

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Fyzická geografie a geokologie



**Mgr. Kateřina Kujanová**

Hydromorfologie jako nedílná složka ekologického stavu vodních toků  
Hydromorphology as a component part of ecological condition of water bodies

Disertační práce

Vedoucí práce/Školitel: RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.

Praha, 2018



Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 21. 9. 2018

.....

#### Poděkování:

Na tomto místě bych chtěla poděkovat mé školitelce RNDr. Miladě Matouškové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a podněty při zpracování mé disertační práce. Dále bych chtěla poděkovat AOPK ČR za poskytnutá data Konsolidované vrstvy ekosystémů vytvořené Agenturou ochrany přírody a krajiny ČR a CzechGlobe díky grantovému projektu TD010066 „Integrované hodnocení ekosystémových služeb v České republice“ poskytnutému Technologickou Agenturou ČR. V neposlední řadě patří moje poděkování Mgr. Zdeňku Hoškovi za pomoc při terénních pracích, inspiraci, podporu a trpělivost.

## Abstrakt

Pozornost studia fluviálně-morfologických procesů je v současnosti spojena s hodnocením hydromorfologického stavu vodních toků a návrhy revitalizačních opatření. Nezbytným předpokladem hodnocení aktuálního hydromorfologického stavu vodních toků je stanovit pro jednotlivé typy vodních toků referenční podmínky, které slouží jako srovnávací prvek a představují cílový stav revitalizačních opatření. Cílem předkládané práce je pomocí stanovení typů vodních toků a vývoje metodického přístupu REFCON pro stanovení referenčních lokalit a záznam charakteristik referenčního stavu popsat typově specifické hydromorfologické referenční podmínky vodních toků na území ČR. Přístup pro stanovení referenčních lokalit je založen na splnění kritérií minimálního antropogenního vlivu, která jsou posuzována na základě distančních dat a následně ověřena terénním průzkumem. Parametry nadmořská výška, sinuosit a sklon údolí pro rozřazení úseků vodních toků do typů byly vybrány na základě výsledků statistických metod aplikovaných na 3197 úseků vodních toků na území ČR. Rozřazení úseků vodních toků do 9 typů bylo validováno terénním průzkumem ve 44 lokalitách. V 16 referenčních lokalitách byl proveden detailní záznam a zaměření charakteristik přirozeného chování vodních toků, které sloužily jako podklad pro vytvoření popisu typově specifických referenčních podmínek. Rozřazení vodních toků ČR do typů prokázalo významnou odlišnost chování vodních toků v podmínkách České vysočiny a flyšového pásma Západních Karpat. Výsledky terénních průzkumů a měření v referenčních lokalitách potvrzují, že hranice prahových hodnot posuzovaných charakteristik typů vodních toků není vždy ostrá. Referenční podmínky je proto třeba stanovovat jako sadu charakteristik nebo podmínek daného typu. Variabilita charakteristik a tedy vnitřní variabilita typu vodního toku je do značné míry ovlivněna velikostí (řádem) vodního toku i litologií. Oddělené posuzování charakteristik nebo jejich prahových hodnot může zkreslit celkovou interpretaci referenčních podmínek. Předkládané typově specifické referenční podmínky byly stanoveny pro fyzicko-geografické podmínky vodních toků v ČR a lze je použít k hodnocení hydromorfologického stavu vodních toků i jako cílový stav revitalizačních opatření. Vytvořený metodický přístup umožňuje uživateli provést individuální stanovení lokálních/regionálních referenčních podmínek pro daný vodní tok na základě reálných dat získaných terénním průzkumem.

**Klíčová slova:** hydromorfologie, referenční podmínky, typ vodního toku, referenční lokalita

## Abstract

Today, the study of fluvial-morphological processes is focused on evaluating hydromorphological status of streams and on proposing restoration measures. A fundamental prerequisite for assessing the current hydromorphological status of streams is establishing reference conditions for each stream type that serve as a benchmark and represent the target status after restoration. The aim of this thesis is to describe type-specific hydromorphological reference conditions for rivers on the territory of the Czech Republic with the help of determining river types, developing the REFCON method for establishing reference sites and recording characteristics of reference status. The approach to establishing reference sites is based on meeting the criteria of having minimal anthropogenic impact that are first assessed using cartographic data and subsequently verified through field survey. Parameters – altitude, sinuosity, and valley floor slope – for classifying river reaches into types were determined on the basis of the results of statistical methods applied on 3197 river reaches covering the whole territory of the Czech Republic. The classification of river reaches into 9 river types was verified through field survey at 44 sites. Detailed field survey and measurements of characteristics of natural channel behavior were conducted at sixteen reference sites that serve as the basis of the describing of the type-specific reference conditions. Classifying river reaches into types confirmed a significant difference between channel behavior in the Bohemian Massif and on the flysch belt of the Western Carpathians. The results of the field surveys and measurements at reference sites confirmed that threshold values of river type characteristics are not always clear. Therefore, the reference conditions are necessary to describe as a set of characteristics or conditions of the type. A variability of characteristics within a river type is influenced by stream order and lithology. Therefore, assessing the characteristics or their threshold values separately may skew the overall interpretation of reference conditions. Presented type-specific reference conditions have been determined for physiographic conditions of rivers on the territory of the Czech Republic and can be used for the assessment of hydromorphological status of streams and also as restoration target conditions. Developed REFCON method enables user to individually establish local or regional reference conditions for each stream when required on the basis of conducted field survey.

**Key words:** hydromorphology, reference conditions, river type, reference site

# OBSAH

<b>1 Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Cíle a struktura práce</b> .....	<b>2</b>
<b>3 Teoretické základy</b> .....	<b>4</b>
3.1 Fluviálně-morfologické procesy a nástroje k jejich porozumění a predikci .....	4
3.1.1 Definování referenčních podmínek v kulturní krajině .....	4
3.1.2 Přirozeného chování říčního systému a změny spojené s činností člověka .....	4
3.1.3 Klasifikace jako nástroj pro pochopení a predikci chování říčního systému.....	7
3.2 Hodnocení hydromorfologické kvality vodních toků a stanovení typově specifických referenčních podmínek .....	9
3.2.1 Vývoj přístupů k hodnocení hydromorfologické kvality vodních toků .....	9
3.2.2 Požadavky a přístupy ke stanovení typů, referenčních podmínek a hodnocení stavu hydromorfologických složek v kontextu Rámcové směrnice o vodách .....	11
3.2.3 Stanovení typů vodních toků podle RSV a referenčních podmínek v ČR a dalších státech EU .....	16
<b>4 Metodický postup, zdrojová data a lokality pro vývoj a ověření postupu</b> .....	<b>22</b>
4.1 Význam stanovení referenčních podmínek.....	22
4.2 Metoda stanovení referenčních lokalit a záznamu charakteristik .....	23
4.3 Rozřazení vodních toků do skupin na základě distančních dat .....	24
4.4 Výběr lokalit a jejich význam v postupu práce .....	26
4.5 Ověření a zpřesnění typů vodních toků terénním průzkumem .....	27
4.6 Význam krajinného pokryvu příbřežní zóny .....	27
4.7 Stanovení referenčních podmínek .....	28
<b>5 Shrnutí a diskuze výsledků</b> .....	<b>29</b>
5.1 Metoda REFCON.....	29
5.2 Typy vodních toků z pohledu hydromorfologie .....	31
5.3 Využití dat krajinného pokryvu příbřežní zóny pro zpřesnění popisu typů vodních toků a referenčních podmínek .....	36
5.4 Referenční podmínky pro 9 typů neovlivněných vodních toků na území ČR.....	38
5.5 Hodnocení hydromorfologického stavu.....	43
<b>6 Závěry</b> .....	<b>45</b>
<b>Odkazovaná literatura</b> .....	<b>46</b>
<b>7 Publikované odborné články</b> .....	<b>52</b>
7.1 Improvement in physical river habitat quality in response to river restoration measures .....	53
7.2 Identification of hydromorphological reference sites using the new REFCON method, with an application to rivers in the Czech Republic .....	79
7.3 Hydromorphological parameters of natural channel behavior in conditions of the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic ...	91
7.4 Typy vodních toků na území České republiky z pohledu hydromorfologie .....	105
7.5 The relationship between river types and land cover in riparian zones.....	111
<b>Přílohy</b> .....	<b>127</b>

# 1 ÚVOD

Vodní toky jsou ovlivňovány krajinou, kterou protékají (Vannote et al., 1980). Většina říčních systémů Evropy i dalších kontinentů je již po staletí výrazně ovlivňována činností člověka. Změna přístupu k managementu vodních toků od technických opatření směrem k přírodě bližším se v západní Evropě začala projevovat již v posledních desetiletích minulého století. Povodňové události v posledních 20 letech a zavedení Rámcové směrnice o vodách (European Commission, 2000, dále RSV) vedly k zintenzivnění snahy evropských států k obnovám přírodě blízkých říčních systémů. Vzhledem k rozsahu modifikace říční sítě, stávajícím územním omezením kulturní krajiny Evropy a finanční náročnosti není možné revitalizací „napravit“ zásadní část říční sítě. RSV si však klade za cíl zabránit dalšímu zhoršování, ochránit a prostřednictvím opatření zlepšit stav vodních ekosystémů. Od zavedení RSV dochází postupně v evropských státech k hodnocení stavu vodních útvarů, navrhování nápravných opatření pro dosažení dobrého stavu vod a stanovování cílového stavu revitalizačních opatření. Osvěta je v ochraně životního prostředí poměrně (časově) náročná, zejména pokud se jedná o hydromorfologické složky, které mají v porovnání s biologickými a fyzikálně-chemickými historicky v Evropě dlouhodobě nevýznamnou pozici. Zlepšení hydromorfologického stavu vodních toků má kromě pozitivního dopadu na biologické složky a „estetické“ hledisko také nezpochybnitelný význam z hlediska retence vody v krajině, protipovodňové ochrany a řešení problémů sucha. Jedná se tedy o téma (společensky) aktuální.

## 2 CÍLE A STRUKTURA PRÁCE

Cílem předkládané práce je vytvoření jednotného přístupu pro stanovení typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek aplikovatelného pro vodní toky na území celé České republiky (ČR) v souladu s požadavky RSV a jeho aplikace. Stanovení hydromorfologických referenčních podmínek je nezbytným nástrojem pro udržitelný management vodních toků. Hydromorfologické referenční podmínky slouží jako srovnávací prvek pro hodnocení hydromorfologického stavu vodních toků, umožňují klasifikaci dalších úrovní stavu a představují cílový stav revitalizačních opatření.

Motivací pro výběr tématu a dosažení vytyčeného cíle bylo plnění požadavků RSV, ke kterému se ČR vstupem do Evropské unie zavázala, a v neposlední řadě osvěta významu hydromorfologie, ochrany přírodě blízkých vodních toků a realizace revitalizací a podpory renaturací vodních toků na území ČR.

K naplnění stanoveného cíle vedlo několik dílčích cílů, které jsou v předkládané práci sledovány:

- Vytvoření metodického přístupu pro stanovení referenčních lokalit vodních toků, který umožňuje stanovení současných reálných referenčních podmínek, zohledňuje variabilitu vodních toků i rozpětí fyzicko-geografických podmínek a antropogenních vlivů na území ČR.
- Stanovení typů vodních toků na území ČR z pohledu hydromorfologie a zařazení vodních toků na území ČR do typů na základě jejich přirozeného chování – fluvialně-morfologických procesů.
- Výběr významných typově specifických hydromorfologických charakteristik a popis typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek.

Základní hypotézou celé práce bylo, že stanovení referenčních podmínek nelze striktně omezit rozpětím prahových hodnot a uvažovat je jako nepřekročitelné. Proto bylo cílem předkládané práce vytvoření průhledného a jednoduše aplikovatelného přístupu, který umožní uživateli vlastní zpřesnění na základě dat získaných terénním průzkumem, identifikaci regionálně specifických referenčních podmínek a tedy reálné využití.

Jako dílčí hypotézy práce byly stanoveny tyto:

- Pro stanovení hydromorfologických referenčních podmínek vodních toků v podmínkách ČR je vhodným a proveditelným přístup určení na základě dat z průzkumu referenčních lokalit.
- Ovlivnění hydrologického režimu se projevuje na značné části říční sítě ČR.
- Hranice mezi jednotlivými typy vodních toků nejsou ostré, nicméně typologie je nezbytným nástrojem ke stanovení typově specifických referenčních podmínek.
- Analýzy charakteristik vodních toků pro území celé ČR jsou možné pouze na základě dostupných distančních dat, následujícím nezbytným krokem je ale ověření výsledků terénním průzkumem.
- Referenční podmínky je třeba posuzovat jako sadu charakteristik, oddělené posuzování charakteristik může zkreslit celkovou interpretaci referenčních podmínek.

Předpokladem praktické aplikace výstupů je postupné vytvoření databáze referenčních lokalit (současných reálných referenčních podmínek), která bude sloužit širokému okruhu uživatelů, pro účely hodnocení hydromorfologického stavu vodních toků v souladu s požadavky RSV, jako předloha pro návrh revitalizačních opatření, ale také jako databáze úseků vodních toků, které zasluhují ochranu před potenciálními zásahy člověka.

Předkládaná disertační práce je komentovaným souborem odborných publikovaných článků sledujících naplnění stanoveného cíle. Práce je rozdělena do 3 částí. Úvodní část práce (kapitola 3) je věnována současnému stavu poznání fluvialně-morfologických procesů a teoretickému rámci pro stanovení typů

vodních toků a referenčních podmínek dle požadavků RSV včetně představení konkrétních zpracovaných přístupů. Druhá část (kapitola 4) popisuje zásadní metodické kroky práce, zdrojová data a lokality využívané pro vývoj i ověření přístupu. Třetí část práce (kapitoly 5 a 6) představuje shrnutí získaných výsledků, jejich diskuzi a závěry. Popis hydromorfologických referenčních podmínek pro jednotlivé typy vodních toků na území ČR na základě syntézy dílčích výsledků je uveden **v příloze 1**. Závěrečnou část práce (kapitola 7) tvoří otisky publikovaných odborných článků řazené ve sledu, který odpovídá vývoji přístupu pro stanovení typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek. S ohledem na opakované ověřování postupu se některé dílčí cíle práce v článcích prolínají.



# 3 TEORETICKÉ ZÁKLADY

## 3.1 FLUVIÁLNĚ-MORFOLOGICKÉ PROCESY A NÁSTROJE K JEJICH POROZUMĚNÍ A PREDIKCI

### 3.1.1 DEFINOVÁNÍ REFERENČNÍCH PODMÍNEK V KULTURNÍ KRAJINĚ

Pro udržitelný management vodních toků je třeba hledat ekvivalenty v přírodě (Rosgen 1994; Brookes 1997). Referenční neboli potenciální přirozený stav představují ekologicky optimální podmínky podporující vývoj říčního ekosystému a jeho soběstačnost (Rosgen, 1994; Brookes, 1997; Verdonschot, 2000). Většina říčních systémů Evropy i dalších kontinentů je již po staletí výrazně ovlivňována činností člověka, referenční podmínky je tedy třeba chápat v podmínkách vývoje kulturní krajiny (Kondolf et al., 2003a; Matoušková, 2008a; Dufour and Piégay, 2009). Tato skutečnost vedla mnoho autorů k závěru, že definování referenčních podmínek jako nedotčených má pro management vodních toků i revitalizační opatření malé praktické využití (Dufour and Piégay, 2009; Wyžga et al., 2012; Rinaldi et al., 2013). Fluviální systém je výsledkem neustálého vzájemného působení přírodních a antropogenních faktorů, autoři proto upouští od využití historických referenčních podmínek (Palmer et al., 2005; Dufour and Piégay, 2009; Wyžga et al., 2012), o jejichž nedotčenosti lze v mnoha případech pochybovat, a zdůrazňují význam pohlížet na fluviální systém jako na dynamický systém, který se v čase vyvíjí podle působících environmentálních podmínek (Brierley and Fryirs, 2005; Dufour and Piégay, 2009; Gurnell et al., 2016b). Historické podmínky vodních toků tak mohou odrážet podmínky již odlišné od současných environmentálních podmínek a zároveň mohou být prakticky nevyužitelné pro management vodních toků a revitalizace (Leuven and Nienhuis, 2001; Dufour and Piégay, 2009; Wyžga et al., 2012; Rinaldi et al., 2013). Pro stanovení referenčních podmínek je proto třeba vycházet ze současných environmentálních podmínek (Brierley and Fryirs, 2005; Palmer et al., 2005; Dufour and Piégay, 2009; Wyžga et al., 2012), zejména klimatických podmínek, vegetačního pokryvu a antropogenních vlivů. Wyžga et al. (2012) uvádí, že definování hydromorfologického referenčního stavu by mělo být založeno na aktuálních nebo potenciálních environmentálních podmínkách ve spojení s minimálním antropogenním vlivem na koryto toku, příbřežní zónu a nivu. Palmer et al. (2005) popisuje referenční podmínky pomocí „guiding images“ jako dynamickou ekologicky zdravou řeku, která by mohla na daném místě reálně existovat.

### 3.1.2 PŘIROZENÉHO CHOVÁNÍ ŘÍČNÍHO SYSTÉMU A ZMĚNY SPOJENÉ S ČINNOSTÍ ČLOVĚKA

Fluviální systém se téměř nikdy nechová staticky ani lineárně, je produktem energetické rovnováhy (Lehotský, 2006). Stabilitu koryta toku, resp. jeho dynamickou rovnováhu, předurčují podmínky proudění (průtok a sklon údolí) a režim sedimentů, dále pak materiál břehů a dna a vegetace břehů (Schumm, 1977, 1985; Rosgen, 1994; Hey, 1997; Gurnell and Grabowski, 2016). Překročením prahových hodnot těchto podmínek se fluviální systém mění a přizpůsobuje se novým podmínkám. Mezi hlavní závislé charakteristiky, které se přizpůsobují a utvářejí tak morfologii říčního systému, patří šířka a hloubka koryta, erozní a akumulací tvary dna, sklon dna, rychlost proudění, sinuositá, průtok, množství a velikost sedimentu (Leopold et al., 1964; Hey, 1997; Brierley and Fryirs, 2005). Přísun sedimentů do koryta závisí na jeho zdrojových oblastech (svažitý terén, drobné přítoky, koryto samotné), změny v přísunu sedimentů ovlivňují kromě povodní významně také změny krajinného pokryvu v povodí, např. odlesňování, urbanizace, těžba. **Tabulka 1** uvádí vliv 8 možných kombinací změn v přísunu sedimentu a režimu proudění na morfologii koryta podle Schumm (1977). V podmínkách mírného humidního klimatu

s vegetačním pokryvem v povodí a aluviálními koryty se sedimentem jemné zrnitosti jsou události menšího rozsahu ale relativně časté z hlediska kumulativního transportu sedimentů důležitější než zřídka se vyskytující významné povodně (Wolman and Miller, 1960).

**Tabulka 1** Vliv změn průtoku a množství sedimentu na morfologii koryta (Schumm, 1977), ↑ nárůst, ↓ pokles, = nemění se.

Změna průtoku	Změna množství sedimentu	Morfologie koryta
=	↑	Agradace, nestabilita koryta, rozšiřování a zmlčování koryta
=	↓	Zařezávání, nestabilita koryta, zužování a zahlubování
↑	=	Zařezávání, nestabilita koryta, rozšiřování a zahlubování
↓	=	Agradace, nestabilita koryta, zužování a zmlčování koryta
↓	↑	Agradace
↑	↑	Procesy nabývají na intenzitě
↓	↓	Intenzita procesů poklesá
↑	↓	Zařezávání, nestabilita koryta, rozšiřování? a zahlubování

Fluviální systém by měl být vnímán hierarchicky, protože se skládá z menších jednotek, které jsou součástí větších: mikrohabitat (např. charakter a diverzita substrátu) – erozní a akumulací tvary dna (např. kaskády, brody, tůně) – koryto – niva – krajina (Frissell et al., 1986; Kondolf et al. 2003a). Porozumění fluviálnímu systému na hierarchicky nižší úrovni (struktury koryta), vyžaduje porozumění současným i v minulosti probíhajícím procesům a zásahům do fluviálního systému na hierarchicky vyšší úrovni (Gurnell et al., 2014; Gurnell et al., 2016b). Lehotský (2004) a Lehotský and Grešková (2004) zavádějí pro lepší porozumění říční krajině jako geosystému 7 úrovní hierarchické klasifikace morfologie řek. Každá hierarchická úroveň je specifikovaná souborem vlastností, které ji odlišují od ostatních hierarchických úrovní: povodí – zóna řeky (homogenní ve vztahu k odtoku a produkci sedimentu) – říční segment (homogenní z hlediska průtoku a množství sedimentu) – koryto-nivní jednotka (koryto, příbřežní zóna, niva a aluviální zvodeň jako integrovaná jednotka, určujícími vlastnostmi jsou říční typ, frekvence a doba zaplavování a tvary povrchu) – říční úsek (koryto a niva jsou homogenní, charakteristické jsou morfologické tvary jako ostrovy nebo tvary spojené s erozí a sesouváním břehů) – morfologická jednotka (formovaná erozními a akumulacími tvary dna jako peřeje, lavice, brody, tůně) a morfohydraulická jednotka (určená variabilitou hydraulických podmínek a charakteristik substrátu morfologické jednotky). Autoři také často poukazují na význam vertikální, laterální a longitudinální konektivity říčního systému (např. Piégay and Schumm, 2003; Lehotský and Grešková, 2004).

Fluviálně-morfologické formy a procesy významně ovlivňují a limitují založení, růst a reprodukci příbřežní vegetace (Hupp and Osterkamp, 1996; Hupp and Rinaldi, 2007). Periodické disturbance v podobě relativně frekventovaných povodní a migrace koryta mohou být považovány za princip fluviálně-geomorfologických procesů zodpovědný za vysokou biodiverzitu příbřežních ekosystémů (Vannote et al., 1980; Marston et al., 1995; Hupp and Osterkamp, 1996; Škarpich et al., 2016b). Fluviálně-morfologické procesy podporují v humidních temperátních regionech rozmanité ekosystémy lesa (Hupp and Bornette, 2003). Kořeny žijících stromů, větve a mrtvé dřevo utvářejí koryto a jeho habitat, listy a bezobratlí padající do koryta poskytují potravu, zastínění stromů ovlivňuje teplotu vody (Vannote et al. 1980; Kondolf et al., 2007; Gurnell and Grabowski, 2016; Škarpich et al., 2016b). Navíc dobře rostlá příbřežní zóna může také sloužit jako filtr pro sedimenty, nutrienty a další znečišťující látky, čímž zlepšuje kvalitu vody v toku (Kondolf et al., 2003b). Proto je prostor příbřežní zóny významnou součástí managementu, ochrany a revitalizačního úsilí (Matoušková, 2003; Kondolf et al., 2007; Gurnell and Grabowski, 2016; Škarpich et al., 2016b).

Vegetace může výrazně měnit míru eroze a ukládání sedimentů a významně ovlivňovat celkovou stabilitu fluvialních povrchů (Hupp and Osterkamp, 1996; Liébault and Piégay, 2002; Hupp and Rinaldi, 2007; Gurnell et al., 2016a). Opakované zarůstání příbřežních zón lesem, pokles dodávky a transportu sedimentů a postupující stabilizace štěrkových lavic méně disturbovaných vysokými podřhými průtoky je spojeno se změnou říčního vzorce od divočícího k migrujícímu („wandering“) a od migrujícího k meandrujícímu nebo přímému korytu (Marston et al., 1995; Liébault and Piégay, 2002; Zawiejska and Wyžga, 2010; Wyžga et al., 2012; Škarpich et al., 2013, 2016a). Řada studií je zaměřena na karpatské a alpské štěrkonosné toky. Pro flyšové Karpaty byla, jako pozůstatek periglaciálního klimatu spojeného s nízkým zalesněním a vysokou intenzitou mechanického zvětrávání, charakteristická zvýšená akumulace sedimentu v podhorských úsecích vodních toků, která tlumila energii proudící vody a předurčovala vznik větvičího se („anabranching“) koryta migrujícího ve štěrkových lavicích. Zvýšení srážkových úhrnů a teplot spojené s nástupem lesa znamenalo stabilizaci, snížení dotace sedimentů do koryt a zároveň posun sedimentů v korytech. Osídlení a odlesnění za účelem pastevevství v 16. století otevřelo nové zdroje sedimentů a podpořilo dodávku sedimentů do koryt, laterální migraci a větvení. Se změnami využití krajiny v posledních 100 letech (zánik pastevevství, zalesňování, omezení dotace sedimentů do koryt), stabilizací břehů a vznikem řady příčných bariér ovlivňujících transport sedimentu (stupně, jezy, vodní nádrže) došlo k transformaci větvičího se říčního vzorce v jednoduchá úzká koryta v některých úsecích se významně zahlubující do svého podloží (Morávka, Ostravice, Olše), náchylnost k zahlubování těchto koryt je vyšší než v případě alpských štěrkonosných toků (Škarpich et al., 2013, 2016a). Obdobnou situaci karpatských toků na území Polska popisuje Wyžga et al. (2012) a Zawiejska and Wyžga (2010).

Zahlubování a zužování koryt je evidentní zejména v případě koryt toků významně ovlivněných lidskou činností, např. stabilizace břehů opevněním, vytváření příčných bariér (stupňů, jezů, hrází vodních nádrží) blokujících transport sedimentů v říčním kontinuu (Marston et al., 1995; Liébault and Piégay, 2002; Hupp and Rinaldi, 2007; Zawiejska and Wyžga, 2010; Wyžga et al., 2012; Škarpich et al., 2013, 2016a). Zužování koryt a nárůst sinuosity bez efektu zahlubování v souvislosti s dodávkami jemného sedimentu (splachy ze zemědělské půdy), které významně ovlivňují struktury dna na příkladu řeky Frome v jižní Anglii popisují Gurnell and Grabowski (2016). Probíhající stabilizace struktur dna vegetací brání jejich další mobilitě, pronikání do štěrku a pohřbívání štěrkového dna. Tím dochází k přeměně sinuózního až meandrujícího koryta v koryto anastomózní (Gurnell and Grabowski, 2016).

Naopak relativně stabilní chování neregulovaných koryt vodních toků ve střední Evropě převažující nad procesy rozrušování břehů, zmlazování povrchů i krajinné pokrývky, které vykazuje změny v krajinném pokryvu příbřežní zóny, popisují Cebecauerová and Lehotský (2012) a Wyžga et al. (2012). Zatímco v částech příbřežní zóny vzdálenějších od koryta intenzita vlivu člověka roste, v bezprostřední blízkosti vodních toků se travní porosty se neudržují v původním rozsahu a kvalitě, zvyšuje se podíl dřevin, dochází ke stabilizaci štěrkových lavic, přibývá ploch křovin a lužního lesa, což iniciuje i změny chování příbřežní zóny v průběhu povodní (Cebecauerová and Lehotský, 2012; Wyžga et al., 2012). Lokálně ale narůstají plochy orné půdy a zastavěné plochy. Obdobnou situaci ve Francii popisuje Liébault and Piégay (2002).

Příbřežní zóna často minimalizuje konflikty mezi dynamickými fluvialními procesy a aktivitami spojenými s rozvojem lidské společnosti (Kondolf et al., 2003b; Dufour and Piégay, 2009). Důležitou otázkou je tedy správná šířka příbřežní zóny. Kondolf et al. (2003b) uvádí, že optimální šířka příbřežní zóny je taková, která slouží k zachycení sedimentů a mrtvého dřeva při povodni, zároveň slouží k zachycení splachů ze zemědělské půdy a zároveň umožňuje zachování druhové rozmanitosti a přirozené laterální migrace koryta, jejíž omezení může významně ovlivnit pokles hladiny podzemní vody. Osterkamp and Hupp (1984) definují příbřežní zónu jako povrch zaplavený nebo nasycený při průtoku odpovídajícímu  $Q_2$ . To odpovídá většině niv a níže položených povrchů v údolí, nejsou zahrnuty terasy s dlouhou periodou



opakování povodní (Hupp and Bornette, 2003). Evropský standard EN 14614 (CEN, 2004) uvádí příbřežní zónu jako část pozemku přilehlého k říčnímu korytu mající přímý vliv na podmínky vodního ekosystému (např. zastíněním a opadem listí).

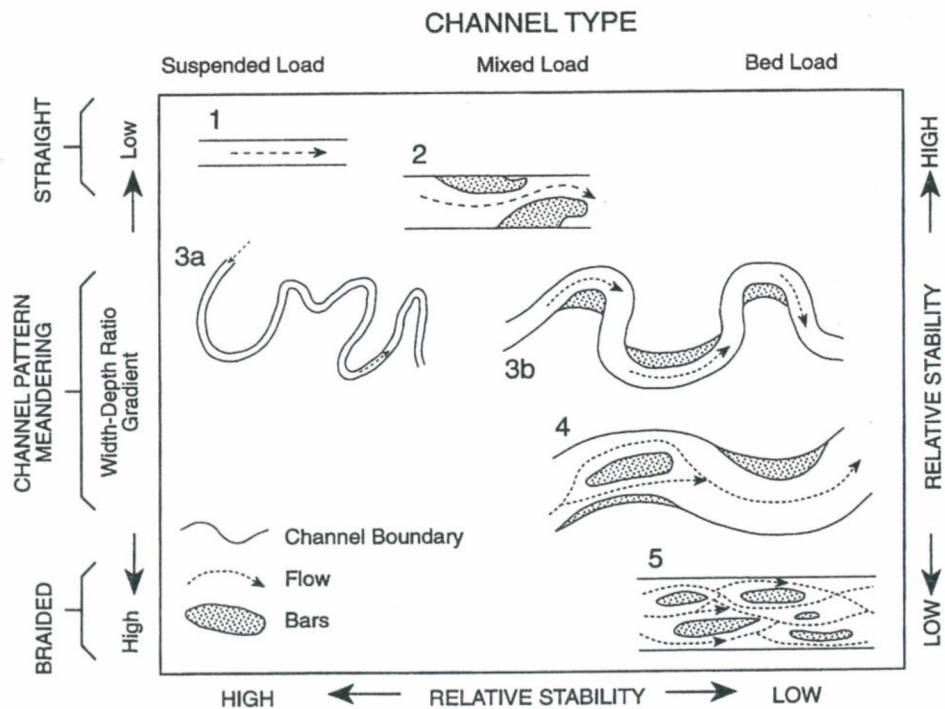
### 3.1.3 KLASIFIKACE JAKO NÁSTROJ PRO POCHOPENÍ A PREDIKCI CHOVÁNÍ ŘÍČNÉHO SYSTÉMU

Geomorfologické klasifikace vodních toků jsou založeny na spojení fluvialních procesů, tvarů a jejich stability (Thorne, 1997). Publikované klasifikace však třídí vodní toky do skupin podle různých hledisek významnosti jednotlivých charakteristik: trasy koryta (Wolman and Leopold, 1957; Church, 1992; Thorne, 1997), převládajících korytotvorných procesů (Schumm, 1977), vývoje koryta a trendů změn (Brookes, 1988; Downs, 1995), pro účely managementu vodních toků (Rosgen, 1994; Montgomery and Buffington, 1997) nebo z hlediska vhodnosti pro revitalizaci (Brierley and Fryirs, 2005). Klasifikace může být založena na hierarchicky nižších jednotkách fluvialního systému (tvaru v rámci úseku koryta toku), za kterými je však třeba vidět a chápat procesy odehrávající se v širší hierarchické úrovni (povodí; Kondolf et al. (2003a). Klasifikace by měla sloužit jako flexibilní nástroj pro stanovení existujících podmínek prostřednictvím porozumění fluvialních procesů a zároveň by měla umožnit předvídat změny spojené s přirozeným chováním říčního systému. Zařazení vodních toků do typů, na základě společných charakteristik jejich přirozeného chování, představuje užitečný nástroj pro porozumění fluvialně-morfologickým procesům a vývoji říční krajiny a nastavení vhodného managementu říčních systémů včetně jejich příbřežních zón.

Geomorfologické klasifikace toků jsou zpravidla založeny na sběru velkého množství dat a jejich posouzení pomocí statistických metod za účelem objektivního definování parametrů klasifikace a skupin toků. Každá klasifikace znamená zjednodušení reality do podoby kvantifikovatelných charakteristik či úrovní kvality. Generalizace by měla napomoci identifikovat přirozené chování vodních toků, ale zároveň by měly být vždy individuálně posouzeny specifické lokální podmínky (Rosgen 1994; Kondolf et al., 2003a; Rinaldi et al., 2016). Prahové hodnoty parametrů pro stanovení hranic skupin nejsou vždy zcela jednoznačné (Schumm, 1977; Rosgen, 1994; Thorne, 1997; Kondolf et al. 2003a, Rinaldi et al., 2016) a rozhraní hodnot parametrů tak mohou být širší nebo klouzavá popř. závislá na hodnotách dalších parametrů (Gurnell et al., 2016a).

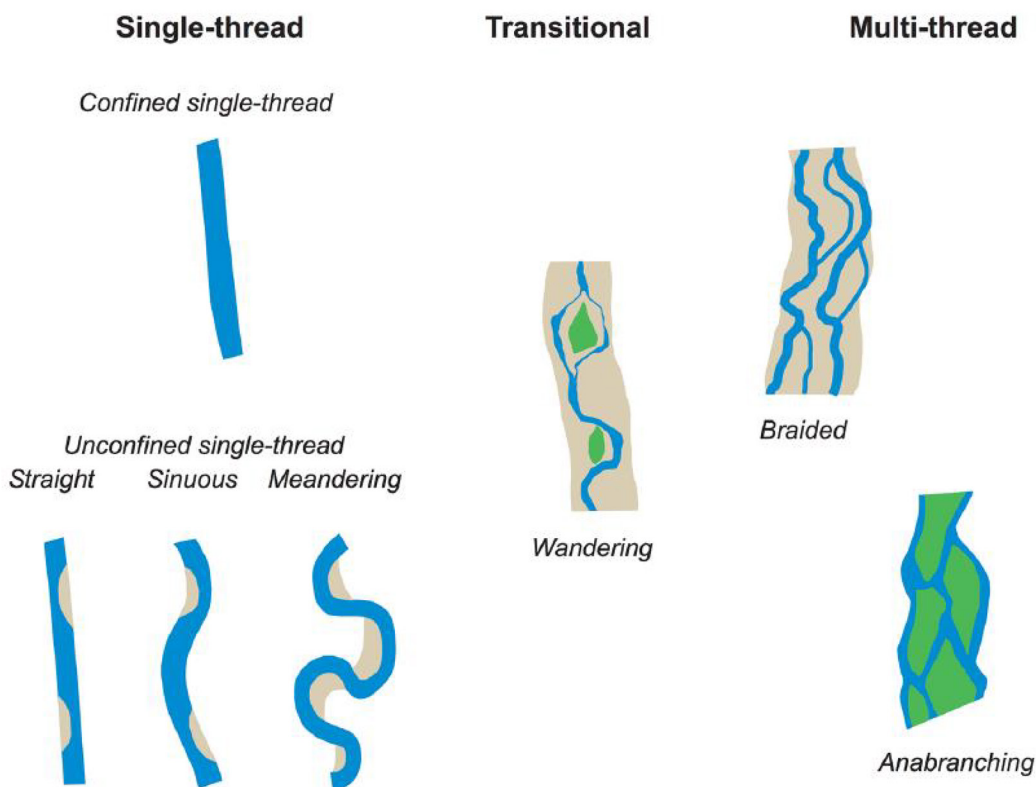
Nejpoužívanějším přístupem pro vymezení typů vodních toků je respektování kontinua říčního vzorce a posouzení tvarů koryta (Thorne, 1997). Za historicky první typologii vodních toků je považována klasifikace říčních vzorců založená na vztazích mezi dodávkou sedimentů a stabilitou koryta (Schumm, 1977), která třídí vodní toky od přímých přes meandrující k divočicím bez ostrých přechodů mezi jednotlivými typy (Obr. 1). Koncept kontinua proměnných v rámci úseků toku zdůrazňuje i výrazně mladší a neméně významná typologie Rosgen (1994). S odstupem téměř 40 let se třídění vodních toků do typů podle říčního vzorce bez ostrých rozhraní mezi typy vrací po rozsáhlých rešerších také Rinaldi et al. (2016) v aktuální klasifikaci vodních toků, která má ambice celoevropského uplatnění. Tato klasifikace byla vyvinuta předními evropskými odborníky v rámci projektu REFORM („REstoring rivers FOR effective catchment Management“) financovaného Evropskou unií z Programu FP7 s cílem zlepšit úroveň porozumění říčním procesům pro účely managementu a integrovat zkušenosti z doposud vytvořených typologií vodních toků do relativně jednoduché typologie zohledňující fakt, že většina evropských řek nese určitou úroveň antropogenní modifikace. Základní verze typologie (Rinaldi et al., 2016) vymezuje 7 typů vodních toků (Obr. 2) na základě říčního vzorce a charakteru údolí (omezení laterálního pohybu koryta). Samostatně vymezuje „typ 1“, pro který je určující charakter údolí nikoli trasa. Rozšířená verze typologie (Rinaldi et al., 2016) pak vymezuje 22 typů vodních toků na základě doplnění dominantní velikosti sedimentu dna. K jednotlivým typům vodních toků je uvedena i typická hodnota sklonu koryta. Dále definuje „typ 0“ pro modifikované (kanalizované a opevněné) úseky toků, jejichž laterální stabilita

neodráží přirozené podmínky. Práce klasifikuje v návaznosti na typy vodních toků také říční nivy a typy odtokového režimu.



Obr. 1 Klasifikace říčních vzorců založená na dodávkách sedimentu a stabilitě koryta (podle Schumm, 1977).

Říční vzorec poskytuje základní informaci o chování vodních toků a je klíčový pro morfologické charakteristiky koryta a sklon (Schumm, 1985). Leopold and Maddock (1953) uvádí sklon toku jako faktor ovlivňovaný procesy utváření koryta toku po dlouhé období jeho vývoje a zároveň utvářející finální morfologický vzhled koryta toku. Přímý průběh trasy toku je často zapříčiněn morfologií údolí. Přímé úseky jsou spojeny s maximální rychlostí a značnou hloubkou údolnice. Oscilace výšek dna je však vždy spojena s tendencí vytvářet sinuózní údolnici (Thorne, 1997). Přímá aluviální koryta jsou raritou. Mobilnější materiál dna a větší přísun sedimentů do koryta má za následek vývoj koryt volně migrujících nivou s typickým podemláním břehů a vzniku lavic (jesepů). Prahové hodnoty sinuosity pro stanovení říčních vzorců se mezi autory liší, např. Wolman and Leopold (1957) uvádí do sinuosity 1,1 přímá koryta, 1,1 – 1,5 sinuózní koryta a nad hodnotu 1,5 koryta meandrující. Rosgen (1994) uvádí sinuózní koryta od hodnoty 1,2 a meandrující koryta od sinuosity 1,4. Rinaldi (2003) uvádí sinuózní koryta 1,2 – 1,5 a meandrující koryta od hodnoty 1,5. S dostatečnou energií pro transport hrubých sedimentů a množstvím erozivního materiálu břehů mají koryta tendenci se rozšiřovat a vytvářet divočící říční vzorec rozčleněný množstvím dynamických (vegetace prostých) lavic, které jsou při korytotvorném průtoku zatopeny. V případě lavic stabilizovaných vegetací výškově ve stejné úrovni jako údolní niva, které nejsou zaplavovány během korytotvorného průtoku, hovoříme o anastomozních korytech. Jedná se o nízkoenergetický fluvialní systém větvcí se do několika samostatných vysoce sinuózních koryt (na rozdíl od jediného divočícího koryta s vysokým počtem aktivních subkoryt). Na rozhraní mezi jednoduchými (nerozvětvenými) a divočícími koryty se nacházejí relativně stabilní migrující koryta („wandering channels“) s větvcími se a spojujícími se rameny, pro která jsou typická ostrovy.



Obr. 2 Sedm základních typů vodních toků podle Rinaldi et al. (2016).

## 3.2 HODNOCENÍ HYDROMORFOLOGICKÉ KVALITY VODNÍCH TOKŮ A STANOVENÍ TYPOVĚ SPECIFICKÝCH REFERENČNÍCH PODMÍNEK

### 3.2.1 VÝVOJ PŘÍSTUPŮ K HODNOCENÍ HYDROMORFOLOGICKÉ KVALITY VODNÍCH TOKŮ

Definováním cílového stavu revitalizačních opatření se v posledních desetiletích zabývalo několik studií (např. Jungwirth et al., 2002; Brierley and Fryirs, 2005; Palmer et al., 2005; Dufour and Piégay, 2009). Snaha o zlepšení stavu vodních toků z pohledu bioty a morfologie vedla, nejen v Evropě, k vyvinutí velkého počtu metod pro hodnocení hydromorfologické kvality řek, mezi nejvýznamnější patří např. britská „River Habitat Survey“ (RHS; Raven et al., 1997), německá „Gewässerstrukturgütekategorisierung“ (LAWA – Field Survey; LAWA, 1999), LAWA – Overview Survey (Kern et al., 2002), francouzský „Système d’Évaluation de la Qualité du Milieu Physique“ (SEQ Physique; Agences de l’Eau and Ministère de l’Environnement, 1998) nebo americký „Rapid Bioassessment Protocol“ (RBP; Barbour et al., 1999). Českým přístupem z tohoto období je metoda EcoRivHab (Matoušková, 2003). Revitalizační úsilí a snaha o vytvoření hodnotících metod byly umocněny se zavedením RSV. Přehled 121 metod vytvořených mezi lety 1983 a 2013 uvádí Belletti et al. (2015). Problematika hodnocení hydromorfologické kvality řek se neustále vyvíjí, autoři se zabývají limitacemi doposud vytvořených metod a vyvíjejí stále nové. Rinaldi et al. (2013) uvádí jako hlavní limitace neadekvátní prostorové měřítko pro porozumění a přesné odhalení morfologických změn (procesy a příčiny je třeba vidět v širším měřítku) a s tím související omezené využívání metod jako např. dálkový průzkum Země nebo GIS analýzy a dále statické pojetí s nedostatečným zohledněním procesů, zejména vývoje koryta. Bertoldi et al. (2009) považuje pro podhorské úseky evropských alpských až mediteránních divočících říčních systémů přímo za nevyhnutelné stanovení referenčního stavu vyšetřováním „referenčních“ procesů a interakcí voda –



sediment – vegetace. Jako příklad uvádí řeku Tagliamento, která si navzdory mnoha antropogenním vlivům zachovala dynamickou a morfologickou integritu. Současné referenční podmínky se tedy neodvíjejí od „počtu tvarů“, ale od nalezení neupravených úseků vodních toků s fungujícími přirozenými fluvialními procesy (Wyźga et al., 2012). Také podle Belletti et al. (2015) a Hajdukiewicz et al. (2017) je při dalším vývoji hydromorfologických hodnotících metod třeba upřednostnit hodnocení geomorfologických procesů a změn před „pouhou“ inventarizaci tvarů. Belletti et al. (2015) považuje dále za důležité integrovat v rámci hodnocení hydrologické a morfologické složky včetně vegetace a nejlépe i dalších složek jako je kvalita vody a ekologie.

Podle Hajdukiewicz et al. (2017) nezahrnuje řada metod žádný nebo jen minimální terénní průzkum, jsou pouze obecné (pro účely reportingu) a jejich využití pro účely revitalizací vodních toků je tak velmi limitované. Aby byly metody hodnocení přínosné, i pro účely revitalizací, musí podle Hajdukiewicz et al. (2017) splňovat tato kritéria:

- Hodnocení by mělo být zaměřeno na určení stupně odchylky od typově specifických neovlivněných podmínek než na kvantitativní určení struktur koryta prospěšných pro biotu (CEN, 2010), jejichž přítomnost může být v různých typech vodních toků odlišná.
- Stupeň modifikace hydromorfologie řek je určen ve vztahu k referenčním podmínkám, které definují nejlepší možný stav, kterého je za současných klimatických, hydrologických, geomorfologických podmínek a využití území v povodí možné dosáhnout (Wyźga et al., 2012).
- Hodnocení je založeno především na terénním průzkumu tak, aby umožňovalo rozpoznání typu, lokalizace a rozsahu modifikace hydromorfologie řek.
- Metoda umožňuje porozumění hydrologickým a geomorfologickým procesům, které předurčují stav říčního ekosystému včetně procesů spojených s přizpůsobováním se změnám environmentálních podmínek.

Jako metody zahrnující hodnocení celého říčního koridoru, současných i historických změn jsou uváděny např. metody MQI (Rinaldi et al., 2013) nebo RHQ (Wyźga et al., 2012; Hajdukiewicz et al., 2017). Obě tyto metody jsou založeny na posouzení odchylky aktuálního stavu od referenčních podmínek a vychází z aktuálního preferovaného způsobu stanovení referenčních podmínek ze současných environmentálních podmínek. Na obdobném principu stanovení lokálního referenčního stavu je založena také metoda EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b). Metoda RHQ (Wyźga et al., 2012; Hajdukiewicz et al., 2017) byla vytvořena pro hodnocení kvality řek pro účely plánování a hodnocení revitalizačních opatření. Metoda vychází z EN 14614 (CEN, 2004), pro jednotlivé příčné profily je skórováno 10 skupin parametrů. Do hodnocených skupin parametrů jsou nad rámec EN 14614 (CEN, 2004) doplněny jsou 2 další parametry: vegetace ostrovů (terestrická vegetace v aktivní zóně divočících, migrujících a anastomozních koryt) a konektivita koryta a hyporheické zóny (vyjma koryt se skalním podložím). Pro každou hodnocenou skupinu parametrů jsou nejprve určeny referenční podmínky a extrémně modifikovaný stav, hodnotí se spektrum podmínek mezi těmito extrémy z hlediska jejich vlivu na kvalitu říčního ekosystému. Pokud není možné referenční podmínky stanovit v rámci posuzovaného vodního toku, lze je určit na jiném vodním toku s povodím obdobné velikosti a v obdobných fyzicko-geografických podmínkách. Zajímavostí metody MQI (Rinaldi et al., 2013), která byla vyvinuta pro italské vodní toky je, že posuzuje vývoj koryta a říčního koridoru vůči aktivitám člověka (např. těžba sedimentů, odstraňování dřeva, management vegetace příbřežní zóny) a změnám fyzicko-geografických podmínek (např. trasa, šířka koryta, změny úrovně dna) za posledních 20 až 100 let. Metoda MQI není nástrojem pro stanovení cílů revitalizačních opatření, referenční podmínky jsou dány tvary koryta a procesy, které jsou očekávány pro daný morfologický typ vodního toku. Použitá typologie vodních toků je založena na říčním vzorci a charakteru údolí (Rinaldi et al., 2016). Posuzuje se, zda procesy a související tvary zodpovědné za správné fungování vodního toku jsou omezeny nebo pozměněny vlivem člověka nebo vývojem koryta.

Výsledkem aplikace metody je stanovení indexu MQI, který nabývá hodnot 0 (nejnižší kvalita) až 1 (nejvyšší kvalita).

Za účelem hodnocení hydromorfologické kvality řek v souladu s požadavky RSV byla pro podmínky ČR vytvořena metoda EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b) a metoda HEM (Langhammer, 2007, 2008, 2014; Langhammer and Hartvich, 2014). Obě metody jsou založeny na detailní terénní mapování parametrů v úsecích vodního toku heterogenní délky doplněným o využití distančních dat (historických map, leteckých snímků atd.). Hodnocení podle metody EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b) je založeno na stanovení lokálního referenčního stavu, se kterým se současný stav úseku vodního toku srovnává. Metoda HEM (Langhammer, 2014; Langhammer and Hartvich, 2014) zohledňuje typově specifické referenční podmínky v hodnocení formou vah jednotlivých hodnocených parametrů nastavených pro jednotlivé skupiny typů toků. Metoda využívá skórovací matici vytvořenou kombinací modelování, expertního odhadu a výsledku pilotního mapování, která pro každý ze 17 hodnocených parametrů definuje 8 typově specifických hodnot vah tohoto parametru. Kromě typově specifických vah parametrů jsou pro vybrané ukazatele navíc vytvořeny samostatné hodnotící matice pro každou skupinu typů toků (Langhammer and Hartvich, 2014).

### 3.2.2 POŽADAVKY A PŘÍSTUPY KE STANOVENÍ TYPŮ, REFERENČNÍCH PODMÍNEK A HODNOCENÍ STAVU HYDROMORFOLOGICKÝCH SLOŽEK V KONTEXTU RÁMCOVÉ SMĚRNICE O VODÁCH

Vstupem do Evropské unie se ČR zavázala k implementaci RSV do svého právního řádu. Evropské směrnice jsou závazné ve výsledcích, kterých má být dosaženo, forma dosažení požadovaných výsledků je ponechána na členském státu. Cílem RSV je zabránit dalšímu zhoršování stavu, ochrana a zlepšení stavu vod. Smyslem hodnocení ekologického a chemického stavu vodních toků podle požadavků RSV je zjištění současného stavu vodních toků a v případě nedosažení dobrého stavu návrh a následná realizace opatření, které povedou k dosažení dobrého stavu. Pro účely této práce je pro vodní útvary povrchových vod v kategorii řeka používán termín vodní tok. Ekologický stav je určen na základě stavu biologických, hydromorfologických a chemických a fyzikálně chemických složek. Účelem hodnocení stavu hydromorfologických složek je získání informace, zda jsou hydromorfologické podmínky vodního toku dostatečné pro podporu biologických složek.

RSV dále požaduje rozdělení útvarů povrchových vod do typů a pro každý typ požaduje stanovení typově specifických hydromorfologických podmínek, které představují hodnoty hydromorfologických kvalitativních složek pro velmi dobrý ekologický stav a tvoří tak nezbytný podklad, který umožňuje klasifikaci dalších úrovní stavu. RSV nedefinuje termín hydromorfologie přímo, ale uvádí popis hydromorfologických složek kvality pro hodnocení ekologického stavu prostřednictvím charakterizace velmi dobrého stavu (Tabulka 2).

**Tabulka 2** Definice velmi dobrého stavu pro jednotlivé hydromorfologické složky kategorie řeka (European Commission, 2000).

Hydromorfologické složky	Velmi dobrý stav
<b>Hydrologický režim</b>	Velikost a dynamika proudění a z toho plynoucí souvislosti s podzemními vodami plně nebo téměř plně odpovídají nenarušeným podmínkám.
<b>Kontinuita toku</b>	Kontinuita toku není narušena antropogenními činnostmi a umožňuje nerušenou migraci vodních organismů i transport sedimentů.
<b>Morfologické podmínky</b>	Uspořádání říčního koryta, proměnlivost jeho šířky a hloubky, rychlosti proudění, vlastnosti substrátu a jak struktura, tak vlastnosti přibřežních zón zcela nebo téměř zcela odpovídají nenarušeným podmínkám.



Pro usnadnění implementace požadavků RSV členskými státy, zejména v souvislosti s vytvářením metodických přístupů, bylo Evropskou komisí vydáno několik tzv. „Guidance“ dokumentů, pro hydromorfologické referenční podmínky „Guidance no. 10“. Evropský výbor pro normalizaci CEN publikoval k problematice záznamu a hodnocení hydromorfologie řek dva standardy. První z nich EN 14614:2004 „*Water quality – Guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers*“, který byl v roce 2005 přijat jako česká technická norma *Jakost vod – Návod pro hodnocení hydromorfologických charakteristik řek*, poskytuje základní principy pro stanovení hydromorfologických charakteristik řek, které by měly být použity k charakterizaci říčních typů a pro hodnocení v porovnání s referenčními podmínkami, jejich sledování a záznam včetně přístupu k interpretaci a prezentaci výsledků. Druhý z nich EN 15843:2010 „*Water quality – Guidance standard on determining the degree of modification of river hydromorphology*“, který byl v roce 2010 přijat jako česká technická norma *Jakost vod – Návod pro určení stupně modifikace hydromorfologie řek*, poskytuje rámec pro hodnocení hydromorfologických charakteristik řek ve smyslu odchylky od přirozeného stavu, zahrnující využití jednoduchého skórovacího systému, který umožňuje záznam hydromorfologické modifikace koryt vodních toků, břehů, příbřežní zóny a údolní nivy a jejich konzistentní vyhodnocení.

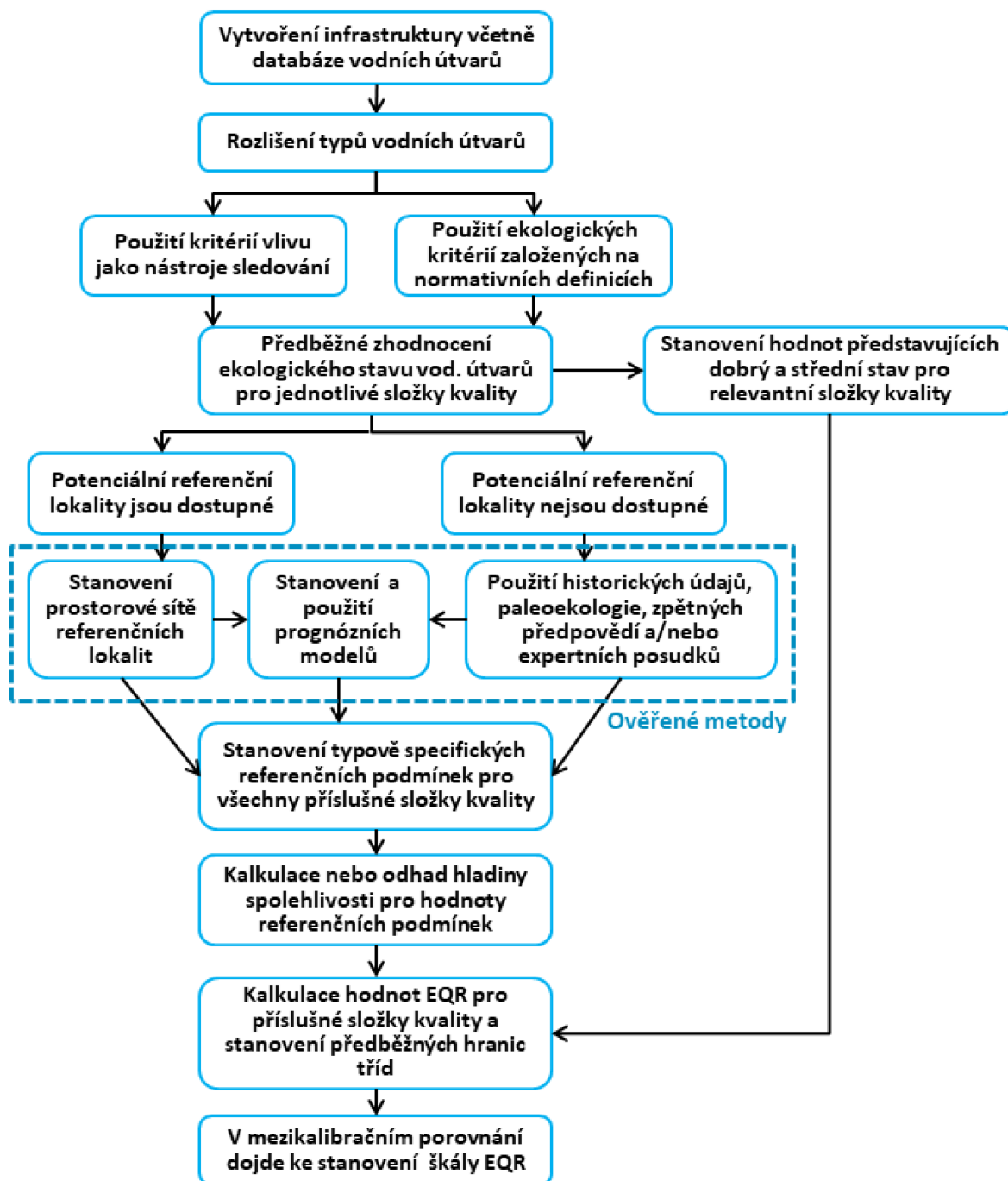
EN 14614 (CEN, 2004) doporučuje, aby byly pro definování říčních typů využity minimálně tyto faktory: velikost (např. řád toku, plocha povodí, vzdálenost od pramene), gradient (sklon koryta), geologie (minimálně 3 kategorie), zeměpisná poloha, nadmořská výška a hydrologický režim (charakteristický průtokový režim). RSV je v tomto ohledu benevolentnější, umožňuje definování typů vodních toků na základě ekoregionů a souboru povinných charakteristik (nadmořská výška, plocha povodí, geologický typ) – systém A nebo na základě závazných a volitelných faktorů – systém B. Závaznými faktory systému B jsou pro řeky nadmořská výška, zeměpisná šířka a délka, geologie a velikost. Mezi volitelné faktory systému B patří např. vzdálenost od pramene, energie vodního toku (funkce průtoku a sklonu), průměrná šířka hladiny vody, průměrná hloubka vody, průměrný sklon hladiny vody, uspořádání a tvar hlavního říčního koryta, kategorie dle velikosti průtoku, tvar údolí. V případě použití systému B musí státy dosáhnout přinejmenším stejného stupně rozlišení, který byl dosažen systémem A. Po vymezení jednotlivých říčních typů je třeba vymežit dílčí úseky toků pro sledování a hodnocení, jejichž hranice jsou určeny změnami v geologii, tvaru údolí, sklonu, půdorysném tvaru toku, průtoku (významný přítok/změna v řádu toku), využití území, pohybu splavenin (nádrž, významnější jez) (CEN, 2004).

Referenční podmínky by měly být určeny pro každý říční typ tak, aby odrážely nenarušené podmínky toku, tzn. přirozený materiál dna i břehů včetně přirozeného příčného profilu a půdorysného tvaru řeky, pohyb koryta inundačním územím bez omezení, přirozený pohyb sedimentu, organismů i proudění vody, přirozený břehový porost odpovídající říčnímu typu a zeměpisné poloze řeky (CEN, 2004).

Dle „Guidance no. 10“ (European Commission, 2003) a standardu EN 14614 (CEN, 2004) odpovídají referenční podmínky velmi dobrému ekologickému stavu a jsou dány hodnotami příslušných kvalitativních složek. Stanovují se pro každý typ vodního útvaru a mohou představovat stav v současnosti nebo v minulosti. Referenční podmínky nemusí odpovídat absolutně nenarušeným původním podmínkám, jsou povoleny antropogenní vlivy, které však nezpůsobují žádné nebo jen velmi malé narušení. Členské státy mají povinnost stanovit referenční podmínky a hranice ekologických tříd pro všechny typy útvarů povrchových vod a pro veškeré relevantní kvalitativní prvky. Jednotlivé kroky procesu stanovení referenčních podmínek a hranic ekologických tříd tak, jak je uvádí „Guidance no. 10“ schématicky znázorňuje **Obr. 3**.

Typově specifické podmínky mohou být stanoveny prostorově (na základě dat z průzkumu), prognózním modelováním, z historických údajů nebo paleorekonstrukce nebo odvozeny kombinací těchto přístupů. Tam, kde tyto způsoby stanovení nejsou možné, může být využit expertní posudek (European

Commission, 2000, 2003). Tabulka 3 shrnuje silné a slabé stránky přístupů používaných ke stanovení referenčních podmínek.



Obr. 3 Kroky procesu stanovení referenčních podmínek a hranic ekologických tříd podle „Guidance no. 10“ (European Commission, 2003); EQR – ekologický kvalitativní poměr.

EN 15843 (CEN, 2010) udává, s odkazem na standard EN 14614 (CEN, 2004), postup hodnocení stupně modifikace hydromorfologických charakteristik vodních toků. Hodnocené charakteristiky jsou rozděleny na hlavní charakteristiky, které slouží k určení odchylky od přirozeného stavu bez potřeby definování typově specifických referenčních podmínek, a vedlejší charakteristiky doplňující hodnocení kvality habitatu. Určení vedlejších charakteristik vyžaduje srovnání pozorovaného stavu s referenčními podmínkami pro odpovídající typy řek. Význam charakteristik není stejný, ale vzhledem k současnému

stavu poznání standard nepřirazuje charakteristikám různé váhy. Pro výsledné hodnocení lze použít 2 samostatné postupy – s kvantitativními údaji (5 bodová stupnice) nebo s kvalitativními údaji (3 bodová stupnice). Ačkoli standard uvádí různé způsoby využití výsledků, k popisu tříd hydromorfologické modifikace byly záměrně využity termíny odlišné od termínů používaných pro klasifikaci ekologického stavu podle RSV, aby bylo zdůrazněno, že klasifikace podle tohoto standardu nemá vztah k hodnocení ekologického stavu podle RSV. **Tabulka 4** shrnuje hydromorfologické charakteristiky, které mají být podle EN 15843 (CEN, 2010) a EN 14614 (CEN, 2004) hodnoceny.

**Tabulka 3** Přístupy ke stanovení referenčních podmínek podle „Guidance no. 10“ (European Commission, 2003), jejich výhody a nevýhody.

Přístup ke stanovení referenčních podmínek	Výhody	Nevýhody
<b>Prostorově určený přístup na základě dat z průzkumů</b>	Možnost zohlednění časové a prostorové variability, v případě dostupnosti dat jednoduchá metoda	Musí být k dispozici nenarušená nebo jen minimálně narušená místa, k dispozici musí být rozsáhlé sady dat pro všechny typy
<b>Prognózní modelování</b>	Možnost “půjčení” údajů z podobných regionů či typů, ke stanovení je potřeba nižší počet míst/vzorků	Požaduje údaje, kalibraci a ověření, platí pouze pro místo/typ, pro které byl vytvořen
<b>Historické údaje, paleorekonstrukce</b>	Lze využít i v oblastech s antropogenními vlivy, kde nelze nalézt referenční lokality	Proměnlivé údaje, málo ukazatelů, kvalita dat může být nízká nebo neznámá, data mohou chybět
<b>Expertní posudek</b>	Lze kombinovat s ostatními metodami, lze využít v případě, že není možné nalézt referenční lokality	Značná subjektivita (zvláště pokud je to jediný zdroj), obvykle kvalitativní vyjádření, nedostatek kvantitativních měření pro ověření

Standard EN 14614 (CEN, 2004) uvádí, že hodnocení je třeba uchovávat odděleně pro jednotlivé zóny (koryto, břehy/příbřežní zóna, inundační území). Standard 15843 (CEN, 2010) uvádí 4 alternativy pro výpočet/záznam hodnocení modifikace řek, které poskytují řadu možností pro různé účely využití:

- 16 skóre odděleně (podrobný záznam pro správu vodních toků)
- 3-místný kód (předávání zpráv za jednotlivé složky hydromorfologické kvality podle RSV, přílohy V): morfologie (průměr ze skóre 1a, 1b, 2a, 2b, 7, 8, 9, 10a, 10b) – hydrologický režim (nejvyšší ze skóre 5a, 5b, 5c) – podélná kontinuita (6)
- Skupinové charakteristiky pro jednotlivé zóny: koryto (1a, 1b, 2a, 2b, 5a, 5b, 5c, 6), břehy/příbřežní zóna (7, 8), inundační území (9, 10a, 10b), aritmetický průměr zvláště pro jednotlivé zóny
- Celková hydromorfologická modifikace vyjádřená pomocí jediného skóre (aritmetický průměr ze 16 skóre)

Podle Boon et al. (2010) standard EN 15843 pomáhá k identifikaci hydromorfologických vlivů, které mohou vést ke zhoršení ekologického stavu podle RSV, umožňuje určitou společnou úroveň reportingu modifikace hydromorfologie řek napříč Evropou, vyhodnocení SEA, EIA, posouzení pro účely managementu povodí a udržovacích prací na vodních tocích, managementu lokalit Natura 2000 a dalších chráněných území.

**Tabulka 4 Hodnocené hydromorfologické charakteristiky podle EN 15843, EN 14614 a požadavků RSV.**

Kategorie	Charakteristika	Hl./vedl. charakteristiky podle EN 15843	Rozdělení do zón		Složky hydromorf. kvality z přílohy V RSV podle EN 15843	Charakteristiky pro identifikaci úseků ve velmi dobrém stavu podle EN 14614
			podle EN 14614	podle EN 15843		
1. Geometrie koryta	1a Půdorysný tvar toku	hlavní	koryto	koryto	morfologie	x
	1b Podélný a příčný profil koryta	hlavní	koryto	koryto	morfologie	x
	2a Rozsah umělého substrátu	hlavní	koryto	koryto	morfologie	x
2. Substrát	2b Směs „přirozeného“ substrátu nebo změněný charakter	vedlejší	koryto	koryto	morfologie	x
3. Vegetace koryta a organické zbytky	3a Péče o vodní vegetaci	vedlejší	koryto			
	3b Rozsah dřevní zbytků, pokud jsou očekávány	vedlejší	koryto			
4. Charakter eroze/nánosů		vedlejší	koryto			
5. Proudění	5a Účinek umělých staveb v úseku toku	hlavní	koryto	koryto	hydrologický režim	
	5b Vlivy úprav v povodí na přirozený charakter proudění	hlavní	koryto	koryto	hydrologický režim	x
	5c Vlivy denních změn průtoku (např. špičkování)	hlavní	koryto	koryto	hydrologický režim	
6. Podélná průchodnost ovlivněná umělými stavbami		hlavní	koryto	koryto	podélná kontinuita	x
7. Struktura a úpravy břehů		hlavní	příbřežní zóna	příbřežní zóna	morfologie	x
8. Typ a struktura vegetace na březích a na přilehlé pevnině		hlavní	příbřežní zóna	příbřežní zóna	morfologie	x
9. Využití údolní nivy		hlavní	inundační území	inundační území	morfologie	
10. Vzájemné působení koryta a inundačního území	10a Stupeň boční průchodnosti řeky a inundačního území	hlavní	inundační území	inundační území	morfologie	
	10b Stupeň bočního pohybu říčního koryta	hlavní	inundační území	inundační území	morfologie	



### 3.2.3 STANOVENÍ TYPŮ VODNÍCH TOKŮ PODLE RSV A REFERENČNÍCH PODMÍNEK V ČR A DALŠÍCH STÁTECH EU

V souvislosti s vymezením vodních útvarů, stanovením aktuálního ekologického stavu vodních toků a aplikací opatření na zlepšení stavu jsou v Evropě zejména od zavedení RSV zpracovávány typologie vodních toků a hledány jejich referenční podmínky (Environment Agency, 2003; Pottgiesser and Sommerhäuser, 2008; Langhammer et al., 2012; Wimmer et al., 2012a), nejčastěji na základě dat z průzkumu a přístupu hledání referenčních lokalit.

