofota byly porovnány s liniemi zaplavení

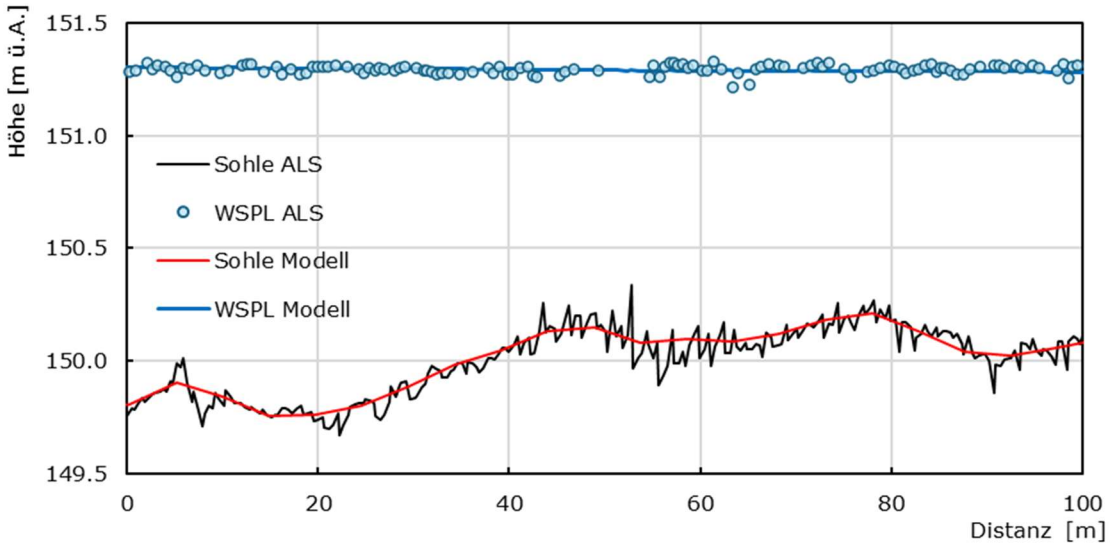
modelu. Je třeba konstatovat, že body klasifikované jako vodní hladina vykazují značný rozptyl (viz Obr. 4-5).

Regulovaný úsek: Odchylky polohy vodní hladiny mezi modelem a mračnem bodů činí v průměru -5,2 cm ± 3,4 cm (Δ_{min} = -0,10 m, Δ_{max} = 0,24 m).

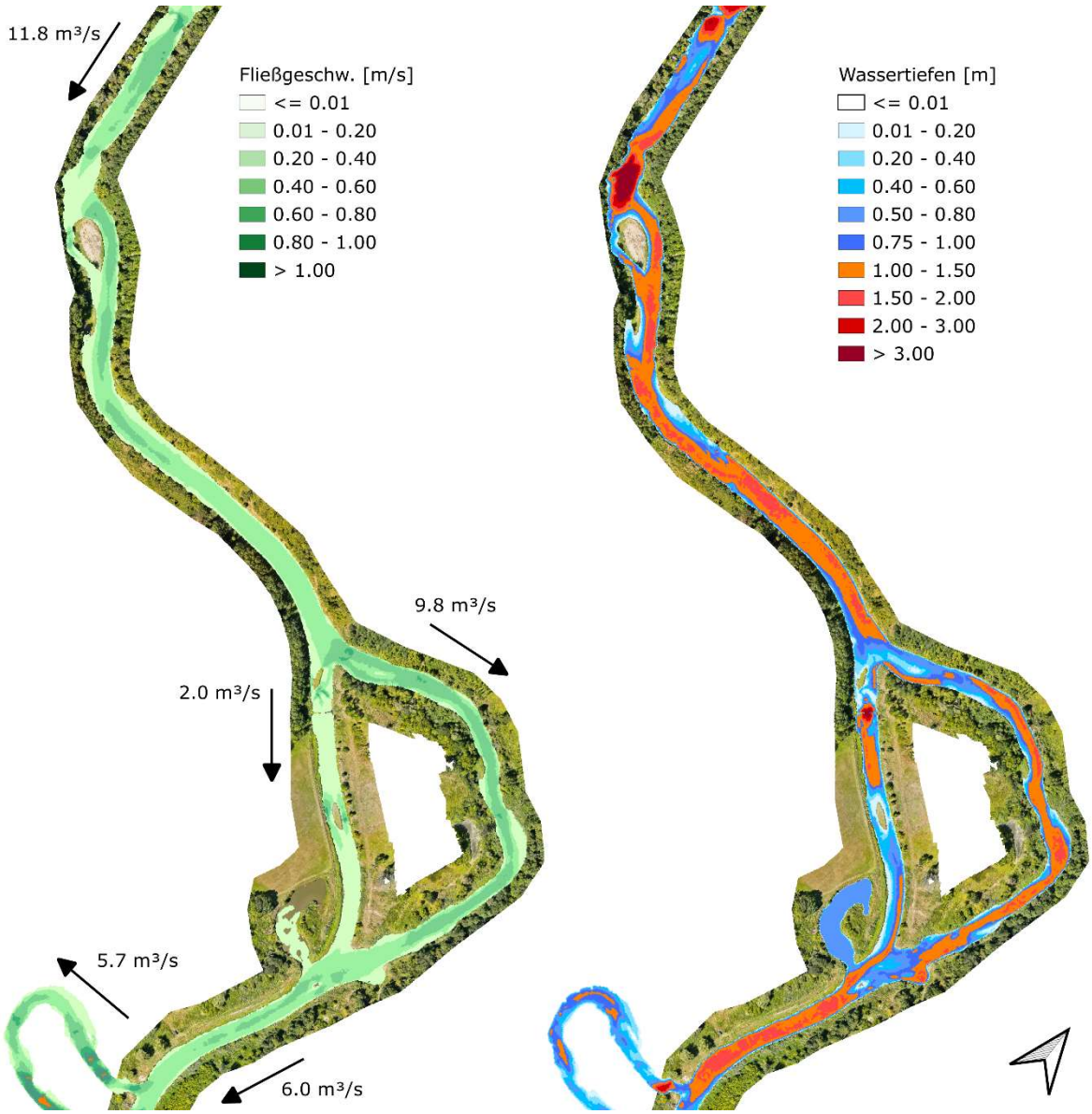
Heterogenní úsek: Odchylky polohy vodní hladiny mezi modelem a mračnem bodů činí v průměru 3,8 cm ± 7,0 cm (Δ_{min} = -0,14 m, Δ_{max} = 0,19 m). Větší odchylky se vyskytují v oblasti ramp. Zde je klasifikace zatížena značnou nejistotou v důsledku vícefázového proudění (vnikání vzduchu). Měření vodní hladiny je navíc velmi nepřesné v důsledku velmi vysokých turbulencí a vlnobití. Hloubkově zprůměrovaný numerický 2D model u těchto 3D proudění naráží na své limity. Na Obr. 4-6 jsou pro příklad znázorněny rychlosti proudění a hloubky vody pro heterogenní úsek.

Protože mezi oběma úseky nebyly k dispozici kalibrační údaje, byly převzaty hodnoty drsnosti obou úseků a věrohodnost modelu byla ověřena vizuálně.

Celkově je k dispozici robustní model, který dokáže velmi dobře zobrazit poměry proudění při nízkých a středních stavech vody.



Obr. 4-5 Příklad srovnání geometrií a poloh vodní hladiny. Upozornění: velký rozptyl bodů klasifikovaných jako vodní hladina.

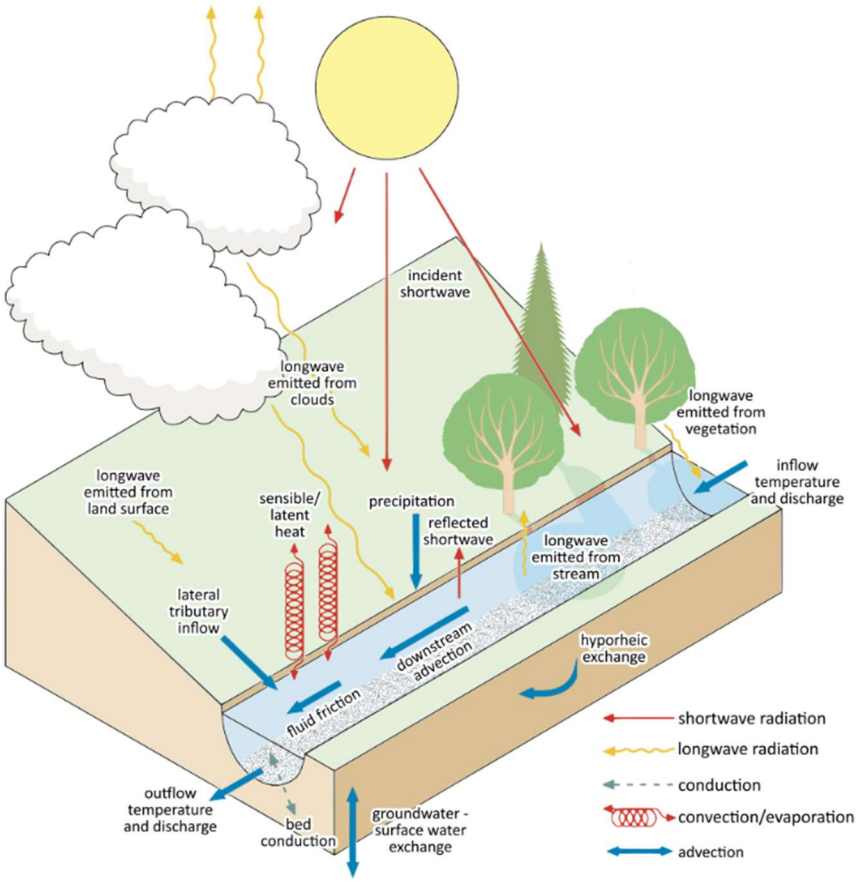


Obr. 4-6 Rychlosti proudění a hloubky vody pro průtok 11,8 m³/s.

4.4 Termodynamický model

4.4.1 Úvod

Numerické modelování termodynamiky dosud není v inženýrské praxi zavedeno, je stále v plenkách a v současné době představuje velkou výzvu. Aplikace dvourozměrného hloubkově zprůměrovaného modelu vyžaduje početná terénní data v dostatečném množství a kvalitě (atmosféra, podzemní voda, topografie atd.). Dále je nezbytný velmi robustní numerický model s vysokým prostorovým a časovým rozlišením. Kromě dat a procesů, které je třeba při hydrodynamickém modelování zohlednit, je třeba vzít v úvahu další procesy výměny energie, které určují teplotu vodních toků a nádrží. Přehled těchto procesů výměny je uveden na Obr. 4-7.



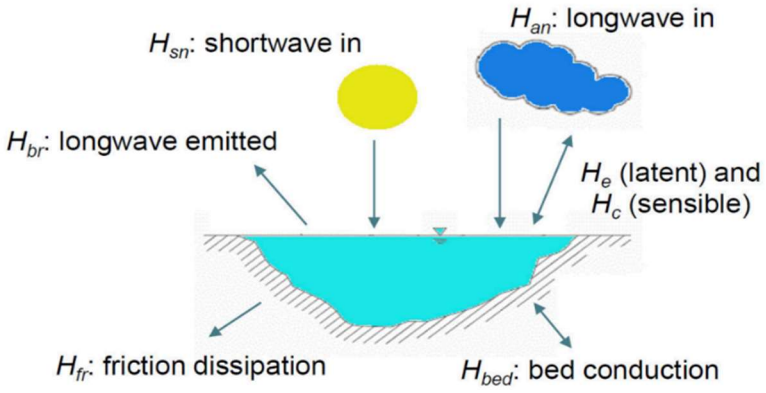
Obr. 4-7: Procesy výměny energie a hydrologické procesy, určující teplotu vodních útvarů (upraveno podle Dugdale et al. 2017)

Teplota vody je modelována v softwaru BASEMENT pomocí advekčně-difuzně-reakční rovnice (Vanzo et al., 2016). Pro modelování teploty jsou relevantní dva procesy, totiž pasivní advekce a difuze.

- V mechanice tekutin, meteorologii a oceánografii pasivní advekce označuje transport látek, tepla nebo jiných vlastností, které jsou pasivně unášeny proudícím médiem (např. vzduchem nebo vodou). Transportovaný materiál přitom nemá žádný významnější vliv na dynamiku samotného proudového pole.

- Difuze je pohyb částic z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s nižší koncentrací, poháněný tepelnou energií. Tento stochastický, přirozený proces pokračuje tak dlouho, dokud není dosaženo rovnováhy, a tím zajišťuje rovnoměrné rozložení bez nutnosti přísunu vnější energie.

Obr. 4-8 ukazuje tepelné toky, které lze zohlednit v softwarovém balíčku BASEMENT. Globální záření (H_{sn}, shortwave in), tj. celkové sluneční záření dopadající na horizontální přijímací plochu na zemském povrchu, je korigováno o albedo (= 3 %) a uživatelem zadaný faktor zastínění SF [0 až 1]. Další tepelné toky jsou určeny pomocí empirických rovnic:



Obr. 4-8: Schematické znázornění tepelných toků, které lze zohlednit v softwarovém balíčku BASEMENT (Vetsch et al., 2024)

H_{an}, longwave in = teplota vzduchu, relativní vlhkost
H_{br}, longwave emitted = teplota vody
H_e, evaporation (latent) heat flux = teplota vzduchu, rel. vlhkost vzduchu, rychlost větru
H_c, convective (sensible) heat flux = teplota vody, teplota vzduchu, rychlost větru
H_b, bed conduction = empirická rovnice
H_{fr}, friction dissipation = empirická rovnice

Pro modelování jsou tedy zapotřebí naměřené atmosférické hodnoty globálního záření, teploty vzduchu, rychlosti větru a relativní vlhkosti vzduchu.

4.4.2 Okrajové podmínky

Jako okrajové podmínky pro příslušný časový interval (hodinové rozlišení) byly použity tyto údaje:

- meteorologická data (teplota vzduchu, globální záření, relativní vlhkost a rychlost větru) z měřicí stanice Hohenau (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.),
- teplota podzemní vody z limnigrafické stanice Bernhardsthal (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.),
- údaje o průtoku a teplotě vody z limnigrafické stanice Bernhardsthal (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.) a
- naměřená teplota vody z dataloggerů (viz kapitola 2.2).

4.4.3 Kalibrace a validace

Kalibrace: Oba úseky byly kalibrovány pro období 19. až 21. srpna 2025, jelikož termografie[2] proběhla 20. srpna. Na začátku modelování byla přidána naměřená teplota vody a kalibrace proběhla na konci modelování na základě měření z dataloggerů. Zastínění (SF) bylo zohledněno denní teplotní amplitudou pro celý úsek, což znamená, že nedošlo k prostorové diferenciaci zastínění. Difuze a modely turbulence nebyly vloženy.[3]

Kvalita kalibrace se řídí podle přesnosti měření dataloggerů. Bylo stanoveno, že odchylka ± 0,2 °C mezi loggerem a modelem bude považována za dobrou kalibraci a odchylka ± 0,1 °C za velmi dobrou kalibraci.

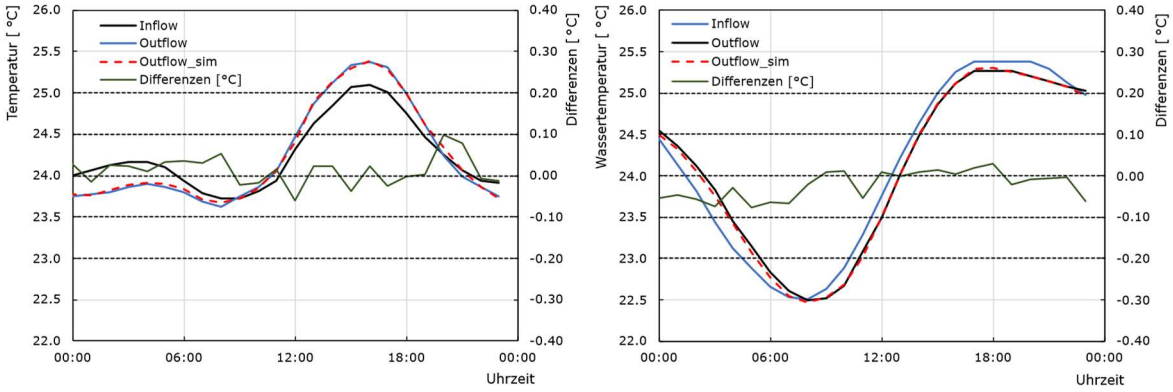
Obr. 4-9 a *Obr. 4-10* ukazují výsledky kalibrace pro regulovaný a heterogenní úsek a výsledné zastínění (SF). V nočních hodinách dokáže model velmi dobře simulovat změnu teploty ve zkoumaném úseku toku bez nutnosti kalibrace (zastínění má vliv pouze na globální záření, které je přítomno mezi 6. a 21. hodinou). Během dne lze model velmi dobře kalibrovat pomocí zastínění

[2] Vzhledem ke kvalitě termografie nebyla tato data v numerickém modelování zohledněna.
[3] Podrobná analýza difuze a modelu turbulence byla provedena v rámci analýzy citlivosti.

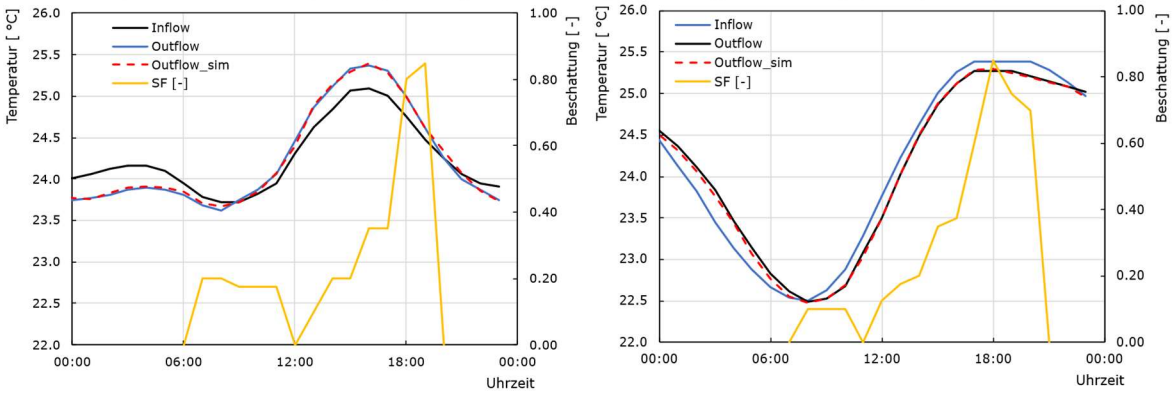
(SF). Rozdíly mezi měřením a modelem jsou řádově stejné jako přesnost měření dataloggerů. V denní teplotní amplitudě nelze najít žádné systematické odchylky ani posuny. To znamená, že hydraulika a advekce fungují správně a tím i přenos signálu (teplo). Celkově je kalibrace pro oba úseky velmi dobrá.

Obr. 4-11 ukazuje, že průměrné denní zastínění v heterogenním úseku je o cca 20 % větší než v regulovaném úseku. Dopolední zastínění >0,2 je malé a do poledne dále klesá. Pozdě odpoledne (18:00) dosahuje nejvyšších hodnot až 0,85. Klasifikace stínění byla provedena v kapitole Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.. V regulovaném úseku se sice blízko břehu nachází méně stromů, nebo je zde až ve vzdálenosti 25 m les, při nízké poloze slunce však mohou Dyji výrazně zastínit.

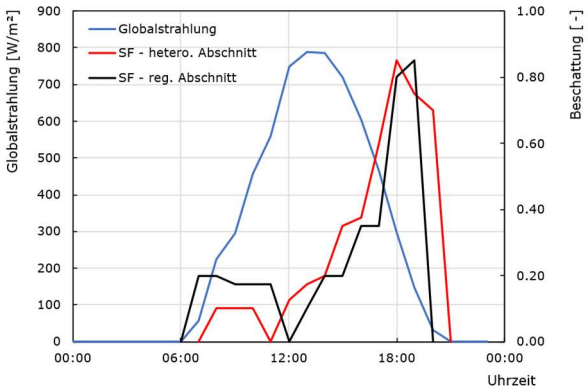
Faktor zastínění lze interpretovat jako obecnou kalibrační proměnnou, která zohledňuje nejen efektivní zastínění způsobené např. břehovou vegetací, ale také nejistoty v lokálním (mikro)klimatu nebo vlastnostech vody (albedo, zákal). Lze tedy konstatovat, že vyjádření týkající se zastínění jsou zatížena určitou nejistotou a že se pro budoucí aplikaci teplotního modelu doporučuje podrobnější analýza procesů, které mohou faktor zastínění ovlivnit.



Obr. 4-9: Výsledek kalibrace pro regulovaný úsek (vlevo) a heterogenní úsek (vpravo) 20.srpna 2025



Obr. 4-10: Výsledné zastínění (SF) kalibrace pro regulovaný úsek (vlevo) a heterogenní úsek (vpravo) 20.srpna 2025



Obr. 4-11: Porovnání výsledného zastínění (SF) kalibrace pro regulovaný úsek a heterogenní úsek a globální záření 20. srpna 2025

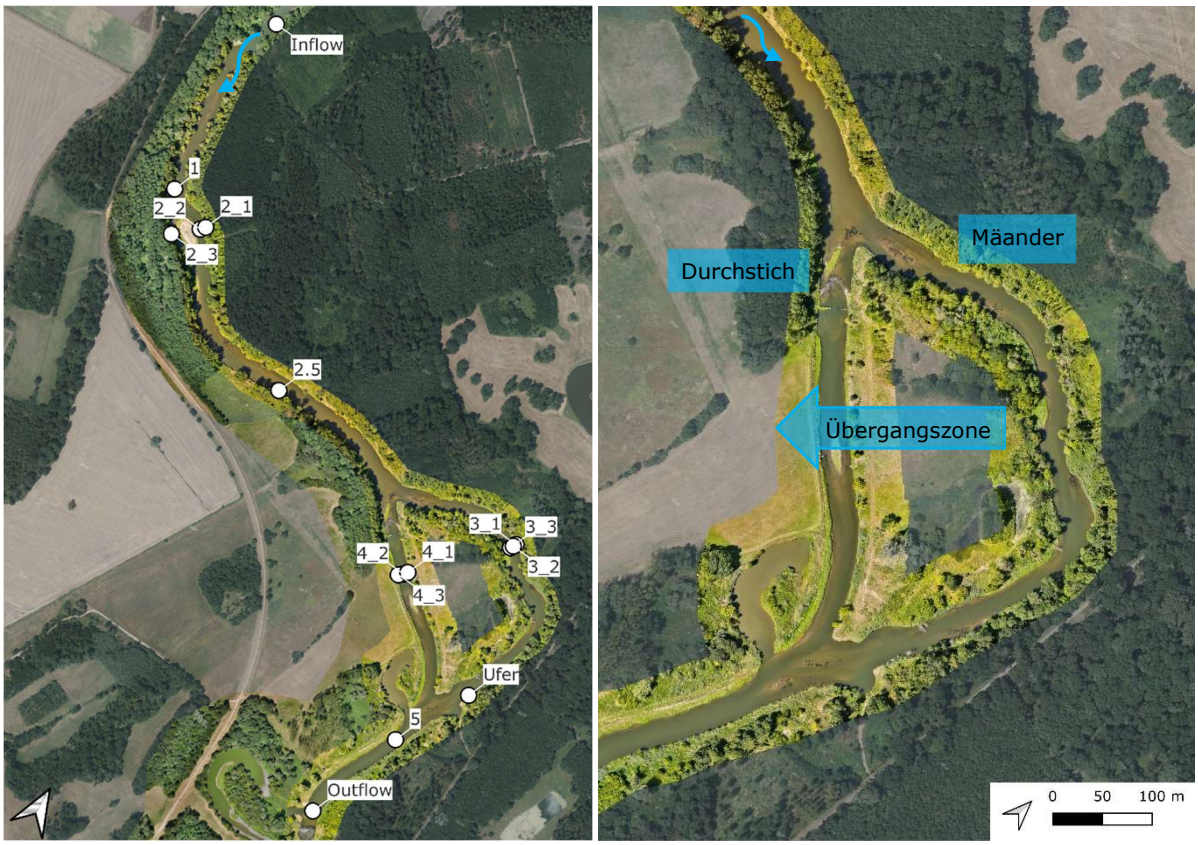
Prostorové rozložení teploty: Ve druhém kroku byly simulované teploty vody porovnány s údaji z dataloggerů ze všech lokalit, aby se ověřilo modelované prostorové rozložení teploty vody. Obr. 4-13 ukazuje toto srovnání pro všechny lokality. Až na několik málo výjimek se rozdíly pohybují v rozmezí ± 0,2 °C (dobrá kalibrace) a převážně ± 0,1 °C (velmi dobrá kalibrace). Umístění dataloggerů je na Obr. 4-12.

Větší odchylky lze vysvětlit lokálními vlivy, například logger 2.3 se nachází v zóně se slabým prouděním (mrtvé dřevo) pod velkým stromem. Roli zde hraje jednak zastínění, jednak nejistoty v batymetrii, které nelze metodou ALB pod stromy zachytit. K tomu přistupuje difuze, která nebyla v této simulaci zahrnuta (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.). Prostorové rozlišení teploty vody lze zlepšit jemněji rozlišeným zastíněním. Pro účely tohoto projektu a jeho rozsahu však považujeme provedené zjednodušení faktorů ovlivňujících zastínění za dostatečně přesné.

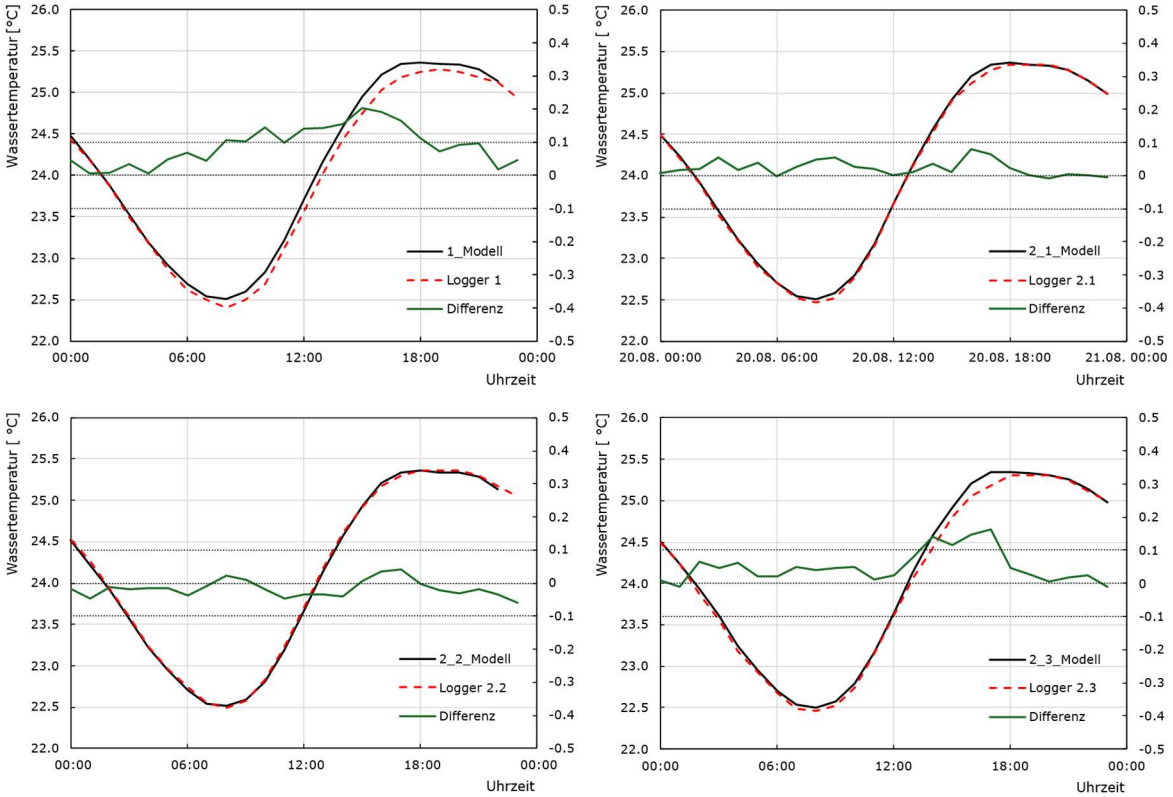
V průkopu (loggery 4.1 až 4.3) lze odpoledne systematicky pozorovat nižší teploty ve srovnání s napojeným meandrem (loggery 3.1 až 3.2). Tyto rozdíly nejsou v modelu zachyceny. Počáteční hypotézou pro tyto lokální rozdíly byl průsak podzemní vody mezi rampou a štětovnicí. Štětovnice a/nebo vývařiště by mohly zvýšit propustnost dna. Štětovnice mohla prorazit nepropustnou vrstvu, kolmaci ve vývařišti považujeme za méně pravděpodobnou. Tato hypotéza byla ověřována v kapitole Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. „Podzemní voda" a nakonec musela být zamítnuta.

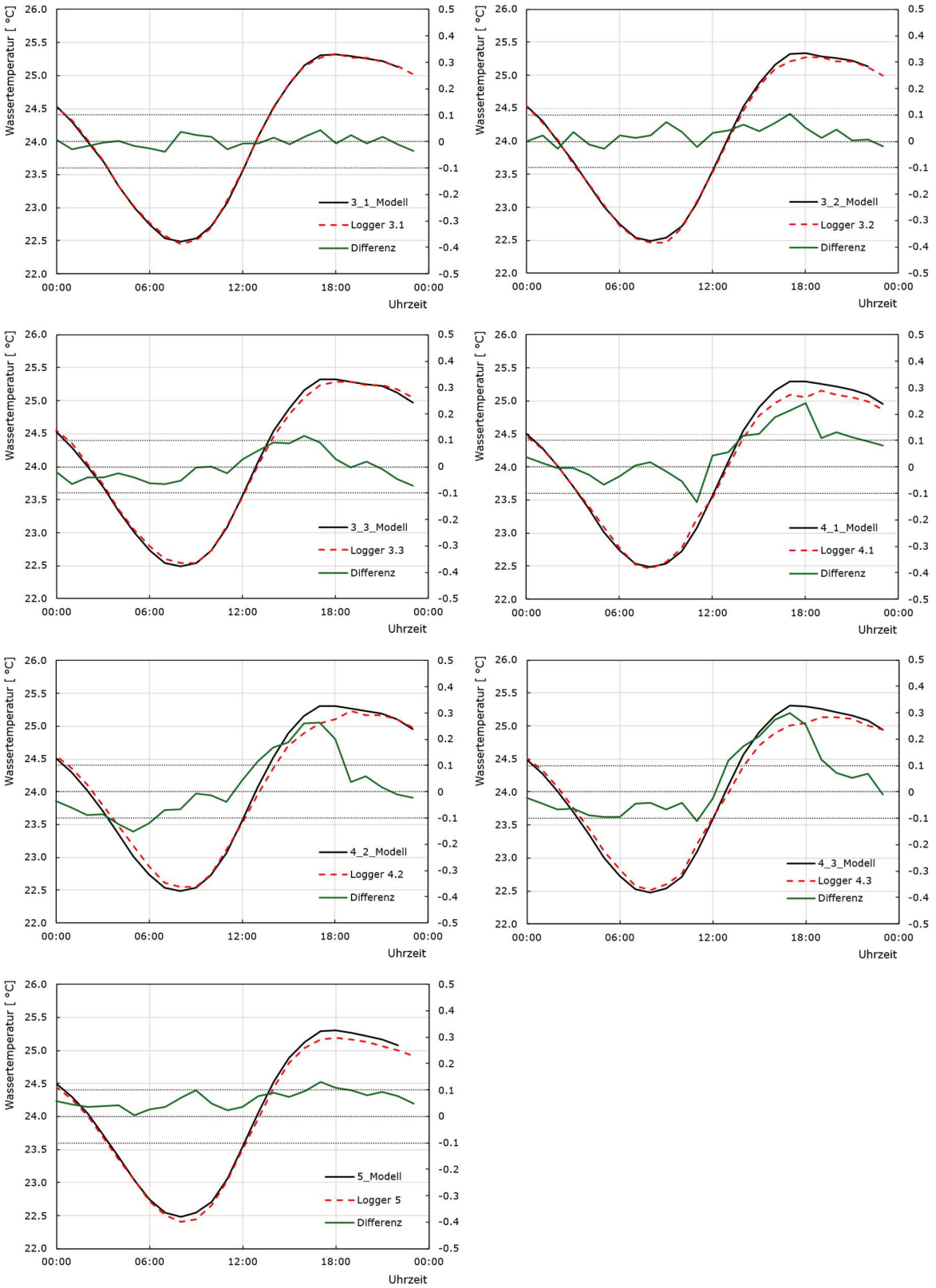
Ani zastínění pravděpodobně nebude dostatečným vysvětlením, protože v průkopu je výrazně menší než v meandru. Lokální zastínění proto nemůže vést k tak výraznému efektu (Obr. 4-12). Na Obr. 4-12 je jasně patrné, že na pravém břehu v této oblasti zcela chybí vegetace a vede tu koridor představující přechodovou zónu mezi lesem a zemědělskou půdou nebo loukou. V takových přechodových zónách mezi lesem a zemědělskou půdou se mohou vyskytovat významné klimatické rozdíly (vč. větru, teploty vzduchu a vlhkosti). Tyto rozdíly v teplotě vzduchu mohou dosahovat až několika stupňů Celsia (Schmidt et al. 2019).

