

Projevy dlouhodobé transformace koryta dolního Labe v Česku a příležitosti jeho obnovy

JAN HRADECKÝ¹, TOMÁŠ GALIA¹, LUKÁŠ KREJČÍ², VÁCLAV ŠKARPICH¹,
LUKÁŠ VAVERKA¹

¹ Ostravská univerzita, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Ostrava, Česko (University of Ostrava, Faculty of Science, Department of Physical Geography and Geoecology, Ostrava, Czechia); email: jan.hradecky@osu.cz, tomas.galia@osu.cz, vaclav.skarpich@osu.cz, lukas.vaverka@osu.cz

² ENVICONS s.r.o., Pardubice-Polabiny, Czechia; krejcilukas@atlas.cz

ABSTRACT Manifestations of the long-term transformation of the lower Elbe channel in Czechia and opportunities for its restoration – This study examines the long-term impact of water management and navigation modifications on the hydromorphology of the lower Elbe River in Czechia. The research focuses on gravel-sand bars, which are remnants of the river's natural morphology. The analysis revealed a significant shift in the hydromorphological quality of the river, evaluated using a morphological quality index and historical data. The study analysed morphological and grain-size parameters of selected gravel-sand bars, as well as daily flow data. The results show a significant reduction in channel width and maximum average daily flows, leading to lower disturbance frequencies of the bars. The analysis suggests that close-to-natural processes affect the development of the bars but are influenced by artificial modifications. The findings indicate the need for restoration measures, which are discussed in this paper.

KEY WORDS hydromorphological quality – navigation – river transformation – morphodynamics – restoration – Elbe River

HRADECKÝ, J., GALIA, T., KREJČÍ, L., ŠKARPICH, V., VAVERKA, L. (2024): Projevy dlouhodobé transformace koryta dolního Labe v Česku a příležitosti jeho obnovy. *Geografie*, 129, 3, 265–297.
<https://doi.org/10.37040/geografie.2024.012>

Do redakce došlo v únoru 2024, přijato do tisku v červnu 2024.

1. Úvod

Úsek dolního Labe na území Česka představuje příklad střetu zájmu mezi ochranou přírodního prostředí a využitím potenciálu vnitrozemské vodní cesty (Brunar 2019; Bejček, Volfová 2019). Na jedné straně se jedná o tradiční vodní cestu, avšak s řadou velmi významných omezení, na straně druhé jde o přírodovědecky velmi cenné území, jež podléhá několika formám ochrany. Přes dlouhotrvající nevyhovující hydrologické podmínky (Havlíček a kol. 2023), jež by umožňovaly plavbu po většinu roku, stále trvá záměr na vybudování plavebního stupně Děčín, který je v příkrém rozporu se statutem území z pohledu ochrany přírody a krajiny. Přestože bývá lodní doprava často označována za environmentálně šetrnou, a dílčím způsobem lze spatřovat ve vysokoobjemovém transportu zboží na velké vzdálenosti ekonomické i ekologické efekty (např. Vinke a kol. 2024), je její provozování spojeno s řadou přímých i nepřímých degradačních jevů fluviálního reliéfu. Cílem studie ovšem není analýza efektivity lodní dopravy, ale poukázání na řadu negativních projevů této dopravy a dalších intervencí v souvislosti s transformací fluviálních procesů, jež nejsou do poškození ekosystémových služeb řek často brány v úvahu (Hein a kol. 2019), a i proto se obecná tvrzení o šetrnosti lodní dopravy nezakládají na faktech. Studie si klade za cíl poukázat na podstatné aspekty dynamiky říčního fenoménu Labe s ohledem na zachování cenných stanovišť z pohledu fluviální geomorfologie a posouzení klíčových atributů dolního Labe na území Česka s ohledem na potenciál území z hlediska obnovných a revitalizačních procesů tohoto významného úseku velké řeky střední Evropy.

2. Lodní doprava a říční krajina

Lodní doprava ke svému fungování vyžaduje na většině přirozených toků značné technické úpravy, tak aby vykazovala vyšší míru spolehlivosti v čase i v dostatečné délce plavebních tras. V tomto směru lze konstatovat, že lodní doprava byla kromě vodohospodářských a protipovodňových opatření jednou z činností člověka, kdy docházelo a dochází k výrazné transformaci fluviálního prostředí (Schinegger a kol. 2012, 2016). Výsledkem je nejen fragmentace fluviálního kontinua (Vannote a kol. 1980; Fryirs a kol. 2007), ale také rychlá nebo plíživá transformace či degradace ekosystémů, které jsou s říční krajinou trvale spjaté (Habersack a kol. 2016; Zajicek, Radinger, Wolter 2018). Dopady úprav koryta, ale i příbřežních morfologických jednotek mají zřetelné dopady do kvality a početnosti rostlinných i živočišných společenstev (Schinegger, Trautwein, Schmutz 2013). Velmi zřetelný je tento vliv u populací obratlovců i bezobratlých (Zajicek, Radinger, Wolter 2018; Zajicek, Wolter 2019), ale nevyhýbá se ani rostlinným formacím (Havlíček

a kol. 2023), které jsou vázány například na dynamiku fluvialních procesů. Jedním ze zastřešujících fenoménů je pokles hydromorfologické pestrosti původně přirozených koryt a jejich náhrada za uniformní kanalizované úseky (Le, Crosato, Arboleda 2020; Smith, Winkley 1996). Výsledkem snížení geodiverzity je pokles biodiverzity takto upravených koryt vodních toků (Schinegger a kol. 2012; 2016; Schinegger, Trautwein, Schmutz 2013). Je nutné podotknout, že úpravy řek pro lodní dopravu jsou jedním z řady stresových faktorů, které mají vliv na fungování fluvialních ekosystémů a koexistence různých transformací říčního fenoménu (např. protipovodňové a protierozní úpravy) vykazuje celou řadu synergií, které kritický stav ekosystémů dále prohlubují.

Lodní doprava představuje širokou škálu potenciálních vlivů na říční krajinu (viz tab. 1). Oproti statickým úpravám koryt, které představují tradiční vodohospodářské přístupy ve smyslu omezování povodňového nebo erozního rizika, představují úpravy pro zajištění plavební cesty a využívání koryta pro pohyb plavidel fenomén, který bychom mohli označit za dynamický. Máme na mysli především kolísání hladin v souvislosti s fungováním plavebních komor (např. dopady do rychlostního pole proudění pod komorami, kolísání průtoků apod.; Maeck, Lorke 2014) nebo účinky vlnění při proplutí lodi (projevy abrazního účinku vln na březní čáru a akcelerace eroze a ústupu břehů; Duró a kol. 2020; Liedermann a kol. 2014). Trvalá snaha o vytvoření vodních cest vedla k unifikaci říčního systému, který ztratil nejen spojitost v podélném profilu koryta (např. výstavba stupňů, jezových těles, plavebních komor), ale došlo i k částečnému nebo úplnému odpojení koryta od příbřežních morfologických jednotek, kdy hlavní koryto ztratilo spojitost s nivou a dalšími prvky, jakými jsou stará říční ramena, povodňová koryta nebo mokřadní ekosystémy vázané na nivu (Erskine 1992; Díaz-Redondo a kol. 2018). V tomto směru se výrazně uplatnilo zkapacitňování koryta (Moog a kol. 2018) lokálními prohrábkami nebo další údržbou plavební dráhy v podobě odtěžování dnových sedimentů na delších úsecích (Helal a kol. 2020) a řízená distribuce sedimentů v horních úsecích plavebních tras (Kondolf 1997; Frings a kol. 2019; Habersack, Jäger, Hauer 2013). Souběžně je často realizováno ohrázování plavebních kanálů, jež kromě funkce zkapacitnění koryta omezuje povodňové rozlivy v nivě (Vauclin a kol. 2020). Regulační opatření vedou i k proměně zdrojů sedimentů pro následnou akumulaci v nivě (Klasz a kol. 2014). Trvalé ovlivnění erozně-akumulačních a transportních procesů v korytě řeky i mimo koryto vedlo ke vzniku různých forem diskonektivity, kterou je např. vznik nepůvodních povrchů, ať již na dně koryta (např. dnové dlažby) nebo vznik hutněných nepůvodních povrchů v nivách či v rámci hrázových těles. Výsledkem je omezení hydraulického propojení s hyporeálem (vrstva dna s infiltrovanou říční vodou pod aktivním korytem) nebo s kolektory v nivách takto upravených řek (Lee a kol. 2022). Je evidentní, že tyto konstrukční prvky plavebních drah ovlivňují jak abiotickou, tak biologickou komponentu říční krajiny (Scharf, Brunke 2013). Zásahy do břehové

Tab. 1 – Přehled konstrukčních a provozních vlivů vodních vlivů vodních cest na vybrané morfologické a další environmentální parametry říční krajiny.

Skupina vlivů	Vliv	Morfologický efekt	Další environmentální efekt
Konstrukční (stavební)	Úprava trasy koryta (např. přímění)	zpravidla zkrácení délky koryta (např. přímění meandrů), změna geometrie koryta a dopad na rychlost a směr morfologicky účinného proudění, vznik boční diskonektivity	snížení kontaktu vody s okolním prostředím, urychlený odtok vody z povodí
	Úprava dna (zpevnění)	změny morfometrie a hydraulických podmínek dna koryta, změna hodnot tečného napětí, změna zrnitostního složení dna a charakteru mikroform reliéfu dna, zvýšení vertikální varianty morfologické diskonektivity	změny ve vlastnostech dnových stanovišť, snížená infiltrace do dna, změna charakteru hyporeálu, změna druhové skladby
	Úprava břehů (opevnění)	morfometrická homogenizace břehů a příbřežních jednotek	změna stanovišť příbřežních jednotek, omezení hydraulického napojení koryta na aluvium nivy, změna druhové skladby
	Zkapacitnění koryta	změna morfografie a morfometrie koryta, změna hloubek koryta, odpojení souběžných niv nebo bočních ramen, vznik nebo posílení boční diskonektivity	zvýšení průtočné kapacity koryta, změny v ekologických parametrech vodního sloupce
	Úprava podélného profilu (výstavba stupňů a plavebních komor)	zvýšení morfologické diskonektivity vlivem nových bariér, změny v intenzitě erozně-transportně-akumulačních procesů, vznik efektu hladové vody (akcelerovaná hloubková eroze pod bariérou), nad bariérou efekt akcelerované zpětné akumulace	změna v rychlosti proudění nad a pod bariérou, vzduší hladiny nad překážkou, změna ekologických podmínek, změna druhové skladby, eutrofizace, akumulace, kolmatace
	Likvidace břehových porostů	kácení lužního lesa a pobřežní dřevinné vegetace, změna v drsnosti povrchu	transformace a nahrazení původní struktury a skladby lužního lesa, dopad na pedogenezi
	Úpravy soutoků a přítoků	komplexní změny morfologie na soutokových zónách je odrazem i úprav koryt vlastních přítoků, ovlivnění sedimentární bilance hlavního toku	změna ekologických podmínek v zóně soutokových lavic a soutokových delt, riziko degradace přirozeně se vyskytujících biotopů na akumulačních formách
	Výstavba hrází	vnik nebo posílení boční diskonektivity vlivem zkapacitnění koryta nebo výstavbo bočních hrází, vliv na procesy vytvářející a přetvářející nivu	omezení přirozeného povodňování nivy a narušení hydraulického a hydrologického propojení koryta a nivy, vliv na intenzitu a frekvenci disturbančních procesů, změna kvality biotopů a dopad na druhovou skladbu

Skupina vlivů	Vliv	Morfologický efekt	Další environmentální efekt
Provozní	Změna průtokového režimu	změny v distribuci sil působících na dno a břehy koryta, přestavba erozních a akumulčních forem koryta, ale i nivy (v době mimokorytové inundace)	podstatný vliv na celou řadu ekologických charakteristik prostředí koryta a příbřežních jednotek, ale i nivy, vliv na pulzační efekt, dopady na rozmnožovací cyklus
	Údržba koryta	prohrábký dna, odtěžení akumulací sedimentů u břehů, morfologické a morfometrické změny	narušování stanovišť dna, změna charakteru dnového a příbřežního biotopu, fyzická likvidace nebo poškození jedinců vázaných na toto prostředí
	Údržba břehů	odstraňování dřevinné vegetace, sekání travin, odstraňování říčního dřeva	změny v zastínění, druhové skladbě, komplexní změna ekosystému
	Vznik vlnění	akcelerovaná abraze břehů, kolísání úrovně hladiny	dopady na změnu substrátu a vegetačního krytu, „dewatering“ – riziko zvýšení mortality plůdku
	Vznik turbulentního proudění	vznik hloubkové, výmolové eroze, změny rozložení rychlosti proudění a směrové změny	příčina změny ekologických podmínek vodního prostředí
	Změny úrovně hladiny (manipulace na objektech, provoz plavebních komor, prolachování, špičkování průtoků)	pulzační efekty na dnové a příbřežní akumulace sedimentů	
	Znečištění		vliv znečištění na živé organismy, vliv na kvalitu vody, kontaminace sedimentů, kontaminace podzemních vod
	Vření vody (provozem lodních motorů)	uvedení jemné plaveniny do vodního sloupce	resedimentace, uvolnění živit ze sedimentu, posun kontaminant
	Akumulace vody nad bariérou (stupeň, plavební komora)	akumulace sedimentů v nadjezí – akcelerace zpětné akumulace	komplexní změna proudného prostředí řeky (např. změna teplotních, živinových, světelných podmínek a rychlosti proudění vody)