V roce 2004 byla souběžně s vymezením vodních útvarů v ČR pro 1. plánovací období zpracována typologie vodních útvarů povrchových vod (Fuksa and Prchalová, 2004). Typologie vycházela ze systému A podle RSV, výchozími parametry tedy byly příslušnost k ekoregionu, nadmořská výška uzávěrového profilu, geologické podloží, plocha povodí k uzávěrovému profilu a jako dodatečný parametr byl doplněn řád toku podle Strahlera. Celkem takto vzniklo 89 typů vodních útvarů kategorie řeka (Fuksa and Prchalová, 2004). Aktualizací vymezení vodních útvarů a typologie v roce 2005 byly vodní útvary v kategorii řeka agregovány do výsledných 39 typů (Fuksa et al., 2005 in Langhammer et al., 2009). V roce 2005 byla vytvořena typologie tekoucích vod v ČR, která odpovídá systému B RSV a je založena na kombinaci parametrů hydroekoregion (vymezeny na základě příslušnosti k povodí a geomorfologických jednotek), nadmořská výška, řád toku dle Strahlera. Postupným slučováním bylo vymezeno 35 výsledných typů vodních toků (Zahrádková, 2005 in Langhammer et al., 2009).

V roce 2009 došlo k novému vymezení typů vodních toků vod pro 2. plánovací období (Langhammer et al., 2009). Typologie byla vytvořena na podkladu 249 904 úseků jemného členění vodních toků DIBAVOD, pro které byly identifikovány 4 nezávislé parametry: úmoří, nadmořská výška, geologie a řád toku podle Strahlera. Typologie odpovídá systému B podle RSV. Nejprve byly na základě prvních třech parametrů stanoveny zonální typy vodních toků postihující základní regionální variabilitu abiotických podmínek pro společenstva vodních toků. Po sloučení okrajových typů bylo takto identifikováno 21 zonálních typů vodních toků. Následně byl do zonální typologie vodních toků promítnut parametr řádovosti podle Strahlera a po sloučení okrajových typů vzniklo jemné členění 47 typů vodních toků. **Tabulka 5** shrnuje kódování parametrů zonální i jemné typologie včetně specifikace jednotlivých kategorií parametrů.

Vzhledem ke skutečnosti, že má být vodní útvar charakterizován pouze jedním typem, uplatňuje se typologie vodních toků v hierarchickém systému postupu vymezení vodních útvarů jako první z kritérií hned po klasifikování kategorií (řeka). Druhou neméně významnou rolí typologie je podklad pro definování typově specifických referenčních podmínek, a to jak biologických, tak hydromorfologických a fyzikálně-chemických. Vodní útvary ČR pro 1. plánovací období byly vymezeny již před zpracováním typologie. V případě zpracování typologie vodních útvarů pro 2. plánovací období byla pro vyhodnocení míry homogenity rozložení typů a možného zachování vymezení vodních útvarů (z 1. plánovacího období) použita pomocná vrstva povodí vodních útvarů, pomocí které byl identifikován dominantní typ charakterizující stávající vodní útvar (Langhammer et al., 2010). Dominance zde představuje podíl délky převládajícího typu toku na délce páteřního toku povodí vodního útvaru. V případě zřetelné dominance jednoho typu (75 % a více) je danému vodnímu útvaru automaticky přiřazen tento dominantní typ. V případě zastoupení dominantního typu 50 – 75 % je na základě podpůrných dat typologie pro celou říční síť rozhodnuto o přiřazení převládajícího typu, případně o rozdělení/převymezení vodního útvaru. V případě zastoupení dominantního typu méně než 50 % je třeba vodní útvar rozdělit/převymezit. Povodí vodních útvarů menší než 100 km<sup>2</sup> je možné na základě homogenity typů a prostorové návaznosti po konzultaci se správci povodí sloučit (Langhammer et al., 2010).

**Tabulka 5 Kódování parametrů zonální a jemné typologie, specifikace kategorií parametrů (Langhammer et al., 2009).**

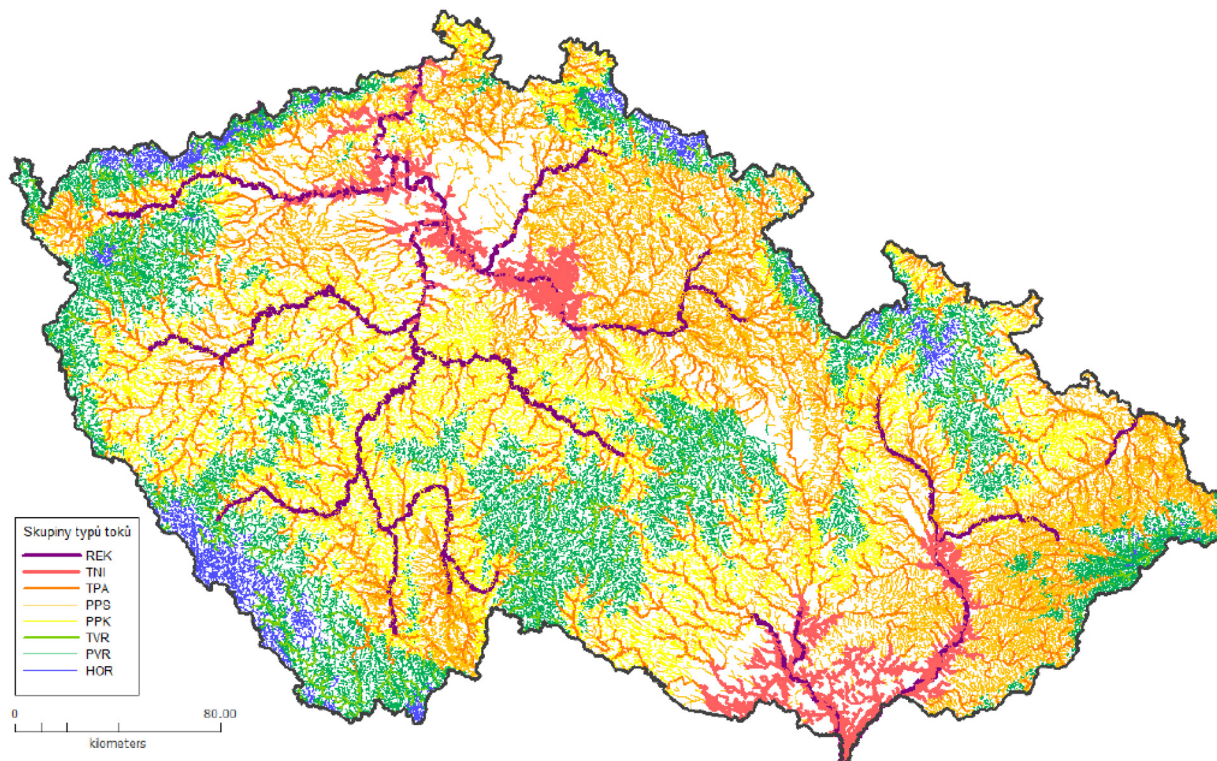
Parametr	Kód	Kategorie
Úmoří	1	Severní moře
	2	Baltské moře
	3	Středozemní moře
Nadmořská výška	1	< 200 m n.m.
	2	200 – 500 m n.m.
	3	500 – 800 m n.m.
	4	800 m n.m. a více
Geologické podloží	1	Krystalinikum a vulkanity
	2	Pískovce, jílovce, kvartér
Řád toku dle Strahlera	1	Potoky (řád 1–3)
	2	Říčky (řád 4–6)
	3	Řeky (řád 7–9)

Při definování typů pro nastavení referenčních podmínek je třeba vycházet z typologického členění tekoucích vod (Langhammer et al., 2009), schváleného Ministerstvem životního prostředí (MŽP), které je však možno pro jednotlivé biologické složky upravit i s ohledem na dostatek dat v jednotlivých typech (Opatřilová et al., 2013). Pro nastavení referenčních podmínek jednotlivých biologických složek byla proto pro každou složku nejprve posouzena relevance jednotlivých parametrů typologie a zastoupení dat v jednotlivých typech. Na základě těchto skutečností byly následně typy vodních toků v rámci jednotlivých biologických složek sloučeny a pro sloučené typy byly poté nastaveny typově specifické podmínky pro jednotlivé biologické složky. Obdobně bylo postupováno i v případě fyzikálně-chemických složek. V případě biologické složky makrozoobentos byly typy vymezeny na základě parametrů nadmořské výšky a řádu toku. Pro nastavení hodnocení typů s odlišnou geologií, která je v ČR velmi heterogenní, nebyl k dispozici dostatek dat, zohlednění úmoří nebylo dostatečně zdůvodnitelné a významné. Sloučením bylo vymezeno 6 finálních typů (Opatřilová et al., 2011a). V případě složky ryby byl z hlediska rozdílů v druhovém složení zohledněn parametr úmoří, jako vhodné parametry byly identifikovány nadmořská výška a řád toku, naopak geologie nebyla potvrzena jako faktor, který by ovlivňoval složení, a z typologie upravené pro společenstva ryb byla vypuštěna (Horký and Slavík, 2011). Vymezeno bylo celkem 13 typů. V případě složky makrofyta se jako významné ukázaly parametry řád toku a nadmořská výška, naopak jako nepodstatné úmoří a geologické podloží. Typologie vodních toků tak byla pro složku makrofyta sloučena do 5 skupin zahrnujících všech 47 vymezených typů vodních toků (Kočí et al., 2011). V rámci složky fytozobentos byl parametr úmoří vyhodnocen jako nepotřebný, geologické podloží významné, ale tak jak bylo vymezeno, zcela nepokrývá požadavky složky fytozobentos. Pro parametry nadmořská výška a řád toku bylo v rámci složky fytozobentos zavedeno plynulé odstupňování vlivu parametru na referenční hodnotu (Marvan et al., 2011). Společenstva fytoplanktonu má smysl hodnotit pouze na tocích řádu 7–9, které byly rozděleny do 3 subtypů dle konkrétního řádu toku. Parametry úmoří, nadmořská výška a geologické podloží do typologie upravené pro společenstvo fytoplanktonu nevstupují (Opatřilová et al., 2011b). V případě fyzikálně-chemických složek ekologického stavu byl jako nadbytečný vypuštěn parametr úmoří a následně identifikováno 21 typů (Rosendorf et al., 2011).

V případě hydromorfologických složek bylo 47 typů jemného členění tekoucích vod (Langhammer et al., 2009) seskupeno do 8 skupin typů toků (Langhammer and Hartvich, 2014). Tato typologie pro účely posouzení hydromorfologických složek využívá kombinaci kategorií parametrů nadmořská výška a řád toku. U vodních toků řádu 1–3 podle Strahlera v nadmořské výšce 200 – 500 m navíc využívá parametr geologické podloží (krystalinikum a vulkanity/pískovce, jílovce, kvartér). Pro ostatní skupiny typů toků není geologické podloží zohledněno, protože výše už je sedimentární podloží zastoupeno jen minimálně



a větší vodní toky už nejsou na podloží tak citlivé. Samostatně napříč fyzicko-geografickými charakteristikami jsou vyčleněny velké řeky, tzn. toky řádu 7 a více, které jsou díky své velikosti a poloze vystaveny významnému antropogennímu ovlivnění, jehož intenzita převažuje nad přirozeným charakterem prostředí. Parametr úmoří není uvažován neboť z hlediska hydromorfologického stavu není rozhodující (Langhammer and Hartvich, 2014). Osm výsledných skupin typů vodních toků pokrývajících říční síť ČR je znázorněno na **Obr. 4**.



**Obr. 4** Skupiny typů vodních toků pro typově specifické hodnocení hydromorfologického stavu (Langhammer and Hartvich, 2014); HOR – Horský tok, PVR – Potok vrchovinný, TVR – Tok vrchovinný, PPK – Potok pahorkatinný na krystaliniku, PPS – Potok pahorkatinný na sedimentu, TPA – Tok pahorkatinný, TNI – Tok nížinný, REK – Řeka.

Typově specifické stanovení referenčních podmínek pro tyto skupiny typů bylo následně provedeno na základě kombinace modelování, expertního odhadu a prostorového určení. Následně byla odvozena skórovací schémata metody HEM (Langhammer, 2014; Langhammer and Hartvich, 2014), kdy pro jednotlivé skupiny typů je hodnocena odchylka od referenčního stavu tak, aby zohledňovala rozsah a intenzitu úprav v jednotlivých ukazatelích hydromorfologické kvality specificky vzhledem k danému typu přírodního prostředí (Langhammer and Hartvich, 2014). Referenční podmínky jednotlivých skupin typů ale nejsou uvedeny.

Metoda EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b) je založena na principu stanovení lokálních referenčních podmínek, hodnocené parametry jsou následně s těmito lokálními referenčními podmínkami porovnávány. Pokud není možné nalézt referenční úseky v zájmovém povodí (ve významně antropogenně ovlivněných povodích), je možné hledat jejich ekvivalent na vodních tocích v některém ze sousedních povodí protékajících krajinou s podobnými fyzicko-geografickými charakteristikami (Matoušková, 2008b), shodný přístup uplatňuje metoda RHQ (Wyžga et al., 2012; Hajdukiewicz et al., 2017).

Pro odvození referenčních podmínek biologických složek i všeobecných fyzikálně-chemických ukazatelů byl v ČR využit přístup stanovení referenčních lokalit na základě dat z existujícího monitoringu. Data

monitoringu hydromorfologických složek pokrývající systematicky území ČR nejsou doposud k dispozici. [Opatřilová et al. \(2013\)](#) uvádí, že za referenční (resp. nejlepší dostupnou) z hydromorfologického hlediska lze obecně považovat lokalitu referenční (resp. nejlepší dostupnou) zároveň pro makrozoobentos i ryby. Žádná z vytvořeného seznamu referenčních a nejlepších dostupných lokalit pro biologické složky však není referenční ani nejlépe dostupná pro všechny biologické složky zároveň.

Hodnocení biologických složek ekologického stavu je v ČR primárně založeno na složce makrozoobentos. V rámci interkalibrace hranic ekologického stavu pro biologickou složku makrozoobentos v EC GIG (Eastern Continental Geographical Intercalibration Group), kde byla ČR zařazena do skupiny spolu se Slovenskem, Rakouskem, Maďarskem, Slovinskem, Rumunskem a Bulharskem, zvolila ČR jako kritéria referenčních lokalit složky makrozoobentos tato: stupeň urbanizace, zemědělství a lesního hospodaření musí být nejnižší možný (využití půdy pro intenzivní zemědělství < 50%) s preferencí neobhospodařovaných niv, dno a břehy neopevněné (akceptováno je pouze zpevnění břehů kořenovým systémem stromové vegetace), existence přirozené vegetace příbřežní zóny a nivy, umožňující laterální migraci mezi korytem a nivou, neovlivněný hydrologický režim včetně neovlivněných průtoků (odběry, kolísání hladiny), žádné nebo pouze minimální vzdutí, hráze nebo nádrže proti proudu toku, fyzikální a chemické podmínky blízké přirozenému pozadí a typově specifickým hodnotám, absence bodových zdrojů znečištění a znečištění nutrienty, bez ovlivnění acidifikací nebo zásaditostí prostředí a nezhoršené fyzikální podmínky, speciálně teplota.

Základem **německé** typologie vodních toků je studie [Schmedje et al. \(2001\)](#). Typologie je založena na systému B podle RSV, typy byly vymezeny na základě příslušnosti k ekoregionům (Alpy, Centrální vysočina, Centrální plošiny), nadmořské výšky (< 200 m, 200–800 m, > 800 m), velikosti povodí (10 – 100 km<sup>2</sup>, 100 – 1000 km<sup>2</sup>, 1000 – 10 000 km<sup>2</sup>, > 10 000 km<sup>2</sup>), geologického podloží na základě vymezení říčních krajín a regionů podle [Briem \(2003\)](#) a sklonu toku.

Přínosem pro definici referenčních podmínek na území Německa byl ekomorfologický průzkum vodních toků realizovaný metodami LAWA – Field Survey ([LAWA, 1999](#)) a LAWA – Overview Survey ([Kern et al., 2002](#)), které se odvíjejí od přírodního stavu srovnatelného s referenčními podmínkami. Aplikací metod byly tedy mimo jiné identifikovány přírodní úseky vodních toků, popř. úseky s velmi malým antropogenním ovlivněním. Referenční lokality byly vyhodnoceny na základě statistické analýzy vzájemné podobnosti lokalit s velmi malým antropogenním ovlivněním.

Autoři popisují typologii jako živý dokument, který bude nadále aktualizován. Nejprve bylo podle tohoto přístupu vymezeno 24 typů vodních toků ([Pottgiesser and Sommerhäuser, 2004](#)), při následné první revizi bylo vymezení zpřesněno na 25 typů: 1 typ pro ekoregion Alp, 3 typy pro podhůří Alp, 8 typů pro Centrální vysočinu, 9 typů pro Centrální plošiny a 4 typy vodních toků nezávislé na příslušnosti k ekoregionu (vymezené napříč několika ekoregiony). Některé z typů byly dále zpřesněny vymezením celkem 13 subtypů ([Pottgiesser and Sommerhäuser, 2008](#)).

Pro všechny typy byly vytvořeny karty typů, které slouží jako názorný příklad typů vodních toků a jejich charakteristik. Karty obsahují nejen popis morfologie toku, charakteru proudění, hydrologie povodí, substrátu dna, hodnoty velikosti povodí, sklonu dna, ale také prahové hodnoty fyzikálně-chemických parametrů (konduktivita, pH, alkalita, celková tvrdost) a detailní popis charakteristických společenstev makrozoobentosu, ryb, makrofyt a fytoobentosu včetně prahových hodnot typově specifických hodnocení biologických složek (popis biocenóz jednotlivých typů není úplný, protože do seznamů byly vybírány zejména druhy se specifickými požadavky habitatu). Detailní popis charakteristik a podmínek a zohlednění všech složek ekologického stavu svědčí o vysoké propracovanosti německé typologie, autoři



však zdůrazňují, že karty typů popisují ideální typické situace, ale nemohou reprezentovat všechny přechodné varianty nebo individuální podmínky (Pottgiesser and Sommerhäuser, 2004, 2008). Uvedené prahové hodnoty charakteristik tak nejsou striktním kritériem pro vyloučení z typu.

Hydromorfologické referenční stavy jsou dále rozpracovány a definovány na úrovni jednotlivých spolkových zemí.

Typologie vodních toků **Rakouska** (Wimmer et al., 2012a) je založena na systému B podle RSV, typy byly vymezeny na základě příslušnosti k 15 bioregionům (Fink et al., 2000), nadmořské výšky (< 200 m, 200 – 499 m, 500 – 799 m, 800 – 1599 m, > 1600 m) a velikosti povodí (< 10 km<sup>2</sup>, 10 – 100 km<sup>2</sup>, 100 – 1000 km<sup>2</sup>, 1000 – 10 000 km<sup>2</sup>). Na základě kombinace těchto parametrů bylo vymezeno 113 typů vodních toků (Wimmer et al., 2012b). Pro každý typ byl vytvořen list („Kurzporträt“) s popisem referenčních podmínek (Obr. 5) prostřednictvím následujících charakteristik: typ údolí, charakter proudění, odtokový režim, průměrný průtok, sklon, řád toku, půdorysný průběh trasy koryta, šířka koryta, charakter substrátu dna (velikost zrna), struktury dna (např. kaskády, tůně, peřeje, lavice), morfologické struktury (např. vodopády a kaskády, šterkové a písčité břehy, eroze břehů – nátrže, mrtvé dřevo). Součástí každého listu jsou také doplňující informace týkající se biologických složek (saprobity, trofie). Samostatně bylo vymezeno 9 velkých řek (Wimmer et al., 2012c). Jako velké řeky byly vymezeny vodní toky řádu 7 a vyššího a/nebo s povodím > 2 500 km<sup>2</sup> a/nebo průměrným průtokem > 50 m<sup>3</sup>/s. Zároveň byl samostatně vytvořen popis speciálních říčních typů (např. soutěsky, vodopády, intermitentní toky, termální prameny aj.). Základem vymezení referenčních úseků bylo mapování ekomorfologických struktur celého Rakouska, přičemž pro definici referenčních stavů byly použity jen úseky v I. a II. jakostní třídě. Celkem bylo Univerzitou Graz statisticky vyhodnoceno 6500 úseků (Wimmer et al., 2012a).

Typy vodních toků **Slovenska** byly vymezeny na základě příslušnosti k ekoregionu (Karpaty, Panonská pánev), nadmořské výšky (< 200 m, 200 – 500 m, 500 – 800 m, > 800 m) a plochy povodí (10 – 100 km<sup>2</sup>, 100 – 1000 km<sup>2</sup>, > 1000 km<sup>2</sup>). Všechny tyto parametry byly testovány z hlediska vlivu na biologická společenstva. Čtvrtým testovaným parametrem byla geologie, nebylo však zatím možné jednoznačně vyhodnotit její vliv na biotu, proto prozatím nebyla do typologie začleněna (Bartík et al., 2008). Vymezeno bylo 22 typů vodních toků. Velké toky se dále dělí na podtypy na základě změn v průtocích nebo sklonu koryta (Bartík et al., 2008).

Při odvozování definice referenčních podmínek z pohledu hydromorfologie pro jednotlivé typy vodních toků se vycházelo z hydromorfologického průzkumu realizovaného Slovenským Hydrometeorologickým Ústavem v referenčních lokalitách v letech 2004 – 2005 (Magulová et al., 2007). Jako referenční lokality byly zvoleny úseky, které dosáhly prvního, popř. druhého stupně hydromorfologické kvality. Parametry pro odvození referenčních podmínek byly rozděleny do 3 skupin (v souladu s požadavky na hydromorfologické složky stanovené v RSV): hydrologický režim (dynamika toku, typ proudění a rychlosti proudění při Q<sub>355</sub>, propojení s podzemní vodou), průchodnost vodního toku v podélném profilu (max. výška migrační bariéry 0,3 m) a vybrané morfologické parametry (půdorysný průběh trasy koryta, průměrná šířka a variabilita šířky koryta, variabilita hloubek, substrát dna, struktura a charakter příbřežní zóny, stav břehů a zastínění úseků; Magulová et al., 2007). Referenční podmínky pro jednotlivé typy byly následně určeny na základě výsledků průzkumů v referenčních lokalitách. Metodika pro hodnocení hydromorfologických charakteristik (Lehotský and Grešková, 2007) je založena na postupech německé metodiky pro velké toky (Kern et al., 2002) a je upravena tak, aby vyhovovala podmínkám na území Slovenska. Hydromorfologický průzkum je koncipován hierarchicky (Lehotský, 2004), je realizován v rámci říční jednotky o délce 200 – 1000 m v závislosti na šířce koryta, která je reprezentativním příkladem úseku a dělí se na 5 subjednotek shodné délky. Morfologické a hydrologické parametry jsou posuzovány odděleně (Lehotský and Grešková, 2007; Magulová et al., 2007).

## TYP 1-4-3 | Kurzporträt

Bioregion	Nummer	
vergleicherte Zentralalpen	1	Epirithral
Seehöhe	Klasse	
800–1.599 m	4	1,25
Einzugsgebiet	Klasse	
101–1.000 km²	3	I-II A
		oligotroph

**Abflussregime:** glazial und nival geprägt

**Wasserführung:** 5–10 m³/s

**Flussordnungszahlen:** 4. bis 6. Ordnung

**Talform:** Kerb- und Kerbsohntal

**Gefälle:** mittel prägend

**Linienführung:** gestreckt, vereinzelt gewunden und verzweigt

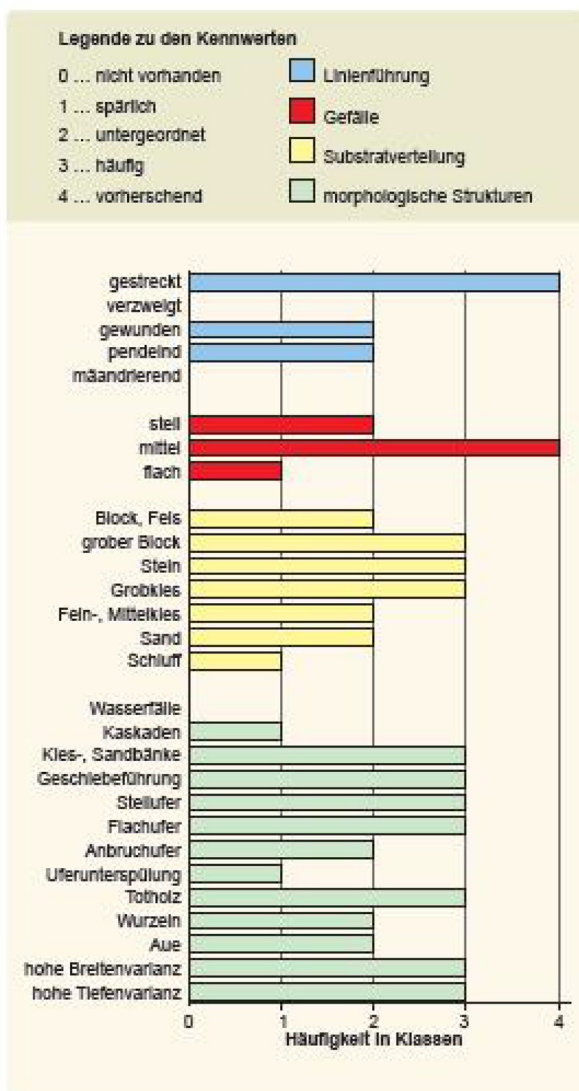
**Gewässerbreite:** < 1–5 m

**Fließverhalten:** rasch fließend bis turbulent

**Prägende morphologische Strukturen:**  
Kaskaden, Flach- und Steiluferbereiche dominierend, gut verzahnte Uferböschungen, hohe Breiten- und Tiefenvariabilität, stark geschiebeführend, ausgeprägte Schotterbänke mit Totholzanteilen

**Gewässersohle:** Block und Stein und in etwas geringeren Anteilen Grobkies, Sand; Schluff untergeordnet

**Sonstiges:** entspricht Typ 1-4-2 („Verlängerung der Gewässer“)



## TYP 1-4-3 | Beispielfotos



Obr. 5 Ukázka rakouského listu typu s popisem referenčních podmínek (Wimmer et al., 2012b).

## 4 METODICKÝ POSTUP, ZDROJOVÁ DATA A LOKALITY PRO VÝVOJ A OVĚŘENÍ POSTUPU

Utváření přístupu pro stanovení typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek pro vodní toky na území ČR se odvíjelo od požadavků RSV popsanych v kapitole 3.2.2, existující typologie tekoucích vod (Langhammer et al., 2009) a reflektovalo zkušenosti s aplikací existujících metod pro hodnocení hydromorfologického stavu vodních toků vyvinutých pro území ČR. Zároveň byl však v celé práci kladem důraz na zohlednění odborných poznatků fluviální geomorfologie a zahraničních přístupů ke klasifikacím vodních toků a posuzování antropogenních vlivů na fluviální systém bez ohledu na požadavky RSV. Smyslem bylo vytvoření snadno aplikovatelného přístupu postihujícího specifika fyzicko-geografických podmínek území ČR bez nadměrné generalizace skutečností pro účely reportingu podle RSV.

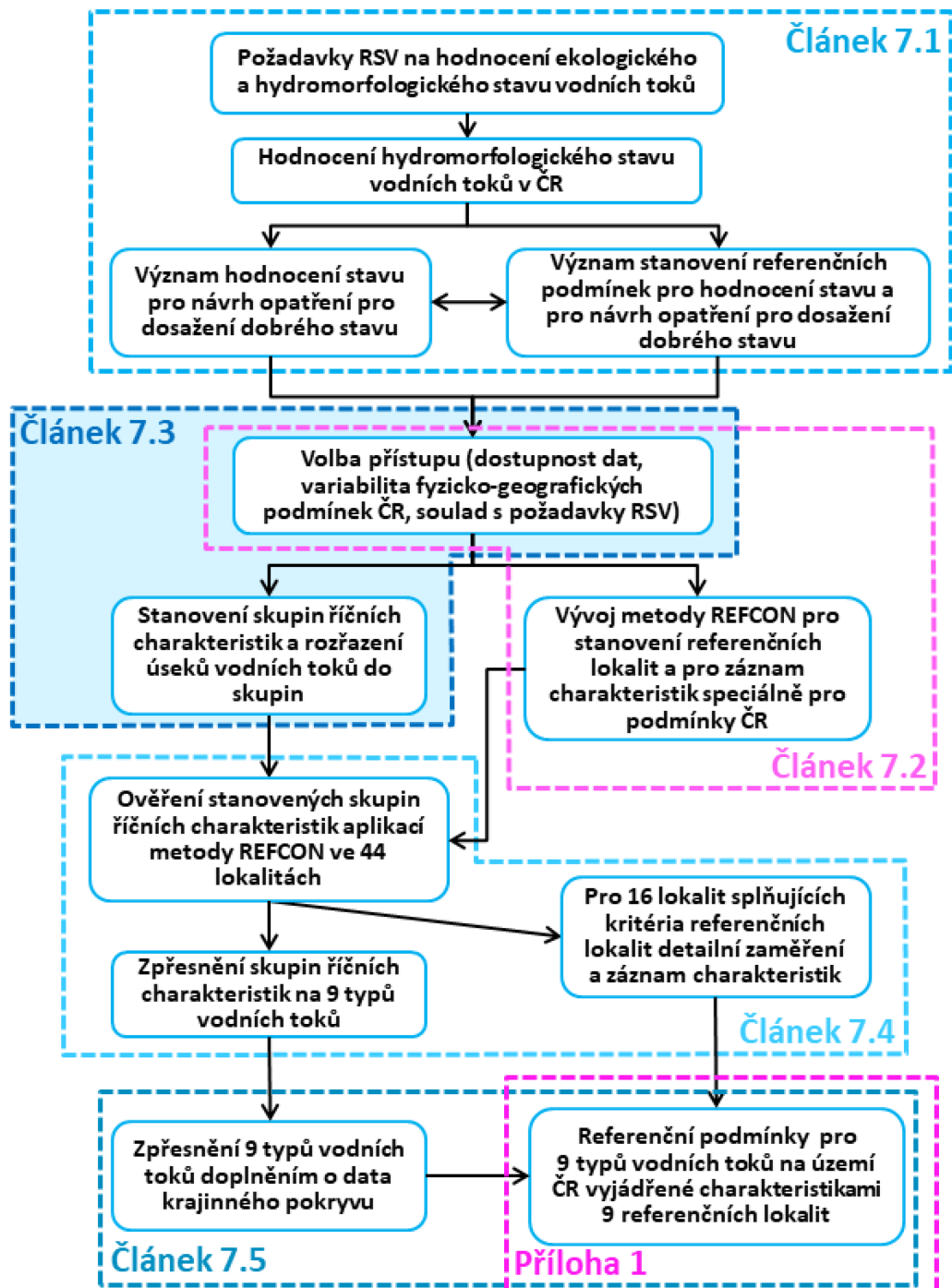
Základním teoretickým předpokladem stanovení typově specifických referenčních podmínek bylo zohlednění charakteristik nadmořské výšky a řádu toku dle Strahlera. Vzhledem k četným zarovnaným povrchům v pramenných oblastech ČR (Šumava, Krušné hory) se jako vhodné pro definici referenčních podmínek jevílo rozšíření charakteristiky nadmořská výška o charakteristiku sklon dna údolí. Za určující byly považovány rovněž charakteristiky odtokového režimu (včetně kapacity koryta), charakter proudění zejména v souvislosti s režimem sedimentů, propojenost s podzemní vodou a možnost komunikace koryta s nivou. Jako významné se jevíly charakteristiky migrační prostupnosti toku a ukazatele postihující míru antropogenního ovlivnění břehové vegetace, zastínění koryta toku a charakteru příbřežní vegetace.

### 4.1 VÝZNAM STANOVENÍ REFERENČNÍCH PODMÍNEK

Na základě výsledků aplikace metod EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b) a HEM (Langhammer, 2007, 2008) a návrhu konkrétních revitalizačních opatření z předchozích prací autorky byla provedena predikce hydromorfologického stavu vodního toku po realizaci navržených revitalizačních opatření včetně zhodnocení rizik výsledného efektu revitalizace za účelem prověření, zda by realizací navržené revitalizace bylo podle metod EcoRivHab a HEM dosaženo dobrého stavu hydromorfologických složek – cíle RSV. Metody EcoRivHab a HEM prostřednictvím hodnocených parametrů reflektovaly význam navržených revitalizačních opatření a jejich aplikace se jevíla proveditelná plošně na celém území ČR. Podrobněji je problematika rozpracována v článku v kapitole 7.1. Naopak, pro hodnocení stavu a návrh revitalizačních opatření bylo nezbytné stanovení referenčních podmínek, které bylo na základě popisu obou metod velmi obtížně uchopitelné a i na lokální úrovni časově náročné. Hledání referenčních úseků pomocí terénního průzkumu povodí znamenalo stále nové skutečnosti, které bylo nutné zohlednit při aplikaci metod. Stanovení referenčních podmínek jako cílového stavu revitalizace pak znamenalo vytvoření samostatného přístupu z pohledu mapovatele náročného odborně i z hlediska výběru vhodných způsobů stanovení (zaměření) charakteristik. Vytvoření jednoduše aplikovatelného přístupu pro stanovení referenčních podmínek a stanovení referenčních podmínek se tedy z hlediska hodnocení stavu i návrhu opatření na úrovni ČR jevílo jako velmi důležité. Význam definice referenčních podmínek zdůrazňují i výstupy provedeného hydromorfologického průzkumu vodních toků (Matoušková, 2003; Matoušková (ed.), 2008c; Weiss et al., 2008; Šípek et al., 2010). Zároveň výstupy provedeného hydromorfologického výzkumu v odlišných fyzicko-geografických podmínkách ČR poukázaly na význam stanovení typových specifíků referenčních vodních toků.



Zásadní kroky metodického postupu a odkazy na jednotlivé články, které se danou částí zabývají, jsou shrnuty v **Obr. 6**.



Obr. 6 Shrnutí metodického postupu práce a odkazy na jednotlivé články, které se danou částí zabývají.

## 4.2 METODA STANOVENÍ REFERENČNÍCH LOKALIT A ZÁZNAMU CHARAKTERISTIK

Pro stanovení hydromorfologických referenčních podmínek byl zvolen přístup prostorového určení na základě dat z průzkumu referenčních lokalit. Tento přístup byl vybrán s ohledem na nedostupnost

aktuálních i historických dat, která by systematicky pokrývala území, a nároky na vytvoření funkčního modelu na úrovni státu. Zároveň byly zohledněny zkušenosti evropských států, které již referenční podmínky pro hydromorfologické i biologické složky v obdobných podmínkách odvozovaly. V neposlední řadě bylo prověřováno, zda je možné nalézt na území ČR dostatek referenčních lokalit z pohledu hydromorfologie.

Za účelem stanovení referenčních lokalit a určení hydromorfologických charakteristik pro stanovení typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek vodních toků ve fyzicko-geografických podmínkách ČR byla vyvinuta metoda REFCON. Metoda REFCON je založená na datech získaných nebo ověřených terénním průzkumem a měřeními v referenčních lokalitách. Určení lokality jako referenční je podmíněno současným splněním těchto kritérií:

- neovlivněný hydrologický režim, tzn. žádné významné vodní nádrže nad referenční lokalitou, žádná soustava 2 a více rybníků v rámci vodního útvaru nad referenční lokalitou, žádné významné odběry, odklony vody nebo špičkování v referenční lokalitě, žádné příčné překážky nad 0,5 m v referenční lokalitě,
- neupravené břehy, dno a trasa koryta v referenční lokalitě,
- přirozená vegetace příbřežní zóny v referenční lokalitě, tzn. les, trvalý travní porost, mokřad, skalní výstup nebo povrch ponechaný přirozené sukcesi.

Všechna tato kritéria jsou nejprve prověřována na základě aktuálních (ZABAGED), historických (2. vojenské mapování) a vodohospodářských map a leteckých snímků. Následně jsou kritéria ověřena terénním průzkumem lokality. Referenční lokalita je úsek toku o délce nejméně 500 m, uvedená kritéria však musí být splněna zároveň pro úsek 500 m nad a 200 m pod referenční lokalitou. Metoda REFCON je tedy aplikována na úsek o délce nejméně 1200 m. Součástí terénního průzkumu lokality je také záznam kvalitativních charakteristik trasy koryta, podélné konektivity toku, příčných profilů, hydrologického režimu a vegetace reprezentujících celý úsek (1200 m). V lokalitách, které splnily kritéria referenční lokality je následně proveden detailní terénní průzkum, který zahrnuje: zaměření minimálně 5 charakteristických příčných profilů včetně jejich detailního vyhodnocení ve vzdálenosti 50 m/100 m po a proti proudu (v závislosti na šířce koryta toku), hodnocení charakteru sedimentu na základě aplikace metody „Pebble count“ (Wolman, 1954) a zaměření podélného profilu lokality včetně záznamu charakteristik dna. Zaznamenané charakteristiky a výsledky měření následně slouží pro stanovení typově specifických referenčních podmínek. Podrobně je metoda REFCON popsána v článku v kapitole 7.2, zároveň je úplný popis metody REFCON včetně formuláře pro záznam charakteristik v příloze 2.

### 4.3 ROZŘAZENÍ VODNÍCH TOKŮ DO SKUPIN NA ZÁKLADĚ DISTANČNÍCH DAT

Dalším významným krokem, který byl podrobně rozpracován v článku v kapitole 7.3, bylo rozřazení vodních toků do skupin na základě jejich přirozeného chování. V rámci tohoto kroku bylo třeba:

1. nalézt s využitím statistických analýz parametry významné z hlediska přirozeného chování vodních toků, které zároveň zohledňují variabilitu fyzicko-geografických podmínek ČR,
2. stanovit prahové hodnoty parametrů pro vymezení teoretických typů a na základě poznatků fluvialní morfologie rozřadit teoreticky vymezené typy do skupin,
3. stanovené skupiny říčních charakteristik validovat pomocí terénního průzkumu.

V rámci výše uvedeného bodu 1 byly nejprve vodní toky (vodní útvary v kategorii řeka) rozděleny na úseky pomocí rozvodnic pro 4424 povodí vymezených Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) k roku 2013 pro účely hydrologického monitoringu a předpovědi. Pro každý ze 4424 úseků byly v souladu

s doporučeními EN 14614 (CEN, 2004) a RSV a na základě dostupných dat dostatečné kvality a podrobnosti stanoveny a dále testovány tyto parametry: maximální a minimální nadmořská výška úseku (z DMT s rozlišením 10 x 10 m), dále byla na základě GIS podkladů určena délka úseku, délka údolí a přiřazen řád toku dle Strahlera (1957) v závěrovém profilu úseku, dopočítán byl sklon toku (rozdíl maximální a minimální nadmořské výšky ku délce úseku), sklon údolí (rozdíl maximální a minimální nadmořské výšky ku délce údolí), sinuosita (poměr délky úseku ku délce údolí) a nadmořská výška úseku (průměrná hodnota maximální a minimální nadmořské výšky úseku). Dále byly pro jednotlivé úseky doplněny charakteristiky hydrologického režimu: měsíc s nejvyšším průměrným průtokem a rozkolísanost průtoků (stanovená jako poměr průměrných průtoků měsíce s nejvyšším a nejnižším průměrným průtokem) za období 2003–2012. Následně byly vyloučeny úseky velkých nížinných řek (řádu 7–9) s předpokládaným významným antropogenním ovlivněním a úseky v pramenných oblastech (řádu 1–2) vykazující vysokou variabilitu parametrů, úseky zatopené vzdušným vodním nádrží a modifikované úseky s hodnotou sinuosity 1,0. Do statistických analýz tak vstupovalo 10 parametrů za 3197 úseků vodních toků o celkové délce 15 636 km. Za účelem redukce počtu původních proměnných a výběru vzájemně nezávislých parametrů vystihujících chování vodních toků byla na výše uvedené parametry za 3197 úseků vodních toků aplikována analýza hlavních komponent (PCA). Pro ověření vzájemných vazeb mezi parametry byla použita metoda aglomerativního hierarchického shlukování (AHC). Vztahy mezi jednotlivými parametry byly dále posuzovány pomocí korelací a regresí. Na základě výsledků analýz byly jako nezávislé parametry popisující přirozené chování vodních toků vybrány parametry nadmořská výška, sinuosita, sklon údolí a řád toku. Při výběru parametrů pro rozřazení vodních toků do typů byl zohledňován jejich význam pro identifikaci přirozeného chování vodních toků. Sklon údolí na rozdíl od sklonu toku není ovlivněn zkrácením a jinými modifikacemi říční sítě. Parametr nadmořská výška zohledňuje do značné míry klimatické charakteristiky (srážky a teploty) a částečně tedy i odtokový režim. Naopak parametry měsíc s nejvyšším průměrným průtokem a rozkolísanost průtoků jsou do určité míry ovlivněny přítomností vodních nádrží a navíc zřejmě s ohledem na počet sledovaných profilů vysvětlují variabilitu souboru méně než parametr nadmořská výška. Sinuosita reprezentuje trasu koryta toku i podélný profil a lze ji využít k identifikaci upravených úseků vodních toků. Řád toku je úpravami nedotčený parametr vhodně vyjadřující velikost.

Na základě histogramů a literatury byly stanoveny prahové hodnoty parametrů (bod 2 výše) následovně: nadmořská výška (< 300 m, 300 – 599 m, ≥ 600 m), sinuosita (1,00 – 1,19, 1,20 – 1,49, 1,50 – 3,50), sklon údolí (< 0,50 %, 0,50 – 1,79 %, ≥ 1,80 %). Kombinací 3 kategorií těchto 3 parametrů vzniklo 27 teoretických typů vodních toků. Teoretické typy byly přiřazeny ke všem úsekům vodních toků vyjma úseků zatopených vzdušným vodním nádrží. Teoretické typy byly dále sloučeny v rámci parametru sinuosita, který je velmi významný pro odlišení přirozené a upravené trasy toku, ale zároveň v závislosti na délce a vymezení posuzovaného úseku vykazuje vysokou variabilitu. Počet teoretických typů se tím snížil na 17 (**Tabulka 6**). Sinuosita byla vždy posuzována společně se sklonem údolí. Při kombinaci podmínek sklonu údolí do 0,5 % a sinuosity do 1,2 byl úsek toku považován za *pravděpodobně upravený*, v případě sklonu 0,5 – 1,79 % a sinuosity do 1,2 byl úsek toku považován za *potenciálně upravený*.

Jako další zásadní parametry přirozeného chování vodních toků byly posuzovány velikost toku vyjádřená řádem toku a litologie vyjádřená jako příslušnost úseku ke geomorfologické jednotce Česká vysočina nebo Západní Karpaty.

Kombinací kategorií vybraných parametrů uvedenou v **Tabulce 6** byly úseky vodních toků rozřazeny do 7 skupin říčních charakteristik (A–G) – **článek v kapitole 7.3**. Skupiny vodních toků A, B, C, E určené jako neovlivněné byly charakterizovány na základě detailních výstupů získaných terénním průzkumem v 6 referenčních lokalitách. Výstupy z terénního průzkumu 6 referenčních lokalit znamenaly řadu nových informací a potvrdily, že je nezbytné rozdělení úseků vodních toků do skupin na základě dat z mapových

podkladů ověřit a popř. zpřesnit terénním průzkumem. (Skupina D byla taktéž určena jako neovlivněná, vzhledem k minimálnímu zastoupení však pro ni v dané chvíli nebyla stanovena referenční lokalita).

**Tabulka 6 Princip určení skupin říčních charakteristik, typů vodních toků a nejbližšího typu neovlivněného toku na základě prahových hodnot vybraných parametrů a zastoupení jednotlivých typů na celkové délce posuzovaných vodních toků na území ČR; zvýrazněno sloučení kategorií v rámci parametru sinuosita.**

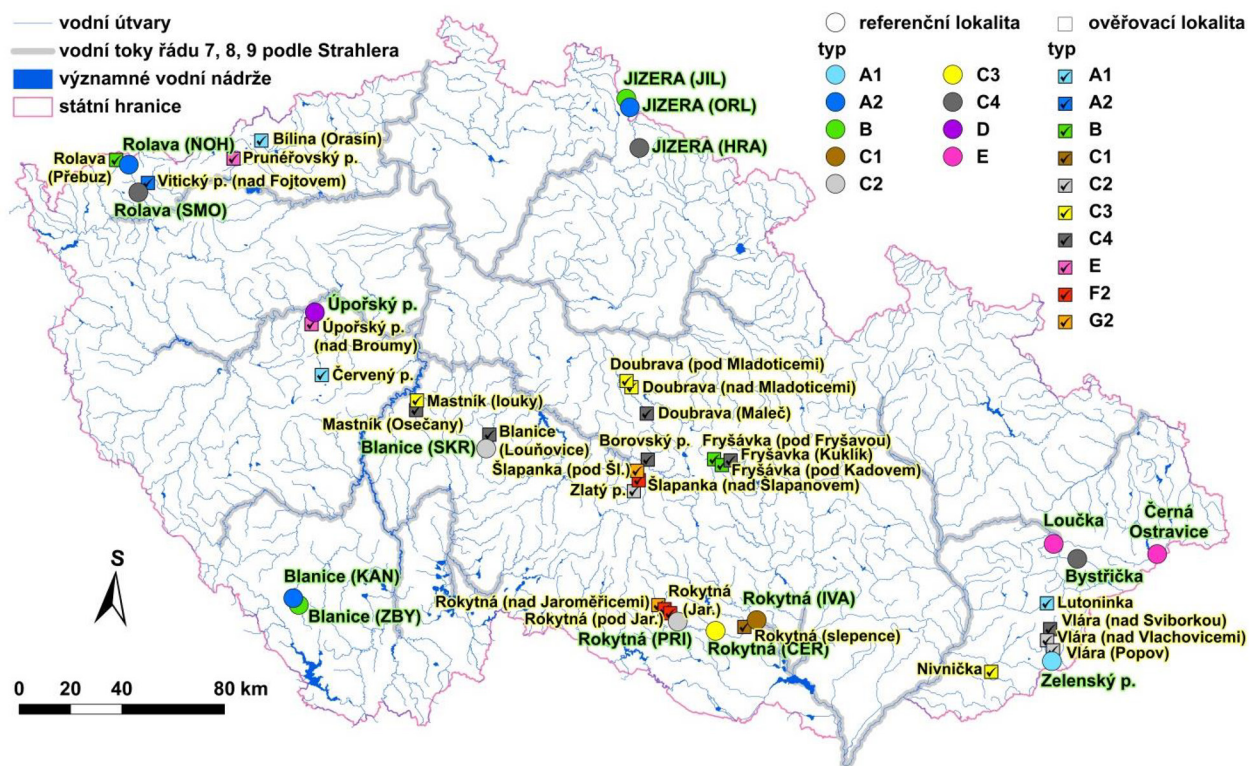
Prahové hodnoty vybraných parametrů pro odvození typů vodních toků			Skupiny říčních charakteristik	Typy vodních toků	Nejbližší typ neovlivněného toku	Zastoupení typů na celkové délce posuzovaných toků
Nadmořská výška	Sinuosita	Sklon údolí				
300–599 m	1,00–1,19	≥ 1,80 %	A	A1		7,1 %
≥ 600 m		0,50–1,79 %		A2		
≥ 600 m	<b>1,00–1,49</b>	≥ 1,80 %		B		B
≥ 600 m	≥ 1,50	≥ 1,80 %				
	≥ <b>1,20</b>	< 0,5 %				
≥ 600 m	≥ <b>1,20</b>	0,50–1,79 %	C	C1		10,1 %
	< 300 m	≥ <b>1,20</b>		C2		10,2 %
300–599 m	≥ <b>1,20</b>	< 0,5 %		C3		4,7 %
< 300 m	≥ <b>1,20</b>	0,50–1,79 %		C4		19,1 %
< 300 m	<b>všechny hodnoty</b>	≥ 1,80 %	D	D		0,5 %
300–599 m	1,20–1,49	≥ 1,80 %	E	E		9,2 %
	≥ 1,50					
< 300 m	1,00–1,19	< 0,5 %	F	F	C1	15,9%
300–599 m	1,00–1,19	< 0,5 %				
< 300 m	1,00–1,19	0,50–1,79 %	G	G	C3	12,1 %
300–599 m	1,00–1,19	0,50–1,79 %				

#### 4.4 VÝBĚR LOKALIT A JEJICH VÝZNAM V POSTUPU PRÁCE

S ohledem na cíl práce bylo širěji vymezenou zájmovou oblastí území ČR, resp. vodní útvary v kategorii řeka na území ČR podle Evidence vodních útvarů povrchových vod MŽP ČR k roku 2013. Vodní útvary v kategorii řeka odpovídají významným vodním tokům podle vyhlášky 178/2012 Sb., kterou se stanoví seznam významných vodních toků a způsob provádění činností souvisejících se správou vodních toků. Posuzované vodní toky jsou znázorněny v **Obr. 7**.

Rozdělení úseků toků do 17 teoretických typů a stanovení 7 skupin říčních charakteristik bylo ověřeno prostřednictvím terénního průzkumu ve 44 lokalitách vybraných na základě předběžného posouzení mapových podkladů a dostupných dat tak, aby pokrývaly variabilitu fyzicko-geografických podmínek vodních toků na území ČR (**Obr. 7**). V každé ze 44 lokalit byla aplikována metoda REFCON, 16 ze 44 lokalit bylo určeno jako referenční. Pro referenční lokality byl proveden detailní záznam charakteristik a měření podle metody REFCON, které dále sloužily ke stanovení typově specifických referenčních podmínek. Nad rámec 44 lokalit bylo namátkově v terénu ověřováno určení *pravděpodobně upravených a potenciálně upravených* úseků, které se ukázalo jako opodstatněné. Problematika ověřování terénním průzkumem se prolíná články v kapitolách 7.2, 7.3, 7.4, 7.5.





Obr. 7 Rozložení lokalit ověřených terénním průzkumem a měřeními na území ČR a jejich příslušnost k typům vodních toků.

#### 4.5 OVĚŘENÍ A ZPŘESNĚNÍ TYPŮ VODNÍCH TOKŮ TERÉNNÍM PRŮZKUMEM

Výsledkem terénního průzkumu bylo zpřesnění 7 skupin říčních charakteristik na 9 typů neovlivněných vodních toků a 2 typy *pravděpodobně* nebo *potenciálně upravené*. Vymezení jednotlivých typů a procentuální zastoupení jednotlivých typů na celkové délce posuzovaných vodních toků na území ČR shrnuje **Tabulka 6**. V případě *pravděpodobně* a *potenciálně upravených* úseků vodních toků (typ F a G) je nemožné objektivně posoudit charakteristiky přirozeného chování vodních toků. Referenční podmínky by však měly být stanoveny pro všechny typy vodních toků. Pro úseky vodních toků typu F a G byl proto stanoven a uplatněn princip odvození nejbližšího typu neovlivněného vodního toku. Nadmořská výška a sklon údolí, tzn. 2 z 3 parametrů, nejsou ovlivněny úpravami koryt vodních toků. Naopak parametr sinuosity je úpravami koryt silně ovlivněn. Nejbližší typ neovlivněného toku byl proto odvozen jako typ stejné kategorie nadmořské výšky a sklonu údolí. Za těchto podmínek vždy existuje pouze jeden nejbližší typ neovlivněného toku. Princip odvození nejbližšího typu neovlivněného toku je naznačen v **Tabulce 6**. Mapové znázornění výsledných typů vodních toků včetně nejbližších typů neovlivněných vodních toků, zastoupení typů vodních toků v rámci geomorfologických jednotek Česká vysočina a Západní Karpaty a v rámci vodních toků řádu 7–9 je podrobněji zpracováno v **článku v kapitole 7.4**.

#### 4.6 VÝZNAM KRAJINNÉHO POKRYVU PŘÍBŘEŽNÍ ZÓNY

Dalším krokem, detailně rozpracovaným v **článku v kapitole 7.5**, bylo posouzení možností využití podrobných dat krajinného pokryvu příbřežní zóny pro zpřesnění popisu typů vodních toků a referenčních podmínek z pohledu hydromorfologie. Zdrojem dat krajinného pokryvu byla Konsolidovaná vrstva ekosystémů (AOPK ČR, 2013), bezešvá vrstva krajinného pokryvu rozděleného do 41 kategorií



zahrnující území celé ČR, která byla vytvořena jako podklad pro mapování ekosystémových služeb. Mapovací zrna se blíží detailu rozlišitelnému člověkem při terénním mapování (AOPK ČR, 2013; Hönigová and Chobot, 2014). Z dat krajinného pokryvu byl pro každý posuzovaný úsek vodního toku vytvořen „round buffer“ ve vzdálenosti 50 m a 200 m (od vodního toku vyjádřeného linií). Z původních 4424 úseků byly vyloučeny úseky zatopené vzdušným vodním nádrží a z důvodu zásadních překryvů bufferů také úseky kratší než 500 m. Pro každý z 3937 bufferů ve vzdálenosti 50 m a 200 m, které vstupovaly do dalších analýz, byla spočítána celková plocha každé kategorie krajinného pokryvu zastoupená v daném bufferu. Vytvořený buffer 50 m podél posuzovaných vodních toků byl tvořen 741 401 polygony a buffer 200 m obsahoval 2 232 094 polygonů. Pro účely dalších analýz byly kategorie krajinného pokryvu slučovány. S využitím deskriptivní statistiky (krabicových grafů) a vizualizace sloupcovými grafy bylo posuzováno zastoupení kategorií krajinného pokryvu v rámci každého bufferu ve vztahu k typům vodních toků stanoveným pro jednotlivé úseky a dále ve vztahu k řádu toku (pro buffer 50 m i 200 m). Na úrovni podrobnosti dat z terénního průzkumu, jehož cílem bylo opět ověřit výstupy získané za vodní toky na území ČR, byla aplikována PCA analýza a pomocí grafů biplot posuzovány vztahy mezi charakteristikami 88 příčných profilů získanými v 16 referenčních lokalitách, stanovenými typy vodních toků a kategoriemi krajinného pokryvu.

V průběhu celé práce byly kartografické a prostorové analýzy zpracovány v ArcGIS 10.0 a 10.1, statistické analýzy byly zpracovány s využitím nástroje XLStat.

## 4.7 STANOVENÍ REFERENČNÍCH PODMÍNEK

Metoda REFCON byla průběžně testována a aplikována ve 44 lokalitách vybraných na základě předběžné konzultace se správci povodí a posouzení dostupných mapových podkladů. Již v této fázi posuzování kritérií bylo mnoho potenciálních referenčních lokalit vyloučeno. Terénním průzkumem se opakovaně potvrdilo, že dostupné mapové podklady neevidují všechny úpravy koryt vodních toků, příčné překážky na tocích ani významné odběry (např. náhony nebo převody vody). Řada dalších potenciálních referenčních lokalit byla tedy vyloučena na základě následného terénního průzkumu.

Doposud bylo identifikováno 16 referenčních lokalit splňující kritéria metody REFCON, ve kterých byl v období 2013 – 2016 proveden detailní záznam charakteristik a měření za účelem stanovení typově specifických referenčních podmínek. Z 16 referenčních lokalit bylo následně vybráno 9 typově specifických (tzn. pro každý z 9 typů neovlivněných vodních toků jedna reprezentující lokalita), pro které byly na základě syntézy všech poznatků a výsledků popsány typově specifické referenční podmínky. Referenční podmínky pro 9 typů neovlivněných vodních toků jsou shrnuty v kapitole 5.4, listy referenčních podmínek jsou zpracovány v **příloze 1**. Pro typy *pravděpodobně* a *potenciálně upravených* úseků vodních toků (F a G) nebyly stanovovány referenční podmínky, ale byly pro ně odvozeny nejbližší typy neovlivněných vodních toků, pro které byly referenční podmínky stanoveny.

## 5 SHRNUÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

### 5.1 METODA REFCON

Metoda REFCON pro stanovení referenčních lokalit a určení hydromorfologických charakteristik významných pro stanovení typově specifických referenčních hydromorfologických podmínek vodních toků v podmínkách ČR je v souladu s postupem pro stanovení referenčních podmínek (European Commission, 2003) uvedeným na Obr. 3. Je založena na stanovených typech vodních toků, aplikuje ekologická kritéria, resp. „screening“ antropogenních vlivů, na základě rozhodnutí o dostupnosti potenciálních referenčních lokalit identifikuje síť referenčních lokalit a způsob záznamu charakteristik, které dále slouží ke stanovení typově specifických referenčních podmínek. Stejně jako německý (Pottgiesser and Sommerhäuser, 2004, 2008), rakouský (Wimmer et al., 2012b) a slovenský (Magulová et al., 2007) přístup je metoda REFCON založena na datech z referenčních lokalit. Zatímco pro Německo, Rakousko a Slovensko je velmi dobrý nebo dobrý hydromorfologický stav důležitým kritériem pro stanovení referenčních lokalit, pro území ČR zatím není systematické hodnocení hydromorfologického stavu k dispozici. Proto je prvním krokem stanovení referenčních lokalit podle metody REFCON „screening“ antropogenních vlivů v podobě splnění stanovených kritérií. V rámci testování metody REFCON bylo ověřeno, že lokality stanovené jako referenční odpovídají při hodnocení podle metody HEM (Langhammer, 2007, 2008) velmi dobrému, popř. dobrému hydromorfologickému stavu.

#### Dostupnost referenčních lokalit

Vzhledem ke skutečnosti, že je na území ČR evidováno 74 866 vodních ploch (ZABAGED; ČÚZK, 2013) a přibližně 6600 příčných překážek na vodních tocích vyšších než 1 m (Slavíková et al., 2014), bylo dle očekávání ovlivnění hydrologického režimu největší komplikací hledání referenčních lokalit. Z celkové délky posuzovaných vodních toků bylo 33,8 % ovlivněno významnými vodními nádržemi. Vliv významné vodní nádrže nebo soustavy 2 a více rybníků v rámci vodního útvaru se projevil na 63,2 % délky posuzovaných vodních toků, které se tím na základě stanovených kritérií staly nevhodné pro stanovení referenčních lokalit.

Pro stanovení referenční lokality je požadován neovlivněný úsek vodního toku v délce minimálně 1200 m, resp. délka referenční lokality minimálně 500 m. Tyto hodnoty se na základě terénního průzkumu ukázaly jako vhodné z hlediska dostupnosti (možnosti nalezení), reprezentativnosti i časové náročnosti terénního průzkumu. Např. již 2 km dlouhé neovlivněné úseky vodních toků se v podmínkách ČR hledají výrazně obtížněji.

Pro stanovené typy neovlivněných vodních toků se na území ČR nachází dostatečně reprezentativní množství referenčních lokalit. Dostupnost referenčních lokalit se ale typ od typu výrazně liší. Zatímco pro typy A2, B, C4 lze referenční lokality nalézt snadno, pro typy A1 a E se referenční lokality hledají o poznání obtížněji, jedná se zpravidla o horní toky v užších údolích ovlivněné ve značné délce vedením silnic a železnic, popř. rozptýlenou zástavbou. Náročnější se ukázalo také hledání referenční lokality pro typ C1 často protékající intenzivně obhospodařovanou zemědělskou krajinou. Dolní toky velkých řek (řádu 7–9) protékající krajinou již po staletí ovlivněnou intenzivní antropogenní činností byly ve značné míře označeny jako pravděpodobně upravené (typ F) a příslušné referenční lokality se tak hledají na vodních tocích nejbližších typů neovlivněných vodních toků (C1 nebo C2).

Metoda REFCON je zaměřena zejména na hydromorfologickou kvalitu vodního toku, posouzení kvality vody není součástí metody, resp. absence významného komunálního, průmyslového nebo zemědělského znečištění vod je teoretickým předpokladem, ale nikoli důvodem pro vyloučení lokality.

### Odůvodněnost detailního terénního průzkumu

Metoda REFCON byla navržena tak, aby bylo možné relativně rychle a snadno rozhodnout, zda lokalita může být považována za referenční nebo nikoli a až poté věnovat čas záznamu detailních charakteristik příčných profilů, podélného profilu a sedimentu.

Za zásadní z hlediska popisu referenčních podmínek je považováno zaměření a záznam charakteristik příčných profilů, které dokumentují nejen variabilitu hloubek a šířek koryta, ale i tvary dna, substrát, charakter a stabilitu břehů, existenci a retenční potenciál nivy. Záznamy příčných profilů dokreslují zejména charakteristiky sklonu dna a údolí, sinuosity a řádu toku. Zároveň záznam dat z příčných profilů umožňuje stanovení dalších významných charakteristik, např. plochu příčného profilu, koeficient zahloubení (vývoje nivy) nebo poměr šířky ku hloubce. Příčné profily by měly být voleny tak, aby dokumentovaly typický charakter toku, nikoli za účelem vystižení extrémních podmínek a hodnot charakteristik (nejhlubší tůň, jediný stupeň v úseku). Význam podélného profilu spočívá zejména ve stanovení sklonu dna, který vstupuje do řady dalších výpočtů, slouží k identifikaci variability tvarů dna včetně charakteru dnového substrátu a přispívá k popisu charakteru proudění. Metoda „Pebble count“ (Wolman, 1954) byla zvolena pro postižení charakteru sedimentu dna zejména z důvodu nízké náročnosti na vybavení a zaškolení mapovatele a nízké časové náročnosti aplikace vzhledem k vypovídající hodnotě výsledku. Další výhodou metody je vyzvednutí pouze cca 100 kusů dnového substrátu, které jsou po zaměření na stejném místě vráceny do toku, což znamená menší zásah do struktur dna. Metoda by opět měla být aplikována v typickém úseku referenční lokality, s ohledem na technické možnosti. Velmi významný se pro stanovení referenčních podmínek vodních toků jeví také záznam kvalitativně určených charakteristik reprezentujících celý úsek vodního toku, zejména typ údolí, půdorysný tvar trasy koryta, charakteristiky proudění, vegetaci břehů a příbřežní zóny. Důležitá je i fotodokumentace referenční lokality.

Detail terénního průzkumu odpovídá požadavku na využití typově specifických referenčních podmínek jako cílového stavu revitalizačních opatření. Pro návrh vhodných parametrů revitalizovaného koryta je třeba vycházet ze současných fyzicko-geografických podmínek revitalizované lokality (Brierley and Fryirs, 2005; Palmer et al., 2005; Dufour and Piégay, 2009; Wyźga et al., 2012) a referenčního stavu vodního toku v obdobných fyzicko-geografických podmínkách (Matoušková, 2008b; Wyźga et al., 2012; Hajdukiewicz et al., 2017). Úspěch revitalizačních opatření se do značné míry odvíjí od vhodně navržené trasy (a sklonu dna), šířky a hloubky koryta, přiměřené kapacity koryta a od schopnosti předvídat vývoj revitalizovaného koryta (břehová eroze, zahlubování koryta, transport a ukládání materiálu).

### Předpokládané využití a jeho limity

Nastavená kritéria stanovení referenčních lokalit i záznam kvalitativních hydromorfologických charakteristik lze aplikovat v podmínkách střední Evropy. Detailní terénní průzkum a měření jsou nastaveny pro toky nižších řádů, které lze brodit. Hlavní principy metody REFCON jsou aplikovatelné s ohledem na podobnost fyzicko-geografických podmínek (klima, geomorfologie, krajinný pokryv, antropogenní vlivy), resp. typová specifika fluvialního systému.

Ačkoli je detailní terénní průzkum časově náročný, nejedná se o metodu, která by měla být plošně aplikována na území ČR. Naopak náročnost aplikace metody zcela vyvažuje hodnotu záznamu charakteristik. V případě metody REFCON platí, že méně dobře popsanych lokalit je cennější než

generalizace několika charakteristik pro území celé ČR. Navíc při zvážení nákladů na realizaci revitalizace vodního toku, lze podrobné posouzení výchozího a cílového stavu považovat za nezbytné minimum.

Metoda REFCON byla vytvořena pro vodní toky na úrovni vodních útvarů, ale kritéria stanovení referenčních lokalit i záznam charakteristik lze aplikovat i na menší vodní toky. Referenční lokality by však měly být stanovovány nejlépe na vodních tocích řádu 4–6. Tyto řády toku reprezentují všechny typy neovlivněných vodních toků a tvoří většinu vodních útvarů v kategorii řeka. Naopak koryta a příbřežní zóny vodních toků řádu 7–9 jsou často zásadně ovlivněny činností člověka a je tedy téměř nereálné zde lokalitu splňující kritéria referenční nalézt. Na vodních tocích řádu 1–3 by se sice referenční lokality hledaly o poznání snadněji, ale tyto toky se zpravidla vyznačují takovou variabilitou hydromorfologických charakteristik a lokálními specifiky, které lze obecně hůře generalizovat a využít pro další lokality.