Pro zjištěné rozdíly může být dále rozhodující nerovnoměrné rozdělení průtoku mezi meandrem a průkopem (viz Tabulka 4-1). Za věrohodné vysvětlení těchto malých rozdílů v teplotě vody mezi průkopem a meandrem tak považujeme kombinaci mikroklimatu a malého průtoku v průkopu.



Obr. 4-12: Vlevo: Přehled umístění a označení dataloggerů použitých pro numerické modelování. Vpravo: Využití půdy s přechodovou zónou v oblasti průkopu a meandru.





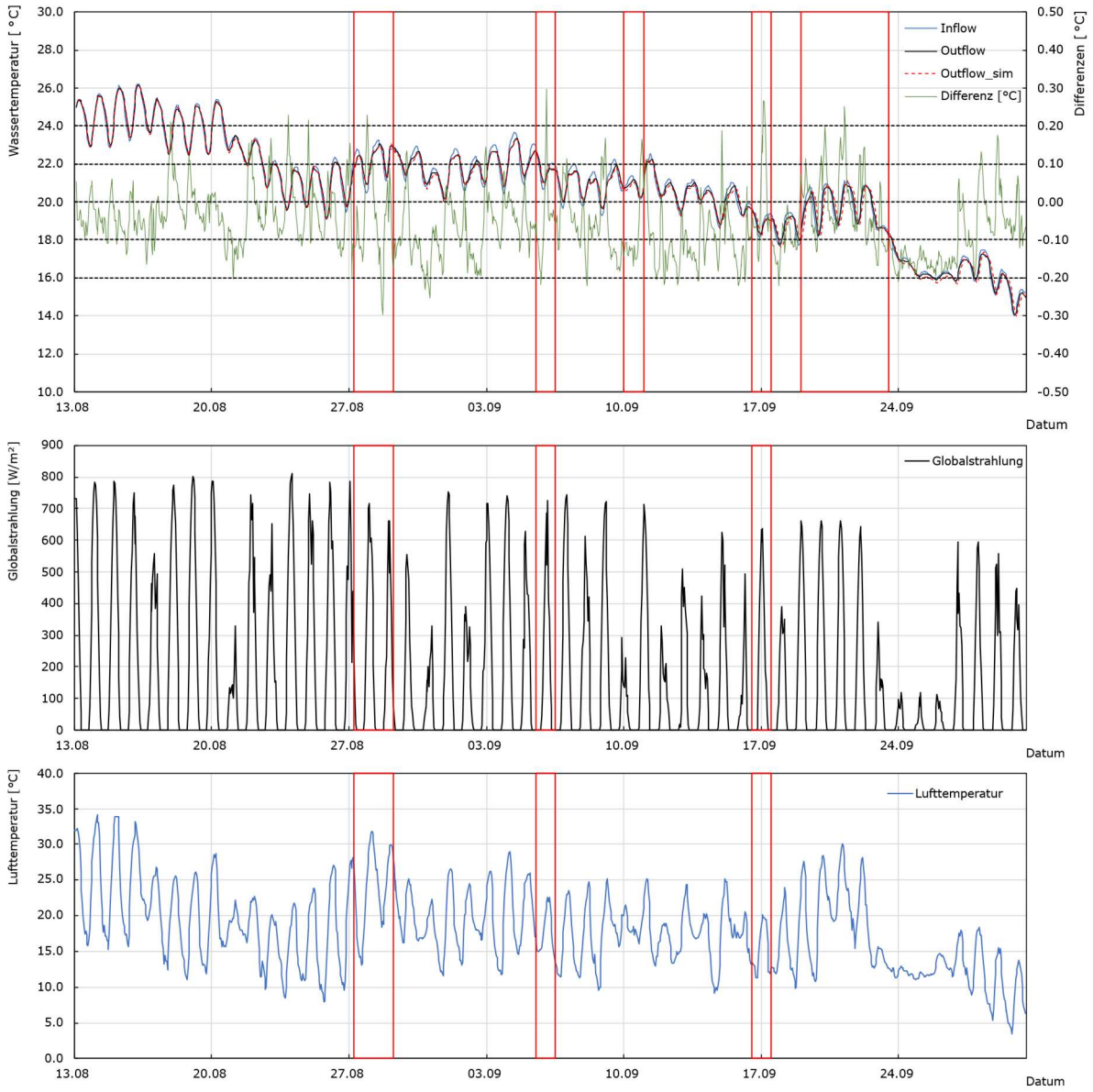
Obr. 4-13: Srovnání dat z loggerů se simulovanými teplotami vody pro všechna umístění loggerů

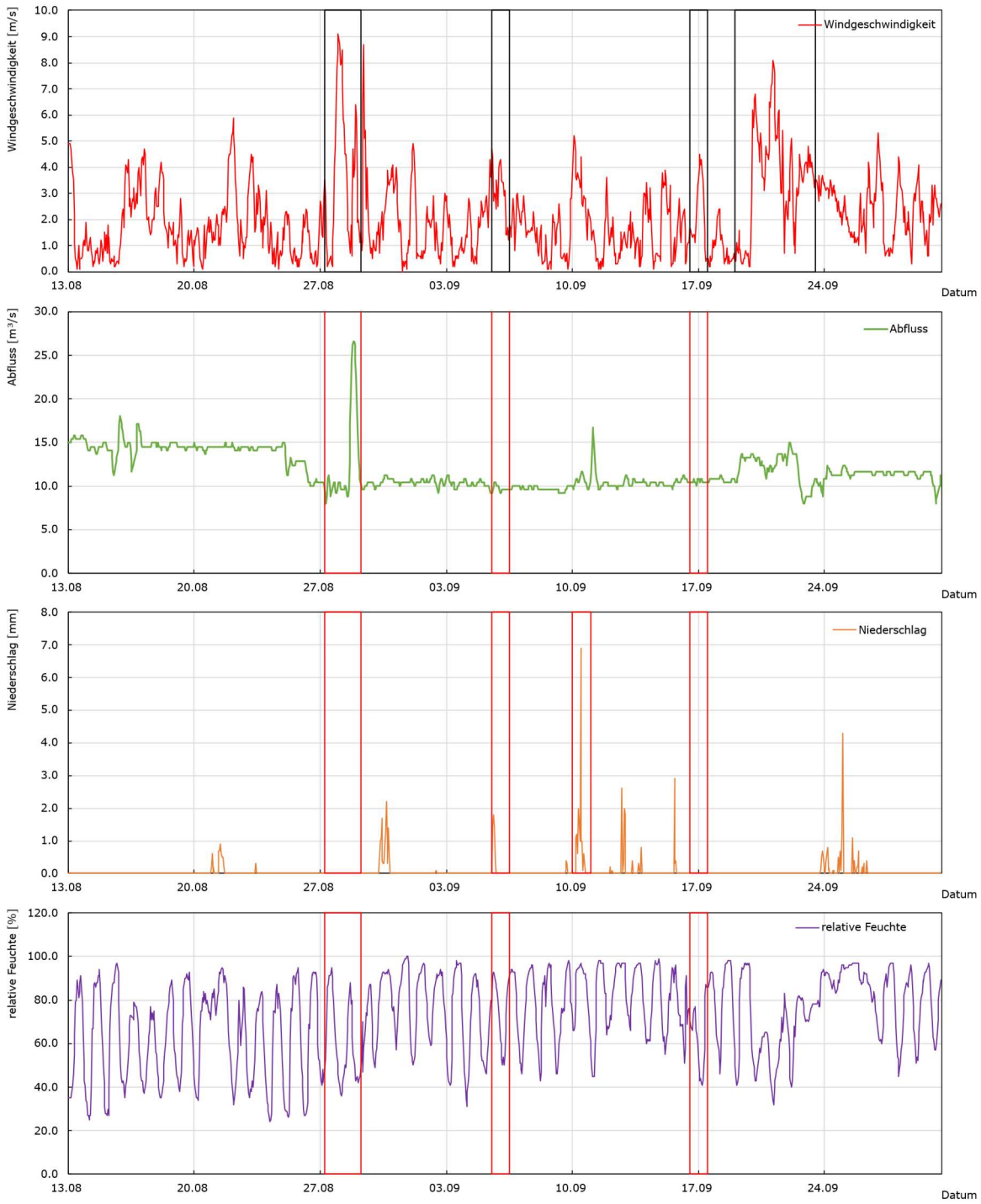
Letní měsíce (validace): Pro otestování použitelnosti modelu kalibrovaného pro velmi krátké období byla simulována časová řada od 13. srpna do 30. září. Obr. 4-14 ukazuje výsledky simulace a naměřená meteorologická data.

Většina rozdílů mezi naměřenou a simulovanou teplotou vody byla v rozmezí ± 0,1 °C, což ukazuje na velmi dobrou kalibraci modelu. Rozdíly přesahující ± 0,2 °C byly vzácné a nikdy nepřesáhly ± 0,3 °C. Simulace nevykazuje žádné systematické ani signifikantní odchylky způsobené „neobvyklými" vstupními daty, která jsou jasně mimo rozsah použitý pro kalibraci, jako například velký průtok během proplachování nebo slabé srážky.

Větší odchylky (± 0,2 °C) na Obr. 4-14 lze vysvětlit velkou rychlostí větru. Vítr může být prostorově i časově značně proměnlivý. Vzhledem k použití pouze jedné dostupné měřicí stanice nelze tento vliv zkoumat podrobněji. Podobně se může prostorově výrazně měnit oblačnost a ovlivňovat tak výsledky, ačkoli je obecně zohledněna naměřeným globálním zářením. Drobné srážky výsledky prakticky neovlivňují, protože mají za následek pouze nepatrný teplotní vstup.

Celkově model pro letní měsíce poskytuje spolehlivé zobrazení teploty vody za daných meteorologických podmínek. Je však třeba upozornit, že během sledovaného období nedošlo k žádným silným srážkovým událostem jako bouřky, teplota vzduchu pod bodem mrazu apod., což omezuje výpovědní hodnotu ohledně takových událostí.





Obr. 4-14: Simulovaná časová řada od 13. srpna do 30. září a vstupní meteorologická data. Červená/černá pole označují anomálie.

Kalibrace – závěr:

Model dvou pilotních úseků s délkami toku 1,40 km a 2,25 km velmi dobře zobrazuje jak časový teplotní průběh, tak i prostorové rozdíly, s výjimkou průkopu (datalogger 3). Rozdíly mezi loggerem a modelem řádově odpovídají přesnosti měření.

Podrobnější analýza zastínění (ale i mikroklimatických procesů), tj. časový průběh a prostorová diferenciace, by umožnila ještě přesnější zobrazení prostorových teplotních rozdílů. Například u loggeru 2.3 by mohlo být zastínění po celý den 100 %, navíc se v tomto místě vyskytují velmi

nízké rychlosti proudění a batymetrické nejistoty. Vzhledem k tomu, že rozložení teploty v Dyji je velmi homogenní, není vyšší prostorové rozlišení zastínění pro cíle projektu zapotřebí.

Loggery v průkopu vykazují významné odchylky oproti loggerům v meandru. Tyto odchylky nejsou v numerickém modelu reprodukovatelné a byly pravděpodobně způsobeny mikroklimatickými vlivy (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)

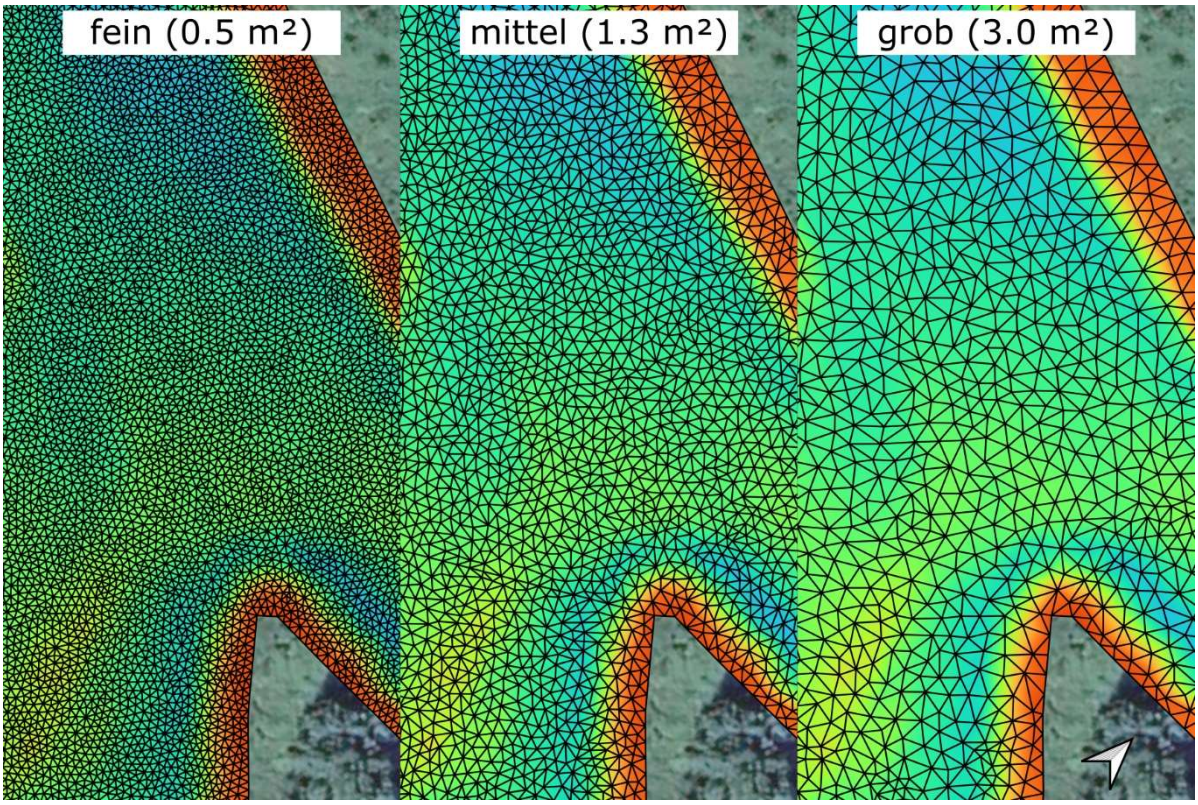
4.4.4 Analýza citlivosti

Velikost buněk:

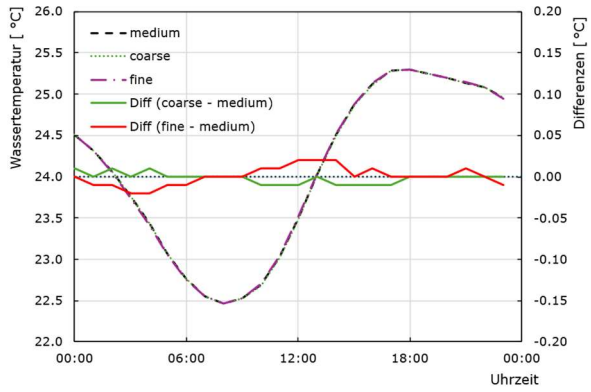
Pro testování citlivosti velikostí buněk výpočetní mřížky na výsledky simulace byly použity tři mřížky s různými velikostmi buněk. Průměrná velikost buněk se pohybuje od jemné = 0,5 m² přes střední = 1,3 m² až po hrubou = 3,0 m². Tabulka 4-1 srovnává rozdělení průtoku mezi oběma meandry v heterogenním úseku. Rozdíly mezi jemnou a střední sítí jsou malé, pro hrubou se ve srovnání s jemnou výrazně zvyšují. Obr. 4-16 ukazuje srovnání teplotního průběhu pro tři velikosti buněk. Rozdíly jsou menší než ± 0,03 °C, a tedy zanedbatelné. Vzhledem k malým odchylkám v teplotě a průtoku i k výrazně narůstajícímu zpomalení výpočtů lze pro toto výzkumné zadání považovat za účelnou „střední" velikost buňky.

Tabulka 4-1: Rozdělení průtoku

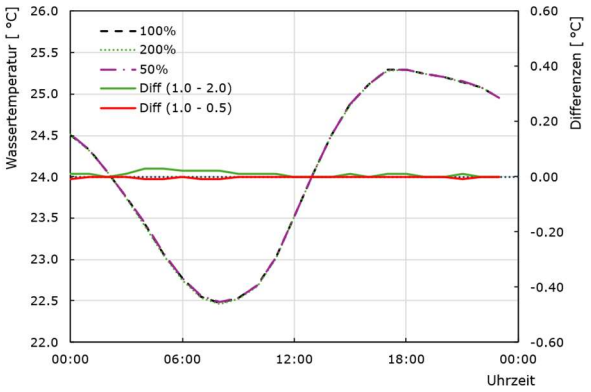
	jemná	**střední**	**hrubá**
Inflow	11,8	11,8	11,8
Outflow	11,8	11,8	11,8
Průkop	1,8	2,0	2,2
Meandr	10,0	9,8	9,5
Průkop II	6,0	6,0	5,4
Meandr II	5,7	5,7	6,4



Obr. 4-15: Srovnání tří zkoumaných výpočetních sítí



Obr. 4-16: Analýza citlivosti: velikost buňky



Obr. 4-17: Analýza citlivosti: vítr

Vítr:

Analýza citlivosti ukazuje, že vítr hraje ve vývoji teploty vody v Dyji pouze malou roli. Obr. 2-17 ukazuje srovnání teplotního profilu pro tři scénáře větru. 100 % odpovídá naměřeným údajům o větru, 200 % dvojnásobku naměřených údajů a 50 % polovině naměřených údajů. Všechny ostatní parametry a nastavení zůstávají beze změny. Vysvětlení lze nalézt ve dvou rovnicích pro tepelný tok při odpařování (latentní teplo) H_e a konvektivní tepelný tok (citelné teplo) H^c, v nichž je zohledněn vítr. V případě Dyje v horkém letním dni se tyto dva toky vzájemně téměř vyruší.

Zastínění (SF):

Pro ověření citlivosti zastínění na výsledek simulace byly provedeny tři simulace s SF = 0,0, 0,5 a 1,0, tj. byly uvažovány oba extrémy s žádným a úplným zastíněním.

Obr. 4-18 ukazuje srovnání teplotního průběhu pro tři hodnoty zastínění a výsledek kalibrace s časově proměnným zastíněním. S rostoucím zastíněním nastává maximální denní teplota později během dne. Maximální rozdíly mezi SF = 0 a SF = 0,5 a mezi SF = 0,5 a SF = 1 ve stejnou dobu činí 0,53 °C. Maximální teploty se však liší pouze o 0,21 °C, 0,31 °C a 0,52 °C, resp. nastává změna teploty o 0,09 °C/km, 0,14 °C/km a 0,23 °C/km.

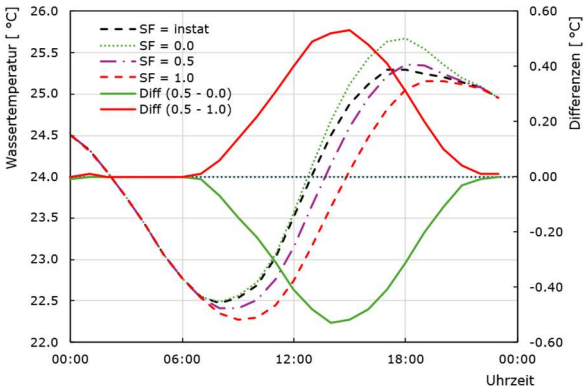
Z toho lze usoudit, že pokud by byla vegetace v heterogenním úseku zcela odstraněna, maximální denní teplota by se ve srovnání se současným stavem zvýšila o 0,37 °C (bez zohlednění vlivu zákalu na faktor zastínění). Významné zvýšení zastínění na teoretickou hodnotu 100 % by vedlo k teplotě o 0,15 °C nižší ve srovnání se současným stavem. Je třeba poznamenat, že 100% zastínění není pro řeku Dyji reálné vzhledem k šířce její hladiny větší než 30 m.

Výměna tepla s říčním dnem:

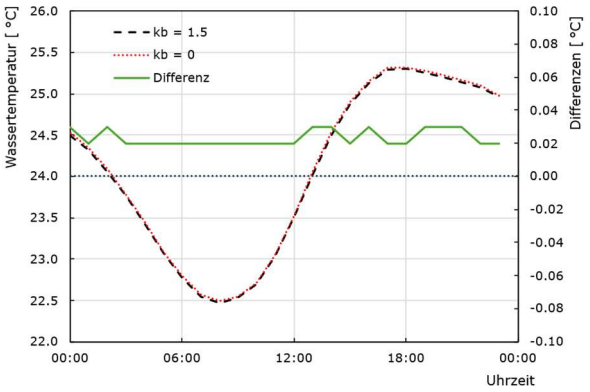
Výměna tepla s říčním dnem je v BASEMENT implementována v hrubém zjednodušení. Hodnocení se proto zaměřilo výhradně na to, do jaké míry aplikace této výměny ovlivňuje výsledky. Při tom byla pro teplotu dna použita jako aproximace měřená teplota podzemní vody ze stanice Bernhardsthal. Obr. 4-19 ukazuje srovnání mezi k_b = 0 W/mK (odpovídá nulové tepelné výměně) a k_b = 1,5 W/mK[4], což je standardní hodnota v programu BASEMENT, převzatá z literatury.

Rozdíly se pohybují v rozmezí 0,02 °C a 0,01 °C/km. Proto je tepelná výměna s říčním dnem pro tento projekt a jeho výzkumné zadání zanedbatelná. Při modelování velmi dlouhých úseků vodního toku s malými průtoky a velkými rozdíly mezi teplotou podzemní vody a teplotou vody ve zkoumaném toku však může mít tato výměna nezanedbatelný vliv. Doporučujeme tento proces v každém projektu prověřit.

[4] Tepelná vodivost říčního dna (kb) závisí na různých faktorech, jako je struktura a složení podloží. V tomto projektu k tomu nejsou k dispozici žádné údaje. Proto byla použita standardní hodnota.

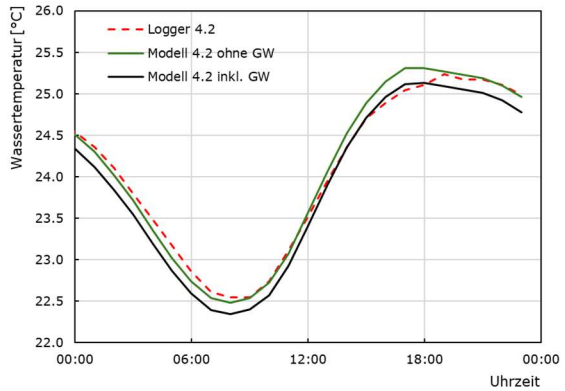


Obr. 4-18: Analýza citlivosti: zastínění

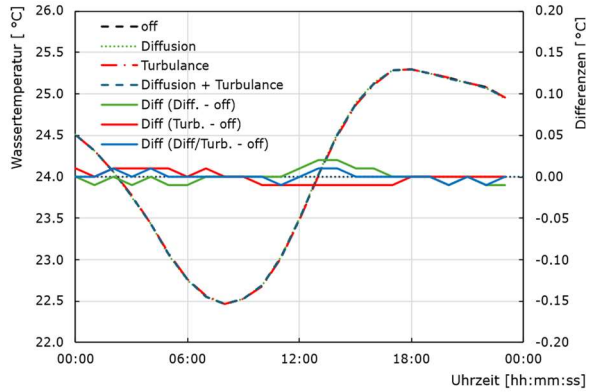


Obr. 4-19: Analýza citlivosti: Tepelná výměna s říčním dnem

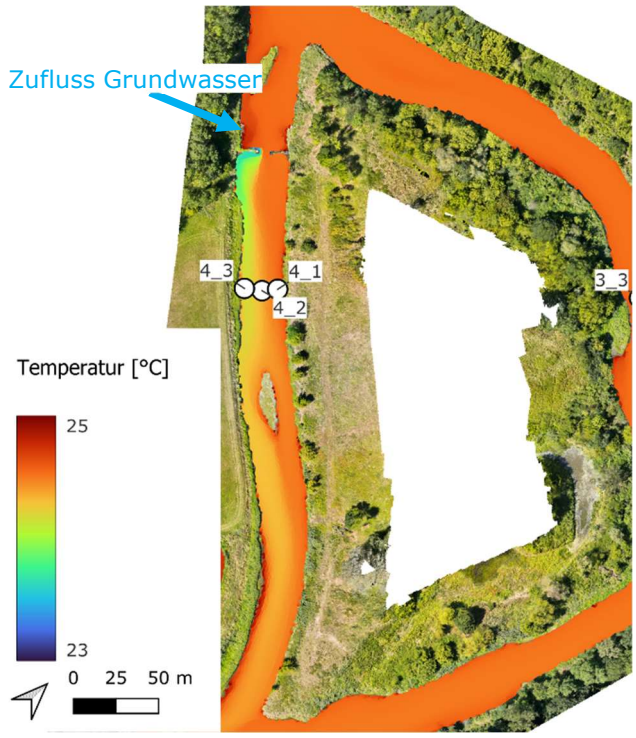
Podzemní voda: Pro zkoumání vlivu lokálního přítoku podzemní vody do řeky Dyje byla v tůni pod rampou aplikována okrajová podmínka přítoku (Q = 50 l/s a T_w = 12,5 °C). Obr. 4-20 ukazuje srovnání dataloggeru 4.2 s podzemní vodou a bez ní. Konstantní přítok podzemní vody po celý den posouvá teplotní křivku téměř souběžně, to znamená, že v Dyji dochází k ochlazování jak v noci, tak i ve dne. Přítok podzemní vody proto nemůže vysvětlit rozdíly mezi meandrem a průkopem, diskutované v kapitole Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.. Lze však konstatovat, že použitý model dokáže spolehlivě simulovat vlivy jako vnikání podzemní vody, ale i přítoky a procesy jejich míšení (Obr. 4-22).



Obr. 4-20: Analýza citlivosti: vliv podzemní vody



Obr. 4-21: Analýza citlivosti: difuze a turbulence

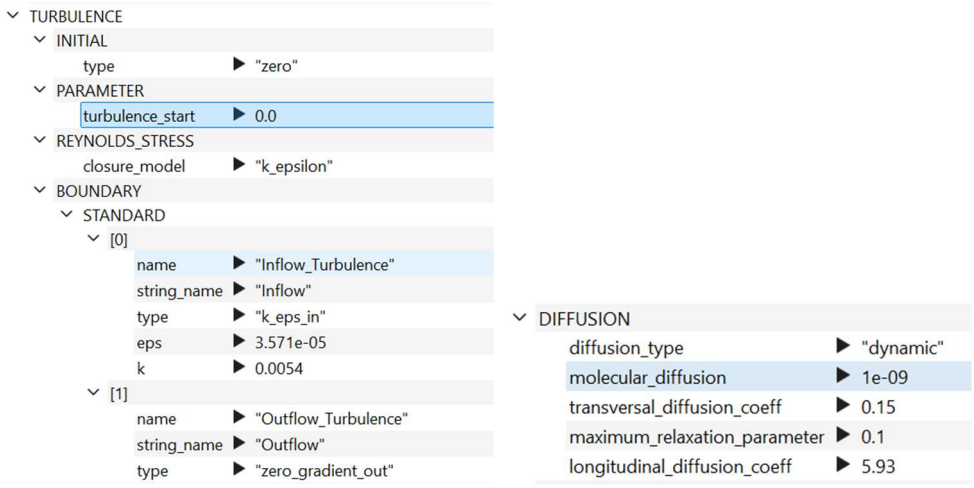


Obr. 4-22: Analýza citlivosti: vliv podzemní vody

Difuze a turbulence:

Analyzují se oba procesy, difuze i turbulence, protože difuze přímo ovlivňuje rozložení teplot (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.) a také turbulence může ovlivňovat teplotu zejména v heterogenním úseku. Obr. 4-23 ukazuje parametrizaci difuze a turbulence v modelu.

Je třeba poznamenat, že velikost turbulence nelze fyzikálně určit, tzn. není známa skutečná velikost turbulence. Použití modelu turbulence navíc výrazně zpomalí výpočty. Doporučujeme proto v každém jednotlivém projektu vyhodnotit potřebnost použití modelu turbulence.