Zdroj: zpracováno na základě podkladů: Habersack a kol. 2016; Jägerbrand a kol. 2019; Schinegger a kol. 2012; 2016; Schinegger, Trautwein, Schmutz 2013; Zajicek, Radinger, Wolter 2018; Zajicek, Walter 2019.

zóny způsobují vznik hydraulické diskonektivity, kterou na mnoha zkanalizovaných tocích doprovází degradace hyporeálu (Fryirs a kol. 2007), a to z důvodu změněné kvality dnových forem a skladby dnových sedimentů, jejich kompletní náhradou za nepropustné hydraulicky hladké povrchy (toto platí především v bezprostředním okolí jezových a plavebních stupňů) nebo v podmínkách zcela umělých úseků plavebních kanálů (Xu a kol. 2016). Dosud jsme zmínili především konstrukční prvky, jež se stávají statickými a rigidními technologickými prvky plavebních kanálů, ale svou funkcí významně postihují dynamickou podstatu fluviálních procesů. Provozní povahu manipulací na jezových tělesech a plavebních komorách doplňuje pohyb samotných lodí. Všechny tyto procesy mají povahu změn ve směru a rychlosti proudění vody. Tím dochází i k ovlivnění eroze, transportu a akumulace sedimentů a tyto dopady mohou být výsledkem chronického ovlivnění fluviálních procesů (Cox a kol. 2021, 2022). Kolísání hladiny v souvislosti s provozem plavebních komor a vlnění od projíždějících lodí vedou ke změnám stanovištních poměrů dna a příbřežních jednotek a s výrazným degradačním účinkem a efektem na populace organismů (Schludermann a kol. 2014). Velmi výrazná změna se projevuje v úseku v dosahu vzdutí nad příčnými bariérami, kde se proudění výrazně zpomaluje, vzniká vyšší vodní sloupec, dochází k projevům zpětné akumulace, zvyšuje se riziko eutrofizace vody a kontaminace dnových sedimentů. Naopak pod příčnými stavbami se standardně projevuje efekt hladové vody a v kombinaci s provozní údržbou plavební dráhy prohrábkami může v delších úsecích docházet k akceleraci hloubkové eroze (Liedermann a kol. 2018). Do komplexnosti provozních vlivů musíme zmínit i geochemické aspekty provozu dané emisemi nebo haváriemi, které ovlivňují nejen vlastnosti vodního prostředí, ale i sedimentů s dopady do biodiverzity (Bläsing, Shao, Lehndorff 2015; Jägerbrand a kol. 2019).

Fenoménem posledních dekad je rozvoj rekreační plavby, která je, podobně jako komerční plavba, spojena s environmentálními riziky (Lorenz a kol. 2013). Jsou popsány projevy hlukové zátěže (Maxwell a kol. 2018), znečištění vody (Xiong a kol. 2023) a ovzduší (Bannan, Adams, Pirie 2008), nebo hydromorfologické změny (Schuster a kol. 2020), kterými je nejen výstavba potřebné infrastruktury (např. přístaviště), ale i dopady výrazně vyšší frekvence pohybu těchto plavidel. Dopad lze spatřovat i ve víření jemné frakce sedimentů a efektu abrazních vln (Houser, Smith, Lilly 2021).

Z výše uvedených projevů dopadu lodní dopravy na fluviální systémy vyvstává řada dílčích otázek, na které se snaží na příkladu v podstatě jediné významnější vnitrozemské vodní cesty v Česku, tato studie najít odpověď: (1) Jak výrazně se změnila hydromorfologická kvalita předmětného úseku v souvislosti s lodní dopravou? (2) Je zde i přes předpokládanou degradaci hydromorfologického stavu zachována dynamika morfologie a povrchových sedimentů korytových náplavů jako důležitého prvku říční krajiny? (3) existují nástroje udržitelného managementu

a obnovy cenných stanovišť Labe prostřednictvím podpory přirozené morfologie a morfodynamiky koryta?

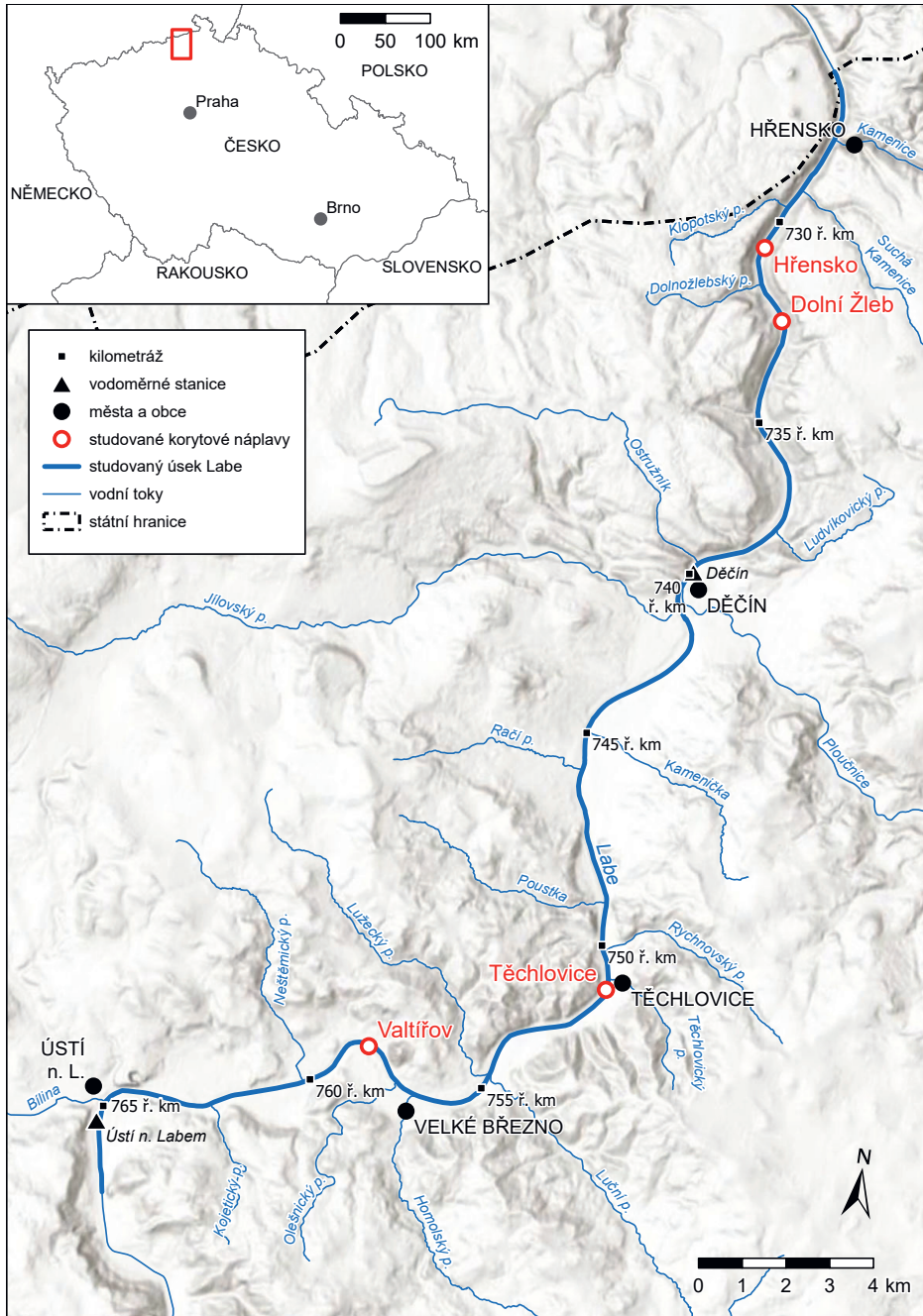
Za tímto účelem byla provedena rešerše historických zásahů a vývoje tohoto říčního úseku, zejména ve spojitosti s lodní dopravou, analyzován dlouhodobý hydrologický režim a byla zhodnocena současná hydromorfologická kvalita. Dvouletý geomorfologický monitoring čtyř náplavů poskytl informace o jejich dynamice během relativně málo vodného období bez významné povodně.

3. Charakteristika studované oblasti

Zájmovou oblastí je úsek koryta řeky Labe (obr. 1) od vodního díla (dále jen VD) Střekov v Ústí nad Labem (767,5 ř. km) po státní hranici Česko–Německo (726,5 ř. km). Celková délka řeky Labe je 1 094 km (v Česku 380 km) a povodí má rozlohu 148 268 km² (v Česku 51 394 km²; Simon a kol. 2005).

Povodí Labe spadá do mírného podnebného pásma a nachází se v přechodné oblasti mezi oceánickým a kontinentálním klimatem. V dlouhodobém průměru činí roční srážkový úhrn v celém povodí Labe 628 mm, v české části pak 666 mm (Simon a kol. 2005). Řeka Labe je charakteristická pluvio-niválním hydrologickým režimem. Nejvyšší průtoky na řece Labi ve studovaném úseku se vyskytují v období jara, kdy zdrojem je voda z tání sněhu. V létě jsou průtoky obecně nižší, ovšem z důvodu výskytu intenzivní cyklonální činnosti mohou srážky v tomto období způsobovat velmi náhlé zvýšení průtoku a vzestupy hladin (Tolasz a kol. 2007). Ve studovaném úseku se nacházejí dvě vodoměrné stanice: Ústí nad Labem a Děčín. Dlouhodobý průměrný roční průtok v Ústí nad Labem je 271 m³/s, v Děčíně pak 287 m³/s. Další hydrologické charakteristiky jsou uvedeny v tabulce 2. Současný hydrologický režim je významně ovlivněn antropogenními faktory. Nejzásadnějším je přítomnost tzv. Vltavské kaskády, která má schopnost účinně transformovat povodňové průtoky a případně nadlepšovat minimální průtoky. Dále se v předmětném úseku projevuje manipulace na vodních dílech, která vede ke kolísání průtoků v průběhu jednoho dne (jednotky až první desítky m³/s v řádu hodin).

Studovaný úsek protéká Českým středohořím, které je charakteristické mlado-třetihorními vulkanickými horninami prorážející především pískovcové sedimentární horniny České křídové pánve. Koryto řeky Labe je zde pod úroveň okolních plošin a vrcholů zahlobeno místy 300 až 500 m (Chlupáč a kol. 2002). Dále pak úsek koryta prochází Děčínskou vrchovinou, v hluboce zaříznutém kaňonovitým korytě vyhloubeném v kvádrových pískovcích svrchní křídý s průniky neovulkanických hornin (Chlupáč a kol. 2002). Z hlediska půdorysného tvaru koryta je Labe ve studovaném úseku charakteristické jednoduchým říčním vzorem s výskytem částečně zachovalých akumulací bočních a vrcholových lavic tvořených šterkporpiscitým materiálem. V minulosti se v zájmovém úseku vyskytovalo celkem



Obr. 1 – Lokalizace studovaného úseku řeky Labe a monitorovaných korytových náplavů. Zdroj podkladových dat: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, ESRI – World Hillshade WGS84, ARCDATA PRAHA – ArcČR®.

Tab. 2 – Dlouhodobé průměrné roční průtoky (Q_a , za referenční období 1991–2020), N-leté průtoky (pro období od 1940 do současnosti ve vodoměrné stanici Ústí n. Labem a od 1887 do současnosti ve vodoměrné stanici Děčín) a dalších hydrografické charakteristiky (pozice v rámci říčních km, plocha povodí k dané vodoměrné stanici) ve vybraných vodoměrných stanicích v zájmovém úseku řeky Labe.

Hlásný profil	ř. km	Plocha povodí vodoměrné stanice (km ²)	Q_a (m ³ /s)	N-leté průtoky (m ³ /s)				
				Q_1	Q_5	Q_{10}	Q_{50}	Q_{100}
Ústí n. Labem	765,96	48 561	271	1 240	2 220	2 670	3 780	4 290
Děčín	740,52	51 120	287	1 300	2 300	2 760	3 900	4 410

Zdroj dat: Český hydrometeorologický ústav, Povodí Labe, s. p.

šest říčních ostrovů (identifikovatelné jsou ještě na mapách II. vojenského mapování – Františkova z let 1836–1852), které však vlivem člověka (z důvodu stabilizace koryta, zabránění rozlivu při povodních, získání nadříčního terénu, zajištění vodní cesty pro lodní dopravu, omezením chodu sedimentů apod.) do současnosti postupně zanikly (Fošumpaur, Kašpar, Zukal 2019; Škarpich a kol. 2018).

4. Metodika

4.1. Zhodnocení dlouhodobého hydrologického režimu

Stejně tak jako celková morfologie koryta je dlouhodobý vývoj korytových náplavů jako objekt monitoringu mimo chod sedimentů a přímé zásahy člověka formován hydrologickým režimem řeky. Podobně je znalost hydrologického režimu a detekce případných trendů důležitá z hlediska zhodnocení nastavení současných podmínek pro potenciální dynamiku povrchu náplavů. Za účelem jeho vyhodnocení byla využita dlouhá časová řada průměrných denních průtoků 1888–2022 z vodoměrné stanice Děčín, jež byla poskytnuta z uložení GRDC (2023). V první fázi byl testován trend změny průtoků pomocí neparametrického Mann-Kendall testu pro celou časovou řadu z hlediska průměrných ročních průtoků a maximálních a minimálních průměrných denních průtoků v jednotlivých letech na úrovni spolehlivosti 0,05. Následně byla užita multitemporální analýza pomocí stejného testu, kdy byly tyto hydrologické charakteristiky zhodnoceny pro posledních 70 let (1952–2022) vzhledem k dostupnosti leteckých snímků na začátku tohoto období a přehlednosti výsledné vizualizované matice. V této matici každá buňka reprezentuje hodnotu τ vypočtenou pro konkrétní časové období, definované počátečním rokem na ose Y a koncovým rokem na ose X. Hodnota τ reprezentuje sílu a směr monotónního trendu, čímž poskytuje vzhled do časových změn v různých časových měřítkách.