Fungující fluvialní systém vyžaduje 3-rozměrnou konektivitu, je závislý na longitudinálním, laterálním a vertikálním transferu energie, materiálu a bioty (Piégay and Schumm, 2003), zdůrazňováno je tedy dynamické vnímání fluvialního systému, které respektuje procesy vývoje koryta (Brierley and Fryirs, 2005; Dufour and Piégay, 2009; Wyžga et al., 2012; Rinaldi et al., 2013; Hajdukiewicz et al., 2017). V rámci metody REFCON jsou dynamické procesy vývoje koryta, eroze, transportu a ukládání materiálu posuzovány např. prostřednictvím erozních a akumulárních tvarů dna, půdorysného průběhu trasy koryta, energie a sklonu koryta, variability hloubek, koeficientu zahloubení (vývoje nivy), poměru šířky ku hloubce, charakteristik proudění, množství a velikosti sedimentu. Posuzována je vždy variabilita charakteristik v rámci úseku.

Metoda REFCON byla navržena pro účely managementu vodních toků, předpokládá využití ze strany správců vodních toků (hodnocení stavu, údržba v souladu s cíli RSV, směřování k renaturaci, cílový stav revitalizačních opatření), orgánů ochrany přírody (monitoring, vymezení úseků, které je třeba chránit, cílový stav revitalizačních opatření), projektantů navrhujících revitalizace vodních toků (cílový stav revitalizačních opatření).

## 5.2 TYPY VODNÍCH TOKŮ Z POHLEDU HYDROMORFOLOGIE

### Vymezení úseků vodních toků

Posuzované vodní toky (vodní útvary v kategorii řeka) byly pro účely stanovení typů rozděleny na úseky pomocí rozvodnic vymezených ČHMÚ k roku 2013 pro účely hydrologického monitoringu a předpovědi. Vymezení vodních útvarů respektuje hranice rozvodnic, tzn. že vodní útvar byl dále rozdělen na několik úseků vodních toků. Hranice rozvodnic byly na základě testování dalších variant rozdělení vodních toků (např. vodní útvary, různé varianty úseků homogenní délky atp.) zvoleny jako vhodné měřítko pro účely této práce. Zároveň bylo vymezení rozvodnic vzhledem k nárokům hydrologického monitoringu a předpovědi ČHMÚ považováno za podklad nejlepší možný z hlediska homogenity fyzicko-geografických podmínek povodí a hydrologického členění (např. přítoky významně mění průtok i charakter vodního toku v následujícím úseku). Navíc má každá rozvodnice svou jedinečnou identifikaci v podobě čísla hydrologického pořadí (CHP), která byla užitečná pro přípravu dat i samotné prostorové analýzy. Protože potenciální uživatelé výstupů této práce běžně s CHP pracují, je CHP zachováno u výsledného stanovení typů vodních toků.

Vzhledem ke skutečnosti, že nejsou prozatím k dispozici výstupy plošného hydromorfologického hodnocení, které by systematicky pokrývaly území ČR, jevílo se vhodné s využitím dostupných distančních dat stanovit základní charakteristiky, které by poskytly podklad pro sjednocení vodních toků do skupin s obdobným chováním a zároveň přispěly k identifikaci antropogenně ovlivněných úseků.



Úseky vodních toků byly do typů zařazeny na základě parametrů získaných z mapových podkladů, tedy s určitým stupněm generalizace. Data naměřená pro konkrétní referenční lokality v terénu se na rozdíl od těch generalizovaných z mapových podkladů váží pouze k relativně krátkému segmentu referenční lokality (1200 m) a mohou se proto od hodnot stanovených z distančních dat pro delší úsek toku lišit. Jedním z důvodů je variabilita posuzovaných charakteristik v rámci delšího stanoveného úseku, což je zejména v pramenných oblastech případ parametru sklon údolí. Generalizace se samozřejmě projevuje i při vymezení úseků. V případě jedné účelově vymezené rozvodnice vznikl úsek toku délky 72 m s nerelevantními hodnotami parametrů pro rozřazení do typu. Určení typu bylo v tomto případě považováno za chybné a úsek byl připojen k úseku níže po toku. Pro popis referenčních podmínek by jistě měla být použita přesnější data získaná v terénu. V případě stanovování typů vodních toků pro větší území (ČR) je třeba zachovat jednotný postup vymezení typů a určitou míru generalizace připustit, v případě odhalení individuální chyby je ale třeba ji opravit.

### Stanovení typů vodních toků

Typy vodních toků byly vymezeny podle systému B. Na základě parametrů nadmořská výška (< 300 m, 300 – 599 m, ≥ 600 m), sinuositá (1,00 – 1,19, 1,20 – 1,49, 1,50 – 3,50) a sklon údolí (< 0,50 %, 0,50 – 1,79 %, ≥ 1,80 %) bylo vymezeno 9 typů neovlivněných vodních toků a 2 typy *pravděpodobně* nebo *potenciálně upravené*. Jako další zásadní parametry byly posuzovány velikost toku vyjádřená řádem toku a litologie. Pro typy *pravděpodobně* nebo *potenciálně upravené* byl určen nejbližší typ neovlivněného vodního toku.

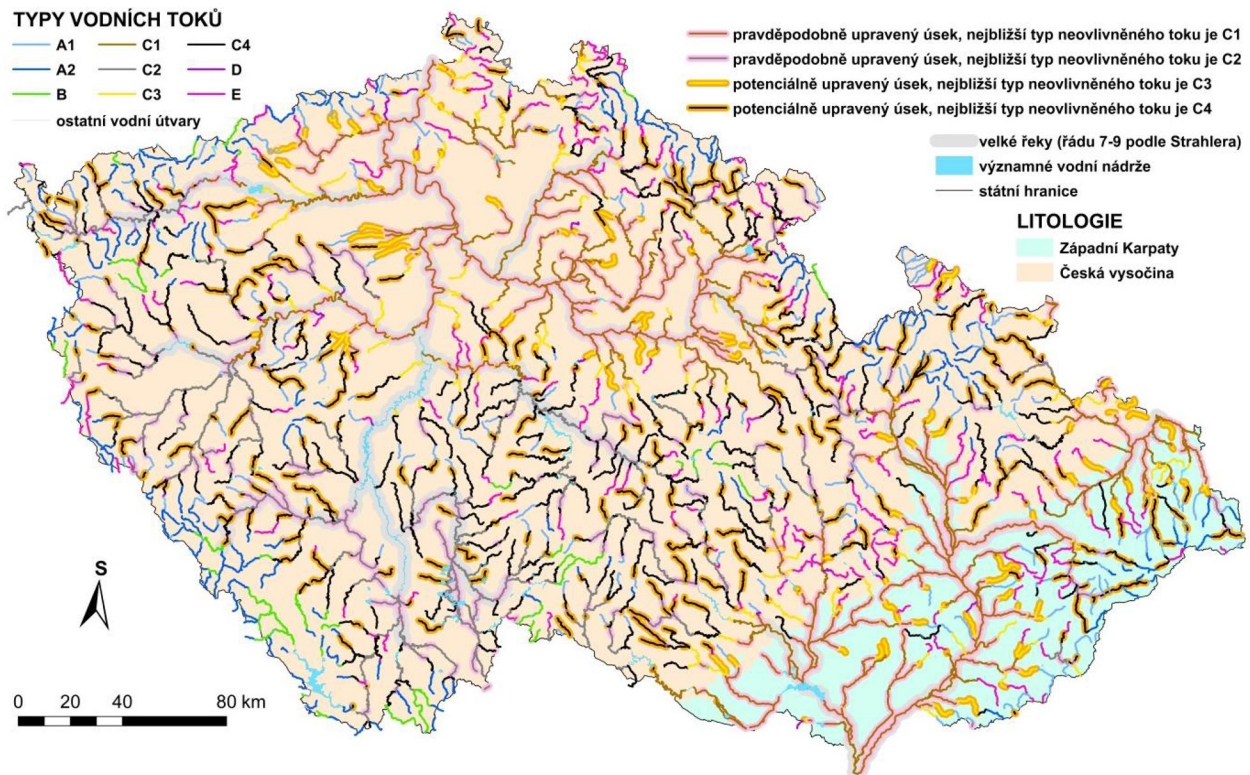
V porovnání s vymezením typů útvarů povrchových vod (Langhammer et al., 2009) byl v předkládané typologii zohledněn parametr nadmořské výšky (odlišné vymezení kategorií), posuzovány parametr řád toku a velmi generalizovaně parametr geologie (resp. litologie). Parametr úmoří nebyl z hlediska hydromorfologie zohledněn.

Litologie byla v rámci vymezení typů vodních toků zahrnuta pouze v generalizované podobě 2 geomorfologických jednotek Česká vysočina a Západní Karpaty (Obr. 8). Vzhledem k pestrosti geologie na území ČR i méně generalizované vyjádření litologie vztažené k posuzovaným vodním tokům pouze zvyšovalo vnitřní variabilitu typů vodních toků a neznamenovalo přínos pro jejich vysvětlení.

Problémem začlenění geologie do typologie vodních toků ČR vzhledem ke složitě a členitě geologické a petrografické stavbě území se detailně zabývali Langhammer et al. (2009). Z geologického pohledu lze území ČR rozdělit do několika výrazně odlišných oblastí, jedná se o oblast krystalinika Českého masivu, v níž vystupují menší oblasti převážně bazických vulkanitů a která je zčásti překryta druhohorními a tercierními sedimenty. Zcela odlišnou jednotkou je na území ČR zasahující část západních Karpat, konkrétně oblast karpatského flyše, tvořená sedimentárními horninami. Další odlišnou oblastí je kvartérní aluvium v údolích velkých řek. Na základě těchto skutečností Langhammer et al. (2009) navrhli a testovali 6 kategorií (granity, syenity, bazické vulkanity, kvartér, pískovce a jílovce, a metamorfity), které však vykazovaly velkou mozaikovitost, výrazně navýšily počet typů vodních toků a řada typů byla zastoupena pouze okrajově. Jako nejvhodnější varianta bylo zohledněno rozdělení pouze na 2 kategorie: horniny metamorfní a vyvěřelé a horniny sedimentární a kvartér, které lépe zohledňuje rozdílné fyzikální vlastnosti, jež mají vliv na morfologii koryt (Langhammer et al., 2009). I toto zohlednění geologie však znamenalo značnou mozaikovitost. V rámci slučování typů do 8 skupin pro účely aktualizace metody HEM (Langhammer and Hartvich, 2014) již byla geologie zohledněna pouze v rámci 2 skupin typů pahorkatinných potoků. Německo zohledňuje v typologii geologické podloží na základě vymezení říčních krajín a regionů podle Briem (2003), Rakousko využívá pouze příslušnosti k bioregionům podle Fink et al. (2000) a Slovensko prozatím geologii do typologie nezačlenilo vůbec (Bartík et al., 2008).

Vzhledem ke skutečnosti, že pahorkatiny, nacházející se převážně v nadmořských výškách 300 – 600 m, tvoří značnou část území ČR, byla jako prahová hodnota parametru nadmořská výška určena horní hranice pahorkatin 600 m n.m. Horní hranice nížin byla s ohledem na zastoupení úseků vodních toků posunuta na 300 m n.m.

Typy vodních toků stanovené pro úseky vodních útvarů v kategorii řeka jsou znázorněny na **Obr. 8.**, zároveň jsou formou shp souboru **přílohou 3** práce (v tištěné verzi CD). Na **Obr. 9** jsou pro větší přehlednost znázorněny pouze typy neovlivněných vodních toků včetně jejich přiřazení k typům *pravděpodobně* a *potenciálně upravených* úseků.



**Obr. 8** Typy vodních toků stanovené pro úseky vodních útvarů v kategorii řeka na základě kombinace parametrů nadmořská výška, sinuosit a sklon údolí včetně zohlednění litologie, řádu toku a nejbližšího typu neovlivněného vodního toku.

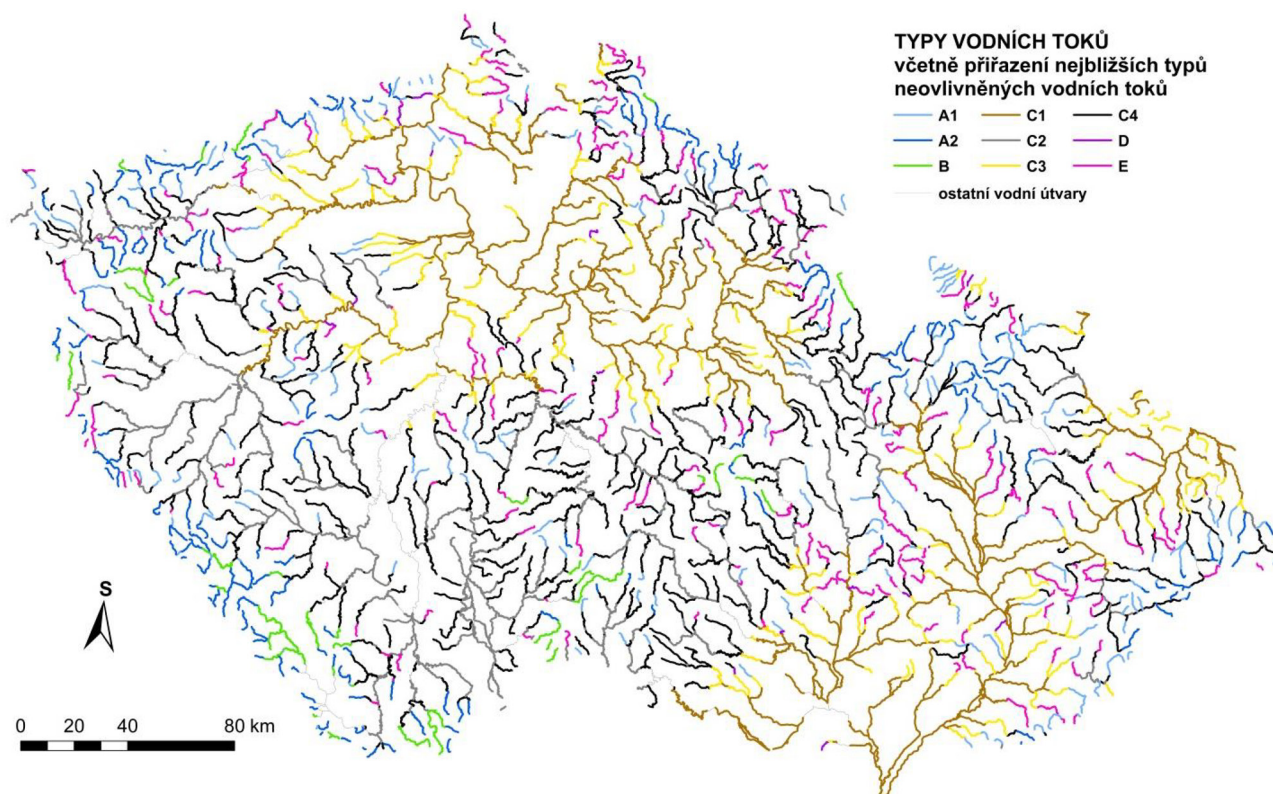
### Zastoupení typů vodních toků na území ČR

Vodní toky Západních Karpat zasahujících na území ČR (**Obr. 8**) tvoří 15,5 % z celkové délky posuzovaných vodních toků (**Tabulka 7**). Ve srovnání s územím České vysočiny je v Západních Karpatech z typů neovlivněných vodních toků nejčteněji zastoupen typ C1 (nížinné sinuózní až meandrující vodní toky se sklonem údolí do 0,5 %), který je reprezentován zejména velkými nížinnými řekami, a dále je zde specifické četnější zastoupení typu A1, který reprezentuje pramenné úseky ve střední a vyšší nadmořské výšce. Naopak typ B není na území Západních Karpat zastoupen vůbec a typ C2 pouze minimálně. V Západních Karpatech je v porovnání s Českou vysočinou výrazně vyšší zastoupení pravděpodobně upravených koryt vodních toků (typ F) i vyšší zastoupení potenciálně upravených koryt (typ G). Po přiřazení nejbližších typů neovlivněných toků (**Obr. 9, Tabulka 7**) se významné zastoupení typu C1 na území Západních Karpat ještě navýší. Naopak typ C4 (sinuózní až meandrující vodní toky ve střední nadmořské výšce se sklonem údolí 0,5–1,8 %), nejčteněji zastoupený typ na území celé ČR, se na území Západních Karpat vyskytuje výrazně méně (5,5 %) než na území České vysočiny (21,5 %), a to i po přiřazení nejbližších typů neovlivněných toků (**Tabulka 7**).



Tabulka 7 Zastoupení typů vodních toků v rámci geomorfologických jednotek.

Typ vodního toku	Zastoupení typů v rámci geomorfologické jednotky (%)		Zastoupení typu na území ČR (%)	Zastoupení typů v rámci geomorfologické jednotky po přiřazení nejbližších typů neovlivněných toků (%)	
	Česká Vysočina	Západní Karpaty		Česká Vysočina	Západní Karpaty
A1	6,7	9,2	7,1	6,7	9,2
A2	9,0	4,2	8,2	9,0	4,2
B	3,5		2,9	3,5	
C1	8,5	18,8	10,1	16,4	51,4
C2	11,9	0,9	10,2	16,5	2,3
C3	4,7	4,8	4,7	7,4	13,3
C4	21,5	5,5	19,1	30,7	11,0
D	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4
E	9,4	8,2	9,2	9,4	8,2
F	12,5	33,9	15,9		
G	11,8	14,0	12,1		
Podíl geomorfologické jednotky na celkové délce posuzovaných vodních toků (%)	84,5	15,5			



Obr. 9 Typy neovlivněných vodních toků stanovené pro úseky vodních útvarů v kategorii řeka včetně jejich přiřazení k pravděpodobně a potenciálně upraveným úsekům.

Česká vysočina je specifická výskytem typu B, který reprezentuje úseky vodních toků vyskytující se na zarovnaných vrcholových partiích českých hor (Krušné hory, Šumava, Novohradské hory, Slavkovský les, Českomoravská vrchovina). Dále je zde specificky vyšší výskyt typu A2, který reprezentuje pramenné úseky v nejvyšších horských oblastech, a téměř výhradní výskyt typu C2 (sinuózní až meandrující úseky vodních toků v nízkých až středních nadmořských výškách se sklonem údolí do 0,5 %).

Vzhledem k poloze zájmového území na hlavním evropském rozvodí tvoří významný podíl v obou geomorfologických jednotkách sinuózní a meandrující pramenné úseky řek a jejich menší přítoky ve střední nadmořské výšce avšak se značným sklonem údolí – typ E.

Předkládané rozdělení vodních toků na území ČR do typů potvrdilo významnou odlišnost chování vodních toků v podmínkách České vysočiny a flyšového pásma Západních Karpat. Tuto odlišnost však reflektuje již 9 stanovených typů neovlivněných vodních toků a další dělení typů z hlediska litologie tak není třeba.

Vodní toky řádu 1–3 tvoří 11,4 % z celkové délky posuzovaných vodních toků, přičemž řády 1–2 jsou v rámci posuzovaných vodních toků (vodní útvary v kategorii řeka) zastoupeny zcela minimálně (**Tabulka 8**). Dle očekávání se jedná především o typy A1, A2 a E s nejvyššími hodnotami sklonu údolí a dále o typ C4, resp. potenciálně upravené úseky (typ G).

Vodní toky řádu 7–9 tvoří 9,2 % z celkové délky posuzovaných vodních toků. Velké nížinné řeky jsou reprezentovány zejména typem C1 a pravděpodobně upravenými úseky vodních toků typu F, pro které je typ C1 nejbližším typem neovlivněného toku. Dále je výrazněji zastoupen typ C2 (sinuózní až meandrující úseky vodních toků v nízkých až středních nadmořských výškách se sklonem údolí do 0,5 %).

**Tabulka 8 Zastoupení typů vodních toků v rámci jednotlivých řádů toku.**

Typ vodního toku	Zastoupení typů vodních toků v rámci řádu toku (%)									Podíl zastoupení typu v řádu toku na celkové délce posuzovaných vodních toků (%)		
	Řád toku									1–3	4–6	7–9
	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
<b>A1</b>	6,6	3,2	19,7	10,4	3,3	0,2				2,1	5,0	
<b>A2</b>	16,2	21,8	13,4	12,4	5,3	2,4				1,6	6,7	
<b>B</b>		5,5	1,7	3,5	3,4	2,9	0,4			0,2	2,7	0,0
<b>C1</b>		5,5	2,8	5,0	9,3	19,7	35,1	27,4	8,8	0,3	7,1	2,8
<b>C2</b>		1,4	1,0	2,8	15,1	26,4	22,9	10,2		0,1	8,6	1,5
<b>C3</b>		2,5	2,8	5,0	6,5	4,8	1,4			0,3	4,3	0,1
<b>C4</b>		3,0	15,8	23,1	24,5	13,0	1,5			1,7	17,4	0,1
<b>D</b>		4,1	0,7	0,6	0,5	0,0				0,1	0,4	
<b>E</b>		14,5	21,7	13,3	4,9	1,1	1,3			2,4	6,7	0,1
<b>F</b>	39,5	14,5	4,6	8,8	15,4	21,4	36,3	62,4	91,2	0,6	10,4	4,6
<b>G</b>	37,7	24,1	15,6	15,2	11,8	8,0	1,1			1,9	10,2	0,1
<b>Podíl řádu toku na celkové délce posuzovaných vodních toků (%)</b>	<b>0,1</b>	<b>0,7</b>	<b>10,7</b>	<b>39,8</b>	<b>26,2</b>	<b>13,3</b>	<b>5,4</b>	<b>2,9</b>	<b>0,9</b>	<b>11,4</b>	<b>79,4</b>	<b>9,2</b>



V rámci posuzovaných vodních toků tvoří 79,4 % délky toky řádu 4–6, které reprezentují s dostatečnou četností všechny typy vodních toků (**Tabulka 8**). Také proto byly vodní toky této velikosti vybrány jako optimální pro stanovení referenčních podmínek.

Zejména typy A1, A2 a E se svým charakterem váží na toky nízkých řádů, naopak typy C1 a C2 odpovídají spíše tokům vyšších řádů. Řád toku byl vyhodnocen jako důležitá informace při výběru reprezentativních referenčních lokalit a pro popis typově specifických podmínek, protože chování vodního toku se s velikostí, resp. řádem mění, nicméně odlišnost horního, středního či dolního toku v podmínkách ČR reprezentují (zejména v parametru sklon údolí) již vymezené typy vodních toků a další dělení typů není nezbytné.

Náročnější se ukázalo vymezení nejčastěji zastoupených typů C1, C2, C3 a C4 reprezentujících sinuózní až meandrující úseky vodních toků v nížinách a středních nadmořských výškách se sklonem do 0,5 % nebo 0,5–1,8 %. Rozdělení skupiny C do 4 typů bylo nezbytné z důvodu značné vnitřní variability skupiny, která se na základě distančních dat jevila bez zřejmých výraznějších rozhraní mezi typy, jenž bylo možné rozklíčovat až na základě terénního průzkumu referenčních lokalit. V rámci typů skupiny C se ukázaly jako zásadní širší vztahy v území, zejména krajinný pokryv příbřežních zón a v případě typu C3 souvislost střední kategorie sklonu údolí v nížině se specifickým podložím a typem údolí. Taktéž skupina A byla rozdělena až na základě terénního průzkumu. V tomto případě byla odlišnost typů A1 a A2 zřejmá již na základě distančních dat, ale v případě typu A1 bylo obtížné najít referenční lokalitu, aby mohla být odlišnost typů potvrzena.

Úseky vodních toků tvořených hluboce zařízlými koryty je třeba posuzovat zcela samostatně. Data z mapových podkladů nejsou v tomto případě dostatečná a hluboce zařízlá koryta se často zásadně liší specifickými lokálními podmínkami, zejména litologií.

### 5.3 VYUŽITÍ DAT KRAJINNÉHO POKRYVU PŘÍBŘEŽNÍ ZÓNY PRO ZPŘESNĚNÍ POPISU TYPŮ VODNÍCH TOKŮ A REFERENČNÍCH PODMÍNEK

Za účelem posouzení možností využití podrobných dat krajinného pokryvu příbřežní zóny pro zpřesnění popisu typů vodních toků a referenčních podmínek byla analyzována data krajinného pokryvu ([AOPK ČR, 2013](#)) příbřežní zóny ve vzdálenosti 50 m a 200 m od linie vodního toku pro 3937 úseků vodních toků.

Význam krajinného pokryvu pro zpřesnění popisu typu lze rozdělit do 3 skupin. První skupinu tvoří typy vodních toků, pro které existují signifikantní kategorie krajinného pokryvu (**Tabulka 9**), které typ odlišují od ostatních a zároveň umožňují popsání typu pomocí dat krajinného pokryvu. Jedná se o typy s nižším antropogenním ovlivněním příbřežní zóny — A2, B, C2, C3 a D. **Obr. 10** je vyjádřením 12 sloučených kategorií krajinného pokryvu pro 906 úseků reprezentujících tyto typy, které zároveň dokumentuje signifikantní kategorie krajinného pokryvu těchto typů.

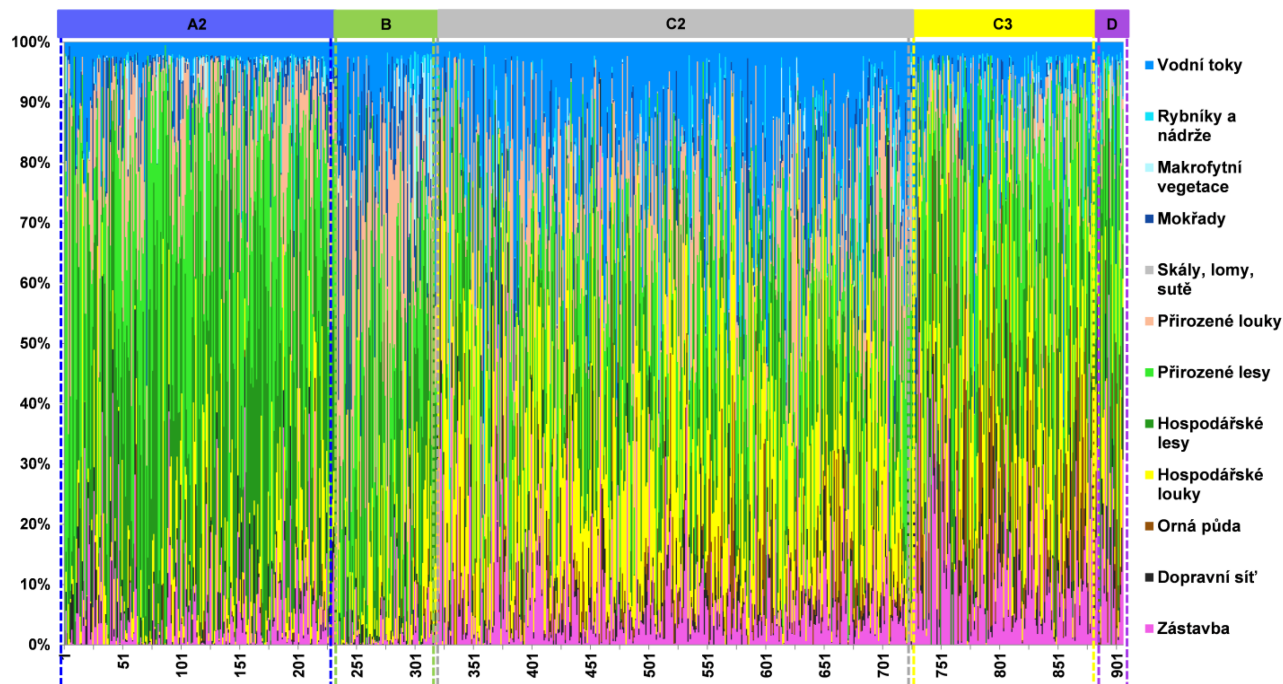
Druhou skupinu tvoří typy A1 and E s rostoucím vlivem člověka v příbřežních zónách. Jedná se o koryta středních nadmořských výšek s vysokým sklonem údolí. Ačkoli tyto typy mohou být popsány určitými kategoriemi, krajinný pokryv zásadně nepřispívá k jejich zpřesnění. Signifikantními kategoriemi jsou hospodářské lesy a hospodářské louky. Do této skupiny lze zařadit také typ C4, kde pestrost zastoupení kategorií krajinného pokryvu odráží vnitřní variabilitu charakteristik reprezentujících tento typ.

Třetí skupinu představují typy nížinných vodních toků s minimálním sklonem (C1 and F) protékající zemědělskou krajinou. Signifikantními kategoriemi krajinného pokryvu jsou orná půda a hospodářské louky. Vzhledem k šířce nížinného toku pokrývá často významnou část 50 m široké buffer zóny koryto

toku. Zastoupení lesa i přirozených luk je minimální. Do této skupiny lze zařadit i typ G, jedná se o toky nižšího řádu s menší plochou koryta než v případě C1 a F, jejichž vyvinuté nivy vytvářejí vhodné podmínky pro husté osídlení. Příbřežní zóna těchto vodních toků byla významně přeměněna, krajinný pokryv přispívá k popisu typů velmi omezeně, naopak krajinný pokryv přispívá k odhalení modifikace říční sítě, která je zejména u typů F a G častá.

**Tabulka 9 Kvalitativní hodnocení vztahů mezi typy vodních toků a krajinným pokryvem pro první skupinu vodních toků; ++ významný výskyt, + vyskytuje se, - minimální výskyt, -- zcela nepatrný výskyt.**

Typ vodního toku	Signifikantní kategorie krajinného pokryvu	
<b>A2</b>	++ hospodářské lesy	- zástavba
	++ přirozené lesy	-- dopravní síť
	+ přirozené louky	-- orná půda
	++ přirozené louky	-- zástavba
<b>B</b>	+ lesy	-- dopravní síť
	+ mokřady	-- orná půda
<b>C2</b>	++ hospodářské louky	-- dopravní síť
	+ aluviální a vlhké louky	-- orná půda
	+ vodní toky	-- ostatní přirozené louky
<b>C3</b>	++ hospodářské louky	-- přirozené louky
	+ lesy	-- aluviální a vlhké louky
	+ zástavba	
<b>D</b>	++ lesy (++ přirozené lesy)	-- přirozené louky
	+ hospodářské louky	-- aluviální a vlhké louky
	+ zástavba	



**Obr. 10 Krajinný pokryv pro 906 úseků reprezentujících typy první skupiny — A2, B, C2, C3 a D.**

Výsledky analýz potvrzují významný podíl lesa v příbřežních zónách v porovnání s ostatními kategoriemi krajinného pokryvu, ale zároveň potvrzují značné zastoupení zemědělské půdy včetně orné půdy a zástavby v příbřežních zónách 50 m od vodního toku u mnoha úseků. V příbřežních zónách vodních toků

v zemědělské krajině (třetí skupina – významně zastoupené typy na území ČR) je zalesnění zcela minimální.

Data krajinného pokryvu příbřežních zón umožňují odlišení typů vodních toků na základě sady signifikantních kategorií, která přispívá k vysvětlení současných environmentálních podmínek (zejména nadmořská výška, klima, antropogenní vlivy), ve kterých se typy vodních toků vyskytují, a tedy i jejich přirozeného chování (sklon údolí, sklon koryta, říční vzorec, typ údolí, koeficient zahloubení).

Zároveň však bylo zjištěno, že úseky vodních toků tvořených hluboce zařízlými koryty, která se často zásadně liší specifickými lokálními podmínkami, zejména litologií, je třeba posuzovat zcela samostatně. Např. [Hack and Goodlett \(1960\)](#) popisují vztahy mezi charakterem lesa a sklonem svahu, ale podkladová data této části práce nebyla v tomto případě zřejmě dostatečná. V případě hluboce zařízlhých koryt se jejich charakterizace na základě dat krajinného pokryvu neukázala jako směrodatná.

V rámci této části práce byl dále posuzován vztah hydromorfologických charakteristik 88 příčných profilů referenčních lokalit rozřazených do typů a kategorií krajinného pokryvu. Výstupy analýz potvrdily, že hydromorfologické charakteristiky jako např. trasa toku, velikost sedimentu nebo struktury dna úzce souvisí s krajinným pokryvem příbřežní zóny.

Z podrobných dat krajinného pokryvu lze odvodit šířku koryta, která v kombinaci s dalšími charakteristikami krajinného pokryvu přispívá k identifikaci charakteru proudění, trasy koryta nebo struktury dna. Data krajinného pokryvu také napomáhají při hledání referenčních lokalit a přispívají ke stanovení míry antropogenního vlivu v příbřežní zóně, která se z příbřežní zóny zpravidla přenáší i na samotné koryto toku.

Na základě posouzení vztahu kategorií krajinného pokryvu příbřežní zóny a typů vodních toků stanovených pro posuzované úseky vodních toků bylo zjištěno, že podrobná data krajinného pokryvu lze využít k vysvětlení odlišností mezi typy vodních toků a doplnění popisu referenčních podmínek nebo za účelem stanovení míry antropogenního vlivu. Charakter příbřežní vegetace i podél člověkem silně ovlivněných toků svědčí o současných a probíhajících fluvialních procesech a zároveň reflektuje stádium vývoje koryta ([Hupp and Rinaldi, 2007](#); [Gurnell et al., 2016a](#)). Podrobné zmapování využití příbřežní zóny jako prostoru vyvážené ochrany ekologických a socio-ekonomických cílů ([Kondolf et al., 2003b](#); [Dufour and Piégay, 2009](#)) slouží také jako jedno z důležitých kritérií při návrhu revitalizačních opatření vodních toků a managementu. Např. [Poppe et al. \(2016\)](#) popisuje, že v případě mnoha revitalizovaných úseků vodních toků šířka vegetace příbřežní zóny korelovala s vysokým efektem revitalizace.

## 5.4 REFERENČNÍ PODMÍNKY PRO 9 TYPŮ NEOVLIVNĚNÝCH VODNÍCH TOKŮ NA ÚZEMÍ ČR

Referenční stav by měl být založen na aktuálně nebo potenciálně existujících podmínkách ve spojení s minimálním vlivem člověka na koryto, příbřežní zónu a nivu ([Brierley and Fryirs, 2005](#); [Palmer et al., 2005](#); [Wyźga et al., 2012](#)). Tento přístup zdůrazňuje užitečnost referenčních podmínek pro revitalizaci vodních toků a koncept dynamického říčního ekosystému aktivně reagujícího na kolísání průtoků, nestabilitu sedimentů a progresivně se přizpůsobujícího změnám v povodí ([Wyźga et al., 2012](#)). Metoda REFCON stanovuje referenční podmínky pomocí systému referenčních lokalit splňujících kritérium minimálního antropogenního ovlivnění, které byly vybírány tak, aby byla rovnoměrně pokryta variabilita 9 vymezených typů vodních toků.

Typ vodního toku může být charakterizován pomocí specifické sady charakteristik, která je odlišná od sady charakteristik ostatních typů, pokud typu porozumíme, můžeme rozhodnout o relevanci jednotlivých charakteristik (Lehotský and Grešková, 2007). Typově specifické referenční podmínky pro vodní toky na území ČR, uvedené v **příloze 1** a souhrnně zpracované v **Tabulce 10**, jsou stanoveny jako sada charakteristik zjištěných terénním průzkumem a měřeními v referenčních lokalitách tak, aby reprezentovaly typický charakter vodního toku, nikoli jako extrémní nebo výjimečné hodnoty. Popis referenčních podmínek je založen na konkrétních kvantitativních i kvalitativních charakteristikách referenční lokality, nesnaží se o zobecnění prahových hodnot charakteristik v rámci typu, ale naopak vybízí uživatele k posouzení celkové sady charakteristik, které by mělo vést k porozumění typu. Je třeba mít na paměti, že oddělené posuzování charakteristik může zkreslit celkovou interpretaci referenčních podmínek.

S ohledem na skutečnost, že v ČR vzniká celá řada metodických postupů, které následně nejsou aplikovány, nebylo smyslem práce vytvoření důmyslného metodického postupu, ale přímo stanovení konkrétních typů vodních toků a typově specifických referenčních podmínek. Variabilita podmínek vodních toků v ČR není zachytitelná statistikou ani dostatečně vysokým počtem popsanych referenčních lokalit. Protože je evidentní, že stanovení typů vodních toků v rozsahu území ČR není bezchybné a stanovení referenčních podmínek pro 9 reprezentativních lokalit není vyčerpávající, nabízí se uživateli metodický přístup, na základě kterého lze podle jednotného přístupu provést individuální stanovení. Stanovování typově specifických referenčních podmínek je tedy „živý systém“, do kterého se jejich uživatelé mohou zapojit a pomoci jej přeshňovat.

Přístup ke stanovení typově specifických referenčních podmínek byl vytvořen tak, aby byl z pozice uživatele průhledný a aplikovatelný, tedy aby si uživatel mohl stanovit lokální/regionální typově specifické referenční podmínky pro daný vodní tok na základě reálných dat získaných terénním průzkumem. Uživateli se doporučuje tento postup:

1. Zjistit stanovený typ vodního toku (**Obr. 8** nebo shp soubor v **příloze 3** práce; v tištěné verzi CD), resp. zařadit posuzovaný úsek vodního toku, který není vodním útvarem v kategorii řeka, do typu na základě hodnot parametrů nadmořská výška, sinuositá a sklon údolí (způsob stanovení hodnot parametrů i prahové hodnoty pro zařazení do typu jsou uvedeny v kapitole 4.3).

Protože hranice mezi typy vodních toků nejsou nikdy zcela ostré, je třeba prahové hodnoty pro vymezení typů chápat nikoli jako striktní, ale jako pohyblivé s možností výskytu přechodných typů (Schumm, 1977; Rosgen, 1994; Thorne, 1997; Kondolf et al., 2003a; Rinaldi et al., 2016). Souvislosti mezi stanovenými typy a případný směr přechodných typů naznačují *příbuzné typy vodního toku* (typy vodních toků, které mají k posuzovanému typu charakterem blízko – v **Tabulce 10** žlutě podbarveny).

2. Seznámit se s příslušným listem referenčních podmínek pro daný typ vodního toku, popř. s listy referenčních podmínek příbuzných typů (**Tabulka 10**).

V rámci využívání stanovených referenčních podmínek je třeba objektivně přihlídnout k velikosti posuzovaného úseku vodního toku, ke kterému jsou referenční podmínky vztahovány.

3. Pokud posuzovaný úsek vodního toku nebude vykazovat obdobné charakteristiky jako uvedené referenční podmínky, doporučuje se aplikovat přístup pro stanovení referenčních lokalit a určení typických charakteristik představujících referenční podmínky pro daný vodní tok – metodu REFCON (jejíž popis a formulář pro záznam charakteristik je v **příloze 2**) a lokální/regionální referenční podmínky daný vodní tok stanovit individuálně.



Význam individuálního posouzení lokálních podmínek zdůrazňují např. [Schumm \(1977\)](#), [Rosgen \(1994\)](#), [Thorne \(1997\)](#), [Kondolf et al. \(2003a\)](#) nebo [Rinaldi et al. \(2016\)](#).

Pro účely návrhu revitalizačních opatření je doporučeno aplikovat metodu REFCON v referenční lokalitě stanovené na obdobně velkém vodním toku v obdobných fyzicko-geografických podmínkách a stanovit konkrétní hodnoty hydromorfologických charakteristik, ke kterým lze parametry revitalizace vztáhnout.

Vodní toky s hluboce zařízlými koryty (typ údolí soutěska, kaňon) je třeba posuzovat zcela samostatně (často se zásadně liší specifickými lokálními podmínkami, zejména litologií a sklonem koryta). Zejména v případě určování sinuosity koryta nebo typu údolí je třeba posuzovat dostatečně dlouhý reprezentativní úsek vodního toku (nikoli extrémní hodnoty).

4. V případě hodnocení hydromorfologického stavu vodního toku posuzovat aktuální stav vodního toku jako jeho odchylku od stanovených referenčních podmínek. Pro hodnocení hydromorfologického stavu vodního toku lze kompatibilně s výstupy této práce využít např. metodu EcoRivHab ([Matoušková, 2003, 2008a,b](#)), podrobněji viz kapitola 5.5.

Tabulka 10 Přehled typově specifických referenčních podmínek pro 9 referenčních lokalit.

Referenční lokalita	Zelenský potok	Rolava (Nové Hamry)	Blanice (Zbytiny)	Rokytná (Ivančice)	Rokytná (Příštipo)	Rokytná (Čermákovice)	Bystřička	Úpořský potok	Černá Ostravice		
Referenční lokalita - zkratka	Zelenský p.	Rolava (NOH)	Blanice (ZBY)	Rokytná (IVA)	Rokytná (PRI)	Rokytná (CER)	Bystřička	Úpořský p.	Čer. Ostravice		
Typ vodního toku	A1	A2	B	C1	C2	C3	C4	D	E		
Prahové hodnoty vybraných parametrů pro odvození typu vodního toku	Nadmořská výška	300 - 599 m   ≥ 600 m	≥ 600 m	≥ 600 m			< 300 m	300 - 599 m	< 300 m	300 - 599 m	
	Sinuosita	1,00 - 1,19	1,00 - 1,49	≥ 1,50	≥ 1,20	≥ 1,20	≥ 1,20	≥ 1,20	≥ 1,00	1,20 - 1,49   ≥ 1,50	
	Sklon údolí	≥ 1,80 %   0,50 - 1,79 %	≥ 1,80 %	≥ 1,80 %	< 0,50 %	0,50 - 1,79 %	< 0,50 %	< 0,50 %	0,50 - 1,79 %	0,50 - 1,79 %	≥ 1,80 %
Příbuzný typ vodního toku	A2	A1, E	A2		(C4)		A2, E	(E)	A2, A1		
Řád toku (Strahler)	4	4	5	6	6	6	4	4	5		
Trasa koryta	Přirozeně přímá až zákrutová	Přirozeně přímá	Meandrující	Meandrující	Meandrující (zákrutová)	Zákrutová (meandrující)	Zákrutová až meandrující	Zákrutová s prvky divočení	Zákrutová s prvky divočení		
Typ údolí	Erozní typu V	Neckovitě	Úvalovité s široce vytvořenou údolní nivou	Úvalovité (U)	Neckovitě	Neckovitě (asymetrické)	Neckovitě (asymetrické)	Neckovitě	Neckovitě		
Sklon dna	2,87 %	1,91 %	0,61 %	0,21 %	0,18 %	0,28 %	1,04 %	1,47 %	0,98 %		
Šířka koryta	průměrná	5,38 m	9,72 m	9,95 m	10,44 m	10,58 m	16,52 m	15,76 m	7,51 m	12,07 m	
	rozpětí min - max	5,1 - 5,9 m	5,6 - 15,0 m	6,5 - 23,2 m	9,0 - 11,3 m	8,7 - 13,9 m	9,5 - 20,9 m	10,7 - 19,3 m	4,7 - 9,3 m	8,0 - 16,6 m	
Plocha příčného profilu	2,84 m <sup>2</sup>	4,77 m <sup>2</sup>	6,31 m <sup>2</sup>	6,15 m <sup>2</sup>	4,6 m <sup>2</sup>	7,98 m <sup>2</sup>	13,26 m <sup>2</sup>	2,49 m <sup>2</sup>	3,83 m <sup>2</sup>		
Maximální hloubka koryta	0,78 m	0,87 m	1,10 m	0,95 m	0,68 m	0,79 m	1,28 m	0,57 m	0,72 m		
Poměr šířky ku hloubce	10,4	20,1	16,5	18,1	25,1	34,7	19,6	23,6	39,9		
Koeficient zahloubení (vývoje nivy)	2,28	2,54	14,44	10,45	1,26	24,3	7,78	2,42	2,65		
Retenční potenciál nivy	Koryto tvoří nivu (viz typ údolí)	Možnost vybřežení velkých vod (les)	Možnost vybřežení velkých vod (přirozené louky)	Možnost vybřežení velkých vod (hospodářské louky)	Existující potenciál, ale niva je dost vysoko (zahlobení koryta)	Existující potenciál (les)	Možnost vybřežení velkých vod (hospodářské louky), místy niva dost vysoko (zahlobení koryta), místy strmé svahy (bez nivy)	Místy možnost vybřežení velkých vod do úzké nivy, místy strmé svahy navazující na koryto (bez nivy)	Místy možnost vybřežení velkých vod do úzké nivy, místy strmé svahy navazující na koryto (bez nivy)		
Charakter proudění	Peřejnatý úsek 70 %; Slapový proud 25 %; Stupně, kaskáda 5 %	Peřejnatý úsek 60 %; Slapový proud 25 %; Stupně, kaskáda 10 %; Tůně 5 %	Slapový proud 70 %; Tůně 15 %; Klouzavý proud 10 %; Peřejnatý úsek 5 %	Klouzavý proud 70 %; Slapový proud 20 %; Tůně 10 %	Klouzavý proud 68 %; Slapový proud 30 %; Peřejnatý úsek 2 %	Slapový proud 63 %; Klouzavý proud 35 %; Peřejnatý úsek 2 %	Slapový proud 50 %; Peřejnatý úsek 40 %; Tůně 10 %	Slapový proud 60 %; Klouzavý proud 40 %	Peřejnatý úsek 60 %; Slapový proud 25 %; Tůně 15 %		
Specifická energie proudění	166,7 W.m-2	982,6 W.m-2	292,9 W.m-2	51,8 W.m-2	32,1 W.m-2	61,3 W.m-2	1172,2 W.m-2	494,9 W.m-2	206,3 W.m-2		
Substrát dna d <sub>50</sub> (Pebble count)	Velmi hrubý štěrk	Středně velké kameny	Velmi hrubý štěrk	Hrubý štěrk	Velmi hrubý štěrk	Velmi hrubý štěrk	Malé kameny	Malé kameny	Malé kameny		

Referenční lokalita - zkratka		Zelenský p.	Rolava (NOH)	Blanice (ZBY)	Rokytná (IVA)	Rokytná (PRI)	Rokytná (CER)	Bystřička	Úpořský p.	Čer. Ostravice
Erozní a akumulací tvary dna (%):	lavice	5,4	11,7	22,5	21	19	18	24,3	20	38
	tůně	0,4	7,5	28,3	20	16	3	9,3	8,3	4,5
	peřeje	67	26,7	7,5	0	0	0,8	17,1	1,7	15
	mělčiny	13	8,3	15,8	6	9	3	35	2	25,8
	stupně	1,2	8,7	0	0	0	0	0	0	0
Vegetace břehů		Přirozený les	Přirozený les	Jednotlivé stromy keře/trávobylinná vegetace	Liniová vegetace	Přirozený les/liniová vegetace	Přirozený les	Liniová vegetace	Přirozený les	Hospodářský les
Substrát břehů		Zvětralá hornina	Lesní půda, místy balvany	Odkrytý půdní profil	Odkrytý půdní profil	Odkrytý půdní profil	Odkrytý půdní profil	Zvětralá hornina	Zvětralá hornina	Lesní půda
Stabilita příčného profilu		Minimální laterální pohyb koryta spojený s podemletím břehů	Nepohyblivé břehy, místy s podemletím	Přirozený laterální pohyb koryta, podemlání a sesouvání břehů (jeseň - výsep)	Přirozený laterální pohyb koryta spojený s podemletím břehů	Minimální laterální pohyb koryta spojený s podemletím břehů	Minimální laterální pohyb koryta spojený s podemletím břehů	Minimální laterální pohyb koryta spojený s podemletím břehů	Stabilní břehy bez projevu břehové eroze	Přirozený laterální pohyb koryta spojený s podemletím břehů/prudkých svahů (nátrže, sesouvání)
Množství sedimentu pro potenciální transport		Vysoké	Vysoké	Střední (místy vysoké - lavice)	Střední	Střední	Střední	Střední (místy vysoké - lavice)	Vysoké	Vysoké
Hlavní původ sedimentu v korytě		Břehová eroze v místě	Přinesený po proudu	Částečně břehová eroze v místě, částečně přinesený po proudu	Částečně břehová eroze v místě, částečně přinesený po proudu	Částečně břehová eroze v místě, částečně přinesený po proudu	Částečně břehová eroze v místě, částečně přinesený po proudu	Převážně přinesený po proudu	Břehová eroze v místě	Břehová eroze v místě i přinesený po proudu
Důvod ukládky sedimentu		Snížení sklonu díky podloží	Přirozené překážky (kameny, balvany), místy snížení sklonu vlivem podloží	Snížení sklonu díky trase koryta	Existence přirozených překážek (mrtvé dřevo), snížení sklonu dna	Existence přirozených překážek (mrtvé dřevo, kameny), snížení sklonu dna	Zejména existence přirozených překážek - mrtvého dřeva, dále snížení sklonu díky podloží	Snížení sklonu vlivem podloží, místy přirozené překážky (kameny, balvany)	Snížení sklonu díky podloží	Snížení sklonu - trasa, množství sedimentu, mrtvé dřevo v korytě
Krajinný pokryv	50 m od koryta	Bučiny 39 %; Lužní a mokřadní lesy 11 %; Hospodářské lesy jehličnaté 11 %	Smrčiny 64 %; Mezofilní louky 19 %; Mokřadní ekosystémy 6 %	Mezofilní louky 30 %; Hospodářské lesy jehličnaté 30 %; Hospodářské louky 15 %	Hospodářské louky 18 %; Doubravy a dubohabřiny 14 %; Hospodářské lesy listnaté 9 %	Hospodářské louky 27 %; Aluviální a vlhké louky 18 %; Doubravy a dubohabřiny 13 %	Doubravy a dubohabřiny 29 %; Suťové lesy 12 %; Hospodářské louky 11 %	Hospodářské louky 33 %; Zástavba 10 %; Hospodářské lesy jehličnaté 9 %	Suťové lesy 41 %; Lužní a mokřadní lesy 24 %; Doubravy a dubohabřiny 14 %	Hospodářské lesy jehličnaté 55 %; Hospodářské lesy smíšené 30 %
	200 m od koryta	Bučiny 41 %; Hospodářské louky 14 %; Hospodářské lesy jehličnaté 12 %	Smrčiny 65 %; Mezofilní louky 19 %; Hospodářské lesy jehličnaté 7 %	Hospodářské lesy jehličnaté 44 %; Mezofilní louky 24 %; Hospodářské louky 19 %	Doubravy a dubohabřiny 21 %; Hospodářské lesy listnaté 14 %; Zástavba 16 %	Hospodářské lesy jehličnaté 35 %; Hospodářské louky 17 %; Doubravy a dubohabřiny 15 %	Doubravy a dubohabřiny 36 %; Hospodářské lesy jehličnaté 20 %; Orná půda 9 %	Hospodářské lesy jehličnaté 25 %; Aluviální a vlhké louky 21 %; Hospodářské louky 18 %	Suťové lesy 29 %; Doubravy a dubohabřiny 28 %; Bučiny 15 %	Hospodářské lesy jehličnaté 71 %; Hospodářské lesy smíšené 18 %
Vzdálenost od pramene		5 km	11 km	16 km	86 km	27 km	56 km	13 km	9 km	8 km

## 5.5 HODNOCENÍ HYDROMORFOLOGICKÉHO STAVU

Pozornost studia fluvialně-morfologických procesů je v současnosti spojena s hodnocením hydromorfologického stavu vodních toků a návrhy revitalizačních opatření. Nezbytným předpokladem hodnocení aktuálního hydromorfologického stavu vodních toků je stanovení referenčních podmínek (neboli definování velmi dobrého stavu) na úrovni jednotlivých typů vodních toků, které slouží jako srovnávací prvek a představují cílový stav revitalizačních opatření.

Hodnocení hydromorfologické kvality vodních toků je kromě implementace RSV potřeba také pro účely ochrany přírody, zároveň pomáhá i při managementu a revitalizaci vodních toků (Boon et al., 2010). Za účelem hodnocení hydromorfologie bylo vytvořeno již velké množství metod, přehled 121 metod vytvořených mezi lety 1983 a 2013 uvádí Belletti et al. (2015), a také dva standardy: EN 14614 (CEN, 2004) a EN 15843 (CEN, 2010). Podle Hajdukiewicz et al. (2017) je pro účely plánování a monitoringu projektů revitalizací vhodnější vycházet z EN 14614, zatímco hodnocení podle EN 15843 může být užitečné pro vytváření zpráv hydromorfologického monitoringu požadovaného podle RSV, ale nikoli pro účely plánování a monitoringu opatření. Nedostatečně široké využití standardu 15843 odráží podle Hajdukiewicz et al. (2017) i výsledek hlasování o přijetí standardu, kdy z 30 zástupců členských států bylo 21 pro a 9 se zdrželo (Boon et al., 2010). Jednou z metod „nové generace“, která se snaží vyvarovat nedostatků a limitů metod předchozích, je metoda MQI (Rinaldi et al., 2013), která může být podle autorů po ověření, že aktuálně pokrývá celé rozpětí fyzicko-geografických podmínek a morfologických typů daného regionu, a s případnými modifikacemi přijata v dalších členských státech EU i ostatních státech. Přístupů tedy existuje celá řada a stále se vyvíjí další, aby mohly být užitečné je ale třeba je přizpůsobit podmínkám říčních systémů, na které mají být aplikovány. Většina metod zohledňuje veškeré charakteristiky zahrnuté do hydromorfologického hodnocení podle standardu EN 14614 (CEN, 2004) a rozpracovává jejich hodnocení s ohledem na podmínky území, ve kterém mají být následně aplikovány.

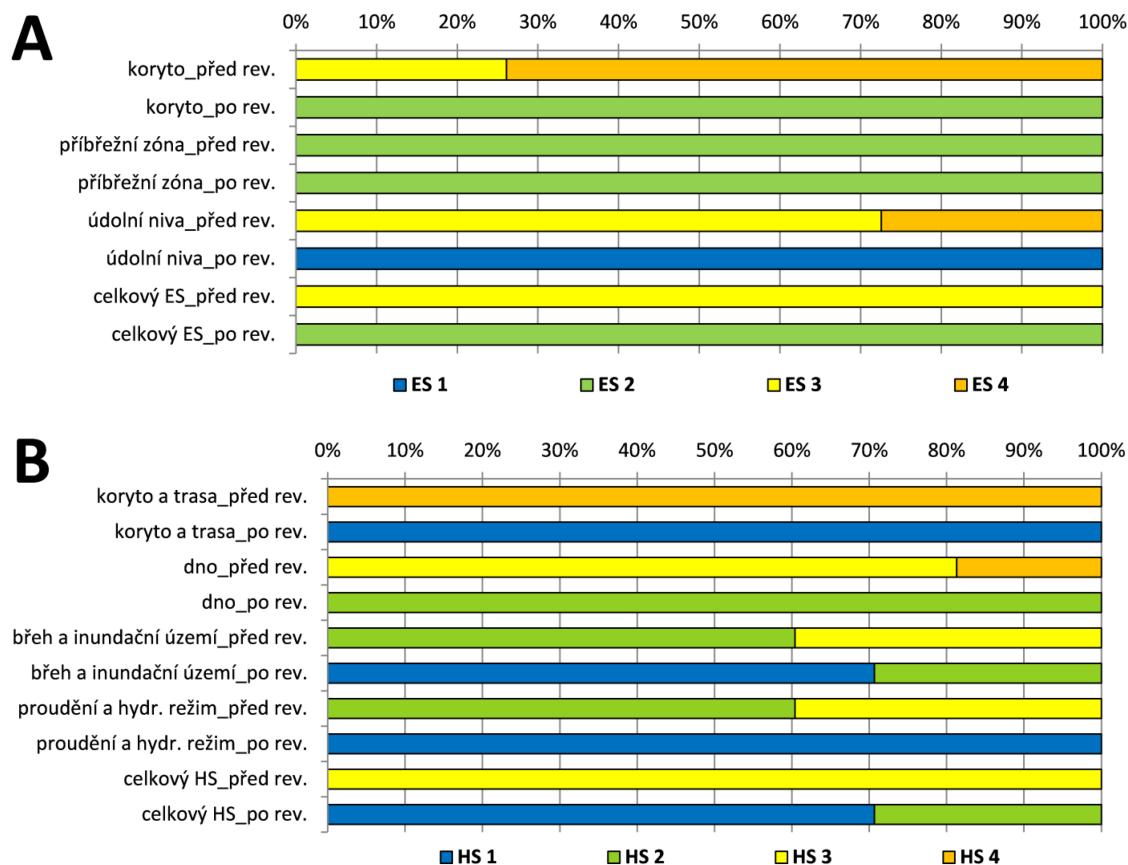
Pro hodnocení hydromorfologických složek v podmínkách ČR byly v souladu s požadavky RSV a standardy vytvořeny metody EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b) a metoda HEM (Langhammer, 2007, 2008, 2014; Langhammer and Hartvich, 2014). Obě tyto metody byly autorkou posouzeny jako vhodné pro hodnocení hydromorfologického stavu vodních toků na území celé ČR (z hlediska náročnosti aplikace i nastavení na podmínky vodních toků ČR) a vhodné pro posouzení revitalizačních opatření. Na základě predikce stavu vodního toku po provedení navržených revitalizačních opatření charakteru komplexní revitalizace (vytvoření přirozené trasy toku v dostatečně širokém pásmu doprovodných porostů a nivy) bylo zjištěno, že realizací navržených revitalizačních opatření by bylo dosaženo minimálně dobrého hydromorfologického stavu jak v případě posuzování metodou EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b), tak v případě posuzování metodou HEM (Langhammer, 2007, 2008) – z Obr. 11 jsou patrné konkrétní výsledky obou metod pro jednotlivé hodnocené zóny v jedné z posuzovaných lokalit. Obě metody tedy prostřednictvím hodnocených parametrů reflektují požadavky RSV na hodnocení stavu i význam navržených revitalizačních opatření pro dosažení dobrého hydromorfologického stavu.

Předkládané typově specifické referenční podmínky byly navrženy v souladu s RSV a standardem EN 14614 (CEN, 2004) pro fyzicko-geografické podmínky vodních toků v ČR a lze je použít k hodnocení hydromorfologického stavu vodních toků i jako cílový stav revitalizačních opatření. Hodnocení hydromorfologického stavu podle metody EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b) je založeno na určení odchylky stavu od přírodě blízkých podmínek formou porovnání s lokálními referenčními podmínkami, které je třeba před hodnocením stanovit. Předkládané typově specifické referenční podmínky zahrnují referenční stavy veškerých hydromorfologických parametrů posuzovaných metodou EcoRivHab (vyjma hodnocení jakosti povrchových vod), jsou tedy s metodou kompatibilní a mohou být vhodným podkladem pro aplikaci metody EcoRivHab. Zároveň je metoda EcoRivHab po zaškolení mapovatelů



jednoduchá na aplikaci i zpracování a interpretaci získaných výsledků a aplikovatelná na vodní toky všech velikostí a typů (což umožňuje porovnání hodnocených úseků). Vzhledem k těmto skutečnostem nebylo cílem předkládané práce vyvíjet další metodu pro hodnocení hydromorfologické kvality vodních toků na území ČR.

Reakcí na určení hydromorfologického stavu vodního toku by mělo být navržení a realizace opatření pro dosažení dobrého stavu, tedy zlepšení parametrů, které neodpovídají referenčním podmínkám. Z pohledu návrhu opatření je tedy mnohem významnější záznam hodnocení jednotlivých parametrů než výsledná hodnota odpovídající stavu.



**Obr. 11 Stav jednotlivých hodnocených zón, celkový stav hydromorfologických složek a predikce stavu po realizaci navržených revitalizačních opatření v lokalitě na dolním toku Slubice na základě aplikace metody EcoRivHab (Matoušková, 2003, 2008a,b) – A, metody HEM (Langhammer, 2007, 2008) – B.**

Metoda HEM po aktualizaci (Langhammer, 2014; Langhammer and Hartvich, 2014) zohledňuje referenční podmínky v hodnocení formou vah jednotlivých hodnocených parametrů nastavených pro skupiny typů toků. Využití předkládaných typově specifických referenčních podmínek není v případě hodnocení metodou HEM namístě. V rámci aktualizace metody HEM (Langhammer and Hartvich, 2014) byly referenční podmínky pro definované skupiny typů nastaveny na základě kombinace modelování, expertního odhadu a prostorového určení jako váhy jednotlivých parametrů, nebyly však blíže popsány. Předkládané typově specifické referenční podmínky lze tedy i v případě využívání metody HEM využít jako cílový stav navrhovaných revitalizačních opatření.

## 6 ZÁVĚRY

Cílem předkládané práce bylo vytvoření jednotného přístupu pro stanovení typově specifických referenčních podmínek pro vodní toky na území ČR a jejich stanovení. Vytýčeného cíle práce bylo dosaženo prostřednictvím vývoje metodického přístupu REFCON pro stanovení referenčních lokalit a záznam charakteristik referenčního stavu a jeho aplikace ve 44, resp. 16 referenčních lokalitách. Zároveň vytvoření typologie vodních toků a rozřazení 4187 úseků vodních toků do typů umožnilo popsat typová specifika referenčních podmínek vodních toků na území ČR.

Rozřazení vodních toků ČR do 9 typů potvrdilo významnou odlišnost chování vodních toků v podmínkách České vysočiny a flyšového pásma Západních Karpat. Terénním průzkumem a zaměřením charakteristik v referenčních lokalitách bylo potvrzeno, že odlišnosti mezi typy jsou zřejmé, ale hranice typů nejsou vždy zcela ostré. Zároveň charakteristiky referenčních lokalit potvrdily, že nelze striktně vymezit prahové hodnoty jednotlivých posuzovaných charakteristik typů vodních toků. Referenční podmínky je třeba posuzovat jako sadu charakteristik, protože oddělené posuzování charakteristik nebo jejich prahových hodnot může zkreslit celkovou interpretaci referenčních podmínek.

Předkládaná práce potvrdila význam kombinovaného využití distančních podkladů a nezbytné validace terénním průzkumem. Analýzy charakteristik přirozeného chování vodních toků pro území celé ČR, které je reálně provést pouze na základě dostupných distančních dat, umožnily rozřazení 4187 úseků vodních toků do typů a zároveň přispěly k omezení rozsahu nutnosti provedení terénního průzkumu pro podrobnou identifikaci přirozeného chování vodních toků (typově specifických referenčních podmínek).

Přístup stanovení hydromorfologických referenčních podmínek vodních toků na základě dat z průzkumu referenčních lokalit je v podmínkách ČR vhodný a reálně proveditelný. V rámci hledání referenčních lokalit se vzhledem k množství vodních nádrží a příčných překážek na tocích (jezů) jako nejnáročnější projevilo splnění kritéria neovlivněného hydrologického režimu.

Detailní data krajinného pokryvu příbřežních zón přispívají k popisu typů vodních toků a vhodně doplňují hydromorfologické charakteristiky pro stanovení referenčních podmínek.

Základní i dílčí hypotézy stanovené v úvodu práce byly potvrzeny a stanovené typově specifické referenční podmínky vodních toků na území ČR lze využít k hodnocení hydromorfologického stavu vodních toků i jako cílový stav revitalizačních opatření. Navíc popsaný metodický přístup umožňuje uživateli provést individuální stanovení lokálních/regionálních referenčních podmínek pro daný vodní tok na základě reálných dat získaných terénním průzkumem.

## ODKAZOVANÁ LITERATURA

Agences de l'Eau and Ministère de l'Environnement, 1998. SEQ Physique: Système d'Évaluation de la Qualité du Milieu Physique.

AOPK ČR, 2013. Konsolidovaná vrstva ekosystémů [elektronická geografická data]. Verze 2013. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha.

Barbour, M.T., Gerritsen, J., Snyder, B.D., Stribling, J.B., 1999. Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable rivers. Washington, USEPA.

Bartík, I., Trubenová, K., Haviar, M., Melová, K., Vančová, A., Magulová, R. 2008. Katalóg typov povrchových vôd SR: referenčné lokality. PS 2.3 Hodnotenie stavu povrchových vôd a interkalibrácia. Slovenský hydrometeorologický ústav, Výskumný ústav vodného hospodárstva.

Belletti, B., Rinaldi, M., Buijse, A.D., Gurnell, A.M., Mosselman, E., 2015. A review of assessment methods for river hydromorphology. *Environ Earth Sci* 73, 2078–2100.

Bertoldi, W., Gurnell, A., Surian, N., Tockner, K., Zanoni, L., Ziliani, L., Zolezzi, G., 2009. Understanding reference processes: linkages between river flows, sediment dynamics and vegetated landforms along the Tagliamento River, Italy. *River Research and Applications* 25, 501–516.

Boon, P.J., Holmes, N.T.H., Raven, P.J., 2010. Developing standard approaches for recording and assessing river hydromorphology: the role of the European Committee for Standardization (CEN). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 20, S55–S61.

Briem, E., 2003. Gewässerlandschaften der Bundesrepublik Deutschland. – ATV-DVWK Arbeits-bericht. Hennef: Mapped mit Textband, Steckbriefe, Kurzfassung, 4 Karten.

Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Oxford.

Brookes, A., 1988. *Channelized Rivers*. John Wiley, Chichester.

Brookes A., 1997. River Dynamics and Channel Maintenance. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 293–308.

Cebecauerová, M., Lehotský, M., 2012. Komplexita ripariálnej zóny – príklad rurálneho segmentu vodného toku Torysa. *Geografický časopis* 64/2, 133–154.

CEN, 2004. EN 14614:2004 Water quality – Guidance standard for assesseing the hydromorphological features of rivers.

CEN, 2010. EN 15843:2010 Water quality – Guidance standard on determining the degree of modification of river hydromorphology.