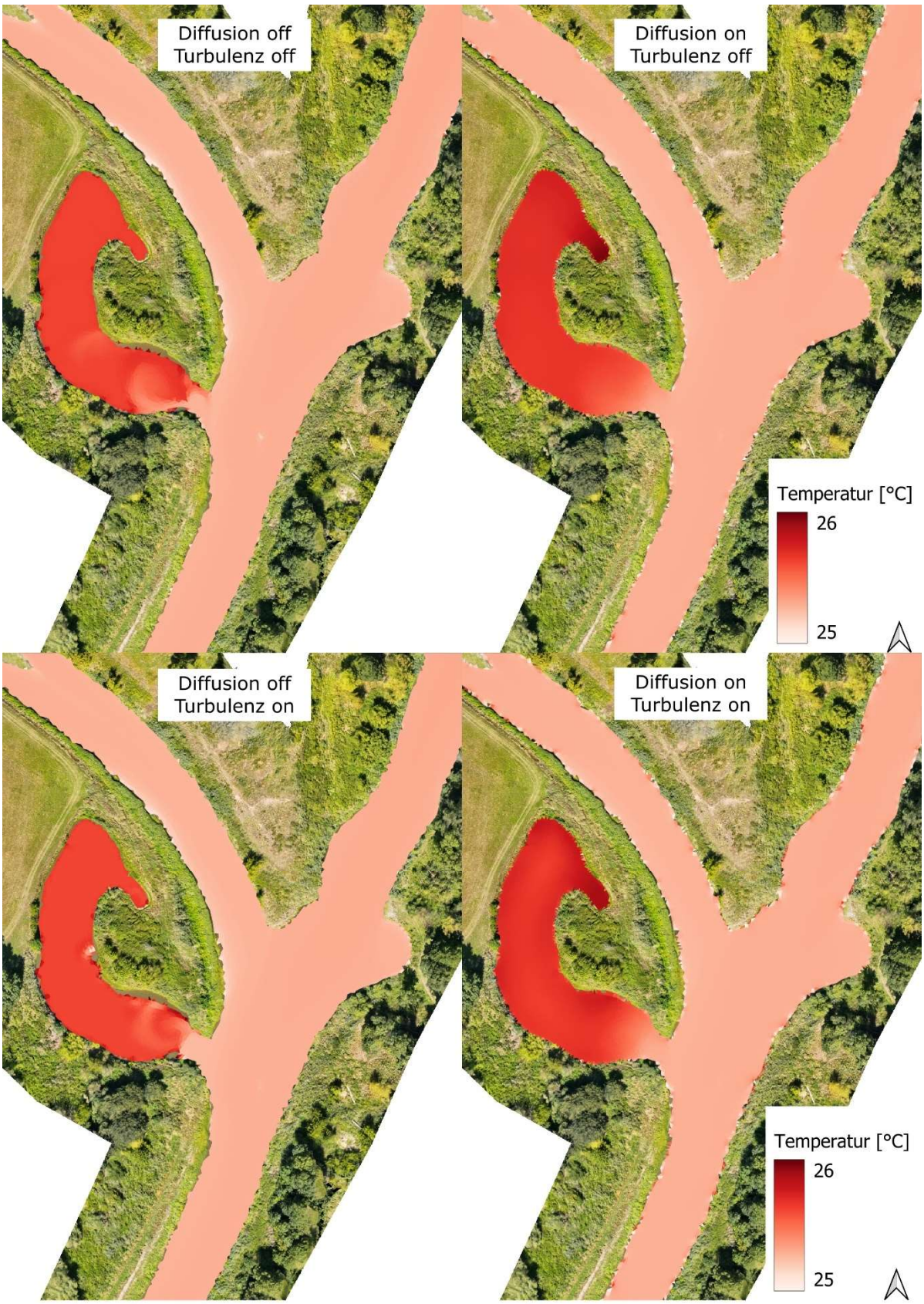
Obr. 4-23: Analýza citlivosti: Parametrizace modelu pro turbulenci a difuzi

Obr. 4-21 a Obr. 4-24 představují srovnání výpočtů s modely difuze a turbulence a bez nich a také jejich kombinace. Pokud se bere v úvahu pouze teplota na odtoku, model turbulence a difuze mají v krátkých modelových úsecích velmi malý vliv pod 0,03 °C, a tedy zanedbatelný.

Plošné zobrazení ukazuje, že výsledky jsou si velmi podobné. Bez difuze teplota v bočním rameni napojeném zespodu sleduje směr proudění/hlavní proud. V hlavním korytě s vysokými rychlostmi proudění a míšením nejsou patrné žádné rozdíly.

BASEMENT nezobrazuje odpařování. Proto se ve smáčených okrajových buňkách s velmi nízkou nebo nulovou rychlostí proudění a malou hloubkou vody mohou vyskytovat nepravděpodobně vysoké teploty. Difuze působí proti tomuto efektu.

Pro naše zadání není difuze ani turbulence nezbytně nutná, protože rozložení teploty v hlavním korytě je velmi homogenní a pro boční rameno napojené zespodu není k dispozici žádné měření teploty. Výsledky modelování proto nelze pro tuto strukturu validovat. Významné oteplení v horkém letním dni je však pravděpodobné.



Obr. 4-24: Analýza citlivosti: difuze a turbulence (20. srpna, 18:00)

4.4.5 Scénáře

4.4.5.1 Metodika

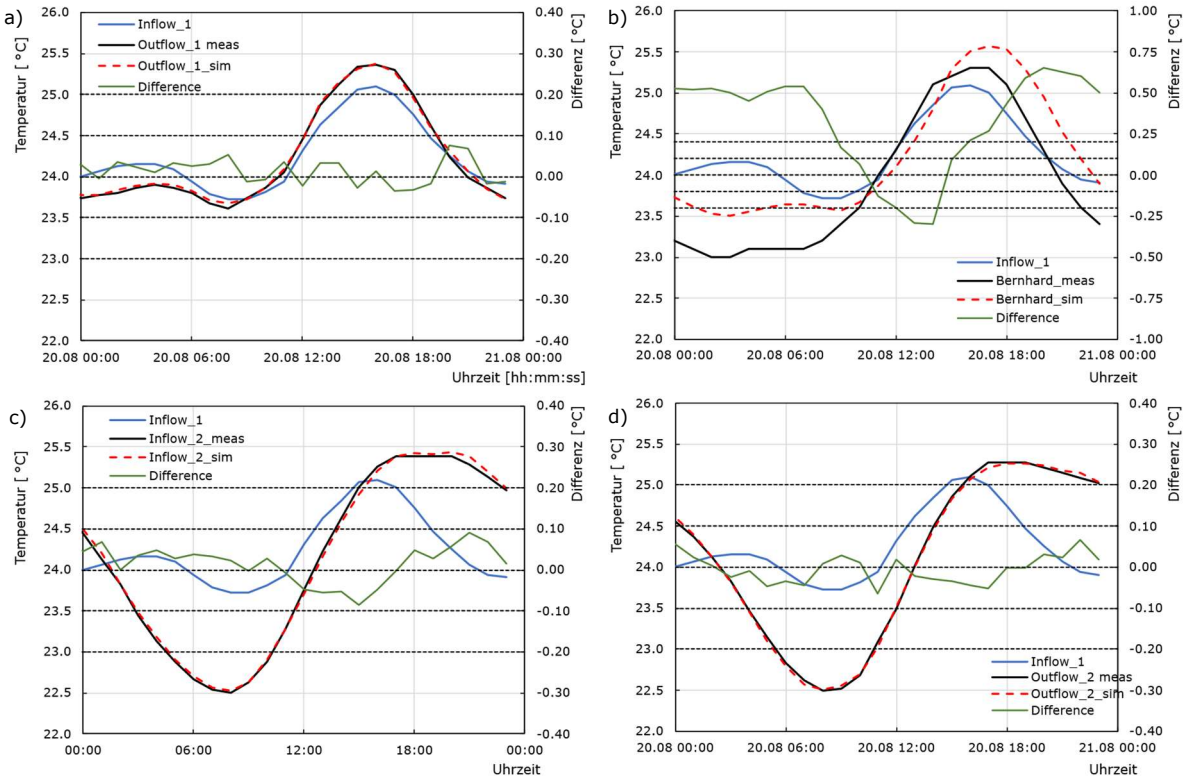
Kromě revitalizace toku je důležitým faktorem ovlivňujícím teplotu vody i zastínění. Modelování jednotlivých zlepšujících opatření přesahuje rámec tohoto projektu. Pomocí 2D modelu se zprůměrovanou hloubkou a na základě současných znalostí není možné provést analýzu teplotní stratifikace tůní a posouzení potřebné velikosti tůní jako chladných útočišť v horkých letních dnech. Model však umožňuje simulovat scénáře zastínění. Proto byl v celkovém modelu (od začátku regulovaného úseku po konec heterogenního úseku) o celkové délce 13,10 km posuzován vliv zastínění za různých podmínek.

4.4.5.2 Kalibrace celkového modelu

S výjimkou limnigrafické stanice Bernhardsthal nejsou pro úsek mezi pilotními úseky k dispozici žádné údaje k hydraulické a termické kalibraci.

Hydraulika byla proto ověřena na základě zkušeností z obou pilotních úseků. Pro simulaci současného stavu byl pro tyto tři úseky (regulovaný úsek, heterogenní úsek a mezilehlý úsek) definován průběh faktoru zastínění (Obr. 4-26).

Obr. 4-25 ukazuje výsledky termické kalibrace celkového modelu. Teplotní signál a jeho změny lze velmi dobře modelovat. Rozdíly mezi simulací a údaji z dataloggeru jsou v tomto projektu menší než ± 0,1 °C, a tedy v rámci přesnosti měření. Větší odchylky až do 0,7 °C jsou však pozorovány při srovnání s daty z limnigrafické stanice Bernhardsthal.



Obr. 4-25: Výsledek kalibrace celkového modelu pro den 20. srpna 2025: a) konec regulovaného úseku, b) limnigrafická stanice Bernhardsthal, c) začátek heterogenního úseku a d) konec heterogenního úseku.

Limnigrafická stanice Bernhardsthal: V průběhu projektu byly provedeny pokusy kalibrovat model po jednotlivých úsecích, tj.

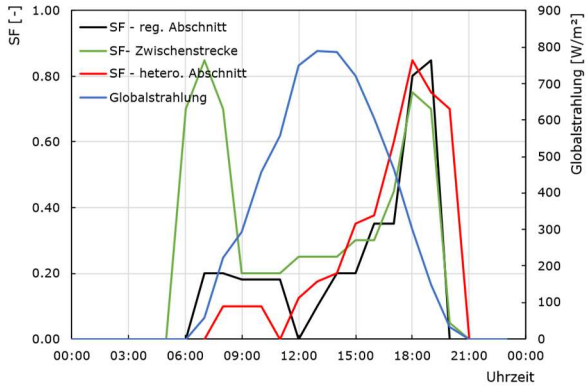
- od konce regulovaného úseku po limnigrafickou stanici Bernhardsthal a
- od limnigrafické stanice Bernhardsthal po začátek heterogenního úseku.

V těchto simulacích se však stále objevovaly systematické nesrovnalosti mezi modelem a měřeními, které nebylo možné vysvětlit dostupnými daty. Nakonec bylo rozhodnuto, že data z limnigrafické stanice Bernhardsthal nebudeme pro kalibrační proces nadále používat, ale pouze upozorníme na tento jev. V budoucích projektech doporučujeme instalovat v místech měření teploty dataloggery, aby se včas identifikovaly potenciální nekonzistence v datech a aby se prostřednictvím doplňkových měření daly zohlednit důležité procesy.

Obr. 4-26 ukazuje hodnoty použité pro faktor zastínění pro tři úseky: „regulovaný", „heterogenní" a „mezilehlý". Celkově jsou si tři denní průběhy faktoru zastínění velmi podobné. Výjimkou jsou ranní časy od 6 do 9 hodin v mezilehlém úseku. V této době byly díky vyššímu faktoru zastínění dosaženy lepší výsledky. Vyplývá z toho pro všechny tři úseky průměrný denní faktor zastínění 0,36 v období s globálním zářením >0 (od 6 do 21 hodin).

Vzhledem k nízké poloze slunce v ranních a večerních hodinách se očekává vyšší zastínění než například v poledne. Na druhé straně má zastínění v této době méně silný vliv kvůli nízkému globálnímu záření. To znamená, že SF v těchto obdobích vykazuje menší citlivost. Tento efekt lze pozorovat v analýze citlivosti, kde se před 9. hodinou ranní vyskytují pouze malé teplotní rozdíly (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.).

Dalším aspektem je délka toku. Vzhledem k tomu, že mezilehlý úsek je výrazně delší než jednotlivé pilotní úseky, jsou tyto efekty patrnější. Proto za příčinu považujeme nejistoty v modelování a datové bázi, spíše než srovnatelná vegetace na všech třech úsecích.



Obr. 4-26: Faktor zastínění pro tři úseky: regulovaný, heterogenní a mezilehlý

4.4.5.3 Scénáře

Pro posouzení byly zvoleny tři konstantní hodnoty zastínění SF = 0,0, 0,5 a 1,0. To znamená, že byly uvažovány dva extrémy – žádné zastínění a úplné zastínění – a porovnány se současným stavem. Dále byla analyzována období od 14. do 19. srpna a od 31. srpna do 5. září. Zatímco během prvního období se teplota vody ve směru toku zvyšuje, během druhého se voda mírně ochlazuje (viz Obr. 2-7). To lze připsat menšímu rozdílu mezi teplotou vzduchu a vody a slabšímu globálnímu záření během druhého období (Obr. 4-29nn).

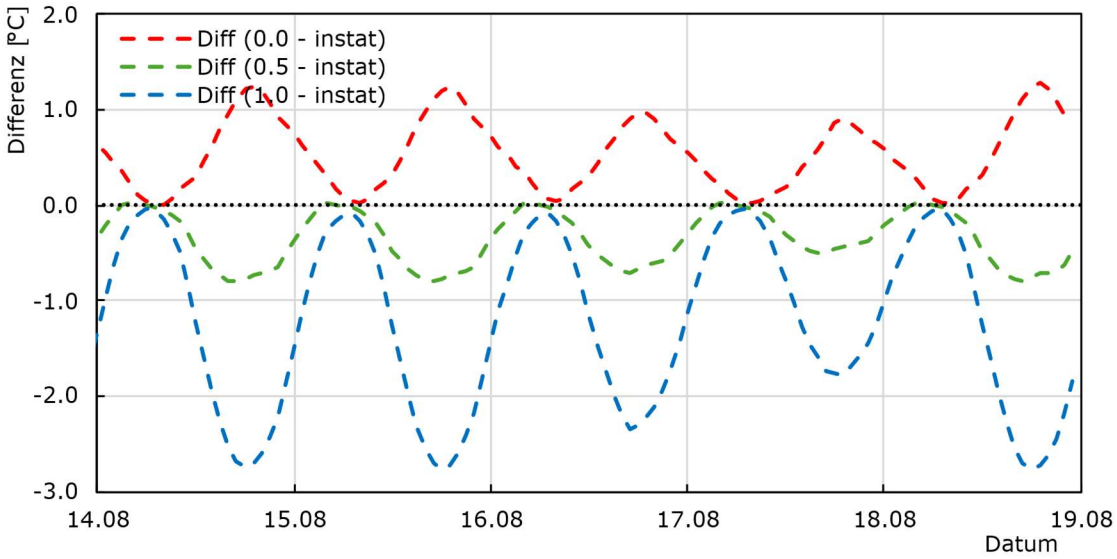
Období 13.–18. srpna (oteplování):

Obr. 4-27 ukazuje průběh teplotních rozdílů v koncovém bodě modelu (konec heterogenního úseku) pro tři konstantní zastínění a časově proměnné zastínění (výsledek kalibrace).

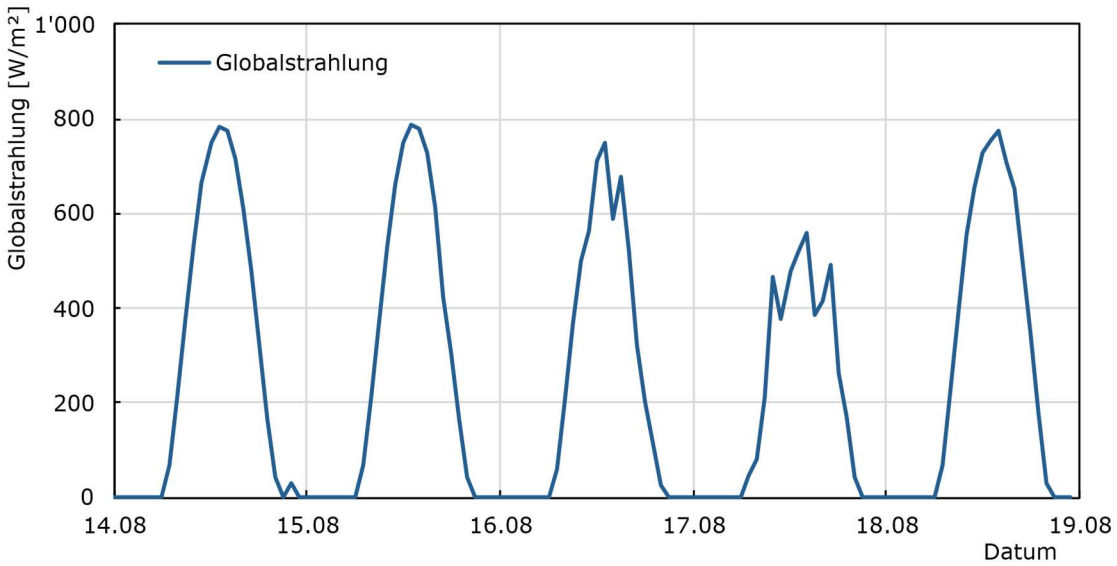
Z toho lze vyvodit, že při úplném odstranění vegetace by se maximální denní teplota v úseku dlouhém 13,10 km během horkého období s vysokou teplotou vzduchu a velmi vysokým globálním zářením zvýšila o více než 1,2 °C oproti současnému stavu (vliv zákalu na faktor zastínění nebyl

zohledněn). Významné zvýšení zastínění na teoretickou hodnotu 100 % by vedlo k maximální denní teplotě téměř o 2 °C nižší ve srovnání se současným stavem, která by také nastávala až později během dne. Ve stejném čase jsou možné teplotní rozdíly až 3,0 °C.

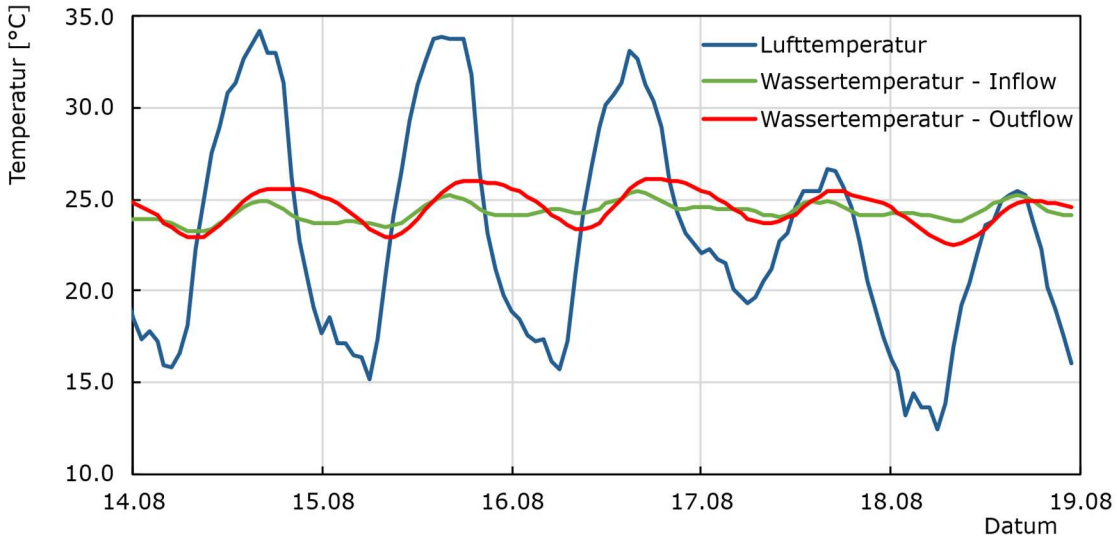
Je třeba poznamenat, že 100% zastínění nelze na Dyji považovat za reálné vzhledem k šířce její hladiny větší než 30 m. Jako realistické se jeví průměrné denní zastínění 50 % až 60 %, a tedy maximální denní teplota přibližně o 1,0 °C nižší ve srovnání se současnou situací.



Obr. 4-27: Analýza scénářů. Vliv zastínění v období 14. – 19. srpna



Obr. 4-28: Globální záření v období 14. – 19. srpna



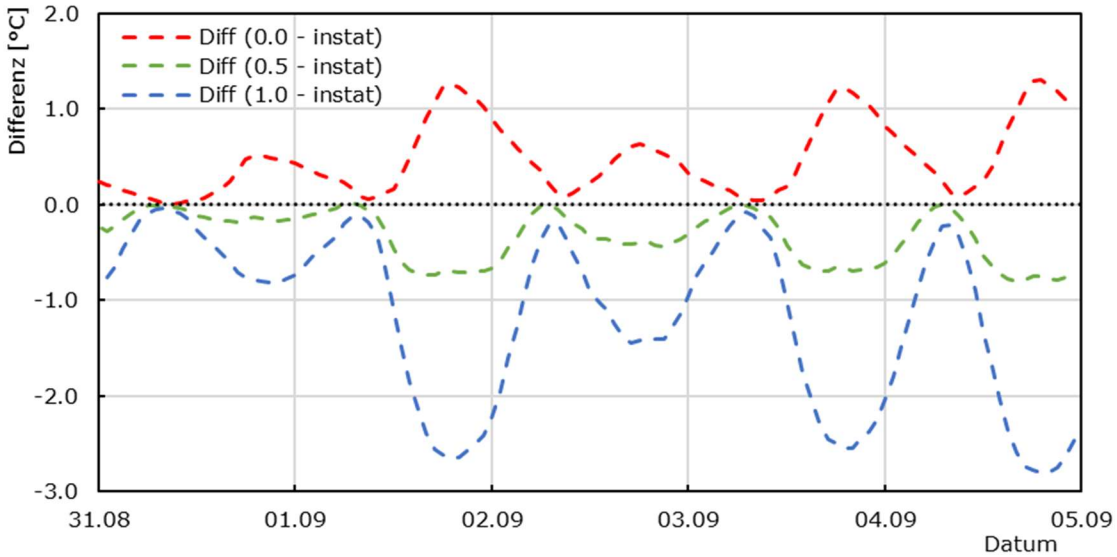
Obr. 4-29: Teploty vzduchu a vody v období 14. – 19. srpna

Období 31. srpna až 5. září (ochlazení):

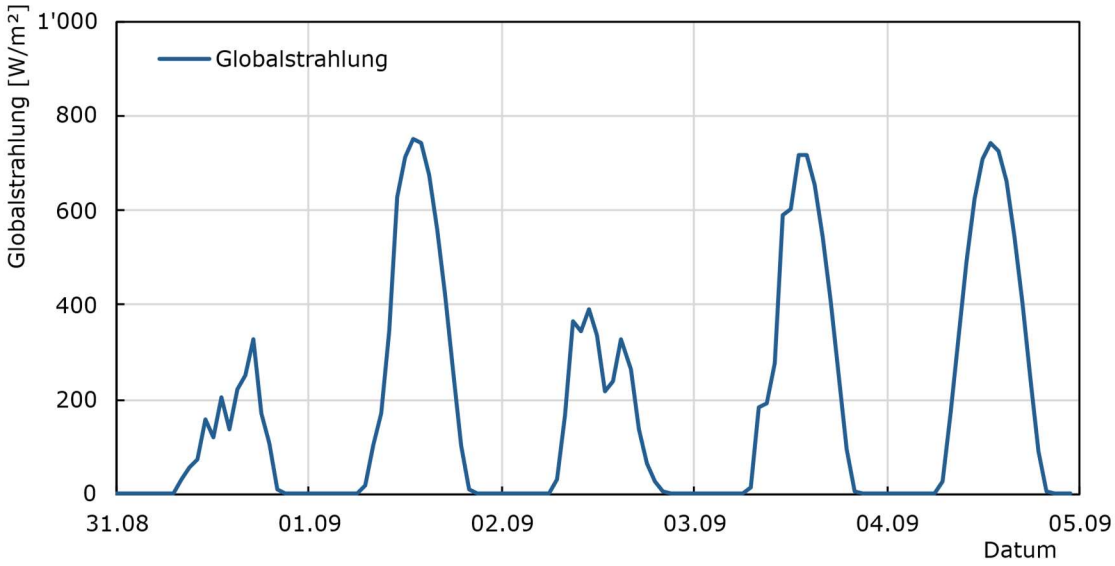
Obr. 4-30 ukazuje průběh teplotních rozdílů v koncovém bodě modelu (konec heterogenního úseku) pro tři konstantní zastínění a časově proměnné zastínění (výsledek kalibrace).

Z toho lze vyvodit, že při úplném odstranění vegetace by se maximální denní teplota v úseku dlouhém 13,10 km během horkého období s vysokou teplotou vzduchu a vysokým globálním zářením zvýšila asi o 1 °C oproti současnému stavu (vliv zákalu na faktor zastínění nebyl zohledněn). Významné zvýšení zastínění na teoretickou hodnotu 100 % by vedlo k maximální denní teplotě téměř o 1,8 °C nižší ve srovnání se současným stavem, která by také nastávala až později během dne. Ve stejném čase jsou možné teplotní rozdíly až 2,8 °C.

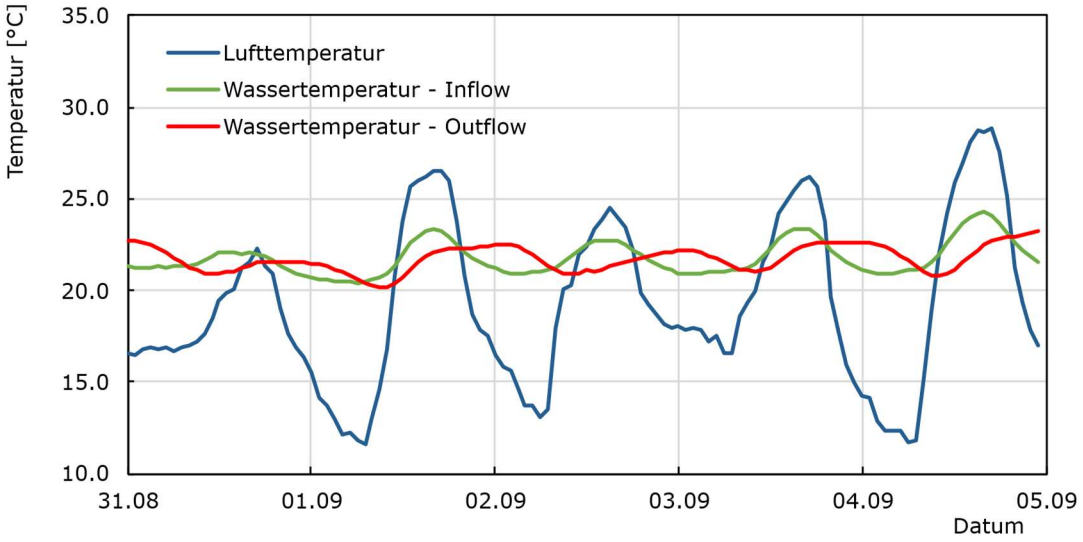
Je třeba poznamenat, že 100% zastínění nelze na Dyji považovat za reálné vzhledem k šířce její hladiny větší než 30 m. Jako realistické se jeví průměrné denní zastínění 50 % až 60 %, a tedy maximální denní teplota přibližně o 1,0 °C nižší ve srovnání se současnou situací.



Obr. 4-30: Analýza scénářů: Vliv zastínění v období 31. srpna až 5. září



Obr. 4-31: Globální záření v období 31. srpna až 5. září



Obr. 4-32: Teploty vzduchu a vody v období 31. srpna až 5. září

4.5 Shrnutí a závěr

S použitým softwarem (BASEMENT V4.2) lze v obou pilotních úsecích o délce toku 1,4 km a 2,2 km velmi dobře zobrazit jak časový teplotní průběh, tak prostorové rozdíly. Rozdíly mezi loggery a modelem řádově odpovídají přesnosti měření. Výjimkou je průkop (datalogger 3) v heterogenním úseku. Tyto odchylky lze však vysvětlit nedostatečnou datovou základnou, protože nejsou k dispozici informace o mikroklimatických procesech.

Faktor zastínění lze interpretovat jako obecný kalibrační parametr, který zahrnuje nejen efektivní zastínění způsobené například břehovou vegetací, ale také nejistoty lokálního (mikro)klimatu nebo vlastností vody (albedo, zákal). BASEMENT zohledňuje albedo 3 %. Albedo kalné vody se však může zvýšit až na hodnoty 25 % nebo i vyšší. Lze proto předpokládat, že zvýšený zákal Dyje odráží více světla. Za druhé větší zákal způsobený plaveninami, ať jde o sedimenty, řasy nebo organické látky, zvyšuje absorpci slunečního záření. Musíme tedy konstatovat, že vyjádření týkající se zastínění jsou zatížena určitou nejistotou a že se pro budoucí aplikaci teplotního modelu doporučuje podrobnější analýza procesů, které mohou faktor zastínění ovlivnit.

V závislosti na konkrétním výzkumném zadání může být přesné stanovení zastínění na základě denní sluneční dráhy klíčovým aspektem při modelování teploty vody a následném ekologickém hodnocením. Břehová vegetace má složité tvary a vrhá odpovídající složité stíny, značně proměnlivé až v řádu metrů. V minulosti byly vyvinuty modely k výpočtu zastínění s vysokým časovým a prostorovým rozlišením (viz Li et al., 2011). V tomto projektu by podrobnější analýza zastínění, tj. časový průběh a prostorová diferenciace, umožnila ještě přesnější zobrazení prostorových teplotních rozdílů. Pro účely našeho zadání a rozsah projektu však považujeme provedené zjednodušení faktorů ovlivňujících zastínění za dostatečně přesné.

Mikroklimatické procesy, zejména v přechodových zónách mezi lesy a zemědělskými plochami, mohou mít podstatný vliv na lokální teplotu vody, zejména při nízkých průtocích. Tyto značné klimatické rozdíly (mj. vítr, teplota vzduchu a vlhkost) nejsou měřeny stálými meteorologickými stanicemi. Řeka Dyje v mnoha úsecích protéká právě takovou přechodovou zónou mezi (lužními) lesy a zemědělskou půdou.

Analýza období od 13. srpna do 30. září ukazuje, že model je schopen spolehlivě zobrazovat teplotu vody během letních měsíců za daných meteorologických podmínek. Je však třeba upozornit, že během sledovaného období nedošlo k žádným silným srážkovým událos-tem jako bouřky, teplota vzduchu pod bodem mrazu apod., což omezuje výpovědní hodnotu ohled-ně takových událostí.

Zastínění je zvlášť důležité pro teplotu vody v malých a středních vodních tocích. V takových vodách může střední zastínění (40 až 60 procent plochy) obecně bránit dalšímu ohřívání, zatímco střední až silné zastínění (60 až 100 procent) způsobuje při střední až vysoké počáteční hodnotě dokonce ochlazení (Mende & Sieber, 2022). Broadmeadow et al. (2010) a Elber et al. (2019) doporučují zastínění alespoň 80 procent plochy vodní hladiny, zejména ve vodních útvarech s populacemi druhů citlivých na teplotu, schopnými přirozené reprodukce.

Analýza scénářů ukázala, že zastínění stávající vegetací během horkého období s vysokou teplotou vzduchu a vysokým globálním zářením v 13,10 km dlouhém zkoumaném úseku Dyje působí proti oteplování. Pokud by byla vegetace zcela odstraněna, teplota by se ve srovnání se současným stavem zvýšila přibližně o 1 °C. Očekáváme, že na Dyji lze dosáhnout průměrného denního zastínění 50 až 60 procent, což by mohlo v budoucnu vést k maximálním denním teplotám přibližně o 1,0 °C nižším, než je současný stav. Rozdílné charakteristiky obou studovaných období mají pouze malý vliv na rychlost oteplování.

Velké a staré původní solitérní stromy mohou dosáhnout průměru koruny 10 až více než 20 metrů. Vzhledem k šířce Dyje více než 30 metrů proto není úplné zastínění dosažitelné. Jestliže se vyplní mezery v pobřežním porostu ve zkoumaném úseku, lze očekávat malou změnu teploty. Satelitní snímky ukazují, že dlouhé úseky na české straně postrádají pobřežní porosty. Zastínění vegetací tak může působit proti změně klimatu, ale nebude ji schopno kompenzovat (viz kap. Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.).