Barva každé buňky udává směr a významnost trendu: červené buňky označují pozitivní hodnotu τ , což naznačuje vzestupný trend, zatímco modré buňky indikují negativní hodnotu τ , což odráží klesající trend. Intenzita barvy koreluje se silou trendu, kdy tmavší odstíny představují významnější trendy. Na úrovni podrobnějšího měřítka byly dále Mann-Kendall testem zjišťovány potenciální trendy průměrných měsíčních průtoků, a to pro obě hodnocené období (1888–2022 a 1952–2022) na úrovni spolehlivosti 0,05.

4.2. Historický vývoj předmětného úseku a hydromorfologické hodnocení jeho současného stavu

V první fázi byla provedena komplexní rešerše dostupných podkladů o antropogenních zásazích do dolního úseku Labe ve spojitosti s lodní dopravou. V návaznosti na to bylo v roce 2021 provedeno aplikované fluvialně-geomorfologické mapování, kde byly inventarizovány významné morfologické prvky koryta a nivy dolního Labe. Cílem této inventarizace bylo mimo jiné získání podkladů pro následné hydromorfologické hodnocení kvality fluvialního systému na základě určení indexu morfologické kvality dle mezinárodně uznávané metodiky (Rinaldi a kol. 2013; 2016). Výstupem byla sada hodnotících formulářů (podrobněji viz Hradecký a kol. 2024), které kvalitativně posuzují různé aspekty morfologické kvality fluvialního prvku a vodního toku jako celku. Na základě syntézy dat dílčích vyhodnocení bylo možné přistoupit k určení indexu morfologické kvality v celé délce zájmového území dolního Labe a vymezit jednotlivé úseky podle kvality morfologie. Metodika je dostatečně robustní a byla otestována na řadě relativně velkých toků Evropy (Lemay a kol. 2021).

Dalším podkladem dokumentujícím historický vývoj koryta dolní Labe byla analýza jeho šířek za období posledních cca 200 let. Jako zdroje této analýzy byly použity staré mapové podklady a letecké snímky. Šířka koryta byla měřena na mapách II. vojenského mapování (v měřítku 1:28 800) z období 1836 až 1852, na leteckých snímcích z let 1952–1954 a současných leteckých snímcích z roku 2021. Měření probíhalo vždy po 500 m úsecích. Na mapách II. vojenského mapování byly šířky měřeny vždy mezi zakreslenými břehovými liniemi kolmo k předpokládané proudnici. Na leteckých snímcích z let 1952–1954 a 2021 byly břehové linie pro měření šířky koryta vedeny vždy po hranici zaplavené vodou. Důvodem bylo, že především na historických leteckých snímcích byly břehové oblasti mnohdy již pod vlivem tzv. regulačních výhonů, jejichž původním smyslem bylo usměrnění proudění vody do užšího profilu. V případě, že mezi výhony byla viditelná stagující voda, byla i tato část považována za koryto. V případě, že byly oblasti mezi břehovými výhony zazemněny nebo již pokryty vegetací, nebyla tato část za koryto považována.

K posouzení vývoje změn šířky koryta mezi jednotlivými obdobími byl využit, z důvodu nenormálního rozložení dat, neparametrický Mann-Whitney test na úrovni spolehlivosti 0,05. Tento postup bývá hojně využíván při posuzování posuzování změn půdorysných aspektů koryta, např. Liébault, Piégay (2002); Zawiejska, Wyżga (2010); Škarpich, Hradecký, Dušek (2013); Rusnák, Lehotský, Kidová (2016). Dále byla také zhodnocena délka úseků, které podlely změně šířky koryta za sledované období.

4.3. Monitoring povrchu korytových náplavů

Za účelem získání detailních informací o morfodynamice korytových náplavů bylo přistoupeno k opakovanému geodetickému zaměřování transektů a stanovení zrnitosti povrchové vrstvy sedimentů v září 2021 a v září 2023 na čtyřech vybraných náplavech (obr. 1). Náplav ve Valtířově má typologické znaky vrcholové lavice, zatímco další tři náplavy lze spíše charakterizovat jako boční lavice svou morfologií typické pro upravené toky s opevněnými břehy. Studované korytové náplavy jsou tvořeny především štěrky s příměsí písčité a prachovité frakce a vykazují armování povrchové vrstvy. Během tohoto dvouletého období nebylo dosaženo na vodoměrné stanice v Děčíně ani jednoletého průtoku; nejvyšší průtok byl zaznamenán 17. 4. 2023 (900 m³/s; Q1 = 1300 m³/s).

Monitorované transekty byly vedeny kolmo k březní linii koryta vždy po trojicích v pětimetrovém rozestupu ve frontální, centrální a distální části náplavu (tzn. horní, střední a dolní části ve směru proudění). Body v jednotlivých transektech byly měřeny v metrových rozestupech a připojeny do sítě S-JSTK. Protože během zaměřování v roce 2021 byla hladina v řece výše než v roce 2023, byly transekty zaměřené v roce 2023 zkráceny po vizualizaci bodů v GIS, aby mohly být výsledky obou etap přímo porovnány. Následně byl pro jednotlivé transekty vypočítán parametr průměrné konkavity *Conc*, který představuje heterogenitu relativních výšek v zaměřeném profilu (Laub a kol. 2012):

$$Conc = \sum(|x_2 - x_1| + |x_3 - x_2| + \dots + |x_{n-1} - x_n|),$$

kde x_i značí pořadí zaměřeného bodu ve směru od hladiny po místo, kde náplav přechází v nivu s kontinuálním trvalým porostem. Tento parametr tedy vyjadřuje průměrné převýšení na jednotkovou vzdálenost, v našem případě jeden metr. Aby mohla být vyjádřena i variabilita těchto převýšení, byla vypočtena směrodatná odchylka těchto převýšení v rámci jednotlivých transektů.

Zrnitostní analýza povrchové vrstvy korytových náplavů byla prováděna metodou fotogrametrie v lokalitách zaměřených transektů ve frontální, centrální a distální části náplavu. V každé z těchto částí bylo snímkování provedeno na 2–4 reprezentativních místech v transektu mezi hladinou a vnějším

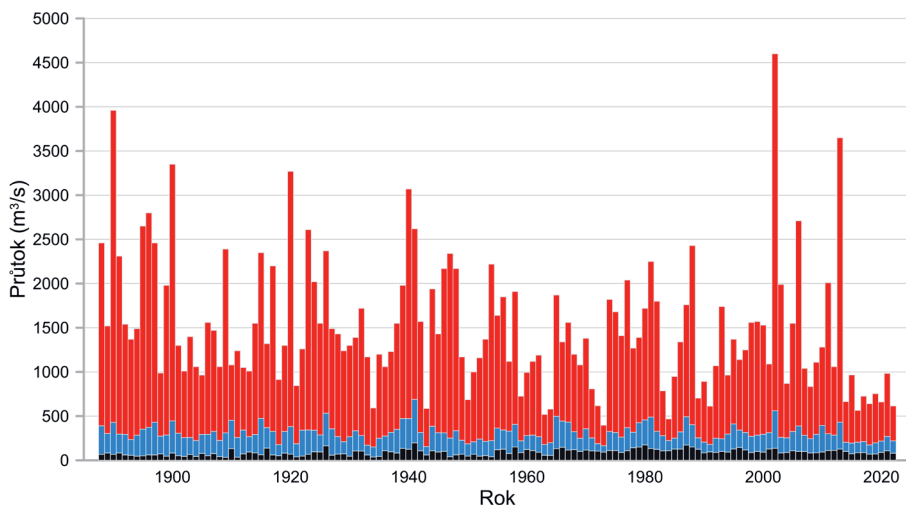
okrajem náplavu v závislosti na šířce náplavu, kdy byl vytyčen obdélník o stranách $1 \times 0,75$ metrů, jenž byl zcela vyčištěn od vegetace. Snímek byl následně vyhodnocen v softwaru *PebbleCounts*, v jehož prostředí byla vygenerována zrnitostní křivka se spodním ořezem 10 mm na základě náhodného výběru 150 klastů ze snímané plochy (Purinton, Bookhagen 2019). Celkově tak za každou část náplavu bylo změřeno 300–600 klastů dle počtu snímaných ploch. Výjimku představovala distální část náplavu v Hřensku, kde se nacházel příliš jemný sediment (medián zrnitosti < 10 mm) znemožňující spolehlivé provedení této analýzy.

Pro vyhodnocení změny v rámci parametru průměrné konkavity a její směrodatné odchylky mezi měřeními v roce 2021 a 2023 byl použit neparametrický Mann-Whitney test na úrovni spolehlivosti 0,05, do kterého vstupovaly hodnoty vždy za celý náplav (tzn. celkově devět hodnot za jeden náplav). Změna v povrchové zrnitosti náplavů v tomto období byla pomocí stejného testu a úrovně spolehlivosti vyhodnocena ve větším detailu, když byla porovnávána zrnitost z jednotlivých částí náplavů (tj. frontální, centrální a distální).

5. Výsledky

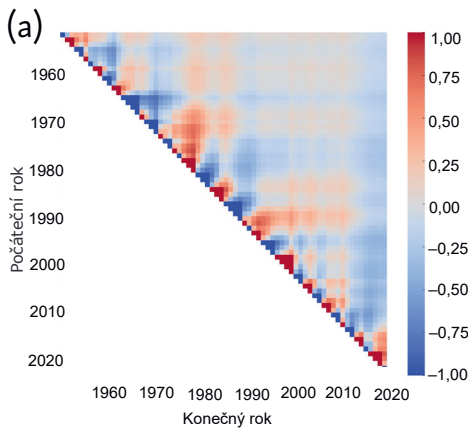
5.1. Dlouhodobé změny denních průtoků

Průměrné roční průtoky, průměrné denní maximální a průměrné denní minimální průtoky za jednotlivé roky v celé časové řadě 1888–2022 pro vodoměrnou

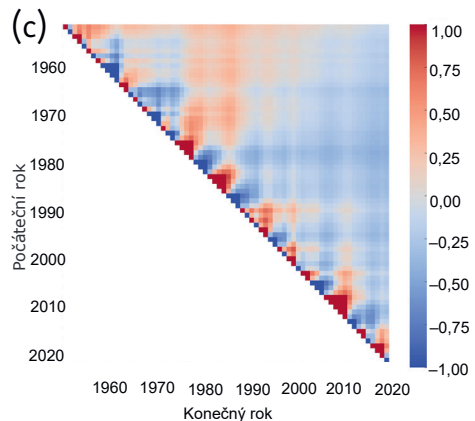
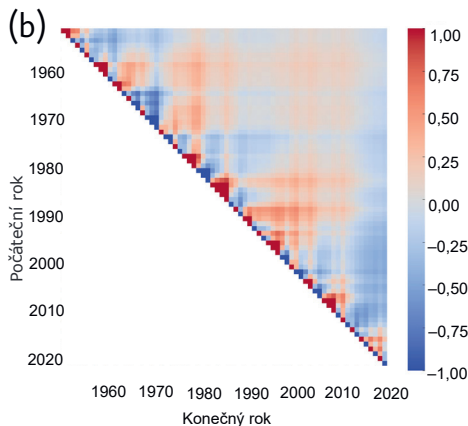


Obř. 2 – Průměrný roční průtok (modré sloupce), maximální (červené sloupce) a minimální (černé sloupce) průměrný denní průtok v jednotlivých letech v období let 1888–2022. Zdroj dat: GRDC 2023.

stanici v Děčíně představuje obr. 2. V této celé časové řadě je patrná tendence k postupnému snižování průměrných ročních průtoků, nicméně tento trend není na úrovni spolehlivosti 0,05 signifikantní ($\tau = -0,11$, $p = 0,06$). Statisticky průkazné je však snižování maximálních průměrných denních průtoků ($\tau = -0,21$, $p < 0,0003$) a naopak pro tuto stanici existuje signifikantní pozitivní trend minimálních průměrných denních průtoků ($\tau = 0,30$, $p < 0,0001$). Testování trendů na úrovni průměrných měsíčních průtoků prokázalo snižování jarních průtoků v celé časové řadě 1888–2022. Pro kratší období 1952–2022 byl tento trend pro březen již neprůkazný, zatímco bylo detekováno statisticky signifikantní snižování červnových průtoků (tab. 3). Vizualizace multitemporální analýzy trendů průtoků za období 1952–2022 zjevně ukazuje na nízké vodnosti v průběhu poslední dekády v kontextu tohoto analyzovaného období. Tato skutečnost se výrazně projevuje u vizualizace všech tří hodnocených charakteristik, tedy průměrných ročních průtoků a maximálních a minimálních průměrných denních průtoků (obr. 3).