Church, M., 1992. Channel morphology and typology. In: Calow, P., Petts, G. (Eds.), *The River Handbook: Hydrological and Ecological Principles*. Blackwell, Oxford, pp. 126–143.

Downs, P.W., 1995. Estimating the probability of river channel adjustment. *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 687–705.

Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications* 25, 568–581.

Environment Agency, 2003. *River Habitat Survey in Britain and Ireland. Field Survey Guidance Manual: 2003*, Bristol.

European Commission, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23rd October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. *Official Journal of the European Communities*, L, 327/1, Luxemburg.

European Commission, 2003. Rivers and Lakes – Typology, Reference Conditions and Classification Systems. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Guidance Document n° 10, Brussels.

Fink, M.H., Moog, O., Wimmer, R., 2000. Fließgewässer-Naturräume Österreichs – eine Grundlage zur typologischen Charakteristik österreichischer Fließgewässer. Monographien des Umweltbundesamtes Nr. 128, Wien.

Frissell, C.A., Liss, W.J., Warren, C.E., Hurley, M.D., 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management* 10, 199–214.

Fuksa, J.K., Prchalová, H., 2004. Vodní útvary v ČR. Výchozí vymezení vodních útvarů povrchových a podzemních vod a typologie vodních útvarů povrchových vod. Praha, VÚV TGM.

Gurnell, A.M., Bussetini, M., Camenen, B., González Del Tánago, M., Grabowski, R.C., Hendriks, D., Henshaw, A., Latapie, A., Rinaldi, M., Surian, N., 2014. A hierarchical multi-scale framework and indicators of hydromorphological processes and forms. Deliverable 2.1, Part 1, of REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656.

Gurnell, A.M., Corenblit, D., García de Jalón, D., González del Tánago, M., Grabowski, R.C., O'Hare, M.T., Szweczyk, M., 2016a. Conceptual model of vegetation–hydrogeomorphology interactions within river corridors. *River Research and Applications* 32, 142–163.

Gurnell, A.M., Rinaldi, M., Belletti, B., Bizzi, S., Blamauer, B., Braca, G., Buijse, A.D., Bussetini, M., Camenen, B., Comiti, F., Demarchi, L., García De Jalón, D., González Del Tánago, M., Grabowski, R., Gunn, I., Habersack, H., Hendriks, D., Henshaw, A., Klösch, M., Lastoria, B., Latapie, A., Marcinkowski, P., Martínez Fernández, V., Mosselman, E., Mountford, J.O., Nardi, L., Okruszko, T., O'Hare, M.T., Palma, M., Percopo, C., Surian, N., van de Bund, W., Weissteiner, C., Ziliani, L., 2016b. A multiscale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management. *Aquat. Sci.* 78, 1–16.

Gurnell, A.M., Grabowski, R.C., 2016. Vegetation–hydrogeomorphology interactions in a low-energy, human-impacted river. *River Research and Applications* 32, 202–215.

Hack, J.T., Goodlet, J.C., 1960. Geomorphology and Forest Ecology of a Mountain Region in the Central Appalachians. Geological survey professional paper 347. United states government printing office, Washington.

Hajdukiewicz, H., Wyźga, B., Zawiejska, J., Amirowicz, A., Oglęcki, P., Radecki-Pawlik, A., 2017. Assessment of river hydromorphological quality for restoration purposes: an example of the application of RHQ method to a Polish Carpathian river. *Acta Geophys.* 65, 423–440.

Hey, R.D., 1997. Stable River Morphology. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 223–236.

Hönigová, I., Chobot, K., 2014. Jemné předivo české krajiny v GIS: konsolidovaná vrstva ekosystémů. *Ochrana přírody* 4, 26–30.

Horký, P., Slavík, O., 2011. Metodika hodnocení ekologického stavu útvarů povrchových vod tekoucích pomocí biologické složky ryby. VÚV TGM.

Hupp, C.R., Osterkamp, W.R., 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* 14, 277–295.

Hupp, C.R., Bornette, G., 2003. Vegetation as a Tool in the Interpretation of Fluvial Geomorphic Processes and Landforms in Humid Temperate Areas. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 269–288.



- Hupp, C.R., Rinaldi, M., 2007. Riparian Vegetation Patterns in Relation to Fluvial Landforms and Channel Evolution Along Selected Rivers of Tuscany (Central Italy). *Annals of the Association of American Geographers*, 97/1, 12–30.
- Jungwirth, M., Muhar, S., Schmutz, S., 2002. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47, 867–887.
- Kern, K., Fleischhacker, T., Sommer, M., Kinde, M., 2002. Ecomorphological survey of large rivers – Monitoring and assessment of physical habitat conditions and its relevance to biodiversity. *Large Rivers*, 13/1–2, 1–28.
- Kočí, M., Grulich, V., Opatřilová, L., Horký, P., 2011. Metodika hodnocení ekologického stavu útvarů povrchových vod tekoucích pomocí biologické složky makrofyta. VÚV TGM.
- Kondolf, G.M., Montgomery, D.R., Piégay, H., Schmitt, L., 2003a. Geomorphic Classification of Rivers and Streams. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 171–204.
- Kondolf, G.M., Piégay, H., Sear, D., 2003b. Integrating Geomorphological Tools in Ecological and Management Studies. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 633–660.
- Kondolf, G.M., Piégay, H., Landon, N., 2007. Changes in the riparian zone of the lower Eygues River, France, since 1830. *Landscape Ecol* 22, 367–384.
- Langhammer, J., 2007. HEM. Metodika pro monitoring hydromorfologických ukazatelů ekologické kvality vodních toků. Aktualizace duben 2008. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha, 47 pp.
- Langhammer, J., 2008. HEM. Hodnocení ukazatelů. Aktualizace březen 2009. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha, 23 pp.
- Langhammer, J., Hartvich, F., Mattas, D., Zbořil, A., 2009. Vymezení typů útvarů povrchových vod. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha.
- Langhammer, J., Hartvich, F., Zbořil, A., 2010. Metodika vymezení útvarů povrchových vod. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha.
- Langhammer, J., Hartvich, F., Mattas, D., Rödlová, S., Zbořil, A., 2012. The variability of surface water quality indicators in relation to watercourse typology, Czech Republic. *Environmental Monitoring and Assessment* 184, 3983–3999.
- Langhammer, J., 2014. HEM 2014 – Metodika monitoringu hydromorfologických ukazatelů ekologické kvality vodních toků. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha.
- Langhammer, J., Hartvich, F., 2014. HEM 2014 – Metodika typově specifického hodnocení hydromorfologických ukazatelů ekologické kvality vodních toků. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha.
- LAWA, 1999. Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahrensvorschlag für kleine und mittelgrosse Fließgewässer.
- Lehotský, M., 2004. River morphology hierarchical classification (RMHC). *Acta Universitatis Carolinae Geographica* 39/1, 33–45.
- Lehotský, M., 2006. Morfológia rieky – princípy a nástroje výskumu jej prispôsobovania. Geomorfologické výzkumy v roce 2006. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc, 147–153.
- Lehotský, M., Grešková, A., 2004. Riverine landscape and geomorphology: ecological implications and river management strategy. *Ekológia* 23, 179–190.
- Lehotský, M., Grešková, A., 2007. Fluvial geomorphological approach to river assessment – methodology and procedure. *Geografický časopis* 59/2, 107–129.
- Leopold, L.B., Maddock, T., 1953. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. *Geological Survey Professional Paper* 252. United States Government Printing Office, Washington.

- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1964. *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman, San Francisco.
- Leuven, R.S.E.W., Nienhuis, P.H., 2001. River restoration and flood protection: controversy or synergism? *Hydrobiologia* 444, 85–99.
- 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.
- Magulová, R., Melová, K., Lupták, L., 2007. Hydromorfologické prvky kvality. In: Kelnarová, Z. et al., 2007. *Metodika pre odvodenie referenčných podmienok a klasifikačných schém pre hodnotenie ekologického stavu vôd*. MŽP SR, SHMÚ, ÚZ SAV, VÚVH, SAŽP, Bratislava.
- Marston, R.A., Guy Pautou, J.G., Piegay, H., Bravard, J.-P., Arneson, C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology* 13, 121–131.
- Marvan, P., Opatřilová, L., Heteša, J., Maciak, M., Horký, P., 2011. Metodika hodnocení ekologického stavu útvarů povrchových vod tekoucích (kategorie řeka) pomocí biologické složky fyto-bentos. VÚV TGM.
- Matoušková, M., 2003. Ekohydrologický monitoring jako podklad pro revitalizaci vodních toků, modelová studie povodí Rakovnického potoka. *Disertační práce, PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha*, 218 pp.
- Matoušková, M., 2008a. Assessment of the river habitat quality within European Water Framework Directive: Application to different catchments in Czechia. *Geografie* 113/3, 223–236.
- Matoušková, M., 2008b. Metoda ekomorfoloického hodnocení kvality habitatu vodních toků EcoRivHab. In: Matoušková, M. (ed.): *Ekohydrologický monitoring vodních toků v kontextu evropské Rámcové směrnice o vodní politice*. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha, pp. 43–65.
- Matoušková, M. (ed.), 2008c. *Ekohydrologický monitoring vodních toků v kontextu evropské Rámcové směrnice o vodní politice*. PŘF Univerzity Karlovy v Praze, Praha.
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* 109/5, 596–611.
- Opatřilová, L., Kokeš, J., Němejcová, D., Syrovátka, V., Zahrádková S., Maciak, M., Horký, P., 2011a. Metodika hodnocení ekologického stavu útvarů povrchových vod tekoucích pomocí biologické složky makrozoobentos. VÚV TGM.
- Opatřilová, L., Desortová, B., Potužák, J., Liška, M., Maciak, M., Horký, P., 2011b. Metodika hodnocení ekologického stavu útvarů povrchových vod tekoucích pomocí biologické složky fytoplankton. VÚV TGM.
- Opatřilová, L., Němejcová, D., Zahrádková S., Horký, P., Marvan, P., Desortová, B., Grulich, V., Tušil, P., Durčák, M., Maciak, M., 2013. Metodika pro stanovení referenčních podmínek pro jednotlivé složky biologické kvality. VÚV TGM.
- Osterkamp, W.R., Hupp, C.R., 1984. Geomorphic and vegetative characteristics along three Northern Virginian streams. *Geol. Soc. Am. Bull.* 95, 1093–1101.
- Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C.N., Follstad, S.J., Galat, D.L., Loss, S.G., Goodwin, P., Hart, D.D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Sudduth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology* 42, 208–217.
- Piégay, H., Schumm, S.A., 2003. System Approaches in Fluvial Geomorphology. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 105–134.
- Poppe, M., Kail, M., Aroviita, J., Stelmaszczyk, M., Gielczewski, M., Muhar, S., 2016. Assessing restoration effects on hydromorphology in European mid-sized rivers by key hydromorphological parameters. *Hydrobiologia* 769, 21–40.
- Pottgiesser, T., Sommerhäuser, M., 2004. Fließgewässertypologie Deutschlands: Die Gewässer-typen und ihre Steckbriefe als Beitrag zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie. In: Steinberg, C.W., Calmano, R., Wilken, D., Klapper, H. (Hrsg.): *Handbuch der Limnologie*. 19. Erg.Lfg. 7/04. VIII-2.1: 1–16 + Anhang.

- Pottgiesser, T., Sommerhäuser, M., 2008. Beschreibung und Bewertung der deutschen Fließgewässertypen - Steckbriefe und Anhang, Umwelt Bundes Amt, LAWA, UBE.
- Raven, P.J., Fox, P., Everard, M., Holmes, N.T.H., Dawson, F.H., 1997. River Habitat Survey: A new system for classifying rivers according to their habitat quality. In: Boon, P.J., Howell, D.L. (Eds.), *Freshwater quality: Defining the indefinable?*, pp. 215–234.
- Rinaldi, M., 2003. Recent Channel Adjustments in Alluvial Rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 28. 587–608.
- 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.
- Rinaldi, M., Gurnell, A.M., González del Tánago, M., Bussettini, M., Hendriks, D., 2016. Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquat Sci* 78, 17–33.
- Rosendorf, P., Tušil, P., Durák, M., Svobodová, J., Beránková, T., Vyskoč, P., 2011. Metodika hodnocení všeobecných fyzikálně-chemických složek ekologického stavu útvarů povrchových vod tekoucích. VÚV TGM.
- Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22, 169–199.
- Schmedtje, U., Sommerhäuser, M., Braukmann, E., Briem, E., Hasse, P., Hering, D., 2001. Grundlage für die Erarbeitung der wichtigsten biozönotisch relevanten Fließgewässertypen im Sinne der Wasserrahmenrichtlinie.
- Schumm, S.A., 1977. *The Fluvial System*, John Wiley & Sons, New York.
- Schumm, S.A., 1985. Patterns of Alluvial Rivers. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 13, 5–27.
- Šípek, V., Matoušková, M., Dvořák, M., 2010. Comparative analysis of selected hydromorphological assessment methods. *Environmental Monitoring Assessment* 169, 309–319.
- 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.
- Škarpich, V., Kašpárek, Z., Galia, T., Hradecký, J., 2016a. Anthropogenic impact and morphology channel response of Beskydian gravel-bed rivers: a case study of the Ostravice River, Czechia. *Geografie* 121/1, 99–120.
- Škarpich, V., Horáček, M., Galia, T., Kapustová, V., Šala, V., 2016b. The effects of river patterns on riparian vegetation: A comparison of anabranching and single-thread incised channels. *Moravian geographical reports* 24/3, 24–31.
- Slavíková, A., Pravec, M., Horecký, J., Dobrovský, P., Slavík, O., Musil, J., Birklen, P., Marek, P., 2014. Koncepce zprůchodnění říční sítě ČR. MŽP, VÚV T.G.M., AOPK ČR, Praha.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union* 38/6, 913–920.
- Thorne, C.R., 1997. Channel Types and Morphological Classification. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 175–222.
- Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., Cushing, C.E., 1980. The River Continuum Concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37, 130–137.
- Verdonschot P.F.M., 2000. Integrated ecological assessment methods as a basis for sustainable catchment management. *Hydrobiologia* 422–423, 389–412.
- Weiss, A., Matoušková, M., Matschullat, J., 2008. Hydromorphological assessment within the EU-Water Framework Directive – trans-boundary cooperation and application to different water basins. *Hydrobiologia* 603, 53–72.

Wimmer, R., Wintersberger, H., Parthl, G.A., 2012a. Hydromorphologische Leitbilder. Band 1: Einführung, Definitionen und Parameter. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft – Abt. VII / 1.

Wimmer, R., Wintersberger, H., Parthl, G.A., 2012b. Hydromorphologische Leitbilder Fließgewässertypisierung in Österreich. Band 2: Naturraumbeschreibungen, Bioregionen und Typologie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft – Abt. VII / 1.

Wimmer, R., Wintersberger, H., Parthl, G.A., 2012c. Hydromorphologische Leitbilder. Band 3: Große Flüsse. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft – Abt. VII / 1.

Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. Transactions, American Geophysical Union 35/6, 951–956.

Wolman, M.G., Leopold, B.L., 1957. River Flood Plains: Some Observations On Their Formation. Geological Survey Professional Paper 282-C. United States Government Printing Office, Washington.

Wolman, M.G., Miller, J.P., 1960. Magnitude and frequency of geomorphic processes. Journal of Geology 68, 54–74.

Wyźga, B., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., Hajdukiewicz, H., 2012. Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. Earth Surface Processes and Landforms 37, 1213–1226.

Zawiejska, J., Wyźga, B., 2010. Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: Patterns, causes and controls. Geomorphology 117, 234–246.

Odkazovaná data:

ČHMÚ, 2013. Databáze rozvodnic v měřítku 1:10 000.

ČÚZK, 2013. Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED).

MŽP, 2013. Evidence vodních útvarů povrchových vod MŽP ČR k roku 2013.



## 7 PUBLIKOVANÉ ODBORNÉ ČLÁNKY

Výsledky disertační práce jsou přestaveny jako soubor publikovaných odborných článků, přehled článků je uveden v **Tabulce 11**. Význam jednotlivých článků pro vytvoření přístupu pro stanovení typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek je patrný z **Obr. 6**.

**Tabulka 11** Přehled odborných publikovaných článků, které představují hlavní výsledky práce.

Kapitola	Název a reference článku	Databáze	Podíl (%)
7.1	Kujanová, K., Matoušková, M., 2016. Improvement in physical river habitat quality in response to river restoration measures. <i>Geografie</i> 121/1, 54–78.	WoS IF	80
7.2	Kujanová, K., Matoušková, M., 2017. Identification of hydromorphological reference sites using the new REFCON method, with an application to rivers in the Czech Republic. <i>Ecohydrology &amp; Hydrobiology</i> 17/3, 235–245.	SCOPUS	80
7.3	Kujanová, K., Matoušková, M., Kliment, Z., 2016. Hydromorphological parameters of natural channel behavior in conditions of the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic. <i>Geomorphology</i> 258, 69–81.	WoS IF	60
7.4	Kujanová, K., Matoušková, M., 2017. Typy vodních toků na území České republiky z pohledu hydromorfologie. <i>Vodní hospodářství</i> 67/12, 2–6.	RVV	80
7.5	Kujanová, K., Matoušková, M., Hošek, Z., 2018. The relationship between river types and land cover in riparian zones. <i>Limnologica</i> 71, 29–43.	WoS IF	70

## **7.1 IMPROVEMENT IN PHYSICAL RIVER HABITAT QUALITY IN RESPONSE TO RIVER RESTORATION MEASURES**

Kujanová, K., Matoušková, M., 2016. Improvement in physical river habitat quality in response to river restoration measures. *Geografie* 121/1, 54–78.

# Improvement in physical river habitat quality in response to river restoration measures

KATEŘINA KUJANOVÁ, MILADA MATOUŠKOVÁ

---

Charles University in Prague, Faculty of Science, Department of Physical Geography and Geology, Prague, Czechia; e-mail: k.smerousova@email.cz, milada.matouskova@natur.cuni.cz

**ABSTRACT** The main goal of this paper is to verify the hypothesis that application of appropriate restoration measures can lead to an improvement in river habitat quality and to achieve good hydromorphological conditions within the ecological status under the Water Framework Directive 2000/60/ES. The study includes an analysis of river network modifications founded on comparing historical and present-day maps, a determination of regional hydromorphological reference conditions based on a field survey and measurements, an assessment of hydromorphological quality of the studied water body and a proposal of appropriate restoration measures. The effects on improvement in hydromorphological status were predicted on the basis of a simulation of hydromorphological conditions after the application of proposed restoration measures. Overall, at least a good hydromorphological status would be achieved. The study proved that it is essential to carry out a hydromorphological survey including a determination of reference conditions as it provides some outputs necessary for a proposal and application of efficient restoration.

**KEY WORDS** hydromorphology – river restoration – river habitat quality – Slubice River – Water Framework Directive – HEM

---

KUJANOVÁ, K., MATOUŠKOVÁ, M. (2016): Improvement in physical river habitat quality in response to river restoration measures. *Geografie*, 121, 1, 54–78.

Received July 2014, accepted November 2015.

## 1. Introduction

Increased use and anthropogenic modifications of rivers have brought the need to understand ecological impacts on a broad spectrum of changes of river habitats (Vaughan et al. 2009), and they have also brought a higher interest in their control and evaluation (Verdonschot 2000).

Approach to hydromorphological assessment should be based on understanding of the complex relations among fluvial morphology, hydrology and biological elements (Matoušková 2008a; Orr et al. 2008; Vaughan et al. 2009; Boon, Holmes, Raven 2010; Raven et al. 2010). A field survey has been the most preferred approach to hydromorphological data collection due to quality of its outcomes. Maps and aerial images document significant alterations (Weiss, Matoušková, Matschullat 2008; Vaughan et al. 2009).

As well as reference ecosystem is generally used in setting restoration project goals and later in its evaluation (Gann, Lamb 2006), the majority of European hydromorphological assessment methods under Water Framework Directive (WFD) are based on comparing the present conditions of rivers to the relevant regional reference conditions. Reference conditions are often provided in the sense of original or initial historical conditions; however, these, too, may have been exposed to the human impact (Dufour, Piegay 2009; Nestler et al. 2010) or to natural disturbances in the past. Thus although, the reference conditions of rivers and their floodplains indicate an ideal solution, any implementation of restoration measures depends on the present conditions, capacities and limitations of the today's European cultural landscape (Leuven, Nienhuis 2001; Matoušková 2005).

The basis for successful restoration lays in designation of a suitable morphological characteristics which create natural-like ecosystem that predestines hydraulic conditions and corresponds with the existing climatic and hydrological conditions and that can withstand extreme events as well as average conditions with minimal external assistance or subsidy (Wade et al. 2000; Just et al. 2005; Palmer et al. 2005; Gann, Lamb 2006). According to Gann, Lamb (2006) and Newson, Large (2006), this necessitates, in particular, the creation of self-sustaining river habitats, which should be incorporated in the surrounding landscape while Davis, Slobodkin (2004) and Palmer et al. (2005) emphasize the importance of supporting self-development of the river ecosystems. It is especially important to ensure balanced relations between management, protection and increasing value of the ecosystem (Gann, Lamb 2006; Hannah, Sadler, Wood 2007). An improvement of the ecological status is a priority in order to reduce the effects of climate changes (Alison 2007; Raven et al. 2010). Because a river should be understood as a continuum based on the River Continuum Concept (Vannote et al. 1980), the reaches above and below the restored segment which still remain degraded in terms of ecology, hydrology and geomorphology can have a negative impact on



the restored segment (Matoušková 2008a). Water quality of the restored segment and even reaches above it should be considered as limiting factor for occurrence of biological elements (Jähnig et al. 2010, Sundermann et al. 2011).

The need to focus to a greater extent also on the riparian zone and the floodplain within the ecohydromorphological survey is emphasized (Zalewski 2006; Matoušková 2008b; Weiss, Matoušková, Matschullat 2008; Vaughan et al. 2009; Matoušková, Weiss, Matschullat 2010; McBride, Hession, Rizzo 2010; Šípek, Matoušková, Dvořák 2010). The potential for success of the river ecosystem restoration is increased by incorporating the floodplain in the restoration process (Lüderitz et al. 2004). The importance of the “river background” is manifested not only in assessment of the ecological status, but also in respect of flood protection. The extraordinary flood events resulted in the support of restorations and of using the retention area of floodplains as a suitable way to retain and reduce flood waves (Just et al. 2005, Jansen et al. 2006, Matoušková 2008b, Zalewski 2008).

This study includes analysis of river network modifications, a determination of regional hydromorphological reference conditions, and hydromorphological field survey in the case study river basin. The aim of this study was to produce on two segments of the main river within the study area a proposal of appropriate restoration measures for improvement of the hydromorphological status and prediction of its effect on the hydromorphological elements within ecological status under WFD. The hypothesis was that restoration of physical habitat of a channel and riparian belts can help to improve the hydromorphological status.

## 2. Applied methods and data sources

The analysis of changes in lengths and planform of the river network in the study river basin was based on comparing historical maps of Imperial Imprints of the Stable Cadastre of Bohemia from 1824–1843 in 1:2,880 scale and the present cadastral maps. The historical maps were georeferenced in GIS environment, and created vector layers were measured, evaluated in the tabular form, and compared to the maps of the present river network.

The Hydroecological monitoring – HEM (Langhammer 2007, 2008) methodology was applied to assess the present status of hydromorphological elements and the effect of proposed restoration measures. This methodology is compliant with the WFD and EN 14614 (CEN 2004) requirements and was accepted as the national methodology for the assessment of hydromorphological elements of ecological status for rivers in Czechia.

HEM methodology is based on the field survey of a river and its floodplain. The river under evaluation is divided in reaches of heterogeneous lengths and homogeneous nature based on the following indicators: planform, land cover of

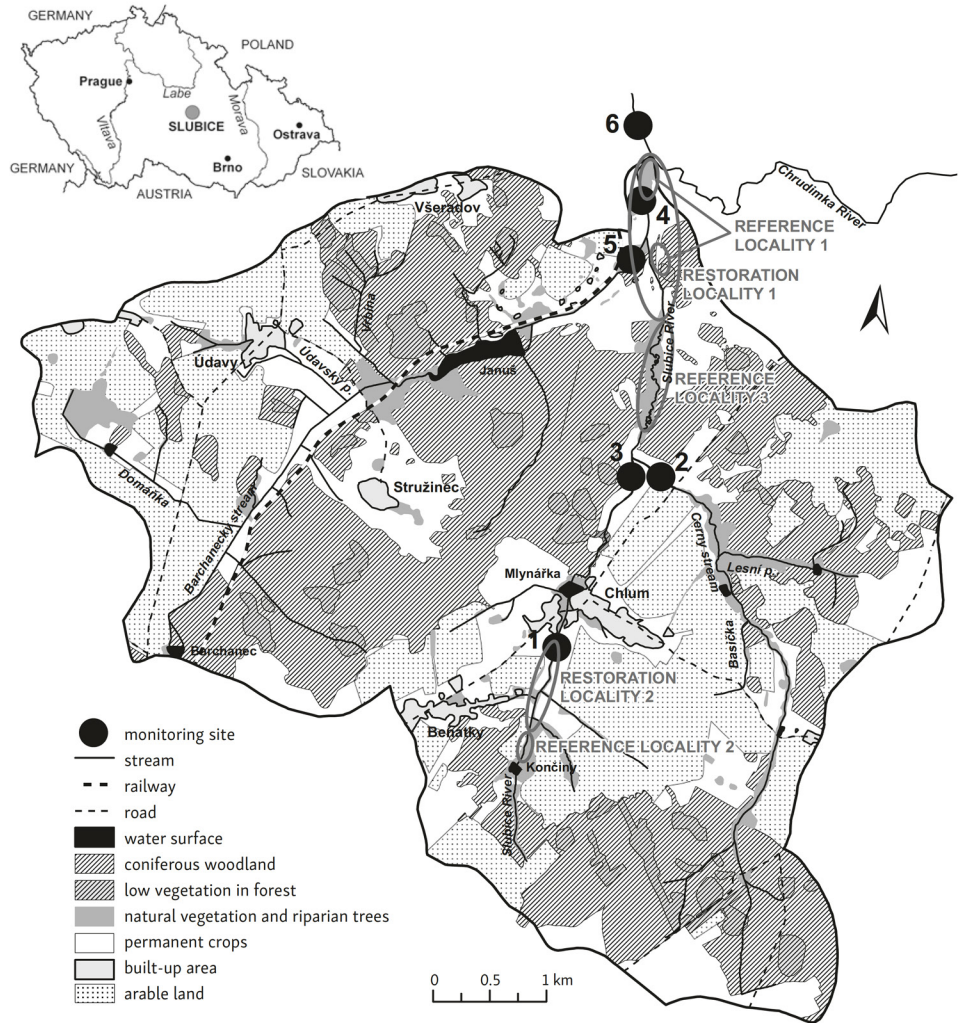
**Table 1** – Overview of parameters assessed by HEM methodology, their dividing into mapped zones and their weight (Langhammer 2007, 2008)

Mapped zones	Parameters assessed	Weight of individual parameters
Channel and planform	Planform modification	0.30
	Longitudinal continuity	0.30
	Variability of channel width	0.10
	Variability of depths in longitudinal profile	0.15
	Variability of depths in cross-section profile	0.15
River bed	Channel bed forms	0.30
	River bed substrate	0.20
	Modification of river bed	0.30
	Extend of wood debris	0.20
Bank and inundation area	Bank modifications	0.30
	Bank vegetation	0.30
	Riparian belt land cover	0.25
	Floodplain land cover	0.15
Flow and hydrological regime	Flow character	0.30
	Hydrological regime alteration	0.30
	Lateral connectivity of river and floodplain	0.20
	Variability of discharge	0.20

**Table 2** – Hydromorphological status classification (Langhammer 2008)

Levels of hydromorphological status (HS)	Hydromorphological quality value	
	≥	<
1 Very good	1.0	1.7
2 Good	1.7	2.5
3 Average	2.5	3.5
4 Poor	3.5	4.3
5 Destroyed	4.3	5.0

the riparian zone and floodplain, and bank modifications. The assessment uses a 5 point scale where 1 means the best score. HEM methodology considers 17 parameters in 4 mapped zones. An overview of parameters assessed according to HEM, weight of individual parameters and zonation is provided in Table 1. The different weight is set to represent the impact of parameters that are of major importance to hydromorphology of rivers. First, the value for each of 4 zones is calculated for individual reach of the river by using the weighted average of score of individual parameters. Then the overall hydromorphological quality value for each reach is calculated as the arithmetic mean of 4 zones (Langhammer 2008). The hydromorphological status classification is based on classification of calculated value of hydromorphological quality for each reach on the 5-level hydromorphological status (HS) according to Table 2. Hydromorphological status of a river corresponds



**Fig. 1** – Location, monitoring sites of water quality and Land Cover of the Slubice River basin in 2009. Legend for monitoring sites: 1 – The Slubice River (upper), 2 – Černý stream, 3 – The Slubice River (middle), 4 – The Slubice River (lower), 5 – Barchanecký stream, 6 – The Chrudimka River. Source: aerial photos GEODIS 2009 and author’s field survey.

to reference conditions if the very good hydromorphological status is achieved in the given reach, and at the same time, if none of the evaluated parameters reaches a value worse than 2 (Langhammer 2007).

Given that type-specific hydromorphological conditions in Czechia have not been determined, a determination of regional hydromorphological reference condition was a necessary prerequisite for formulating any proposal of restoration

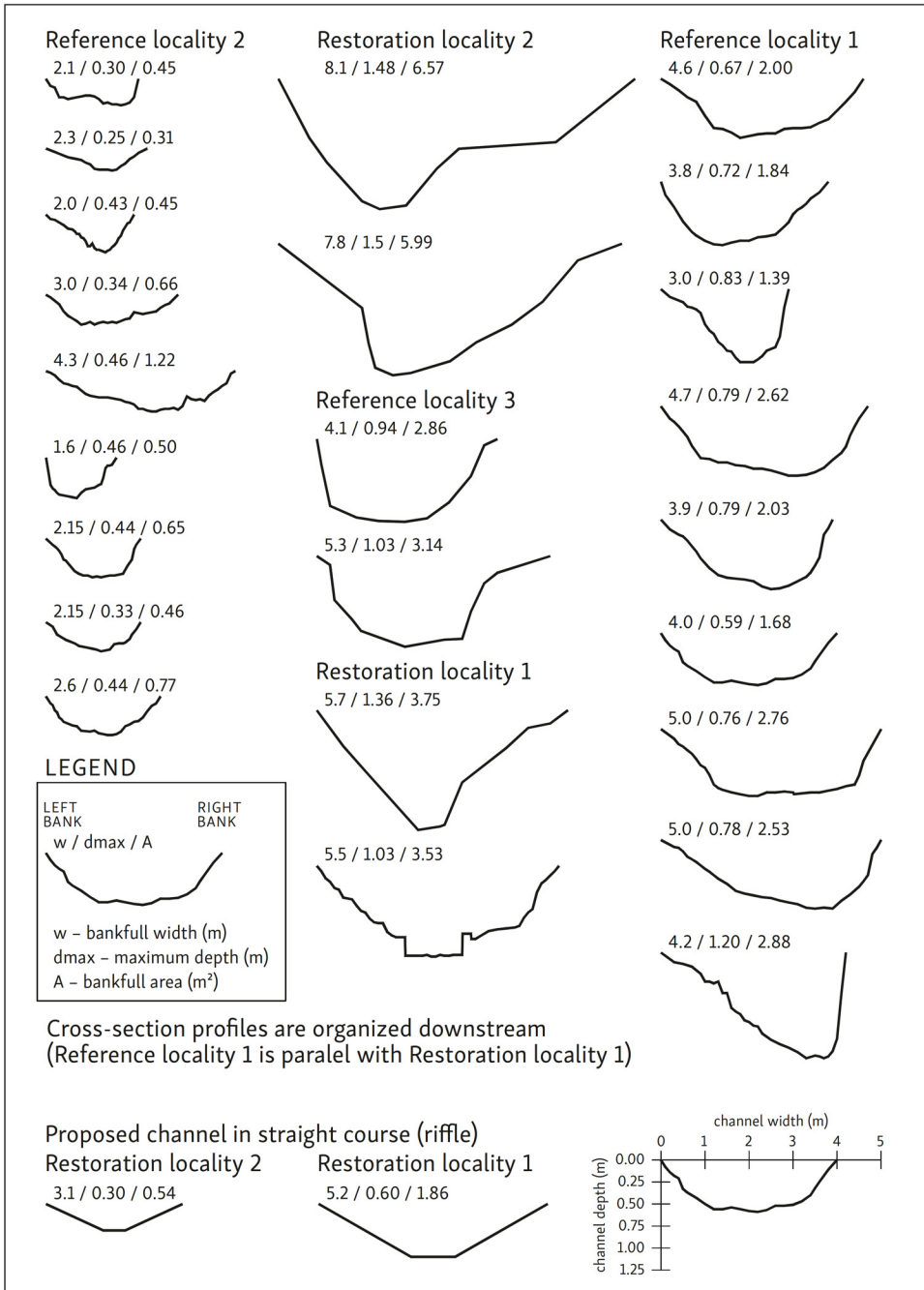
**Table 3** – Monthly measurements of runoff variability in 6 profiles in study area in period 2008–2010 (MS – monitoring site)

Month	Q (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )					
	MS 1	MS 2	MS 3	MS 4	MS 5	MS 6
November 08	0.010	0.016	0.031	0.046	0.007	0.455
December 08	0.034	0.047	0.024	0.170	0.066	0.602
January 09	0.009	0.029	0.020	0.094	0.043	0.422
February 09	0.023	0.046	0.041	0.178	0.084	1.454
March 09	0.111	0.440	0.219	0.973	0.390	—
April 09	0.039	0.084	0.113	0.378	0.140	1.095
May 09	0.007	0.011	0.006	0.042	0.023	0.353
June 09	0.009	0.032	0.021	0.089	0.047	0.528
July 09	0.011	0.045	0.020	0.131	0.018	0.745
August 09	0.014	0.020	0.044	0.095	0.051	1.016
September 09	0.011	0.016	0.012	0.064	0.007	0.173
October 09	0.007	0.007	0.007	0.018	0.006	0.127
November 09	0.0385	0.0426	0.0623	0.2328	0.1158	1.0794
December 09	0.0055	0.0746	0.0463	0.2637	0.1243	0.8715
January 10	0.0360	0.0871	0.0628	0.2092	0.0860	1.4119
February 10	0.0207	0.0105	—	0.1021	0.0497	0.6987
March 10	0.0319	0.0553	0.0634	0.1967	0.0685	0.7234
April 10	0.1554	0.3516	0.4023	1.5224	0.6168	—
May 10	0.0237	0.0388	0.0378	0.1598	0.0617	0.8144

measures. Reference conditions were determined on the basis of detailed field survey and measurements of many hydromorphological characteristics in natural reaches of the selected river within the study area in 2008–2010. On the basis of field survey (GPS, leveling survey, electronic distance measuring instrument), meandering course and slope steepness were drawn. Runoff variability was measured by hydrometric propeller monthly in 6 profiles (monitoring sites in Fig. 1) in 2008–2010. Outputs of measurements are presented in Table 3. Then individual cross-section profiles (across the whole floodplain) were surveyed and variability of width and depth, riffles and pools and substrate were recorded. Selected measured cross-section profiles, their maximum depth and bankfull area are presented in Figure 2. Channel capacity was derived from runoff variability measurements and recorded characteristics of cross-section profiles. At the same time, vegetation species in reference locality were recorded.

As a part of a restoration proposal it is necessary to take water quality into consideration. Therefore, in period autumn 2009 to summer 2010 every three months 12 basic physical-chemical and biochemical parameters were monitored (temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity, hardness, nitrite nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, orthophosphates, COD-Mn, calcium, chlorides) based on standard chemical analyses. Water quality classes were determined





**Fig. 2** – Selected measured cross-section profiles (their maximum depth and bankfull area) in reference localities and their comparison with present and proposed cross-section profiles in restoration localities

in accordance with the Czech Norm ČSN 75 7221. Within the study river basin 6 profiles in total were monitored (monitoring sites in Fig. 1).

All results were interpreted in GIS environment (details in AutoCAD) whilst digital layers ZABAGED 1:10,000 (national geographical database) and aerial images (GEODIS) were used for background presentation.

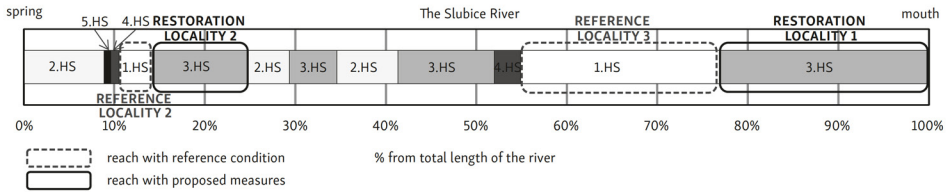
### 3. Study area

The study area the Slubice River basin covers 29.21 km<sup>2</sup> and is located in the northern edge of Vysočina region in triangle of towns: Havlíčkův Brod, Žďár nad Sázavou and Hlinsko (Fig. 1). The Slubice River is left site tributary of the Chrudimka River which is left site tributary of The Elbe River. The head spring of the Slubice River (lat 49°41.94' N, long 15°51.36' E) lays 617 m a.s.l. and the altitude at the confluence (lat 49°45.03' N, long 15°51.73' E) is 540 m a.s.l. The actual river length is 6.75 km and average annual discharge  $Q_a = 0.32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (HMÚ 1970).

The highland type of landscape of the Slubice River basin is characterized by mixture of meadows, pastures, fields, forests and ponds. 51.5% of the river basin area is covered with forests; arable land represents 29.2% of the river basin area, while meadows and pastures represent only 16.7% (Fig. 1). The area belongs to rather cold, humid and windy parts of Czechia. The average annual temperature is 6 °C and the average annual precipitation in the river basin is 879 mm (CHMI 2008).

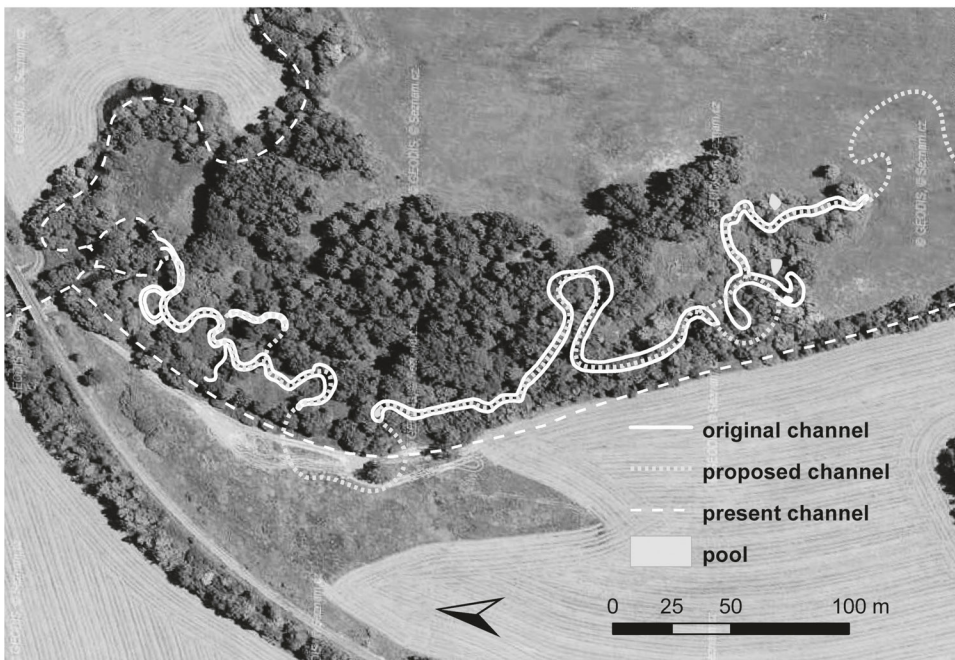
The Slubice River was selected because its reaches vary between degraded and in natural conditions that deserve specific protection. Although the whole Slubice River basin was Protected Landscape Area, in the 2<sup>nd</sup> half of the 20<sup>th</sup> century 35% of the basin has been drained due to agricultural intensification and 49.8% of monitored streams have been modified (artificially stabilized). The study area thus provides reaches suitable for a determination of regional reference conditions as well as reaches with different anthropogenic pressures suitable for application of restoration measures and prediction of their effects.

Selection of localities suitable for proposing restoration measures was based on the essential idea of restoring reaches of the worst hydromorphological status where the highest potential effect of status improvement could be achieved. The channel deepening, bank reinforcement, the runoff situation and gradient of the river bed (unsuitable straightening) were decisive for necessity of restoration and creation of self-sustaining river habitats. Important was to connect the restored reaches to the natural reaches of the stream above, which were used as reference localities (Figs. 1, 3), and use of unused and wet properties in floodplain for creation of a new channel. Based on assessment of all the aspects above, two segments of the Slubice River were selected for the restoration measures proposal, Restoration

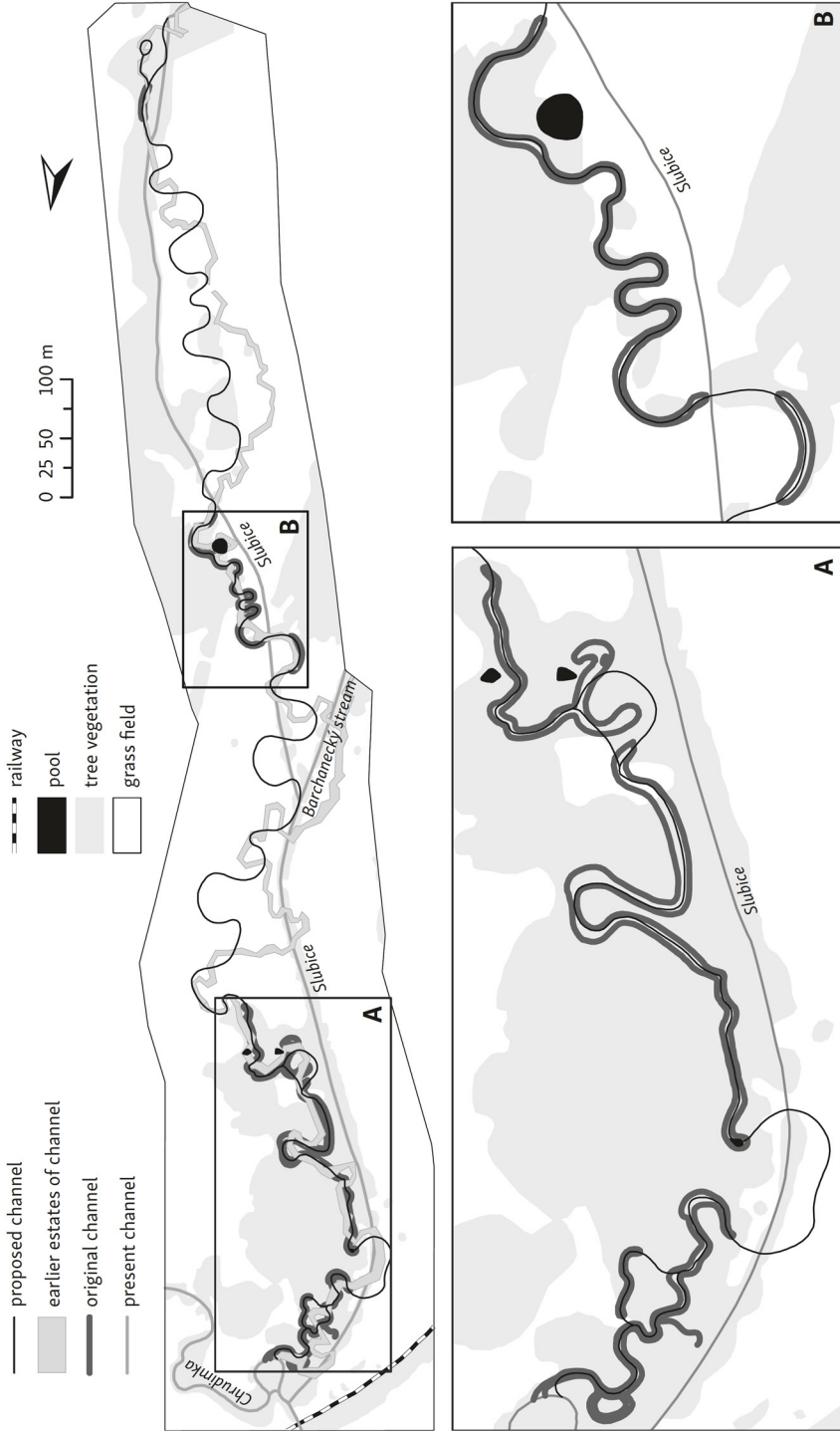


**Fig. 3** – Outputs of hydromorphological status assessment of the Slubice River using HEM methodology (Langhammer 2007, 2008), drawn in longitudinal profile of Slubice River

locality 1 (lat 49°45.00' N, long 15°51.74' E; lat 49°44.40' N, long 15°51.93' E), and Restoration locality 2 (lat 49°42.97' N, long 15°51.52' E; lat 49°42.46' N, long 15°51.39' E). The uniqueness of Restoration locality 1 lays in existence of preserved meanders of former channels – Reference locality 1 in the floodplain (Fig. 4), which were not filled and destroyed due to low accessibility of the terrain. These former channels were used for determination of regional reference conditions (course, gradient of the river bed, shape of cross-section profiles, channel capacity, etc.), and were included in the resulting proposed channel (Figs. 4, 5). Such proposal means restoration of flow regime through the former channels. Restoration locality 2 was



**Fig. 4** – Aerial photo of a section of Reference locality 1 and Restoration locality 1 – former channel detail, proposed connection of former channels and present channel course. Source: aerial photos GEODIS 2009.



**Fig. 5** – Detailed comparison of planform of present straightened channel in Restoration locality 1, former channel which has remained in two separate parts (details A and B – together Reference locality 1) and proposed channels in the Restoration locality 1.



**Table 4** – Comparison of main characteristics of restoration and reference localities including reach of the Slubice River where partially restoration was realized in period 1997–1999

Characteristics	Restoration locality 1	Reference locality 1	Restoration locality 2	Reference locality 2	Reach, where partially restoration was realized
Channel length	1,237 m	450 m	1,046 m	480 m	689 m
Channel course modification	Shortening about 48.8%	Natural meandering course	Shortening about 31.4%	Natural meandering course	Straightening
Channel width	Cca 4.5–6 m	Cca 4–5 m	Cca 6–8 m	Cca 2–2.5 m	Cca 1.2–1.6 m
Channel depth	Cca 0.9–1.4 m	Cca 0.7–0.8 m	Cca 1–1.5 m	Cca 0.3–0.5 m	Cca 0.5–1.2 m
Reinforcement of river bed and bank	Concrete blocks or wooden bars stabilized by metal stakes in banks; artificial substrate of river bed	Preserved meanders without reinforcement	Wooden bars stabilized by metal stakes in banks	Meanders without reinforcement	Wooden bars in banks; artificial substrate of river bed
Channel capacity	Cca 4.3 m <sup>2</sup>	Cca 2.5 m <sup>2</sup>	Deepening, cca 7.4 m <sup>2</sup>	Cca 0.6 m <sup>2</sup>	Cca 1.5 m <sup>2</sup>
Vegetation of floodplain	Wet meadow	Natural forest	Meadow	Natural forest	Meadow
Quality of zone channel and planform (HEM)	4	1	3–4	1	4
Quality of zone river bed (HEM)	3–4	1–2	3–5	1	4
Quality of zone bank and inundation (HEM)	2–3	1	2–3	1	2–3
Quality of zone flow and hydrological regime (HEM)	2–3	1	2–3	1	2–3
Overall hydromorphological quality (HEM)	3	1	2–3	1	3

chosen particularly for considerable deepening and continuing deep erosion of the straightened channel associated with a drainage effect, and dangerous residues of channel stabilization. Comparison of main characteristics of restoration localities and reference localities is presented in Table 4. As an example a restored reach of the Slubice River is included. This partial restoration was realized in period 1997–1999 and occurred only within the modified channel using biotechnical measures, e.g. the obstacles and wooden reinforcement. A channel course was not restored. The partial restoration did not improve the classification of the hydromorphological status.

## 4. Results

### 4.1. Changes in the river network length and shape

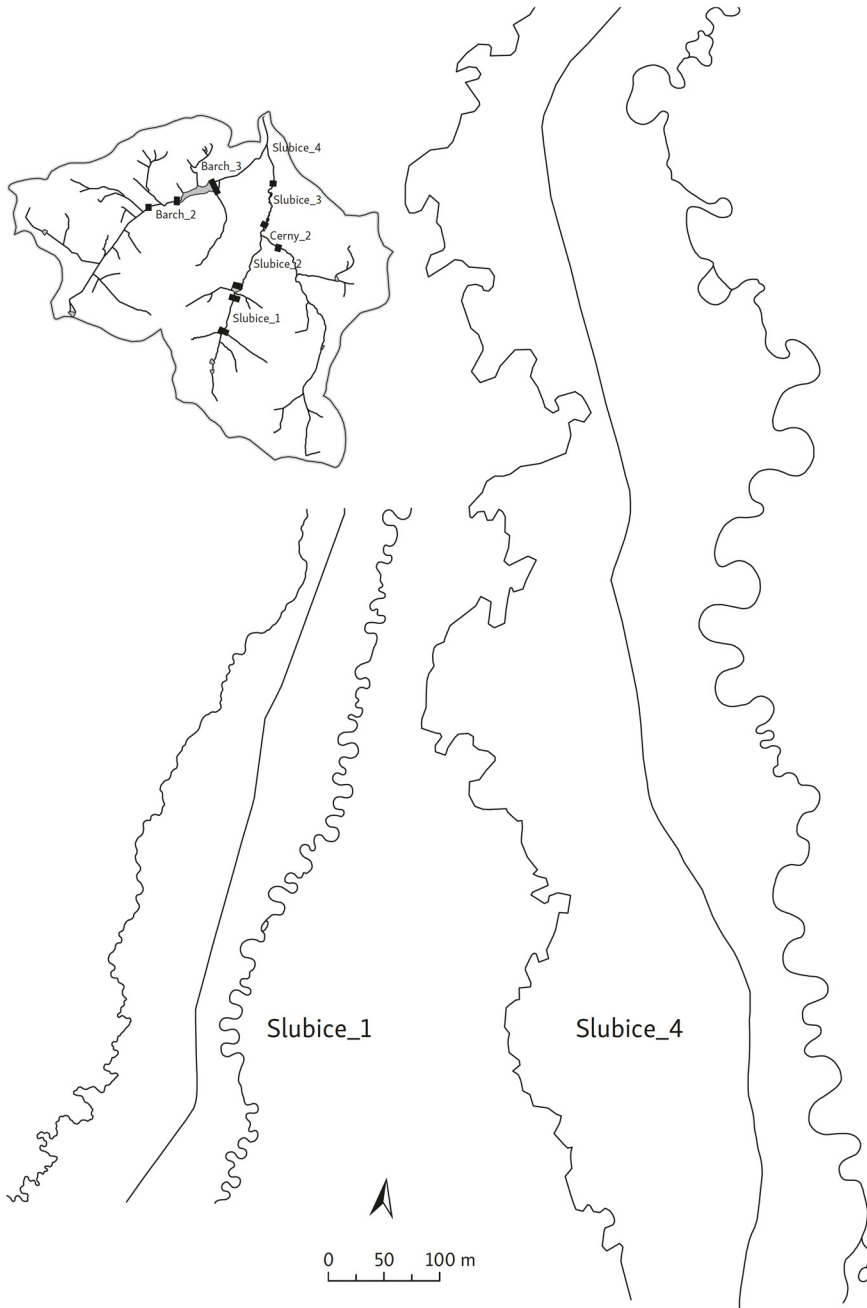
Determination of the original course of the streams in the Slubice River basin before their modification and evaluation of the changes in the length and shape of the river network proved considerable shortening (Fig. 6). The calculation shows shortening by 31% in upper course of the Slubice River (reach Slubice\_1, Figs. 6, 7), and 48.8% in the lower course (reach Slubice\_4, Figs. 6, 7). Such a level of river network shortening is higher than the Czech average of river network modification – 28.4% (Langhammer, Vajskebr 2007). The main reasons for modifications done in the past were to drain the landscape in order to intensify agriculture and flood protection of arable land in the floodplain.

### 4.2. Hydromorphological status

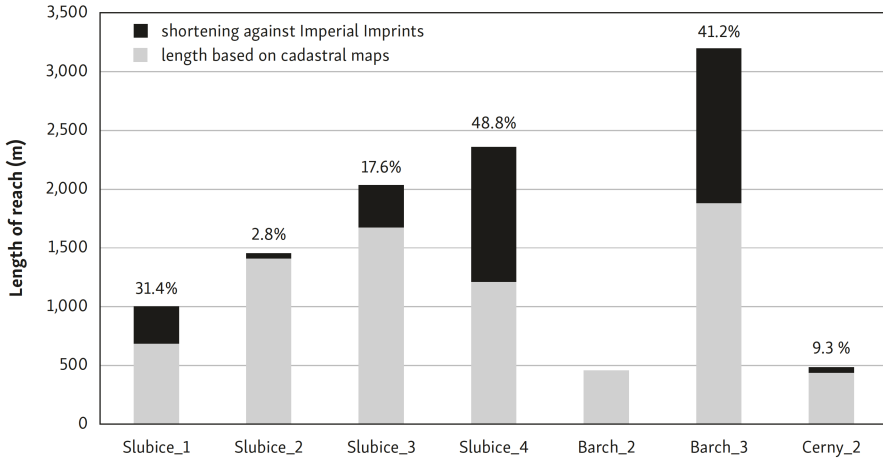
The overall hydromorphological status of the Slubice River assessed by using the HEM methodology can be denoted as average hydromorphological status (3. HS); average hydromorphological status was determined for 49.5% of the length of mapped reaches (Fig. 3) located in area used for agricultural practices, where the channel was straightened and bank stabilized. 25.7% of the river length were in very good status (1. HS) represented by reaches with near natural habitat of riverine ecosystem, which can be considered as referential (Fig. 3). In good hydromorphological status (2. HS) was assessed 20.2% of the total evaluated length of the river.

### 4.3. Water quality

Contamination by nutrients, particularly nitrates, was found to be the most important problem of water quality in all the monitored profiles (Fig. 1). In all evaluated profiles the nitrates achieved the worst recorded value of the worst quality class (V) pursuant to Czech Norm ČSN 75 7221 (Table 5, Fig. 8). The highest concentration of  $\text{N-NO}_3^-$  corresponds to higher discharge which indicates inappropriate use and application of industrial fertilizers and manure. On the other hand  $\text{N-NH}_4^+$  achieved quality class II or III in all profiles in the Slubice river basin (Table 5, Fig. 8). In this case the highest concentration corresponds to low discharge which indicates communal sewerage water pollution. (Only profile on the Chrudimka River – MS 6 (Fig. 1) achieved quality class V.) Organic contamination is also a problem of water quality, represented by the COD-Mn parameter (class IV in most

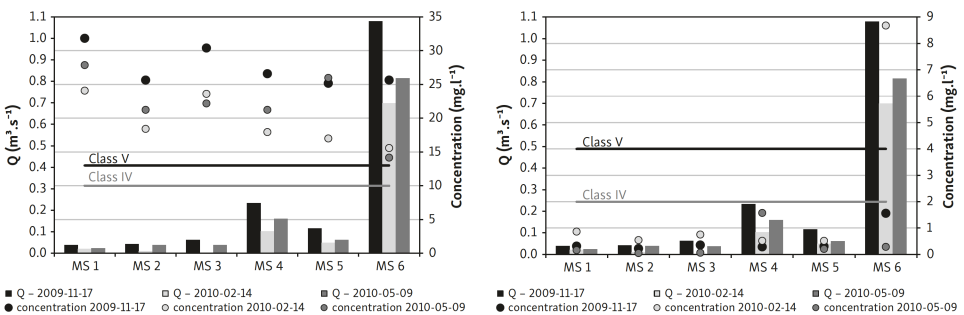


**Fig. 6** – The changes in the length and shape of the 2 selected reaches (reach Slubice\_1 in Restoration locality 2, reach Slubice\_4 in Restoration locality 1). Comparison of the original course from historical maps (in left) with the present course from cadastral maps (in the middle) and with the proposed course (in right).



**Fig. 7** – Present length based on cadastral maps (grey) and changes in comparison of former length from historical maps (black) of 7 selected reaches of river network in the Slubice River basin. Selected reaches (4 on the Slubice River, 2 on Barchanecky stream, 1 on Cerny stream) were numbered from spring to mouth (Fig. 6).

profiles); on the contrary, dissolved oxygen shows sufficient concentrations in water (Table 5). Poor water quality (quality class IV and V) can have a negative impact on occurrence of biological elements and ecological status. Water quality in study area shows little differences between individual monitoring sites (except for MS 6 which is on larger river with many tributaries and below sewage treatment plant) but considerable differences in seasonal concentrations and in relation to discharge.



**Fig. 8** – Dependence between concentration of  $N-NO_3^-$  (in left),  $N-NH_4^+$  (in right) and corresponding measured discharge in monitoring sites (threshold values for quality classes IV and V according to Czech Norm ČSN 75 7221 are highlighted)



**Table 5** – Water quality in the Słubice River basin (monitoring sites MS 1–5) in period from autumn 2009 to summer 2010 and in the Chrudimka River (MS 6) behind the confluence

Monitoring sites	MS 1		MS 2		MS 3		MS 4		MS 5		MS 6							
	M	W	M	W	M	W	M	W	M	W	M	W						
Temperature* (°C)	6.0	11.5	5.2	10.5	6.5	13.5	6.2	13.0	6.8	14.5	6.5	13.5						
Dissolved oxygen* (mg/L)	9.5	7.7	10.3	7.7	10.6	8.2	10.1	7.4	9.8	7.8	10.3	7.8						
pH*	7.35		7.14		7.23		7.27		7.35		7.37							
Conductivity* (µS/cm)	204	214	135	146	223	237	183	196	185	196	218	280						
Hardness (mmol/L)	0.96	1.02	0.70	0.77	1.07	1.13	0.80	0.86	0.91	1.01	0.73	0.96						
Nitrite nitrogen (mg/L)	0.09	0.10	0.04	0.04	0.14	0.15	0.07	0.08	0.08	0.10	0.52	1.38						
Nitrate nitrogen (mg/L)	27.92	31.83	V	21.77	25.65	V	25.40	30.40	V	21.93	26.60	V	18.47	25.65	V			
Ammonium nitrogen (mg/L)	0.45	0.87	III	0.27	0.55	II	0.39	0.76	III	0.79	1.57	III	0.34	0.51	II			
Orthophosphates (mg/L)	0.11	0.13		0.04	0.05		0.10	0.11		0.08	0.08		0.10	0.11				
COD – Mn (mg/L)	6.21	8.40	II	9.28	14.24	IV	9.79	17.92	IV	10.35	15.68	IV	11.65	18.56	IV	10.27	14.72	IV
Calcium (mg/L)	28.54	30.80	I	19.69	20.34	I	28.51	32.55	I	24.43	28.48	I	27.83	34.59	I	22.05	25.30	I
Chlorides (mg/L)	12.58	13.34	I	1.99	2.81	I	16.32	18.25	I	10.03	13.34	I	7.34	8.42	I	18.80	28.08	I

\* Parameters measured in the field.

The temperature, conductivity and pH were measured at the monitoring sites during the sampling. Legend: MS – monitoring site, M – arithmetic mean of determined values, W – the worst determined value, C – water quality class pursuant to Czech Norm ČSN 75 7221: I – clean water, II – slightly polluted water, III – polluted water, IV – strongly polluted water, V – heavily polluted water.

**Table 6** – Overview of basic characteristics of proposed restoration measures

Reach	Length (km)	Slope (%)	Cross-section profile (m <sup>2</sup> )	Discharge (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
Restoration locality 1 – present	1.24	4.66	4.28	Q <sub>1</sub> = 4, Q <sub>30d</sub> = 0.73 (HMÚ 1970)
Restoration locality 1 – proposal	2.17	2.66	1.86	Q <sub>HK</sub> = 0.947
Restoration locality 2 – present	1.01	16.57	7.42	
Restoration locality 2 – proposal	1.93	8.62	0.54	Q <sub>HK</sub> = 0.306

#### 4.4. Restoration proposal

According to assessment by HEM and characteristics recorded during the field survey, channel modifications (straightening, deepening and reinforcement) are the worst problems of the Slubice River basin while the floodplain shows good functionality (communication between channel and floodplain, retention) and is in relatively good state (land use). The main aim of the restoration was to propose appropriate slope steepness of the river bed (it means enhancement of the channel's length) and channel capacity (including width versus depth). Thus a new meandering channel course was proposed in both localities based on parameters of longitudinal and cross-section profiles measured in relevant reference reaches. Selected cross-section profiles of reference localities and their comparison with cross-section profiles in restoration localities and proposed cross-section profiles are presented in Figure 2. Cross-section profiles in both reference localities are shallow, wide and show significantly higher variability in shape and depth. Reference locality 2 has several times smaller bankfull area in comparison with cross-section profiles in both restoration localities.

The proposal also included special specifications: (1) new course should run along the valley floor using preserved traces of the former natural channel including the riparian zone vegetation (Restoration locality 1, Figs. 4, 5), (2) incorporation of drainage outlets in the proposal (Restoration locality 2), and (3) consideration of availability of properties for implementation of the proposal (both restoration localities).

The course length would almost double in both restoration localities (Figs. 5, 6), while the average gradient of the river bed would become reduced by almost one half (see Table 6). The floodplain in both restoration localities is formed by extensively used meadows, therefore a near-natural, wide and shallow channel was proposed with the depth-to-width ratio 1:5.2 for Restoration locality 1 (or 1:6 for Restoration locality 2, respectively), with  $Q_{30d}$  capacity and discharge  $0.947 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  in Restoration locality 1 and with  $Q_{30d}$  to  $Q_1$  capacity and discharge  $0.306 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  in Restoration locality 2 (Table 6; Fig. 2). For proposed cross-section profiles in both restoration localities rating curves were calculated (Fig. 9). The former channel of the stream on the right side of the inundation area – Reference locality 1 was included in the proposal in Restoration locality 1 (Fig. 5).

It was also proposed to complete existing vegetation with protective bank vegetation in order to stabilize the new channel, and with group riparian vegetation in the floodplain so that the restoration incorporates into the surrounding landscape.

*Prediction of hydromorphological status after the proposed restoration:* The effectiveness of realized restoration is given by approaching natural (regional reference) status of the river ergo by its complexity. This study simulated whether restoration

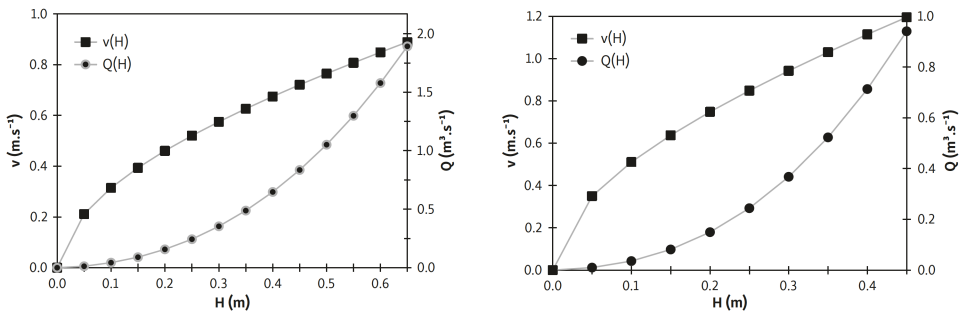


Fig. 9 – Rating curves and velocity curves for proposal cross-section profiles in straight course (riffle) for Restoration locality 1 (in left) and for Restoration locality 2 (in right)

proposed with the use of maximum area potential in favour to natural river character (reference status) will result in improvement of all major parameters of HEM methodology thus how the restoration will affect the overall hydromorphological status of the river evaluated in accordance with Water Framework Directive (2000/60/ES).

Based on assessment of the present hydromorphological status and on simulation of conditions after application of the proposed restoration measures, real risks were predicted, which follow from restorations of river channels. The risks prediction was based on assessed parameters which are the most significant for the resulting effect (Table 7).

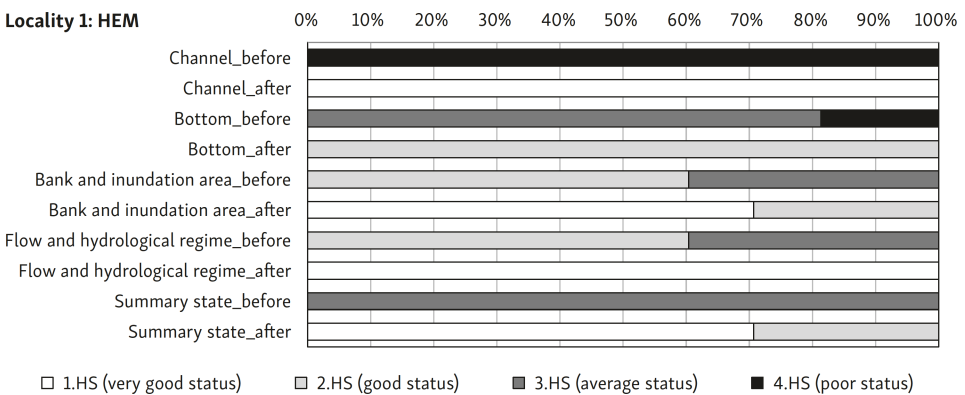
The primary hypothesis said that complying with all the rules above to propose the restoration measures, implementation of the proposed restoration measures should lead to provable improvement of the river habitat quality, and to the achievement of good hydromorphological status in both study localities. Criteria of successful restoration, which leads to improvement of hydromorphological elements, were selected on the basis of assessment setting of HEM methodology (Langhammer 2008). Expected risks and effects of proposed restoration were estimated from outputs of restoration realizations (for example Just et al. 2005; Kliment et al. 2008). Then, hydromorphological status for expected status was calculated.