Řeka Dyje s homogenním rozložením teplot je náročný případ, který bude jistě vyžadovat ještě více zkušeností s modelováním teploty. Současný projekt však přinesl důležité poznatky a zkušenosti týkající se potřebné datové základny, kalibračního postupu a také omezení, která aplikaci zatěžují.

Použitý software umožňuje modelovat obecnou teplotu vodních útvarů a simulovat varianty a scénáře a také řešit otázky vlivu podzemní vody, vypouštění chladicí vody a jejich směšovacích procesů. Modelování teploty je proto cenným nástrojem pro ekologické, ale i právní posuzování různých problémů. Pro úspěšné použití teplotního modelu pro konkrétní zadání a jeho okrajové podmínky jsou však rozhodující konzistentní data a měřicí body jak pro teplotu vody, tak pro meteorologické parametry.

5 Analýza habitatů

5.1 Metodika

5.1.1 Úvod

Model habitatů pokrývá tok dlouhý cca 1,3 km v regulovaném úseku a cca 3 km v heterogenním úseku. Celoplošné výsledky modelování pro hloubku vody a rychlost proudění byly sestaveny do několika map pro jednotlivé druh ryby (a jejich vývojová stádia) a modelované průtoky (viz Příloha Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.). V prvním kroku byla na základě výsledků modelování analyzována hydraulická dostupnost habitatů. Ve druhém kroku byla dostupnost habitatů překryta výsledky měření teplot, aby bylo možné odhadnout skutečné podmínky pro rybí faunu.

5.1.2 Model habitatů

Pro stanovení vztahu mezi parametry určujícími habitat (rychlost proudění, hloubka vody a substrát) a vhodností habitatu byl použit preferenční přístup. Univariantní preferenční křivka vyjadřuje tento vztah ve formě indexu vhodnosti (SI) od 0 (nevhodný) do 1 (optimálně vhodný).

Modelování habitatů bylo provedeno pro celou zkoumanou oblast pro dva indikátorové druhy (parma, okoun) a dva běžné doprovodné druhy (ostroretka a perlín) a pro různá vývojová stádia. Důvody výběru podrobně popisujeme v kapitole Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. a dále uvádíme příklady preferenčních křivek.

Z indexu vhodnosti (SI) každého parametru určujícího habitat lze v každé výpočetní buňce vypočítat složený index vhodnosti (HSI – Habitat Suitabilty Index):

$$\mathrm{HSI}_i = \mathrm{SI}_h(\mathrm{H}_i) * \mathrm{SI}_v(\mathrm{V}_i) * \mathrm{SI}_s(\mathrm{S}_i)$$

SI pro jednotlivý druh se vztahuje k preferenční hodnotě rychlosti proudění (SI_v), hloubku vody (SI_h) a substrát (SI_s). Vzhledem k tomu, že pro substrát nebyla k dispozici vhodná datová základna a tento parametr má pro naše výzkumné zadání jen doplňkový význam, HSI byl vypočítán na základě modelované hloubky vody a rychlosti proudění.

$$\mathrm{HSI}_i = \mathrm{SI}_h(\mathrm{H}_i) * \mathrm{SI}_v(\mathrm{V}_i)$$

Modelování bylo provedeno pomocí softwaru HABBY (open source, https://habby.inrae.fr/). Podrobnosti o implementaci modelu habitatů jsou uvedeny v dokumentaci.

Ve druhém kroku bylo ekologicky interpretováno rozložení teplot ve dvou úsecích na základě měření z loggerů a teplota byla zohledněna při hodnocení vhodnosti habitatů.

5.1.3 Druhy ryb

Analýza habitatů byla provedena pro čtyři druhy ryb a zčásti pro různá vývojová stádia. Výběr čtyř reprezentativních druhů byl založen na různých kritériích. Cílem bylo reprezentovat rozmanité druhové spektrum řeky Dyje s ohledem na preference různých typů proudění, ale i teploty vody. Základem byl cílový přehled druhů ryb pro Dyji (metapotamal bioregionu Východní roviny a pahorkatiny), doplněný zkušenostmi s populací ryb v řešeném území ve formě dlouhodobých výsledků odlovu. Výběr a sestavení preferenčních křivek vychází z údajů z literatury týkající se hydraulických a teplotních preferencí různých druhů ryb, verifikovaných pomocí empirických dat a v případě potřeby upravených. Standardní hodnoty uložené v HABBY, převzaté z Lamouroux et al. (1999), byly adaptovány na základě dalších studií (Küttel et al., 2002; LfU, 2005; Souchon & Tissot, 2012).

Analýza habitatů byla provedena pro tyto druhy ryb a jejich vývojová stádia:

- parma obecná (Barbus barbus)

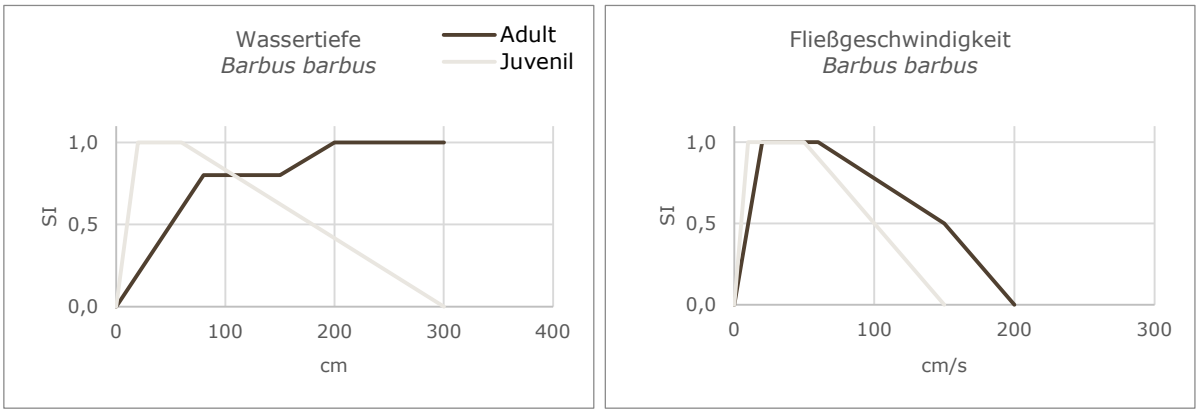
- ostroretka stěhovavá (Chondrostoma nasus)
- okoun říční (Perca fluviatilis)
- perlín ostrobřichý (Scardinius erythrophthalmus)

Parma a ostroretka jsou pro řešené území typické reofilní druhy a vykazují různá teplotní optima a limity. Zatímco parma je klasifikována jako indikátorový druh a při odlovech se trvale vyskytuje s vysokým zastoupením, ostroretka jako doprovodný druh je poněkud méně častá. U obou druhů se výrazně liší habitatové požadavky juvenilních a dospělých ryb, proto byla do analýzy na základě preferenčních křivek zařazena obě vývojová stádia. Obr. 5-1 ukazuje jako příklad srovnání preferenčních křivek pro hloubku vody a rychlost proudění u adultní a juvenilní parmy.

Okoun je jeden ze čtyř eurytopních indikátorových druhů v dolním toku Dyje. Tento druh mívá spíše méně přísné nároky a na rozdíl od jiných druhů snáší i poněkud vyšší teploty vody. Požadavky jsou zobrazeny společně pro všechna vývojová stádia.

Perlín byl vybrán jako jeden ze stagnofilních doprovodných druhů cílového přehledu. Vyžaduje oblasti říční krajiny se slabým prouděním a patří mezi druhy, které tolerují nejvyšší teploty vody. I pro perlína lze sloučit požadavky několika vývojových stádií.

Preferenční křivky pro hloubku vody, rychlost proudění a teplotu vody pro jednotlivé druhy ryb a věková stádia jsou uvedeny v Příloze Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..



Obr. 5-1: Preferenční křivky adultní a juvenilní parmy pro hloubku vody (h_w) a rychlost proudění (v)

5.1.4 Průtoky

Analýza habitatů byla provedena pro čtyři průtoky (9, 13, 23 a 45 m³/s):

Jako spodní hranice modelovaných průtoků v řešeném území byl zvolen průtok 9 m³/s, což představuje krajně nepříznivé podmínky v letních měsících. Zákonem stanovený minimální odtok z VD Nové Mlýny je 8 m³/s. Díky tomu byl v řešeném území ve zvlášť suchých letech (např. 2017 a 2018) po dobu několika týdnů pozorován konstantní průtok přibližně 11 m³/s. V rámci projektu „Thaya Wellendynamik" byla v roce 2022 zvažována vhodná opatření k zamezení negativních dopadů spojených s delšími obdobími konstantního minimálního průtoku. Bylo navrženo na dobu maximálně dvou týdnů snížit minimální průtok na 6 m³/s, aby následně bylo možné průtok příslušně zvýšit a tím zlepšit variabilitu. Ke snížení na 6 m³/s by však mělo dojít pouze v obdobích, kdy se neočekávají teplotní špičky, tedy ne během vrcholného léta. Takový odtok z Nových Mlýnů odpovídá přibližně 9 m³/s v řešeném území. Při analýze habitatů tak lze nyní v úsecích zkoumat pouze s tím spojené hydraulické podmínky. V důsledku změny klimatu a souvisejících extrémů se obecně očekává, že v budoucnu budou nižší průtoky častější.

Přehled dat z limnigrafické stanice Bernhardsthal za uplynulé roky ukazuje, že zvýšená teplota vody se obvykle vyskytuje mezi začátkem června a polovinou září. Během tohoto období ve fázi nízkého

stavu vody se průtok většinou pohybuje kolem 13 m³/s. Tento průtok je proto považován za vhodný pro reprezentativní zobrazení typických letních průtokových podmínek v řešeném území.

V souvislosti s výše popsanými snahami o zlepšení variability průtoku ve zvlášť suchých létech navrhl projekt „Thaya Wellendynamik" vypouštět z Nových Mlýnů „odlehčovací vlnu" přibližně 20 m³/s. To odpovídá přibližně 23 m³/s v Bernhardsthalu. Modelování habitatů umožňuje porovnat a vyhodnotit hydraulické podmínky při tomto průtoku s podmínkami při nižších průtocích.

Při posuzování dopadu morfologických opatření v řešeném území je z hydroekologického hlediska zajímavé popsat dostupnost habitatů i při větších průtocích. Pro tento účel byl zvolen průtok 45 m³/s, což odpovídá průměrnému průtoku (MQ) v řešeném území. Z předchozích projektů je známo, že nad touto úrovní průtoku dochází k silnějšímu propojení říčního koryta s okolním územím. I když je tento průtok pro analýzu letních vln veder méně relevantní, jako horní hranice analýzy habitatů umožňuje vyvodit závěry o vlivu různých profilů koryta při širším spektru průtoků.

5.2 Dostupnost habitatů

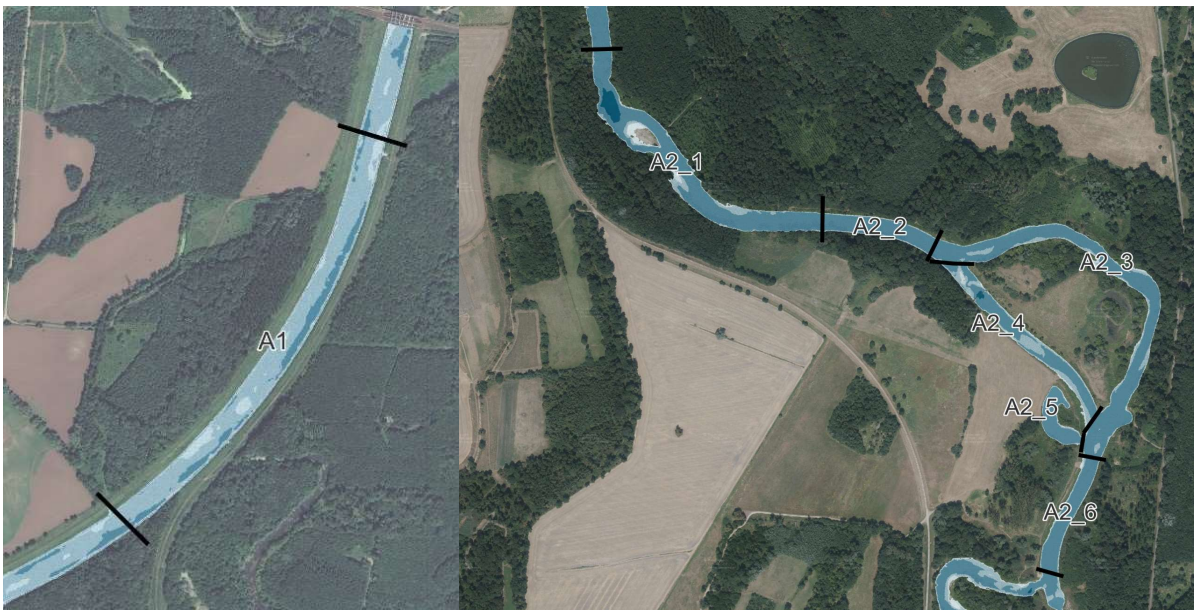
5.2.1 Hydraulická dostupnost habitatů

Analýzu lze provést na základě plošného pojetí nebo podle parametrů, které popisují využitelnou plochu (Weighted Usable Area, WUA) a vhodnost habitatu (Overall Suitability Index, OSI) definovaného úseku. Parametr OSI je zvlášť vhodný pro srovnávání úseků různých délek. Pro výpočet těchto parametrů bylo v heterogenním úseku definováno celkem šest podoblastí, aby se zvýšila vypovídací schopnost a umožnilo porovnání morfologicky rozdílných úseků. Regulovaný úsek nebyl pro hodnocení takto rozdělen vzhledem k homogenitě svého profilu. Vymezení a označení podoblastí je znázorněno na Obr. 5-2.

Plošné zobrazení výsledků analýzy hydraulické vhodnosti habitatů v **regulovaném úseku** s vysokým rozlišením (viz Příloha Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.) ukazuje, že za nízkého stavu vody (průtoky 9 a 13 m³/s) se habitaty pro dospělé parmy nacházejí pouze v oblasti málo výrazného proudového koryta ve vnějším oblouku. Nenabízejí však optimální podmínky. Naproti tomu pro dospělé ostroretky se hydraulicky vhodné oblasti nacházejí na velké ploše.

Zdá se, že při nízkém stavu vody splňuje regulovaný úsek požadavky juvenilních ostroretek a parem. S rostoucím průtokem však kvůli homogenním profilům prakticky nezbývají žádná vhodná místa s klidnějším prouděním.

Vhodnost regulovaného úseku pro okouna je celkově pouze prostřední až špatná. Zejména při nízkém stavu vody tu prakticky neexistují oblasti, které by splňovaly požadavky tohoto druhu. Je to dáno především malou hloubkou vody. Ani pro perlína není tento úsek vhodný. Tento stagnofilní druh je vázaný na klidné zátoky a boční ramena. V regulovaném úseku je při nízkém stavu vody jen několik velmi malých ploch u jesepního břehu, kde sedimenty a makrofyty vytvářejí mělčí oblasti s pomalejším prouděním.



Obr. 5-2: Podoblasti regulovaného úseku (vlevo), heterogenního úseku (vpravo). Pozadí: Modelované hloubky vody, Google Satellite (CZ) a BEV 2026 (AT)

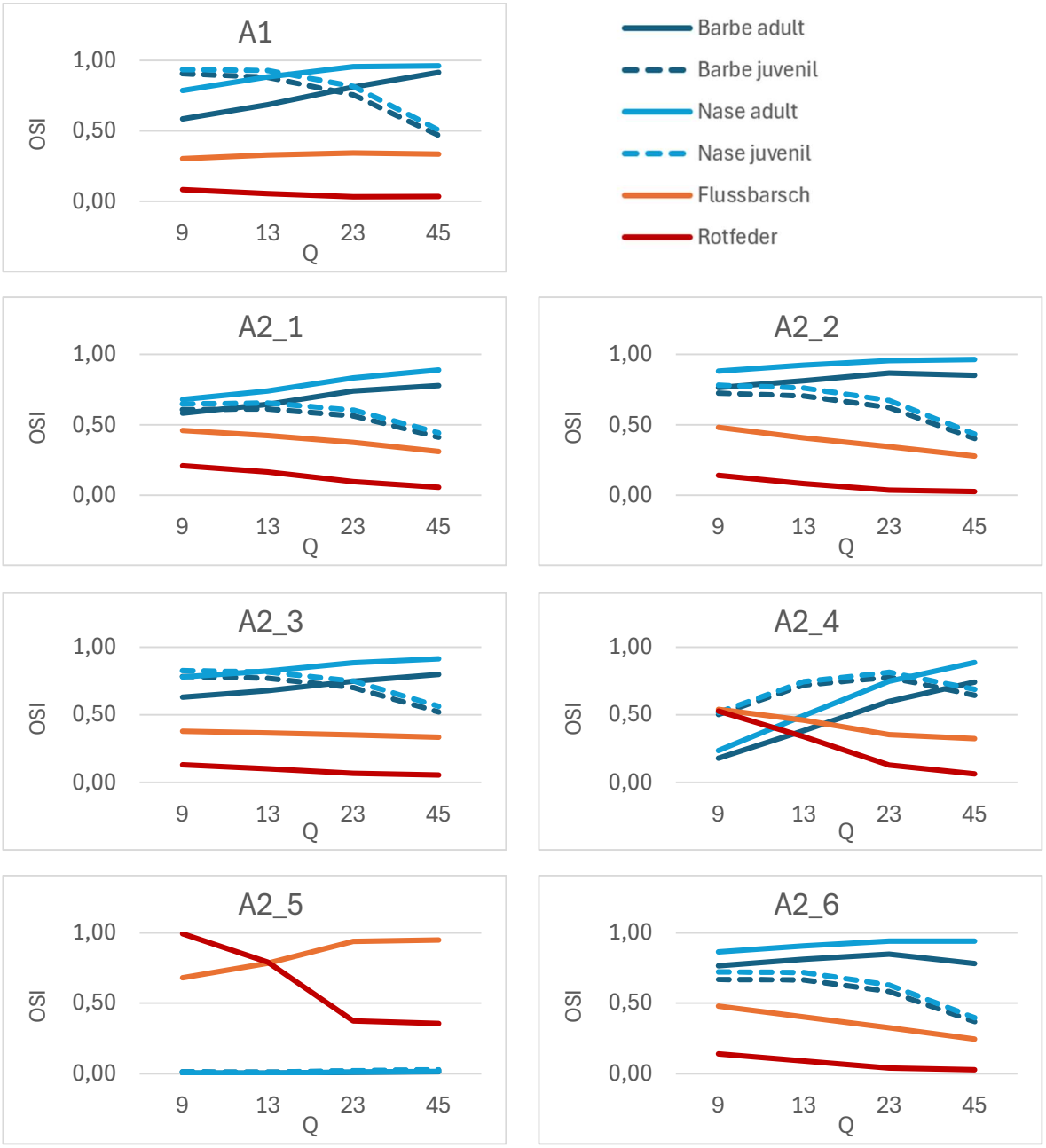
V heterogenním úseku existují i při nejnižším zkoumaném průtoku 9 m³/s dostatečně hluboké zóny rozložené po celém úseku, které vykazují vysokou vhodnost habitatu pro dospělé parmy. Jedinými výjimkami jsou průkop (podoblast A2_4) a meandr D8 napojený na dolním konci (podsekce A2_5). Podsekce A2_2 a A2_6 vykazují při průtoku 23 m³/s nejvyšší vhodnost habitatu. Na rozdíl od parmy preferují dospělé ostroretky o něco menší hloubku vody a rychlost proudění. Model habitatů ukazuje, že téměř všechny oblasti v hlavním korytě jsou pro tento druh velmi vhodné. I zde jsou při nízkém stavu vyloučeny pouze mělčí oblasti. Juvenilní parmy a ostroretky mají při všech zkoumaných průtocích k dispozici vhodné habitaty u ostrova na horním konci úseku, podél výrazně formovaných jesepních břehů, u odbočení dříve odstavených ramen a zejména v průkopu níže po proudu.

Vhodné habitaty pro okouna se nacházejí v okrajových oblastech velké tůně, v klidně tekoucím pravostranném bočním rameni kolem ostrova, v jednotlivých zátokách v meandru, v průkopu a v dole napojeném bočním rameni D8. Stupeň vhodnosti variuje mezi nízkým a středním stavem vody, ale velmi vhodné oblasti jsou k dispozici v celém spektru průtoků.

Ani v heterogenním úseku hlavní koryto se silným proudem prakticky nenabízí vhodné habitaty pro perlína. Kromě dole napojeného bočního ramene je dostatečně klidné proudění pouze na menších plochách podél jesepních břehů a v některých částech průkopu. Upozorňujeme zejména na poněkud větší zátoku v hlavním korytě pod ostrovem, která vykazuje relativně dobrou vhodnost.

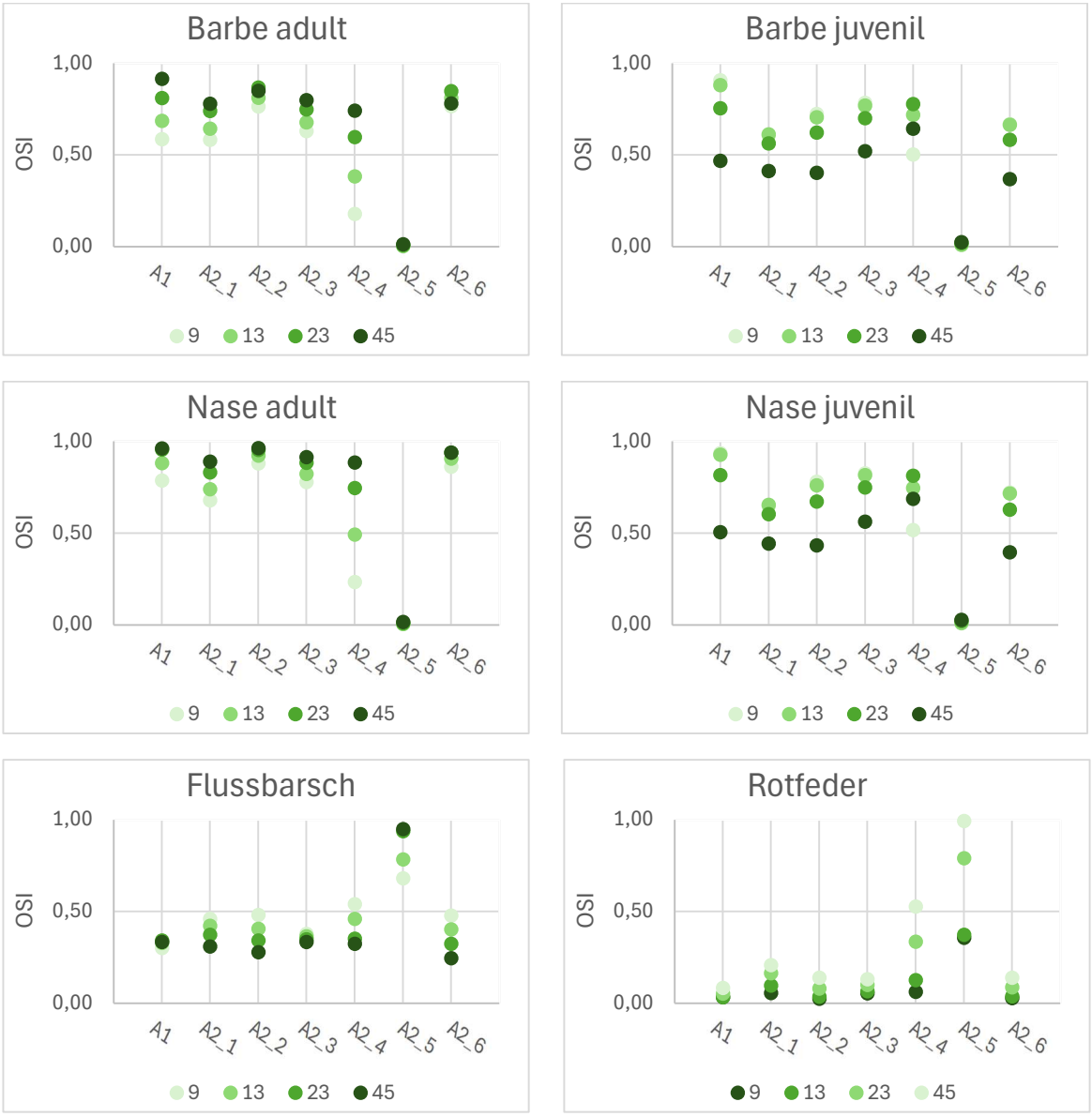
Následující obrázky obsahují grafické znázornění parametru OSI vypočítaného pro každou podoblast, tj. vhodnost habitatů celé podoblasti váženou podle vodní plochy. Obr. 5-3 je věnovaný diferenciaci zkoumaných druhů, Obr. 5-4 představuje rozdíly mezi podoblastmi se zkoumanými průtoky.

Jak je vidět na Obr. 5-3, regulovaný úsek A 1 stejně jako poměrně úzké a přímočaré podoblasti A2_2 a A2_6 nad a pod znovu napojeným meandrem ve 2. úseku vykazují podobné výsledky. Platí to i pro samotný meandr (A2_3). Ten však nabízí v celém zkoumaném spektru proudění konstantně lepší podmínky pro mladé jedince reofilních druhů a pro eurytopní druhy. Graf ukazuje také nepatrně lepší podmínky pro slabě plovoucí druhy v heterogenní části kolem ostrova (A2_1). Vzhledem ke složitým průtokovým vzorcům v souvislosti s rozdělovacím objektem a k hloubkám vody v průkopu (A2_4), které se liší od hlavního koryta, poskytuje zde vývoj dostupnosti habitatů diferencovaný obraz. V celém spektru proudění se zde nacházejí zvlášť dobré podmínky pro juvenilní jedince a ve srovnání s jinými oblastmi se silným prouděním také pro stagnofilního perlína.



Obr. 5-3: Porovnání OSI pro podoblasti a druhy

Výsledky jsou shrnuty na Obr. 5-4 podle druhu a vývojového stádia. Pro dospělé parmy a ostroretky je obraz téměř identický. Zatímco vhodnost habitatu v průkopu silně závisí na průtoku, v hlavním korytě zůstává konstantně vysoká. Pro juvenilní jedince parmy a ostroretky vykazuje nejlepší vhodnost v rámci zkoumaného území regulovaný úsek při nízkých hladinách vody. Při vyšších průtocích je dostupnost vhodných oblastí v heterogenním úseku poněkud více proměnlivá, celkově je tu nejspíš méně mělkých oblastí se slabým prouděním. Pro okouna je relevantní zejména boční rameno s dolním napojením. Podoblasti heterogenního úseku obecně vykazují lepší vhodnost než A1. To platí i pro perlína, i zde je průkop (A2_4) identifikovatelný jako habitat s prostřední vhodností.

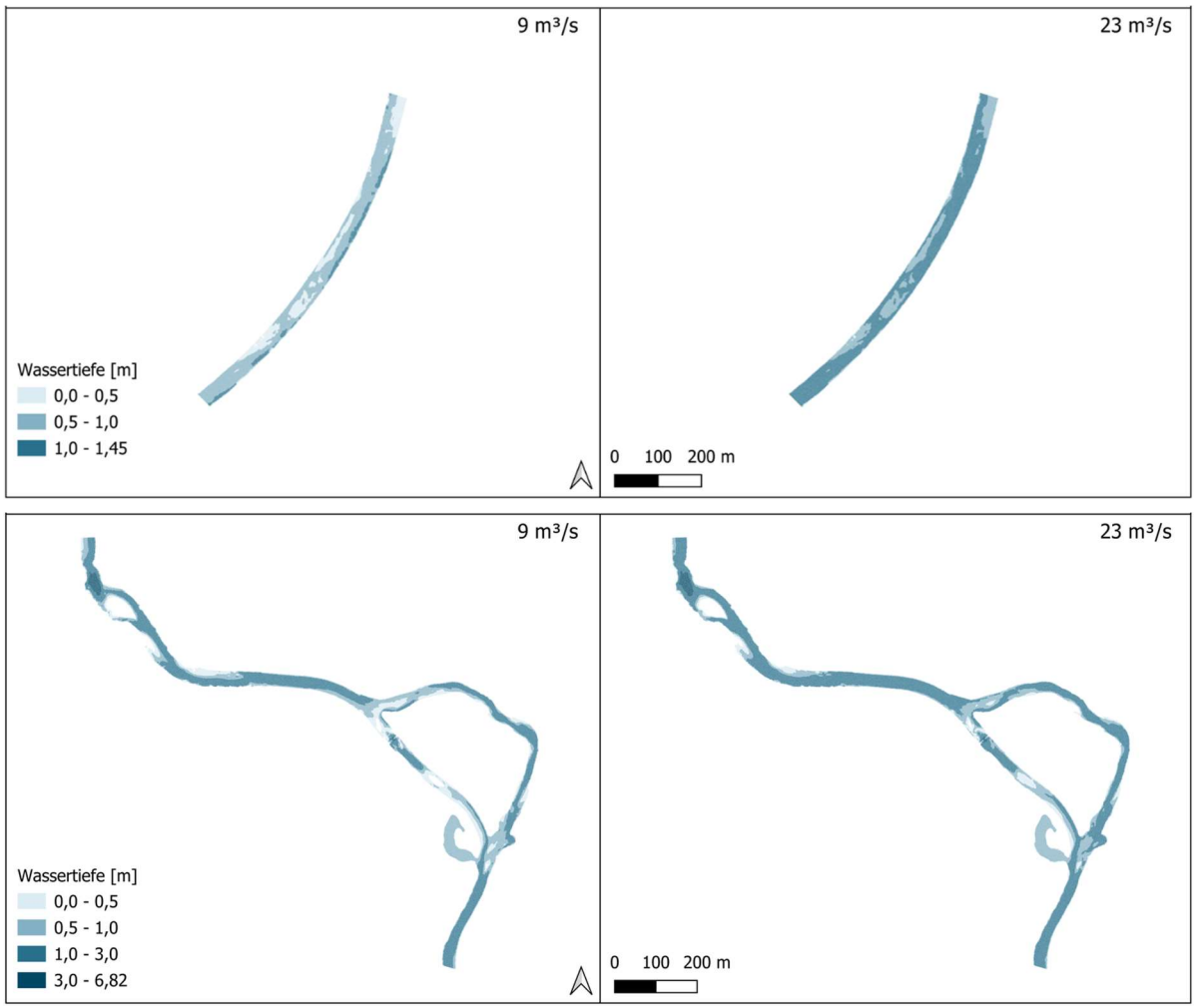


Obr. 5-4: Srovnání OSI, podoblasti pro jednotlivé druhy

Ve fázích s nízkým stavem vody je pro hydraulickou dostupnost habitatů relevantní zejména rozložení zbývajících hlubokých míst v toku. Pro posouzení této dostupnosti byla v hydraulickém modelu vyhodnocena hloubka vody při různých průtocích. Vzhledem k tomu, že mezi průtoky 9 a 13 m³/s nejsou téměř žádné rozdíly, byly porovnány výsledky pro průtok 9 a 23 m³/s (Obr. 5-5). Pro vizualizaci byly zvoleny různé třídy: hloubky vody do 0,5 m jsou zbarveny světle modře, následuje odstupňování pro hloubky vody od 0,5 do 1 m, od 1,0 do 3,0 m a hlubší než 3,0 m.

Na zobrazení je patrné, že i při průtoku pouhých 9 m³/s se v heterogenním úseku vyskytují velké plochy s hloubkou vody přes 1 m a jeden souvislý koridor s hloubkou vody alespoň 50 cm. To je důležité pro přesun mezi dílčími habitaty, který může být z různých důvodů nezbytný. Maximální hloubka vody ve 2. úseku je přibližně 6,8 m při průtoku 9 m³/s a přibližně 7,2 m při průtoku 23 m³/s.