Obr. 3 – Multitemporální analýza průtoků za jednotlivé roky v období 1952–2022: (a) průměrných ročních průtoků, (b) maximálních a (c) minimálních průměrných denních průtoků během jednotlivých let v období 1952–2022. Zdroj dat pro analýzu: GRDC 2023.



Tab. 3 – Výsledky Mann-Kendalova testu měsíčních průtoků pro období 1888–2022 a 1952–2022; statisticky významné hodnoty jsou vyznačeny kurzívou. Zdroj dat pro analýzu: GRDC 2023.

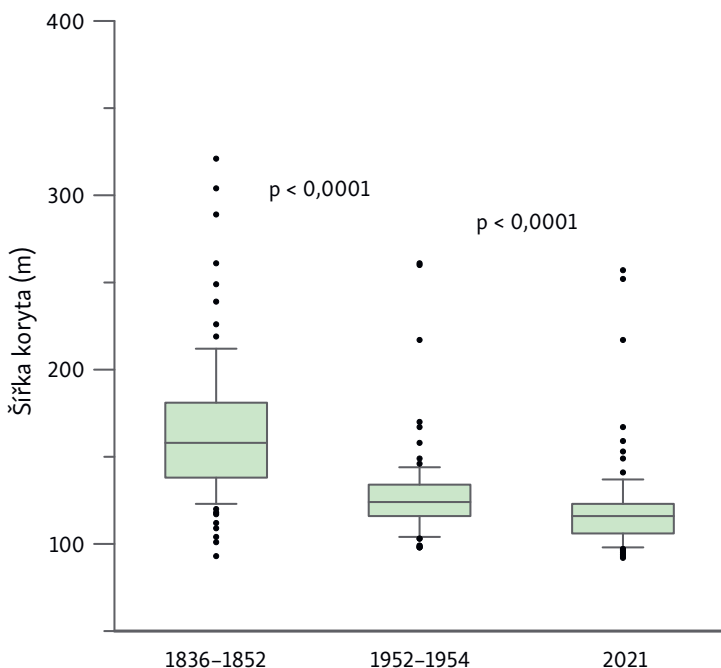
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1888–2022	τ	0,103	0,048	-0,137	-0,173	-0,207	-0,053	0,017	0,011	0,021	-0,005	0,060	0,078
	<i>p</i>	0,076	0,41	0,018	0,003	0,0004	0,36	0,77	0,85	0,71	0,93	0,30	0,18
1952–2022	τ	0,066	0,070	-0,008	-0,203	-0,200	-0,170	-0,142	-0,120	-0,063	-0,026	-0,008	-0,103
	<i>p</i>	0,41	0,38	0,92	0,012	0,013	0,036	0,081	0,14	0,44	0,75	0,92	0,21

Pozn.: τ – koeficient představující sílu a směr trendu, *p* – úroveň spolehlivosti.

5.2. Historický vývoj předmětného úseku a hydromorfologické hodnocení jeho současného stavu

Zájmový úsek řeky Labe byl od středověku předmětem regulačních zásahů především z důvodu úpravy plavební dráhy za pomoci prohrábek, soustředovacích staveb, opevnění břehů, ale také z důvodu zabránění rozlivu při povodních (Fošumpaur, Kašpar, Zukal 2019). První regulační práce měly spíše nesystematický charakter za pomoci místních úprav s cílem odstranění přirozených překážek, výstavby zařízení sloužících k plavbě (např. přístavy, mola) a opevnění břehů (Fošumpaur a kol. 2020). Opevňování břehů se provádělo převážně ručně vyplétanými plůtky nebo hatěmi, které se do Čech rozšířily z Holandska v 18. století. Problematické byly především úseky s širokým řečištěm a přirozeně vytvořenými mělčinami, které tvořily překážky v plavbě za nižších vodních stavů. V těchto úsecích se z hatoviny stavěly spolu s průběhem koryta rovnoběžné stavby, které se nazývaly regulace. Tyto rovnoběžné stavby zúžily koryto a soustředily proudění vody na potřebnou šířku (Šámalová 2009).

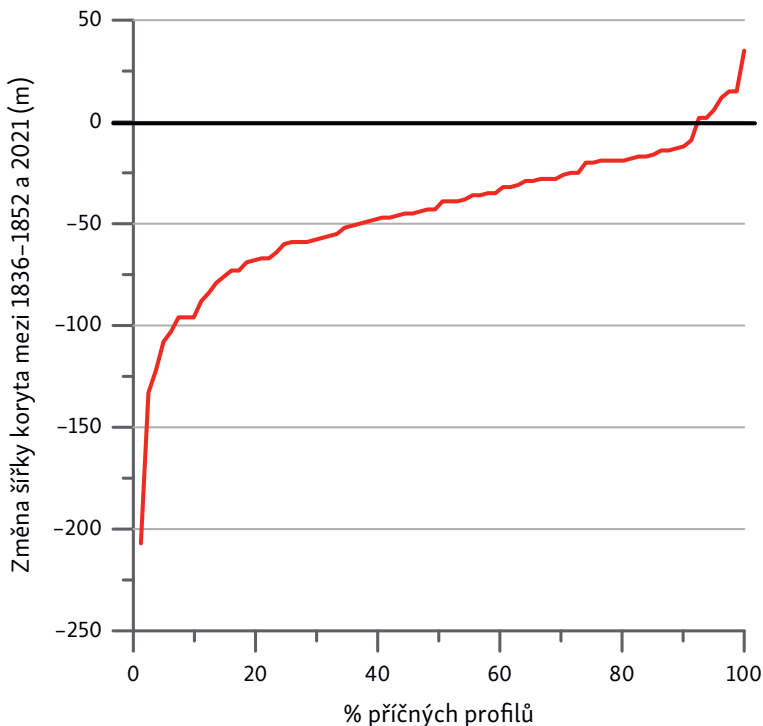
Významnější úpravy se začaly realizovat na počátku 19. století, kdy byly břehy opevňovány dlažbou z lomového kamene uloženého do štěrkopískového lože (Fošumpaur a kol. 2020). Problematická byla pro lodě především plavba proti proudu, kdy lodě neměly v minulosti svůj vlastní pohon a musely být vlečeny lidmi nebo koňmi. V roce 1820 pak byla postavena z Drážďan do Litoměřic na levém břehu Labe dlážděná potahová (vlečná) stezka, která umožnila lidský vlek nahradit koňským (Šámalová 2009). V souvislosti se zahájením plavby parních lodí na Labi se pak Rakousko-Uherská říše zavázala v roce 1844 k udržování předepsané hloubky koryta (Fošumpaur, Kašpar, Zukal 2019). Velkou překážkou byly také lodní mlýny (první lodní mlýn na Labi se objevil ve 13. století), které sestávaly se dvou lodí s plochým dnem upevněných ke břehu nebo dnu kotvami a řetězy, mezi kterými se točilo mlýnské kolo. V roce 1860 se tyto lodní mlýny ve studovaném úseku vyskytovaly např. v Ústí nad Labem a ve Valtířově. Ty byly postupně likvidovány až do začátku 20. století (Šámalová 2009).



Obr. 4 – Změny šířky koryta řeky Labe v úseku 767,0–727,0 ř. km mezi roky 1836–1852, 1952–1954 a 2021; počet měřených transektů ve zkoumaném úseku koryta $n = 81$; p – výsledek neparametrického statistického Mann-Whitney testu mezi jednotlivými měřeními šířkami koryta v daných obdobích, krabicový graf znázorňuje rozpětí měřených šířek mezi dolním a horním kvantilem v daných obdobích.

V letech 1875 až 1887 na základě říšského vodního zákona 1869–1875 proběhly rozsáhlé regulační práce defacto v celém studovaném úseku Labe. Jednalo se především o prohlubování koryta, opevňování břehů a rozšíření vlečné potahové stezky. Od roku 1896 pak byly prováděny další rozsáhlé regulační úpravy, které sestávaly v budování soustředovacích staveb, hrázek, břehového opevnění dlážděného z lomového kamene, a prohrábek dna (Fošumpaur, Kašpar, Zukal 2019). Realizace těchto úprav koryta Labe v 19. století vedla k zúžení koryta až o 60 %. Došlo také ke zvýšení rychlosti proudění o přibližně 30 % a tím k částečné změně charakteru materiálu dna Labe, které je dnes v daném úseku štěrkovité až kamenité (Fošumpaur a kol. 2020).

Významnou regulací byla výstavba VD Střekov mezi roky 1924 až 1936 na ř. km 767,5. Toto vodní dílo s plavebním stupeněm po jeho dokončení patřilo mezi největší v celé Evropě. Účelem bylo především splavit úsek Labe v oblasti tzv. střekovských peřejí, které byly pro lodě často nesjízdné v obdobích s nižšími průtoky (Šámalová 2009). V průběhu zbytku 20. století pak docházelo spíše k udržování regulačních staveb realizovaných v 19. století a na přelomu 19. a 20. století. Úpravy

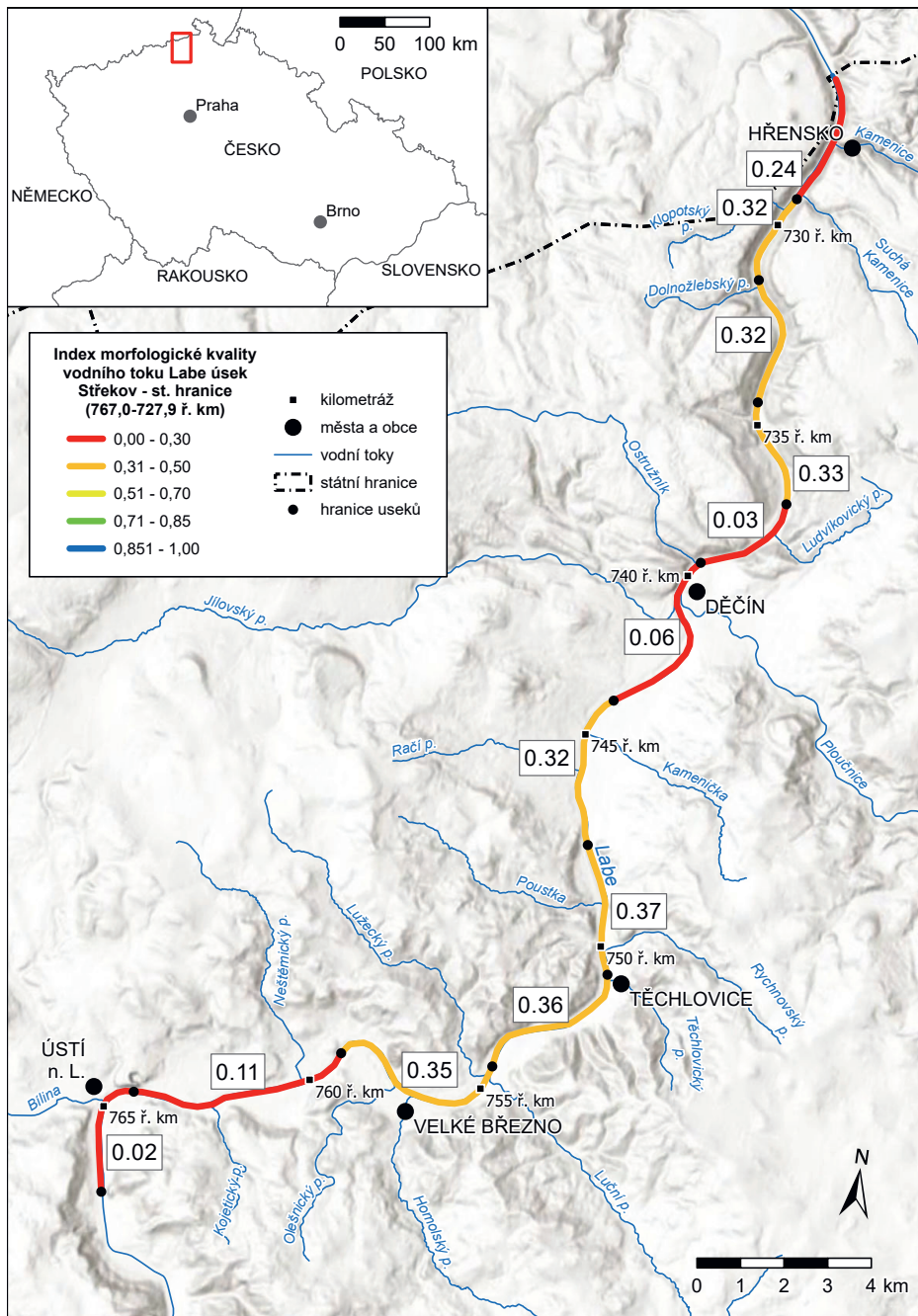


Obr. 5 – Procentuální zastoupení změn šířek koryta v období mezi roky 1836–1852 a 2021 ve studovaném úseku řeky Labe.

souvisely především s lokální stabilizací břehových partií v oblastech se zástavbou, v blízkosti říčních přístavů a udržováním plavební hloubky za pomoci prohrábek dna, které jsou realizovány i v současnosti.