Application of the HEM methodology on the simulated conditions that should be achieved through the proposed and implemented remedial measures demonstrated the most significant improvement in the zone of the channel itself, as expected – by up to 3 classes of hydromorphological status (Fig. 10). In connection with improvement of morphological characteristics of the channel, improvement by 1–2 classes within the hydrological regime zone is also achieved (Fig. 10). Significant improvement was caused by restoration of river continuity in longitudinal profile, variability of depth and elimination of river bed modification and bank

**Table 7** – Potential risks and effects of realization of the proposed restoration measures on individual assessed hydromorphological parameters

Parameters which will be significantly improved	Parameters that may be at risk or temporarily deteriorated	Parameters without significant changes
Planform modification	Variability of channel width (it depends on realization of terrain work)	Riparian belt land cover
River continuity in longitudinal profile	Variability of depth in longitudinal profile (it depends on realization of terrain work and precipitation events after the realization)	Floodplain land cover
Variability of depth in cross-section profile (it depends on realization of terrain work)	Bank stability	Hydrological regime alteration (abstraction and discharge)
Modification of the river bed, connection to ground water bodies	River bed substrate (diversity)	Lateral connectivity of river and floodplain
Bank modification	Extend of wood debris	Variability of discharge
Character of water flow	Bank vegetation	
	Channel bed forms	

modification, restoration of planform reference conditions and character of water flow (Table 7). Improvement of the status of the inundation area zone by 1 class is influenced by incorporation of bank modifications in this zone. As the Table 7 shows, improvement of some parameters (middle column) are dependent on a quality of realization (variability of channel width, variability of depth in longitudinal profile) or are developed in a longer period (diversity of river bed substrate, channel bed forms, bank stability and vegetation) which could be affected by flood events. Figure 10 shows results for Restoration locality 1; however, similar results are also achieved by the restoration proposal in Restoration locality 2. Implementation of the proposed restoration measures at least a good hydromorphological status would be achieved in both study localities (Fig. 10).



**Fig. 10** – Hydromorphological status of the Slubice River in Restoration locality 1 assessed by using HEM methodology (Langhammer 2007, 2008) – present state and prediction of the state after restoration with details of individual mapped zones and the overall status



## 5. Discussion

Outputs obtained by using HEM methodology provide detailed evaluation of morphological characteristics of the channel, of the range of river network modifications and of alteration of the hydrological regime, quality and use of the riparian zone and floodplain. Determination of hydromorphological reference conditions enables to set the target status for the locality. However, within the complex ecohydrological survey it is necessary to add hydrobiological survey to hydromorphological and the basic physical-chemical parameters monitoring. Only ichthyological survey was carried out in the study river basin, focused on the quality of the habitat for fish populations (Rozkošný et al. 2007). No further hydrobiological surveys were performed as part of this study focused on the hydromorphological situation and especially on the channel course due to time capacity reasons.

Kliment et al. (2008) evaluated the development of the channel of Sviňovický brook restored in 2005 – by freeing the channel in its original course. The channel showed a deepening process in the first 6 months after its restoration; however, in the subsequent period it already exhibited especially positive bank erosion and spontaneous development of small meanders which implicated increased variability of the bed widths and depths (presence of riffles and pools), provoked erosion and accumulation processes and increase of the substrate diversity. Very important event was the flood on July 12, 2006 which initiated intensive fluvial-morphological processes: mild to moderate deepening (up to 30 cm) associated with the broadening (up to 20 cm) of the profiles along the whole length of the freshly restored bed.

Lüderitz et al. (2004) evaluated the restoration success in the lowland Ihle River. The natural inclination of the river bed of less than 2‰ was to be achieved, which corresponds to the proposed inclination of Slubice River in the Restoration locality 1. However, persisting deep erosion occurred due to insufficient course restoration, while no development of naturally diversified habitat associated with the river dynamics in the brought out floodplain was manifested. In the process of modeling the effect of selected restoration measures on the restoration of the natural function of the hydrological regime, restoration of alteration of riffles and pools, and a change of the slope, bring a higher effect than modification of the substrate structure (Kasahara, Hill 2008). However, based on the study results, the highest effect is brought by restoration of the meandering, together with addition of coarse sediments to the channel (Kasahara, Hill 2008). Because of risk of deep erosion and high effect of meandering on further river ecosystem development main aim of proposal was focused on length and planform of channel.

Similarly as in these case study's results (Lüderitz et al. 2004; Kasahara, Hill 2008; Kliment et al. 2008), prediction of the hydromorphological status after application of the proposed restoration in the Slubice River confirmed that the

proposal of a new channel course corresponding to the reference conditions was an essential precondition for improvement of hydromorphological quality elements, however, the responses of biological elements should be perceived.

Lüderitz et al. (2004) recommends expanding hydrobiological survey of the macroinvertebrates, considered as the most suitable for evaluation of the success of small stream restorations, with fishes and macrophytes components. It however appears, that macrophytes are not sensitive enough to changes in the habitat, and their presence depends particularly on hydraulic conditions of the stream and on shading of the channel by plants in the riparian zone (Lüderitz et al. 2004; Sawa, Popek 2011). The effect of the substrate and hydraulic characteristics of the channel are considered as the most significant factors influencing the abundance of macroinvertebrates (Parson, Thoms 2007; Sawa, Popek 2011). Proposed restoration of river bed habitat with variable depth and restoration of river passability provide for diversification of water flow and thus it should represent a precondition for improvement of biological elements status.

The limited potential of recolonization and particularly poor water quality (Jähnig et al. 2010; Sawa, Popek 2011; Sundermann et al. 2011) are considered to be the main reasons of the little effect of restorations on improvement of the macroinvertebrates component. In terms of the effect of restoration on the ecological status, the existence of riparian zones in good state appears to be important, as they reduce the input of nutrients and pesticides into the stream. The riparian zones with bands of 5–30 m width and longer than 1 km seem to provide the highest efficiency (Parson, Thoms 2007; Matthews et al. 2010; Feld et al. 2011). The creation of new longer meandering course with functional riparian zones a reduction of nutrients inflow should be achieved by proposed restoration.

## 6. Conclusions

It is essential that the ecological survey including hydromorphological survey is carried out before any proposal of restoration as it provides important inputs, and after the restoration application as it allows assessment of restoration effect. The highest improvement of the status of hydromorphological elements in the cultural landscape of Central Europe can be achieved in modified small streams in an extensively used agricultural landscape. Whereas the main rivers are often limited in their options for restoring the new course because complex restoration measures have high cost and several realization difficulties therefore, the improvement of riparian belt and floodplain quality should be supported.

An essential precondition of successful restoration, which leads to improvement in status of hydromorphological elements, is in allowing for natural development of the channel course without stabilization of the banks, restoration of migration

passability (and if possible transport of sediment), restoration of the variability of depths and widths along the longitudinal profile, and restoration of variability of the cross-section profile in accordance with the channel course (alternation of riffles and pools). The channel dimension designation has to allow for direct overflow into the flood plain during the flood events in non-urbanized areas. This is of crucial importance for sustaining the functions of the restored segment.

Despite high improvement of channel structure, the quality of riparian zone and inundation area (especially land cover and structure) has the significant role among the restoration measures for achievement of good hydromorphological status and support achievement of good ecological status.

## References

- ALISON, S.K. (2007): You Can't Not Choose: Embracing the Role of Choice in Ecological Restoration. *Restoration Ecology*, 15, 601–605.
- BOON, P.J., HOLMES, N.T.H., RAVEN, P.J. (2010): Developing standard approaches for recording and assessing river hydromorphology: the role of the European Committee for Standardization (CEN). *Marine and freshwater ecosystems*, 20, 55–61.
- CHMI (2008): Daily precipitation data from hydro stations Hamry, Kruceburk a Vysočina in period 1998–2007.
- Committee for Standardization (2004): EN 14614 Water quality – Guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers. Brussels.
- ČSN 75 7221 (1998): Jakost vod – Klasifikace jakosti povrchových vod.
- DAVIS, M.A., SLOBODKIN, L.B. (2004): The Science and Values of Restoration Ecology. *Restoration Ecology*, 12, 1–3.
- DUFOUR, S., PIEGAY, H. (2009): From the myth of a lost paradise to targeted river restoration forget natural references and focus on human benefits. *River Research and Applications*, 25, 568–581.
- FELD, C.K., BIRK, S., BRADLEY, D.C., HERING, D., KAIL, J., MARZIN, A., MELCHER, A., NEMITZ, D., PEDERSEN, M.L., PLETTERBAUER, F., PONT, D., VERDONSCHOT, P.F.M., FRIBERG, N. (2011): From Natural to Degraded Rivers and Back Again: A Test of Restoration Ecology Theory and Practice. *Advances in Ecological Research*, 44, 119–209.
- GANN, G.D., LAMB, D. (2006): Ecological restoration: A mean of conserving biodiversity and sustaining livelihoods (version 1.1). Society for Ecological Restoration International, Tucson, Arizona, USA and IUCN, Gland, Switzerland.
- HANNAH, D.M., SADLER, J.P., WOOD, P.J. (2007): Hydroecology and ecohydrology: a potential route forward? *Hydrological Processes*, 21, 3385–3390.
- HMÚ (1970): Hydrologické poměry ČSSR. III. díl. Hydrometeorological institute, Turnov.
- JÄHNIG, S.C., BRABEC, K., BUFFAGNI, A., ERBA, S., LORENZ, A.W., OFENBÖCK, T., VERDONSCHOT, P.F.M., HERING, D. (2010): A comparative analysis of restoration measures and their effects on hydromorphology and benthic invertebrates in 26 central and southern European rivers. *Journal of Applied Ecology*, 47, 671–680.
- JANSEN, K., TREPPEL, M., MERRITT, D., ROSENTHA, G. (2006): Restoration ecology of river valleys. *Basic and Applied Ecology*, 7, 383–387.

- JUST, T. et al. (2005): Vodohospodářské revitalizace a jejich uplatnění v ochraně před povodněmi. Český svaz ochránců přírody, Prague.
- KASAHARA, T., HILL, A.R. (2008): Modeling the effect of lowland stream restoration projects on stream-subsurface water exchange. *Ecological engineering*, 32, 310–319.
- KLIMENT, Z., MATOUŠKOVÁ, M., ŠOBR, M., POTŮČKOVÁ, M., HUJSLOVÁ, J. (2008): Fluvial dynamics and selected methods of ecohydrological monitoring of restored Sviňovický brook channel. *AUC–Geographica*, 1–2, 125–144.
- LANGHAMMER, J. (2007): HEM. Hydroekologický monitoring. Metodika a manuál pro mapovatele. Charles University in Prague, Prague.
- LANGHAMMER, J. (2008): HEM. Hydroekologický monitoring. Charles University in Prague, Prague.
- LANGHAMMER, J., VAJSKEBR, V. (2007): Využití GIS pro analýzu a zkrácení říční sítě na základě historických mapových podkladů. In: Langhammer, J. (ed.): Povodně a změny v krajině. Charles University in Prague, Prague, 153–168.
- LEUVEN, R.S.E.W., NIENHUIS, P.H. (2001). River restoration and flood protection: controversy or synergism? *Hydrobiologia*, 444, 85–99.
- LÜDERITZ, V., JÜPNER, R., MÜLLER, S., FELD, C.K. (2004): Renaturalization of streams and rivers – the special importance of integrated ecological methods in measurement of success. An example from Saxony-Anhalt (Germany). *Limnologia*, 34, 249–263.
- MATOUŠKOVÁ, M. (2005): Assessment of the human impact on the river network as a basis for the ecohydrological monitoring of streams. *Geographical Review*, 129, 35–46.
- MATOUŠKOVÁ, M. (2008a): Assessment of the river habitat quality within European Water Framework Directive: Application to different catchments in Czechia. *Geografie*, 113, 223–236.
- MATOUŠKOVÁ, M. (2008b): Ekohydrologický monitoring vodních toků v kontextu Evropské Rámcové směrnice o vodní politice EC2000/60. Charles University in Prague, Prague.
- MATOUŠKOVÁ, M., WEISS, A., MATSCHULLAT, J. (2010): Ecological survey of river habitat diversity: trans-boundary cooperation in the Ore Mountains (Krušné hory, Erzgebirge). *Geografie*, 115, 3, 284–307.
- MATTHEWS, J., REEZE, B., FELD, C.K., HENDRINKS, A.J. (2010): Lessons from practice: assessing early progress and Access in river rehabilitation. *Hydrobiologia*, 655, 1–14.
- McBRIDE, M., HESSION, W.C., RIZZO, D.M. (2010): Riparian reforestation and channel change: How long does it take? *Geomorphology*, 116, 330–340.
- NESTLER, J.M., THEILING, C.H., LUBINSKI, K.S., SMITH, D.L. (2010): Reference condition approach to restoration planning. *River Research and Applications*, 26, 1199–1219.
- NEWSON, M.D., LARGE, A.R.G. (2006): “Natural” rivers, “hydromorphological quality” and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 1606–1624.
- ORR, H.G., LARGE, A.R.G., NEWSON, M.D., WALSH, C.L. (2008): A predictive typology for characterizing hydromorphology. *Geomorphology*, 100, 32–40.
- PALMER, M.A. et al. (2005): Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42, 208–217.
- PARSON, M., THOMS, M.C. (2007): Hierarchical patterns of physical–biological associations in river ecosystems. *Geomorphology*, 89, 127–146.
- RAVEN, P.J., HOLMES, N.T.H., VAUGHAN, I.P., DAWSON, F.H., SCARLETT, P. (2010): Benchmarking habitat quality: observations using River Habitat Survey on near-natural streams and rivers in northern and western Europe. *Marine and freshwater ecosystems*, 20, 13–30.



- ROZKOŠNÝ, M. et al. (2007): Výzkum vodních ekosystémů v rámci povodí. Závěrečná souhrnná zpráva projektu VaV/SL/8/59/04. Ministry of the environment of the Czech Republic, Brno.
- SAWA, K., POPEK, Z. (2011): Analysis of the connections between hydromorphological conditions and biocenotic diversity on the example of the Zwolenka River. *Land Reclamation*, 43, 173–184.
- ŠÍPEK, V., MATOUŠKOVÁ, M., DVOŘÁK, M. (2010): Comparative analysis of selected hydromorphological assessment methods. *Environmental Monitoring Assessment*, 169, 309–319.
- SUNDERMANN, A., ANTONS, C., CRON, N., LORENZ, A. W., HERING, D., HAASE, P. (2011): Hydromorphological restoration of running waters: effects on benthic invertebrate assemblages. *Freshwater Biology*, 56, 1689–1702.
- 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.
- VAUGHAN, I.P., DIAMOND, M., GURNELL, A.M., HALL, K.A., JENKINS, A., MILNER, N.J., NAYLOR, L.A., SEAR, D.A., WOODWARD, G., ORMEROD, S.J. (2009): Integrating ecology with hydromorphology: a priority for river science and management. *Marine and freshwater ecosystems*, 19, 113–125.
- VERDONSCHOT, P.F.M. (2000): Integrated ecological assessment methods as a basis for sustainable catchment management. *Hydrobiologia*, 422–423, 389–412.
- WADE, P.M., LARGE, A.G.R., DE WAAL, L.C. (2000): *Rehabilitation of Rivers. Principles and Implementation*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Water Framework Directive. Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the Council of 23<sup>rd</sup> October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L, 327/1, Luxembourg.
- WEISS, A., MATOUŠKOVÁ, M., MATSCHULLAT, J. (2008): Hydromorphological assessment within the EU-Water Framework Directive – trans-boundary cooperation and application to different water basins. *Hydrobiologia*, 603, 53–72.
- ZALEWSKI, M. (2006): Ecohydrology – an interdisciplinary tool for integrated protection and management of water bodies. *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 158, 613–622.
- ZALEWSKI, M. (2008): Rationale for the “Floodplain Declaration” from environmental conservation toward sustainability science. *Ecohydrology & hydrobiology*, 8, 107–113.

## SHRNUTÍ

### Zlepšení kvality fyzického habitatu vodních toků jako odezva na revitalizační opatření

Nárůst antropogenního ovlivnění a celková degradace přirozených habitatů vodních ekosystémů vyvolaly potřebu porozumět širokému spektru dopadů na jejich kvalitu, vyhodnotit tyto změny a nastavit opatření, která by znovu vedla k dosažení dobrého stavu vod. Rámcová směrnice o vodách 2000/60/ES požaduje dosažení dobrého ekologického stavu vod, který je klasifikován na základě biologických, hydromorfologických, chemických a fyzikálně chemických složek kvality. Klasifikace jednotlivých složek kvality je založena na porovnání současného stavu s referenčními podmínkami, ve smyslu původních nenarušených podmínek jednotlivých kvalitativních složek. Cílem úspěšné revitalizace je tedy návrh a realizace hydromorfologických opatření, která při odpovídající kvalitě chemických a fyzikálně chemických složek povedou k dosažení dobrého ekologického stavu.

Nezbytnou součástí návrhu revitalizačních opatření je tedy stanovení regionálních hydromorfologických referenčních podmínek a vyhodnocení hydromorfologického stavu. Hydromorfologická kvalita zájmového toku Slubice a údolní nivy byla hodnocena metodou HEM – Hydroekologický monitoring (Langhammer 2007, 2008). Terénním průzkumem bylo vyhodnoceno v každém vymezeném úseku 17 parametrů rozdělených do 4 mapovaných zón. Výsledná hydromorfologická kvalita hodnocených úseků byla zařazena do jedné z 5 tříd hydromorfologického stavu. Regionální hydromorfologické referenční podmínky jako předpoklad pro formulování cílového stavu navrhovaných revitalizačních opatření byly stanoveny na základě detailního terénního průzkumu a měření řady hydromorfologických charakteristik v přirozených úsecích zájmového povodí Slubice. Analýza změn délky a tvaru říční sítě byla založena na porovnání historických map Stabilmního katastru Čech v měřítku 1 : 2 880 a současných katastrálních map zájmového povodí Slubice. Jako podklad pro návrh revitalizačních opatření byla dále hodnocena variabilita odtoku, kapacita koryta, kvalita vody a vegetace koryta a údolní nivy.

Pro návrh revitalizace byly vybrány dvě lokality s nejhorším výsledným hodnocením hydromorfologického stavu, významně postižené zahloubením, napřímením a opevněním s nevhodnou kapacitou koryta i sklonem trasy. Záměrem bylo propojení přirozených úseků toku.

Výsledky analýzy změn tvaru a délky říční sítě prokázaly zkrácení o 31,4 % na horním toku Slubice a o 48,8 % na dolním toku. V rámci hydromorfologického monitoringu byla zjištěna značná modifikace koryta toku včetně trasy, ale poměrně dobrá kvalita údolní nivy. Celkový hydromorfologický stav toku zjištěný aplikací metody HEM byl určen jako průměrný (3. HS) pro 49,5 % délky toku, ve velmi dobrém a dobrém stavu bylo označeno 45,9 % délky toku. Kvalita vody byla v zájmovém povodí hodnocena zejména s ohledem na limitující potenciál kvality biologických složek. Největším problémem kvality vody ve sledovaných profilech byla kontaminace nutrienty z plošných zdrojů znečištění. S ohledem na výše uvedené skutečnosti byla v souladu se stanovenými referenčními podmínkami navržena nová meandrující trasa koryta včetně výpočtů sklonů, kapacity koryta a variability podélných i příčných profilů. Z důvodu značného rizika hloubkové eroze a vysokého efektu meandrování byl v rámci revitalizačního návrhu důraz kladen zejména na délku a trasu koryta. Návrh nového koryta byl zasazen do existující nivy a doplněn návrhem břehových porostů. Kritéria hodnocení úspěšnosti revitalizace byla zvolena v souladu s nastavením hodnocení metodiky HEM (Langhammer 2008) a následně byl vypočítán hydromorfologický stav pro simulované podmínky. Aplikací metody HEM na simulované podmínky bylo zjištěno významné zlepšení stavu zóny koryta (až o 3 třídy hydrologického stavu), vzhledem k očekávanému zlepšení morfologických charakteristik koryta došlo také ke zlepšení zóny hydrologický režim (o 1–2 třídy HS).

Simulací podmínek po aplikaci navržených revitalizačních opatření při zohlednění reálných rizik realizace revitalizace bylo zjištěno prokazatelné zlepšení stavu hydromorfologických složek v obou lokalitách. Hydromorfologický průzkum a stanovení regionálních referenčních podmínek před návrhem opatření na zlepšení hydromorfologického stavu poskytuje podklady nezbytné pro návrh opatření i následné vyhodnocení efektu opatření.

Ačkoli jsou revitalizační opatření značně individuální, základním předpokladem pro zlepšení stavu hydromorfologických složek je obnova přirozené trasy koryta bez stabilizace břehů a dna, obnova migrační průchodnosti, variability hloubek a šířek koryta v podélném i příčném profilu. Navzdory významu komplexní revitalizace koryta toku lze při posouzení efektu i částečnou revitalizací koryta toku dosáhnout zlepšení hydromorfologického stavu. Na všech vodních tocích lze dále podporovat dosažení dobrého ekologického stavu prostřednictvím opatření na zlepšování kvality příbřežní zóny a údolní nivy, zejména typem krajinného pokryvu a strukturou vegetace v příbřežní zóně.

- Obr. 1 Lokalizace, profily pro hodnocení kvality vod a krajinný pokryv povodí Slubice v roce 2009. Legenda pro profily hodnocení kvality vod: 1 - Slubice (horní tok), 2 - Černý potok, 3 - Slubice (střední tok), 4 - Slubice (dolní tok), 5 - Barchanecký potok, 6 - Chrudimka. Zdroj: letecké snímky GEODIS 2009, terénní průzkum.
- Obr. 2 Vybrané zaměřené příčné profily (jejich maximální hloubka a plocha průtočného profilu) v referenčních lokalitách a jejich srovnání se současnými a navrženými příčnými profily v lokalitách k revitalizaci.
- Obr. 3 Výsledky hodnocení hydromorfologického stavu Slubice na základě aplikace metody HEM (Langhammer 2007, 2008), vykresleno v podélném profilu Slubice.
- Obr. 4 Letecký snímek části Referenční lokality 1 a Lokality k revitalizaci 1 - detail původního koryta, návrh propojení původních koryt a současné trasy toku. Zdroj: letecké snímky GEODIS 2009.
- Obr. 5 Detail porovnání současného napřímeného koryta v Lokalitě k revitalizaci 1, původní koryto, které se zachovalo ve dvou oddělených částech (detail A a B - dohromady Referenční lokalita 1) a návrh trasy toku v Lokalitě k revitalizaci 1.
- Obr. 6 Změny v délce a tvaru dvou vybraných úseků (úsek Slubice\_1 v Lokalitě k revitalizaci 2, úsek Slubice\_4 v Lokalitě k revitalizaci 1). Porovnání původní trasy z historických map (vlevo) se současnou trasou z katastrálních map (uprostřed) a s navrhovanou trasou (vpravo).
- Obr. 7 Současná délka z katastrálních map (šedě) a změny oproti původní délce z historických map (černě) pro 7 vybraných úseků říční sítě povodí Slubice. Vybrané úseky (4 na Slubice, 2 na Barchaneckém potoce, 1 na Černém potoce) byly číslovány od pramene k ústí (obr. 6).
- Obr. 8 Závislost mezi koncentrací  $N-NO_3^-$  (vlevo),  $N-NH_4^+$  (vpravo) a odpovídajícími naměřenými průtoky na sledovaných profilech (zvýrazněna je mezní hodnota pro IV. a V. třídu jakosti vody podle ČSN 75 7221).
- Obr. 9 Konzumpční a rychlostní křivka pro navržené příčné profily v přímé trase (brodu) pro Lokalitu k revitalizaci 1 (vlevo) a pro Lokalitu k revitalizaci 2 (vpravo).
- Obr. 10 Hydromorfologický stav Slubice v Lokalitě k revitalizaci 1 hodnocený na základě aplikace metody HEM (Langhammer 2007; Langhammer 2008) - současný stav a predikce stavu po návrhu revitalizačních opatření včetně detailu hodnocení jednotlivých mapovaných zón a celkového stavu.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was conducted as part of research projects GAČR 13-32133S "Headwaters retention potential with respect to hydrological extremes", SVV 3300-244-2600781 "Physic-geographical processes" and PRVOUK-43 Geography.

## **7.2 IDENTIFICATION OF HYDROMORPHOLOGICAL REFERENCE SITES USING THE NEW REFCON METHOD, WITH AN APPLICATION TO RIVERS IN THE CZECH REPUBLIC**

Kujanová, K., Matoušková, M., 2017. Identification of hydromorphological reference sites using the new REFCON method, with an application to rivers in the Czech Republic. *Ecohydrology & Hydrobiology* 17/3, 235–245.

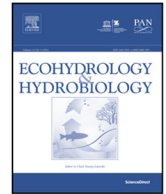




ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Ecohydrology &amp; Hydrobiology

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ecohyd](http://www.elsevier.com/locate/ecohyd)

Original Research Article

# Identification of hydromorphological reference sites using the new REFCON method, with an application to rivers in the Czech Republic



Kateřina Kujanová\*, Milada Matoušková

Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Czech Republic

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received 24 August 2016

Accepted 13 June 2017

Available online 22 June 2017

## Keywords:

Reference site

Hydromorphological characteristics

Reference conditions

Hydromorphological status assessment

Water Framework Directive

## ABSTRACT

This paper presents a new approach to establishing reference sites and determining hydromorphological characteristics for establishing type-specific hydromorphological reference conditions for rivers in the Czech Republic – the REFCON method – as well as its application. This method is based on hydromorphological river types. Using available maps and field surveys, it determines potential reference sites for establishing reference conditions, and subsequently, on the basis of an assessment of anthropogenic impacts using set criteria, it identifies stream reference sites. Reference sites and river types are validated using field survey data. This method also identifies characteristics of channel pattern, flow, riverbed structures, sediment, and variability of cross-sectional profiles used for establishing type-specific hydromorphological reference conditions.

Reference conditions can be expressed using threshold values of individual characteristics (e.g., channel slope, entrenchment ratio, specific stream power); they can also be described qualitatively, that is, verbally (e.g., channel pattern, valley type). Nonetheless, reference conditions are always an expression of a set of characteristics or conditions that should be valid for a given river type.

One of the expected results of applying this method is the creation of a reference site database for assessing hydromorphological status of streams. This database will serve for proposing stream restoration measures and also as a database of stream sections in need of protection from potential human impact.

© 2017 European Regional Centre for Ecohydrology of the Polish Academy of Sciences. Published by Elsevier Sp. z o.o. All rights reserved.

## 1. Introduction

Several studies conducted in the preceding decade deal with defining restoration target conditions (Jungwirth et al., 2002; Brierley and Fryirs, 2005; Palmer et al., 2005; Dufour and Piégay, 2009). Many methods and models, as PHABSIM (Milhous and Waddle, 2012), MesoHABSIM (Parasiewicz, 2007), RHS (Environment Agency, 2003),

have also been developed for existing habitat assessment and prediction of changes in quality and quantity of river habitats. Since the introduction of the Water Framework Directive (WFD, European Commission, 2000) stream restoration target conditions in Europe have been established on the basis of set hydromorphological reference conditions and a set stream typology (Environment Agency, 2003; Pottgiesser and Sommerhäuser, 2008; Langhammer et al., 2012; Wimmer et al., 2012). Hydromorphological reference conditions are a benchmark for assessing the hydromorphological status of streams, and they also represent stream restoration target conditions.

\* Corresponding author.

E-mail address: [katerina.kujanova@email.cz](mailto:katerina.kujanova@email.cz) (K. Kujanová).

According to the WFD, the purpose of hydromorphological assessment is to determine if the status of hydromorphological conditions is sufficient for supporting biological elements. The status assessment and establishment of reference conditions are thus important framework of ecohydrology.

According to European standard EN 14614 (CEN, 2004), reference conditions should be determined for all river types so that they reflect undisturbed stream conditions – that is, natural cross-sectional profile and channel planform, free flow of water and sediment in channel, and natural vegetation in the riparian zone. Reference conditions may represent the present status of a stream or a past status, and therefore reference conditions do not need to be the equivalent of absolutely undisturbed original conditions (European Commission, 2003), as anthropogenic impacts that cause minimal disturbance are acceptable. Type-specific reference conditions may be spatially based (using data from monitoring sites), based on predictive modeling or hindcasting methods using historical data or paleoreconstruction, or derived from a combination of these methods. In cases where these methods cannot be applied, expert judgment may be used to establish such conditions (European Commission, 2000, 2003). Table 1 describes the advantages and disadvantages of these methods.

Most river systems in Europe, as well as on other continents, have been significantly influenced by human activities over the centuries. This fact has led many authors to the conclusion that defining reference conditions as pristine conditions is infeasible and doing so has little practical use (Leuven and Nienhuis, 2001; Dufour and Piégay, 2009; Wyźga et al., 2012; Rinaldi et al., 2013). Fluvial systems are the result of constant interaction between natural and anthropogenic factors; therefore, authors have abandoned use of historical reference conditions (Palmer et al., 2005; Dufour and Piégay,

2009; Wyźga et al., 2012), the naturalness of which can be doubted in many cases, and emphasize the importance of viewing fluvial systems as dynamic systems that develop over time under given environmental conditions (Palmer et al., 2005; Dufour and Piégay, 2009; Wyźga et al., 2012). Historical stream conditions may reflect conditions that diverge from present environmental conditions, and thus may not be of any practical use for stream management and restoration (Leuven and Nienhuis, 2001; Dufour and Piégay, 2009; Rinaldi et al., 2013). Therefore, present environmental conditions should be used for establishing reference conditions (Palmer et al., 2005; Brierley and Fryirs, 2005; Dufour and Piégay, 2009), particularly climatic conditions, vegetation cover, and anthropogenic impacts. Wyźga et al. (2012) state that defining hydromorphological reference conditions should be based on present or potential environmental conditions in connection with minimal anthropogenic impacts on the channel, riparian zone, and floodplain. Palmer et al. (2005) describe reference conditions using a “guiding image” of a dynamic, ecologically healthy river that could actually exist at the given location.

### 1.1. Establishing hydromorphological reference conditions in the countries neighboring the Czech Republic

Some neighboring countries use spatial methods for establishing reference conditions based on data from reference site (RS) monitoring. The German approach to establishing reference conditions is based on the following hydromorphological attributes: channel planform and sinuosity, valley type, riverbed substrate, cross-sectional profile, and floodplain characteristics. RSs are evaluated based on statistical analyses of similarities in sites that have very little anthropogenic impact. The advantage in establishing reference conditions in Germany was the availability of an ecomorphological stream survey results

**Table 1**

Approaches to establishing reference conditions according to Guidance Document No. 10 (European Commission, 2003), their advantages and disadvantages.

Approach to establishing reference conditions	Advantages	Disadvantages
Spatially based approach using survey data	Temporal and spatial variability can be taken into account; when data is available, it is a simple method	Undisturbed or minimally disturbed sites must be available; large data sets must also be available for all types
Predictive modeling	Data from similar regions or types can be borrowed; a lower number of sites/samples is necessary to establish reference conditions	Requires data, calibration, and validation; valid only for the ecoregion/type it has been created for
Temporally based approach using historical data, paleoreconstruction, or combination of both	Can be used in areas where human-induced stress is widespread and undisturbed reference sites are few or lacking entirely	Such approaches are usually site and organism-specific, and hence may be of limited value for establishing type-specific values; use of historical data may be limited by its availability and unknown quality
Expert judgment	Can be combined with other methods; can be used where reference sites are lacking or few	Substantial subjectivity and bias (particularly when this approach is the only source); the lack of clarity or low degree of transparency in assumptions used to establish reference conditions and the lack of quantitative measures for validation, often static values



conducted using the LAWA-OS (Kern et al., 2002) and LAWA-FS (LAWA, 2000) methods because these methods use comparison of reference conditions represented by natural conditions (Pottgiesser and Sommerhäuser, 2008). In Austria hydromorphological reference conditions are based on stream typology, derived by categorizing streams according to bioregion, basin size, and altitude. The parameters for determining hydromorphological reference conditions include: run-off regime type, flow character, stream order, valley type, slope, channel planform, width and depth variability, hydromorphological formations, and riverbed characteristics. Reference reaches were delimited by mapping ecomorphological structures throughout all of Austria, where only reaches achieving a quality score of I or II were used for defining reference conditions (Wimmer et al., 2012). In Slovakia hydromorphological reference conditions were derived from a hydromorphological survey conducted by the Slovak Hydrometeorological Institute (SHMI) in 2004–2005. Reaches indicating a high hydromorphological status were selected as RSs. Parameters defining reference conditions were grouped into three categories: hydrological regime (flow dynamics, flow type and current velocity at Q355, groundwater connectivity), longitudinal continuity (max. height of obstacles to migration – 0.5 m), and selected morphological parameters (channel planform, average channel width and channel width variability, depth variability, riverbed substrate, structure and characteristics of the riparian zone, bank conditions, and reach shading) (Lehotský and Grešková, 2004; Lehotský, 2006).

To define river types for establishing reference conditions for each quality element of ecological status, the approved watercourse typology (Langhammer et al., 2012) should be used, although it is possible to modify it for individual elements of ecological status (Opatřilová et al., 2013). In the Czech Republic there is a method for assessment of hydromorphological parameters of rivers (Langhammer and Hartvich, 2014) approved by Ministry of the Environment which uses weighted score of individual assessed parameters. The weight of individual parameters is set specifically for 8 groups of types to define differences in parameters of hydromorphological status in various natural conditions (primarily altitude and channel order). The assessed parameters describe the degree of anthropogenic modifications and of variability of conditions. This existing method does not describe type-specific reference conditions nor does it explain how the reference conditions should be determined which is fundamental to ecological status assessment according to WFD.

Establishing hydromorphological reference conditions according to WFD for rivers in the Czech Republic has yet to be dealt with in detail. The aim of this paper is to present a new REFCON method for establishing RSs and determining hydromorphological characteristics for establishing type-specific hydromorphological reference conditions in compliance with WFD requirements for assessment of ecological status of rivers. REFCON method is described here with the help of its application to 3 selected river reaches on the territory of the Czech Republic.

## 2. Applied method

The REFCON method for establishing hydromorphological reference conditions is based on data from RSs. This approach was selected due to the unavailability of current and historical data and the need for creating a functional model for the entire country. At the same time, the experience of European countries that have already established reference conditions for hydromorphological and biological components of streams were taken into account. The assumption preceding the development of the REFCON method was that reference conditions are necessary to describe by set of characteristics not by defining threshold values of individual parameters. The characteristics should be determined with the combined use of available maps and data and detailed field survey.

The step-by-step application of the REFCON method is illustrated in the flow chart in Fig. 1. The first crucial step for establishing hydromorphological reference conditions is the determination of RSs based on meeting the criteria given in Fig. 1, including no important reservoirs or no system of two or more ponds (criterion 1); no crosswise obstacles over 0.5 m in height (criterion 2); no significant water extraction, diversion, or hydropeaking (criterion 3); no channel modification (criterion 4); no planform modification (criterion 5); and natural vegetation in riparian zone (criterion 6). These criteria for identifying RSs are first assessed using cartographic data (present, historical, and water management maps; aerial images). Subsequently, a field survey must be conducted to verify the criteria. An RS consists of a stream section of at least 500 m in length; however, for a site to be considered referential, criteria must be met 500 m above and 200 m below the RS. Thus, in total a reach of at least 1200 m in length is assessed.

In the Czech Republic all main rivers were determined as river water bodies (Ministry of the Environment, 2013) which you can see in Figs. 2 and 3A, B. Almost ninety water reservoirs were determined as lake water bodies. The REFCON method considers only main rivers (about 19,000 km). The first criterion is met when above the RS there are no important reservoirs, or there is no system of two or more ponds. The standing water layer in ZABAGED (State Administration of Land Surveying and Cadastre, 2013) was used to determine the presence of ponds. For identifying important reservoirs 178 bodies of standing water were considered – 174 reservoirs in the Register of Reservoirs (Ministry of Agriculture, 2013) and four water bodies categorized as lakes according to the WFD (Ministry of the Environment, 2013) that are not included in the Register of Reservoirs. The details of applying the first criterion are explained in Sections 3.1.1 and 3.1.2 and illustrated in Fig. 2. The second criterion is met when along the entire assessed reach (1200 m) there are no manmade crosswise obstacles over 0.5 m in height (including temporary ones) that could influence flow hydraulics, sediment regime, or migration. Large woody debris, natural rock steps, beaver dams, and so on are not considered to be such crosswise obstacles. The third criterion is met when along the entire assessed reach (1200 m) there is no significant water extraction, diversion, or hydropeaking. Meeting the

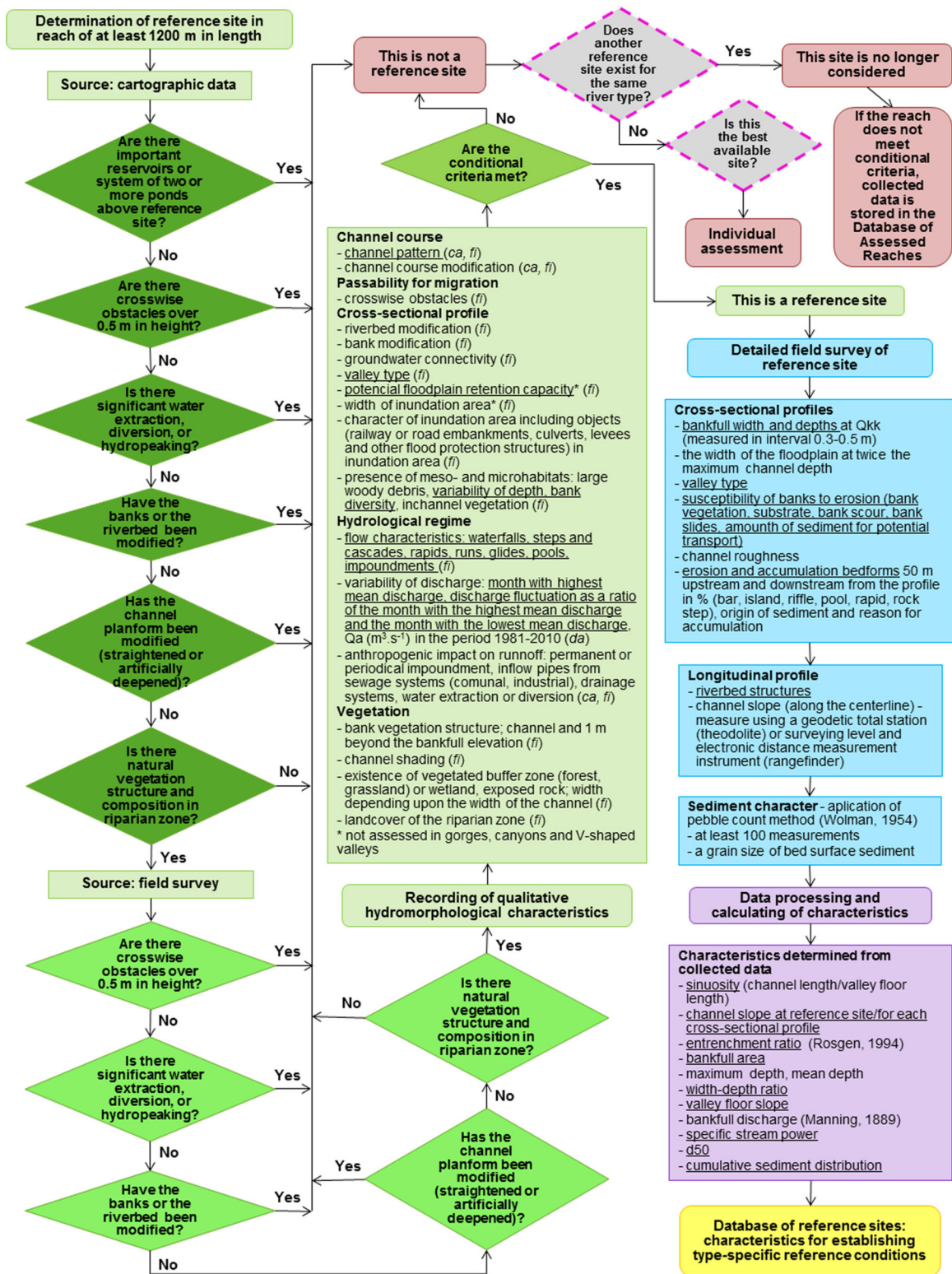


Fig. 1. Step-by-step application of the REFCON method. Legend: *ca*, cartographic data; *fi*, field survey; *da*, database; Q<sub>kk</sub>, bankfull discharge. Characteristics used for establishing reference conditions are underlined.



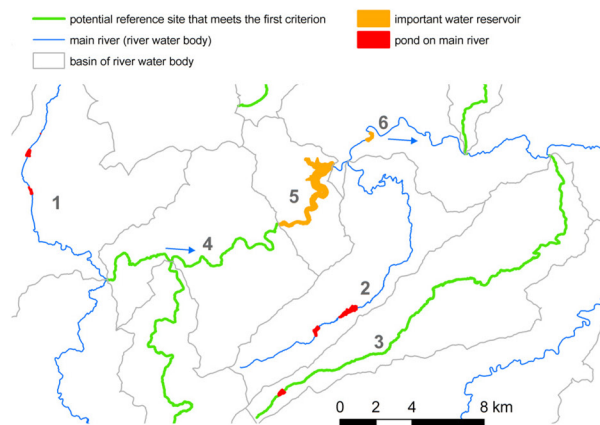


Fig. 2. Illustration of applying the first criterion – no important reservoirs or no system of two or more ponds above RS. The numbers refer to examples of application of the first criterion explained in Sections 3.1.1 and 3.1.2.

fourth criterion means that along the entire assessed reach (1200 m) neither the banks nor the riverbed have been modified (although bank stabilization by grass or tree roots is permissible). The fifth criterion is met when the channel planform in the entire assessed reach (1200 m) has not been modified and the channel has not been straightened or artificially deepened. The sixth criterion is considered met when there is a natural vegetation structure at least in the given width of the riparian zone and at the same time when the vegetation in the riparian zone consists of forest (natural or managed), wetlands, meadows (natural or managed), natural rock surfaces, or surfaces left to natural succession. Conditions in the riparian zone are assessed along the entire reach (1200 m); the width of the surveyed riparian zone depends on the channel width (10 m/20 m/50 m).

The REFCON method emphasizes hydromorphological characteristics, and therefore, water quality is not considered at all. The absence of sources of municipal, industrial, or agricultural pollution is thus considered a theoretical prerequisite, but their presence is not a reason for exclusion.

Acceptable anthropogenic impacts (minimal disturbances) include the following: local channel modification due to roads, wastewater outlets, small water extraction, a riparian zone with the correct qualities but not the proper width (the width, however, must be at least half of that required), and the occurrence, in places, of ruderal vegetation or invasive species in the riparian zone. These minimal disturbances, which we refer to as *conditional criteria for identifying an RS*, can occur at most twice along an RS reach.

As part of the field survey, qualitative hydromorphological characteristics of the channel planform, longitudinal connectivity, cross-sectional profile, hydrological regime, and vegetation given in Fig. 1 representing the entire assessed reach are recorded. These hydromorphological characteristics help validate the criteria, or they represent characteristics that will be used for establishing reference conditions (underlined in Fig. 1). For a site that meets the criteria and is established as an RS, a further

detailed field survey is conducted and entails the following: surveying at least five typical cross-sectional profiles, including a detailed assessment at a distance of 50 m/100 m upstream and downstream (depending on channel width); assessing the grain size of riverbed surface sediment using the pebble count method (Wolman, 1954); and surveying the longitudinal profile along the entire length of the RS including recording riverbed structures (see Fig. 1).

All RSs, as well as all surveyed cross-sectional profiles, are defined using GPS coordinates; making photographic records of RSs is also essential.

Datasets of the collected hydromorphological characteristics of each RS are further processed; quantitative (surveyed) characteristics are used directly (e.g., depth variability at cross-sectional profiles), but also serve for establishing other characteristics (e.g., calculating channel slope, bankfull area, and other characteristics given in Fig. 1). Statistical data analysis is used for specifying “groups of river characteristics” (Kujanová et al., 2016). Observing qualitative characteristics (e.g., valley type, channel pattern, and other characteristics given in Fig. 1) is also crucial. The characteristics underlined in Fig. 1 are those used to establish type-specific reference conditions.

### 3. Results

#### 3.1. Meeting the criteria for identifying reference sites

The Czech Republic’s river network has been significantly affected by extensive channel modification (28.4% of the entire length of the river network has been modified, Langhammer, 2007) and by a large number of crosswise obstacles. Approximately 6600 crosswise structures greater than 1 m in height have been built on streams in the Czech Republic; the number of lower migration obstacles is not known exactly, but it is most likely many times higher (Slavíková et al., 2014). There are 74,866 ponds and water reservoirs in ZABAGED in the country; the Register of Reservoirs (Ministry of Agriculture, 2013) contains 174 reservoirs. Based on these facts, it can be assumed that first criterion is a limiting factor on rivers in the Czech Republic. The first criterion was applied on all river water body reaches on the territory of the Czech Republic. The details and results of application are described in Sections 3.1.1 and 3.1.2.

The REFCON method for establishing RSs was applied between 2013 and 2016 at dozens of potential RSs in the Czech Republic chosen based on an assessment of criteria determined from available cartographic data (Fig. 1). Already at this early phase of assessment, many potential sites were excluded. Field surveys repeatedly confirmed that available maps do not record all channel modifications, crosswise obstacles, and significant extraction sites (e.g., mill races and water transfers). Many *potential RSs* were therefore excluded based on subsequent field surveys (Fig. 1). Only the first criterion, no important reservoirs or no system of two or more ponds, proved to be assessable on the basis of cartographic data. The other criteria allow the exclusion of many *potential RSs* based on cartographic data, but cartographic data alone is not a sufficiently



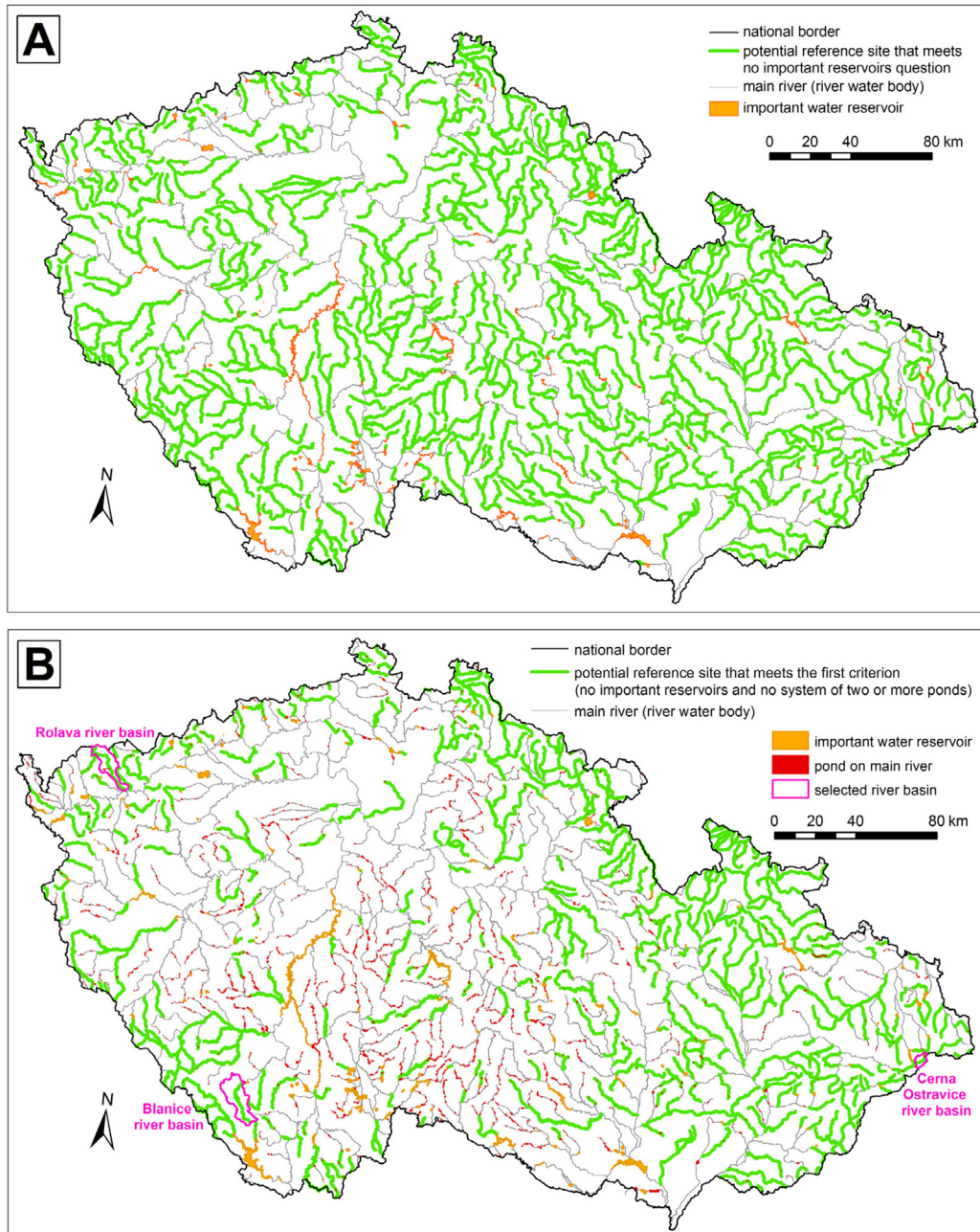


Fig. 3. Application of the first criterion by A – an important reservoir (the first part of the first criterion), B – an important reservoir and a system of two or more ponds on the evaluated river water body above the RS (the whole first criterion).

reliable source for determining RSs. Whether these criteria are met should always be verified by field survey.

### 3.1.1. Results of no important reservoirs question – the first part of the first criterion

River water body reaches that meet the first part of the first criterion (no important reservoirs) are displayed in Fig. 3A. If an important reservoir was located in a basin but not on a particular river water body only the reach above the mouth of the tributary from the reservoir was considered as a *potential* RS. Potential RSs are reaches

that meet particular criteria, but it is not certain if they meet all the criteria for determining an RS. Potentially modified rivers originating in other countries (e.g., the Dyje and Ohře Rivers) and those flowing along national borders in to which flow “foreign tributaries” (e.g., the Opavice and Olše Rivers) were excluded.

### 3.1.2. Results of no system of two or more ponds question – the second part of the first criterion

The criterion of no system of two or more ponds above the RS was assessed on a layer of 2128 standing waters

**Table 2**

Overview of the result of applying the first criterion (no important reservoirs or no system of two or more ponds).

Potential reference sites	Length (km)	Length (%)
Main rivers (river water bodies) in the Czech Republic	19,136.9	100.0
Segments of main rivers that meet no important reservoirs question (Fig. 3A)	12,672.6	66.2
Segments of main rivers that meet the first criterion no important reservoirs or no system of two or more ponds (Fig. 3B)	7044.8	36.8
– Segments of main rivers without pond	3380.5	17.7
– Segments of main rivers with one pond	2488.8	13.0
– Other segments of main rivers that meet the criterion no important reservoirs above RS and no system of two or more ponds on river water body	1175.5	6.1

(ZABAGED) located on river water bodies (Fig. 3B). If only one pond lay on a tributary, the stream was considered to meet the criterion – see basin 3 in Fig. 2 (even when there were two tributaries with one pond each). The impact of two or more ponds was assessed only on one specific river water body and this impact was not transmitted to the river water body downstream (basin 1 versus 4 in Fig. 2). Fig. 3B displays potential RSs meeting the whole first criterion. Analysis results are summarized in Table 2.

### 3.2. Results of REFCON method application at selected reference sites

Sixteen RSs have been identified so far in the Czech Republic using the REFCON method; the procedure for determining hydromorphological characteristics described in Fig. 1 was applied. Concurrently, hydromorphological characteristics important for establishing type-specific hydromorphological reference conditions at RSs were established, and the categorization of RSs into “groups of river characteristics” (Kujanová et al., 2016) was validated. From the RSs identified, three RSs were selected from the Rolava, Cerna Ostravice, and upper Blanice river basins. These case study river basins were selected to demonstrate the application of the REFCON method in the various physiographic conditions present in the Czech Republic. The location of the basins in which the selected RSs are found can be seen in Fig. 3B.

The Rolava River basin is located in the Krušné hory Mountains in the northwest of the Czech Republic. The

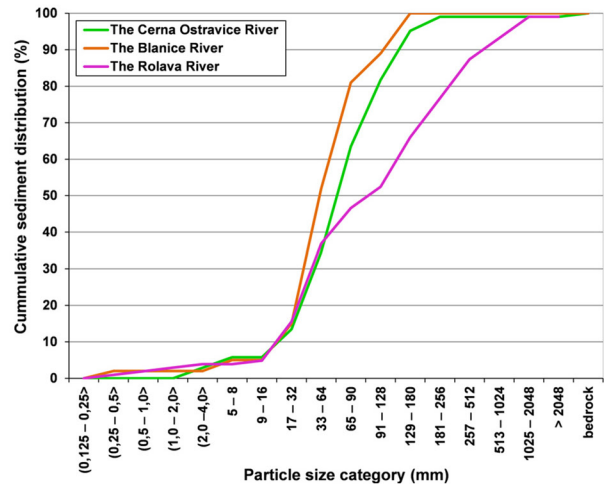


Fig. 4. Sediment distribution in selected reference sites determined by the pebble count method (Wolman, 1954).

upper course runs through flat, forest-free terrain that features large peat bogs important for water retention. In the middle course, where the RS is situated, the Rolava changes into a wilder mountain forest stream with a riverbed composed of medium cobbles ( $d_{50}$  – Fig. 4), but with large cobbles and boulders present as well. The channel at the RS was determined to be a channel with naturally low sinuosity (Kujanová et al., 2016). This RS

**Table 3**

Hydromorphological characteristics of selected reference sites.

Reference site (RS)	Cerna Ostravice	Blanice	Rolava
Mean altitude (m a.s.l.)	539	764	783
Channel order (Strahler)	5	5	4
Sinuosity	1.36	1.96	1.17
Channel slope (%)	0.98	0.61	1.91
Valley floor slope (%)	1.18	0.72	2.22
Channel pattern	Sinuuous/braided	Meandering	Straight
Valley type	U-shaped	Wide floodplain	U-shaped
Entrenchment ratio	2.65	14.44	2.54
Width-depth ratio	39.9	22.1	20.1
Specific stream power ( $W \cdot m^{-2}$ )	206.3	292.9	982.6
Riverbed forms (occurrence in %):			
Pools	5	28	8
Riffles	27	16	8
Islands	3	0	10
Bars	50	23	12
Cascades and steps	0	0	5
Rapids	15	8	32



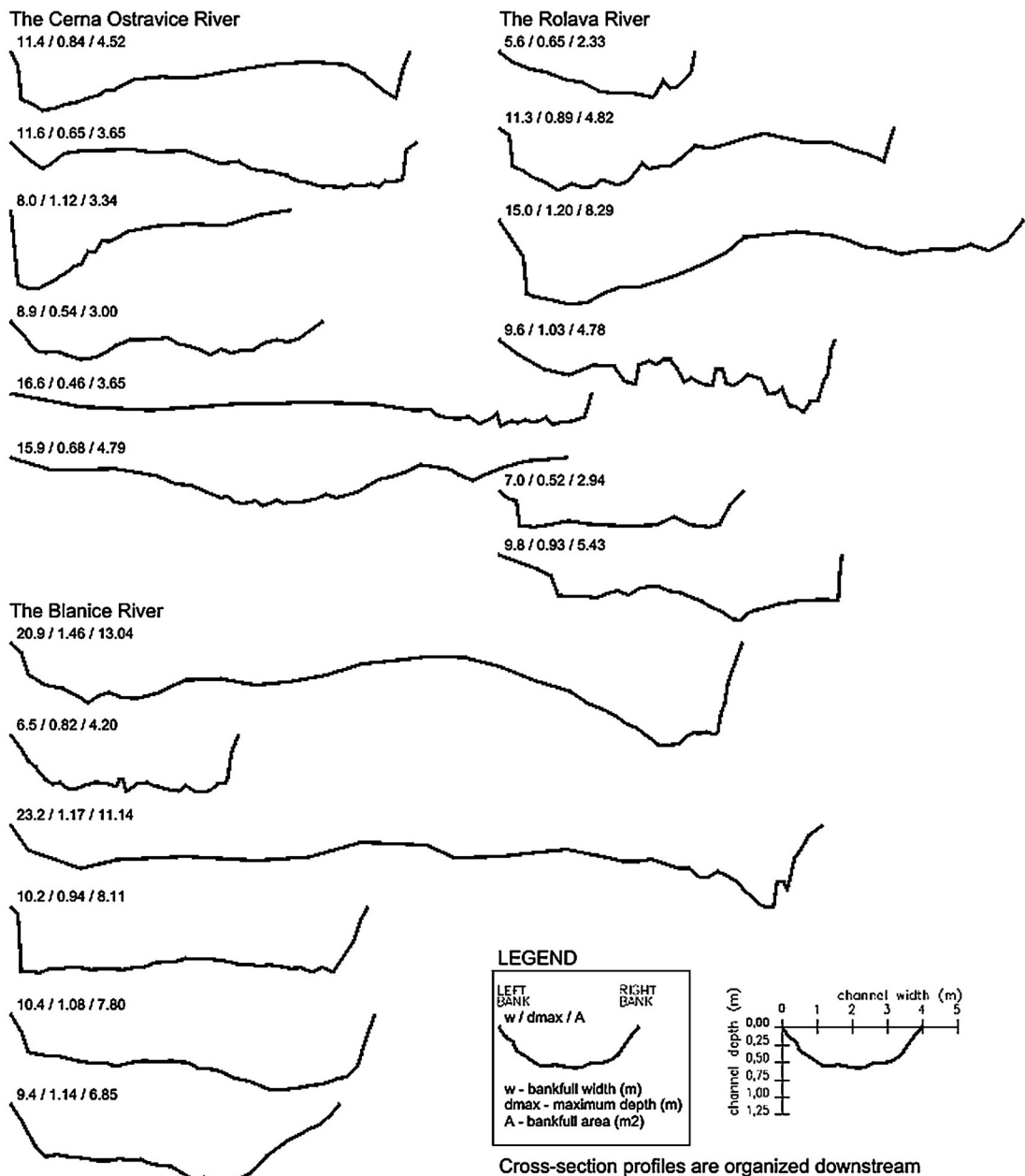


Fig. 5. Cross-sectional profiles measured at selected reference sites.

indicates a low stage of floodplain development, steep channel slope, and even valley floor slope. Rapids are the dominant bedform, although bars and island formations are also present (Table 3).

The Blanice River basin is located in the southwest of the Czech Republic. The upper course runs through flat, forest-free terrain with peat bogs. Afterwards, the meandering river runs through a wide floodplain comprised of meadows with natural vegetation, where the RS is located. Despite the RS's high-altitude location, its low channel slope, well-developed floodplain, finer sediment (d<sub>50</sub> – very coarse gravel), and lower width-depth ratio

confirm it as a meandering channel with riffle-pool sequences and large amounts of accumulation (Table 3).

The Cerna Ostravice River is a wild mountain forest stream located in the Beskydy Mountains in the eastern Czech Republic. The mountainous catchment of the Cerna Ostravice is practically completely forested and uninhabited. The channel slope, due to sinuosity, allows for the existence of many accumulation forms in the channel, but the floodplain is at a low stage of development. This RS has sufficient sediment supply upstream and from bank erosion, and therefore the channel is shallow (Fig. 5) with a riverbed consisting of small to medium cobbles



(d50 – small cobbles). The sinuous channel pattern partially demonstrates elements of braiding when compared to the meandering channel pattern of the Blanice River (Kujanová et al., 2016).

Type-specific reference conditions can be imagined as a set of characteristics, some of which are expressed using threshold values and others verbally. It is clear from the given characteristics (Table 3, Figs. 4 and 5) that, although each RS falls under a different “group of river characteristic” category, often no clear boundaries between values exist. Similarly, condition variability within RSs makes determining threshold values for expressing type-specific reference conditions difficult. In Table 3 similar values are highlighted, confirming that type-specific reference conditions are specified by a set of characteristics.

### 3.3. General method overview

The method has been designed so that it is possible to decide relatively easily whether a site can be considered an RS or not. Thus, it can determine whether it is worth putting the time and effort into surveying and mapping in detail the characteristics of cross-sectional profiles, longitudinal profile, and sediment characters of the site (Fig. 1). Cross-sectional profiles should mainly reflect the river type and the variability of conditions; they should not, however, capture extreme conditions (the deepest pool, the largest bar, the only steps, etc.). Considering the fact that in surveying a cross-sectional profile a 100 m long stream section is evaluated in detail, cross-sectional profiles should be spread out far enough so that no overlap of assessed characteristics occurs and at the same time to ensure that the characteristics of most of the RS reach are recorded in detail. Cross-sectional profiles are considered to be fundamental for recording reference conditions. Cross-sectional profiles demonstrate not only channel depth and width variability at the RS, but also riverbed structures, riverbed substrate, and channel pattern. The characteristics of channel and valley slope, sinuosity, and stream order (see Table 3 and Fig. 1) are particularly important for filling in cross-sectional profile data. At the same time, cross-sectional profile characteristics enable other important characteristics to be established, such as bankfull area, entrenchment ratio, width-depth ratio, and others (see Fig. 1). RS longitudinal profile is advantageous primarily for establishing channel slope, which is used for other calculations, as well as for recognizing the riverbed structure of the RS. Variability of the longitudinal profile and riverbed substrate characteristics are important. The benefit of the pebble count method (Wolman, 1954), which was selected to describe riverbed sediment distribution, lies, in particular, in the simplicity of the equipment needed, in the ease of training surveyors, and in the short amount of time it takes to conduct compared to the high value of the results it produces (Fig. 4). Another advantage is that only about 100 particles are taken from the riverbed and this sediment is then returned to the stream after measuring, which means a low impact on riverbed structure. This method should be applied in a representative section of the RS, which would reflect prevailing character of the reach,

taking into consideration technical possibilities. For establishing reference conditions of streams, a record of qualitatively determined characteristics seems to be of great importance (Kujanová et al., 2016), especially valley type, channel pattern, flow characteristics, susceptibility of banks to erosion, and the vegetation of banks and riparian zone. All field surveys and measurements should be conducted at low water and not during the growing season.

## 4. Discussion on approach to establishing reference conditions

The REFCON method is in compliance with procedures for establishing reference conditions laid out in Guidance No. 10 (European Commission, 2003) that follows common implementation strategy for the WFD. The method presented here is based on defined river types, applies ecological criteria, resp. screening of anthropogenic impacts. Based on a decision about the availability of potential RSs, it identifies a network of RSs and a data collection method for validating RSs. The resulting characteristics of RSs serve for establishing reference condition threshold values.

As well as German, Austrian and Slovak approaches the REFCON method for establishing reference conditions is based on data from RSs. Although the REFCON method covers specifics of geographical location determined characteristics are also similar to those used in Germany, Austria, and Slovakia. Although in Germany, Austria, and Slovakia having a high or good hydromorphological status is an important criterion for determining RSs, in the Czech Republic hydromorphological status has not yet been assessed across the board. In comparison with the other mentioned approaches the REFCON method emphasizes screening for anthropogenic impacts in determining RSs.

Set criteria as well as recording of qualitative hydromorphological characteristics are applicable elsewhere in conditions of Central Europe. Detailed field survey with measurements is adjusted to streams of lower order and possible to wade. The main principles of the method are applicable elsewhere considering physical-geographical conditions (climate, geomorphology, land cover, and anthropogenic impacts).

The REFCON method for identifying RSs based on meeting defined criteria was established for streams defined as river water bodies (Ministry of the Environment, 2013), but the criteria for selecting RSs can also be applied to smaller streams. The method for establishing reference conditions based on RS survey data can be used in the Czech Republic on upper and middle courses of rivers, where suitable RSs can be found. On first- and second-order streams according to the classification of Strahler, RSs can be found more easily. These sections, however, represent headwater areas and upper stream courses only, they indicate as a rule greater variability, and their hydromorphological characteristics are in general hard to generalize. Therefore, this method is primarily designed for third- to sixth-order streams. On the lower courses of rivers (seventh- to ninth-order streams) that flow through land that has been intensively used by people for centuries

and where there is intensive anthropogenic impact, RSs cannot be found as a rule. Reference conditions, however, should be established for all river types, that is, for large lowland rivers as well. For establishing reference conditions in this situation, it is suitable to expand the RS network to include sites that do not meet all the criteria, but which are the best available sites for the given river type. To establish the best available site, it is necessary to conduct individual assessments of anthropogenic impacts and the importance of the site for establishing type-specific reference conditions.

The REFCON method facilitates the reliable assessment of set criteria and the exclusion river reaches that do not comply with requirements for reference sites. The choice of cross-sectional profiles or sites for pebble count application may be considered biased by the surveyor's subjectivity and by the variability of site's conditions.