Naproti tomu v regulovaném úseku se při průtoku 9 m³/s vyskytují pouze izolované oblasti s hloubkou vody větší než 1 m. Největší hloubka je tam jen cca 1,5 m. Teprve při průtoku 23 m³/s se na větší ploše vyvíjejí hlubší habitaty s maximální hloubkou vody 1,95 m.



Obr. 5-5: Porovnání hloubek vody při nízkém stavu na základě hydraulického modelu. Úsek 1 (nahoře), úsek 2 (dole).

Pro zkoumání refugií je také relevantní, zda jsou přítomny úkrytové struktury, tj. dílčí habitaty ve formě mrtvého dřeva, makrofytů, převislé vegetace nebo podemletých břehů, které nabízejí rybí fauně možnost úkrytu. Pro toto hodnocení byly použity záběry z dronu. Obr. 5-6 prezentují příklady výřezů z leteckých snímků regulovaného a heterogenního úseku. V regulovaném úseku převážně chybí úkrytové struktury. Výřez vlevo nahoře je reprezentativní pro většinu úseku – nachází se zde jen málo míst s maloplošnými strukturami mrtvého dřeva. Větší plochy jsou porostlé makrofyty. Ty se však nacházejí v mělčích oblastech a nejsou proto vhodné pro větší jedince. I v heterogenním úseku se nacházejí oblasti, které nevykazují žádné úkrytové struktury nebo jen málo. Celkově jsou však vhodné struktury rozmístěné po celém úseku.



Obr. 5-6: Dostupnost úkrytových struktur, příklady: regulovaný úsek (nahoře), heterogenní úsek (dole)

5.2.2 Termická dostupnost habitatů

Preferenční křivky v Příloze Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. ukazují, že teploty vody preferované většinou druhů relevantních pro Dyji se pohybují mezi 14 a 25 °C. Horní limity jsou poněkud rozmanitější a pohybují se od 26 °C (dospělci) do 27 °C (juvenilní jedinci) pro ostroretku a kolem 32 °C pro parmu. Pro okouna literatura uvádí maximální teplotu vody 33 °C. Ze zkoumaných druhů toleruje vyšší teploty pouze perlín, a to maximálně 38 °C (viz Tabulka 5-1).

Tabulka 5-1: Teplotní limity (horní optimum a maximum) pro zkoumané druhy

druh	vědecký název	stadium	horní optimum [°C]	maximum [°C]
parma	*Barbus*	juvenil./adult.	24	32
ostroretka	*Chondrostoma nasus*	adult.	24	26
ostroretka	*Chondrostoma nasus*	juvenil.	25	27
okoun	*Perca fluviatilis*	juvenil./ adult.	25	33
perlín	*Scardinius erythrophthalmus*	juvenil./ adult.	28	38

Obr. 5-7 aObr. 5-8 ukazují, že teploty vody v červenci a srpnu, tedy dvou měsících s nejvyššími teplotami vody, se pohybují přibližně od 19 do 28 °C, většinou kolísají mezi 22 a 24 °C. Od 4. září teploty plynule klesají, trvale pod 23 °C, a proto již nejsou relevantní pro výzkumnou otázku vysokých teplot vody v tomto projektu.

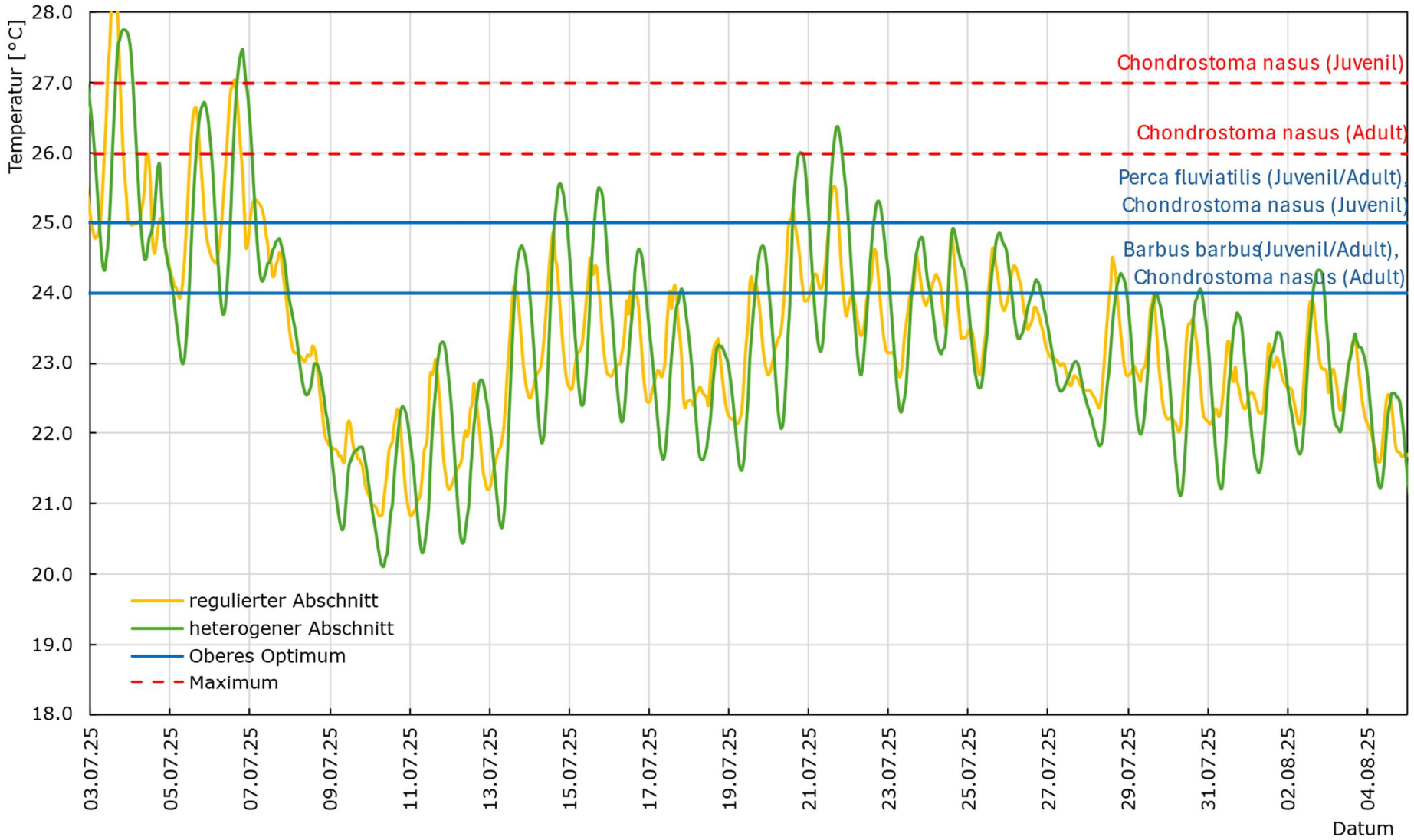
Měření z dataloggerů v den snímkování pomocí dronu vykazují ranní teploty vody přibližně 23,6 °C v regulovaném úseku a přibližně 22,5 °C v heterogenním úseku. V poledne byly hodnoty přibližně 24,4 °C v regulovaném úseku a přibližně 24,0 °C v heterogenním úseku. Během odpoledne a večera

teploty v obou úsecích dosáhly nejvyšších hodnot přibližně 25,3 až 25,4 °C. Měření v den snímkování pomocí dronu jsou proto považována za reprezentativní pro posouzení typických letních podmínek a z nich vyplývající dostupnosti habitatů v řece Dyji.

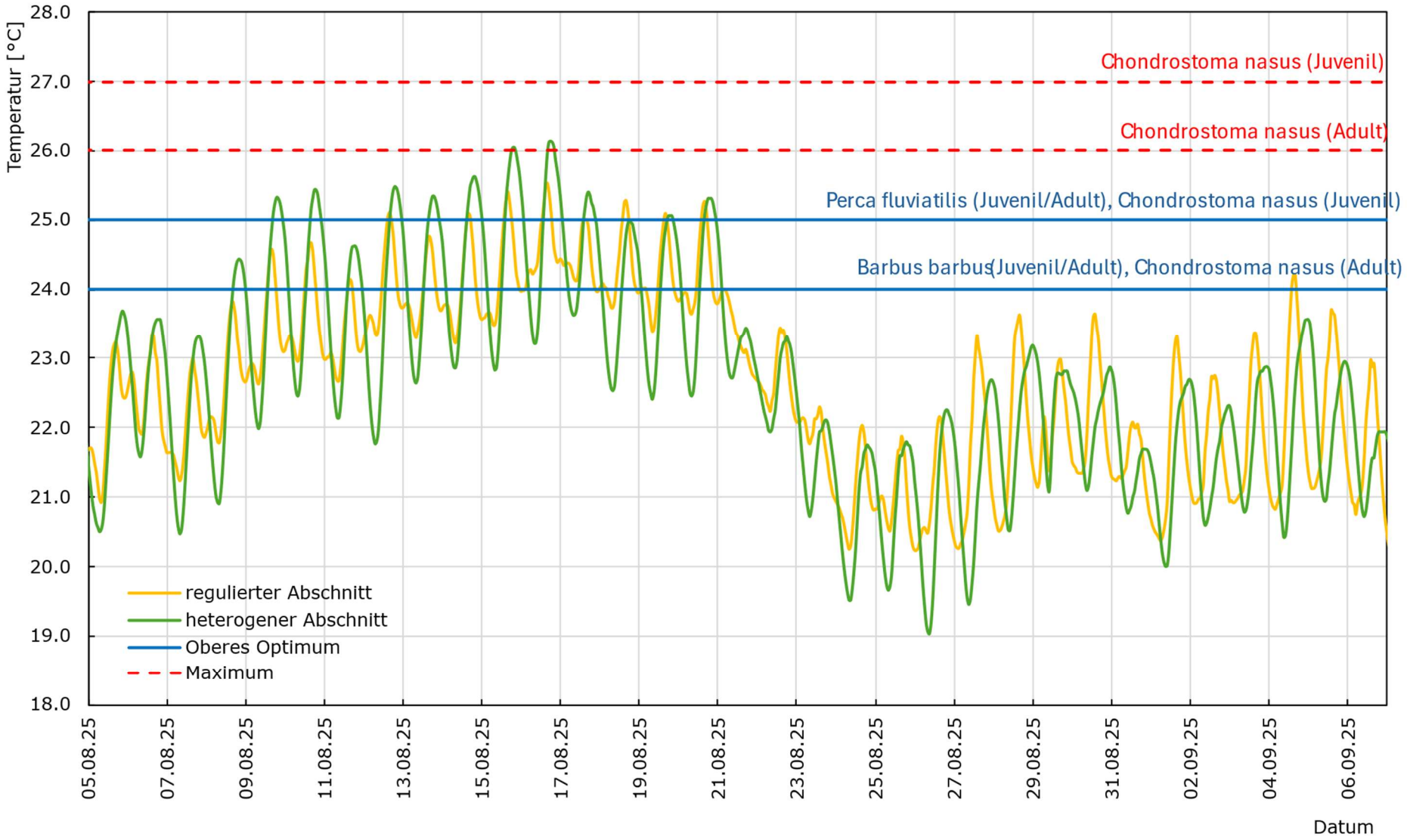
Překrytí měření a teplotních preferencí vybraných druhů ryb a jejich vývojových stádií v obou grafech ukazuje, že se aktuální letní teploty vody nacházejí v rozmezí horního optima zkoumaných druhů.

Situace je zvlášť kritická pro dospělé ostroretky a parmy obou věkových kategorií, jejichž horní optimum je 24 °C. Ve zkoumaných úsecích byla tato hodnota v odpoledních a večerních hodinách často překročena o více než jeden stupeň. U ostroretky byla maximální teplota na několik hodin překročena asi v pěti dnech. Dyje se však v noci dostatečně ochlazuje a teploty se nakonec vracejí do optimálního rozmezí. Zdravé ryby se dokáží s krátkodobým a ojedinělým překročením maximální teploty vyrovnat, rozhodující však je, aby vysoké teploty vody nebyly zhoršovány dalšími stresovými faktory (např. hydraulická dostupnost habitatů, zákal, nedostatek kyslíku) (viz kapitola Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.). Při vysokých teplotách je nezbytné dostatečné okysličení. Vyhodnocení výsledků měření v kapitole Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. ukazuje, že vzhledem ke zvýšené teplotě vody stávající tůně nejsou vhodné jako refugia. Zmírňující vliv na teplotu Dyje tedy mají pouze delší zastíněné úseky.

Z oblastí s výrazně klidnějším prouděním v heterogenním úseku, které lze rozeznat v modelu habitatů, nejsou k dispozici žádná měření z dataloggerů. Na základě pozorovaných rozdílů mezi údaji z loggerů a naměřenými hodnotami z termografie v kapitole Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. lze vyvodit zjednodušený odhad, že teploty z loggerů v denní době teplotního maxima dron asi o jeden až dva stupně nadhodnocuje. Proto lze ve 2. úseku pro boční rameno D8 napojené na dolním konci, které je vhodné především pro stagnofilní druhy, předpokládat teplotní maxima přibližně 27 až 28 °C. Tyto teploty odpovídají horní hranici optima pro okouna a perlína. Výsledky numerického modelu ukazují v uvedeném bočním rameni teploty vody až 26 °C (viz Obr. 4-24). Lze předpokládat, že tento habitat a jemu podobné jsou na Dyji v současné době k dispozici jako vhodné habitaty pro eurytopní a stagnofilní druhy.



Obr. 5-7: Termická dostupnost habitatů – 3. července až 5. srpna



Obr. 5-8: Termická dostupnost habitatů – 5. srpna až 7. září

5.3 Shrnutí a závěr

Analýza habitatů ukazuje jasné rozdíly v hydraulické dostupnosti habitatů mezi regulovaným a heterogenním úsekem. To se dalo vzhledem k rozdílným charakteristikám profilů vodního toku, rozložení hloubek a zakřivení řečiště v zásadě očekávat. Mimoto data umožňují vyvodit konkrétní závěry ohledně dostupných habitatů a jejich rozložení pro gildy ichtyofauny Dyje, vázané na určitý typ proudění.

Regulovaný úsek je celkově vhodný pouze pro některá vývojová stádia zkoumaných reofilních druhů. Za zvýšených průtoků zde výrazně chybí refugia.

V heterogenním úseku se díky rozmanitým charakteristikám příčných profilů vyskytují habitaty s dobrou až velmi dobrou vhodností pro všechny zkoumané druhy a vývojová stádia, ačkoli převažují oblasti se zřetelným prouděním. Výsledky pro okouna a perlína ukazují, jak velký význam pro nabídku vhodných stanovišť pro širokou škálu eurytopních a stagnofilních druhů ryb mají v říční krajině úseky toku s pokročilou sukcesí, například jednostranně napojená slepá ramena.

To je relevantní i pro dostupnost habitatů při různých průtokových scénářích. Na příkladu juvenilní ostroretky je jasně patrné, že při nejvyšším zkoumaném průtoku 45 m³/s již v úseku s jednotným profilem, jednotnou břehovou linií a minimální rozmanitostí hloubek neexistují žádná vhodná stanoviště. Naproti tomu v říčních úsecích s výraznými zákruty zůstávají využitelná území pro juvenilní jedince v jesepních březích nebo v blízkosti ostrovů.

K dostupnosti refugií za nízkého stavu vody lze souhrnem konstatovat, že v regulovaném úseku se téměř nevyskytují útočiště ve formě hlubší vody nebo úkrytových struktur. Naproti tomu v heterogenním úseku je patrná souvislá nejhlubší část koryta a v celém jeho průběhu je také rozmístěno mnoho rozmanitých úkrytových struktur. V heterogenním úseku nicméně nadále existuje potenciál pro zvýšení jejich podílu úkrytových struktury z mrtvého dřeva.

Průtok 23 m³/s, navržený v předchozích projektech ke zmírnění negativních dopadů dlouhodobě nízkých stavů vody, by například zlepšil situaci pro dospělé parmy, protože tyto ryby jsou závislé na hlubších lokalitách, které by ve srovnání s průtokem 13 m³/s získaly výrazně větší plochu. Na základě výsledků měření teploty a chybějících důkazů o zřetelnější stratifikaci a ochlazování v hlubších místech nelze od vyšších průtoků očekávat úlevu související s nízkoteplotními refugii. Vzhledem k tomu, že by se taková „úlevová vlna" generovala z vody zadržené v Nových Mlýnech, její účinek do značné míry závisí na teplotě vypouštěných objemů vody.

Celkově vzato nejsou v současnosti hydraulicky dostupné habitaty v důsledku nynějších převládajících letních teplot vody zatím omezeny. Teploty se však již pohybují na horní hranici optima. To je třeba vzít v úvahu s ohledem na potenciální změny dostupnosti habitatů v důsledku budoucího zvyšování teploty vody.

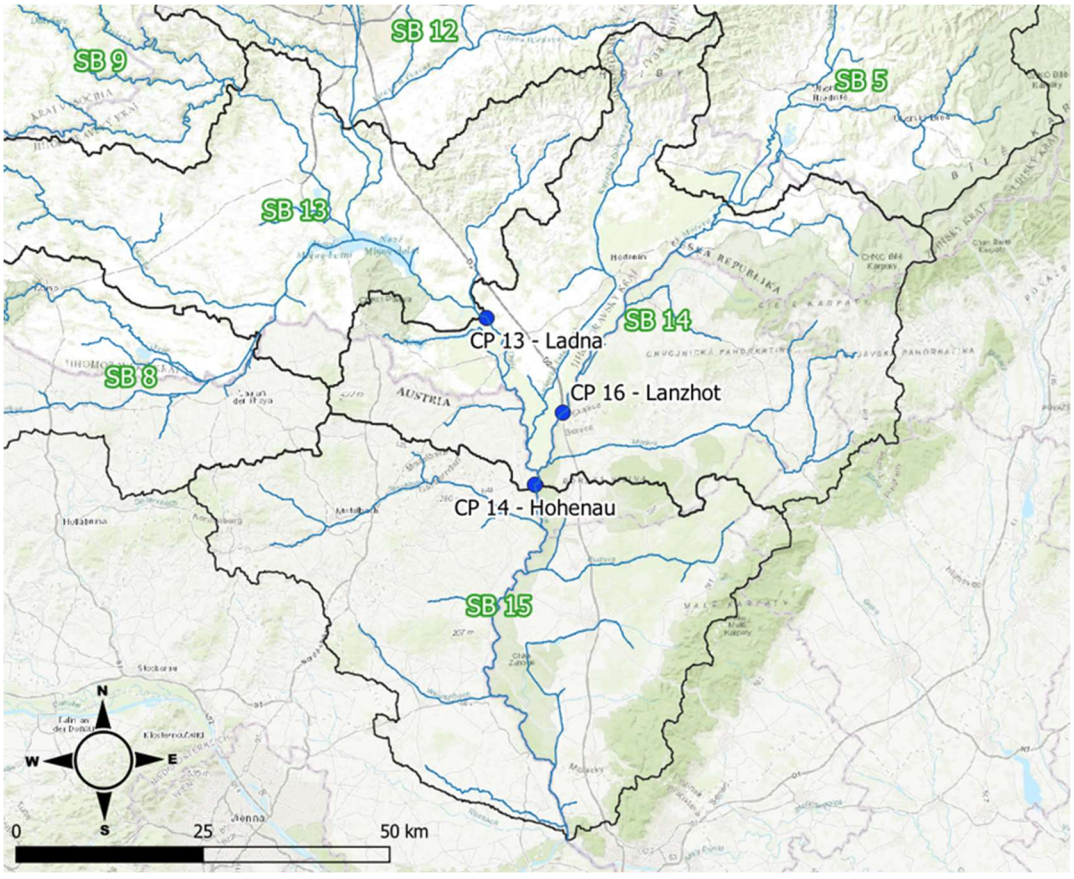
6 Zkoumání vlivu změny klimatu na teplotu vody

6.1 Podklady

K vývoji teploty vody v říčním úseku přispívají nejrůznější fyzikální procesy (viz Obr. 4-7). Navzdory složité souhře těchto procesů vykazuje pozorovaná teplota vody v říčním úseku obvykle velmi vysokou korelaci s teplotou okolního vzduchu (viz Łaszewski, 2013).

Mnoho regresních modelů teploty vody je založeno pouze na dvou proměnných, totiž teplotě vzduchu a průtoku vody v řece, který určuje tepelnou kapacitu vodního útvaru. Díky tomu mohou spolehlivě zobrazit variance teploty vody (např. Hostetler 1991, Webb a Nobilis 1994, Toffolon a Piccolroaz 2015, Gray et al. 2018). AFRY již dříve provedla v rámci projektu „Kli-Ma" pro viadonau podobné simulace pro nejsevernější úsek řeky Moravy bezprostředně pod soutokem s Dyjí (Stanzel et al., 2022).

V rámci simulací teploty vody v Moravě byl vytvořen regresní model pro období 2000, resp. 2004–2020 s využitím dat o teplotě vody především z limnigrafické stanice Hohenau (Morava/March), dat průtoku ze stanic Ladná (Dyje) a Lanžhot (Morava) a regionalizovaných teplotních dat pro povodí mezi Ladnou a Hohenau (území SB 14 na Obr. 6-1, který ukazuje také umístění limnigrafů a síť vodních toků). Data o teplotě vzduchu byla prostorově interpolována z údajů ČHMÚ.



Obr. 6-1: Zkoumané území pro simulaci teploty vody v Moravě v rámci projektu Kli-Ma (zdroj: Stanzel et al. 2022)

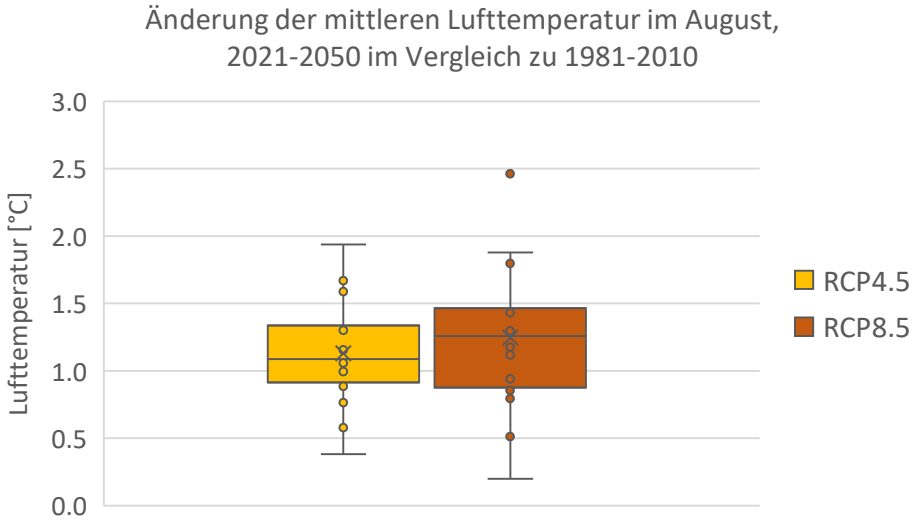
Pro simulace scénářů ovlivněných změnou klimatu tato analýza využila projekce klimatických modelů z regionálních klimatických modelů ansámblu CORDEX (Jacob et al., 2014) a také simulace průtoků podle těchto projekcí klimatických modelů. Výsledky pro úsek řeky Moravy bezprostředně pod řešeným územím na Dyji lze použít i pro fundovaný odhad vlivu změny klimatu na teplotu vody v Dyji.

6.2 Klimatické scénáře

Obr. 6-2 ukazuje projekce zvyšování průměrné teploty vzduchu v srpnu pro období 2021–2050 ve srovnání s průměrem za období 1981–2010 ve dvou emisních scénářích RCP4.5 a RCP8.5. Analýza se vztahuje opět na oblast SB14 na Obr. 6-1.

Pro zkoumání různých možností vývoje při budoucích globálních emisích skleníkových plynů se používají různé emisní scénáře. RCP4.5 je realisticky optimistický scénář, ve kterém dochází k významné, ale ne nereálně velké redukci globálních emisí přibližně od roku 2050. Ve scénáři RCP8.5 emise poklesnou až koncem 21. století – pesimistický scénář, který však lze také považovat za realistický. Vzhledem k tomu, že podstatné rozdíly v předpokládaných emisích se u obou scénářů projeví až po roce 2050, nevykazují projekce teploty vzduchu na období 2021–2050 příliš markantní rozdíl.

Bylo vyhodnoceno množství klimatických modelů (tzv. ansámbl), díky tomu pro každý emisní scénář nevznikla jediná hodnota, nýbrž distribuce. Tato distribuce je shrnuta na Obr. 6-2 formou krabicového grafu. Tento postup alespoň částečně odráží chybovost v modelování klimatu, protože každý model má mírně odlišné matematické zobrazení fyzikálních procesů a tím i poněkud odlišné systematické chyby a výsledky. Kromě výsledků všech jednotlivých modelů krabicový graf ukazuje medián všech modelů („medián ansámblu") a interkvartilové rozpětí, ve kterém leží 50 % výsledků všech modelů. V ansámblu CORDEX pro projekt „Kli-Ma" bylo použito šestnáct různých modelů.



Obr. 6-2: Projekce změny průměrné teploty vzduchu v srpnu v klimatických modelech ansámblu CORDEX pro dva emisní scénáře (RCP4.5 a RCP8.5) v období 2021–2050 ve srovnání s lety 1981–2010.

Mediány ansámblu pro zvýšení průměrné srpnové teploty v těchto datech pro oblast soutoku Dyje s Moravou jsou cca 1,1 °C ve scénáři RCP4.5 a cca 1,3 °C ve scénáři RCP8.5.

Ansámbl CORDEX je nadále aktuální ansámbl klimatických modelů s vysokým prostorovým rozlišením (tzv. Regional Climate Models, RCM).

Od té doby však byla publikována novější generace globálních klimatických modelů (GCM) s hrubším prostorovým rozlišením jako tzv. ansámbl CMIP6 (Eyring et al., 2016).

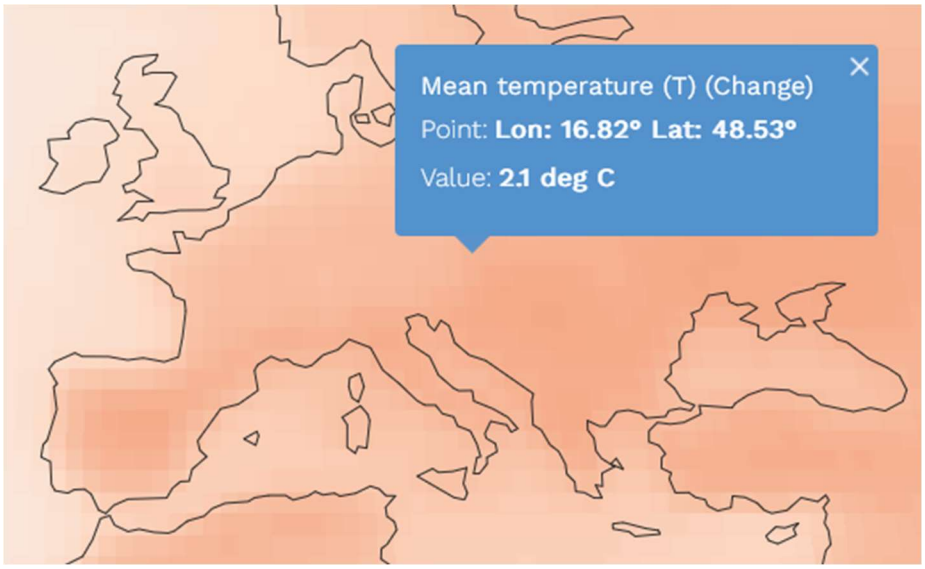
Tato data předpokládají silnější oteplování. Obr. 6-3 ukazuje průměr ansámblu CMIP6 pro zkoumaný region (scénář RCP8.5, nový název: SSP5-8.5, období 2021–2040, srovnání 1981–2020, průměrná teplota vzduchu v letních měsících; screenshot z datového portálu IPCC WGI Interactive Atlas, IPCC 2026). Ačkoli období scénáře končí o deset let dříve, průměrná hodnota ansámblu je

výrazně vyšší než v prezentovaných projekcích CORDEX, a to 2,1 °C ve scénáři SSP5-8.5 (a 1,8 °C v SSP2-4.5).

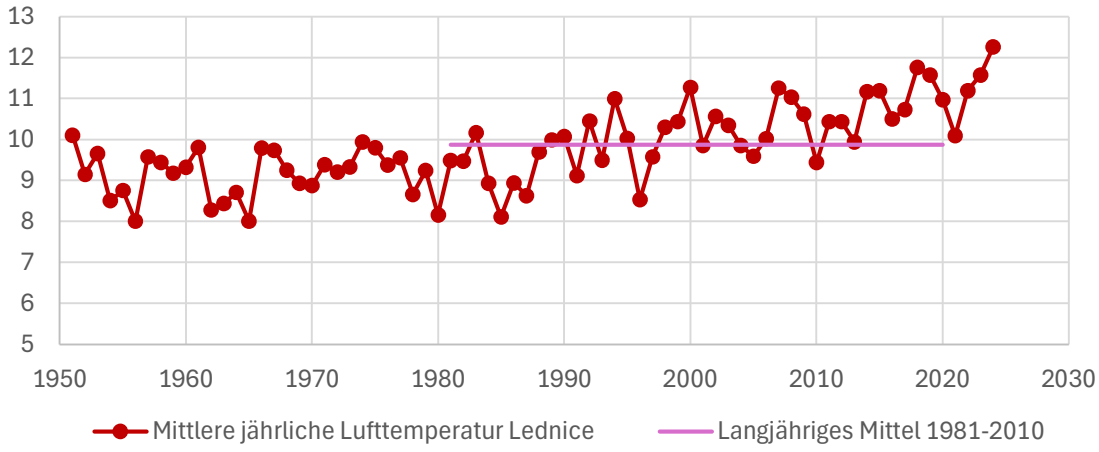
V analýzách pro řeku Moravu nebyly vyhodnoceny maximální teploty vzduchu. Data o maximálních teplotách však lze získat na online portálu IPCC. Projekce změny této proměnné ukazují hodnoty o 0,1 až 0,2 °C vyšší (podle období a scénáře emisí).

Na základě vyhodnocených dat ze dvou ansámblů klimatických modelů CORDEX a CMIP6 lze pro oba scénáře emisí (optimistický i pesimistický) vyvodit, že v dlouhodobém výhledu přibližně do roku 2050 lze během letních horkých vln očekávat další oteplování (oproti letům 1981–2010) o cca 1,2 °C až cca 2,3 °C.

Při tom je třeba vzít v úvahu, že od období 1981–2010 již došlo k výraznému nárůstu teploty vzduchu (a tím i teploty vody). Na stanici Lednice byla teplota vzduchu v letech 1995–2024 v ročním i srpnovém průměru téměř o 0,7 °C vyšší než v období 1981–2010, přičemž obzvlášť teplá byla zejména většina roků po r. 2010 (Obr. 6-4). Průměrná teplota vody na stanici Hohenau byla v období 2004–2010 12,4 °C, což je o 0,8 °C více než simulovaná teplota vody pro období 1981–2010.