Tyto historické regulace se výrazně promítly do hodnocených změn šířek koryta řeky Labe v úseku od VD Střekov v Ústí nad Labem po státní hranici Česko–Německo (767,0–727,0 ř. km). Na základě Mann-Whitney testu mezi roky 1836–1852 až 1952–1954, resp. 2021, je viditelná signifikantní změna mezi jednotlivými obdobími (viz obr. 4). V daném úseku převažoval trend zužování koryta nad jeho rozšiřováním (srovnej na obr. 5), kdy zúžení koryta podlehlo za období od roku 1836–1852 do roku 2021 zhruba 90 % délky studovaného úseku a rozšíření jen 10 % délky studovaného úseku. Maximální hodnoty zúžení koryta se pohybovaly okolo 200 m a rozšíření okolo 70 m. Zúžení koryta o více jak 50 m podlehlo zhruba 40 % délky studovaného úseku a zúžení koryta do 50 m podlehlo okolo 50 % délky studovaného úseku (podrobněji viz obr. 5).

Hydromorfologické hodnocení dle metodiky Rinaldi a kol. (2016) vykazaly velmi nízké hodnoty indexu hydromorfologické kvality, a to na celém úseku mezi



Obr. 6 – Hodnoty indexu morfologické kvality pro jednotlivé úseky dolního Labe. Zdroj: Hradecký a kol. 2024, dle metodiky Rinaldi a kol. (2016). Zdroj podkladových dat: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, ESRI – World Hillshade WGS84, ARCDATA PRAHA – ArcČR®.

Tab. 4 – Hodnoty indexu morfologické kvality dle metodiky Rinaldi a kol. (2016) a stručná charakteristika jednotlivých úseků dolního Labe.

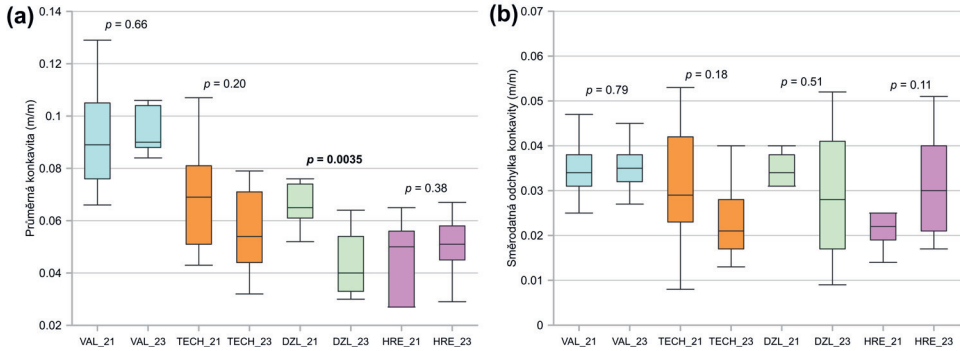
Začátek úseku (ř. km)	Konec úseku (ř. km)	Délka úseku (km)	Stručná charakteristika úseku	Index morfologické kvality
767,5	764,2	3,3	v zastavěném území města Ústí nad Labem	0,02
764,2	759,2	5,0	v zastavěném území města, výskyt přístaviště a významné stabilizace břehů	0,11
759,2	754,4	4,8	částečně zastavěné území obcí s výskytem náplavů	0,35
754,4	751,0	3,4	bez větší zástavby s výskytem náplavů	0,36
751,0	747,5	3,5	sevřenější údolí s občasně se vyskytující zástavbou menších obcí	0,37
747,5	744,0	3,5	občasná zástavba s výskytem volných ploch v nivě pro rozlivy	0,32
744,0	739,5	4,5	v zastavěném území města Děčín s přístavišti	0,06
739,5	737,2	2,3	uzavřené údolí, přístaviště na pravém břehu	0,03
737,2	734,6	2,6	uzavřené údolí s výskytem lavic a velmi občasnou zástavbou	0,33
734,6	731,5	3,1	uzavřené údolí s výskytem lavic a velmi občasnou zástavbou	0,32
731,5	728,0	3,5	uzavřené údolí s výskytem lavic a velmi občasnou zástavbou	0,32
728,0	726,5	1,5	uzavřené údolí s výskytem lavic a zástavbou na pravém břehu	0,24

Zdroj dat: Hradecký a kol. (2024)

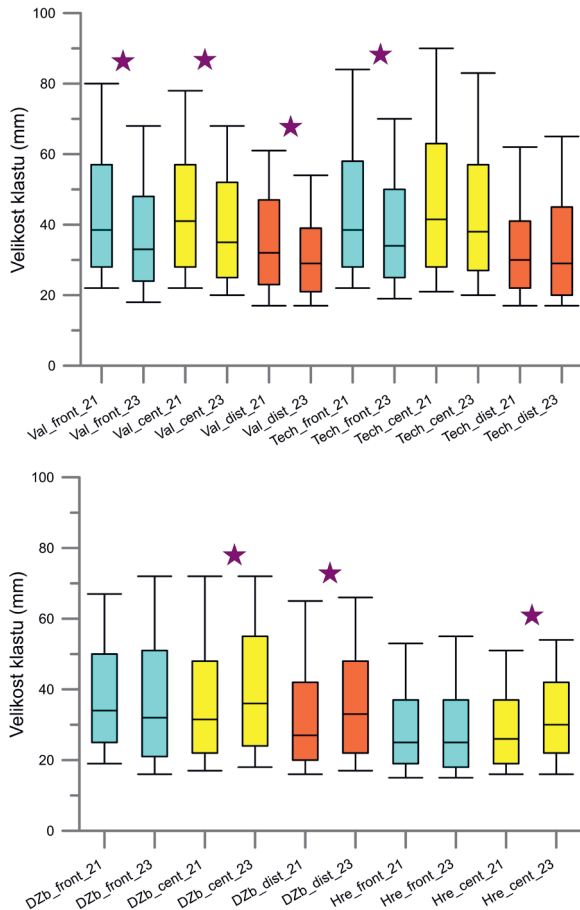
VD Střekov a státní hranicí s Nemeckem (Hradecký a kol. 2024; viz obr. 6 a tab. 4). Hydromorfologický stav dolního Labe daný historickými úpravami a současnou údržbou koryta lze považovat za silně ovlivněný. Stanovený index morfologické kvality vykazuje v zámjovém úseku řeky Labe hodnoty mezi 0,02 až 0,37, což vodní tok z pohledu hydromorfologie klasifikuje do kategorie špatný až velmi špatný (viz tab. 4). Nejnižší hodnoty indexu hydromorfologické kvality se vyskytují v úsecích, kdy koryto prochází městy Ústí nad Labem a Děčín (0,02 až 0,11). Syntetizované hodnoty podtrhují komplexní transformaci fluviálního systému, která se projevuje jak v morfodynamice, tak v zachoalosti a kvalitě řady fluviálních forem reliéfu.

5.3. Monitoring povrchu korytových náplavů

Z hlediska heterogenity příčných transektů vedenými korytovými náplavy byly za dvouleté období 2021–2023 pozorovány signifikantní změny pouze u jednoho



Obr. 7 – Změny v (a) parametru průměrné konkavity (b) směrodatné odchylky konkavity monitorovaných náplavů; p-hodnoty vyjadřují výsledek Mann-Whitney testu, statisticky významné rozdíly jsou vyznačeny tučně.



Obr. 8 – Distribuce zrnitosti povrchové vrstvy korytových náplavů, a – Valtířov a Těchlovice, b – Dolní Žleb a Hřensko mezi lety 2021 a 2023 dle jednotlivých poloh (modře: frontální, žlutě: centrální, oranžově: distální). Statisticky významné rozdíly mezi testovanými roky jsou označeny hvězdičkou, vossy krabicového grafu představují 10. a 90. percentil zrnitosti.

ze čtyř monitorovaných náplavů (Dolní Žleb), a to v parametru průměrné konkavity ukazující na snížení heterogenity v příčných profilech (obr. 7). Tendence změn směrem ke snižování heterogenity je pozorovatelná i na náplavu v Těchlovicích a naopak směrodatná odchylka konkavity v Hřensku může poukazovat na mírné zvýšení heterogenity, nicméně tyto změny nejsou statisticky průkazné. U náplavu ve Valtířově nebyly pozorovány významné změny ve sledovaných parametrech.

Korytové náplavy dolního Labe tvoří dominantně štěrky různých frakcí s příměsí písčité frakce a také jemnější prachovité frakce, nicméně použitá metodika dovozovala pouze vyhodnocení změn v rámci štěrkové frakce. Zrnitost jednotlivých poloh náplavů vykázala nejednoznačný směr trendů mezi lety 2021 a 2023, kdy se na sedmi z jedenácti poloh projevila signifikantní změna (obr. 8). Na všech polohách náplavu ve Valtířově a frontální (horní) poloze náplavu v Těchlovicích bylo pozorováno zjemňování povrchové vrstvy sedimentů. Naopak u dvou po proudu níže položených lavic (Dolní Žleb a Hřensko) jsme vždy v centrální části lavice pozorovali hrubnutí, a to se také projevilo i u distální (dolní) polohy v Dolním Žlebu. Ostatní hodnocené polohy nevykázaly mezi lety 2021 a 2023 statisticky významný rozdíl v zrnitosti.

6. Diskuze

Tato studie si kladla za cíl zhodnotit současné antropogenní ovlivnění dolního úseku Labe v souvislosti s lodní dopravou, stanovit současnou dynamiku povrchu korytových náplavů a najít nástroj udržitelného managementu obnovy stanovišť přírodě blízkými opatřeními. Bylo zjištěno, že celý studovaný úsek je v současnosti ve špatném hydromorfologickém stavu vzhledem k výrazným historickým zásahům člověka, což se mimo nízké hodnoty výsledné hydromorfologické kvality projevuje ve výrazné redukci šířek aktivního koryta. I přes tento stav a relativně nízké vodnosti v monitorovaném období vykázaly sledované náplavy (jako cenné biotopy studované říční krajiny) poměrně výraznou morfodynamiku, která však nemá jednotné trendy a vykazuje známky antropogenního ovlivnění. Závěrečná část diskuze proto přibližuje konkrétní nástroje, kterými je možno podpořit zlepšení hydromorfologického stavu dolního Labe.

6.1. Hydrologický režim jako prediktor morfologických změn

Změny v odtoku představují velmi často komplexní problém, který je dán ovlivněním režimu vybudovanými vodohospodářskými díly, odběry vody z vodních toků, změnami využití území a v neposlední řadě se výrazně uplatňují dopady probíhající klimatické změny. Analýza více než 140leté časové řady v rámci

profilu Děčín prokázala signifikantní snižování maximálních průměrných denních průtoků, zároveň se projevil signifikantní trend zvyšování minimálních průměrných denních průtoků. Projevem změn je i celkové snižování průměrných ročních průtoků, avšak nebyla prokázána signifikance trendu. V časových řadách 1888–2022 a 1952–2022 jsme detekovali snižování průměrných měsíčních průtoků v jarním období, kdy dochází k posunu tohoto trendu pro druhé sledované období až do června. Tato situace není na jiných tocích Evropy i světa ojedinělá a různé variace těchto trendů popisuje řada studií. Stonevičius a kol. (2014) prokázal snížení průtoku litevských řek od 40. let 20. století. Od 60. let se projevuje i pokles jarních povodňových maxim, naopak se objevuje nárůst zimních minim. Tyto změny jsou dávány do souvislosti s nárůstem srážkových úhrnů. Z pohledu fungování morfodynamických procesů v korytě dolního Labe je zřejmé, že pokles v maximech bude mít dopad na nižší frekvenci disturbancí příbřežních jednotek. Zároveň lze očekávat delší exponování sucha na náplavy podobně, jak se projevilo v uplynulém desetiletí. Podobné změny mají tedy charakter projevující se na úrovni sezonních změn a mají jasný vztah k měnícímu se klimatu, zatímco průměrné charakteristiky nevykazují signifikantní změnu. Podobné fenomény v analýze dlouhých časových řad potvrzují i výzkumy na tocích střední Evropy v období 1869–2016 (Rottler a kol. 2021). Jedním z důležitých momentů je měnící se charakter odtoku v souvislosti s tající sněhovou pokrývkou a snižující se zásoba vody iniciovaná tímto procesem a zvyšující zásobu vody i v umělých rezervoárech, na rozdíl od studií lokalizovaných v jižních oblastech Evropy, kde je pokles průtoků prokazatelně svázán s celkovým poklesem srážkových úhrnů (Darvini, Memmola 2020). Změny v sezonnosti průtoků identifikovali i na východním okraji střední Evropy na karpatských tocích Siwek a kol. (2022). Nárůst zimních minim a pokles odtoku v podzimních obdobích jsou v zalesněných povodích na pozadí neměnicích se celkových srážkových úhrnů dávány do souvislosti s nárůstem teploty vzduchu. Pro situaci dolního Labe jsou v posledních deseti letech naprosto klíčovou příčinou snížené účinky korytotvorných průtoků. Snižující se průměrná denní maxima provází projev dlouhodobé suché periody, která bezesporu limituje ekologicky významné disturbance. Snižování průměrných průtoků v jarních měsících může vést k rychlejší kolonizaci náplavů vegetací, což může posléze opět vést ke snížení geomorfologického efektu případných povodňových disturbancí.