The assessment of set criteria and hydromorphological characteristics may certainly be considered cost-effective. Although detailed field measurements are time-consuming, having an actual record of characteristics is priceless.

Channel morphology tends to be viewed statically; in recent years, however, more authors emphasize a dynamic view of river systems that respects channel processes and, in particular, channel adjustments (Brierley and Fryirs, 2005; Dufour and Piégay, 2009; Wyžga et al., 2012; Rinaldi et al., 2013). With the REFCON method, dynamic processes are considered in the form of their resulting river characteristics – erosion and accumulation bedforms, channel pattern (sinuosity), specific stream power and channel slope, variability of depth, width-depth ratio, entrenchment ratio, flow characteristics, sediment load and size, bank characteristics, and so on.

The idea of restoring pristine or historical conditions in an environment changed by humans is not feasible. Restoration target conditions should therefore be present reference conditions (Wyžga et al., 2012; Rinaldi et al., 2013). Where reference conditions have been lost the “space for time substitution” principle may be used (Wyžga et al., 2012). Palmer et al. (2005), however, point out that restoration targets cannot be applied universally where geological and climate conditions, land use, and species distribution differ. The REFCON method establishes present reference conditions using a system of RSs that are sought to equally cover the entire diversity of hydromorphological river types or groups of river characteristics (Kujanová et al., 2016). When a RS cannot be established for a given type, the REFCON method advises using the best available site. Considering the diversity and intensity of anthropogenic impacts (reservoirs on rivers, significant extraction, flood protection structures, roads) and the importance of the site for the type being assessed, it is necessary to conduct an individual assessment to establish the best available site (Fig. 1).

## 5. Conclusions

Establishing hydromorphological reference conditions is necessary for sustainable river management in line with WFD requirements. The essential task of identifying RSs that cover all river types and creating a record of

hydromorphological characteristics using field surveys is relatively time-consuming. One of the expected results of applying the REFCON method is the creation of a RS database for assessing the hydromorphological status of streams. This database will also serve for proposing stream restoration measures as well as a database of stream sections in need of protection from potential human impact.

The approach to establishing hydromorphological reference conditions on the basis of RS survey data enables the establishment of present reference conditions and takes into account stream variability and the range of physiographic conditions and anthropogenic impacts present in the Czech Republic.

For river management it would be the easiest to establish RSs using available maps and data; however, it was repeatedly confirmed that field surveys must be conducted for verification which confirms the original assumption. Type-specific reference conditions can be expressed using threshold values of individual characteristics; they can also be described qualitatively (verbally). The river system, however, is created by processes and the mutual interaction of processes and forms, which need to be respected. Therefore, it is always necessary to consider reference conditions as a set of characteristics or conditions that should be valid for a given river type which also confirms the original hypothesis of this study. For establishing RSs as well as hydromorphological characteristics, particularly from the perspective of land use and anthropogenic impacts, it is crucial to view the wider spatial context – the functional units of the basin and floodplain. It is also necessary to evaluate longer homogeneous reaches, that is, conditions in reaches downstream and upstream, and thus to take into account the principle of stream continuity.

## Conflict of interest

None declared.

## Ethical statement

Authors state that the research was conducted according to ethical standards.

## Acknowledgements

This research was realized under the framework of the research project SVV 263 202 “Dynamics of Earth's physical and geographical spheres and their interactions” and GAČR 13-32133S “Headwaters retention potential with respect to hydrological extremes”.

## Funding body

Charles University and Czech Science Foundation.

## References

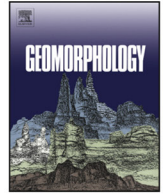
- Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Oxford.

- CEN, 2004. EN 14614:2004 Water Quality – Guidance Standard for Assessing the Hydromorphological Features of Rivers.
- Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Res. Appl.* 25, 568–581.
- Environment Agency, 2003. River Habitat Survey in Britain and Ireland. Field Survey Guidance Manual: 2003, Bristol.
- European Commission, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23rd October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Official Journal of the European Communities, L, 327/1, Luxemburg.
- European Commission, 2003. Rivers and Lakes – Typology, Reference Conditions and Classification Systems. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC), Guidance Document n° 10, Brussels.
- Jungwirth, M., Muhar, S., Schmutz, S., 2002. Re-establishing and assessing ecological integrity in riverine landscapes. *Freshw. Biol.* 47, 867–887.
- Kern, K., Fleischhacker, T., Sommer, M., Kinde, M., 2002. Ecomorphological survey of large rivers – monitoring and assessment of physical habitat conditions and its relevance to biodiversity. *Large Rivers* 13 (1–2), 1–28.
- Kujanová, K., Matoušková, M., Kliment, Z., 2016. Hydromorphological parameters of natural channel behavior in conditions of the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic. *Geomorphology* 258, 69–81.
- Langhammer, J., 2007. Úpravy toků a údolní nivy jako faktor ovlivňující průběh povodní. (Modifications of river network and floodplain as a flood risk factor). In: Langhammer, J. (Ed.), *Povodně a změny v krajině. (Floods and Landscape Changes)*. Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University in Prague and Ministry of the Environment of the Czech Republic, Prague, pp. 271–294.
- Langhammer, J., Hartvich, F., 2014. Metodika typově specifického hodnocení hydromorfologických ukazatelů ekologické kvality vodních toků (Method of Type-specific Assessment of Hydromorphological Parameters Ecological Quality of Watercourses). Ministry of the Environment of the Czech Republic.
- Langhammer, J., Hartvich, F., Mattas, D., Rödlová, S., Zbořil, A., 2012. The variability of surface water quality indicators in relation to watercourse typology, Czech Republic. *Environ. Monit. Assess.* 184, 3983–3999.
- LAWA, 2000. Gewässerstrukturgütekartierung in der Bundesrepublik Deutschland. Verfahrensvorschlag für kleine und mittelgroße Fließgewässer.
- Lehotský, M., 2006. Metodika pre odvodnenie referenčných podmienok pre hydromorfologické parametry vodných tokov (Method of Reference Conditions Derivation for Hydromorphological Parameters of Streams). Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava.
- Lehotský, M., Grešková, A., 2004. Příprava databázy hydromorfologických a biologických ukazatelů pro proces výběru a charakterizace referenčních míst podla Smernice 2000/60/EC (Preparation of hydromorphological and biological parameters database for a process of selection and description of reference sites according to Water Framework Directive 2000/60/EC, report). Slovak Hydrometeorological Institute, Bratislava.
- Leuven, R.S.E.W., Nienhuis, P.H., 2001. River restoration and flood protection: controversy or synergism? *Hydrobiologia* 444, 85–99.
- Milhou, R.T., Waddle, T.J., 2012. Physical Habitat Simulation (PHABSIM) Software for Windows (v.1.5.1) Fort Collins, USGS Fort Collins Science Center.
- Ministry of Agriculture of the Czech Republic, 2013. Register of Reservoirs.
- Ministry of the Environment of the Czech Republic, 2013. Register of Surface Water Bodies.
- Opatřilová, L., et al., 2013. Metodika pro stanovení referenčních podmínek pro jednotlivé složky biologické kvality (Method for establishing reference conditions for individual biological quality elements, report). T.G. Masaryk Water Research Institute, Prague.
- Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C.N., Follstad, S.J., Galat, D.L., Loss, S.G., Goodwin, P., Hart, D.D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Donnell, T.K., Pagano, L., Sudduth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration. *J. Appl. Ecol.* 42, 208–217.
- Parasiewicz, P., 2007. The MesoHABSIM model revisited. *River Res. Appl.* 23, 893–903.
- Pottgiesser, T., Sommerhäuser, M., 2008. Beschreibung und Bewertung der deutschen Fließgewässertypen – Steckbriefe und Anhang. Umwelt Bundes Amt, LAWA, UBE.
- Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussetini, 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.
- Slavíková, A., Pravec, M., Horecký, J., Dobrovský, P., Slavík, O., Musil, J., Birklen, P., Marek, P., 2014. Koncepcie zprůchodnění říční sítě ČR (Conception of River Continuity Restoration in the Czech Republic). Ministry of the Environment of the Czech Republic, T.G. Masaryk Water Research Institute, Nature Conservation Agency of the Czech Republic, Prague.
- State Administration of Land Surveying and Cadastre, 2013. Database of Geographic Data of the Czech Republic (ZABAGED).
- Wimmer, R., Wintersberger, H., Parthl, G.A., 2012. Hydromorphologische Leitbilder Fließgewässertypisierung in Österreich. Bundesministerium für Land-Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Wien, Band 1 Einführung, Definitionen und Parameter.
- Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Trans. Am. Geophys. Union* 35 (6), 951–956.
- Wyźga, B., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., Hajdukiewicz, H., 2012. Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. *Earth Surf. Process. Landf.* 37, 1213–1226.

### **7.3 HYDROMORPHOLOGICAL PARAMETERS OF NATURAL CHANNEL BEHAVIOR IN CONDITIONS OF THE HERCYNIAN SYSTEM AND THE FLYSCH BELT OF THE WESTERN CARPATHIANS ON THE TERRITORY OF THE CZECH REPUBLIC**

Kujanová, K., Matoušková, M., Kliment, Z., 2016. Hydromorphological parameters of natural channel behavior in conditions of the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic. *Geomorphology* 258, 69–81.





# Hydromorphological parameters of natural channel behavior in conditions of the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic



Kateřina Kujanová\*, Milada Matoušková, Zdeněk Kliment

Department of Physical Geography and Geocology, Faculty of Science, Charles University in Prague, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Czech Republic

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 8 August 2015

Received in revised form 27 January 2016

Accepted 28 January 2016

Available online 29 January 2016

### Keywords:

Natural channel groups

Hydromorphology

Reference conditions

Sinuosity

## ABSTRACT

A fundamental prerequisite for assessing the current ecological status of streams is the establishment of reference conditions for each stream type that serve as a benchmark. The hydromorphological reference conditions reflect the natural channel behavior, which is extremely variable. Significant parameters of natural channel behavior were determined using a combination of four selected statistical methods: Principal Component Analysis, Agglomerative Hierarchical Clustering, correlation, and regression. Macroscale analyses of data about altitude, stream order, channel slope, valley floor slope, sinuosity, and characteristics of the hydrological regime were conducted for 3197 reaches of major rivers in the Czech Republic with total length of 15,636 km. On the basis of selected significant parameters and their threshold values, channels were classified into groups of river characteristics based on shared behaviors. The channel behavior within these groups was validated using hydromorphological characteristics of natural channels determined during field research at reference sites. Classification of channels into groups confirmed the fundamental differences between channel behavior under conditions of the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians in the Czech Republic and determined a specific group in the flattened high areas of mountains in the Bohemian Massif. Validating confirmed the distinctions between groups of river characteristics and the uniqueness of each one; it also emphasized the benefits of using qualitative data and riparian zone characteristics for describing channel behavior. Channel slope, entrenchment ratio, bed structure, and  $d_{50}$  were determined as quantitative characteristics of natural channel behavior.

© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

## 1. Introduction

Today, the study of fluvial-morphological processes is focused on evaluating the current ecological status of streams and proposing restoration measures. A fundamental prerequisite for assessing the current ecological status of streams is the establishment of reference conditions for each stream type that serve as a benchmark and represent the target status after restoration.

The stability of a stream channel or its dynamic equilibrium is predetermined by flow conditions (discharge and valley floor slope) and sediment regime as well as the bank and channel bottom material and bank vegetation (Schumm, 1985; Rosgen, 1994; Hey, 1997). When the threshold values of these conditions are exceeded, the fluvial system changes and adapts to the new conditions. The characteristics that adapt and thus form the morphology of the river system include channel width and depth, erosion and accumulation bedforms, channel slope, flow velocity, sinuosity, discharge, and sediment load and size (Leopold et al., 1964; Hey, 1997; Brierley and Fryirs, 2005). In order to

understand fluvial-morphological processes and the development of riverine landscapes, categorizing channels according to shared characteristics is useful.

Geomorphological classifications of channel types have established qualitative links between channel processes, forms, and stability (Thorne, 1997). These classification systems, however, group channels together based on the significance of different characteristics, including the following: channel pattern (Wolman and Leopold, 1957; Church, 1992; Thorne, 1997), dominant channel-forming processes (Schumm, 1977), existing channel morphology (Rosgen, 1994), and morphodynamic channel development processes and trends in the change of these processes (Brookes, 1988; Downs, 1995). Channels are also classified for the purposes of stream management (Rosgen, 1994; Montgomery and Buffington, 1997; Newson et al., 1998) or based on recovery potential (Brierley and Fryirs, 2005). Classification systems should serve as flexible tools for establishing existing conditions as well as for forecasting changes in the natural behavior of a river system.

Several authors have stated the significance of studying fluvial processes of natural channels (Leopold and Maddock, 1953; Montgomery and Buffington, 1997; Rinaldi, 2003; Wohl and Merritt, 2005; Harnischmacher, 2007) and emphasized process-based understanding

\* Corresponding author.

E-mail address: [katerina.kujanova@email.cz](mailto:katerina.kujanova@email.cz) (K. Kujanová).

of hydromorphology (Gurnell et al., 2014). Rivers that have been affected by anthropogenic impact should be excluded as they would skew the characteristics. Reference status, or potential natural status, represents optimal ecological conditions supporting the development of a riverine ecosystem and its self-sustainability (Rosgen, 1994; Brookes, 1997; Verdonshot, 2000). Reference conditions, however, must be understood in terms of cultural-landscape changes (Kondolf et al., 2003a; Matoušková, 2008; Dufour and Piégay, 2009). Fluvial systems should be viewed hierarchically: landscape–floodplain–channel–riverbed forms and microhabitats (Frissell et al., 1986; Lehotský, 2004). The understanding of hydromorphology at the reach scale requires an understanding of current and past processes and interventions at larger spatial scales (Gurnell et al., 2014). Vaughan et al. (2009) and Kondolf et al. (2003b) discussed the significance of the link between the riparian zone and channel-forming processes.

Geomorphological channel classification is as a rule based on the collection of a large amount of data and the assessment of such data using statistical methods, including, for example, principal component analysis (Newson et al., 1998), cluster analysis (Schmitt et al., 2000), and discriminant analysis (Wohl and Merritt, 2005), with the objective of defining parameters for classifying and grouping channels. Classification always involves generalizing reality into quantifiable characteristics or qualities. Such generalization should help identify natural channel behavior, but at the same time specific local conditions should always be assessed individually (Rosgen, 1994; Kondolf et al., 2003a).

The selection of variables describing a river system should represent the cross-sectional and longitudinal channel profile as well as channel pattern (Leopold et al., 1964; Thorne, 1997; Harnischmacher, 2007). Most authors recommend determining all morphological as well as hydraulic characteristics of a stream channel at bankfull discharge (Rosgen, 1994; Simon and Castro, 2003; Johnson and Padmanabhan, 2010). Channel pattern provides basic information about stream channel behavior and is crucial for the morphological characteristics of the channel and slope (Schumm, 1985). Leopold and Maddock (1953) named channel slope as a factor influenced by channel processes in a long period of development, which at the same time creates the final morphological appearance of the stream channel. Generally, as channel pattern changes from straight to meandering to braiding, valley floor slope and sediment load increase (Schumm and Khan, 1972). Straight channel pattern is often caused by valley morphology. Oscillating bed height is always linked to a tendency for a sinuous thalweg to form (Thorne, 1997). Sinuosity thresholds for establishing channel pattern according to Wolman and Leopold (1957), Rosgen (1994), and Rinaldi (2003) are summarized in Table 1.

In relation to determining the current ecological status of watercourses and the application of restoration measures, particularly since the *Water Framework Directive (2000/60/ES)* has come into effect, watercourse typologies have been developed and reference conditions sought (Environment Agency, 2003; Pottgiesser and Sommerhäuser, 2008; Langhammer et al., 2012; Wimmer et al., 2012). Type-specific reference conditions may be spatially based (using data from reference sites), based on predictive modeling or hindcasting methods using historical, paleological, or other data, or derived from a combination of these methods. In cases where these methods cannot be applied, expert judgment may be used to establish such conditions (*Water Framework Directive, 2000/60/ES*). A cartographically documented historical state

of rivers is perhaps the most commonly used concept of reference conditions (Hohensinner et al., 2008; Wyzga et al., 2012).

This study focuses on the actual appearance of channels expressed as a data set of the morphological characteristics of the stream channel and floodplain at two levels of scale: macroscale analysis of maps and detailed microscale field research conducted at reference sites.

The main objective of this study was to classify channels into groups based on determined significant parameters of natural channel behavior in physiographic conditions of the Czech Republic that would subsequently facilitate the establishment of reference conditions. Further objectives were to validate these statistically classified groups in the field survey and to compare the morphological characteristics of channels in the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic.

## 2. Study area

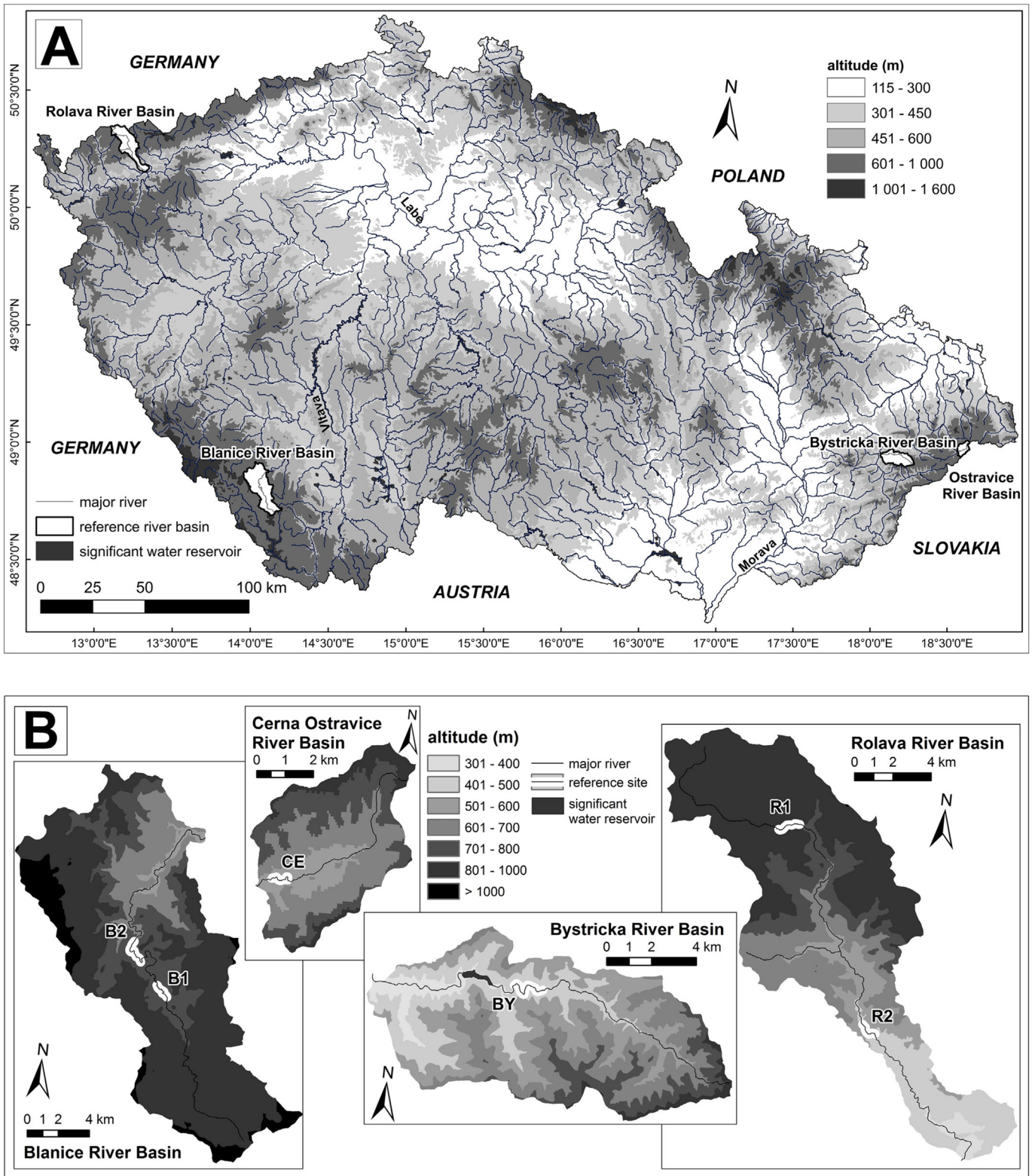
The broadly defined studied area consists of the territory of the Czech Republic, which includes the headwaters of three important river systems: the Labe, Odra, and Morava Rivers. The majority of the area is in the Bohemian Massif, a part of the Hercynian System of western and central Europe. Expansive, flattened surfaces primarily on Precambrian and Paleozoic igneous and metamorphic rock are typical for this area. The younger Western Carpathians, which consist primarily of flysch and whose terrain is significantly rougher and more sloped, are located on the eastern margins of the study area. The differences between these two geomorphological units mean different natural conditions for the development and composition of river networks. The mean altitude of the study area is 450 m, with a maximum altitude of 1602 m in the Krkonoše Mountains and a minimum of 115 m where the Labe River leaves the territory of the Czech Republic (Fig. 1A). The Czech Republic has a temperate climate. Locally, the climate is strongly influenced by prevailing westerly oceanic wind flow as well as by differences in altitude. The average annual temperature ranges from 0.4 °C to 10.1 °C depending upon location. Average annual precipitation varies between 435 and 1392 mm, and this variability is strongly affected by the differing effects of the leeward and wayward sides of mountains. Maximum discharge occurs during the spring thaw and rains, that is, in March at medium and low altitudes and in April at high altitudes. The lowest discharge occurs in the autumn. The runoff regime of watercourses is significantly affected by the presence of reservoirs and extensive modifications of the river network (about 28.4% of the entire length of the river network; Langhammer, 2007).

The case study river basins (Fig. 1B and Table 2) were selected to cover the various physiographic conditions present in the Czech Republic and to provide reference sites compliant with set criteria (see Section 3.4). The Rolava River basin is located in the Krušné hory Mountains in northwestern Czech Republic. The upper course runs through flat, forest-free terrain that features large peat bogs important for water retention. In the middle course where reference site **R1** is situated, the Rolava changes into a wilder mountain forest stream with a riverbed composed of large cobbles and even boulders and steep slopes. Thereafter, the slope continues to decrease slowly, and reference site **R2** is located in the upper part of this section. The Blanice River basin is located in the southwest of the Czech Republic. The upper course runs through flat, forest-free terrain with peat bogs. Afterwards, the

**Table 1**  
Sinuosity thresholds for establishing channel pattern.

Channel pattern	Straight Sinuosity index	Sinuosity	Meandering	Other channel pattern
Wolman and Leopold (1957)	<1.1	1.1–1.5	>1.5	
Rinaldi (2003)	<1.2	1.2–1.5	1.5–2.5	Sinuosity with alternate bars: 1.1–1.45
Rosgen (1994)	<1.2	>1.2	>1.4 (very high sinuosity >1.5)	Braided: <1.1





**Fig. 1.** Topography of the study area. (A) Digital elevation model of the Czech Republic and the network of major rivers in the area; (B) details of studied river basins with selected reference sites.

meandering river runs through a wide floodplain comprised of meadows with natural vegetation (location of reference site **B1**). Then the Blanice River changes into a wild mountain forest stream in a deep, canyoned valley with a riverbed composed of cobbles and even boulders and steep slopes (location of reference site **B2**). Thereafter,

the stream runs into the Husinec Reservoir, which covers an area of 0.61 km<sup>2</sup> and has a maximum depth of 25.5 m. Numerous free meanders, oxbow lakes, and pools are formed in the middle course. The Bystrická River basin and Cerna Ostravice River basin are located in the Beskydy Mountains (part of the Western Carpathians) in eastern

**Table 2**  
Fundamental characteristics of study river basins and their major rivers.

River	Catchment area (km <sup>2</sup> )	River length (km)	Mean daily discharge (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Max altitude/min altitude (m)	Location of source	Location of last profile
Rolava	138	36.6	2.39	920/370	50°24'05"N 12°36'55"E	50°14'10"N 12°52'15"E
Upper Blanice	204	62.2	2.04	972/523	48°51'45"N 14°2'26"E	49°21'1"N 13°58'12"E
Bystricka	86	22.2	0.90	868/302	49°38'52"N 18°18'52"E	49°42'00"N 17°96'25"E
Cerna Ostravice	29	9.4	1.50 <sup>a</sup>	850/529	49°49'28"N 18°54'09"E	49°45'30"N 18°46'46"E

<sup>a</sup> Below the confluence with the Bila Ostravice River.

Czech Republic. The Bystricka basin is largely covered in forests and meadows with natural vegetation. It is a mountainous basin with a narrow valley with coarse gravel and small cobbles dominating the riverbed. The Bystricka Reservoir, in the lower course of the stream, covers an area of 0.38 km<sup>2</sup>, and has a maximum depth of 26 m. Reference site **BY** is in the middle section of the river, 1.5 km above the impoundment of the Bystricka Reservoir (Fig. 1B). The Cerna Ostravice River is a wild mountain forest stream with a riverbed consisting of coarse gravel and small to medium cobbles. The mountainous catchment of the Cerna Ostravice is practically completely forested and uninhabited. Reference site **CE** is located in the lowest river course, just above the confluence with the Bila Ostravice.

### 3. Methods and source data

#### 3.1. Source data and spatial scale

For this study, a DEM with a resolution of 10 × 10 m from the Fundamental Database of Geographic Data of the Czech Republic (ZABAGED) was used as were discharge data from 2003 to 2012 from the hydrological database of the Czech Hydrometeorological Institute and data on major river courses from the Register of Surface Water Bodies of the Ministry of the Environment of the Czech Republic (Evidence vodních útvarů povrchových vod MŽP ČR). Cartographic outputs and spatial analyses were processed using ArcGIS 10.0; statistical analyses were conducted with XLStat.

Channel behavior was assessed at two different spatial scales. First, at the macroscale level, generalized cartographic data were used to reduce the number of variables relevant for characterizing channel behavior; and then at the microscale level, data acquired from detailed field research and cross-sectional profile measurements at reference sites were used to validate the findings.

#### 3.2. Selection of suitable river reaches at macroscale level

Macroscale analyses were conducted on major rivers of the Czech Republic. These major rivers were divided into reaches based on the boundaries of 4424 drainage basins defined by the Czech Hydrometeorological Institute (valid to 2013) for the purposes of hydrological monitoring and forecasting. The necessity of dividing rivers into reaches of variable length to capture changes in physiographic conditions emerged from the statistical analysis of physiographic characteristics of the rivers. Dividing the major rivers into 4424 reaches with an average length of 4.35 km was a suitable scale for determining individual parameters (e.g., length of the valley, sinuosity, valley floor slope, and hydrological changes because of tributaries) within the study area. The maximum and minimum altitude of each reach was established using a DEM; furthermore, on the basis of GIS data, the length of each reach and the length of the valley were determined as was the Strahler (1957) number in last profile of the reach. For every reach, acquired data were used to calculate channel slope (the difference between maximum and minimum altitudes divided by the length of the reach), valley floor slope (the difference between maximum and minimum altitudes divided by valley length), sinuosity (the ratio of the length of the reach to the length of the valley), and the mean altitude of the reach

(the average value of the maximum and minimum altitude of the reach). Furthermore, for every reach the following characteristics of the hydrological regime in 2003–2012 were also determined: month with the highest average discharge and variability of discharge (determined as the ratio of average discharge of month with the highest discharge to average discharge of month with the lowest discharge). For the purpose of excluding reaches that have been anthropologically influenced, only reaches of the third- to sixth-order according to the classification of Strahler in last profile of the reach were selected. This selection criterion excluded data about large, lowland rivers affected by anthropogenic impact. Headwater reaches (first- and second-order streams) were excluded because of the high variability of their parameters. Furthermore, reaches flooded by reservoirs and modified reaches with a sinuosity value of 1.0 were also excluded as a result of anthropogenic impact. Thus, 3197 reaches with the total length of 15,636 km were included in further analyses.

#### 3.3. Statistical methods of establishing significant parameters at macroscale level

A Pearson-type Principal Component Analysis (PCA) was conducted in order to reduce the number of variables and to select mutually independent parameters that describe channel behavior. Seven variables from each of the 3197 reaches were used as PCA input: stream order (Strahler number), sinuosity, mean altitude, valley floor slope, channel slope, variability of discharge, and month with the highest discharge. The Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) method was used to validate mutual relationships between parameters. Pearson's correlation coefficient was used as distance criterion; simple-linkage clustering was the method of AHC used. The input values for AHC analysis, in contrast to PCA, also included minimum and maximum altitudes and altitude difference.

On the basis of histograms, threshold value categories were determined for the following output parameters: mean altitude, valley floor slope, and sinuosity (Table 3). Sinuosity threshold values were established along with the channel pattern threshold values listed in Table 1. A large part of the study area consists of hilly terrain (Fig. 1A); therefore, the threshold value for determining the upper boundary of hilly terrain was set at 600 m, and the upper boundary defining lowlands was increased to 300 m. The assumption that natural reaches at higher altitudes with steeper channel slopes better express the

**Table 3**  
Threshold values of categories for selected parameters: valley floor slope, sinuosity, and altitude and their share in total number.

Selected parameter	Category	Share in total number (%)
Valley floor slope (%)	Less than 0.50	35.62
	0.50–1.79	42.90
	1.80 and more	21.48
Sinuosity	1.00–1.19 (straight)	40.81
	1.20–1.49 (sinuous)	40.82
	1.50–3.50 (meandering)	18.37
Mean altitude (m)	Less than 300 (low altitude)	28.05
	300–599 (mid-altitude)	62.41
	600 and more (high altitude)	9.54



relationships between hydromorphological parameters was tested on data from the reaches that were divided into the threshold-based categories listed in Table 3.

In this study, sinuosity was always assessed together with valley floor slope. Reaches that were found to have a slope of up to 0.5% and a sinuosity value of up to 1.2 were considered *probably modified*, whereas reaches with a slope of 0.5–1.79% and a sinuosity value of up to 1.2 were considered to be *potentially modified*.

In addition, correlation and regression were used to derive morphological channel patterns (Harnischmacher, 2007; Johnson and Padmanabhan, 2010; Galia and Hradecký, 2014). At first, regression analyses were conducted on the entire set of 3197 reaches and then separately for the three altitude categories and the three valley floor slope categories.

On the basis of the results of PCA, AHC, correlation, and regression analyses, groups of river characteristics (GRCs) were created and were validated by subsequent field research and measurements at six reference sites (Fig. 1B).

### 3.4. The criteria for identification of reference sites

This study assumes an application of the approach of using data from field research (Matoušková and Šmerousová, 2014) conducted at selected reference sites for establishing hydromorphological reference conditions in the Czech Republic. This approach was selected taking into account the unavailability of historical data, how well this data has been processed, and the demands on creating a functional model at the state-level. Reference sites were identified that met the criteria of having minimal anthropogenic impact defined by the REFCON method (Šmerousová and Matoušková, 2014): (i) unmodified flow hydraulics (no crosswise obstacles > 0.5 m at the reference site, no reservoirs or pond systems consisting of two or more ponds above the reference site, no significant water extraction or diversion at the reference site); (ii) natural banks, bed, and natural channel course at the reference site and at least 0.5 km above the reference site; and (iii) floodplain with a good status at the reference site (forest, permanent grassland, wetland, exposed rock). At first, a macroscale assessment of the fulfillment of these criteria was made using available maps. The potential reference sites were reaches of at least 1200 m, thus all of the mentioned criteria were assessed also in reaches 500 m above and 200 m below reference sites. Subsequently, whether potential reference sites met all of the above-mentioned criteria was assessed through microscale field research. For the purposes of this study, six reference sites that met the given criteria were selected. In general, each reference site is a morphologically homogenous reach of at least 500 m.

### 3.5. The methods of surveying and establishing hydromorphological characteristics at microscale level

In the six selected reference sites (Fig. 1B) between September 2013 and November 2014, 36 representative cross-sectional profiles were measured, and longitudinal profiles of individual reference sites that were at least 30 times the length of the channel's width were surveyed (Simon and Castro, 2003). Bankfull channel width and depth were measured using a tape measure (accuracy  $\pm 0.01$  m), the width of the floodplain at twice the maximum channel depth for determining the entrenchment ratio (Rosgen, 1994) was measured using a rangefinder (accuracy 0.1 m), and channel slope was measured using a surveying level (accuracy 0.005 m) and a rangefinder (accuracy 0.1 m). In the field, bankfull elevation was identified using the method of Williams (1978). For channels in a developed floodplain, bankfull elevation was identified by the elevation of the active floodplain; the bankfull elevation of incised channels was identified based on a combination of valley morphology, perennial vegetation, and sediments. For each reference site, a grain size of bed surface sediment was determined using the pebble count method (Wolman, 1954). At least 100 measurements were

taken each time; on the basis of these measurements, the  $d_{50}$  value was determined. At the same time, other selected characteristics of the reference site were recorded in the field: flow characteristics, potential floodplain retention capacity, characteristics of the vegetation of the bank and the riparian zone including channel shading, the presence of meso- and microhabitats, etc. The following characteristics of cross-sectional profiles were also recorded: valley type, susceptibility of banks to erosion, channel roughness, and erosion and accumulation bedforms 50 m upstream and downstream from the profile (Šmerousová and Matoušková, 2014). Bankfull area, mean depth, width–depth ratio, valley floor slope, bankfull discharge, and specific stream power were determined from data collected in the field (Rinaldi, 2003; Wohl and Merritt, 2005; Galia et al., 2012). Specific stream power  $\Omega$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) at bankfull discharge was determined with the equation:

$$\Omega = \rho g Q_{bf} S / w$$

where  $\rho$  is the specific weight of water ( $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $g$  is gravitational acceleration ( $9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ),  $Q_{bf}$  is bankfull discharge ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $S$  is channel slope (m/m), and  $w$  is bankfull width (m). The distance of the identified profile from the source was calculated from the length of the river network in ArcGIS. The length of each reach was always determined using GIS data and altitude data from a DEM – that is, using the same data sources as were used for all 3197 reaches.

The PCA and AHC analyses were once again conducted on the data acquired from the 36 reference site profiles in order to assess the representativeness or uniqueness of each hydromorphological characteristic. In addition, the interrelationships between the characteristics determined by field research at 36 reference site profiles were assessed using the Spearman and Pearson correlation coefficients; dependence between characteristics was then tested using regression analysis. The assumption is that a linear relationship exists between dependent variables and explanatory variables.

## 4. Results and discussion

### 4.1. Establishing significant parameters at the macroscale level

#### 4.1.1. Establishing significant parameters using PCA and AHC analyses

The PCA and AHC analyses were selected for establishing significant channel behavior parameters and to reduce the number of macroscale-level variables. Principal components PC1 and PC2 explain 37.86% and 16.80% of the total variability in the analyzed parameters among the river reaches, respectively. Adding a third component (14.69%) accounted for 69.35% of the total variability. Further components have eigenvalues of <1. As Figs. 2A, 2B, and 3 illustrate, strong relationships occur between valley floor slope and channel slope. Parameters variability of discharge, Strahler number, and month with the highest discharge only weakly contribute to explaining variation in the data set (Fig. 2A, B). The first three components explain 50% to 92% of variance of individual variables. According to the results of AHC analysis (Fig. 3), variability of discharge, Strahler number, sinuosity, and the month with highest discharge are relatively independent parameters that indicate dependence only in the upper parts of the hierarchy. They can therefore be used as parameters for expressing channel behavior characteristics.

In selecting parameters, their significance for identifying natural channel behavior was taken into account. The selected parameters should also represent cross-sectional and longitudinal profiles as well as channel pattern. Valley floor slope, in contrast to channel slope, is not affected by shortening the river network or by other modifications. The parameter mean altitude largely includes natural climatic characteristics (precipitation and temperatures) and, to some extent, the runoff regime. In contrast, the parameters variability of discharge and month with the highest discharge are to a certain extent influenced by the presence of reservoirs, and in light of the number of studied profiles

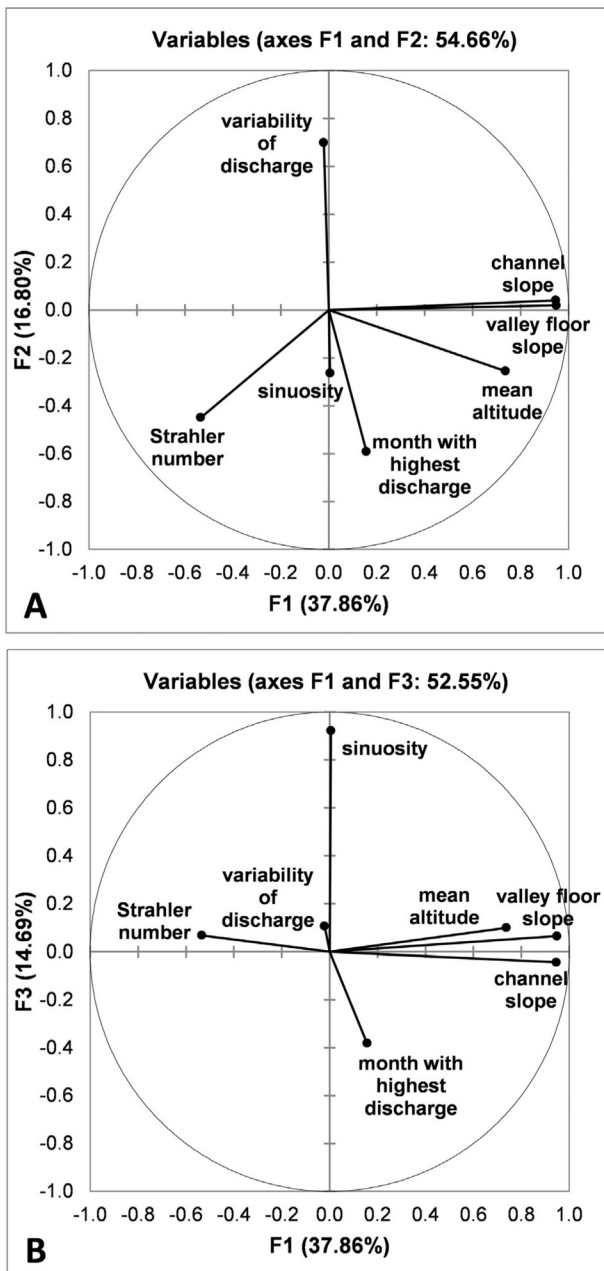


Fig. 2. Positions of analyzed river characteristics along the components of the PCA shown on F1 × F2 (A) and F1 × F3 (B) correlation circles and the degree of variance explanation by the three first components of the analysis.

they explain data set variance less than the altitude. The combination of valley floor slope and altitude in the study area indicates great variability (Fig. 4). Sinuosity represents channel pattern as well as the longitudinal profile; within the study area it can be used to identify modified channel reaches. Stream order is a parameter that is not affected by modifications and which expresses the size of the channel.

#### 4.1.2. Establishing significant parameters using correlation and regression analyses

Dependence between parameters was first examined for the set of 3197 reaches. Subsequently, the interrelationships between parameters were assessed separately for the three altitude categories, as well as for the valley floor slope, in order to confirm the assumption that natural reaches occur at higher altitudes and have steeper channel slopes.

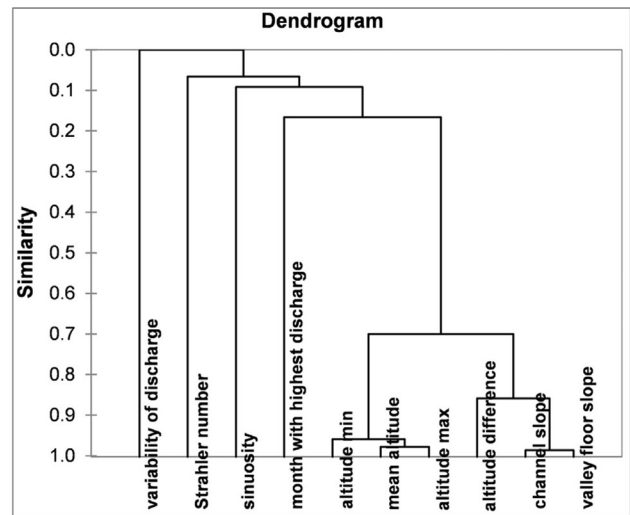


Fig. 3. Agglomerative hierarchical clustering of considered data sets.

The results of Spearman correlation between the seven selected variables of the 3197 reaches (Table 4) indicate a strong positive dependence between valley floor slope and channel slope; with the exception of these two parameters, the other variables listed in Table 4 can be considered to be independent.

Relationship between stream order and channel slope is not strong because low-order streams in headwater areas, many of which are found on flattened terrain, indicate relatively low slope values. Strong

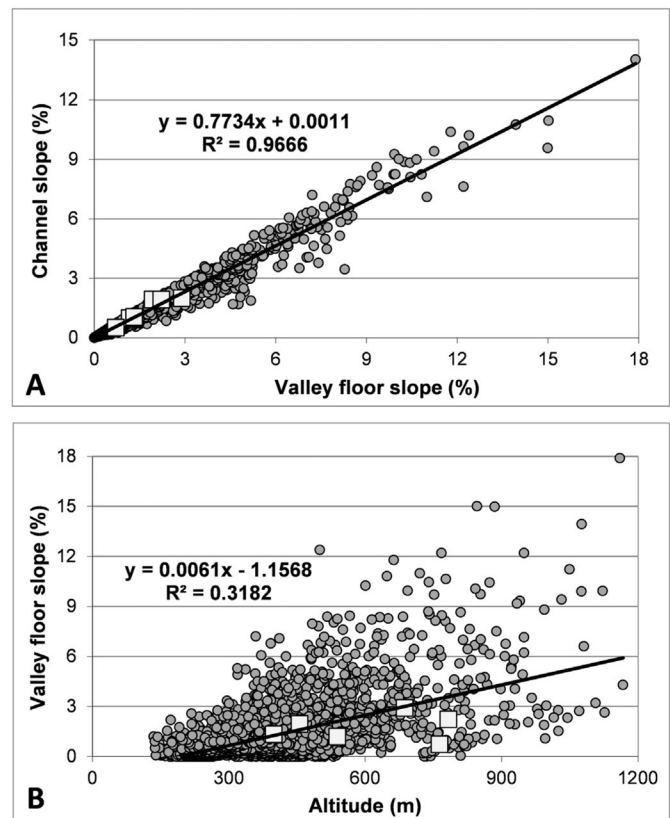


Fig. 4. Relationships between channel slope and valley floor slope (A) and between valley floor slope and mean altitude (B) for the set of 3197 river reaches. Values of the parameters at the six reference sites acquired through field measurements are depicted by white squares.



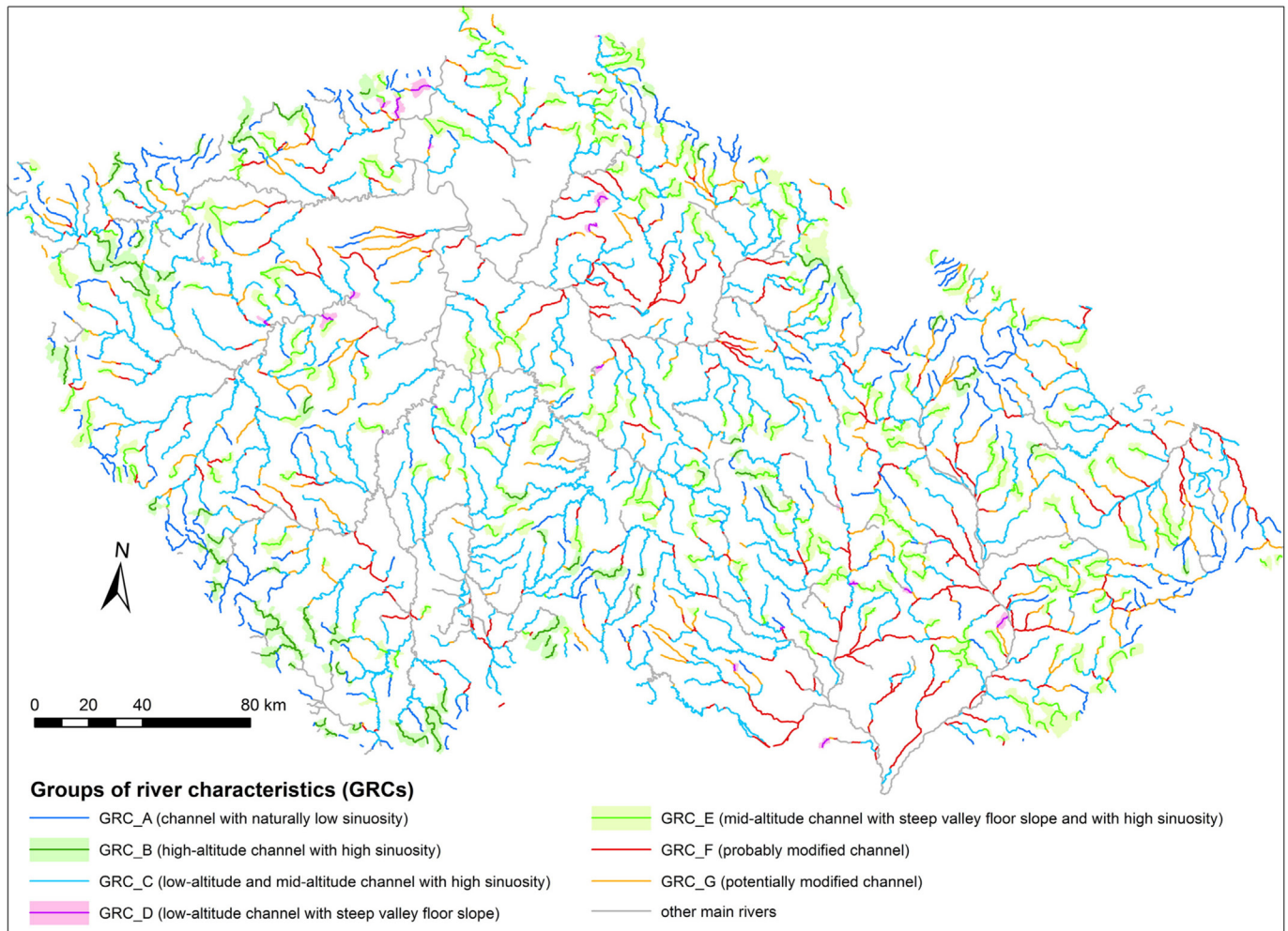
**Table 4**

Correlation of selected parameters expressing channel behavior at the highest level of generalization for 3197 reaches using the Spearman correlation coefficient; values in bold are statistically different from 0 with a significance level  $\alpha = 0.05$ ; gray cells indicate correlations of parameters that are best described by categories of river reaches at altitudes  $\geq 600$  m and by category of river reaches with valley floor slope  $\geq 1.8\%$ .

Variables	Channel slope	Valley floor slope	Sinuosity	Stream order	Mean altitude	Month with highest discharge	Variability of discharge
Channel slope		<b>0.986</b>	-0.012	<b>-0.492</b>	<b>0.512</b>	<b>0.164</b>	0.011
Valley floor slope	<b>0.986</b>		<b>0.129</b>	<b>-0.485</b>	<b>0.531</b>	<b>0.156</b>	0.012
Sinuosity	-0.012	<b>0.129</b>		0.009	<b>0.151</b>	<b>-0.054</b>	-0.001
Stream order	<b>-0.492</b>	<b>-0.485</b>	0.009		<b>-0.244</b>	<b>0.067</b>	<b>-0.097</b>
Mean altitude	<b>0.512</b>	<b>0.531</b>	<b>0.151</b>	<b>-0.244</b>		<b>0.212</b>	<b>-0.047</b>
Month with highest discharge	<b>0.164</b>	<b>0.156</b>	<b>-0.054</b>	<b>0.067</b>	<b>0.212</b>		<b>-0.120</b>
Variability of discharge	0.011	0.012	-0.001	<b>-0.097</b>	<b>-0.047</b>	<b>-0.120</b>	
Correlation best described by category of river reaches at altitudes $\geq 600$ m		Correlation best described by category of river reaches with valley floor slope $\geq 1.8\%$			Correlation best described by categories of river reaches at altitudes $\geq 600$ m as well as with valley floor slope $\geq 1.8\%$		

relationships neither between channel slope and altitude nor valley floor slope and altitude were demonstrated. In the total set of 3197 reaches, sinuosity indicated no relationship with altitude, which can

be explained by the modified character of lower stream reaches at low altitudes where great sinuosity would be expected, and, in contrast, the occurrence of reaches with high sinuosity on flattened terrain at



**Fig. 5.** Groups of river characteristics (GRCs) for third- to sixth-order river reaches based on a combination of altitude, sinuosity, and valley floor slope. Other major rivers are first- and second-order headwater reaches and seventh- to ninth-order lower courses and reaches flooded by significant reservoirs.

**Table 5**  
Specifications of individual parameters and the way of their clustering into 18 resulting GRCs and for 7 generalized groups in the map in Fig. 5.

Groups of river characteristics (GRCs)	Parameter	Altitude (m)			Sinuosity			Valley floor slope (%)			% no. of all reaches
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	
		Threshold	<300	300–600	≥600	<1.2	1.2–1.5	≥1.5	<0.5	0.5–1.8	
A	Channel with naturally low sinuosity		x		x					x	4.75
				x	x				x		0.51
				x	x	x				x	5.43
B	High–altitude channel with high sinuosity			x			x			x	1.24
				x		x	x	x			0.34
				x		x	x		x		1.52
C	Low–altitude and mid–altitude channel with high sinuosity	x				x	x	x			7.76
			x			x	x	x			9.59
		x				x	x		x		5.06
			x			x	x		x		17.12
D	Low–altitude channel with steep valley floor slope	x			x	x	x			x	0.76
E	Mid–altitude channel with steep valley floor slope and with high sinuosity		x			x				x	6.16
			x				x			x	2.36
F	Probably modified channel	x			x				x		13.27
			x		x				x		8.29
				x	x				x		0.03
G	Potentially modified channel	x			x					x	4.58
			x		x				x		11.25

high altitudes. A graphic depiction of the correlations between selected parameters can be found in Fig. 4A, B. Reference sites that can be considered fully natural reaches as a rule indicate values close to the linear regression trend line and are not extreme in regards to the other data.

Reaches at altitudes  $\geq 600$  m better explain the variability of discharge and sinuosity in comparison to the other assessed parameters in 11 of 21 assessed relationships (Table 4), which confirms the assumption about the natural character of reaches at such altitudes. In contrast, reaches at altitude  $\geq 600$  m indicate weaker correlation between channel slope and valley floor slope than reaches at altitude  $< 300$  m and reaches at altitude 300–599 m because valley floor slope in reaches  $\geq 600$  m increases substantially faster than channel slope.

When correlation and regression analyses were repeated separately for the three categories of channel reaches based on valley floor slope, reaches in the category with the steepest slope ( $> 1.8\%$ ) better described 12 of the 21 assessed parameter correlations (Table 4). Reaches in the

category with steepest slope ( $\geq 1.8\%$ ) better explain the variability in discharge, sinuosity, and altitude.

The results of analysis confirmed the selection of independent parameters – altitude, valley floor slope, sinuosity, and Strahler number – as significant for natural channel behavior. At the same time, the significance of reaches at higher altitudes and with steeper slopes for describing natural channel behavior was confirmed.

#### 4.2. Groups of river characteristics

For third- to sixth-order reaches, with the exception of reaches flooded by significant reservoirs, GRCs were established on the basis of combining altitude, sinuosity, and valley floor slope categories. By theoretically combining categories of these parameters, 27 theoretical GRCs emerged, which were further clustered into 18 GRCs. These GRCs were clustered based on clustering the categories of sinuosity

**Table 6**  
Outputs of correlation of river characteristics determined in 36 cross-sectional profiles using the Spearman correlation coefficient; values in bold are statistically different from 0 with a significance level  $\alpha = 0.05$ ; w—bankfull width,  $d_{\max}$ —maximum channel depth, A—bankfull area, O—wet perimeter,  $d_s$ —mean channel depth,  $w/d_s$ —width–depth ratio,  $Q_{br}$ —bankfull discharge,  $\Omega$ —specific stream power, Entr. ratio—entrenchment ratio, Source dist.—distance to source; gray cells indicate correlations of parameters that are mentioned in Section 4.3.1.

Characteristics	w (m)	$d_{\max}$ (m)	A ( $m^2$ )	O (m)	$d_s$ (m)	$w/d_s$	$Q_{br}$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	$\omega$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	Channel slope (%)	Valley floor slope (%)	Entr. ratio	Source dist. (km)
w (m)		<b>0.380</b>	<b>0.675</b>	<b>0.963</b>	0.018	<b>0.656</b>	<b>0.520</b>	0.131	0.280	0.205	–0.301	0.293
$d_{\max}$ (m)	<b>0.380</b>		<b>0.847</b>	<b>0.456</b>	<b>0.750</b>	–0.247	<b>0.818</b>	<b>0.483</b>	–0.060	0.043	0.249	0.242
A ( $m^2$ )	<b>0.675</b>	<b>0.847</b>		<b>0.715</b>	<b>0.699</b>	–0.050	<b>0.944</b>	<b>0.547</b>	0.115	0.182	0.070	<b>0.489</b>
O (m)	<b>0.963</b>	<b>0.456</b>	<b>0.715</b>		0.086	<b>0.574</b>	<b>0.571</b>	0.224	<b>0.356</b>	0.283	–0.261	<b>0.333</b>
$d_s$ (m)	0.018	<b>0.750</b>	<b>0.699</b>	0.086		<b>–0.691</b>	<b>0.791</b>	<b>0.643</b>	–0.073	–0.021	<b>0.430</b>	<b>0.416</b>
$w/d_s$	<b>0.656</b>	–0.247	–0.050	<b>0.574</b>	<b>–0.691</b>		–0.224	<b>–0.387</b>	0.259	0.131	<b>–0.508</b>	–0.133
$Q_{br}$ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	<b>0.520</b>	<b>0.818</b>	<b>0.944</b>	<b>0.571</b>	<b>0.791</b>	–0.224		<b>0.760</b>	0.252	<b>0.335</b>	0.020	<b>0.530</b>
$\omega$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	0.131	<b>0.483</b>	<b>0.547</b>	0.224	<b>0.643</b>	<b>–0.387</b>	<b>0.760</b>		<b>0.582</b>	<b>0.663</b>	–0.134	<b>0.551</b>
Channel slope (%)	0.280	–0.060	0.115	<b>0.356</b>	–0.073	0.259	0.252	<b>0.582</b>		<b>0.836</b>	<b>–0.521</b>	<b>0.344</b>
Valley floor slope (%)	0.205	0.043	0.182	0.283	–0.021	0.131	<b>0.335</b>	<b>0.663</b>	<b>0.836</b>		<b>–0.592</b>	0.308
Entr. ratio	–0.301	0.249	0.070	–0.261	<b>0.430</b>	<b>–0.508</b>	0.020	–0.134	<b>–0.521</b>	<b>–0.592</b>		–0.030
Source dist. (km)	0.293	0.242	<b>0.489</b>	<b>0.333</b>	<b>0.416</b>	–0.133	<b>0.530</b>	<b>0.551</b>	<b>0.344</b>	0.308	–0.030	



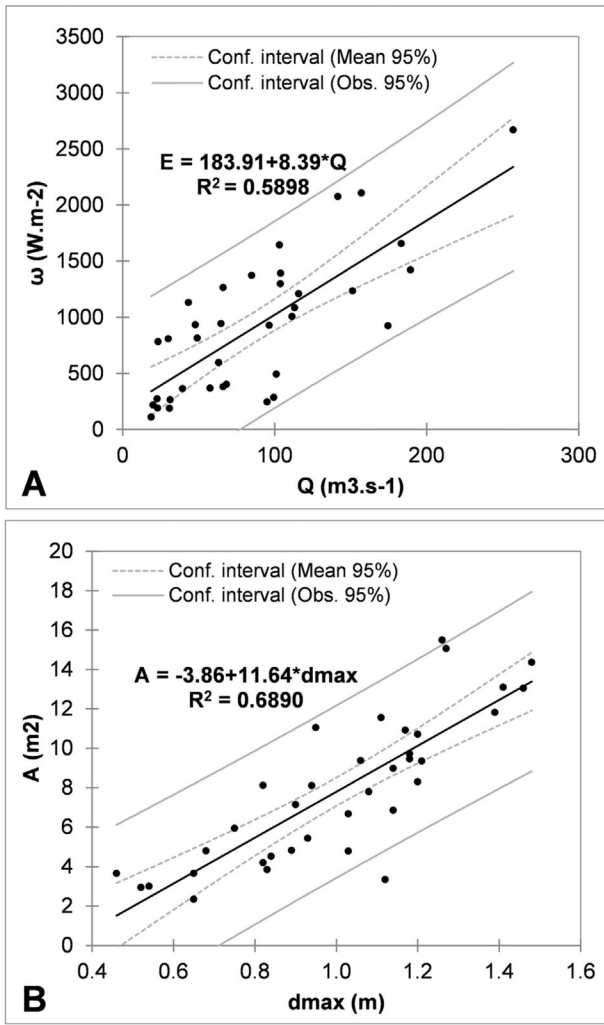


Fig. 6. Scatter plots and regression relationships between specific stream power and bankfull discharge (A) and between bankfull area and maximum depth (B). Dashed lines delimit confidence interval of mean parameter values; solid lines delimit confidence interval of true observation values.

due to the significance of sinuosity for differentiating natural and modified channels and the high variability of this parameter in relation to the length and boundaries of the assessed reach.

For cartographic depiction (Fig. 5), the resultant 18 GRCs were generalized into seven groups (labeled A to G). The specifics of the 18 resulting GRCs that were determined using the categories of assessed parameters, as well as the way of clustering, are given in Table 5.

The most frequent GRC – GRC\_C (39.5%) – includes low and mid-altitude sinuous and meandering stream channels with a slope of up to 1.8%. GRC\_A is also significantly represented (10.7%) and consists of headwater reaches in high areas in Czech mountain ranges and mid-altitude reaches in rough terrain with steep valley floor slopes.

The group GRC\_B (3.1%) can be considered a specific group found in the study area; such reaches typically occur in the flattened high areas of Czech mountain ranges (Krušné hory, Šumava, Novohradské hory, Slavkovský les, Českomoravská vrchovina). Headwater reaches with steep slopes but at low altitudes and with rare occurrence in the study area (GRC\_D) are also highlighted. Considering that the study area is located on the Main European Watershed, sinuous and meandering headwater reaches and their mid-altitude smaller tributaries in steep-sloped valleys form a significant group, GRC\_E (8.5%). The groups GRC\_B, GRC\_D, and GRC\_E are considered as specific groups of natural channel behavior in physiographic conditions of the Czech Republic.

The eastern part of the study area, containing 10% of the assessed channel reaches, is a part of the Western Carpathian flysch belt. In this completely geomorphologically different system a very significant percentage represents reaches with steeply sloped valleys at mid-altitude. In the Western Carpathians, reaches rarely occur with high sinuosity and generally have lower sinuosity even though they are mostly at altitude 300–599 m. The authors indicate that the proportion of group GRC\_A (14.43%) is much higher here as it mainly includes headwater reaches in Beskydy Mountains, which is the highest part of the Western Carpathians in the territory of the Czech Republic. The group GRC\_E (10.82%), which is represented by sinuous and meandering headwater reaches of lower mountain ranges, is found here more frequently than in the Bohemian Massif. In contrast, the very unique GRC\_B group does not occur here at all.

The groups GRC\_F and GRC\_G were determined to be probably modified and potentially modified reaches (37.42% in total) because the combination of valley floor slope and sinuosity values of these reaches suggests they could have been modified. Groups of probably modified and potentially modified reaches significantly occur in the Western Carpathians (51.81%) while GRC\_C is represented only by 21.97% here. Whether the river reaches have been modified or not can only be verified by field research. Therefore, objectively assess the characteristics

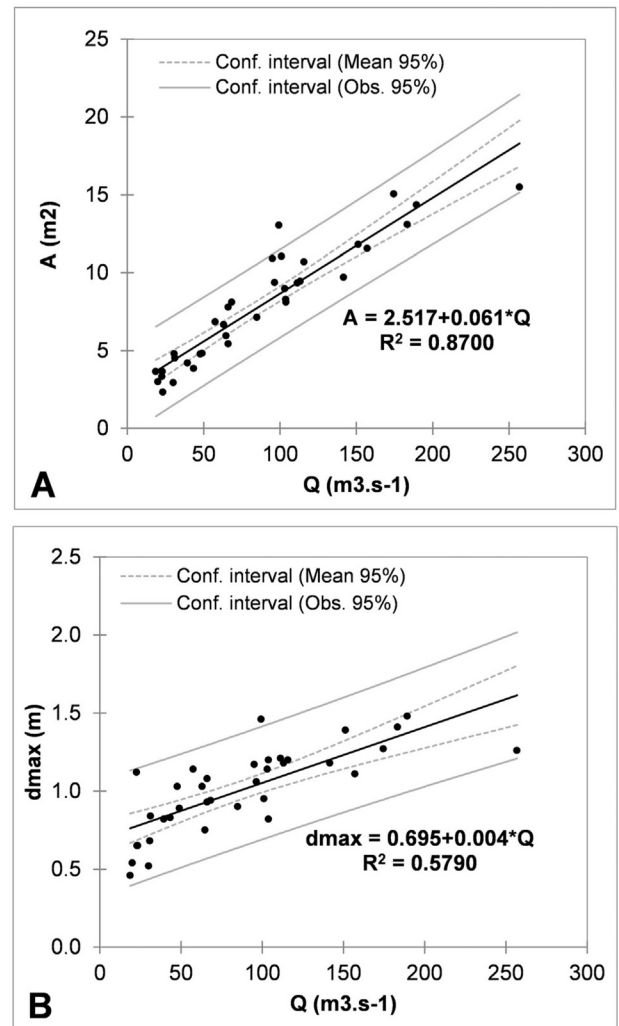


Fig. 7. Scatter plots and regression relationships between bankfull area and bankfull discharge (A) and relation between maximum depth and bankfull discharge (B). Dashed lines delimit confidence interval of mean parameter values; solid lines delimit confidence interval of true observation values.

**Table 7**  
Specification of measured hydromorphological characteristics and groups of river characteristics at the studied reference sites.

Reference site	CE	B1	R1	B2	BY	R2
Mean altitude (m)	539	764	783	687	399	456
Sinuosity	<b>1.36</b>	<b>1.96</b>	<b>1.17</b>	<b>1.19</b>	<b>1.51</b>	<b>1.34 (1.23<sup>a</sup>)</b>
Valley floor slope (%)	4.78	0.99	2.26	3.02	1.35	1.39 (1.94 <sup>a</sup> )
Stream order (Strahler)	5	5	4	5	4	5
<b>Group of river characteristics (GRC)</b>	<b>(GRC_E) mid-altitude steep slope channel with high sinuosity</b>	<b>(GRC_B) high-altitude channel with high sinuosity</b>	<b>(GRC_A) channel with naturally low sinuosity</b>		<b>(GRC_C) low-altitude and mid-altitude channel with high sinuosity</b>	
Channel pattern	Sinuuous/braided	Meandering	Straight	Straight/braided	Meandering	Straight/sinuuous
Bankfull width (m)	<b>12.07</b>	<b>9.95</b>	<b>9.72</b>	<b>20.70</b>	<b>15.76</b>	<b>11.70</b>
Bankfull area (m <sup>2</sup> )	3.83	6.31	4.77	11.19	13.26	6.95
Mean depth (m)	0.33	0.56	0.48	0.61	0.98	0.59
Width–depth ratio	<b>39.9</b>	16.5	20.1	<b>46.3</b>	19.6	20.3
Specific stream power (W.m <sup>-2</sup> )	206.3	292.9	982.6	1507.4	1172.2	1381.5
Channel slope (%)	<b>0.98</b>	<b>0.61</b>	<b>1.91</b>	<b>1.98</b>	<b>1.04</b>	<b>1.91</b>
Entrenchment ratio	<b>2.65</b>	<b>14.44</b>	<b>2.54</b>	<b>1.78</b>	<b>7.78</b>	<b>3.43</b>
Valley type	U-shaped	Wide floodplain	U-shaped	V-shaped	U-shaped (asymmetric)	U-shaped (asymmetric)
d <sub>50</sub> (Pebble count)	Small cobble	Very coarse gravel	Medium cobble	Large cobble	Small cobble	Large cobble
Riverbed form (occurrence in %):						
Pools	5	28	8	8	9	5
Riffles	27	16	8	2	35	5
Islands	3		10	6	6	
Bars	50	23	12	9	24	10
Cascades and steps			5	10		
Rapids	15	8	<b>32</b>	<b>58</b>	17	<b>75</b>

<sup>a</sup> Value measured at reference site R2 that is different from the value for the whole reach.

of natural channel behavior for reaches in groups **GRC\_F** and **GRC\_G** is impossible. The natural channel behavior for reaches in groups **GRC\_F** and **GRC\_G** is necessary to consider separately, for example it might need to be derived from the nearest unmodified group of river characteristics. When **GRC\_F** and **GRC\_G** are excluded from the assessed data, the correlations between all studied parameters become stronger, most significantly for the dependence between sinuosity and channel slope and between sinuosity and stream order. Lower channel slopes and higher stream orders along with higher sinuosity correspond to

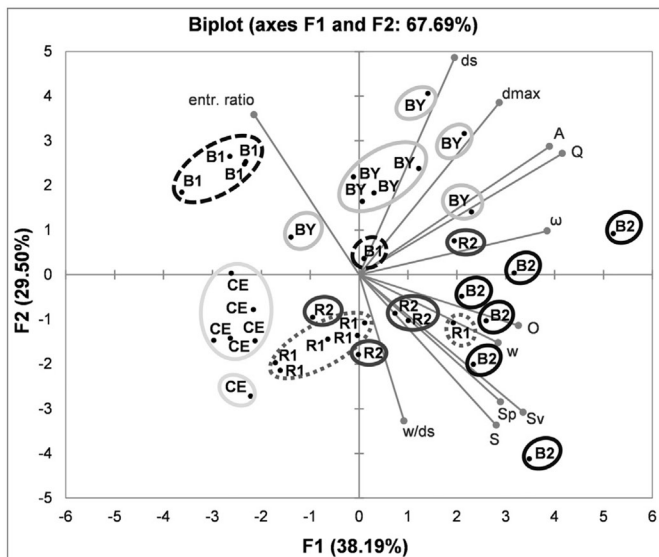
natural channel behavior and confirm that the excluded reaches have been anthropogenically modified.