Obr. 6-3: Průměr ansámblu změny letních teplot vzduchu pro období 2021–2040 ve srovnání s lety 1981–2020, v ansámblu CMIP6 pro území v blízkosti zkoumané oblasti, screenshot z IPCC WGI Interactive Atlas, IPCC 2026.



Obr. 6-4: Nárůst teploty vzduchu na stanici Lednice (zdroj: ČHMÚ)

6.3 Dopady na teplotu vody

Do scénářové simulace teploty vody v Moravě byl kromě teploty vzduchu zahrnut také průtok v Moravě a Dyji. Hydrologické simulace, které umožnily projekci průtoků pod vlivem změny klimatu, se řídí daty z klimatických modelů nejen pro teplotu vzduchu, ale i pro srážky. Tyto simulace však pro letní měsíce neodhalily žádné jasné trendy: z dat některých klimatických modelů vyplynul mírný pokles, zatímco z jiných mírný nárůst; průměr ansámblu nevykázal žádnou relevantní změnu.

V ročním průměru se teplota vody zvyšovala méně než teplota vzduchu: Zvýšení teploty vzduchu o 1,0 °C, resp. 1,1 °C v průměru ansámblu vedlo ke zvýšení teploty vody o 0,9 °C, resp. 1,0 °C. V průběhu roku se však v létě ukázalo o několik desetin stupně výraznější oteplování, což může souviset s menším průtokovým množstvím vody. Celkově lze tedy předpokládat, že teplota vody má v létě tendenci stoupat stejnou měrou jako teplota vzduchu.

Vyhodnocení dat z klimatických modelů a simulací teploty vody pro řeku Moravu tedy naznačuje očekávaný letní nárůst teploty vody v Dyji o cca 1,2 °C až cca 2,3 °C.

Ve vyhodnocení pro řeku Moravu byla v souvislosti se specifickými odchylkami simulované teploty vody od pozorování provedena také analýza, zda má odtok z VD Nové Mlýny nějaký měřitelný vliv na teplotu vody v Hohenau. Při tom nebyla zjištěna žádná časová souvislost mezi kolísáním teploty vody v Hohenau a odtoky z nádrže.

6.4 Změny v dostupnosti habitatů

Obr. 6-5 aObr. 6-6 ukazují hypotetický teplotní průběh v létě na základě naměřených dat a analýzy klimatických scénářů. Byl předpokládán nejpesimističtější scénář, kdy teplota vody během letní vlny veder vzroste do roku 2050 o 2,3 °C, zatímco morfologie řeky Dyje zůstane nezměněna, tj. nebudou provedena žádná další revitalizační opatření.

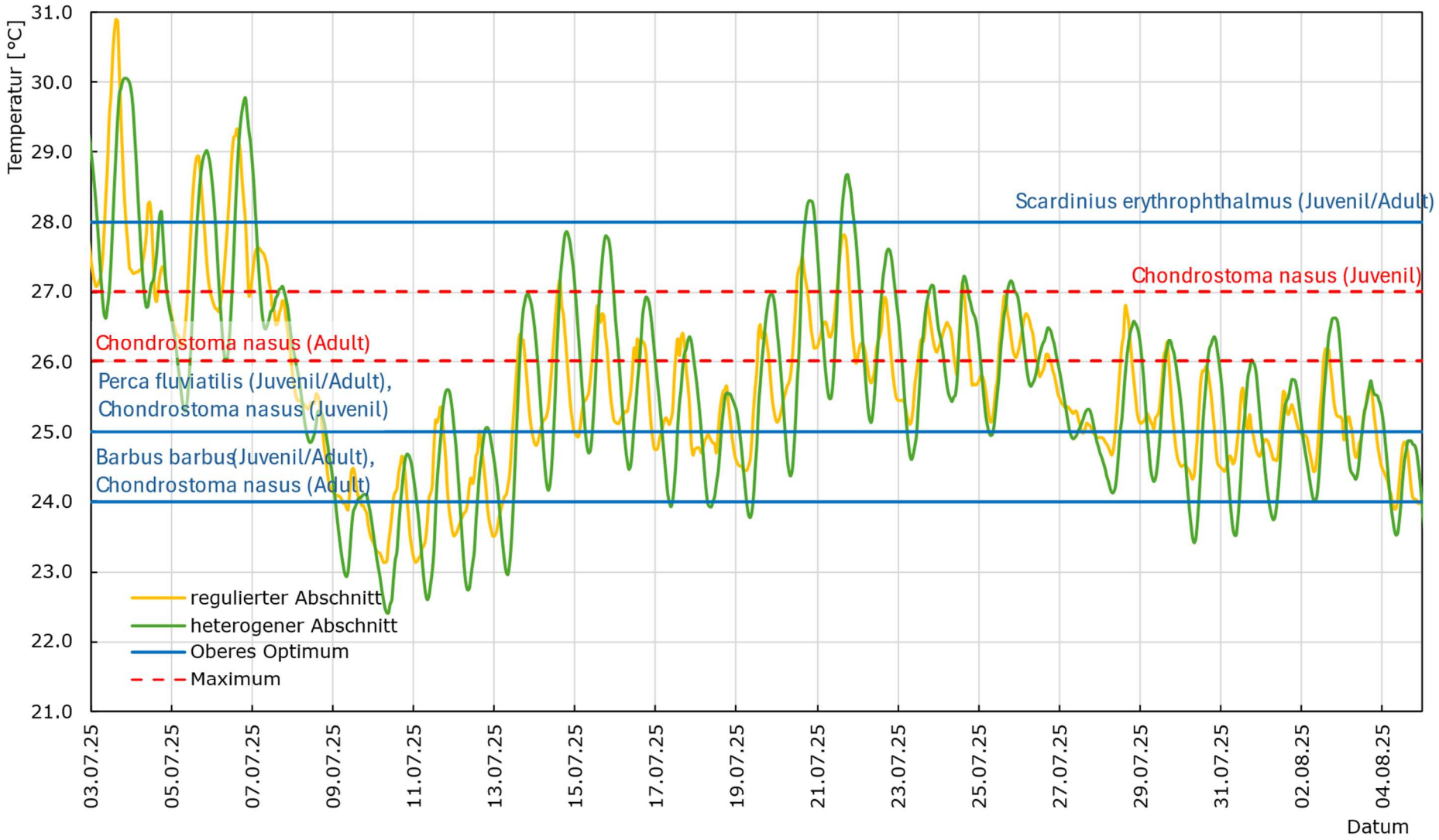
Ve srovnání s kapitolou5.2.2 se výrazně zvýší tepelný stres, zejména u reofilních druhů. Grafy ukazují, že teploty vody v letních měsících se v budoucnu udrží po několik týdnů výrazně nad optimálním rozmezím pro reofilní rybí faunu. Během zvlášť horkých fází, jako např. zobrazený začátek července, by teploty vody mohly po několik dní překračovat maximální tolerovatelné hodnoty pro dospělé ostroretky. Během tohoto období by maximální denní teploty vody mohly dosáhnout 30 °C. Aby takové vlny veder nevedly k vysoké mortalitě reofilních druhů, bude v budoucnu ještě důležitější aktuálně pozorované ochlazování v nočních hodinách. Trvalý vysoký tepelný stres povede k poklesu podílu reofilních druhů v Dyji.

Mnoho eurytopních a stagnofilních druhů je adaptováno na extrémní teplotní a kyslíkové podmínky a jejich teplotní optima a limity často překračují hodnoty zobrazené v níže uvedeném grafu. Jejich preferovaná stanoviště se však také podstatně více oteplují a podle jednotlivých měření jsou jen omezeně zastoupena. V kapitolách Chyba! Nenalezen zdroj odkazů. a 5.2.2 byly pro dole napojené boční rameno v heterogenním úseku předpokládány maximální teploty vody kolem 26 až 28 °C. V případě nejhoršího scénáře by se zde v typickém letním dni v roce 2050 mohly vyskytnout teploty vody až 29,3 °C, ve zvlášť horkých fázích i ještě vyšší. To by již znamenalo výrazné překročení optimálního rozsahu pro okouny a perlíny, stanoviště by však ještě byla v zásadě využitelná. I zde je však nutné předpokládat zvýšenou úroveň stresu.

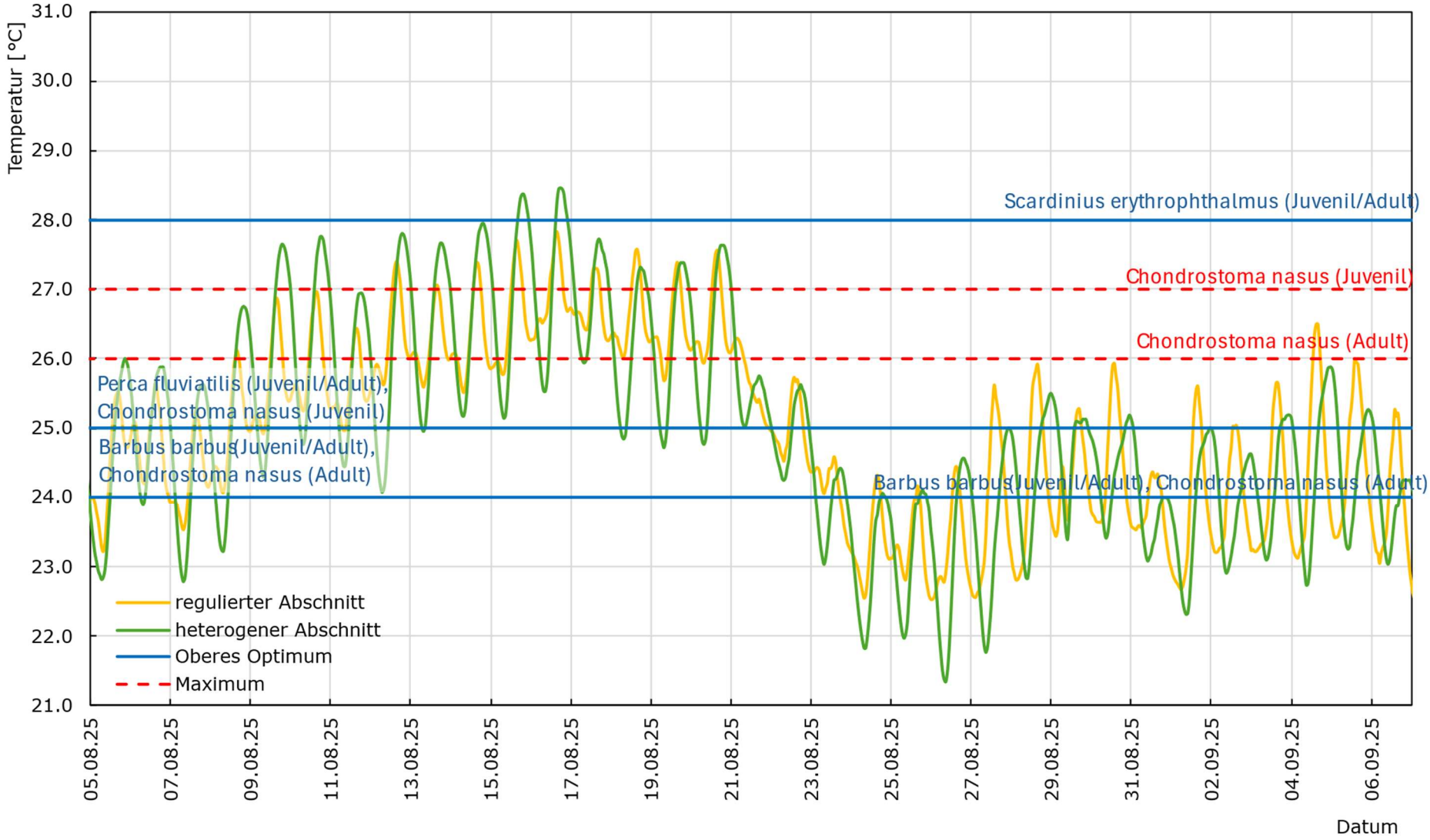
Kromě čistého zvýšení teploty jsou relevantní i biochemické procesy, které budou během budoucího vývoje nabývat na významu. Kromě procesů spotřebovávajících kyslík je znepokojivé především přemnožení řas (sinic) ve VD Nové Mlýny, které může vést k úhynu ryb působením toxinů a velkého množství organické hmoty. Takové přemnožení sinic s následným úhynem ryb bylo v posledních letech v okolí Břeclavi dobře zdokumentováno. Lze očekávat nárůst takových ekologicky fatálních stavů.

Analýzy využívající termodynamický model ukazují, že lokální efekty mohou skutečně vést k teplotním rozdílům, které se znatelně liší od okolních oblastí. V této souvislosti by klidnější zátoky nebo boční ramena méně ovlivněná hlavním proudem mohly při vysokém stupni zastínění skutečně fungovat jako refugia. Takové efekty by mohly být blíže prozkoumány v dalších měřeních.

Analýza scénářů ukázala potenciální dopady různého zastínění na teplotu vody. Na hraničním úseku Dyje je stupeň zastínění již relativně vysoký, protože porosty lužního lesa v dlouhých úsecích zasahují až k toku. Pouze v několika úsecích tu je potenciál pro zvýšení vlivu zastínění. Úsek toku mezi Novými Mlýny a zkoumaným regulovaným úsekem v Česku je však převážně regulovaný a nezastíněný. Přiblížením stupně zastínění podmínkám zkoumaného hraničního úseku na podobné délce přibližně osmi kilometrů by se mohly maximální teploty vody snížit asi o 1,5 °C (viz Obr. 4-30), což je významný efekt vzhledem k očekávanému nárůstu v důsledku změny klimatu.



Obr. 6-5: Termická dostupnost habitatů – 3. července až 5. srpna 2050, bez dalších opatření na vodním toku



Obr. 6-6: Termická dostupnost habitatů – 5. srpna až 7. září 2050, bez dalších opatření na vodním toku

7 Závěry a výhled

7.1 Měření a modelování teploty

(a) Které metody měření a výpočtu teploty jsou v praxi vhodné k získání dat potřebných k zodpovězení následujících otázek?

Zjišťování teploty: Porovnání výsledků bodových měření pomocí dataloggerů instalovaných v toku a plošných výsledků termografie odhaluje některé významné rozdíly. Ty jsou připisovány chybám měření a silné závislosti termografických měření na různých ovlivňujících faktorech, např. krátkodobých radiačních a reflexních efektech. Výsledky z loggerů zřetelně ukazují, že teploty vody v Dyji jsou do značné míry homogenní. Uvnitř profilů nebyly zjištěny žádné významné rozdíly, a to ani u břehů, ani jako horizontální stratifikace. Termografická měření povrchových teplot ukazují maloplošné rozdíly o několik stupňů, které ve vodním toku nejsou pravděpodobné. Za podmínek tohoto výzkumu proto termografie neposkytuje reprezentativní výsledky pro teploty vody v Dyji. Aby bylo v budoucích měřeních možné plně využít výhod plošných výsledků termografie, bylo by nutné prověřit možnosti úpravy metodiky (např. noční lety) a vyhodnocování dat.

Naproti tomu měření s použitím instalovaných dataloggerů poskytují robustní výsledky ve formě časových řad pro měřicí body, které lze do značné míry volně zvolit. Pro ekologické posouzení teplotní resilience vodního toku nebo nádrže mohou být rozhodující měření v různých hloubkách. Výsledky pak jsou vhodné jako vstupní data pro další výzkumy a pro hodnocení vlivů teploty vody z hydroekologického hlediska. Zásadní je řádná fixace loggerů v toku a prevence potenciálních ztrát vandalismem nebo driftováním při povodni. Ke ztrátě dat však přesto může dojít.

Modelování teploty: Použitý software (BASEMENT V4.2) umožňuje velmi dobře zobrazit jak časový průběh teplot, tak jejich prostorové rozdíly. Diference mezi naměřenými hodnotami z dataloggerů a hodnotami modelu řádově odpovídají přesnosti měření. Kromě obecného modelování teploty v toku a simulace variant a scénářů lze řešit i otázky dopadů přítoku podzemní vody, vypouštění chladicí vody a procesů jejich směšování. Modelování teplot tak představuje cenný nástroj pro ekologické a právní posuzování různých problémů. Pro úspěšné použití teplotního modelu pro konkrétní zadání a jeho okrajové podmínky jsou však rozhodující konzistentní data a měřicí body jak pro teplotu vody, tak i meteorologické parametry.

7.2 Dostupnost habitatů

(b) Jaká je v současné době prostorová a časová dostupnost termicky (teplota) a hydraulicky (hloubka a rychlost proudění) vhodných habitatů v horkém letním dni při minimálním zůstatkovém průtoku v Dyji?

(c) Jak se pod různými vlivy (minimální zůstatkový průtok, změna klimatu nebo revitalizační opatření) mění prostorová a časová dostupnost termicky a hydraulicky vhodných habitatů?

Pokud jde o dostupnost habitatů vhodných pro různé gildy ichtyofauny Dyje, vázané na určitý typ proudění, lze na základě analýzy habitatů lze pozorovat jasné rozdíly mezi regulovaným a heterogenním úsekem. Na základě analýzy lze konkrétně ukázat, že úseky s jednotným příčným profilem nabízejí vhodná stanoviště jen pro některá vývojová stádia zkoumaných reofilních druhů, navíc silně závislá na průtoku. Heterogenní utváření koryta nabízí i při velmi nízkých nebo naopak zvýšených průtocích refugia v podobě hlubších míst, klidnějších zátok a bočních ramen. Význam přírodě blízkých úseků toku s pokročilou sukcesí je zvlášť zřetelný u stagnofilních druhů, protože jim poskytují mozaiku dílčích biotopů s různými průtokovými poměry, zahrnujících i stojaté vody.

Výsledky tak potvrzují význam revitalizačních opatření provedených v hraničním úseku, která opětovným napojením dříve oddělených ramen přiblížila míru meandrování vodního toku jeho přirozenému typu a vytvořila tím rozmanité habitaty. Opatření k rozvolnění břehů nebo dlouholetý program

údržby břehové zóny, který má umožnit vývoj břehové linie s vlastní dynamikou, zvyšují dostupnost úkrytových struktur ve formě mrtvého dřeva v toku a vytváření plochých i strmých břehů. Úkrytové struktury navíc podporuje vznik lokálních hlubokých tůní – podíl těchto prvků by se mohl i v heterogenním úseku Dyje dále zvyšovat (viz koncept opatření z projektu Thaya Wellendynamik).

Výsledky modelování také umožnily ověřit dopad dříve navrhovaných „odlehčovacích vln". Zatímco z hydraulického hlediska se tyto vlny považují za účinné, ochlazení od nich nelze očekávat vzhledem k závislosti teploty vody v Dyji na VD Nové Mlýny. Ichtyofauna Dyje jako nížinné řeky je v zásadě přizpůsobená poměrně vysokým teplotám vody. Současné letní teploty vody se však již nacházejí na horní hranici optima pro reofilní druhy ryb, které jsou k teplotám vody méně tolerantní.

Při postupném oteplování, postulovaném podle klimatických scénářů, by mohla teplota vody během letních vln veder do roku 2050 být až o 2,3 °C vyšší než dnes. Rybí fauna Dyje se tak ocitá pod stále větším tlakem – tepelný stres se výrazně zvyšuje, a to zejména u reofilních druhů. Krátkodobá zvýšení mohou dočasně přečkávat například v místech s přítokem podzemní vody, ale to vyžaduje odpovídající propojení v bočním i podélném směru. Pokud by se nevhodné podmínky vyskytovaly častěji a po delší dobu, některé druhy ryb typické pro Dyji, jako jsou parmy a ostroretky, by mohly z ekosystému vymizet. I teplotní rozpětí považovaná za optimální pro okouny a perlín by byla ve zkoumaném scénáři výrazně překročena, proto je nutné předpokládat zvýšenou úroveň stresu pro rybí faunu jako celek. Kromě toho se při zvýšených teplotách zvyšuje riziko přemnožení řas a s tím souvisejícího úhynu ryb, ke kterému již dnes opakovaně dochází. Zranitelnost vodního ekosystému zdůrazňuje nutnost opatření ke snížení tohoto rizika.

7.3 Doporučená opatření

(d) Která (i) již zavedená a (ii) budoucí revitalizační opatření jsou zvlášť vhodná pro zvýšení teplotní resilience Dyje?

K redukci oteplování vodního toku a posílení jeho resilience vůči nízkému stavu vody a teplotě přicházejí v úvahu různá opatření, která se nabízejí jako východisko pro strategie specifické pro dané lokality v závislosti na specifických stresových situacích. Termodynamické modelování, zejména analýza citlivosti a zvažované scénáře, poskytuje přehled hlavních faktorů ovlivňujících převládající teploty vody v řece Dyji během letních měsíců.

Podobně jako v katalogu opatření pro revitalizační potenciály (Blattfisch & AFRY 2022), vypracovaném v předchozím projektu, lze i u opatření zlepšujících teplotní resilienci rozlišovat systémová a lokální opatření. Prvně jmenovaná mají přispět k řešení systémových problémů v povodí nebo ve větším měřítku, které významně ovlivňují místní situaci. Druhá zahrnují opatření, která mají být provedena lokálně pro vytvoření nebo ochranu biotopů.

Příkladem systémových opatření jsou **opatření hydrologická**. Důraz se tu obvykle klade na snižování dopadu vzdutí způsobených příčnými objekty. Vzhledem k delšímu zdržení vody, zvětšené ploše vodní hladiny a často redukovanému zastínění břehů mohou tyto faktory vést zejména v obdobích nízkých stavů k významnému oteplování vodního tělesa (Mende & Sieber, 2020). Tento efekt byl v naší studii jasně potvrzen naměřenými daty pro VD Nové Mlýny. Systémová opatření se ale vztahují i na různá velkoplošně působící opatření v povodí, jako např. rozsáhlá podpora nebo obnova evapotranspiračních krajinných prvků, například obnovením mokřadů, nebo opatření k odstranění nepropustných povrchů nebo k redukci přísunu živin do vodních útvarů.

Na lokální úrovni působí především **hydromorfologická opatření** zvyšující strukturální heterogenitu. Výsledky měření teplot v Dyji nevykazují žádné významné rozdíly v rámci jednotlivých profilů v toku – ani v šířce, ani v hloubce. Lze to připsat především silnému promíchávání v důsledku proudění. Přírodě blízké úseky toků často vykazují výrazně silnější zastínění než úseky napřímené nebo opevněné, takže vliv struktury vodního toku na teplotu vody je maskován faktorem zastínění, což ztěžuje jednoznačné přiřazení. Přítoky podzemní vody s chladicím účinkem nebylo možné detekovat ani pomocí jednotlivých měření, ani termografií. Předpokládá se, že se vyskytují velko-

plošně a nejsou jasně patrné v důsledku překrytí jinými vlivy. Důležitost strukturální rozmanitosti se ukazuje na příkladu nejhlubších částí koryta. Homogenní úseky, jako jsou velmi široké regulované pasáže bez výrazných prohlubní, za nízkých stavů vody zpravidla vykazují větší plochy s malou hloubkou, které se při oslunění prohřívají výrazně rychleji než úzké, hlubší vodní plochy. I když nejhlubší části koryta Dyje ani lokální hluboké tůně nenabízejí teplotní refugia, stále mohou omezovat oteplování celého vodního útvaru. Studie (mj. Tonina et al. 2026) ukázaly, že během horkých období tůně díky teplotní stratifikaci slouží jako útočiště pro ryby a mohou zmírňovat nárůst teploty v toku. Musíme však upozornit, že výzkumy v této oblasti jsou stále v rané fázi a spolehlivé závěry o těchto procesech zatím nejsou možné. Bez ohledu na to jsou nejhlubší části koryta a lokální prohlubně za nízkého stavu vody vzhledem ke zbývajícím minimálním hloubkám vody důležitými útočišti a v extrémních případech dokonce jedinými zbývajícími stanovišti.

Zlepšení **zastínění** je důležité zejména jako opatření pro delší úseky vodního toku. Lokální dopady zastínění jsou pravděpodobné pouze v oblastech s klidnějším prouděním. Význam zastínění pro zmírnění negativních ekologických dopadů stoupající teploty vodních útvarů je považován za výrazný zejména u malých až středně velkých vodních toků (viz Melcher et al. 2016, Mende & Sieber 2022). Vzhledem k šířce Dyje je možné zastínění pouze částečné, a to i v oblastech lužního lesa, kde stromový porost sahá až ke břehu. Analýza scénářů však ukázala, že stávající zastínění na několikakilometrovém modelovaném úseku vede k významnému tlumení teplotních špiček. Pravděpodobně přispívá i k tomu, že pod Novými Mlýny se s rostoucí vzdáleností postupně obnovují přirozené denní amplitudy teploty vody.

Za posledních 10 letech byla podél hraničního úseku Dyje realizována řada revitalizačních opatření. V několika přeshraničních projektech byla znovu napojena dříve odstavená ramena, bylo odstraněno několik kilometrů břehového opevnění a zvýšena strukturální diverzita, například instalací prvků z klád i celých stromů (log jams). Přestože jsou tato opatření klasifikována jako **lokální sanační opatření**, jejich rozsah a příspěvek k heterogenitě profilů a struktury toku je značný. Vedle výše popsaných účinků tato hydromorfologická opatření přispívají i k resilienci při nízkých stavech vody, a to zejména podporou utváření nejhlubší části koryta a lokálních hlubokých tůní. Lokální sanační opatření navržená v rámci projektu Thaya Wellendynamik, a to jak v řece, tak v její nivě, podporují cíle relevantní pro teplotní resilienci. Katalog opatření zahrnuje návrhy pro konkrétní lokality, například na rozvolnění břehů, instalaci různých struktur a vytvoření sníženin v inundačním území v kombinaci s podporou vývoje lužní krajiny. Některá z těchto navrhovaných opatření již byla realizována.

Potenciál zvýšení stupně zastínění v úseku rakousko-české hranice pod Bernhardsthalem je velmi omezený. V tomto úseku existuje pouze několik izolovaných oblastí, kde by bylo možné podél jižního a západního břehu doplnit porosty dřevin a dosáhnout tak efektu zastínění během největšího oteplování v pozdním odpoledni. Konkrétně by se Opatření č. 3 (od D18 po D15 (km 11,1–12,7), Rozvolnění břehů, rozšíření programu údržby břehové zóny a zúžení profilu) mohlo doplnit o další dílčí opatření „Rozvoj břehového dřevinného porostu“ na západním břehu.

Větší význam však mají **systémová opatření** zaměřená na redukci oteplování vody v oblastech výše po toku. Předchozí projekty se soustředily na podporu dynamických průtokových poměrů. Ty jsou sice nadále považovány za významné, nyní je však třeba brát v úvahu i nové poznatky týkající se teploty vody na odtoku z Nových Mlýnů.

Novomlýnské nádrže a jejich vývoj (mj. teplota a kvalita vody) v kontextu změny klimatu spolurozhodují o dostupnosti habitatů v Dyji ve zkoumané oblasti. Tento vývoj a změny teploty v říčním toku nebyly zkoumány odděleně a detailně. Větší oteplování vody v Dyji nebo další stresové faktory způsobené nádržemi (zhroucení nádrží[5]) nelze vyloučit a měly by být v budoucnu posouzeny. Kvůli výskytu sinic a s tím souvisejícímu úhynu ryb jsou mimoto velice důležitá opatření ke snížení přísunu živin. Je třeba se také zabývat nedostatečnou průchodností Dyje, způsobenou vodním dílem.

[5] Náhlé zhroucení ekologické rovnováhy v důsledku nedostatku kyslíku, často vyvolané nadměrným hnojením (eutrofizací) a horkem, ve spojení se silným růstem řas, úbytkem kyslíku a úhynem ryb

Studie ukazují, že při postupném oteplování vodních toků se habitaty rybích druhů adaptovaných na studenou vodu posouvají stále výše proti proudu. Týká se to i některých typických dyjských druhů ryb, jejichž migraci proti proudu však blokuje právě VD. V této souvislosti se doporučuje vypracovat, resp. prověřit možná opatření ke zmírnění negativních dopadů nádrže zejména na teplotu vody v Dyji a přísun živin do vodního tělesa.

Tok řeky Dyje pod novomlýnskými nádržemi od obce Bulhary až po zkoumaný homogenní úsek pod Břeclaví navíc vede regulovaným profilem a je převážně nezastíněný. Analýza scénářů ukázala, že takové úseky mají významný potenciál k ovlivnění teploty vody v Dyji prostřednictvím vhodných opatření. S přihlédnutím k různým plánovacím limitům, daným například protipovodňovou ochranou, by se mohla vybudovat přírodě blízká geometrie toku, reaktivovat přirozené záplavové plochy a podpořit zastínění. Bylo by proto žádoucí realizovat tento potenciál obnovy Dyje v oblasti Břeclavi, kde protéká Chráněnou krajinnou oblastí Soutok, a vnímat jeho velký bilaterální význam pro habitat dyjské říční krajiny.

Literatura

Arminger P. & C. Gumpinger (2026): Langzeitentwicklung der Wassertemperaturen oberösterreichischer Fließgewässer im Kontext des Klimawandels. Im Auftrag des Amts der Oö. Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft. 100 S.

Blattfisch und AFRY (2022). Thaya Wellendynamik - Analyse Wellencharakteristik und Uferstreifen sowie Planung von Renaturierungsmaßnahmen. Im Auftrag der via donau – Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH.

Bly, J. E., & Clem, L. W. (1992). Temperature and teleost immune functions. Fish & Shellfish Immunology, 2(3), 159–171. https://doi.org/10.1016/S1050-4648(05)80056-7

Booker, D. J., & Whitehead, A. L. (2022). River water temperatures are higher during lower flows after accounting for meteorological variability. River Research and Applications, 38(1), 3–22. https://doi.org/10.1002/rra.3870

Broadmeadow, S., Jones, J., Langford, T., Shaw, P., Nisbet, T. (2011): The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout. River Research and Applications, Jg. 27, S. 226-237

Brown, J. H., Gillooly, J. F., Allen, A. P., Savage, V. M., & West, G. B. (2004). Toward a metabolic theory of ecology. Ecology, 85(7), 1771–1789. https://doi.org/10.1890/03-9000

Buisson, L., Thuiller, W., Lek, S., Lim, P., & Grenouillet, G. (2008). Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. Global Change Biology, 14(10), 2232–2248. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01657.x

Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: A review. Freshwater Biology, 51(8), 1389–1406. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x

Campbell, J. L., Driscoll, C. T., Pourmokhtarian, A., & Hayhoe, K. (2011). Streamflow responses to past and projected future changes in climate at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, United States. Water Resources Research, 47(2), 2010WR009438. https://doi.org/10.1029/2010WR009438

Dugdale, S.J., Hannah, D.M. and Malcolm, I.A. (2017). River temperature modelling: A review of process-based approaches and future directions. Earth-Science Reviews, 175: 97–113.

Elber, F., Stäheli, T., Camenzind, M. (2019): Revitalisierung von Fliessgewässern in Zeiten des Klimawandels. Aqua Viva – Die Zeitschrift für Gewässerschutz, 03/2019, S. 26-31

Elliott, J. M., & Elliott, J. A. (2010). Temperature requirements of Atlantic salmon Salmo salar, brown trout Salmo trutta and Arctic charr Salvelinus alpinus: Predicting the effects of climate change. Journal of Fish Biology, 77, 1793–1817.

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, Geosci. Model Dev., 9, 1937–1958, https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Ferstl, L. T. (2024) How hydromorphological changes affect the local fish community of the lower Thaya River, a multi-stressed lowland river in Austria. Master Thesis at BOKU - Universität für Bodenkultur Wien. *http://permalink.obvsg.at/bok/AC17211236*.