6.2. Hydromorfologická kvalita, změny šířky koryta řeky Labe a role člověka

Jak vyplývá z historického exkurzu, dolní Labe prošlo velmi výraznou vodo-hospodářskou proměnou, při které byly hlavními opatřeními protipovodňové a protierozní zásahy. Tato opatření byla často budována v souběhu se splavnovacími úpravami koryta. Nedílnou součástí provozu vodní cesty byla korekční

údržba zaměřená především na zajištění dostatečných plavebních hloubek a jejich optimální distribuci v plavební dráze. Všechny tři skupiny opatření mají často synergické efekty. Tradiční urychlení odtoku zkapacitněním a méně hydraulicky drsným korytem akceleruje v zúžených místech koryta odnos sedimentů a podporuje procesy hloubkové eroze (Cox a kol. 2022). Prohlubování koryta coby plavební trasy vede ke zkapacitnění a velmi často k podpoře diskonektivity s příbřežními jednotkami a nivou (Fryirs a kol. 2007). Korekční údržba mění strukturu sedimentů nejenom na dně koryta, ale také v příbřežních jednotkách, kam je zpravidla sediment koryta vyhrnut (Moog a kol. 2018). Příbřežní jednotky, jako jsou výše zmíněné korytové náplavy, vykazují následkem přímých i nepřímých efektů změny v morfologii a zrnitostní skladbě. Zkapacitnění koryta navíc zásadně mění dosahy morfologicky efektivních průtoků. V důsledku těchto zásahů byla pozorována výrazná degradace předmětného úseku Labe z pohledu mezinárodně uznávané metodiky hydromorfologického hodnocení kvality (Rinaldi a kol. 2016). Podobný stav v souvislosti s lodní dopravou je však popisován na řadě dalších říčních úseků ve středoevropském prostoru (např. Habersack a kol. 2016; Zajicek, Wolter, 2019).

Analýzovaný vývoj šířky koryta lze interpretovat jako trvalou snahu iniciovat a udržovat koryto urychlující odtok a mající dostatečné plavební hloubky, čemuž odpovídá dominantní trend zužování koryta v období let 1836–2021. Podobné chování koryta intenzivně využívaných vodních toků, které jsou navíc na kontaktu s okolní infrastrukturou lze považovat za standardní projev jak primárních úprav a modifikací, tak pravidelné údržby. Na dolním Labi vznikala celá řada konstrukčních prvků usměrňující proudnici (výhony), tak byla a je prováděna údržba plavební dráhy prohrábkami. Podobné fenomény a jejich dopady na fluvialní procesy popisují studie z řady podobně využívaných toků (Henning, Hentschel 2013). Ekologické modifikace prostředí jsou tak výsledkem těchto zásahů a v souběhu s ovlivněným hydrologickým režimem jsou hlavními řídicími procesy vyskytující se ekosystémů a stanovišť. Velmi podstatným projevem výše uvedených trendů je snižování heterogenity koryta, které se mimo jiné projevilo ztrátou ostrovů (např. Raška, Dolejš, Hofmanová 2017), korytových náplavů a variability hloubek. Jedním z projevů následných vývojových změn, které akceleroval i dlouhodobý snížený výskyt účinných průtoků a omezená intenzita přestavby příbřežních jednotek je sukcesní kolonizace vybudovaných výhonů a další stabilizací vegetace a sedimentací materiálu docházelo k dalším zužování koryta.

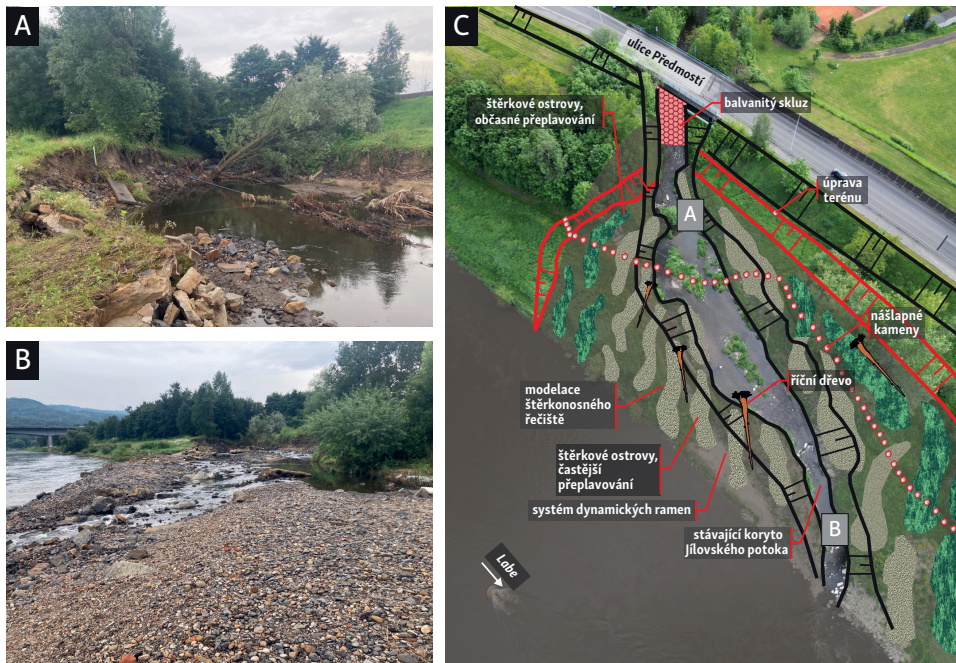
6.3. Morfodynamika korytových náplavů v podmínkách relativně nízké vodnosti

Pro výskyt a udržitelnost náplavů je důležitý rozkolísaný hydrologický režim s pravidelným výskytem průtoků schopných transportovat sedimenty (v našem případě písčité a štěrkové frakce), a tedy tyto náplavy aktivně přetvářet. Výsledky

monitoringu povrchové morfologie i zrnitostního složení povrchu náplavů prokázaly, že v současnosti stále ještě dochází k disturbanci jejich povrchu i během relativně nízkých průtoků nedosahujících úrovně jednoleté vody. Tyto změny však nemají jednoznačný a společný trend. Zajímavým faktem je zjištění, že u dvou náplavů byl evidován tradiční trend zjemňování povrchové vrstvy. Níže po proudu bylo zjištěno naopak hrubnutí povrchové vrstvy. Je zřejmé, že kromě přirozených procesů se patrně setrvačně projevoval vliv prohrábek koryta na náplavu v Hřensku a Dolním Žlebu a kromě režimu účinných průtoků tak důležitou roli sehrávají výrazně lokální podmínky. Z hlediska porovnání a interpretace těchto pozorování v podstatě neexistují studie, které by popisovaly výsledky krátkodobého terénního monitoringu povrchu náplavů ve velkých vodohospodářsky upravených řekách. V širším kontextu náplavů v upravených tocích uvádí Jaballah a kol. (2015) pro alpskou štěrkonosnou řeku různé trendy morfodynamiky náplavů krátce po jejím zkapacitnění v 90. letech 20. století, kdy došlo v napřímeném a zúženém korytě k zformování několika střídavých náplavů a rychlém pokrytí některých z nich vegetací. Šíření vegetace přitom dávají do souvislosti se sníženou frekvencí výskytu vyšších průtoků a také dlouhými periodami charakterizovanými nízkými vodnostmi mj. v důsledku narušení přirozeného hydrologického režimu výše položenou údolní nádrží. V našem případě je pozorováno soustavné snižování jarních nebo brzkých letních měsíčních průtoků v uplynulých dekádách a poslední dekáda vykazuje známky celkových nízkých vodností. To může mít pozitivní vliv na šíření vegetace na náplavech a jejich biogeomorfologické stabilizaci či případnému ukládání jemných plavenin vlivem vegetace jako významného drsnostního prvku (Corenblit a kol. 2015). Ačkoliv v této studii nebyla dynamika vegetace sledována, je scénář zvyšování poměrové plochy náplavů pokrytých vegetací a jejich budoucí stabilizace v případě absence povodňových průtoků pravděpodobný. Pro srovnání, výrazný nárůst ploch vegetace na úkor holých štěrkopísčitých náplavů byl během posledních dvou dekád pozorován na území Česka v upravených i volně meandrujících úsecích Odry, které navíc nebyly přímo ovlivněny pozměněným hydrologickým režimem vzhledem k absenci velkých vodních děl (Holušová a kol. 2023).

6.4. Návrhy možných optimalizačních opatření pro zlepšení hydromorfologického stavu

Jednou z cest, jak hydromorfologický stav zlepšit je koncept revitalizačních opatření (Belletti a kol. 2018, Piégay a kol. 2023). Každý vodní tok vykazuje specifika limitující užití jistých typů revitalizačních opatření. Pro dolní Labe lze limitace území shrnout do těchto bodů: (a) existence regulačních vodohospodářských opatření, (b) opatření daná plány dílčích povodí, (c) záplavová území a technická infrastruktura, (d) limity ochrany přírody a (e) plavební dráha. Na základě



Obr. 9 – Ukázka návrhu revitalizačních opatření v soutokové zóně Jílovského potoka s řekou Labe v Děčíně, návrh využívá podmínky daných povodňovou renaturací upraveného koryta v roce 2022: A – morfologické změny vyvolané akceleraovanou erozí a akumulací na kontaktu s korytem Labe, B – interiér renaturované části koryta, C – návrhová opatření zlepšující hydromorfologický stav.

zjištěných hydromorfologických defektů a změny v hydrodynamice vedly k definování několika vhodných opatření, jejichž cílem je iniciace a zlepšení současného hydromorfologického stavu. Značný potenciál skýtá otevření soutokových zón, kde jsou jako demonstrativní příklad navržena opatření podporující donášku deficitních sedimentů do hlavního koryta a vytvoření cenných stanovišť (obr. 9). Dalším potenciálem je revitalizace příbřežní zóny včetně korytových náplavů s nižší morfodynamikou. Jedním z nástrojů je zvýšení napojení těchto jednotek na hlavní koryto. Jedním z prvků, jež výrazně v morfologii dolního Labe chybí je říční dřevo. Jeho zapojením do koryta lze na základě velkého množství výzkumů podpořit dynamické procesy eroze a akumulace. Zároveň má říční dřevo značné efekty stran skladby a početnosti hydrobiontů. Zvláštní pozornost je v návrzích věnována prostorům intravilánu, kde řeka vykazuje vysoký potenciál z hlediska zvýšení kvality životního prostředí ve městě (Ústí nad Labem, Děčín). Poslední navrženou skupinou opatření je aplikace konceptu řízeného nebo umělého povodňování. Tento přístup je v zahraničí ověřen a aplikován. Právě situace délky trvání období bez povodňové disurbance vede k degradaci cenných stanovišť. Modelovaná

povodňová vlna iniciovaná částečným vyhrazením VD Střekov a současného průtoku Q_{120d} . Tento průtok v podstatě odpovídá průměrnému průtoku. Tento průtok je pro Labe již poměrně častý. Pokud by hydrologická předpověď nebyla příznivá, průtoky by se trvale snižovaly a zároveň by se jednalo již o dlouhé období bez zvýšených průtoků, bylo by výhodné využít ještě tento průtok jako základ ekologického povodňování ve smyslu Robinson, Uehlinger (2003). Nevýhodou je však delší doba plnění nadjezí. V případě, že by byla $\frac{1}{2}$ průtoku využita k plnění, trvalo by přibližně 30 hodin. Při celkovém zhodnocení se tato varianta jeví jako nejlepší. Ekologické povodňování manipulací na VD Střekov lze interpretovat velice jednoduše. Toto managementové opatření je efektivní a je schopno naplnit požadované cíle. Nárůst hladiny v celém řešeném úseku je dostatečný pro zaplavení jak stávajících, tak navrhovaných korytových prvků. Takto vytvořený průtok bude mít ekologický efekt a podpoří tolik chybějící narušování stanovišť korytových náplavů dolního Labu.

Transformovaná říční krajina dolního Labu nese celou řadu zjevných limitací, které neumožňují za daných podmínek provést zásadní opatření, které by vedly k proměně hydrodynamických a fluvialně geomorfologických parametrů. Zvolený soubor navržených revitalizačních opatření umožňuje podpořit vznik a udržitelnost cenných stanovišť, a to prostřednictvím morfodynamického otevření soutokových zón, což nejen že povede k posílení tolik chybějící heterogeneity fluvialních forem, ale přinese i důležitý posílení sedimentární bilance. Posílení konektivity příbřežních jednotek jejich tvarovou modifikací a implementace chybějícího říčního dřeva přinesla u řady podobně intenzivně transformovaných vodních toků výrazné posílení stanovištní i biologické diverzity. Potenciálně nekontroverznější může být vnímán návrh umělého povodňování prostřednictvím tzv. ekologicky významného (účinného) průtoku, který svým magnitudem může pomoci zabezpečit tolik potřebnou a v literatuře dokládanou dynamiku disturbančních procesů (Bayley 1991 nebo Bond a kol. 2014). Jelikož se optimalizační opatření nemohou vyhnout v rámci fluvialního kontinua úsekům, která procházejí urbanizovanými územími Ústí nad Labem a Děčína, je jedním z nástrojů posílení vazby mezi rozvojem města a říční krajinou, potažmo říční krajinou jako životního prostoru obyvatel výše zmíněných měst. Proto byl podobně jako u jiných projektů v zahraničí zvolen výběr vhodných modifikací těchto úseků, jež by využili řeku jako zásadní rozvojový prvek kvalitního urbánního prostoru (Francis a kol. 2008).

7. Závěr

Dolní Labe na území Česka představuje velký vodní tok, avšak s výrazně antropogenně ovlivněnou hydrologií, morfodynamikou a variabilitou korytových úseků. Studie přináší soubor výstupů dílčích analýz, které reflektují dlouhodobé

dopady vodohospodářské a dopravní infrastruktury na morfológickou kvalitu řeky. Zároveň jsou zjištěná data využita v aplikačním potenciálu, který se snaží navrhnout vhodnou sadu revitalizačních opatření ke zlepšení hydromorfologického stavu největší řeky v Česku. Je zřejmé, že v podmínkách probíhající klimatické změny představuje hydromorfologický stav podstatnou proměnu prostředí, která svými projevy v krajině může přispět k adaptaci říční krajiny a posilování environmentální kvality a udržitelnosti.