#### 4.3. Validating GRCs and establishing significant parameters at the micro-scale level

##### 4.3.1. Assessing the correlations between river characteristics of reference sites

Other correlations of natural channel were studied on the basis of detailed field research. The Spearman's correlations between river characteristics determined on the basis of surveying 36 cross-sectional profiles at reference sites are summarized in Table 6. Spearman's coefficient was chosen because it is resistant to outlying values. Conducting Spearman and Pearson correlations determined a positive correlation between mean depth and bankfull discharge as well as specific stream power. Specific stream power is positively correlated to bankfull discharge (Fig. 6A) and slope (particularly valley floor slope). Bankfull area is more closely correlated to maximum depth (Fig. 6B) than bankfull width. Entrenchment ratio is negatively correlated to valley floor slope, channel slope, and also to width–depth ratio. The distance from source is correlated to specific stream power and bankfull discharge. Surprisingly, it poorly correlates to bankfull area. A correlation between channel width and bankfull area and bankfull discharge is only slightly strong.

Based on the results of the correlation analysis, linear regression analysis was applied to identify statistically significant relations between particular river characteristics. The expected dependence of specific stream power on bankfull discharge and the dependence of bankfull area on maximum depth are depicted in Fig. 6A, B. Bankfull discharge was found as an explanatory variable for mean depth, maximum depth, and bankfull area (Fig. 7A, B). Interesting, however, is that neither bankfull width nor width–depth ratio nor channel slope were determined to be explanatory variables. Vianello and D'Agostino (2007) also noted that there is no direct correlation between channel width and slope. Similarly, Johnson and Padmanabhan (2010) stated that channel slope was not a significant explanatory variable in regression analyses



**Fig. 8.** Positions of analyzed river characteristics at reference sites along the two first components of PCA and positions of particular cross-sectional profiles on the first factorial map of the PCA. Input variables: entr. ratio—entrenchment ratio, w—bankfull width, dmax—maximum depth, A—bankfull area, O—wet perimeter, ds—mean depth, w/ds—width–depth ratio, Qbf—bankfull discharge, Ω—specific stream power, S—channel slope, Sv—valley floor slope, Sp—mean slope.



of the main basin characteristics and found it interesting that bankfull width was not an explanatory variable in regression analyses of channel characteristics.

Field measurements at reference sites did not confirm unambiguously an increase in bankfull width, and therefore, bankfull area did not increase with distance from the source (Leopold and Maddock, 1953; Leopold et al., 1964). According to the measurements, depth increases downstream significantly more than bankfull width, which instead indicates substantial variability. In the case of a relation between depth and distance from the source, reference site **BY** stands out with its higher incision because of less resistant flysch bedrock and river management upstream resulting in lack of sediment supply. In comparison, the other Carpathian reference site **CE** has sufficient sediment supply upstream and even from bank erosion, therefore **CE** channel is considerably shallower. Other exceptions represent reference sites **R2** and **B2** with very resistant bedrock that are less incised than other researched reference sites. In the case of bankfull width, a negligible increase downstream is obvious for sinuous and meandering channels contrary to a straight channel pattern with lack of space for widening or development of the floodplain (reference sites **R1** and **R2**). It may be the result of the low number of assessed cross-sectional profiles ( $n = 36$ ) or differences in degree of channel incision or floodplain development. In contrast, Galia and Hradecký (2014) confirmed for headwater streams in the Outer Western Carpathians that as a general rule bankfull width increases and channel slope decreases as the basin area increases; mean bankfull depth, however, does not correlate with basin area, neither generally nor in terms of individual morphological conditions.

#### 4.3.2. Validating GRCs at reference sites using surveyed hydromorphological characteristics

Using macroscale data, that is, cartographic data, allowed us to establish GRCs for the broadly defined study area. Similarly, assessing criteria for defining potential reference sites on the basis of cartographic data from the entire study area substantially narrowed the scope of field research needed to verify reference sites. The subsequent necessary step was to validate the established GRCs using hydromorphological characteristics established and surveyed during field research. Whereas macroscale generalization allowed us to determine the variability of conditions within the wider study area, microscale research allowed us to better understand natural channel behavior on the basis of hydromorphological characteristics of unmodified channels.

When comparing the results acquired in the physiographic conditions of the Czech Republic with results discussed in the literature, it is necessary to keep in mind the physiographic differences in the set of studied channels. Source data sets in each study differ not only in lithology, climate, geomorphology, and land cover — all of which substantially affect river system characteristics — but also in the specific local conditions of concrete reaches being compared.

For validating GRCs, typical examples of channels meeting reference site criteria were selected. Table 7 lists the combination of values of selected morphological parameters — altitude, sinuosity, and valley floor slope — and GRCs to which each reference site belongs as presented in Table 5 and Fig. 5. The other values given in Table 7 represent the average values of selected parameters measured in the field for each cross-sectional profile.

The studied reference sites **R1** and **B2** are the only ones that share the same group of river characteristics, **GRC\_A** (channels with naturally low sinuosity). Both have low entrenchment ratio values and thus indicate a low stage of floodplain development and steep channel slope. Rapids are the dominant riverbed form, although cascades and riffles are also represented and island formation does occur. Within **GRC\_C**, **BY** and **R2** differ in sinuosity, which is documented by different channel slopes, different entrenchment ratios, and a substantial percentage of rapids in the riverbed of **R2**. The reference site **R2** (characteristics given in Table 7) is part of a relatively long reach. Therefore, in the

assessment of reference site characteristics, some values from reference site **R2** approach those of **R1** and **B2**. The straight channel pattern of **B2** demonstrates some elements of braiding: a shallow, wide channel; steep channel slope; low sinuosity; high specific stream power; and greater sediment size. The sinuous channel pattern of **CE** also partially demonstrates elements of braiding when compared to the meandering channel pattern of **B1**. The negative correlation between entrenchment ratio and width–depth ratio also demonstrates the mentioned characteristics of braided channels. Nonetheless, a clear relationship between braided channels and sediment size does not appear. Simon and Downs (1995) confirmed a substantial increase in width–depth ratio as well as channel slope in braided channels. Fredsøe (1978) found that stream channels with width–depth ratios  $> 60$  are always braided. Rinaldi (2003) also confirmed that sinuous channels with alternate bars along with braided channels have increased slopes, width–depth ratios, and sediment size and have greater sinuosity during low discharge in comparison to sinuous and meandering channels. Even with steep valley floor slope, the channel slope of **CE** due to its high sinuosity allows for the existence of many accumulation forms in the channel but with a floodplain at a low stage of development. Despite **B1**'s high-altitude location, its low channel slope, well-developed floodplain, finer sediment, and lower width–depth ratio confirm it as a meandering channel with riffle-pool sequences and large amounts of accumulation. These same meandering-channel characteristics are also displayed by **BY** with its lower sinuosity. These results correspond with Schumm's (1977) findings that narrow, deep channels with low width–depth ratios are relatively sinuous, whereas wide, shallow channels are often relatively straight. In contrast, Simon and Downs's (1995) finding that mountainous streams with steep slopes are characterized by deep, narrow channels was not confirmed.

Specific stream power at the reference sites (Table 7) displays high variability with lower values for the meandering and sinuous channels of **B1** and **CE**. On the other hand, the straight channels of **R1**, **B2**, and **R2** with steeper slopes and coarser sediment grades display higher specific stream power values. The meandering channel of **BY** is, however, characterized by greater depth, bankfull area, and bankfull discharge and thus high specific stream power as well. Similarly, Rinaldi (2003) described a general increase in specific stream power with increasing slope, whereas meandering channels indicate lower specific stream power values ( $< 250 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Vianello and D'Agostino (2007) also stated that high channel slope determines the high potential energy connected to the transport of finer particles, whereas coarser sediment stays in place (it creates, for example, step-pools or cascades), limits channel deepening, and supports bank erosion and increasing bankfull widths. The results also correspond with Harnischmacher's (2007) description of decreasing sinuosity with increasing stream power for groups of rivers with valley floor slopes between 1 and 2%, although the observed floodplains offer enough space for the development of meanders and bends; decreasing sinuosity for rivers in V-shaped valleys with valley floor slope  $> 2\%$  is obvious, too. Rinaldi (2003) confirmed that specific stream power is highly variable; Vianello and D'Agostino (2007) further specified that the variability of specific stream power increases with increasing basin area and confirmed its positive correlation with sediment size. Vianello and D'Agostino (2007) explained the locally high channel slope of steep alpine streams by the increase of bed roughness, which in the present study is clearly confirmed by **R2**, **B2**, and **R1**. Galia and Hradecký (2014) confirmed greater roughness of bed sediment with increasing basin area but only on individual steeper reaches (bedrock-cascades, cascades, step-pools, and step-rapids).

For validating channel behavior of each GRC with the help of selected characteristics determined through field research and measurements at reference sites in the physiographic environment of the Czech Republic, the following channel behavior characteristics are significant: channel slope, entrenchment ratio, bed structure,  $d_{50}$ , and many other qualitatively determined characteristics (valley type, flow characteristics, characteristics of bank and riparian vegetation, channel

roughness, etc.). In contrast, some of the quantitatively established characteristics were not sufficiently explanatory, which may be caused by the low number of profiles ( $n = 36$ ) in the assessed sample. Channel width and bankfull area, in particular, vary considerably and display no relation to any GRC.

Of GRCs A–G given in Table 5 and Fig. 5, GRCs A–E are considered to be probably unmodified. The studied reference sites are typical examples of natural channel reaches for GRC\_A, GRC\_B, GRC\_C, and GRC\_E. The only probably unmodified GRC that is not represented by a reference site is GRC\_D, which, however, makes up only 0.76% of the total number of assessed reaches. Other GRCs were tested by detailed field research and by surveying several characteristics of natural reaches that confirmed the fundamental differences between GRCs but also indicated some variability of hydromorphological characteristics of cross-sectional profiles within reference sites and overlapping of characteristics between the reference sites. The fundamental differences are documented by separate clusters of cross-sectional profiles for Carpathian reference sites CE and BY, and for Bohemian reference site B1 (Fig. 8). On the contrary, cross-sectional profiles of reference site R2 overlap with cross-sectional profiles of R1 and B2. Here, R2, thanks to its substantial channel slope at the reference site, appears to be more similar to R1 and B2 than to BY. The reference site B2 indicates considerable variability of cross-sectional profiles thus further specification by qualitative characteristics is appropriate (V-shaped valley type, straight channel pattern with elements of braiding, wide shallow but confined channel that uses all available space). Bohemian reference sites R1, B2, and R2 because of their straight channel pattern, low stage of floodplain development, steep channel slope, and higher specific stream power have higher variability of characteristics and higher potential for channel development.

## 5. Conclusions

The objective assessment of natural channel behavior in the cultural landscape of central Europe is primarily based on determining fluvial-morphological reference conditions. Establishing reference conditions in the broadly defined study area enables the classification of stream channels into groups.

The results of analyses demonstrated the significance of channels at higher altitudes and with higher slopes for identifying natural channel behavior. Altitude, valley floor slope, sinuosity, and Strahler number were confirmed to be significant parameters for identifying natural channel behavior.

Classifying stream channels into groups (GRCs) based on a combination of these parameters confirmed a significant difference between channel behavior in the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians in the territory of the Czech Republic. Classification identified a specific group of streams located in the flattened, high-altitude areas of mountains in the Bohemian Massif, which do not occur in the completely geomorphologically different system of the Western Carpathians.

The study confirmed the usefulness of combining macroscale methods – large-scale analyses of maps to determine the variability of conditions in the broader study area and to reduce the necessity of conducting field research – with microscale methods for the closer identification of natural channel behavior based on hydromorphological characteristics of unmodified channels.

Validating GRCs using field data from natural reaches confirmed the distinctions between GRCs and the uniqueness of each one; it also emphasized the benefits of using qualitative data to establish channel and riparian zone characteristics for describing channel behavior. Channel slope, entrenchment ratio, bed structure, and  $d_{50}$  were determined to be significant quantitative characteristics of natural channel behavior.

The presented classification of channels in the study area into groups based on the variability of their hydromorphological characteristics and the establishment of significant hydromorphological characteristics of

natural channel behavior through field research are essential prerequisites for establishing concrete hydromorphological reference conditions for each channel group in the study area. Reference conditions will also further serve as benchmarks for assessing the current morphological status of streams as well as models for restoration measures or as target statuses for improving ecological status in accordance with the Water Framework Directive (2000/60/ES). Understanding the natural behavior of channels also facilitates the forecasting of changes related to the development of fluvial systems, especially as concerns their instabilities and risks.

## Acknowledgments

This research was realized under the framework of projects SVV 263 202 “Dynamics of Earth’s physical and geographical spheres and their interactions” of Department of Physical Geography and Geoecology, Charles University in Prague, GAČR P210/13/32133S “Headwaters retention potential with respect to hydrological extremes” and PRVOUK P43 Geography. The authors wish to express their thanks to anonymous reviewers and to the editor Richard A. Marston for very constructive comments which greatly improved the manuscript.

## References

- Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Oxford.
- Brookes, A., 1988. *Channelized Rivers*. John Wiley, Chichester.
- Brookes, A., 1997. River dynamics and channel maintenance. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 293–308.
- Church, M., 1992. Channel morphology and typology. In: Calow, P., Petts, G. (Eds.), *The River Handbook: Hydrological and Ecological Principles*. Blackwell, Oxford, pp. 126–143.
- Downs, P.W., 1995. Estimating the probability of river channel adjustment. *Earth Surf. Process. Landf.* 20, 687–705.
- Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Res. Appl.* 25, 568–581.
- Environment Agency, 2003. *River Habitat Survey in Britain and Ireland. Field Survey Guidance Manual: 2003*. Bristol.
- Fredsoe, J., 1978. Meandering and braiding of rivers. *J. Fluid Mech.* 84 (4), 609–624.
- Frissell, C.A., Liss, W.J., Warren, C.E., Hurley, M.D., 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environ. Manag.* 10, 199–214.
- Galia, T., Hradecký, J., 2014. Morphological patterns of headwater streams based in flysch bedrock: examples from the Outer Western Carpathians. *Catena* 119, 174–183.
- Galia, T., Škarpich, V., Hradecký, J., 2012. Bedload sediment transport in connection with the geomorphological transition of gravel-bed streams in the Moravskoslezské Beskydy Mountains. *Geografie* 117 (1), 95–109.
- Gurnell, A.M., Bussettini, M., Camenen, B., González Del Tánago, M., Grabowski, R.C., Hendriks, D., Henshaw, A., Latapie, A., Rinaldi, M., Surian, N., 2014. A hierarchical multi-scale framework and indicators of hydromorphological processes and forms. Deliverable 2.1, Part 1, of REFORM (REstoring rivers FOR effective catchment Management), a Collaborative project (large-scale integrating project) funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656.
- Harnischmacher, S., 2007. Thresholds in small rivers? Hypotheses developed from fluvial morphological research in Western Germany. *Geomorphology* 92, 119–133.
- Hey, R.D., 1997. Stable River morphology. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 223–236.
- Hohensinner, S., Herrnegger, M., Blaschke, A.P., Haberer, C., Haidvogel, G., Hein, T., Jungwirth, M., Weiss, M., 2008. Type-specific reference conditions of fluvial landscape: a search in the past by 3D-reconstruction. *Catena* 75, 200–215.
- Johnson, B.H., Padmanabhan, G., 2010. Regression estimates of design flows for ungaged sites using bankfull geometry and flashiness. *Catena* 81, 117–125.
- Kondolf, G.M., Montgomery, D.R., Piégay, H., Schmitt, L., 2003a. Geomorphic classification of rivers and streams. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 171–204.
- Kondolf, G.M., Piégay, H., Sear, D., 2003b. Integrating geomorphological tools in ecological and management studies. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 633–660.
- Langhammer, J., 2007. Úpravy toků a údolní nivý jako faktor ovlivňující průběh povodní. In: Langhammer, J. (Ed.), *Povodně a změny v krajině*. Department of Physical Geography and Geoecology, Faculty of Science, Charles University in Prague and Ministry of the Environment of the Czech Republic, Prague, pp. 271–294.
- Langhammer, J., Hartvíč, F., Mattas, D., Rödllová, S., Zbořil, A., 2012. The variability of surface water quality indicators in relation to watercourse typology, Czech Republic. *Environ. Monit. Assess.* 184, 3983–3999.



- Lehotský, M., 2004. River morphology hierarchical classification (RMHC). *Acta Universitatis Carolinae Geographica* 39 (1), 33–45.
- Leopold, L.B., Maddock, T., 1953. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Geological Survey Professional Paper 252. Washington, United States Government Printing Office.
- Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco.
- Matoušková, M., 2008. Assessment of the river habitat quality within European Water Framework Directive: application to different catchments in Czechia. *Geografie* 113 (3), 223–236.
- Matoušková, M., Šmerousová, K., 2014. Hydromorphological reference conditions of streams based on the European Water Framework Directive. In: Roose, A. (Ed.), *Progress in Water Geography-Pan-European Discourses, Methods and Practices of Spatial Water Research*. Publikationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensium 110, University of Tartu, Tartu, pp. 51–65.
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geol. Soc. Am. Bull.* 109 (5), 596–611.
- Newson, M.D., Clark, M.J., Sear, D.A., Brookes, A., 1998. The geomorphological basis for classifying rivers. *Aquatic Conservation* 8, 415–430.
- Pottgiesser, T., Sommerhäuser, M., 2008. Beschreibung und bewertung der deutschen Fließgewässertypen-Steckbriefe und Anhang. Umwelt Bundes Amt, LAWA, UBE.
- Rinaldi, M., 2003. Recent channel adjustments in alluvial rivers of Tuscany, Central Italy. *Earth Surf. Process. Landf.* 28, 587–608. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.464>.
- Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22, 169–199.
- Schmitt, L., Maire, G., Humbert, J., 2000. Typologie hydro-géomorphologique des cours d'eau: vers un modèle adapté à la gestion du milieu physique des rivières du versant sud-occidental du fossé rhénan. *Géocarrefour* 75 (4), 347–363.
- Schumm, S.A., 1977. *The Fluvial System*. John Wiley & Sons, New York.
- Schumm, S.A., 1985. Patterns of alluvial rivers. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 13, 5–27.
- Schumm, S.A., Khan, H.R., 1972. Experimental study of channel patterns. *Geol. Soc. Am. Bull.* 83, 1755–1770.
- Simon, A., Castro, J., 2003. Measurement and analysis of alluvial channel form. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 291–322.
- Simon, A., Downs, P.W., 1995. An interdisciplinary approach to evaluation of potential instability in alluvial channels. *Geomorphology* 12, 215–232.
- Šmerousová, K., Matoušková, M., 2014. Establishing hydromorphological reference sites of rivers. *River Landscape* 10. Koalice pro feky, Masarykova univerzita v Brně, Moravský zemský archiv, Brno, pp. 110–115.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union* 38 (6), 913–920.
- Thorne, C.R., 1997. Channel types and morphological classification. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 175–222.
- Vaughan, I.P., Diamond, M., Gurnell, A.M., Hall, K.A., Jenkins, A., Milner, N.J., Naylor, L.A., Sear, D.A., Woodward, G., Ormerod, S.J., 2009. Integrating ecology with hydromorphology: a priority for river science and management. *Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst.* 19 (1), 113–125. <http://dx.doi.org/10.1002/aqc.895>.
- Verdonschot, P.F.M., 2000. Integrated ecological assessment methods as a basis for sustainable catchment management. *Hydrobiologia* 422–423, 389–412.
- Vianello, A., D'Agostino, V., 2007. Bankfull width and morphological units in an alpine stream of the dolomites (Northern Italy). *Geomorphology* 83, 266–281.
- Water Framework Directive. Directive 2000/60/EC of the European parliament and of the Council of 23st October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, L, 327/1, Luxembourg.
- Williams, G.P., 1978. Bank-full discharge of rivers. *Water Resour. Res.* 14 (6), 1141–1154.
- Wimmer, R., Wintersberger, H., Parthl, G.A., 2012. Hydromorphologische Leitbilder Fließgewässertypisierung in Österreich, Bundesministerium für Land-Fortwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Wien. Band 1 Einführung, Definitionen und Parameter.
- Wohl, E., Merritt, D., 2005. Prediction of mountain stream morphology. *Water Resour. Res.* 41 (8). <http://dx.doi.org/10.1029/2004WR003779>.
- Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions, American Geophysical Union* 35 (6), 951–956.
- Wolman, M.G., Leopold, B.L., 1957. *River Flood Plains: some observations On their formation*. Geological Survey Professional Paper 282-C. Washington, United States Government Printing Office.
- Wyźga, B., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., Hajdukiewicz, H., 2012. Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. *Earth Surf. Process. Landf.* 37, 1213–1226.

## **7.4 TYPY VODNÍCH TOKŮ NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY Z POHLEDU HYDROMORFOLOGIE**

Kujanová, K., Matoušková, M., 2017. Typy vodních toků na území České republiky z pohledu hydromorfologie. Vodní hospodářství 67/12, 2–6.

# Typy vodních toků na území České republiky z pohledu hydromorfologie

Kateřina Kujanová, Milada Matoušková

## Abstrakt

Hydromorfologické referenční podmínky reprezentují přirozené chování vodních toků, které vykazují značnou variabilitu. Na základě statistických analýz nad daty za 4424 úseků vodních útvarů v kategorii „řeka“ byly jako signifikantní pro identifikaci přirozeného chování vodních toků potvrzeny parametry nadmořská výška, sklon údolí, sinuosita a řád toku. Dále byla zohledněna litologie území. Kombinací vybraných parametrů vzniklo 27 teoretických typů úseků vodních toků, které byly následně ověřeny terénním průzkumem a měřeními v lokalitách rovnoměrně rozložených po celém území České republiky. Ověřením a zpřesněním bylo stanoveno 9 neovlivněných typů vodních toků a 2 typy pravděpodobně nebo potenciálně upravené, pro které byl odvozen nejbližší neupravený typ. Představená klasifikace vodních toků do typů je základem pro stanovení typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek vodních toků na území České republiky, které by měly dále sloužit k hodnocení aktuálního stavu vodních toků z pohledu morfologie a zároveň jako předloha revitalizačních opatření.

## Klíčová slova

typy vodních toků – hydromorfologie – referenční podmínky – nadmořská výška – sklon údolí – sinuosita – řád toku – litologie

## 1. Úvod

Přirozenému chování vodních toků a vývoji říční krajiny se společnost snaží porozumět již po staletí. V posledních desetiletích je pozornost soustředěna zejména na možnosti předvídat chování vodních toků a eliminovat rizika s tím spojená. Zavedením Rámcové směrnice o vodách (RSV) [1] zesílil zájem o hodnocení aktuálního ekologického stavu vodních toků jako nástroje porovnávacího přirozené chování vodních toků s aktuálním stavem.

Nezbytným předpokladem hodnocení aktuálního ekologického stavu vodních toků je proto stanovení typově specifických referenčních podmínek, které slouží jako srovnávací prvek a představují cílový stav revitalizačních opatření. Podle evropského standardu EN 14614 [2] by referenční podmínky měly být určeny pro každý typ vodního toku tak, aby odrážely nenarušené podmínky toku. Referenční podmínky je však třeba chápat v podmínkách vývoje kulturní krajiny [3, 4]. Obnovit nedotčené nebo historické podmínky v prostředí střední Evropy není často reálné a vzhledem k vývoji ani žádoucí. Pro stanovení referenčních podmínek je proto třeba vycházet ze současných podmínek prostředí (geologických a klimatických podmínek, vegetačního pokryvu, antropogenních úprav říční sítě a požadavků společnosti), ve kterých se fluvialní systém vyvíjí [5, 6, 7].

Chování vodního toku, resp. jeho dynamická rovnováha, jsou předurčeny podmínkami proudění (zejména průtokem a sklonem údolí) a režimem sedimentů, dále je pro chování vodního toku určující materiál břehů a dna a vegetace břehů a příbřežní zóny [8, 9, 10]. Překročením prahových hodnot těchto podmínek se fluvialní systém mění a přizpůsobuje se svými morfologickými charakteristikami (např. šířka a hloubka koryta, erozní a akumulační tvary dna, sklon dna, rychlost proudění, sinuosita, průtok, množství a velikost sedimentu) novým podmínkám [6, 10, 11].

Pro porozumění fluvialně-morfologickým procesům a vývoji říční krajiny je účelné třídit vodní toky do skupin na základě společných

charakteristik. Klasifikace třídí vodní toky do skupin podle různých účelů a významnosti jednotlivých charakteristik: trasy koryta [12, 13], převládajících korytotvorných procesů [14], existující morfologie koryta [9], vývoje koryta a trendů změn [15, 16], pro účely managementu vodních toků [9, 17, 18] nebo z hlediska vhodnosti pro revitalizaci [6]. Klasifikace by však zejména měla sloužit jako flexibilní nástroj pro stanovení existujících podmínek a umožnit předvídat změny spojené s přirozeným chováním fluvialního systému.

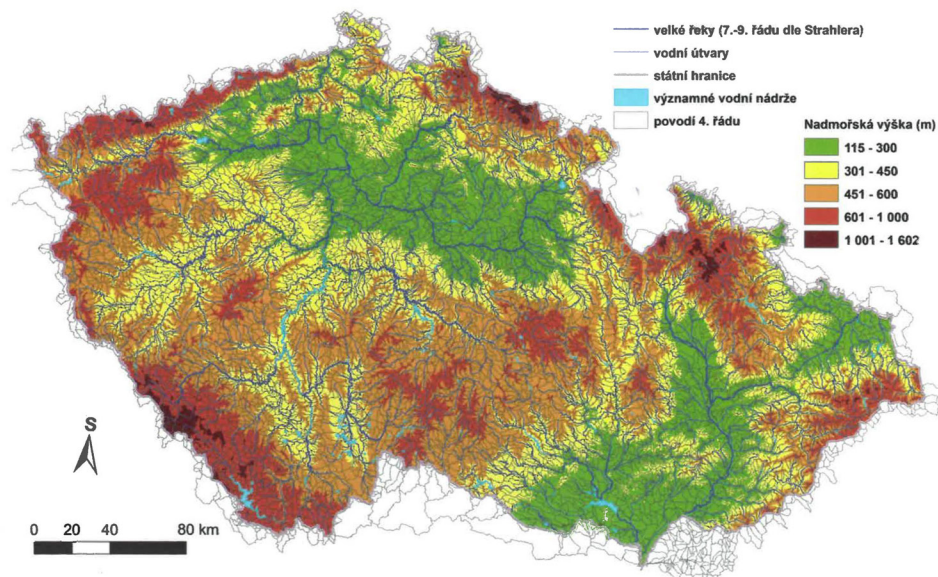
Klasifikace vodních toků jsou zpravidla založeny na sběru velkého množství dat a jejich posouzení pomocí statistických metod. Každá klasifikace tak znamená zjednodušení reality do podoby kvantifikovatelných charakteristik, zároveň je však třeba individuálně posoudit specifické lokální podmínky [3, 9].

Cílem studie bylo nalézt signifikantní parametry chování vodních toků v České republice, zařadit vodní toky na území České republiky do skupin a na základě ověření terénním průzkumem stanovit typy vodních toků na území České republiky z pohledu hydromorfologie.

## 2. Zájmové území, aplikované metody a vstupní data

Zájmovým územím je území České republiky, které představuje pramennou oblast 3 významných říčních systémů: Labe, Odry a Moravy. Větší část území tvoří Česká vysočina, která je součástí systému Hercynských pohoří západní a střední Evropy. Charakteristické pro ni jsou rozsáhlé zarovnané povrchy vyvinuté převážně na vyvřelých a metamorfovaných horninách předprvohorního a prvohorního stáří. Do východní části zasahují okrajově vývojově mladší Západní Karpaty tvořené převážně flyšem, s výrazně členitějším a sklonitějším reliéfem. Odlišnost obou geomorfologických jednotek vytváří rozdílné přírodní podmínky pro vývoj a morfologické charakteristiky koryt vodních toků (obr. 1).

S ohledem na důvody uvedené níže byly analýzy pro nalezení signifikantních parametrů i typy vodních toků zpracovány pouze pro významné vodní toky označené jako vodní útvary v kategorii „řeka“, které jsou znázorněny na obr. 1. Tyto vodní toky byly rozděleny pomocí rozvodnic povodí 4. řádu dle [19] vymezených Českým hydrometeorologickým ústavem k roku 2013 pro účely hydrologického monitoringu a předpovědi na úseky heterogenní délky (obr. 1). Toto dělení na úseky, respektující změny fyzicko-geografických podmínek včetně zaústění přítoků, se již předchozími analýzami ukázalo v rámci zájmového území vhodné pro stanovení jednotlivých parametrů. Každému z 4424 vymezených úseků vodních toků byla přiřazena informace o maximální a minimální nadmořské výšce úseku z digitálního modelu terénu (DMT), dále byla z GIS podkladů určena délka úseku, délka údolí a přiřazen řád toku v závěrovém profilu úseku. Ze zjištěných dat byl pro každý úsek dopočítán sklon koryta (rozdíl maximální a minimální nadmořské výšky ku délce úseku toku), sklon údolí (rozdíl maximální a minimální nadmořské výšky ku délce údolí), sinuosita (poměr délky úseku ku délce údolí) a nadmořská výška úseku (průměrná hodnota maximální a minimální nadmořské výšky úseku).



Obr. 1. Topologie zájmového území: digitální model terénu, síť vodních útvarů v kategorii řeka a vymezení úseků vodních toků v podobě povodí 4. řádu dle Strahlera



Pro jednotlivé úseky byly doplněny charakteristiky hydrologického režimu za období 2003–2012: měsíc s nejvyšším průměrným průtokem a rozkolísanost průtoků (stanovená jako podíl průměrného měsíčního průtoku měsíce s nejvyšším a nejnižším průměrným měsíčním průtokem). Za účelem vyloučení úseků s antropogenním ovlivněním byly z celkové skupiny úseků vodních toků vybrány pouze úseky toků splňující kritérium 3.–6. řádu toku v závěrovém profilu úseku, tzn. vyřazeny byly úseky velkých nížinných antropogenně ovlivněných řek (7.–9. řádu) – obr. 1, z důvodu vysoké variability parametrů byly vyloučeny pramenné úseky (1. a 2. řádu) a úseky zatopené významnými vodními nádržemi a upravené úseky se sinuositou 1,0. Do dalších analýz tak vstupovalo 3197 úseků vodních toků.

Za účelem redukce počtu původních proměnných a výběru vzájemně nezávislých parametrů vystihujících chování vodních toků byla aplikována analýza hlavních komponent (PCA), typ Pearson. Do PCA analýzy vstupovalo 7 proměnných vyjádřených pro každý z 3197 úseků vodních toků: řád toku, sinuosita, nadmořská výška úseku, sklon údolí, sklon koryta, rozkolísanost průtoků a měsíc s nejvyšším průměrným průtokem. Pro ověření vzájemných vazeb mezi parametry byla použita metoda *aglomerativního hierarchického shlukování* (AHC), jako kritérium vzdálenosti byl použit Pearsonův korelační koeficient, jako aglomerační metoda použita Simple linkage. Vstupními hodnotami pro AHC byly oproti PCA navíc maximální a minimální nadmořská výška a rozdíl maximální a minimální nadmořské výšky úseku.

Pro výsledné parametry nadmořská výška, sklon údolí a sinuosita byly na základě histogramů stanoveny prahové hodnoty kategorií (tab. 1). Reliéf pahorkatin tvoří značnou část zájmového území (obr. 1), proto byla jako prahová hodnota určena horní hranice pahorkatin 600 m n.m. a horní hranice nížin byla stanovena 300 m n.m.

Dále byly v rámci studie statisticky odvozovány morfologické zákonitosti vodních toků pomocí korelací a regresí. Na základě výsledků PCA, AHC, korelací a regresí byly vytvořeny teoretické typy úseků vodních toků, jejichž platnost byla následně ověřena terénním průzkumem [20].

Pro účely zpracování studie byl využit DEM s rozlišením 10x10 m ze základní databáze geografických dat ČR (ZABAGED), data o průtocích z hydrologické databáze ČHMÚ za období 2003–2012, vodní útvary povrchových vod v kategorii řeka k roku 2013. Mapové výstupy a prostorové analýzy byly zpracovány v ArcGIS 10.0 a statistické analýzy v programu XLStat.

### 3. Stanovení signifikantních parametrů pomocí statistických analýz

Podle výsledků AHC analýzy (obr. 2) jsou parametry rozkolísanost průtoků, řád toku, sinuosita i měsíc s nejvyšším průměrným průtokem relativně nezávislé. V rámci výběru parametrů byl zohledňován jejich význam pro identifikaci přirozeného chování vodních toků. Vybrané parametry by dále měly reprezentovat příčný a podélný profil i trasu toku. Sklon údolí na rozdíl od sklonu koryta není ovlivněn zkrácením ani jinými úpravami říční sítě. Parametr nadmořská výška zohledňuje do značné míry „přirozené“ charakteristiky klimatu (srážky a teploty) a částečně tedy i odtokového režimu. Naopak parametry rozkolísanost průtoků a měsíc s nejvyšším průměrným průtokem jsou do určité míry ovlivněny přítomností vodních nádrží a navíc s ohledem na počet sledovaných profilů vysvětlují variabilitu souboru méně než parametr nadmořská výška. Kombinace parametrů sklon údolí a nadmořská výška v rámci zájmového území vykazuje značnou variabilitu (obr. 3). Sinuosita reprezentuje trasu toku i podélný profil a v rámci zájmového území ji lze využít k identifikaci upravených úseků vodních toků. Řád toku je úpravami neovlivněný parametr vyjadřující velikost toku. Dílčí výstupy statistických analýz, které vedly ke stanovení signifikantních parametrů, jsou rozpracovány ve studii [20].

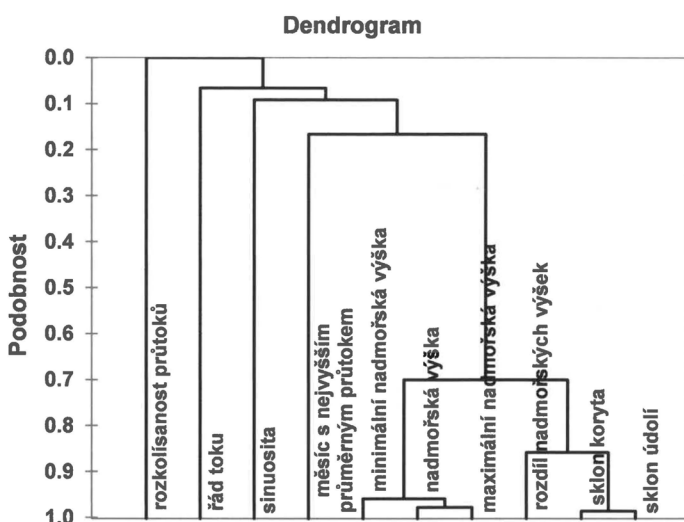
Na základě výsledků PCA, AHC, korelace a regrese byly jako signifikantní parametry přirozeného chování vodních toků ve fyzicko-geografických podmínkách České republiky určeny nadmořská výška, sklon údolí, sinuosita a řád toku.

### 4. Typy chování vodních toků

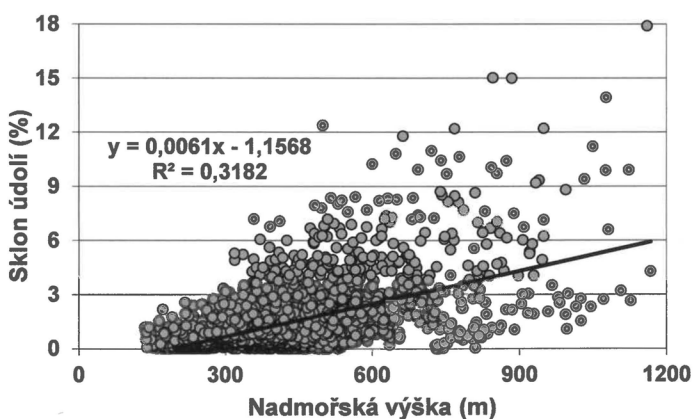
Kombinací kategorií 3 vybraných parametrů: nadmořská výška – sinuosita – sklon údolí, které jsou zřejmé z tab. 1, vzniklo 27 teoretických typů úseků vodních toků. Teoretické typy byly přiřazeny všem úsekům vodních toků vyjma úseků toků zatopených významnými vodními nádržemi. Reálně bylo na vodních tocích identifikováno 26 z 27 teoretických typů.

Tab. 1. Prahové hodnoty kategorií pro vybrané parametry nadmořská výška, sinuosita a sklon údolí a jejich označení používané při popisu typů (upraveno z [20])

Parametr	Kategorie	Označení kategorie
Nadmořská výška	méně než 300 m	1
	300 m–599 m	2
	600 m a více	3
Sinuosita	1,00–1,19	1
	1,20–1,49	2
	1,50–3,50	3
Sklon údolí	méně než 0,5 %	1
	0,50 %–1,79 %	2
	1,80 % a více	3



Obr. 2. Ověření vzájemných vazeb mezi proměnnými pomocí metody aglomerativního hierarchického shlukování (upraveno z [20])



Obr. 3. Vztah sklonu údolí a nadmořské výšky vyjádřený pro 3197 úseků vodních toků (upraveno z [20])

Jako další zásadní parametry chování vodních toků v České republice byly zohledněny litologie (příslušnost úseku ke geomorfologické jednotce Česká vysočina nebo Západní Karpaty) a velikost toku, resp. řád toku podle Strahlera.

Teoretické typy byly dále sloučeny v rámci parametru sinuosita, který je velmi významný pro odlišení přirozené a upravené trasy toku, ale zároveň vykazuje vysokou variabilitu v souvislosti s délkou a vymezením posuzovaného úseku. Počet teoretických typů úseků se tím snížil na 17 (tab. 2, sloupec 2). Teoreticky určené typy úseků vodních toků byly následně ověřeny terénním průzkumem ve 44 lokalitách a měřeními vybraných charakteristik v 16 referenčních lokalitách rovnoměrně rozložených po celém území České republiky (obr. 4) tak, aby byla co nejlépe vystižena variabilita fyzicko-geografických podmínek a ověřeny všechny teoretické typy.

Sinuosita byla v rámci studie posuzována vždy společně se sklonem údolí. Při kombinaci podmínek sklonu do 0,5 % a sinuosity do 1,2 byl úsek toku považován za *pravděpodobně upravený*, v případě sklonu 0,5–1,79 % a sinuosity do 1,2 byl tok považován za *potenciálně upravený*. Tento předpoklad byl následně potvrzen terénním průzkumem.

Ověřením a zpřesněním bylo stanoveno 9 neovlivněných typů vodních toků a 2 typy pravděpodobně nebo potenciálně upravené (tab. 2). V tab. 2 je dále uvedeno porovnání podílu zastoupení typů vodních toků v rámci území celé České republiky a v rámci jednotlivých geomorfologických jednotek Česká vysočina a Západní Karpaty. V posledním sloupci tabulky je uvedeno zastoupení typů vodních toků pro velké řeky (7.–9. řádu podle Strahlera). Rozložení typů vodních toků na území České republiky včetně zohlednění litologie a řádu toku je znázorněno na obr. 5.

Nejčastěji zastoupený neupravený typ na území celé České republiky je typ C4 (sinuosní až meandrující vodní toky ve střední nadmořské výšce se sklonem údolí 0,5–1,8 %), který je podstatně méně zastoupen v geomorfologické jednotce Západní Karpaty než v České vysočině (tab. 2, obr. 5). Další z četně zastoupených neupravených typů – C2 (sinuosní až meandrující vodní toky ve střední nadmořské výšce se sklonem údolí do 0,5 %) se vyskytuje téměř výhradně na území České vysočiny.

Na území Západních Karpat je lokalizováno cca 15,5 % z celkové délky posuzovaných úseků vodních toků. V Západních Karpatech je z neupravených typů nejčastěji zastoupen typ C1 (nížinné sinuosní až meandrující vodní toky se sklonem údolí do 0,5 %), který je reprezentován zejména velkými nížinnými řekami a je významně zastoupen na celém území České republiky, a dále typ A1, který reprezentuje pramenné úseky ve střední a vyšší nadmořské výšce (obr. 5). Typ A2, který reprezentuje pramenné úseky v nejvyšších horských oblastech, je výrazně častěji zastoupen v České vysočině.

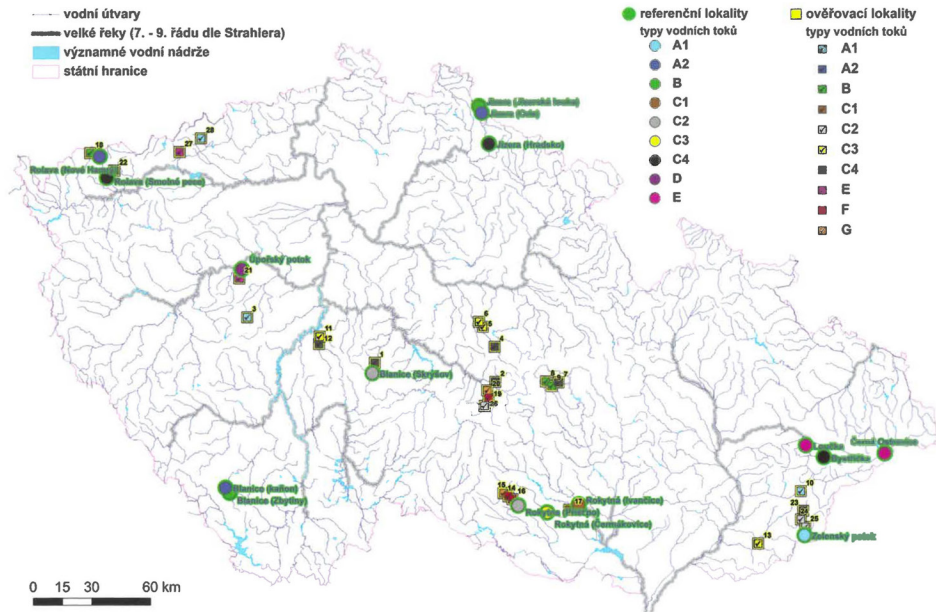
V Západních Karpatech je výrazně vyšší zastoupení pravděpodobně upravených koryt vodních toků (typ F) i vyšší zastoupení potenciálně upravených koryt (typ G) v porovnání s Českou vysočinou.

Naopak velmi specifický typ B se v Západních Karpatech nevyskytuje vůbec. Typ B reprezentuje úseky vodních toků vyskytující se na zarovnaných vrcholových partiích českých hor (Krušné hory, Šumava, Novohradské hory, Slavkovský les, Českomoravská vrchovina).

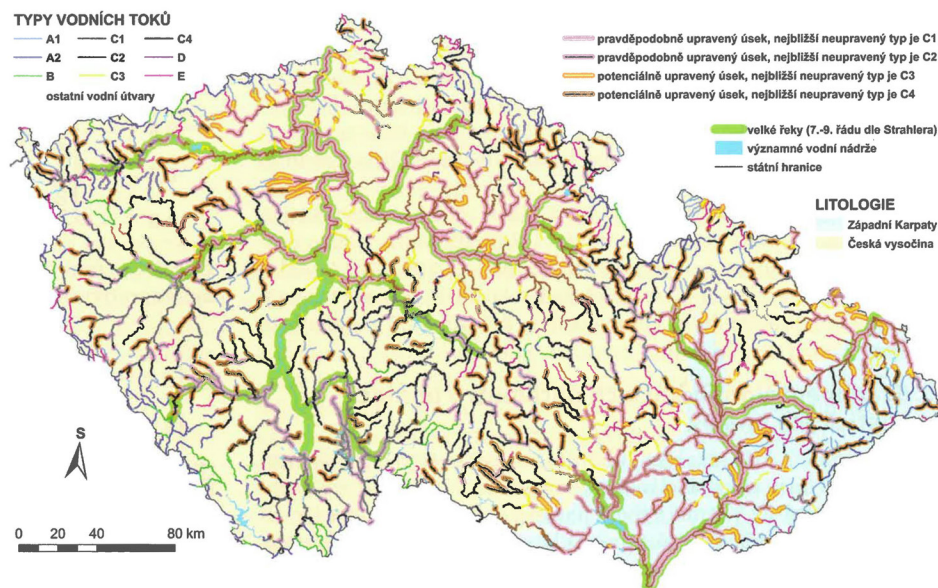
Vzhledem k poloze zájmového území na hlavním evropském rozvodí tvoří významný podíl v obou geomorfologických jednotkách sinuosní a meandrující pramenné úseky řek a jejich menší přítoky ve střední nadmořské výšce, avšak se značným sklonem údolí – typ E.

Velké řeky jsou dle očekávání reprezentovány typem C1 a typem C2 (sinuosní až meandrující úseky vodních toků v nízkých až středních namořských výškách se sklonem údolí do 0,5 %) a pravděpodobně upravenými úseky vodních toků (typ F).

V případě pravděpodobně a potenciálně upravených úseků vodních toků (typ F a G) je nemožné objektivně posoudit charakteristiky přirozeného chování vodních toků. Referenční podmínky by však měly být stanoveny pro všechny typy vodních toků, tedy velké nížinné řeky nevýjímaje. Úseky vodních toků typu F a G byly proto posuzovány samostatně s využitím principu odvození nejbližšího neupraveného typu. Nadmořská výška a sklon údolí, tzn. 2 ze 3 významných parametrů, nejsou ovlivněny úpravami koryt vodních toků. Naopak parametr sinuosita je úpravami koryt silně ovlivněn. Nejbližší neupravený typ byl proto odvozen jako typ stejné kategorie nadmořské



Obr. 4. Rozložení lokalit ověřených terénním průzkumem a měřeními na území České republiky a jejich příslušnost k typům vodních toků



Obr. 5. Typy vodních toků stanovené pro úseky vodních útvarů v kategorii řeka na základě kombinace parametrů nadmořská výška, sinuosita a sklon údolí včetně zohlednění litologie, řádu toku a nejbližšího neupraveného typu

výšky a sklonu údolí. Za těchto podmínek vždy existuje pouze jeden nejbližší neupravený typ. Způsob odvození nejbližšího neupraveného typu je uveden v tab. 3. Úseky vodních toků typu F a G s odvozeným nejbližším neupraveným typem jsou na obr. 5 zvýrazněny červeným a oranžovým podbarvením.

## 5. Diskuse

Zpracování dat na úrovni makroměřítká (z mapových podkladů) sice představuje značný stupeň generalizace, ale pro postižení variability podmínek širšího zájmového území a stanovení teoretických typů úseků vodních toků pro území celé České republiky je jediné reálné. Následujícím krokem proto musí být ověření teoretických typů terénním průzkumem a měřeními v referenčních lokalitách. V této studii generalizace na úrovni makroměřítká umožnila postižení variability podmínek širšího zájmového území, úroveň mikroměřítká umožnila zpřesnění na základě jednotlivých charakteristik neupravených úseků vodních toků.

Terénní průzkum a měření potvrdily zřejmé odlišnosti mezi jednotlivými stanovenými typy vodních toků, dle očekávání se také potvrdila skutečnost, že hranice prahových hodnot posuzovaných charakteristik



typů vodních toků není vždy ostrá. Referenční podmínky je proto třeba stanovovat jako sadu charakteristik nebo podmínek daného typu. Variabilita charakteristik a tedy vnitřní variabilita typu vodního toku je do značné míry ovlivněna velikostí (řádem) vodního toku i litologií.

Náročnější se ukázalo vymezení nejčastěji zastoupených typů C1, C2, C3 a C4, reprezentujících sinuosní až meandrující úseky vodních toků v nížinách a středních nadmořských výškách se sklonem do 0,5 % nebo 0,5–1,8 %. Posuzované charakteristiky těchto úseků vodních toků nevykazují vždy ostrá rozhraní, přesto se jedná o úseky toků natolik odlišné, že byly rozděleny do 4 samostatných typů. Právě v rámci této skupiny typů se ukazuje jako zásadní a hluboce zařizlá koryta a širší vztahy území, zejména krajinný pokryv lokalit, jehož vztah k typům vodních toků bude podroben další analýze.

Na základě terénního průzkumu se jako problematická jeví značná variabilita charakteristik v rámci typu E, daná do značné míry vysokou variabilitou pramenných úseků spojenou se specifickými lokálními podmínkami, které jsou jen obtížně klasifikovatelné do typů vodních toků.

Dále bylo zjištěno, že úseky vodních toků tvořených hluboce zařizlými koryty, pracovními nazývanými jako „kaňony“, je třeba posuzovat zcela samostatně. Data z mapových podkladů nejsou v tomto případě dostatečná a hluboce zařizlá koryta se často zásadně liší specifickými lokálními podmínkami, zejména litologií.

## 6. Závěry

Jako signifikantní parametry pro identifikaci přirozeného chování vodních toků byly potvrzeny parametry nadmořská výška, sklon údolí, sinuosita a řád toku. Dále byla zohledněna litologie území. Klasifikace úseků vodních toků do 9 neovlivněných typů vodních toků, založená na kombinaci parametrů nadmořská výška, sklon údolí a sinuosita, potvrdila významnou odlišnost chování vodních toků v podmínkách České vysočiny a flyšového pásma Západních Karpat. Identifikována byla specifická skupina vodních toků v zarovnaných vrcholových partiích České vysočiny, která se v geomorfologicky zcela odlišném systému Západních Karpat nevyskytuje. Ověření na základě dat z terénního průzkumu potvrdilo odlišnost a jedinečnost typů. Úsekům vodních toků označeným jako pravděpodobně nebo potenciálně upravené byl přiřazen nejbližší neupravený typ.

Předložená klasifikace vodních toků do typů z pohledu hydromorfologie je nezbytným předpokladem pro stanovení typově specifických hydromorfologických referenčních podmínek vodních toků na území České republiky. Referenční podmínky by měly dále sloužit jako srovnávací prvek pro hodnocení aktuálního stavu vodních toků z pohledu morfologie a zároveň jako předloha revitalizačních opatření nebo cílový stav opatření pro zlepšení ekologického stavu podle požadavků RSV [1]. Porozumění přirozenému chování vodních toků navíc umožňuje předvídat změny spojené s vývojem fluvialního systému zejména z pohledu jeho nestability a rizik.

## Literatura/References

- [1] European Commission, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23rd October 2000 Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Official Journal of the European Communities, L, 327/1, Luxembourg.
- [2] CEN, 2004. EN 14614:2004 Water quality–Guidance standard for assesseing the hydromorphological features of rivers.
- [3] Kondolf, G.M., Montgomery, D.R., Piégay, H., Schmitt, L., 2003. Geomorphic Classification of Rivers and Streams. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), Tools in Fluvial Geomorphology. John Wiley & Sons, Chichester, 171–204.
- [4] Matoušková, M., 2008. Assessment of the river habitat quality within European Water Framework Directive: Application to different catchments in Czechia. Geografie 113 (3), 223–236.
- [5] Palmer, M.A., Bernhardt, E.S., Allan, J.D., Lake, P.S., Alexander, G., Brooks, S., Carr, J., Clayton, S., Dahm, C.N., Follstad, S.J., Galat, D.L., Loss, S.G., Goodwin, P., Hart, D.D., Hassett, B., Jenkinson, R., Kondolf, G.M., Lave, R., Meyer, J.L., O'Do-

**Tab. 2. Zastoupení typů vodních toků na celkové délce posuzovaných úseků vodních toků v rámci území celé České republiky, v rámci jednotlivých geomorfologických jednotek a v rámci velkých řek (7.–9. řádu dle Strahlera)**

Typ vodního toku	Teoretické typy *	Podíl typů vodních toků na celkové délce posuzovaných úseků vodních toků (%)			
		Území České republiky	Česká vysočina	Západní Karpaty	Velké řeky
A1	213, 312	7,1	6,7	9,2	
A2	3, 12, 3	8,2	9,0	4,2	
B	333, 3, 23, 1, 3, 23, 2	2,9	3,5		0,2
C1	1, 23, 1	10,1	8,5	18,8	30,1
C2	2, 23, 1	10,2	11,9	0,9	16,6
C3	1, 23, 2	4,7	4,7	4,8	0,8
C4	2, 23, 2	19,1	21,6	5,5	0,9
D	1, 123, 3	0,5	0,5	0,4	
E	223, 233	9,2	9,4	8,2	
F	111, 211	15,8	12,5	33,9	50,7
G	112, 212	12,1	11,8	14,0	0,7

\* teoretické typy jsou popsány tříčíselným kódem vyjadřujícím kombinaci kategorií parametrů nadmořská výška – sinuosita – sklon údolí uvedenou v tabulce 1 (např. kód 213 znamená úsek toku s nadmořskou výškou v rozmezí 300–599 m, sinuositou do 1,2 a sklonem údolí 1,8 % a více). Kód 3\_12\_3 popisuje sloučený typ v rámci parametru sinuosita, tzn. zahrnuje úseky toků se sinuositou do 1,2 úseky toků se sinuositou 1,2–1,49

**Tab. 3. Odvození nejbližšího neupraveného typu vodního toku pro pravděpodobně upravený typ F a potenciálně upravený typ G**

Pravděpodobně nebo potenciálně upravený úsek			Nejbližší neupravený typ	
F	111	→	C1	1, 23, 1
F	211	→	C2	2, 23, 1
G	112	→	C3	1, 23, 2
G	212	→	C4	2, 23, 2

- nnell, T.K., Pagano, L., Sudduth, E., 2005. Standards for ecologically successful river restoration. Journal of Applied Ecology 42, 208–217.
- [6] Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework. Blackwell Publishing, Oxford.
- [7] Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. River Research and Applications 25, 568–581.
- [8] Schumm, S.A., 1985. Patterns of Alluvial Rivers. Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 13, 5–27.
- [9] Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. Catena 22, 169–199.
- [10] Hey, R.D., 1997. Stable River Morphology. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management. John Wiley & Sons, Chichester, 223–236.
- [11] Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1964. Fluvial processes in geomorphology. Freeman, San Francisco.
- [12] Church, M., 1992. Channel morphology and typology. In: Calow, P., Petts, G. (Eds.), The River Handbook: Hydrological and Ecological Principles. Blackwell, Oxford, 126–143.
- [13] Thorne, C.R., 1997. Channel Types and Morphological Classification. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management. John Wiley & Sons, Chichester, 175–222.
- [14] Schumm, S.A., 1977. The Fluvial System, John Wiley & Sons, New York.
- [15] Brookes, A., 1988. Channelized Rivers. John Wiley, Chichester.
- [16] Downs, P.W., 1995. Estimating the probability of river channel adjustment. Earth Surface Processes and Landforms 20, 687–705.
- [17] Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. Geological Society of America Bulletin 109 (5), 596–611.
- [18] Newson, M.D., Clark, M.J., Sear, D. A. and Brookes, A., 1998. The geomorphological basis for classifying rivers. Aquatic Conservation 8, 415–430.
- [19] Strahler, A.N., 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. Transactions, American Geophysical Union 38 (6), 913–920.
- [20] Kujanová K., Matoušková M., Kliment Z., 2016. Hydromorphological parameters of natural channel behavior in conditions of the Hercynian System and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic. Geomorphology 258, 69–81.



Mgr. Kateřina Kujanová (autor pro korespondenci)  
RNDr. Milada Matoušková, Ph.D.  
Katedra fyzické geografie a geoekologie  
Přírodovědecká fakulta  
Univerzita Karlova  
Albertov 6  
128 43 Praha 2  
katerina.kujanova@email.cz

*River types in terms of hydromorphology on the territory of the Czech Republic (Kujanova, K.; Matouskova, M.)*

*Abstract*

Hydromorphological reference conditions reflect the natural behaviour of water channels, which is extremely variable. Significant parameters of natural channel behaviour – altitude, sinuosity, valley floor slope, and stream order – were determined on the basis of statistical analysis from prepared datasets of 4424 sections of river water bodies. The lithology of the study area was also taken into

consideration. By combining the selected parameters, 27 theoretical river types emerged that were validated by subsequent field survey and measurements at sites evenly distributed throughout the territory of the Czech Republic. By correction, 9 unmodified river types were determined as well as 2 types of likely or potentially modified watercourses for which the nearest unmodified types were derived. This classification of river types is a basis of establishment of type-specific hydromorphological reference conditions of streams on the territory of the Czech Republic. It should serve for assessing the current status of streams in their morphology and also represent stream restoration target conditions.

**Key words**

*river types – hydromorphology – reference conditions – altitude – valley floor slope – sinuosity – stream order – lithology*

Tento článek byl recenzován a je otevřen k diskusi do 28. února 2018. Rozsah diskusního příspěvku je omezen na 2 normostrany A4, a to včetně tabulek a obrázků.  
Příspěvky posílejte na e-mail stransky@vodnihospodarstvi.cz.

## **7.5 THE RELATIONSHIP BETWEEN RIVER TYPES AND LAND COVER IN RIPARIAN ZONES**

Kujanová, K., Matoušková, M., Hošek, Z., 2018. The relationship between river types and land cover in riparian zones. *Limnologica* 71, 29–43.



## The relationship between river types and land cover in riparian zones

Kateřina Kujanova\*, Milada Matouřkova, Zdeněk Hořek

Department of Physical Geography and Geocology, Charles University, Faculty of Science, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Czech Republic



### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Land cover  
River type  
Reference conditions  
Hydromorphological characteristics

### ABSTRACT

Fluvial systems are dynamic and the characteristics of every assessed reach are variable and difficult to quantify based on river type threshold values. The authors of this study considered whether taking into account detailed land cover data from the riparian zone could be of any help in more accurately defining river types and establishing hydromorphological reference conditions. Detailed land cover data from riparian zones (50 m and 200 m buffers along main rivers) were included among the hydromorphological characteristics of the main rivers on the territory of the Czech Republic, and the relationship between established river types and land cover in riparian zones was evaluated.

Land cover data from main river reaches categorized by river type indicate fundamental land cover differences between types that closely correspond with the hydromorphological characteristics of channels. If we examine riparian zones with no or minimal anthropogenic impact, significant land cover classes emerge for distinct river types that at the same time facilitate more accurate descriptions of river types. For rivers in agricultural lowlands, land cover contributes to revealing modifications of the river network. This study demonstrates that detailed land cover data can be used to explain differences between river types and can be included among river characteristics for establishing hydromorphological reference conditions or for assessing the level of anthropogenic impact in the riparian zone, which generally has an effect on the channel as well. At the same time, detailed land cover data may significantly help locate new reference sites, or exclude unsuitable sites.

### 1. Introduction

Rivers are influenced by the landscapes they flow through (Vannote et al., 1980). The stability of a stream channel or its dynamic equilibrium is predetermined by flow conditions (discharge and valley floor slope) and sediment regime (Schumm, 1977, 1985; Rosgen, 1994), as well as bank and riverbed material and bank vegetation (Hey, 1997; Gurnell and Grabowski, 2016). The main dependent characteristics that describe channel geometry include channel width and depth, erosion and accumulation bedforms, channel slope, flow velocity, sinuosity, discharge, and sediment load and size (Leopold et al., 1964; Hey, 1997; Brierley and Fryirs, 2005). Classifying rivers based on their natural channel behavior is a useful tool for understanding fluvial-morphological processes but classifications also serve as flexible management tools that enable assessing the current ecological status of streams according to the Water Framework Directive (WFD, European Commission, 2000), determining reference conditions, forecasting changes, and thus configuring suitable management for river systems including their riparian zones.

Classifications of channel types have established qualitative links

between channel processes, forms, and stability (Thorne, 1997). Channels are classified using different approaches and for various applications. Nevertheless, number of river classification systems (since Schumm, 1977 to Rinaldi et al., 2016) is based on respect of continuum of planform patterns and use examination features of channel to classify river type.

According to European standard EN 14614 (CEN, 2004), reference conditions should be determined for all river types so that they reflect undisturbed stream conditions—that is, natural cross-sectional profiles and channel planforms, the free flow of water and sediment in the channel, and natural vegetation in the riparian zone. Hydromorphological reference conditions are a benchmark for assessing the hydromorphological status of streams, and they also represent stream restoration target conditions. According to the WFD (European Commission, 2000) one of recommended ways to establish type-specific reference conditions is by using a spatially based approach (with data from reference sites). Reference conditions, however, must be understood in terms of cultural-landscape changes (Kondolf et al., 2003a; Matouřkova, 2008; Dufour and Piégay, 2009). Defining reference conditions as pristine conditions is infeasible and doing so has little

\* Corresponding author.

E-mail address: [katerina.kujanova@email.cz](mailto:katerina.kujanova@email.cz) (K. Kujanova).



practical use for stream management and restoration (Dufour and Piégay, 2009; Wyzga et al., 2012; Rinaldi et al., 2013). Therefore, present environmental conditions should be used for establishing reference conditions (Brierley and Fryirs, 2005; Dufour and Piégay, 2009; Wyzga et al., 2012).

The importance of the interactions between riparian zones and channel-forming processes has been pointed out by many researchers (e.g., Kondolf et al., 2003b; Hupp and Rinaldi, 2007; Vaughan et al., 2009; Gurnell et al., 2016). Fluvial-morphological forms and processes significantly influence and limit the establishment, growth, and reproduction of riparian vegetation (Hupp and Osterkamp, 1996; Hupp and Rinaldi, 2007). The distribution of riparian habitats is determined by species tolerance to specific disturbances and stresses and the occurrence of these disturbances. It is also guided by fluvial-geomorphological processes and landforms (Hupp and Bornette, 2003; Hupp and Rinaldi, 2007). Periodic disturbances in the form of relatively frequent flooding and channel migration could be considered the fluvial-geomorphological processes responsible for the high biodiversity of riparian ecosystems (Vannote et al., 1980; Marston et al., 1995; Hupp and Osterkamp, 1996; Škarpich et al., 2016b).

Vegetation may significantly affect erosion rates, sediment accumulation, and the overall stability of fluvial landforms (Hupp and Osterkamp, 1996; Liébault and Piégay, 2002; Hupp and Rinaldi, 2007; Gurnell et al., 2016). This is particularly evident in rivers affected by human activities that are not in equilibrium and that indicate channel incision and channel narrowing (Marston et al., 1995; Liébault and Piégay, 2002; Zawiejska and Wyzga, 2010; Škarpich et al., 2016a).

When river channels are near equilibrium conditions, riparian vegetation indicates specific landforms and hydromorphological conditions (Hupp and Osterkamp, 1996). In Central Europe, relatively stable behavior of unmodified channels prevails over bank erosion and surface disturbances; while anthropogenic impact increases farther away from the channel, near by the channel grasslands are not maintained, the share of woody plants increases, shrub vegetation and alluvial forests expand. This leads to changes in riparian zone behavior during flood periods (Cebecauerová and Lehotský, 2012; Wyzga et al., 2012). Locally, however, arable land and urban areas increase. Liébault and Piégay (2002) describe similar situation in southeastern France.

Bottomland landscapes can be characterized as all fluvially generated landforms and the vegetation they support (Hupp and Osterkamp, 1996), or variable mosaics (Swanson et al., 1988). The variability of hydromorphological processes can also appear over short distances, such as within the width of the floodplain (Hupp and Bornette, 2003). In humid temperate regions, fluvial-geomorphological processes support diverse forested ecosystems (Hupp and Bornette, 2003). The roots of living trees, branches, and large woody debris help form the channel and its habitat, leaves and invertebrates falling into the channel provide food, and tree shading influences water temperature (Vannote et al., 1980; Kondolf et al., 2007; Gurnell and Grabowski, 2016; Škarpich et al., 2016b). Moreover, a well-vegetated riparian zone can also act as a filter of sediments, nutrients, and contaminants and thus improve water quality (Kondolf et al., 2003b). Therefore, riparian zones are significant management and conservation areas, where restoration efforts are important (Kondolf et al., 2007; Gurnell and Grabowski, 2016; Škarpich et al., 2016b).

Riparian zones also often minimize conflicts between dynamic fluvial processes and human development activities (Kondolf et al., 2003b; Dufour and Piégay, 2009). The width of the riparian zone is therefore important. Osterkamp and Hupp (1984) define a riparian zone as a surface inundated or saturated by the dominant discharge equivalent to  $Q_2$ . Most floodplains and all surfaces lower in the valleys meet these criteria; terraces with long flood-return intervals are not included (Hupp and Bornette, 2003). Cebecauerová and Lehotský (2012) define a riparian zone as the corridor along a river bank with specific spatial and ecological gradient that includes bank structures and vegetation in addition to the periodically inundated parts of the floodplain. European

standard EN 14614 (CEN, 2004) defines a riparian zone as an area of land adjoining a river channel (including the river bank) capable of directly influencing the condition of the aquatic ecosystem (e.g., by shading and leaf litter input) and a floodplain as an area of land adjoining a river channel that is or had regularly been in the past inundated during the flood period. If a river valley is less than 100 m wide it is possible to include the entire floodplain in the riparian zone. For all other rivers, a standard distance of 50 m on either side is suggested (CEN, 2004).