Gray B.R., Robertson D.M., Rogala J.T. (2018). Effects of air temperature and discharge on Upper Mississippi River summer water temperatures. River Research and Applications 34/6, 506-515. https://doi.org/10.1002/rra.3278

Hostetler, S. W., (1991). Analysis and modeling of long-term stream temperatures on the Steamboat Creek Basin, Oregon: implications for land use and fish habitat. Wat. Resour. Bull. 27: 637–647.

Huppmann, D., Keiler, M., Riahi, K., Rieder, H., Brudermann, T., Gingrich, S., Hanger-Kopp, S., Kirchner, M., Kleidorfer, M., Knaus, K., Miess, M., Novy, A., Olfes, M., Schöniger, F., Steiger, R., Donner, A., Hummel, E.-M., Holzinger, M., Mayer, M., … Scheifinger, K. (2025). Zweiter Österreichischer Sachstandsbericht zum

Klimawandel | AAR2 Wissenschaftliche Zusammenfassung. Austrian Academy of Sciences. https://doi.org/10.1553/aar2-ts-de

IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

Jacob D., Petersen J., Eggert B., et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Reg. Environ. Change. 14, 563-578, doi:10.1007/s10113-013-0499-2

Johnson, M. F., Albertson, L. K., Algar, A. C., Dugdale, S. J., Edwards, P., England, J., Gibbins, C., Kazama, S., Komori, D., MacColl, A. D. C., Scholl, E. A., Wilby, R. L., de Oliveira Roque, F., & Wood, P. J. (2024). Rising water temperature in rivers: Ecological impacts and future resilience. WIREs Water, 11(4), e1724. https://doi.org/10.1002/wat2.1724

Kędra, M. (2020). Regional Response to Global Warming: Water Temperature Trends in Semi-Natural Mountain River Systems. Water, 12(1), 283. https://doi.org/10.3390/w12010283

Krochta, M., Anlauf-Dunn, K., Bugni, D., & Chang, H. (2025). Effects of climate change on stream temperature and salmonid habitats in a Cascades river basin. Journal of Environmental Management, 387, 125843. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125843

Krogh, S. A., Scaff, L., Kirchner, J. W., Gordon, B., Sterle, G., & Harpold, A. (2022). Diel streamflow cycles suggest more sensitive snowmelt-driven streamflow to climate change than land surface modeling does. Hydrology and Earth System Sciences, 26(13), 3393–3417. https://doi.org/10.5194/hess-26-3393-2022

Küttel, S., Peter, A., & Wüest, A. (2002). Temperaturpräferenzen und -limiten von Fischarten Schweizerischer Fliessgewässer. Rhone Revitalisierung Publikation Nr. 1.

Lamouroux, N., Capra, H., Poully, M., Souchon, Y., 1999. Fish habitat preferences in large streams of southern France. Freshwater Biology 42: 673–687.

Łaszewski M. (2013). Stream water temperature: a short review with special reference to diurnal dynamics. Miscellanea Geographica. Regional Studies on Development 17/1. DOI: 10.2478/v10288-012-0035-0

LfU (2005). Mindestabflüsse in Ausleitungsstrecken — Grundlagen, Ermittlung und Beispiele. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, 97, 187.

Marx, A., Kumar, R., Thober, S., Rakovec, O., Wanders, N., Zink, M., Wood, E. F., Pan, M., Sheffield, J., & Samaniego, L. (2018). Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 °C. Hydrology and Earth System Sciences, 22(2), 1017–1032. https://doi.org/10.5194/hess-22-1017-2018

Melcher, A., · Dossi, F., Graf· W., Pletterbauer, F., · Schaufler, K., Kalny, · G., · Rauch, H. P., · Formayer, H., Trimmel, · H., Weihs, P. (2016) ·Der Einfluss der Ufervegetation auf die Wassertemperatur unter gewässertypspezifischer Berücksichtigung von Fischen und benthischen Evertebraten am Beispiel von Lafnitz und Pinka. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 2016 · 68:308–323, DOI 10.1007/s00506-016-0321-8

Mende, M., & Sieber, P. (2020). Temperaturverlauf in Fliessgewässern. Untersuchung und Visualisierung von Temperatureinflüssen, Ableitung von Maßnahmenvorschlägen.

Mende, M., & Sieber, P. (2022). Wie halten wir unsere Fliessgewässer kühl? Untersuchung und Visualisierung von Temperatureinflüssen, Ableitung von Massnahmenvorschlägen. «Wasser Energie Luft» – 114. Jahrgang, 2022, Heft 1, CH-5401 Baden

Michel, A., Råman Vinnå, L., Bouffard, D., Epting, J., Huwald, H., Schaefli, B., Schmid, M., & Wüest, J. (2021). Hydro-CH2018 Evolution of stream and lake water temperature under climate change (Version 1.0, S. 7633391 bytes) [Application/pdf]. EnviDat. https://doi.org/10.16904/ENVIDAT.207

Niedrist, G. H. (2023). Substantial warming of Central European mountain rivers under climate change. Regional Environmental Change, 23(1), 43. https://doi.org/10.1007/s10113-023-02037-y

O'Gorman, E. J., Pichler, D. E., Adams, G., Benstead, J. P., Cohen, H., Craig, N., Cross, W. F., Demars, D. O., Friberg, N., Gislason, G. M., & Gudmundsdottir, R. (2012). Impacts of warming on the structure and functioning

of aquatic communities: Individuals-to-ecosystem level responses. Advances in Ecological Research, 47, 81–176.

Prinz, H., Lahnsteiner, F., Haunschmid, R., Jagsch, A., Sasano, B., & Schay, G. (2009). Reaktion ausgewählter Fischarten auf verschiedene Wassertemperaturen in OÖ Fließgewässern. Schlussbericht. Im Auftrag der Oberösterreichischen Landesregierung.

Schmidt, M., Lischeida, G., Nendela, C. (2019). Microclimate and matter dynamics in transition zones of forest to arable land. Agricultural and Forest Meteorology 268.

Souchon, Y., & Tissot, L. (2012). Synthesis of thermal tolerances of the common freshwater fish species in large Western Europe rivers. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems, 405, 03. https://doi.org/10.1051/kmae/2012008

Stanzel, P., Weilguni H., Kling, H. (2022). Regionalisierte Klimastudie für die March – Ergänzung: Auswirkung des Klimawandels auf die Wassertemperatur. Studie für viadonau im Rahmen des Projekts „Kli-Ma – Wasserspiegeloptimierung an der March unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels"

Sun, J., Di Nunno, F., Sojka, M., Ptak, M., Zhou, Q., Luo, Y., Zhu, S., & Granata, F. (2024). Long-term daily water temperatures unveil escalating water warming and intensifying heatwaves in the Odra river Basin, Central Europe. Geoscience Frontiers, 15(6), 101916. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2024.101916

Toffolon M. und Piccolroaz S. 2015. A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. Environ. Res. Lett. 10 114011. doi: 10.1088/1748-9326/10/11/114011

Tonina A., Bertagnoli A., Hurst A. und Tranmer A. (2026) When pools cool streams: A dimensionless framework for reach-scale thermal buffering. Science of the Total Environment 1012 (2026) 181232

van Vliet, M. T. H., Ludwig, F., Zwolsman, J. J. G., Weedon, G. P., & Kabat, P. (2011). Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. Water Resources Research, 47(2), 2010WR009198. https://doi.org/10.1029/2010WR009198

Vanzo, D., Siviglia, A. and Toro, E.F. (2016). Pollutant transport by shallow water equations on unstructured meshes: Hyperbolization of the model and numerical solution via a novel flux splitting scheme. Journal of Computational Physics, 321: 1–20.

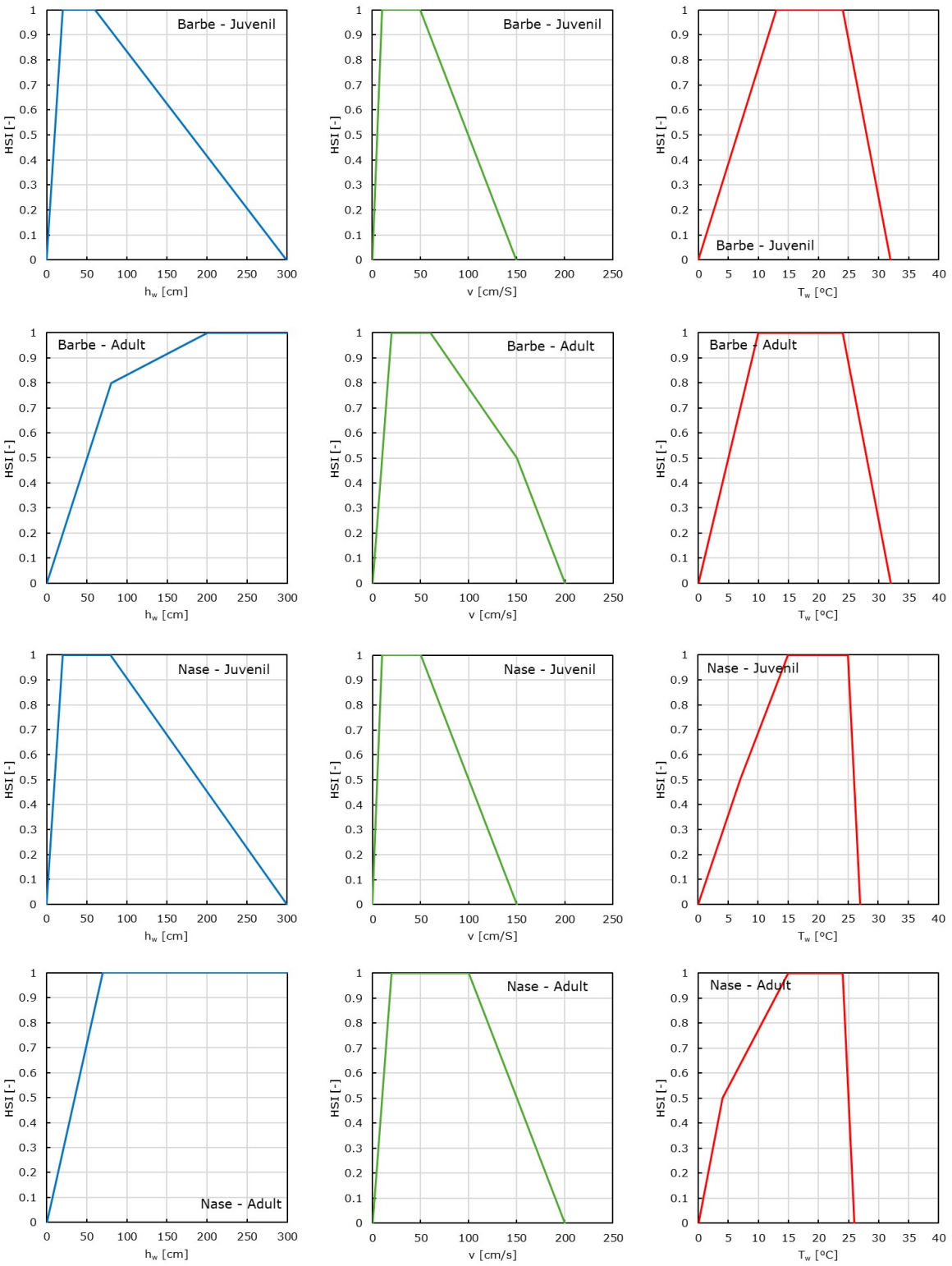
Verberk, W. C. E. P., Durance, I., Vaughan, I. P., & Ormerod, S. J. (2016). Field and laboratory studies reveal interacting effects of stream oxygenation and warming on aquatic ectotherms. Global Change Biology, 22(5), 1769–1778. https://doi.org/10.1111/gcb.13240

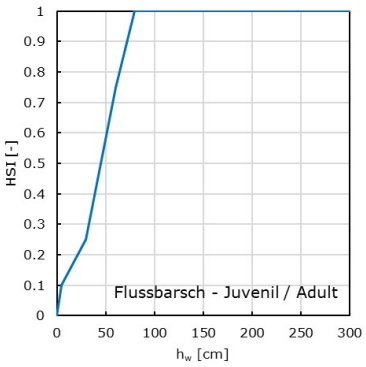
Vetsch, D., Siviglia, A., Caponi, F., Ehrbar, D., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vanzo, D., Vonwiller, L., Facchini, M., Gerber, M., Volz, C., Farshi, D., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., & Baeyens, R. (2024). System Manuals of BASEMENT, VERSION 4.1.0. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zürich

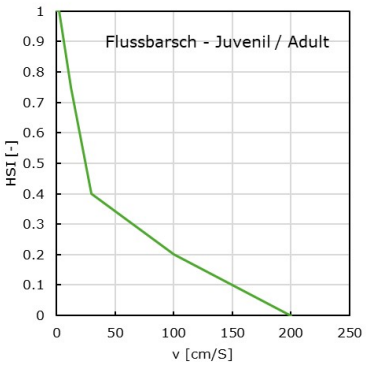
Webb B.W. und Nobilis F. (1994). Water temperature behaviour in the River Danube during the twentieth century. Hydrobiologia 291, 105–113

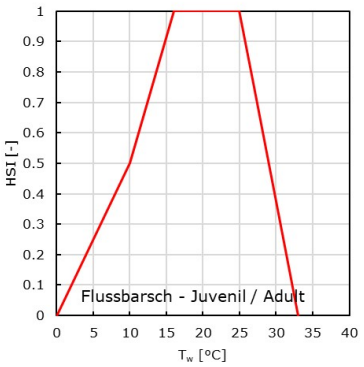
A-1. A-1. Příloha – Křivky preferencí

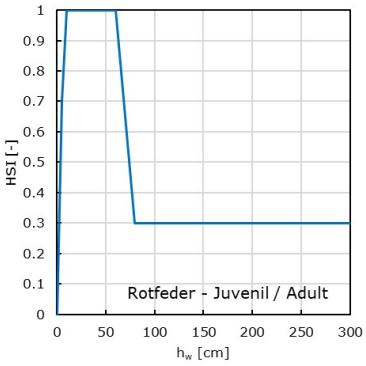
Barbe =parma obecná
Nase = ostroretka stěhovavá
Flussbarsch = okoun říční
Rotfeder = perlín ostrobřichý

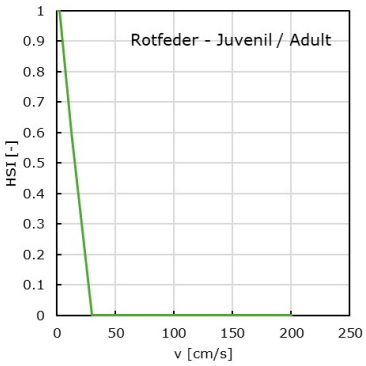


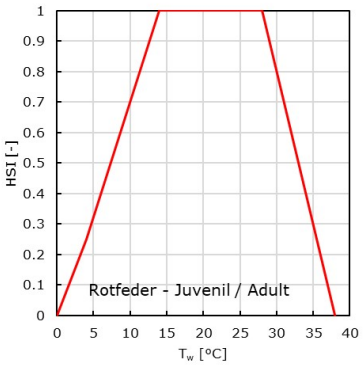

HSI [-]
Flussbarsch - Juvenil / Adult
h_w [cm]


HSI [-]
Flussbarsch - Juvenil / Adult
v [cm/S]

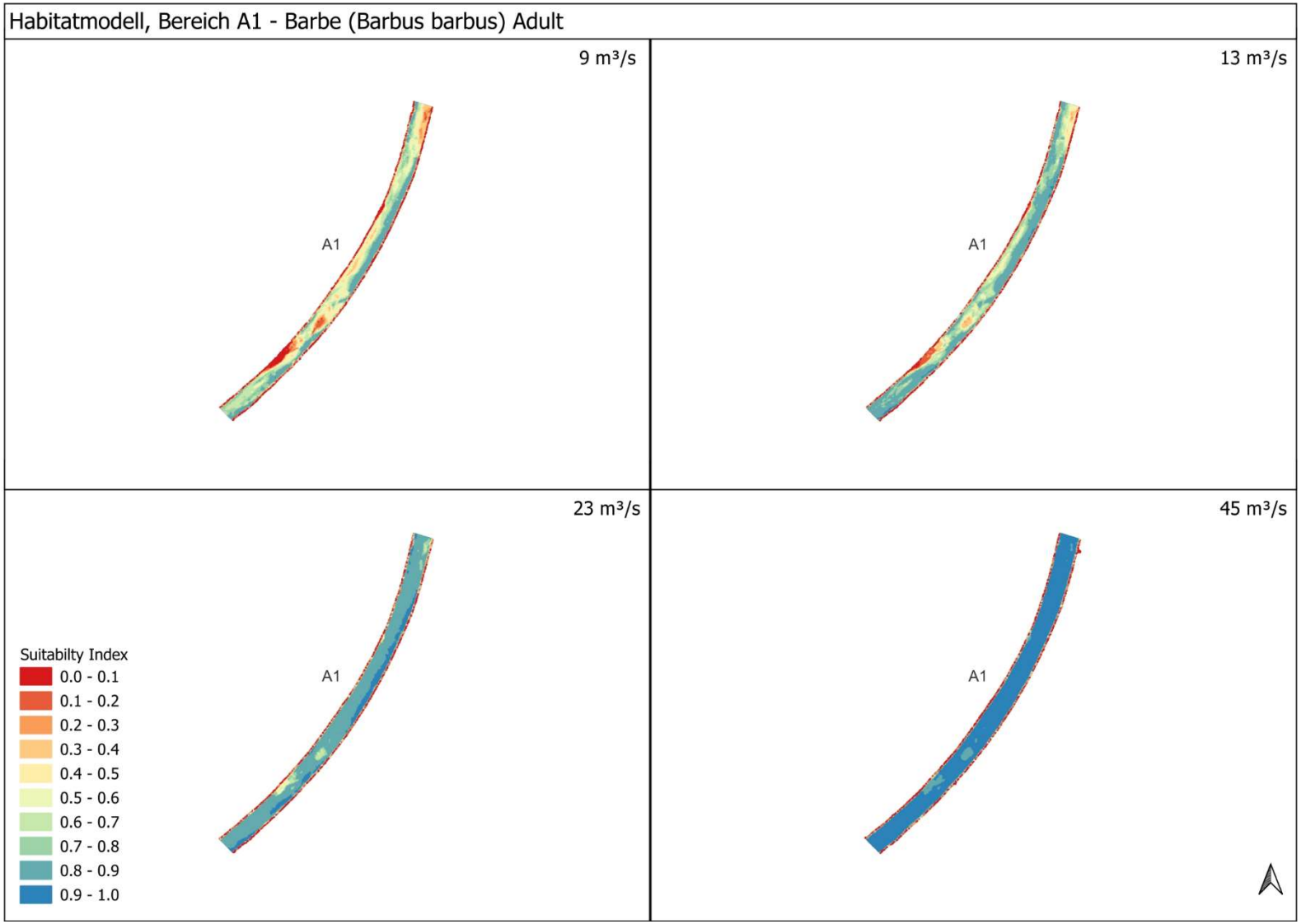

HSI [-]
Flussbarsch - Juvenil / Adult
T_w [°C]

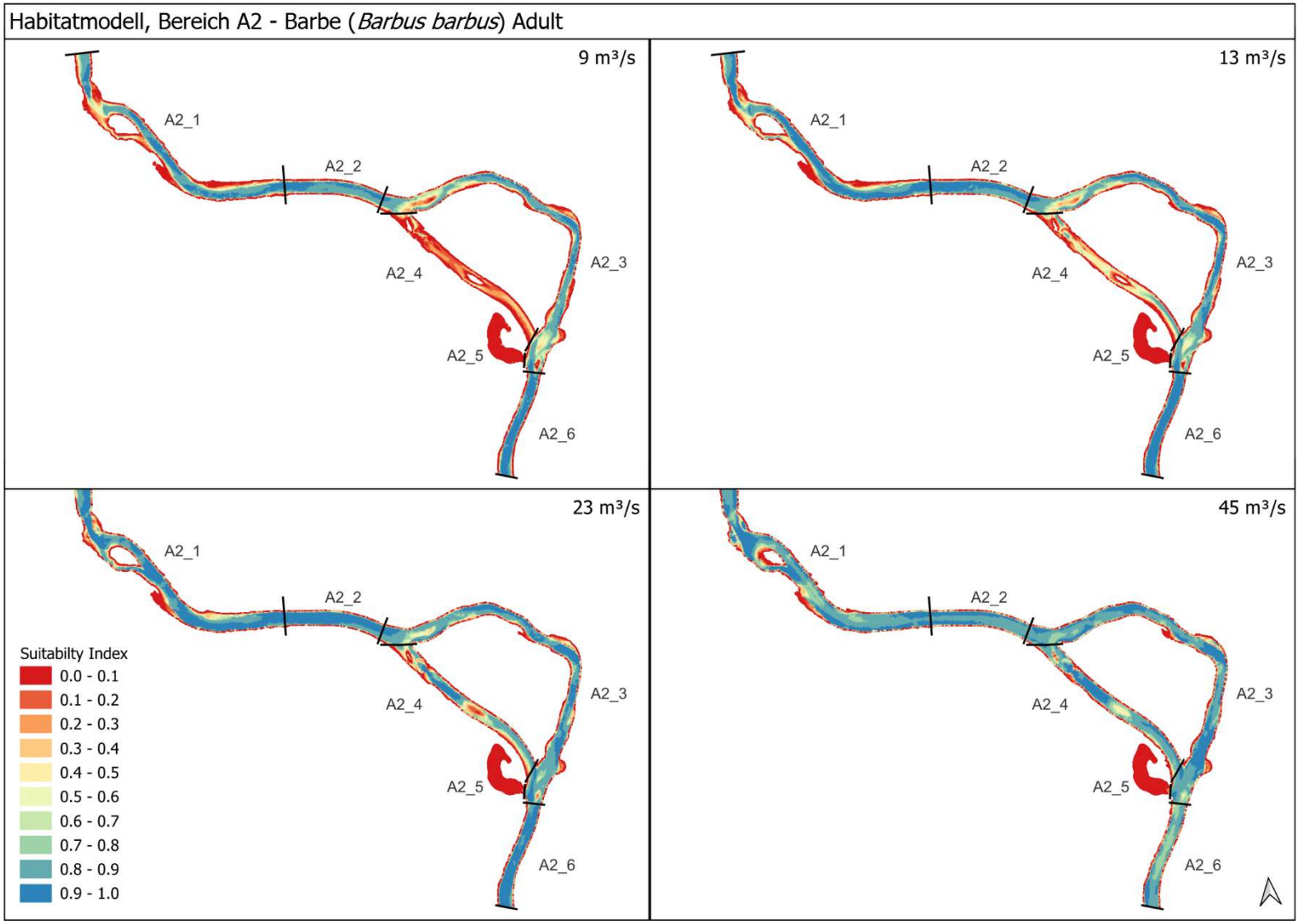

HSI [-]
Rotfeder - Juvenil / Adult
h_w [cm]


HSI [-]
Rotfeder - Juvenil / Adult
v [cm/s]

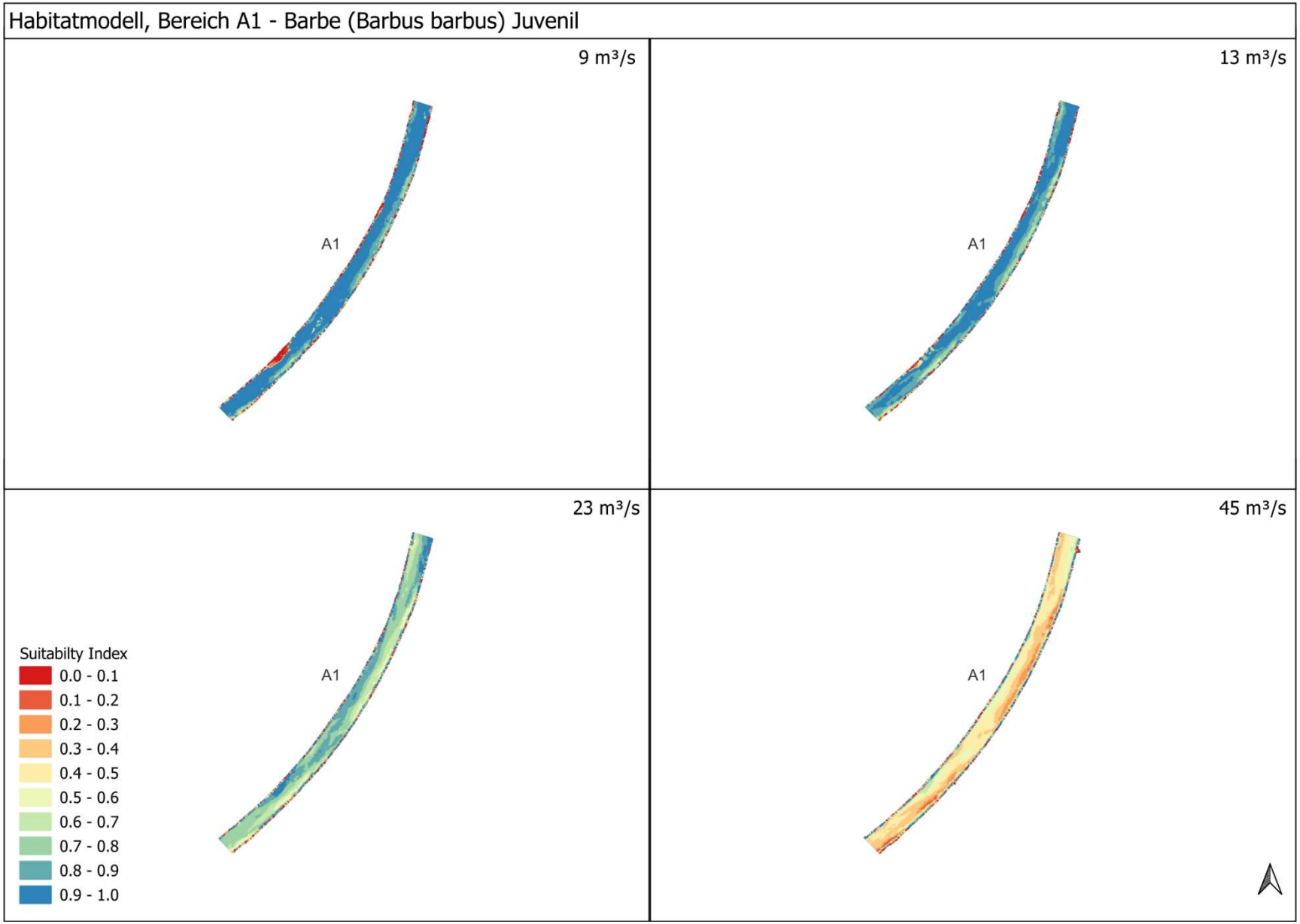

HSI [-]
Rotfeder - Juvenil / Adult
T_w [°C]

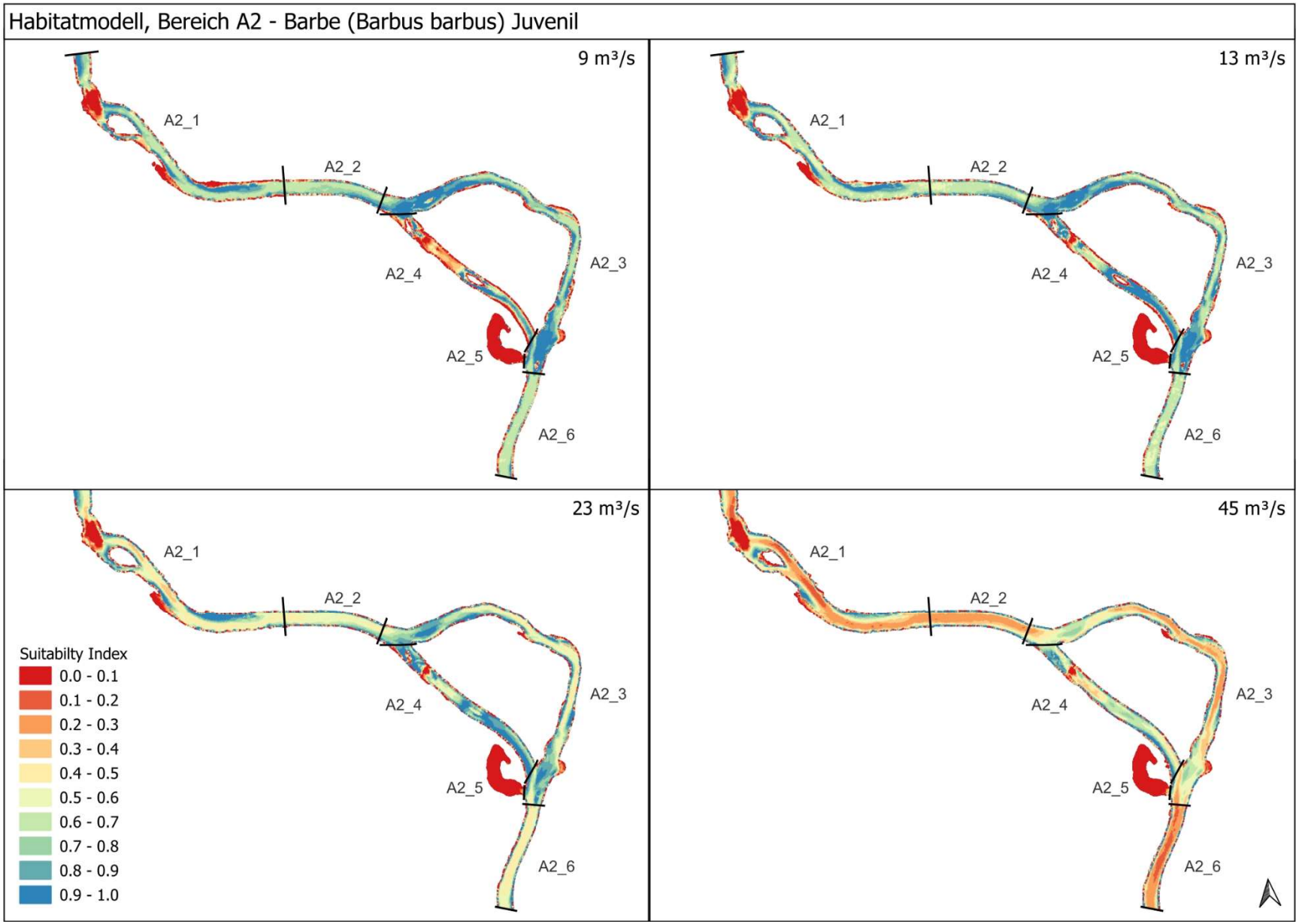
A-2. Příloha – Výsledek modelování habitatů