Literatura

- BANNAN, M., ADAMS, C. E., PIRIE, D. (2008): Hydrocarbon emissions from boat engines: Evidence of recreational boating impact on Loch Lomond. *Scottish Geographical Journal*, 116, 3, 245–256. <https://doi.org/10.1080/00369220018737097>
- BAYLEY P. B. (1991): The flood pulse advantage and the restoration of river–floodplain systems. *Regulated Rivers*, 6, 75–86. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450060203>
- BEJČEK, V., VOLFOVÁ, E. (2019): Bahnité náplavy v ČR a na Labi. *Ochrana přírody*, 2, 24–27.
- BELLETTI, B., NARDI, L., RINALDI, M., POPPE, M., BRABEC, K., BUSSETTINI, M., COMITI, F., GIELCZEWSKI, M., GOLFIERI, B., HELLSTEN, S. KAIL, J., MARCHESE, E., MARCINKOWSKI, P., OKRUSZKO, T., PAILLEX, A., SCHIRMER, M., STELMASZCZYK, M., SURIAN N. (2018): Assessing Restoration Effects on River Hydromorphology Using the Process-based Morphological Quality Index in Eight European River Reaches. *Environmental Management*, 61, 69–84. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0961-x>
- BLÄSING, M., SHAO, Y., LEHNDORFF, E. (2015): Fuel regulation in inland navigation: Reduced soil black carbon deposition in river valleys in Germany. *Atmospheric Environment*, 120, 376–384. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.004>
- BOND, N., COSTELLOE, J., KING, A., WARFE, D., REICH, P., BALCOMBE, S. (2014): Ecological risks and opportunities from engineered artificial flooding as a means of achieving environmental flow objectives. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12, 386–394. <https://doi.org/10.1890/130259>
- BRUNAR, I. (2019): Mýtus plavebního stupně Děčín. *Ochrana přírody*, 2, 52–56.
- CORENBLIT, D., BAAS, A., BALKE, T., BOUMA, T., FROMARD, F., GARÓFANO-GÓMEZ, V., GONZÁLEZ, E., GURNELL, A. M., HORTOBÁGYI, B., JULIEN, F., KIM, D., LAMBS, L., STALLINS, J. A., STEIGER, J., TABACCHI, E., WALCKER, R. (2015): Engineer pioneer plants respond to and affect geomorphic constraints similarly along water–terrestrial interfaces world-wide. *Global Ecology and Biogeography*, 24, 1363–1376. <https://doi.org/10.1111/geb.12373>
- COX, J. R., HUISMANS, Y., KNAAKE, S. M., LEUVEN, J. R. F. W., VELLINGA, N. E., VAN DER VEGT, M., HOITINK, A. J. F., KLEINHANS, M. G. (2021): Anthropogenic effects on the contemporary sediment budget of the lower Rhine–Meuse Delta channel network. *Earth's Future*, 9, e2020EF001869. <https://doi.org/10.1029/2020EF001869>
- COX, J. R., LEUVEN, J. R. F. W., PIERIK, H. J., VAN EGMOND, M., KLEINHANS, M. G. (2022): Sediment deficit and morphological change of the Rhine–Meuse river mouth attributed to multi-millennial anthropogenic impacts. *Continental Shelf Research*, 244, 104766. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104766>

- DARVINI, G., MEMMOLA, F. (2020): Assessment of the impact of climate variability and human activities on the runoff in five catchments of the Adriatic Coast of south-central Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100712. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100712>
- DÍAZ-REDONDO, M., EGGER, G., MARCHAMALO, M., DAMM, C., DE OLIVEIRA, R. P., SCHMITT, L. (2018): Targeting lateral connectivity and morphodynamics in a large river-flood-plain system: The upper Rhine River. *River Research and Application*, 34, 734–744. <https://doi.org/10.1002/rra.3287>
- DURÓ, G., CROSATO, A., KLEINHANS, M. G., ROELVINK, D., UIJTTEWAAL, W. S. J. (2020): Bank erosion processes in regulated rivers. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, e2019JF005441. <https://doi.org/10.1029/2019JF005441>
- ERSKINE, W. D. (1992): Channel response to large-scale river training works: hunter river, Australia. *Regulated Rivers: Research and Management*, 7, 261–278. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450070305>
- FOŠUMPAUR, P., HORSKÝ, M., KAŠPAR, T., ZAJÍCOVÁ, P. (2020): Evidence regulačních úprav dolního Labe od VD Střekov po státní hranici (Nmap – Specializovaná mapa s odborným obsahem, průvodní zpráva). *Fakulta stavební ČVÚT, Praha*.
- FOŠUMPAUR, P., KAŠPAR, T., ZUKAL, M. (2019): Technical Cultural Heritage on the Elbe-Vltava Waterway. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 290, 012152. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012152>
- FRANCIS, R. A., HOGGART, S. P. G., GURNELL, A. M., COODE, C. (2008): Meeting the challenges of urban river habitat restoration: developing a methodology for the River Thames through central London. *Area*, 40, 435–445. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2008.00826.x>
- FRINGS, R. M., HILLEBRAND, G., GEHRES, N., BANHOLD, K., SCHRIEVER, S., HOFFMANN, T. (2019): From source to mouth: Basin-scale morphodynamics of the Rhine River. *Earth-Science Reviews*, 196, 102830. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.002>
- FRYIRS, K. A., BRIERLEY, G. J., PRESTON, N. J., KASAI, M. (2007): Buffers, and blankets: The (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena*, 53, 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.07.007>
- GRDC (2023): The Global Runoff Data Centre, 56068 Koblenz, Germany.
- HABERSACK, H., HEIN, T., STANICA, A., LISKA, I., MAIR, R., JÄGER, E., HAUER, C., BRADLEY, C. (2016): Challenges of river basin management: Current status of, and prospects for, the River Danube from a river engineering perspective. *Science of the Total Environment*, 543, 828–845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.123>
- HABERSACK, H., JÄGER, E., HAUER, C. (2013): The status of the Danube River sediment regime and morphology as a basis for future basin management. *International Journal of River Basin Management*, 11, 2, 153–166. <https://doi.org/10.1080/15715124.2013.815191>
- HAVLÍČEK, V., HEŘMANOVSKÝ, M., BUREŠ, L., MARTÍNKOVÁ, M., ČUDA, J., HANEL, M. (2023): The site dynamics of *Corrigiola litoralis* (Strapwort) on the Elbe River in Czechia: A combined hydrological and hydrodynamic approach. *Ecohydrology*, e2586. <https://doi.org/10.1002/eco.2586>
- HEIN, T., FUNK, A., PLETTERBAUER, F., GRAF, W., ZSUFFA, I., HAIDVOGL, G., SCHINEGGER, R., WEIGELHOFER, G. (2019): Management challenges related to long-term ecological impacts, complex stressor interactions, and different assessment approaches in the Danube River Basin. *River Research and Application*, 35, 500–509. <https://doi.org/10.1002/rra.3243>
- HELAL, E., ELSERSAWY, H., HAMED, E., ABDELHALEEM, F. S. (2020): Sustainability of a navigation channel in the Nile River: A case study in Egypt. *River Research and Application*, 36, 1817–1827. <https://doi.org/10.1002/rra.3717>

- HENNING, M., HENTSCHEL, B. (2013): Sedimentation and flow patterns induced by regular and modified groynes on the River Elbe, Germany. *Ecohydrology*, 6, 598–610. <https://doi.org/10.1002/eco.1398>
- HOLUŠOVÁ, A., POLEDNIKOVÁ, Z., VAVERKA, L., GALIA, T. (2023): Spatiotemporal dynamics and present perception of gravel bars in natural and regulated environments. *Science of The Total Environment*, 892, 164711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164711>
- HOUSER, C., SMITH, A., LILLY, J. (2021): Relative importance of recreational boat wakes on an inland lake. *Lake and Reservoir Management*, 37, 227–234. <https://doi.org/10.1080/10402381.2021.1879325>
- HRADECKÝ, J., ČUDA, J., FROUZ, J., HANEL, M., GALIA, T., ŠKARPICH, V., RUMAN, S., VAVERKA, L., WILD, J., HADINCOVÁ, V., PETŘÍK, P., BUREŠ, L., HEŘMINOVSKÝ, M., HUMMEL, J., PROŠEK, J., BOROVEC, J., BRETON, F., GONCHAROV, O., KOTILOVÁ, P., TOMKOVÁ, I., OSAFO, N. (2024): Optimalizace managementu dolního úseku Labe s ohledem na přítomnost biotopu 3270 a zlepšení hydromorfologického stavu na základě mezioborové studie 2021–2023 (výzkumná zpráva). Ostravská univerzita, Ostrava.
- CHLUPÁČ, I., BRZOBHATÝ, R., KOVANDA, J., STRÁNÍK, Z. (2002): Geologická minulost České republiky. Academia, Praha.
- JABALLAH, M., CAMENEN, B., PÉNARD, L., PAQUIER, A. (2015): Alternate bar development in an alpine river following engineering works. *Advances in Water Resources*, 81, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.03.003>
- JÄGERBRAND, A. K., BRUTEMARK, A., SVEDÉN, J. B., GREN, I.-M. (2019): A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems. *Science of the Total Environment*, 695, 133637. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133637>
- KLASZ, G., RECKENDORFER, W., GABRIEL, H., BAUMGARTNER, CH., SCHMALFUSS, R., GUTKNECHT D. (2014): Natural levee formation along a large and regulated river: The Danube in the National Park Donau-Auen, Austria. *Geomorphology*, 215, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.12.023>
- KONDOLF, G. M. (1997): Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, 21, 533–551. <https://doi.org/10.1007/s002679900048>
- LAUB, B. G., BAKER, D. W., BLEDSOE, B. P., PALMER, M. A. (2012): Range of variability of channel complexity in urban, restored and forested reference streams: Channel complexity and stream restoration. *Freshwater Biology*, 57, 1076–1095. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02763.x>
- LE, T. B., CROSATO, A., ARBOLEDA, A. M. (2020): Revisiting Waal River Training by Historical Reconstruction. *Journal of Hydraulic Engineering* 146, 5, 05020002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001688](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001688)
- LEE, A., AUBENEAU, A. F., CARDENAS, M. B., LIU, X. (2022): Hyporheic exchange due to cobbles on sandy beds. *Water Resources Research*, 58, e2021WR030164. <https://doi.org/10.1029/2021WR030164>
- LEMAY, J., BIRON, P.M, BOIVIN, M., STÄMPFLI, N., FOOTE, K. (2021): Can the Morphological Quality Index (MQI) be used to determine the ecological status of lowland rivers? *Geomorphology*, 395, 108002. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108002>
- LIÉBAULT, F., PIÉGAY, H. (2002): Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425–444. <https://doi.org/10.1002/esp.328>
- LIEDERMANN, M., TRITTHART, M., GMEINER, P., HINTERLEITNER, M., SCHLUDERMANN, E., KECKEIS, H., HABERSACK, H. (2014): Typification of vessel-induced waves and their

- interaction with different bank types, including management implications for river restoration projects. *Hydrobiologia*, 729, 17–31. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1829-1>
- LIEDERMANN, M., GMEINER, P., KREISLER, A., TRITTHART, M., HABERSACK, H. (2018): Insights into bedload transport processes of a largeregulated gravel-bed river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, 514–523. <https://doi.org/10.1002/esp.4253>
- LORENZ, S., GABEL, F., DOBRA, N., PUSCH, M.T. (2013): Modelling the effects of recreational boating on self-purification activity provided by bivalve mollusks in a lowland river. *Freshwater Science*, 32, 1, 82–93. <https://doi.org/10.1899/12-054.1>
- MAECK, A., LORKE, A. (2014): Ship-lock-induced surges in an impounded river and their impact on subdaily flow velocity variation. *River Research and Application*, 30, 494–507. <https://doi.org/10.1002/rra.2648>
- MAXWELL, R. J., ZOLDERDO, A. J., DE BRUIJN, R., BROWNSCOMBE, J. W., STAATERMAN, E., GALLAGHER, A. J., COOKE, S. J. (2018): Does motor noise from recreational boats alter parental care behaviour of a nesting freshwater fish? *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 28, 4, 969–978. <https://doi.org/10.1002/aqc.2915>
- MOOG, O., STUBAUER, I., HAIMANN, M., HABERSACK, H., LEITNER, P. (2018): Effects of harbour excavating and dredged sediment disposal on the benthic invertebrate fauna of River Danube (Austria). *Hydrobiologia*, 814, 109–120. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2476-x>
- PIÉGAY, H., ARNAUD, F., BELLETTI, B., CASSEL, M., MARTEAU, B., RIQUIER, J., ROUSSON, C., VAZQUEZ-TARRIO, D. (2023): Why Consider Geomorphology in River Rehabilitation? *Land*, 12, 1491. <https://doi.org/10.3390/land12081491>
- PURINTON, B., BOOKHAGEN, B. (2019): Introducing PebbleCounts: a grain-sizing tool for photo surveys of dynamic gravel-bed rivers. *Earth Surface Dynamics*, 3, 7, 859–877. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-859-2019>
- RAŠKA, P., DOLEJŠ, M., HOFMANOVÁ, M. (2017): Effects of Damming on Long-Term Development of Fluvial Islands, Elbe River (N Czechia). *River Research and Applications*, 334, 471–482. <https://doi.org/10.1002/rra.3104>
- RINALDI, M., SURIAN, N., COMITI, F., BUSSETTINI, M. (2013): A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology*, 180–181, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.09.009>
- RINALDI, M., BUSSETTINI, M., SURIAN, N., COMITI, F., GURNELL, A. M. (2016): Guidebook for the evaluation of stream morphological conditions by the Morphological Quality Index (MQI), https://reformrivers.eu/system/files/Rinaldi%20et%20al%202016%20MQI_final_Aug16.pdf.
- ROBINSON, C. T., UEHLINGER, U. (2003): Using artificial floods for restoring river integrity. *Aquatic Sciences*, 65, 3, 181–182. <https://doi.org/10.1007/s00027-003-0002-0>
- ROTTLER, E., BRONSTERT, A., BÜRGER, G., RAKOVEC, O. (2021): Projected changes in Rhine River flood seasonality under global warming. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25, 5, 2353–2371. <https://doi.org/10.5194/hess-25-2353-2021>
- RUSNÁK, M., LEHOTSKÝ, M., KIDOVÁ, A. (2016): Channel migration inferred from aerial photographs, its timing and environmental consequences as responses to floods: a case study of the meandering Topľa River, Slovak Carpathians. *Moravian Geographical Reports*, 24, 3, 32–43. <https://doi.org/10.1515/mgr-2016-0015>
- SCHARF, B., BRUNKE, M. (2013): The recolonization of the river Elbe with benthic and hyporheic Ostracoda (Crustacea) after the reunion of Germany in 1989. *International Review of Hydrobiology*, 98, 305–312. <https://doi.org/10.1002/iroh.201201617>

- SCHINEGGER, R., PALT, M., SEGURADO, P., SCHMUTZ, S. (2016): Untangling the effects of multiple human stressors and their impacts on fish assemblages in European running waters. *Science of the Total Environment*, 573, 1079–1088. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.143>
- SCHINEGGER, R., TRAUTWEIN, C., MELCHER, A., SCHMUTZ, S. (2012): Multiple, human pressure and their spational patterns in European running waters. *Water and Environmental Journal*, 26, 261–273. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00285.x>
- SCHINEGGER, R., TRAUTWEIN, C., SCHMUTZ, S. (2013): Pressure-specific and multiple pressure response of fish assemblages in European running waters. *Limnologia*, 43, 348–361. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2013.05.008>
- SCHLUDERMANN, E., LIEDERMANN, M., HOYER, H., TRITTHART, M., HABERSACK, H., KECKEIS, H. (2014): Effects of vessel-induced waves on the YOY-fish assemblage at two different habitat types in the main stem of a large river (Danube, Austria). *Hydrobiologia*, 729, 3–15. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1680-9>
- SHUSTER, R., SHERMAN, D. J., LORANG, M. S., ELLIS, J. T., HOPF, F. (2020): Erosive potential of recreational boat wakes. *Journal of Coastal Research*, 95, 1279–1283. <https://doi.org/10.2112/SI95-247.1>
- SIMON, M., BEKELE, V., KULASOVÁ, B., MAUL, C., OPPERMANN, R., ŘEHÁK, P. (2005): Labe a jeho povodí: Geografický, hydrologický a vodohospodářský přehled. Mezinárodní komise pro ochranu Labe, Magdeburg.
- SIWEK, J., MOSTOWIK, K., LIOVA, S., RZONCA, B., WACŁAWCZYK, P. (2022): Baseflow trends for midsize Carpathian catchments in Poland and Slovakia in 1970–2019. *Water*, 15, 1, 109. <https://doi.org/10.3390/w15010109>
- SMITH, L. M., WINKLEY, B. R. (1996): The response of the Lower Mississippi River to river engineering. *Engineering Geology*, 45, 433–455. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00025-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00025-7)
- STONEVIČIUS, E., VALIUŠKEVIČIUS, G., RIMKUS, E., KAŽYS, J. (2014): Climate induced changes of Lithuanian rivers runoff in 1960–2009. *Water Resources*, 41, 592–603. <https://doi.org/10.1134/S0097807814050133>
- ŠÁMALOVÁ, Z. (2009): Historie vodní cesty na dolním Labi (výstavba zdymadla Střekov). Povodí Labe, s. p., Hradec Králové.
- ŠKARPICH, V. HRADECKÝ, J., DUŠEK, R. (2013): Complex transformation of the geomorphic regime of channels in the forefield of the Moravskoslezské Beskydy Mts.: Case study of the Morávka River (Czech Republic). *Catena* 111, 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.028>
- ŠKARPICH, V., HRADECKÝ, J., GALIA, T., VAVERKA L., GURKOVSKÝ, V. (2018): Fluvialně-geomorfologická studie vývoje korytových náplavů řeky Labe v úseku Střekov – státní hranice: pro účely dokumentace přírodního prostředí řeky Labe v Chráněné krajinné oblasti Labské pískovce (a přilehlých úsecích toku) a pro účely získání podkladů pro péči a ochranu stanovišť vázaných na řeku Labe, a to zejména ve světle probíhající klimatické změny (závěrečná zpráva). Ostravská univerzita, Ostrava.
- TOLASZ, R., MÍKOVÁ, T., VALERIÁNOVÁ, A., VOŽENÍLEK, V. (2007): Climate Atlas of Czechia. Český hydrometeorologický ústav, Palackého univerzita, Praha, Olomouc.
- VANNOTE, R. L., MINSHALL, G. W., CUMMINS, K. W., SEDELL, J. R., CUSHING, C. E. (1980): The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 130–137. <https://doi.org/10.1139/f80-017>
- VAUCLIN, S., MOURIER, B., TENA, A., PIÉGAY, H., WINIARSKI, T. (2020): Effects of river infrastructures on the floodplain sedimentary environment in the Rhône River. *Journal of Soils and Sediments*, 20, 2697–2708. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02449-6>

- VINKE, F., TURPIJN, B., VAN GELDER, P., VAN KONINGSVELD, M. (2024): Inland shipping response to discharge extremes – A 10 years case study of the Rhine. *Climate Risk Management*, 43, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2023.100578>
- XIONG, D., WILLIAMS, I. D., HUDSON, M. D., OSBORNE, P. E., ZAPATA-RESTREPO, L. M. (2023): The impact of an annual major recreational boating event on water quality in the Solent Strait. *Marine Pollution Bulletin*, 186, 114450. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114450>
- XU, M., CHEN, L., WU, Q., LI, D. (2016): Morph- and hydro-dynamic effects toward flood conveyance and navigation of diversion channel. *International Journal of Sediment Research*, 31, 264–270. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.09.001>
- ZAJICEK, P., RADINGER, J., WOLTER, C. (2018): Disentangling multiple pressure on fish assemblages in large rivers. *Science of the Total Environment*, 627, 1093–1105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.307>
- ZAJICEK, P., WOLTER, C. (2019): The effects of recreational and commercial navigation on fish assemblages in large rivers. *Science of the Total Environment*, 646, 1304–1314. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.403>
- ZAWIEJSKA, J., WYŻGA, B. (2010): Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: patterns, causes and controls. *Geomorphology*, 117, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.01.014>

SUMMARY

Manifestations of the long-term transformation of the lower Elbe channel in Czechia and opportunities for its restoration

The paper explores the impacts of human activities, specifically navigation, on the morphology of the lower Elbe River in Czechia (767.5–726.5 river km), utilizing a robust methodological framework. It integrates historical analysis, hydromorphological assessment, and geomorphological monitoring to quantify the transformations within the riverine landscape. The study underscores the detrimental effects of navigational infrastructure on natural river dynamics, which include the alteration of sediment transport processes and the degradation of aquatic habitats. These changes are attributed to extensive river engineering and management practices aimed at improving navigation but at the cost of ecological integrity.

The findings underscore the significant impact human interventions have had on the Elbe River's hydromorphology, highlighting the substantial decline in morphodynamic diversity. This includes the narrowing of active channels, with reductions in channel width by dozens of metres since the 19th century, alongside a notable decrease in maximum daily discharges over the past 136 years. Moreover, the last decade was identified as an extraordinarily dry period within the context of the past seven decades. The study employs the REFORM hydromorphological assessment protocol to quantify the deterioration of habitat quality for aquatic and riparian species. These changes have compromised the ecological resilience of the river and its capacity to sustain a diverse biological community. Additionally, the research identified channel bars consisting of gravel- and sand-grain-size fractions as critical biotopes within the riverine landscape that have been adversely affected by anthropogenic activities, underscoring the urgency of targeted restoration efforts aimed at ecological rehabilitation and the restoration of river continuity.

Morphological changes in the surfaces of bars, along with variations in surface grain sizes, were observed during the 2021–2023 monitoring period for four channel bars. However, the pattern of these changes varied significantly among the channel bars evaluated. Two of the bars exhibited downstream fining, a pattern typically observed in conditions unaffected by human activities, while the other two displayed downstream coarsening of surface sediments when comparing individual sampled positions (frontal, central, and distal parts). These alterations are likely attributable to the influence of human activities on the channel, such as gravel extraction from the channel bed to improve ship navigation.

The article advocates for a paradigm shift in river management, emphasizing the integration of geomorphological insights and ecosystem-based approaches in planning and decision-making processes. By applying the findings from hydromorphological assessments and geomorphological monitoring, the study proposes strategies for the restoration of natural river dynamics and the enhancement of habitat complexity. It calls for a balanced approach that reconciles navigational needs with ecological sustainability, suggesting that informed, science-based river management can mitigate negative impacts and promote the recovery of degraded riverine ecosystems. The research contributes valuable knowledge to the development of sustainable management practices that can ensure the long-term health and functionality of riverine landscapes.

- Fig. 1 Geographical location of the studied reach of the Elbe River and monitored channel bars. Background data source: T.G. Masaryk Water Research Institute, ESRI - World Hillshade WGS84, ARCDATA PRAHA - ArcCR®.
- Fig. 2 Mean annual discharges (blue bars), maximum (red bars) and minimum (black bars) mean daily discharges for individual years in the 1952–2022 period. Data source: GRDC 2023.
- Fig. 3 Multitemporal analysis of discharges for individual years in the 1952–2022 period: (a) mean annual discharges, (b) maximum and (c) minimum mean daily discharges for individual years in the 1952–2022 period. Data source for analysis: GRDC 2023.
- Fig. 4 Changes in channel width in the 767.0–727.0 r. km reach of the Elbe River between the periods 1836–1852, 1952–1954, and 2021; number of measured transects in the studied reach, $n = 81$; p - value of the non-parametric statistical Mann-Whitney test between individual channel widths of given periods; the box plot shows the span of measured widths between the lower and upper quartiles of given periods.
- Fig. 5 Percentage distribution of channel width changes between the 1836–1852 period and 2021 in the studied Elbe River reach.
- Fig. 6 Morphological quality indices of individual river reaches in the lower Elbe River. Data source: Hradecký et al. 2024, based on Rinaldi et al. 2016. Background data source: T. G. Masaryk Water Research Institute, ESRI - World Hillshade WGS84, ARCDATA PRAHA - ArcCR®.
- Fig. 7 Changes in (a) the mean concavity and (b) the standard deviation of the concavity of the monitored channel bars; p values correspond to the Mann-Whitney test; statistically significant values are in bold.
- Fig. 8 Grain size distribution of bed sediments of the bars (a) Valtířov and Těchlovice, and (b) Dolní Žleb and Hřensko between 2021 and 2023 in individual positions (blue: frontal, yellow: central, orange: distal part). The significance of the differences between individual tested years are marked by an asterisk; the whiskers of the boxplot represent the 10th and 90th percentiles of grain size.

Fig. 9 Example of the proposed restoration measures in the confluence zone of Jílovský Stream and the Elbe River in Děčín. The proposal uses the conditions given by the flood renaturation processes of the original artificially modified stream channel in 2022: A - morphological changes caused by accelerated erosion and accumulation in the confluence with the Elbe River channel, B - interior of the renaturated part of the stream channel, C - design of measures improving hydromorphological conditions.

PODĚKOVÁNÍ / ACKNOWLEDGEMENT

Příspěvek vznikl za podpory projektu Technologické agentury ČR č. SS03010279 „Optimalizace managementu dolního úseku Labe s ohledem na přítomnost biotopu 3270 a zlepšení hydromorfologického stavu na základě mezioborové studie“. Autoři děkují Adrianě Holušové a Stanislavu Rumanovi za výpomoc v terénu.

This work was supported by Technology Agency of the Czech Republic, project No. SS03010279 “Management optimisation of the Elbe lower reach with respect to the presence of 3270 biotope and improvement of the hydromorphological state as based on an interdisciplinary study”. Authors thank to Adriana Holušová and Stanislav Ruman for their help during field works.

ORCID

JAN HRADECKÝ

<https://orcid.org/0000-0003-3228-0492>

TOMÁŠ GALIA

<https://orcid.org/0000-0002-0438-2048>

LUKÁŠ KREJČÍ

<https://orcid.org/0000-0002-1733-5654>

VÁCLAV ŠKARPICH

<https://orcid.org/0000-0003-4239-8531>

LUKÁŠ VAVERKA

<https://orcid.org/0000-0002-9512-6583>