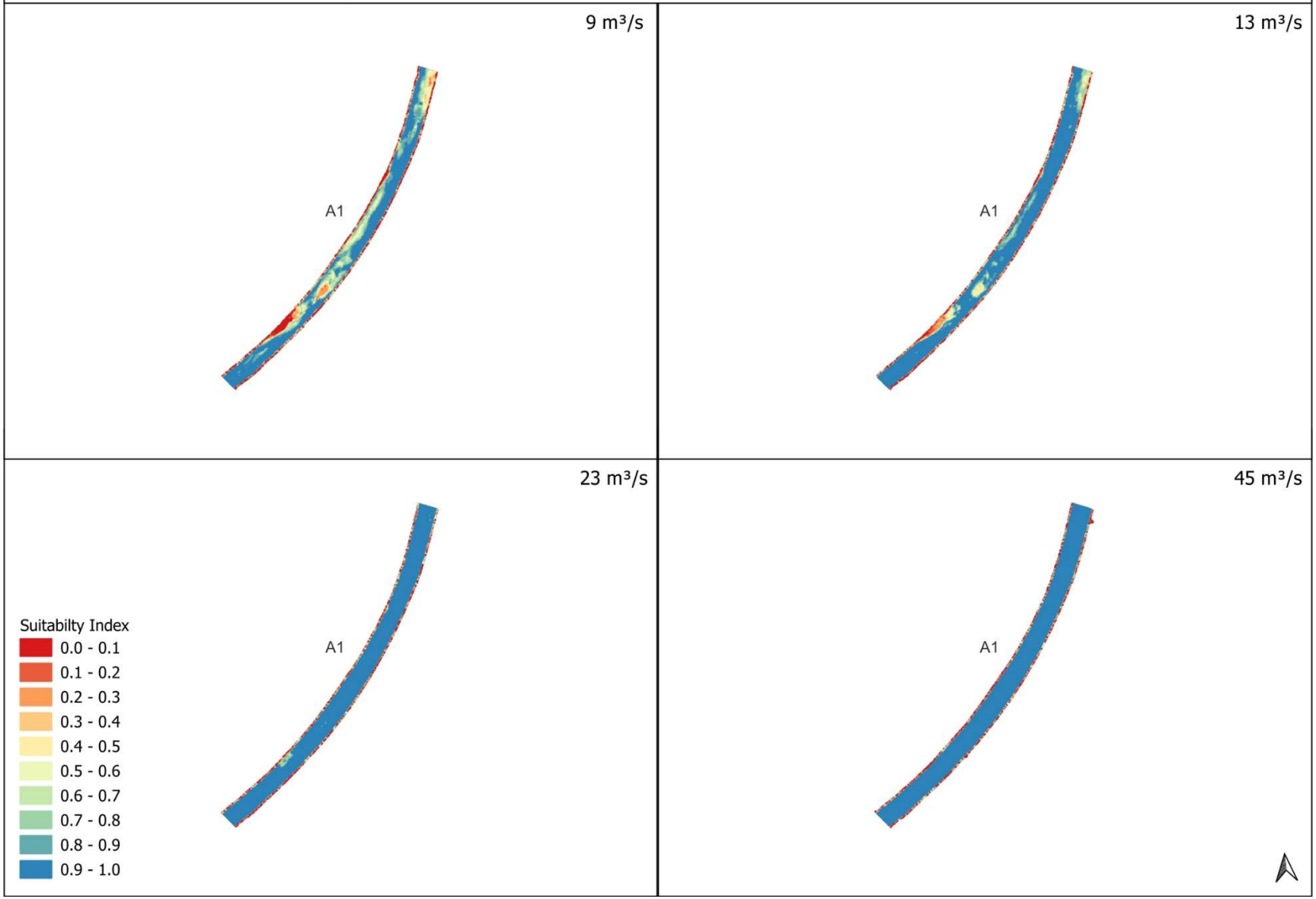

Habitatmodell, Bereich A2 - Barbe (*Barbus barbus*) Adult
9 m³/s
13 m³/s
23 m³/s
45 m³/s
A2_1
A2_2
A2_3
A2_4
A2_5
A2_6
Suitabilty Index
0.0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1.0

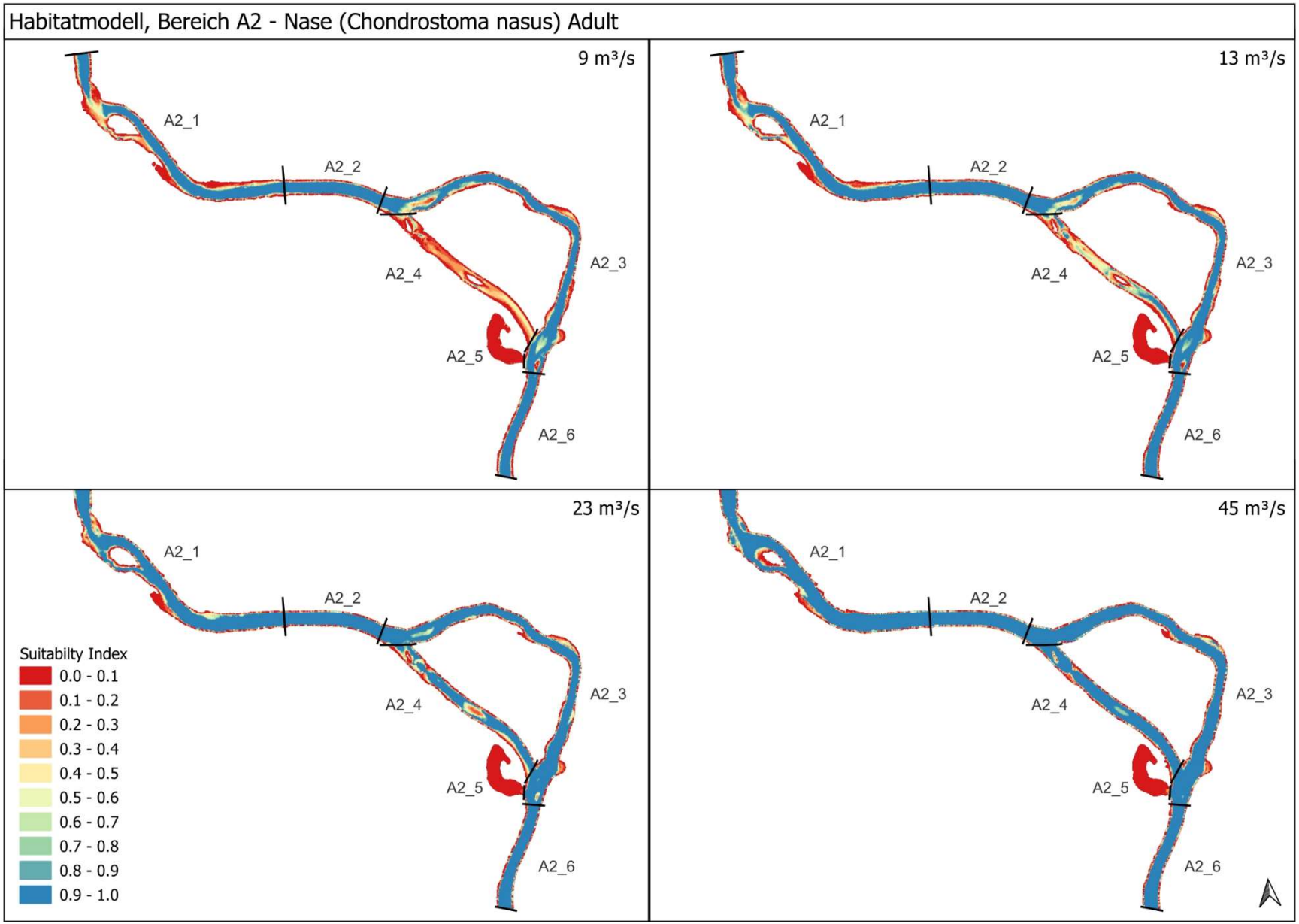
Habitatmodell, Bereich A1 - Barbe (Barbus barbus) Juvenil



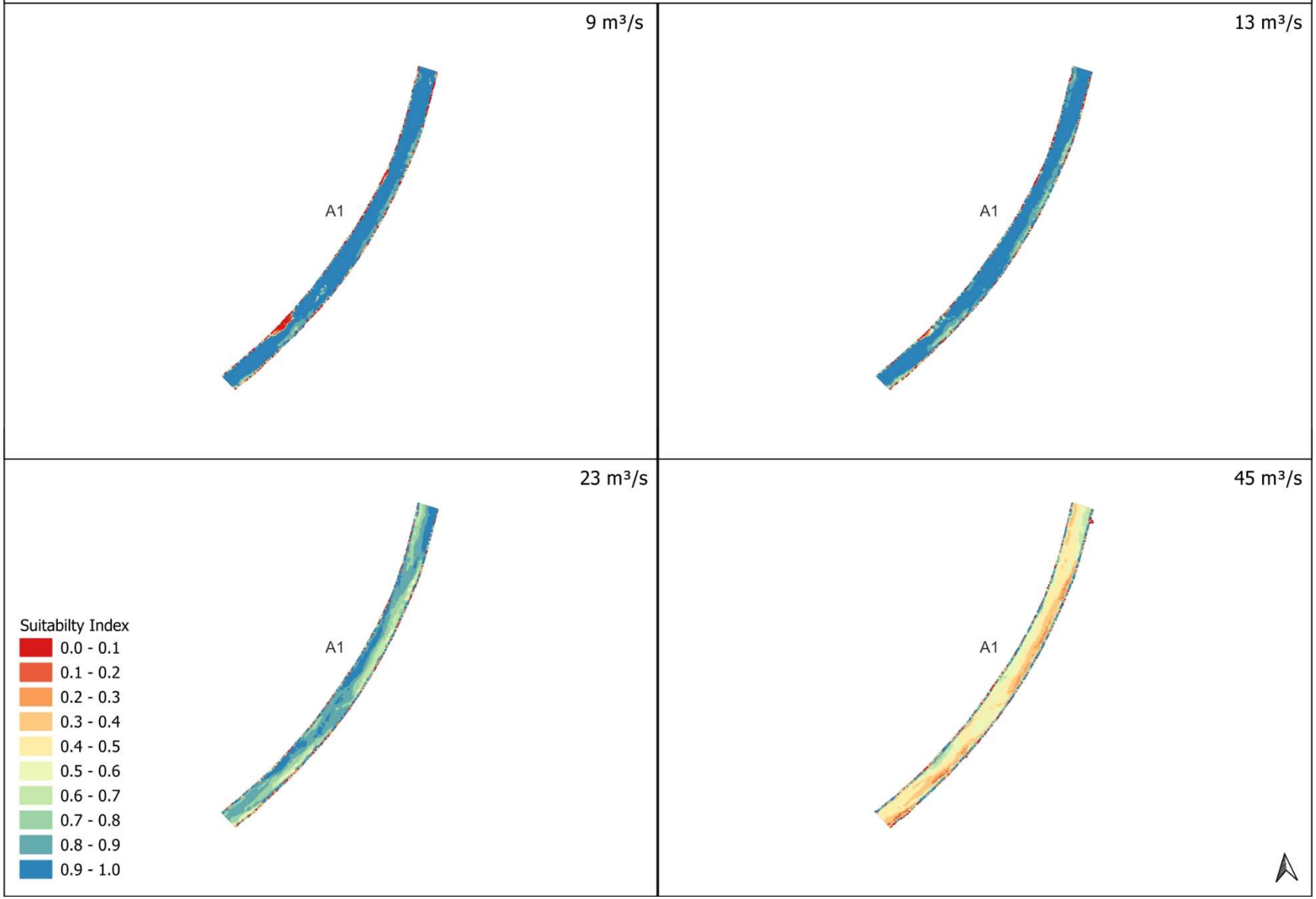

Habitatmodell, Bereich A2 - Barbe (Barbus barbus) Juvenil
9 m³/s
13 m³/s
23 m³/s
45 m³/s
A2_1
A2_2
A2_3
A2_4
A2_5
A2_6
Suitabilty Index
0.0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1.0

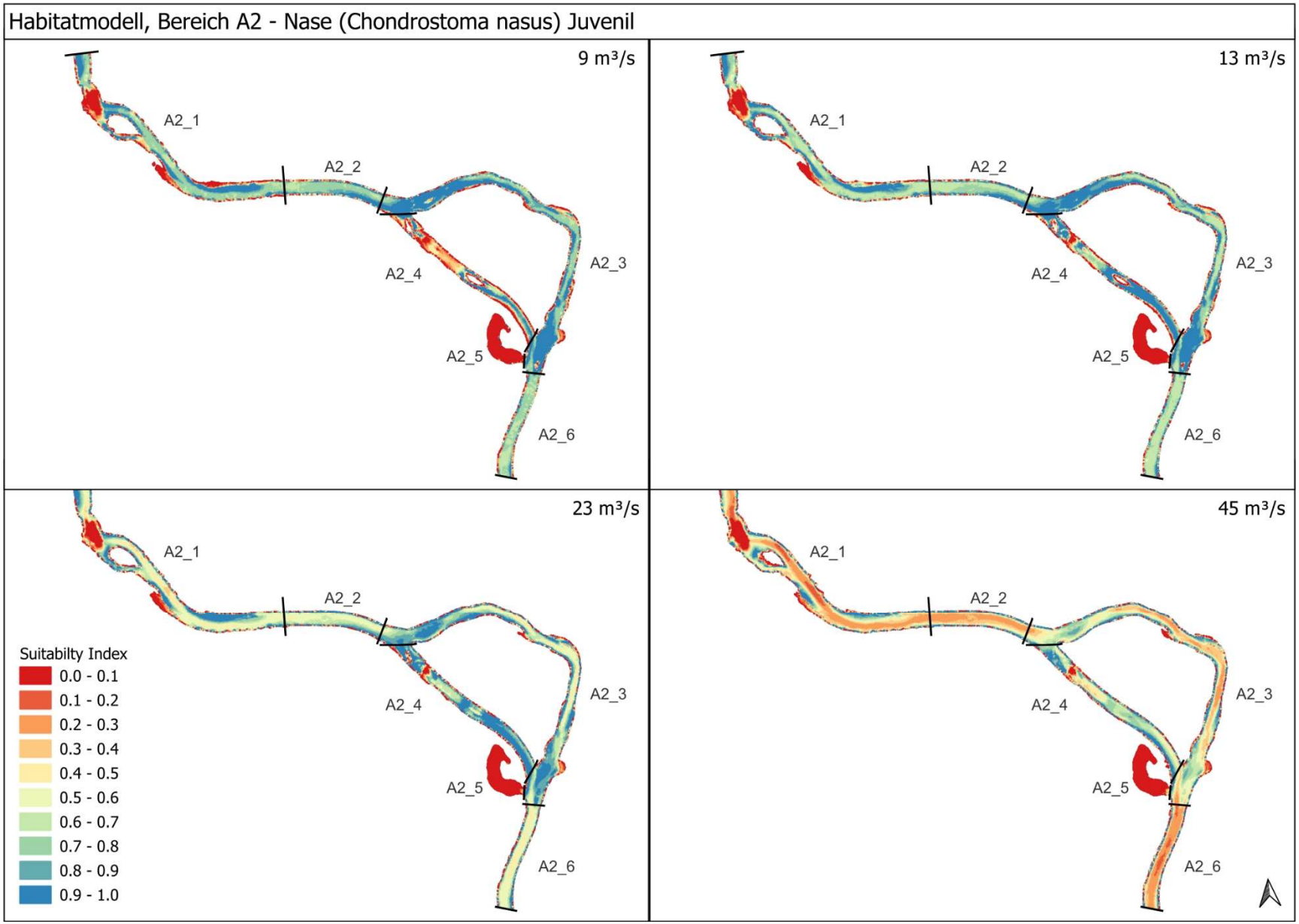
Habitatmodell, Bereich A1 - Nase (Chondrostoma nasus) Adult

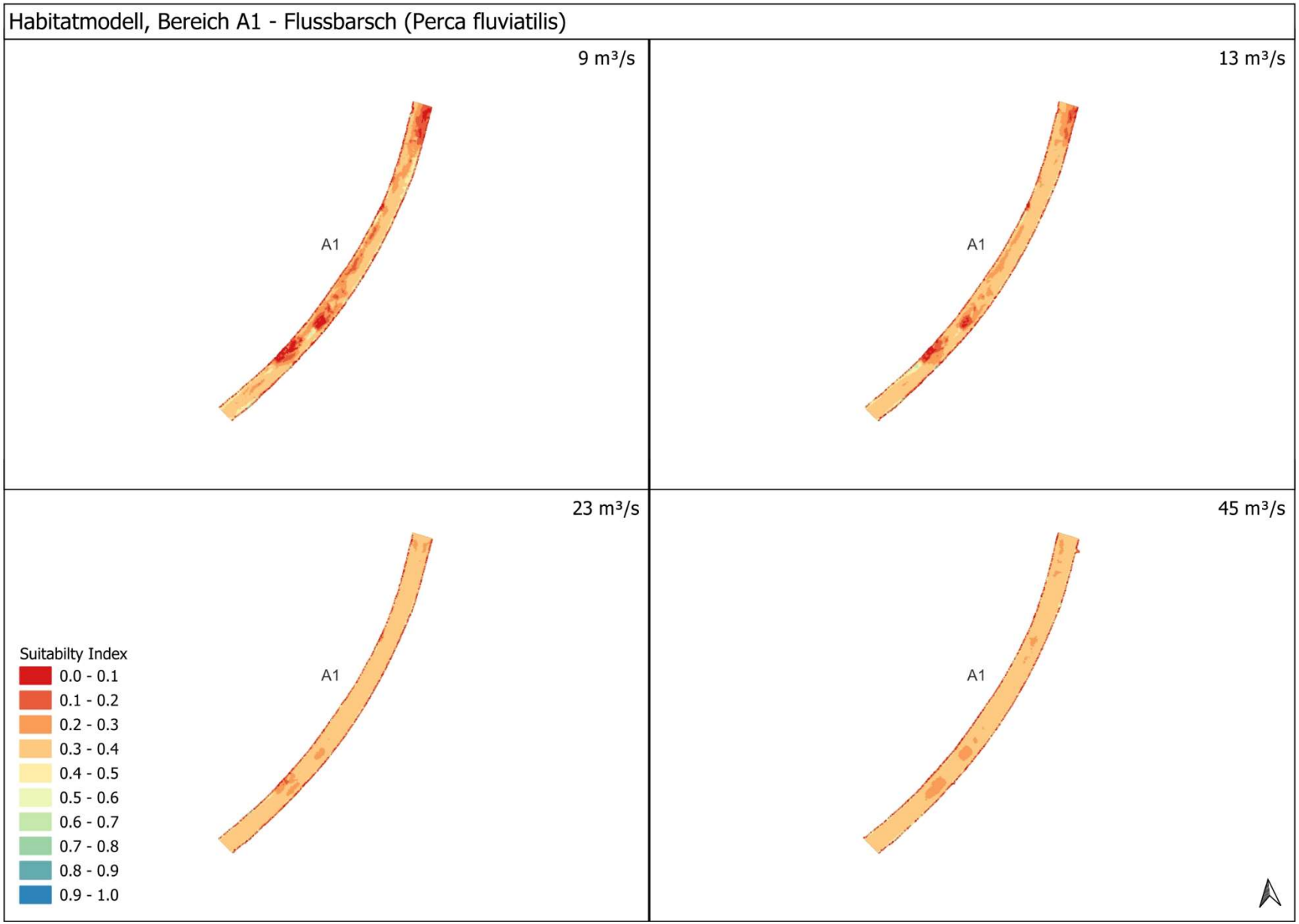


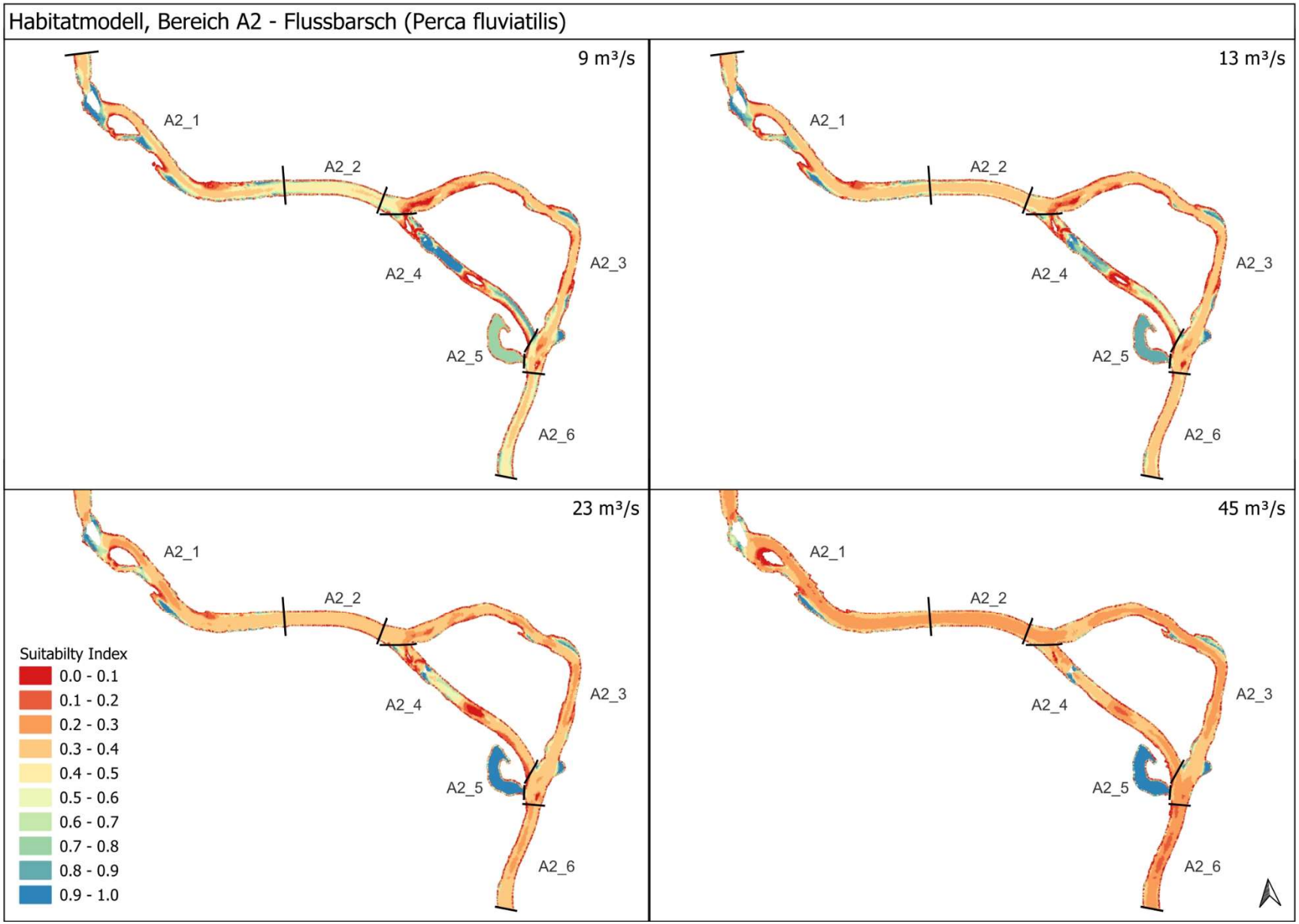

Habitatmodell, Bereich A2 - Nase (Chondrostoma nasus) Adult
9 m³/s
13 m³/s
23 m³/s
45 m³/s
A2_1
A2_2
A2_3
A2_4
A2_5
A2_6
Suitabilty Index
0.0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1.0

Habitatmodell, Bereich A1 - Nase (Chondrostoma nasus) Juvenil

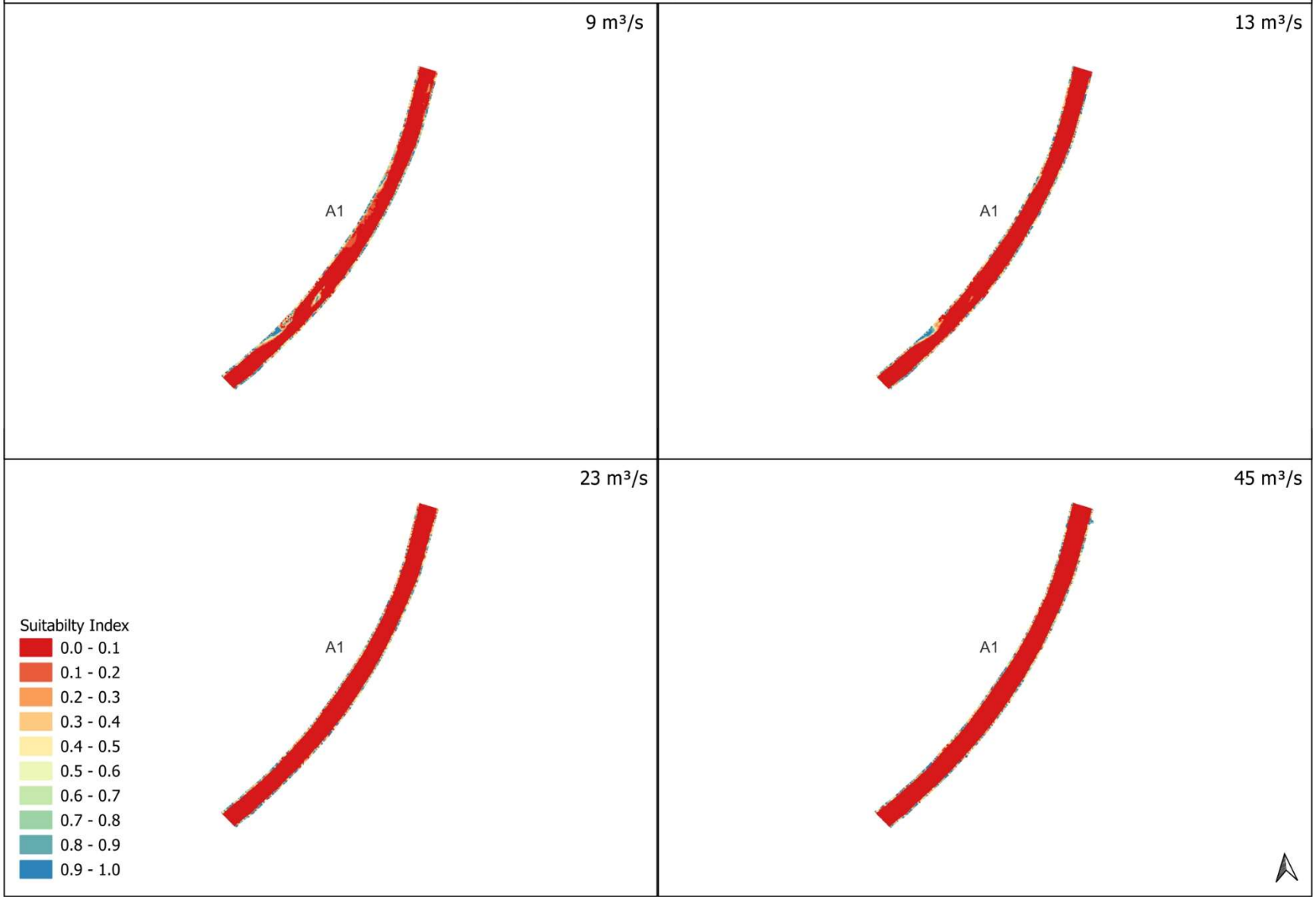


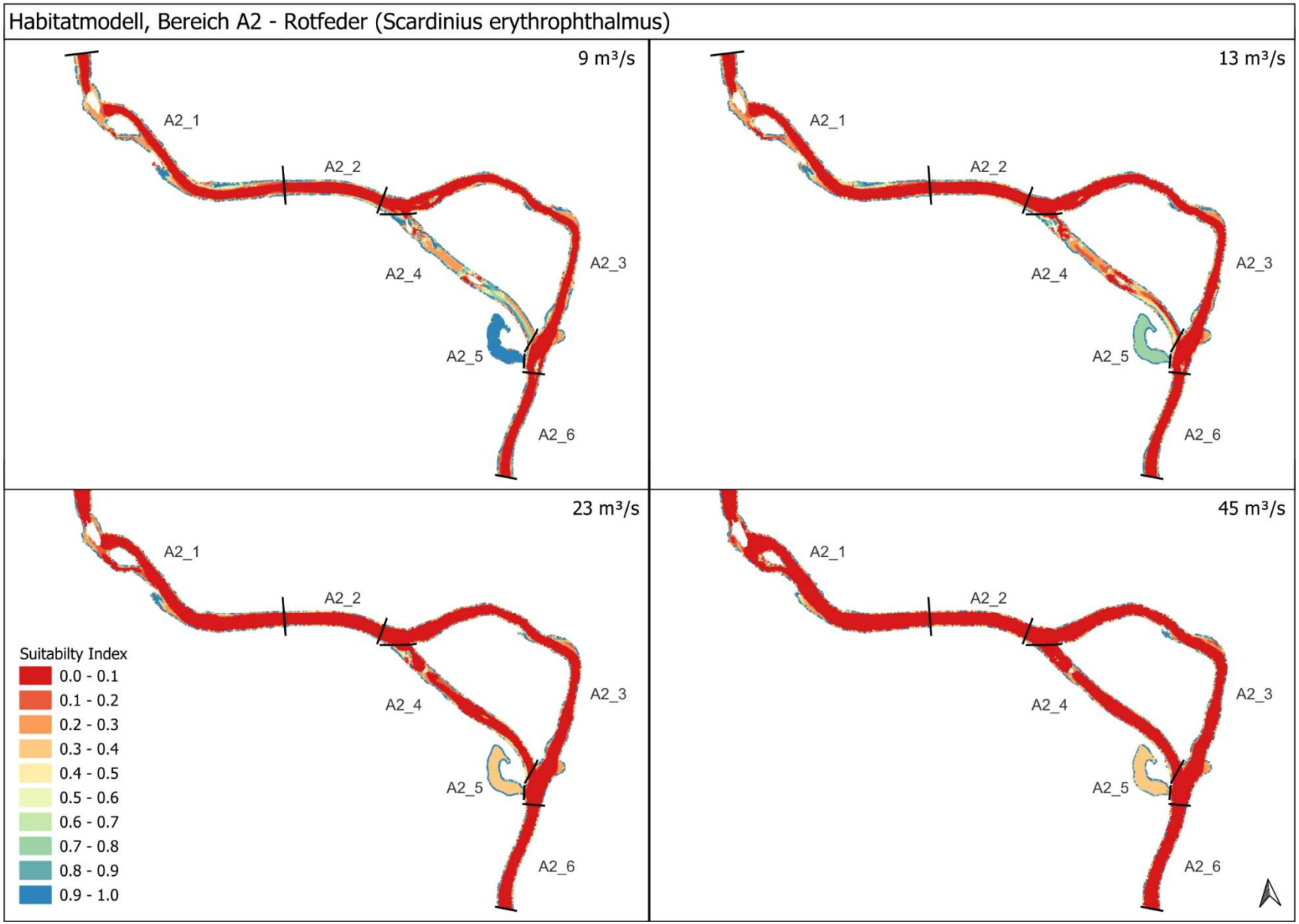

Habitatmodell, Bereich A2 - Nase (Chondrostoma nasus) Juvenil
9 m³/s
13 m³/s
23 m³/s
45 m³/s
A2_1
A2_2
A2_3
A2_4
A2_5
A2_6
Suitabilty Index
0.0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1.0


Habitatmodell, Bereich A1 - Flussbarsch (Perca fluviatilis)
9 m³/s
A1
13 m³/s
A1
23 m³/s
A1
45 m³/s
A1
Suitabilty Index
0.0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1.0


Habitatmodell, Bereich A2 - Flussbarsch (Perca fluviatilis)
9 m³/s
13 m³/s
23 m³/s
45 m³/s
A2_1
A2_2
A2_3
A2_4
A2_5
A2_6
Suitabilty Index
0.0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1.0

Habitatmodell, Bereich A1 - Rotfeder (Scardinius erythrophthalmus)




Habitatmodell, Bereich A2 - Rotfeder (Scardinius erythrophthalmus)
9 m³/s
13 m³/s
23 m³/s
45 m³/s
A2_1
A2_2
A2_3
A2_4
A2_5
A2_6
Suitabilty Index
0.0 - 0.1
0.1 - 0.2
0.2 - 0.3
0.3 - 0.4
0.4 - 0.5
0.5 - 0.6
0.6 - 0.7
0.7 - 0.8
0.8 - 0.9
0.9 - 1.0