This paper focuses on assessing interactions between land cover in the riparian zone and the fluvial-morphological characteristics of a wide range of river systems in temperate Central Europe, the meeting place of rivers from two different geomorphological units: the Bohemian Massif and the Western Carpathians. This study is unique in that it assesses a number of river systems without a subjective selection of specific rivers. Additionally, the diverse physiographic conditions of the study area and the detailed nature of the land cover data acquired from field surveys in the entire study area add to its value. Verifying the results of field surveys increases their relevance and enables them to be used for establishing type-specific hydromorphological reference conditions as well as to be more broadly applied to similar river systems in temperate climates.

The objective of this study was to assess the significance of the occurrence of land cover classes in riparian zones for characterizing hydromorphological river types in the Czech Republic and for interpreting the relationships between these types and land cover classes in riparian zones. This transparent, broadly applicable approach should enable the identification of specific (local) reference conditions upon which appropriate management and restoration measures can be based.

## 2. Study area

The broadly defined study area comprises the entire territory of the Czech Republic. Lithologically, the majority of the area is covered by the expansive, flattened surfaces of the Bohemian Massif primarily on Precambrian and Paleozoic igneous and metamorphic rock. The younger Western Carpathians, which consist primarily of flysch and whose terrain is significantly rougher and more sloped, are located on the eastern margins of the study area. The mean altitude of the study area is 450 m, with a maximum altitude of 1602 m and a minimum of 115 m. The Czech Republic has a temperate climate. The average annual temperature ranges from 0.4 °C to 10.1 °C depending upon location. Average annual precipitation varies between 435 and 1392 mm. Maximum discharge occurs during the spring thaw and rains, that is, in March at medium and low altitudes and in April at high altitudes. The lowest discharge occurs in the autumn. The runoff regime of water courses is significantly affected by the presence of reservoirs and extensive modifications of the river network. Our main focus was on the river network consisting of the main rivers (Fig. 1) and their riparian zones within a 200 m buffer zone.

The area within 200 m of main rivers is largely forested (30.4%), and a large part is covered in arable land (17.3%) and intensive grasslands (19.0%). Alluvial meadows cover a mere 4.8% of this 200 m buffer zone (NCA CR, 2013). This area has been significantly affected by human activities, which the high percentage of urban fabric, industrial, commercial and transport units (a total of 17.3%) bears witness to.

Special focus was on reference sites (RSs). Initially, 44 verification sites that cover the diversity of physiographic conditions present in the Czech Republic were verified through field surveys. Sixteen of these 44 sites were surveyed in detail and act as RSs for verifying defined river types, assessing the relationships between river types and land cover in riparian zones, and determining river characteristics for establishing type-specific hydromorphological reference conditions. The location of these sites can be seen in Fig. 1. Table 1 contains the names and basic features of RSs.

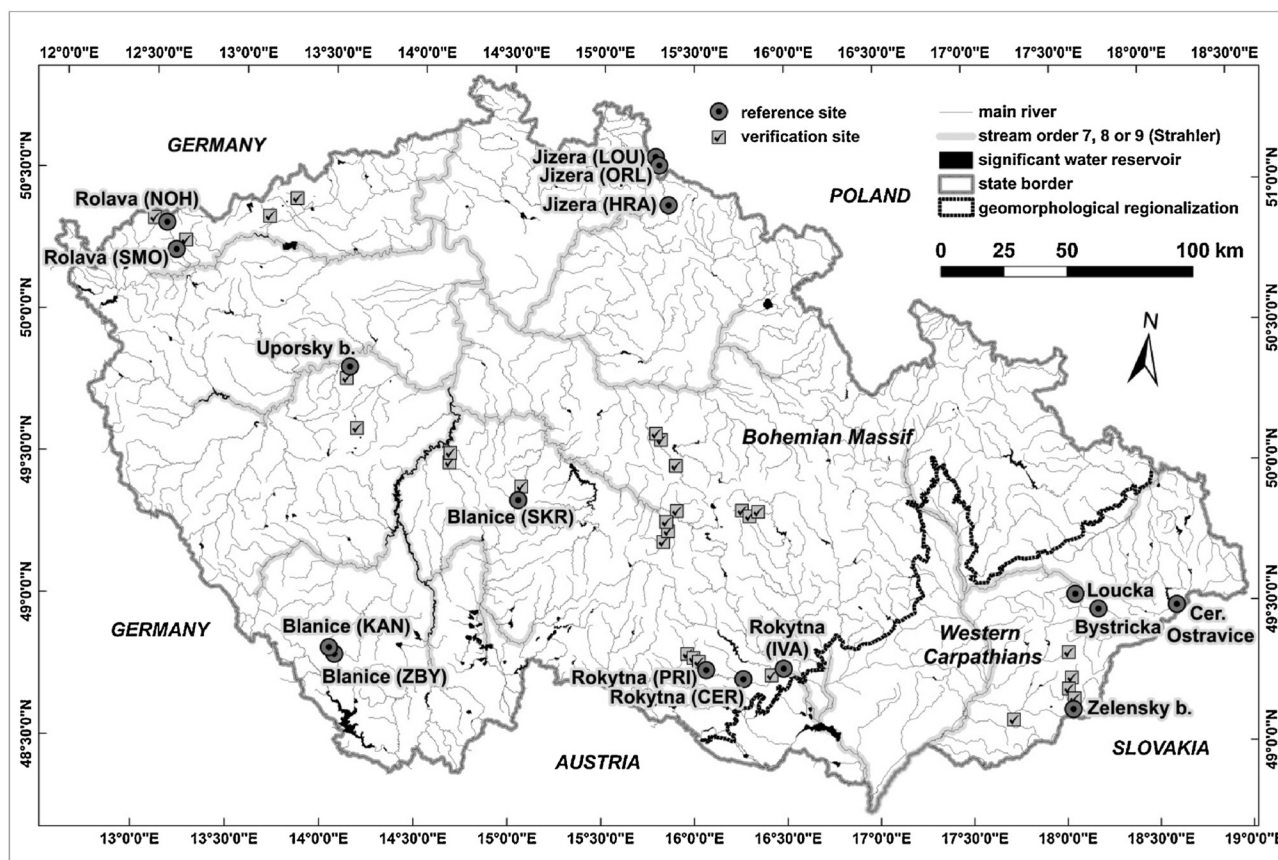


Fig. 1. River network of main rivers on the territory of the Czech Republic and the distribution of verification and reference sites.

### 3. Method and source data

#### 3.1. Source data for classifying rivers into types and characteristics at RSs

A fundamental prerequisite of this study is classification of main river reaches on the territory of the Czech Republic into groups of river characteristics (river types) based on significant parameters of natural channel behavior described in detail in Kujanová et al. (2016). The

groups of river characteristics of main river reaches, with the exception of reaches flooded by reservoirs were classified on the basis of the results of applied statistical methods (Principal Component Analysis (PCA), the Agglomerative Hierarchical Clustering method, correlation, and regression analyses) using the threshold values of three parameters—mean altitude, sinuosity, and valley floor slope. The threshold values for deriving groups of river characteristics and, consequently, river types are provided in Table 2.

Table 1  
Selected characteristics describing the reference sites.

Reference site (RS) and abbreviation	Mean altitude (m)	Sinuosity	Valley floor slope (%)	Stream order (Strahler, 1957)	Channel slope (%)	Width-depth ratio (m)	Valley type	d <sub>50</sub> (Pebble count)
Zelensky b. ZE	522	1.19	5.48	4	2.87	10.4	V-shaped	Very coarse gravel
Rolava (NOH) NOH	783	1.17	2.26	4	1.91	20.1	U-shaped	Medium cobble
Blanice (ZBY) ZBY	764	1.96	0.99	5	0.61	16.5	Wide floodplain	Very coarse gravel
Rokytna (IVA) IVA	222	1.92	0.39	6	0.21	18.1	Wide floodplain	Coarse gravel
Rokytna (PRI) PRI	397	1.50	0.43	6	0.18	25.1	U-shaped	Very coarse gravel
Rokytna (CER) CER	280	1.24	0.55	6	0.28	34.7	U-shaped	Very coarse gravel
Bystricka BY	399	1.51	1.35	4	1.04	19.6	U-shaped	Small cobble
Uporsky b. UP	295	1.35	2.11	4	1.47	23.6	U-shaped	Small cobble
Cer. Ostravice CE	539	1.36	4.78	5	0.98	39.9	U-shaped	Small cobble
Jizera (ORL) ORL	700	1.08	2.56	4	1.62	17.5	U-shaped	Large cobble
Jizera (LOU) LOU	858	2.48	1.05	4	0.12	14.6	Wide floodplain	Medium coarse gravel
Blanice (KAN) KAN	687	1.19	3.02	5	1.98	46.3	V-shaped	Large cobble
Blanice (SKR) SKR	400	1.28	0.32	5	0.27	11.5	U-shaped	Very coarse gravel
Jizera (HRA) HRA	432	1.32	0.85	5	0.47	28.0	V-shaped	Medium cobble
Rolava (SMO) SMO	456	1.23	1.94 (RS), 1.39 (reach)	5	1.91	20.3	U-shaped	Small cobble
Loucka LO	455	1.48	0.92 (RS), 2.90 (reach)	4	0.71	11.6	Wide floodplain	Coarse gravel



**Table 2**

Determination of groups of river characteristics, river types, and nearest unmodified types; river types as percentages of main rivers network on the whole territory of the Czech Republic and as percentages of all seventh- to ninth-order streams.

Groups of river char.	River type	Threshold values of selected parameters for deriving river types			Nearest unmodified type	River types as percentages of the total length	
		Mean altitude (m)	Sinuosity	Valley floor slope (%)		Territory of the Czech Republic	Rivers of seventh- to ninth-order
A	A1	300–599	1.00–1.19	1.80 and more		7.1	
		600 and more		0.50–1.79			
	A2	600 and more	1.00–1.49	1.80 and more		8.2	
B	B	600 and more	1.50 and more	1.80 and more		2.9	0.2
			1.20 and more	less than 0.5			
			1.20 and more	0.50–1.79			
C	C1	less than 300	1.20 and more	less than 0.5		10.1	30.1
	C2	300–599	1.20 and more	less than 0.5		10.2	16.6
	C3	less than 300	1.20 and more	0.50–1.79		4.7	0.8
	C4	300–599	1.20 and more	0.50–1.79		19.1	0.9
D	D	less than 300	all	1.80 and more		0.5	
E	E	300–599	1.20–1.49	1.80 and more		9.2	
			1.50 and more				
F	F	less than 300	1.00–1.19	less than 0.5	C1	15.9	50.7
		300–599	1.00–1.19	less than 0.5	C2		
G	G	less than 300	1.00–1.19	0.50–1.79	C3	12.1	0.7
		300–599	1.00–1.19	0.50–1.79	C4		

The seven defined groups of river characteristics (Table 2) were subjected to field surveys conducted at 44 verification sites in the Czech Republic using the REFCON method for establishing hydro-morphological reference conditions (Kujanová and Matoušková, 2017). For 16 of the 44 verification sites that met the criteria of having minimal anthropogenic impact and were established as RSs a further detailed field survey was conducted and entailed the following: surveying at least five typical cross-sectional profiles, assessing riverbed surface sediment, and surveying the longitudinal profile along the entire length of the RS. Thus, the established set of qualitative and quantitative characteristics was recorded and processed. A selection of these characteristics for describing RSs is presented in Table 1. The established set of assessed characteristics for all 16 surveyed RSs was expanded to include detailed land cover data in further analyses conducted as part of this study. Quantitatively expressible hydro-morphological characteristics of RSs that were used in this study for assessing their relationship to land cover data include width-depth ratio, channel slope, specific stream power, bankfull width, bankfull discharge, bankfull area, maximum channel depth, mean channel depth, entrenchment ratio, d<sub>50</sub> (using the pebble count method – Wolman, 1954), and riverbed structures (pools, bars, rapids, etc.).

The findings from field surveys conducted at 44 verification sites led to the further division of the seven groups of river characteristics into eleven river types (see Table 2). From 16 sites that met the criteria and were established as RSs, 9 RSs were chosen that represent hydro-morphological reference conditions which are presented in Table 3. Types F and G were marked as *probably modified channels* and *potentially*

*modified channels*, respectively (Kujanová et al., 2016). Types A1–E represent unmodified channels. The characteristics of natural channel behavior for type F and G reaches are impossible to objectively assess. Reference conditions, however, should be established for all river types (CEN, 2004). Therefore, type F and G reaches were considered separately and the *nearest unmodified types* were derived for them. Mean altitude and valley floor slope, two of the three selected parameters, are not influenced by channel modification. In contrast, sinuosity is strongly influenced. The *nearest unmodified type* was derived as a type with the same categories of mean altitude and valley floor slope; only the category of sinuosity was changed (from category 1.00–1.19 to categories 1.2–1.49 and 1.50–3.50). Only one *nearest unmodified type* always exists (Table 2).

RSs were selected only on fourth- to sixth-order streams (Table 1) because rivers of this size comprise most main river reaches and represent all river types (see Fig. 2). In contrary, the diversity of seventh- to ninth-order streams is very low in the Czech Republic because their channels and riparian zones are often heavily impacted by human activity. Thus, it is almost impossible to find RSs on such rivers that meet the criteria of having minimal anthropogenic impact.

### 3.2. Land cover data processing

The source of the land cover data was the Consolidated Layer of Ecosystems (NCA CR, 2013; Hönigová and Chobot, 2014). The Consolidated Layer of Ecosystems, referred to as KVES, contains detailed land cover data divided into 41 classes that cover the entire territory of



**Table 3**  
Nine reference sites that represent type-specific hydromorphological reference conditions; Ref. cond.–reference conditions, Entr. ratio–entrenchment ratio.

Reference site (RS)	Ref. cond. for river type	Channel pattern	Valley type	Channel slope (%)	Bankfull width (m)	Bankfull area (m <sup>2</sup> )	Depth max. (m)	Width-depth ratio (m)	Entr. ratio	Specific stream power (W.m <sup>-2</sup> )	d <sub>50</sub> (Pebble count)	Riverbed structures (%):				
												bars	pools	rapids	riffles cascades	
Zelensky b.	A1	Straight/sinuuous	V-shaped	2.87	5.38	2.84	0.78	10.4	2.28	166.7	Very coarse gravel	5.4	0.4	67.0	13.0	1.2
Rolava (NOH)	A2	Straight	U-shaped	1.91	9.72	4.77	0.87	20.1	2.54	982.6	Medium cobble	11.7	7.5	26.7	8.3	8.7
Blanice (ZBY)	B	Meandering	Wide floodplain	0.61	9.95	6.31	1.1	16.5	14.44	292.9	Very coarse gravel	22.5	28.3	7.5	15.8	0.0
Rokytna (IVA)	C1	Meandering	Wide floodplain	0.21	10.44	6.15	0.95	18.1	10.45	51.8	Coarse gravel	21.0	20.0	0.0	6.0	0.0
Rokytna (PRI)	C2	Meandering	U-shaped	0.18	10.58	4.60	0.68	25.1	1.26	32.1	Very coarse gravel	19.0	16.0	0.0	9.0	0.0
Rokytna (CER)	C3	Sinuuous	U-shaped	0.28	16.52	7.98	0.79	34.7	24.30	61.3	Very coarse gravel	18.0	3.0	0.8	3.0	0.0
Bystricka	C4	Meandering	U-shaped	1.04	15.76	13.26	1.28	19.6	7.78	1172.2	Small cobble	24.3	9.3	17.1	35.0	0.0
Uporsky b.	D	Sinuuous/braided	U-shaped	1.47	7.51	2.49	0.57	23.6	2.42	494.9	Small cobble	20.0	8.3	1.7	2.0	0.0
Cer. Ostravice	E	Sinuuous/braided	U-shaped	0.98	12.07	3.83	0.72	39.9	2.65	206.3	Small cobble	38.0	4.5	15.0	25.8	0.0

the Czech Republic. The KVES mapping scale is near the detail recognizable in field survey (NCA CR, 2013; Hönigová and Chobot, 2014). The KVES was created by the Nature Conservation Agency of the Czech Republic in 2013 because CORINE land cover was found insufficiently detailed for use in mapping ecosystem services, resp. it appeared that better and more detailed data could be created that would be beneficial for other purposes (Hönigová and Chobot, 2014). Despite large amount of available sources separately covering only certain land cover topics, no coherent layer covering the entire Czech Republic in adequately high resolution that included human-altered ecosystems existed. The main source of data was a biotope mapping (2013) originally serving as a base for Natura 2000 sites designation. Data from this source were preferred wherever they were available. Data on Continuous and Discontinuous urban fabric were drawn from the Urban Atlas (2006). The minimum mapping unit size in the Urban Atlas is 0.25 ha whereas in CORINE land cover it is 25 ha. Other urban areas were covered using the Urban Atlas in combination with data from the Fundamental Base of Geographic Data of the Czech Republic (ZABAGED®). ZABAGED data were also used to cover other areas with anthropogenic impact (Urban areas, Agricultural land, Intensive forests, and Artificial rocks). The source of data to cover Wetlands besides the biotope mapping and ZABAGED was also Digital Database of Water Management Data (DIBAVOD). CORINE land cover data were used to provide information about forest cover composition in Intensive forest areas. The complete list of input data and the method in which KVES was created can be found in the manual that is part of the data set (NCA CR, 2013). The resulting KVES land cover data are in ESRI shapefile format that can be used for various GIS analyses.

As a first step, main rivers (drawn as channel centerlines) were divided into reaches based on the boundaries of 4424 drainage basins as defined by the Czech Hydrometeorological Institute for the purposes of hydrological monitoring and forecasting. KVES land cover data were clipped using a round buffer created for each main river reach (both 50 m and 200 m buffers were created). Of the original 4424 reaches, those that are flooded by reservoirs or shorter than 500 m (due to considerable overlaps of buffers) were excluded. Thus, 3937 main river reaches and their 50 m and 200 m buffer zones were further analyzed. For each of the 3937 buffer zones the total area of each KVES class was calculated. Land cover data and spatial analyses were processed using ArcGIS 10.1. Through the unique buffer ID of each main river reach assigned to all KVES polygons in the process of clipping buffers, two matrices, one for the 50 m buffer zone and one for the 200 m buffer, were created in Microsoft Excel, each consisting of 3937 rows and 40 columns of values. The 50 m buffer zone along main rivers consisted of 741,401 polygons and the 200 m buffer contained 2,232,094 polygons. Maintaining complete information about the fine structure of KVES polygons was considered critical.

KVES land cover data provide very valuable and credible information comparable to the results of biotope mapping. One weakness of KVES land cover data is that they include the class of Anthropogenically influenced water courses because it is based on an assessment of “worse than good ecological status” according to WFD (European Commission, 2000), and thus it is a generalized output for a long river reach. Therefore, for this study the classes Natural water courses and Anthropogenically influenced water courses are displayed together as Water courses. KVES classes were consolidated according to purposes of various analyses depending on the importance of the classes for each analysis, the number of considered reaches, and depicting of results. The total area of each KVES class was calculated for every reach’s buffer zone. Table 4 lists 40 KVES classes that appear in the 50 m and 200 m buffer zone along main rivers (the only class not represented in the data was Artificial urban green areas-parks, gardens, cemeteries), as well as how classes were consolidated.

The polygons located in overlapping parts of buffers were included in all buffers where they were located. KVES classes occurrence in each buffer was assessed as was the relationship between KVES classes

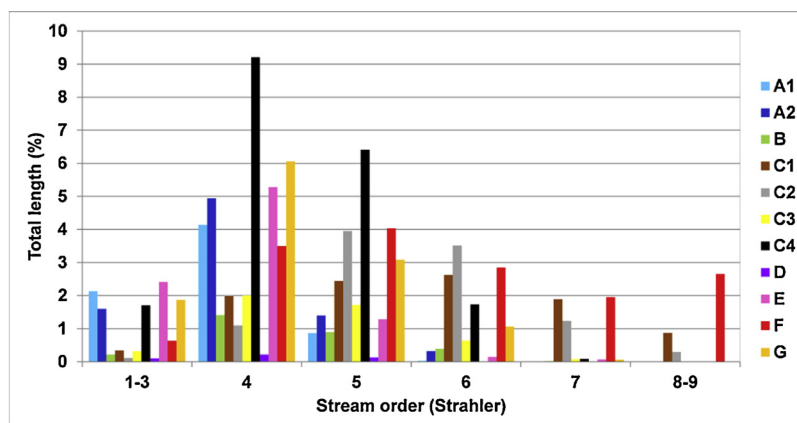


Fig. 2. River types by stream order as percentages of the total length of the main rivers network.

occurrence and river types. The number of polygons, that is, the level of detail of the structure of KVES land cover data polygons, which is visible in Fig. 3, was ignored.

### 3.3. Applied statistical methods

Pearson-type PCA was conducted to visualize the correlation of the data set of the characteristics of 88 cross-sectional profiles at 16 RSs and also to assess similarities between surveyed cross-sectional profiles (for more information about the 88 cross-sectional profiles see Supplementary material), their classification into river types, and the identification of non-typical cross-sectional profiles or RSs. The first conducted PCA was only for river characteristics at RSs. Fourteen variables from each of the 88 cross-sectional profiles were used as PCA input: width-depth ratio, channel slope at reference site, channel slope at cross-sectional profile, bankfull width, bankfull discharge, bankfull area, specific stream power, maximum channel depth, mean channel depth, entrenchment ratio,  $d_{50}$ , and riverbed structures (pools, bars, rapids). Subsequently in order to correlate river characteristics and land cover characteristics of riparian zones, input data were expanded to include KVES land cover data, nine variables (consolidated KVES classes) from buffer zone areas at RSs were added as PCA input: Urban fabric, Transport units, Arable land, Intensive grasslands, Intensive forests, Natural forests, Natural grasslands, Wetlands, and Water courses. The purpose was also to assess changes in the position of cross-sectional profiles in relation to land cover. Land cover data were applied as the total area of each consolidated class in the 50 m buffer; the classes of Bare rock, Macrophyte vegetation, and Ponds and water reservoirs, however, were not taken into account because their occurrence in the 50 m buffer zone of RSs was very low (95% of considered values comprise less than 1% of buffer area, remaining 5% of considered values comprise less than 5% of buffer area).

Descriptive statistics were used to express the occurrence of land cover classes (50 m buffer) for each river type: the results were displayed using box plots. The occurrence of 15 consolidated KVES land cover classes (third column in Table 4) from each of 3937 buffer zones along main rivers divided into 11 river types was used as descriptive statistics input. Each box plot depicts the minimum, the first quartile, median, mean, the third quartile, and both limits (the ends of the “whiskers”), where the lower limit is  $Q1 - 1.5(Q3 - Q1)$  and upper limit is  $Q3 + 1.5(Q3 - Q1)$ .

All statistical analyses were conducted with XLStat.

## 4. Results

### 4.1. Correlation between KVES land cover data and river characteristics at 88 cross-sectional profiles

The average area covered by each type of riverbed structures at RSs is depicted in Fig. 4. For some river types, riverbed structures are a suitable descriptive characteristic (A1, C2); however, for others, examples from RSs demonstrate that riverbed structure is a highly variable characteristic of river types (C4, E), which is not suitable for defining river types or for establishing type-specific reference conditions (Fig. 4). Although there are clear differences between river types, the threshold values of river characteristics are not always so clear. Therefore, hydromorphological characteristics were expanded to include KVES land cover data and then the correlation between land cover data and hydromorphological characteristics, and also between land cover data and river types, were assessed.

A clear correlation between the characteristics of a meandering channel in a well-developed floodplain (e.g., entrenchment ratio, pools and bars) and a correlation between the characteristics of a channel with a steep slope, coarse sediment, and rapids as the predominant riverbed structure are visible in Fig. 5. The position of each cross-sectional profile in Fig. 5 is marked with corresponding river type and the abbreviation of an RS (see Table 1). Separate clusters of cross-sectional profiles indicate belonging to a river type based on their shared dominant characteristics. Rolava (NOH), Rolava (SMO), Blanice (KAN), and Jizera (ORL) have in common a naturally straight channel with a steep slope, coarse sediment, and rapids as the predominant riverbed structure. The name of each RS is given in Table 1. A special cluster consists of meandering channels in a wide floodplain with pools and bars as predominant riverbed structures—for example, Blanice (ZBY), Jizera (LOU), Loucka, and Rokytna (IVA). The shallow, wide channels of Cer. Ostravice, Rokytna (CER), and Uporsky Brook contain a large amount of medium-sized sediment.

Expanding PCA analysis input data to include KVES land cover characteristics enhances the classification of each cross-sectional profile into river type or groups of types (Fig. 6). A cluster of cross-sectional profiles dominated by the class Natural forests emerges. Also separately, a river type emerges with a sinuous to meandering channel in the lowlands with a medium valley floor slope—Rokytna (CER). Well-developed floodplains featuring meandering channels are used as Intensive grasslands—Loucka, Rokytna (IVA), and Blanice (SKR)—or as Arable land. The class of Natural grasslands remains concentrated primarily in the floodplains of meandering rivers with unsuitable conditions for agriculture (due to altitude, difficult access, or waterlogging). Wetlands are generally less frequently found nevertheless they appear linked to meandering channels. The Water courses class is marked by a wider channel and thus corresponds with a larger bankfull area. It has

**Table 4**  
Classes of KVES land cover data and their consolidation.

Level 1 (NCA CR, 2013)	Classes (NCA CR, 2013) – used in Fig. 9	Partially consolidated classes (used in Fig. 10)	Consolidated classes (used in Fig. 6, Figs. 7A, B, 8A, B)
Urban areas	Continuous urban fabric	Urban fabric	Urban fabric
	Discontinuous urban fabric		
	Urban nature		
	Artificial urban green areas-recreation and sport areas	Transport units	Transport units
	Industrial and commercial units		
	Transport units		
	Dump and construction units		
Agricultural land	Arable land	Arable land	Arable land
	Orchards and gardens		
	Hop fields		
	Vineyards		
	Intensive grasslands	Intensive grasslands	Intensive grasslands
Forests	Intensive coniferous forests	Intensive forests	Intensive forests
	Intensive broad-leaved forests		
	Intensive mixed forests		
	Introduced shrub vegetation	Introduced shrub vegetation and Pinus mugo shrub	
	Introduced Pinus mugo shrub		
	Alluvial forests	Alluvial forests	Natural forests
	Oak and oak-hornbeam forests	Natural forests	
	Beech forests		
	Ravine forests		
	Dry pine forests		
	Spruce forests		
	Bog forests		
	Natural shrub vegetation		
	Natural Pinus mugo shrub		
Grasslands	Alluvial meadows	Alluvial meadows	
	Mesic meadows	Natural grasslands	
	Dry grasslands		
	Alpine grasslands		
	Heaths		
Bare rock	Artificial rocks	Bare rock	Bare rock
	Natural rocks		
Wetlands	Wetlands and littoral vegetation	Wetlands	Wetlands
	Peatbogs and springs		
	Swamps		
Aquatic ecosystems	Macrophyte vegetation of water bodies	Macrophyte vegetation	Macrophyte vegetation
	Ponds and water reservoirs	Ponds and water reservoirs	Ponds and water reservoirs
	Natural water courses	Water courses	Water courses
	Anthropogenically influenced water courses		

been confirmed that in the Czech Republic channels with steep slopes, usually on the upper courses of rivers, are generally located in forested areas.

#### 4.2. The relationship between river types and KVES land cover

##### 4.2.1. River types and KVES land cover on the main rivers network of the Czech Republic

To compare land cover in the 50 m buffer zone (Fig. 7A) and in the 200 m buffer zone (Fig. 7B) and to assess the relationships between river types and land cover data, KVES classes for the 3937 main river reaches were consolidated into 12 classes (Table 4). Main river reaches were sorted according to river type and for each reach a bar graph expressing the percentage of KVES classes present in the buffer zone was created. KVES land cover data characterize well type B

(meandering channels at altitude  $\geq 600$  m) with a significant percentage of forestation, the minimal presence of Urban fabric and Transport units, and relatively wide river channels, which often flow through Natural or Intensive grasslands. Type A2 (naturally straight channels in the highest parts of Czech mountains with steep valley floor slope) in predominantly forested areas with a minimal percentage of Urban fabric is interesting to compare with type A1 (straight channels at mid-altitudes) with a substantially higher percentage of Intensive grasslands and Urban fabric at the expense of forests. Types C1 (meandering lowland channels) and C2 (meandering channels at mid-altitudes), just like type F (straight channels in the lowlands—probably modified channels), are largely reaches on the lower courses of rivers with wide channels (especially visible in the percentage of Water courses in the 50 m buffer zone). In the 50 m buffer zone, type F even indicates a lower percentage of Urban fabric at the expense of Water courses,



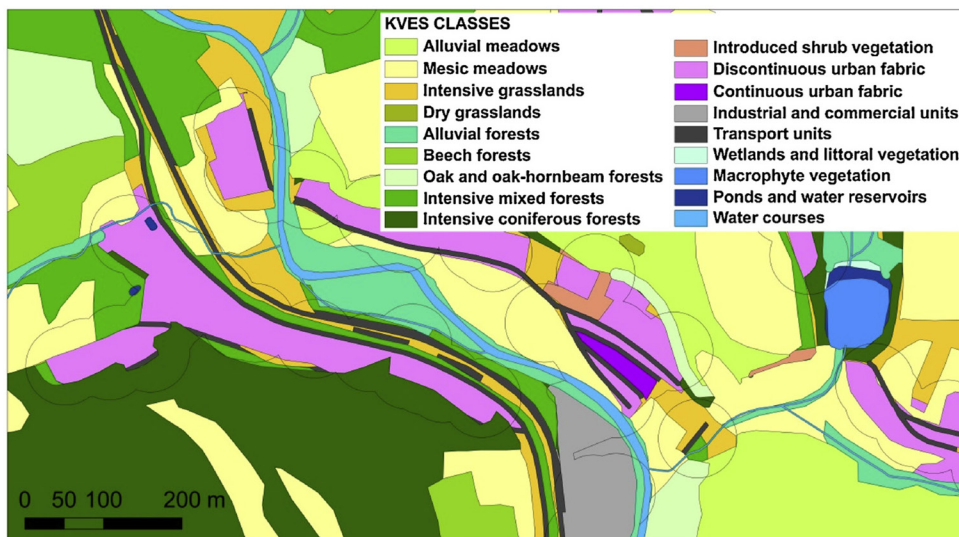


Fig. 3. The riparian zone of the Rolava River as an example of KVES land cover data structure; Source: Consolidated Layer of Ecosystems © CzechGlobe © AOPK ČR 2013 using its own and the data from the following sources: ZABAGED (© Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre 2012), Corine Land Cover 2006 (© EEA 2006), Urban Atlas 2006 (© EEA 2006), DIBAVOD (© TGM WRI 2012).

which significantly changes in the 200 m buffer zone. A fundamental feature of types C1 and F is a lower percentage of forest and a high percentage of Arable land, which in the 200 m buffer zone increases even more significantly. Intensive grasslands, Natural grasslands, and both classes of forest are found in particular in types C2 and C4 (sinuous to meandering lower-order rivers and steeper valley floor slope upstream from type C2) with a well-developed floodplain. Type C3 represents sinuous to meandering lowland channels, but with a steeper valley floor slope that is mainly the result of the specific lithology of the reach (higher  $d_{50}$  value, higher flow velocity, insignificant riverbed structures). As a rule, these are narrow channels with a high percentage of forestation in the riparian zone; the percentage of Urban fabric cover is significant as well. Type D is a very specific type (lowland river with a high valley floor slope), which is distinguished by a significant percentage of forestation. Type E (sinuous to meandering channels at mid-altitude with a steep valley floor slope) indicates a high percentage of forestation as well as a significant percentage of Natural grasslands and Urban fabric. Type G (straight lowland channels with medium valley floor slope—*potentially modified channels*) indicates a high percentage of Urban fabric and Agricultural land without a significant percentage of

Water courses.

In the 200 m buffer zone there is significant growth in Arable land and Urban fabric for types C1, C2, C3, C4, F, and G compared to the 50 m buffer zone. In contrast, for types A1, A2, B, D, and E changes in KVES land cover in the 200 m buffer zone were minimal; for example, the percentage of Natural grasslands has grown.

To express the relationship between stream order (Strahler) and land cover, KVES classes for the 3937 main river reaches were consolidated into 12 classes (Table 4). Main river reaches were sorted according to stream order and subsequently according to river type. For each reach, bar graphs expressing the percentage of KVES classes present in the 50 m buffer zone (Fig. 8A) and in the 200 m buffer zone (Fig. 8B) were created. If the broader riparian zone (200 m buffer) of seventh- to ninth-order streams is taken into consideration, there is greater diversity in riparian zone land cover because Water courses cover a large area in the 50 m buffer. Although seventh- to ninth-order streams (lowland channels with suitable conditions for most human activities) are represented mostly by types C1, C2 and F (Fig. 2, last column in Table 2) Urban fabric and Arable land cover less area of the riparian zone than in case of some lower-order streams in type C1 and F

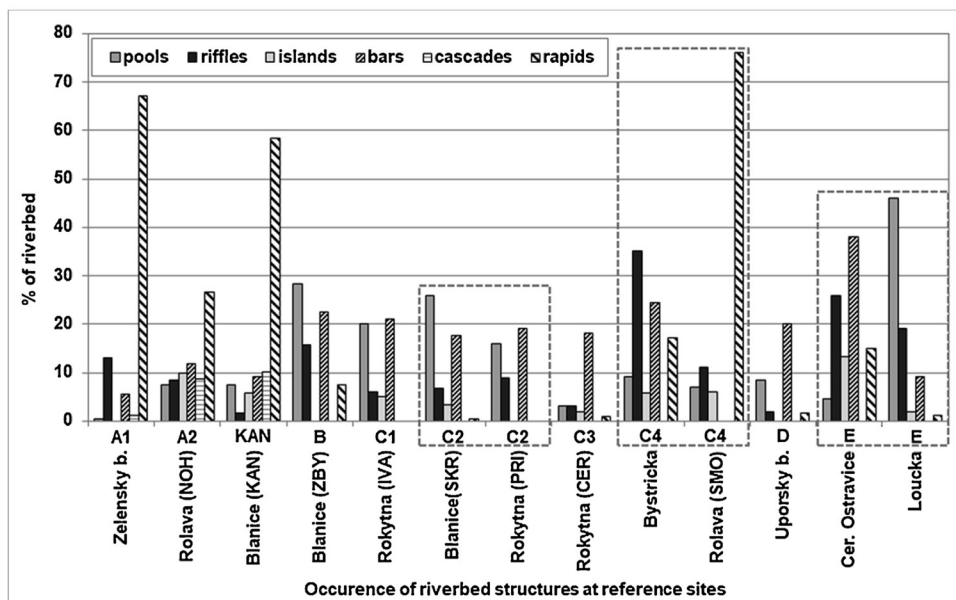


Fig. 4. Average area covered by individual riverbed structures within reference sites.

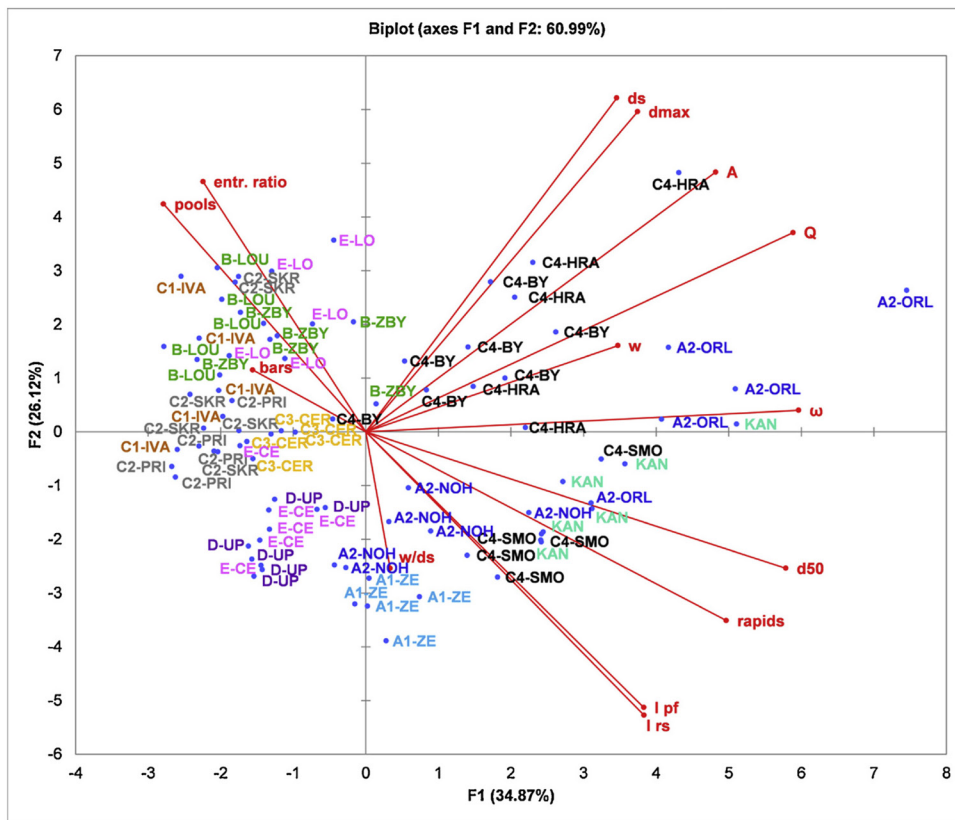


Fig. 5. Position of analyzed river characteristics at reference sites along the first two components of PCA and the position of particular cross-sectional profiles on the first factorial maps of the PCA; w/ds – width–depth ratio, Irs – channel slope at reference site, Ipf – channel slope at cross-sectional profile, ω – specific stream power, w – bankfull width, Q – bankfull discharge, A – bankfull area, dmax – maximum channel depth, ds – mean channel depth, entr. ratio – entrenchment ratio. The position of each cross-sectional profile is marked with corresponding river type and the reference site abbreviation (e.g., A1-ZE). For reference site abbreviations, see Table 1, and for the color marking of each type, see Table 2.

(see Figs. 7B, Figure 8A, B).

KVES land cover data for main river reaches sorted according to river types (Fig. 7A, B) show significant differences between the river types that are closely related to channel characteristics. KVES land cover data thus contribute to characterizing river types. Stream order is

only supplementary information for better characterizing river types because the diversity of river characteristics and KVES land cover data rather increases with decreasing stream order (Fig. 8A, B).

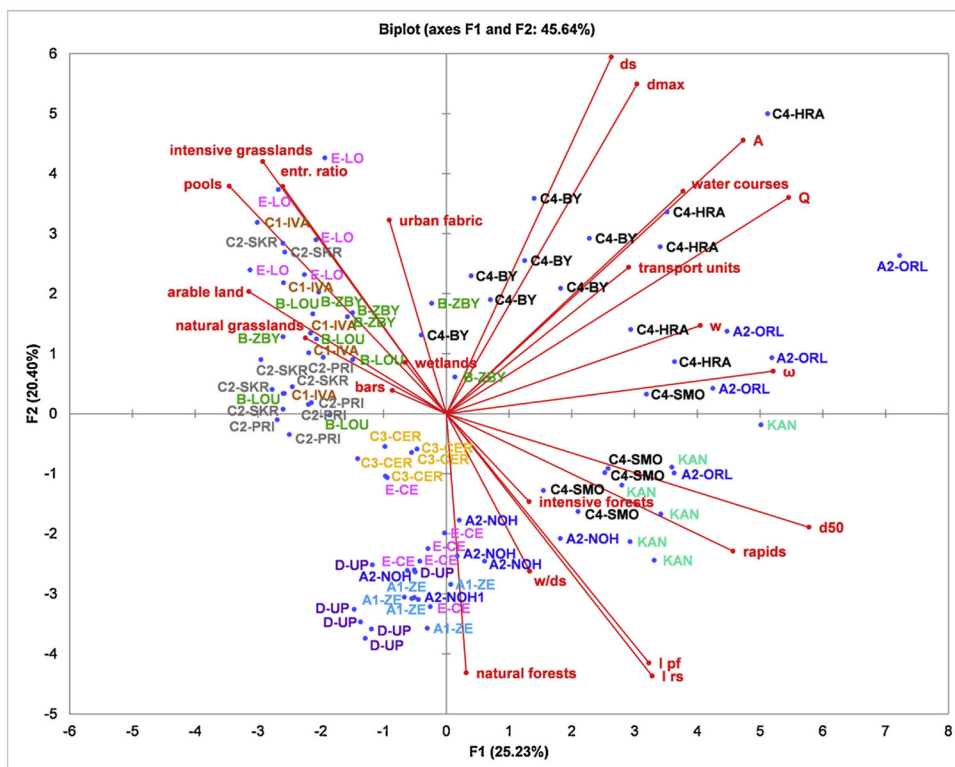


Fig. 6. Position of analyzed river characteristics and KVES land cover data at reference sites along the first two components of PCA and position of particular cross-sectional profiles on the first factorial maps of the PCA; w/ds – width–depth ratio, Irs – channel slope at reference site, Ipf – channel slope at cross-sectional profile, ω – specific stream power, w – bankfull width, Q – bankfull discharge, A – bankfull area, dmax – maximum channel depth, ds – mean channel depth, entr. ratio – entrenchment ratio. The position of each cross-sectional profile is marked with corresponding river type and the reference site abbreviation, see Table 1, and for the color marking of each type, see Table 2.



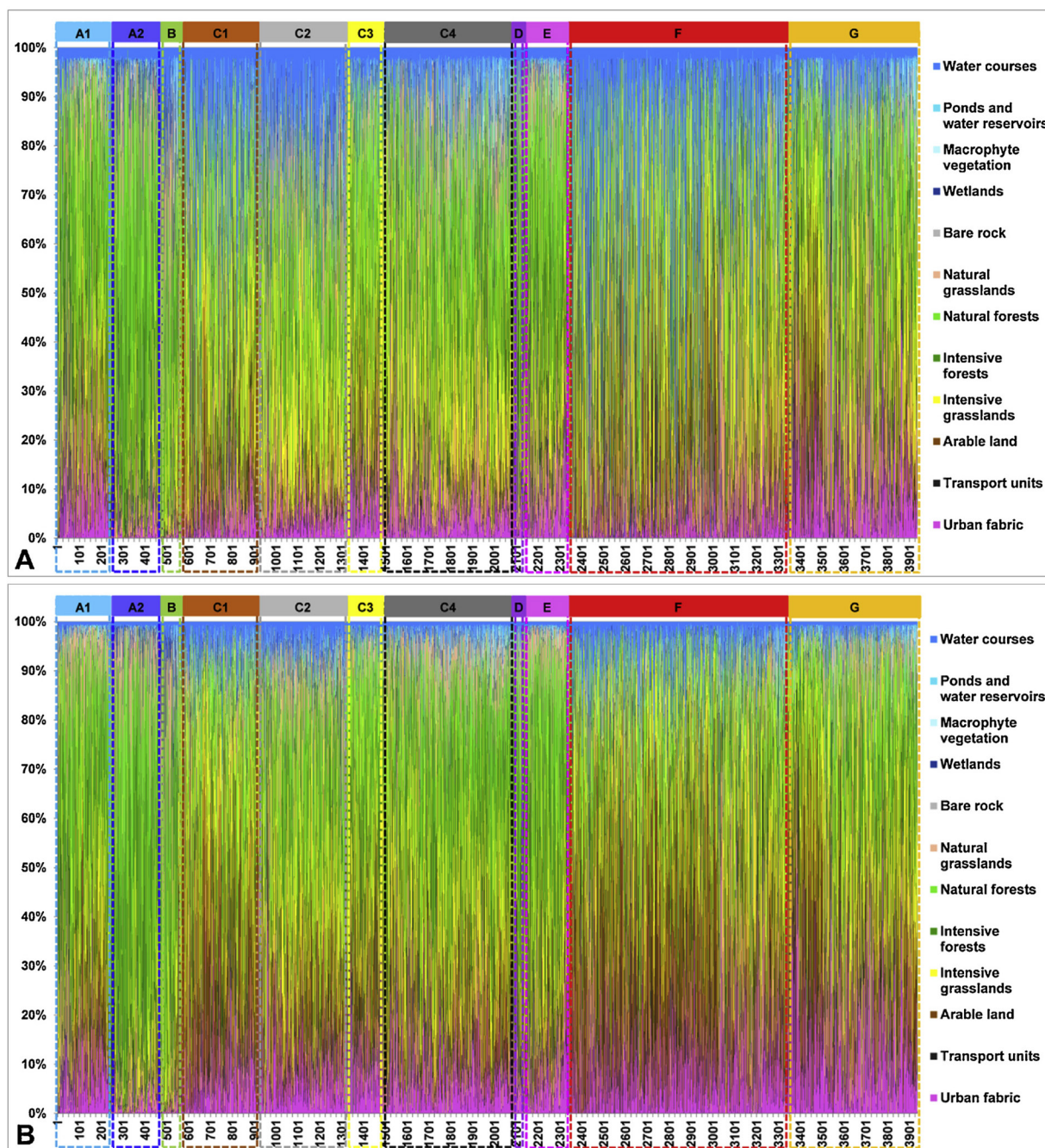


Fig. 7. KVES land cover for all 3937 main river reaches sorted according to river type in the 50 m buffer zone (A) and in the 200 m buffer zone (B).

4.2.2. River types and KVES land cover at reference sites

For a more detailed assessment of land cover, KVES land cover data were determined for the riparian zone (the 50 m buffer zone) and the 200 m buffer zone at 16 RSs (Fig. 9). In this case, only the classes Natural water courses and Anthropogenically influenced water courses were merged into the Water courses class; other KVES classes were not modified. The KVES land cover data from 16 RSs confirm a high percentage of forestation with a low to insignificant occurrence of Urban fabric and Transport units for types A2, B, D, and E and for RS Blanice (KAN). Type B RSs, both in headwater areas, indicate a high percentage of grasslands, and Peatbogs and springs as well. The land cover of type D is interesting; there is a significant percentage of Natural forests (Alluvial forests, Oak and oak-hornbeam forests, Ravine forests), as well as of Natural rocks, which documents the specific nature of RS Uporsky Brook (a shallow, wide channel with a steep slope and a large amount

of raw sediment, whose source was local bank slides). The nature of land cover at RS Loucka approaches that of a meandering river in agricultural land (types C1 and C2). Type C4 includes reaches with a wide range of physiographic conditions, which is reflected not only in the high variability of the characteristics of this type (Fig. 6), but also in the very diverse spectrum of KVES classes (Fig. 9). Thanks to suitable conditions (e.g., altitude, valley shape), the riparian zones of type C4 are frequently settled in comparison with landscapes farther away from the channel. At RSs in agricultural landscapes (C1, C2, C3, A1) within the 200 m buffer zone there is a greater percentage of Arable land, Intensive grasslands, and Urban fabric compared to the 50 m buffer zone. In contrast, changes are minimal for types with minimal human impact (A2, B, D).



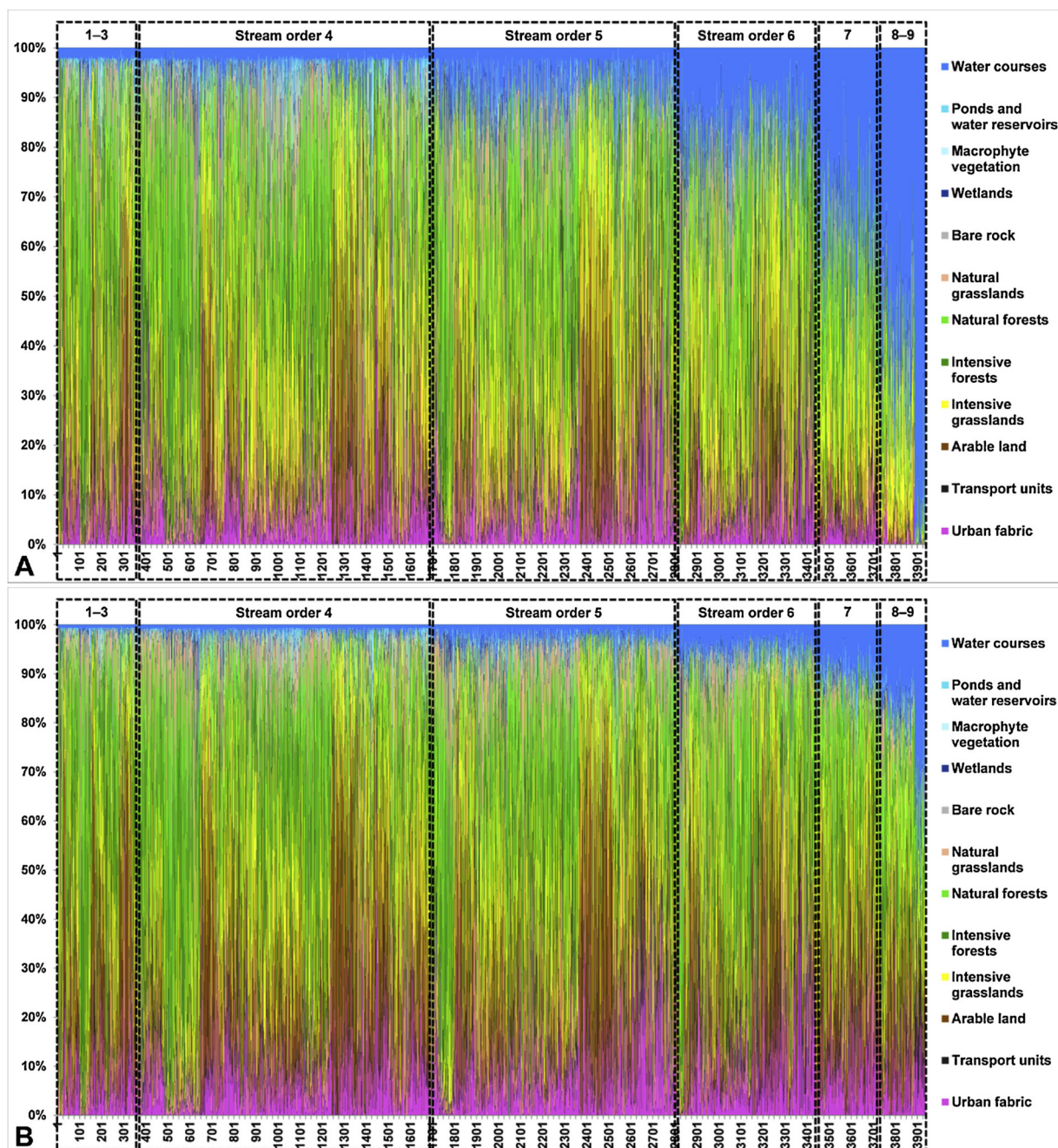


Fig. 8. KVES land cover for all 3937 main river reaches sorted according to stream order (Strahler) and subsequently according to river type in the 50 m buffer zone (A) and in the 200 m buffer zone (B).

#### 4.2.3. Assessing the importance of KVES land cover for type-specific hydromorphological characteristics using descriptive statistics

The purpose of applying descriptive statistics was to determine for each river type the percentages of KVES land cover classes and to answer the question of how important assessing land cover in the riparian zone (50 m buffer) is for assessing type-specific hydromorphological characteristics. For creating boxplots, KVES land cover data were consolidated to make 15 classes (see Table 4).

For most river types significant KVES land cover classes exist that set the type apart from others (see Fig. 10). The first and third quartiles provide information about variability in class percentages for different river types. The mean indicates the average percentage of a class for a given type. This value can be easily compared with those for other types. The maximum makes possible assessing whether some reaches of a given class reach extreme values (when percentage cover approaches

100%).

The significance of land cover data for more accurately defining river types and establishing reference conditions is clear especially for rivers whose riparian zones have been less affected by humans. Type A2 (naturally straight channels with a steep slope at altitudes  $\geq 600$  m) feature highly forested riparian zones accompanied in places by Natural grasslands or Intensive grasslands (see Fig. 10). The percentage of cover of each forest class varies markedly; there is a high occurrence of Natural forest. These riparian zones in the highest and steepest parts of Czech mountains are hardly settled. Therefore, there are only insignificant occurrences of other land cover classes, including Urban areas. Of all river types, type B (meandering channels at altitudes  $\geq 600$  m) feature the highest percentage of Natural grassland cover. This type is further distinguished from others by a high percentage of Wetlands coverage in flattened high areas and by the channel itself as it tends to



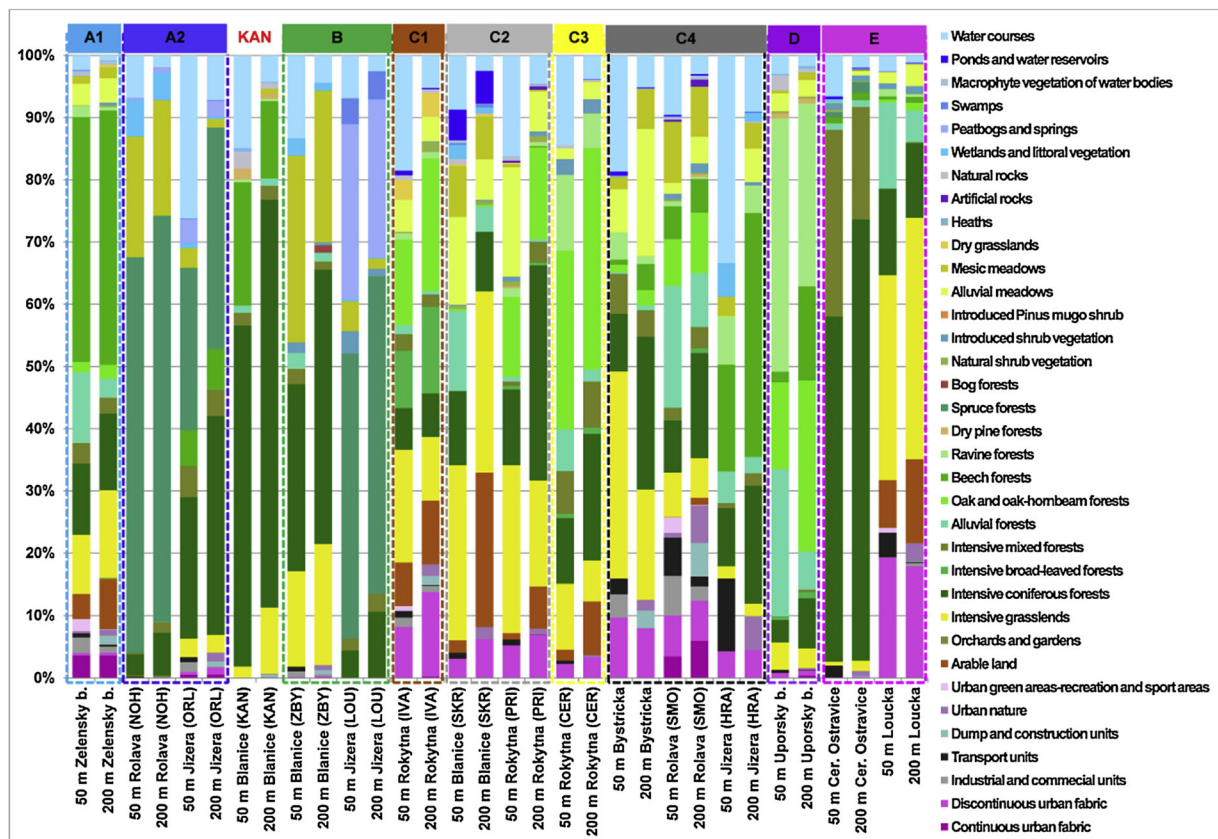


Fig. 9. KVES land cover data at 16 reference sites in 50 m and 200 m buffer zones along main rivers.

be wider. These riparian zones are also heavily forested with minimal human impact. Meandering channels at mid-altitude with a low slope (type C2) are lined with grasslands, with the class of Intensive grasslands dominating, but also with a significant percentage of Alluvial meadows cover. In well-developed floodplains of type C2, the channel itself often covers a significant part of the 50 m buffer zone. Types C3 and D indicate less variability in coverage percentages. For both these types, the percentage of forest cover in the riparian zone is significant. The riparian zone is also affected by Urban areas classes as well. In type C3 the most significant land cover is Intensive grasslands; in contrast, Natural grasslands practically do not occur along these lowland rivers. Type D is distinguished from other river types by its high percentage of Natural forest, including Alluvial forests, and the absence of natural meadows. The class of Intensive grasslands along these lowland rivers with a steep valley floor slope fills the entire farmable part of the riparian zone.

### 5. Discussion

Based on available present, historical, and water management maps and three selected parameters—mean altitude, sinuosity, and valley floor slope—river reaches can be theoretically classified by type quite easily. Field surveys and measurements of characteristics at RSs using the REFCON method (Kujanová and Matoušková, 2017) confirmed that differences between types are clear, but the boundaries between river types, or the threshold values of characteristics, are not always so clear. Schumm (1977); Rosgen (1994); Thorne (1997); Kondolf et al. (2003a), and Rinaldi et al. (2016) assume that boundaries between river types are not clear and propose wide, moving, or fuzzy margins. They also emphasize the importance of local conditions that should always be assessed individually. Rinaldi et al. (2016) mention the possible occurrence of transitional types.

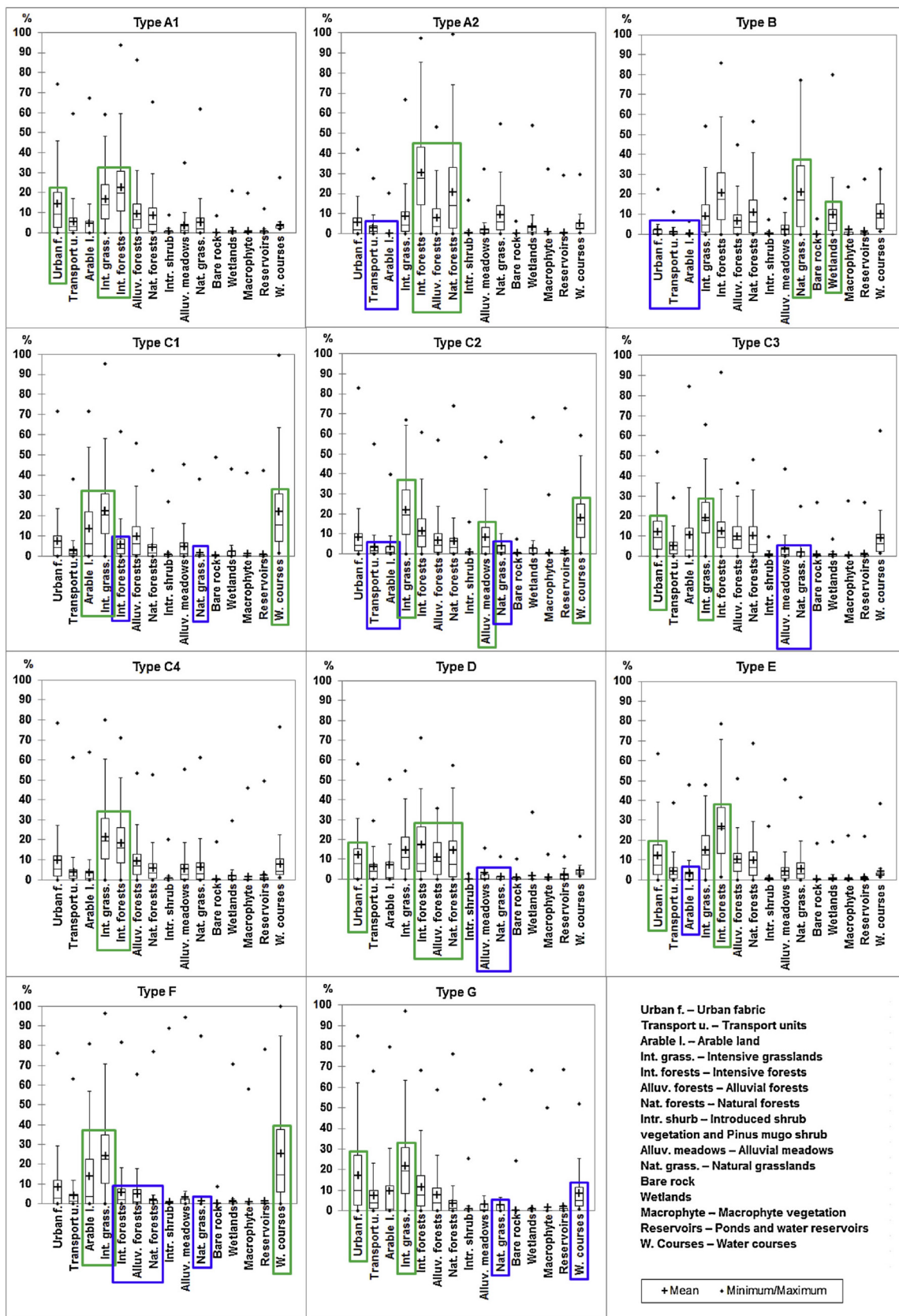
The assumption that rivers cannot be neatly divided into river types

and that accurate, constant threshold values of reference conditions cannot be determined led to attempt to describe the variability of conditions using land cover data. It should contribute to characterizing river types and establishing reference conditions.

Considered river characteristics do not have to be equally important for all river types, and moreover characteristics always need to be assessed as a set because separately assessing characteristics may skew the overall interpretation of types and RSs. Hydromorphological characteristics (e.g., channel pattern, sediment size, bedforms) are closely related to land cover in the riparian zone as confirmed in Fig. 6. Changes in channel pattern and related bedforms in connection with changes in river basin land cover are described by Liébault and Piégay (2002); Zawiejska and Wyźga (2010); Wyźga et al. (2012), and Škarpich et al. (2013, 2016a). Gurnell et al. (2016) give for each type of river planform the indicative proportion of river corridor lateral zones, which are differentiated by vegetation affected by hydrogeomorphological processes. Gurnell and Grabowski (2016) describe the transport of fine sediment to the channel, changes in riverbed structure, channel narrowing, and growth in sinuosity related to land cover, changes to the benefit of agricultural land, and the insufficient width of riparian zones, lacking especially trees. Hupp and Rinaldi (2007) discuss the relationship between fluvial landforms and dominant vegetation types.

The degree to which KVES land cover data contribute to characterizing river types (Figs. 7A, 8) can be sorted into three groups. The **first group** (see Table 5) consists of river types, for which significant KVES land cover classes exist that distinguish a given type from others and at the same time which allow the type to be described using land cover data. These are river types with riparian zones with less anthropogenic impact—types A2, B, C2, C3, and D.

The **second group** consists of river types A1 and E with growing human impact on riparian zones. These channels are at mid-altitude and have steep valley floor slope. Although these river types can be



**Fig. 10.** The relationships between determined river types and KVES land cover classes in the 50 m buffer zone. Green boxes represent KVES land cover classes with significant occurrence, blue boxes with minimal or negligible occurrence. Combination of green and blue highlighted KVES land cover classes differ type from other types (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article).



**Table 5**

Qualitative assessment of relationships between river types and KVES land cover data; ++ significant occurrence, + occurrence, - minimal occurrence, - - negligible occurrence.

River type	Significant KVES land cover classes	
A2	++ Intensive forests ++ Natural forests + Natural grasslands	- Urban fabric - - Transport units - - Arable land
B	++ Natural grasslands + Forests + Wetlands	- - Urban fabric - - Transport units - - Arable land
C2	++ Intensive grasslands + Alluvial meadows + Water courses	- - Transport units - - Arable land - - other Natural grasslands
C3	++ Intensive grasslands + Forests + Urban fabric	- - Natural grasslands - - Alluvial meadows
D	++ Forests (++ Natural forests) + Intensive grasslands + Urban fabric	- - Natural grasslands - - Alluvial meadows
A1	++ Urban fabric ++ Intensive grasslands ++ Forests	
E	++ Urban fabric ++ Intensive forests + Intensive grasslands	- Arable land
C4	+ Intensive grasslands + Forests	
C1	++ Arable land ++ Intensive grasslands ++ Water courses	- Natural grasslands - Intensive forests
F	++ Arable land ++ Intensive grasslands ++ Water courses	- - Natural grasslands - - Forests
G	++ Urban fabric ++ Intensive grasslands	- Water courses - - Natural grasslands

characterized by certain KVES land cover classes, land cover does not particularly contribute to defining them. At lower altitudes the percentage of Urban areas and Agricultural land classes increases substantially. Significant classes in these river types include Intensive forests and Intensive grasslands; in general, these areas are largely forested (Fig. 10). River type C4 can also be included in this group. The diversity of land cover classes in river type C4 reflects the internal variability of characteristics present in this type. There is no question about human influence on the riparian zone—the KVES land cover classes of Intensive grasslands and Intensive forests predominate.

The third group includes river types found in lowland rivers with low slope (C1 and F) flowing through Agricultural land. The significant KVES classes are Arable land and Intensive grasslands (Table 5). The channel itself often covers a significant part of the 50 m buffer zone. Forests and Natural grasslands are hardly present. River type G (straight channels in lowlands with medium valley floor slope) can be included in this group. They are low-order rivers with smaller channel width than river types C1 and F, whose well-developed floodplains provide suitable conditions for heavy settlement. The significant KVES classes are Urban fabric and Intensive grasslands. The riparian zones of these main rivers have been significantly transformed. Land cover contributes very little to characterizing these types; instead it can help reveal modifications to the river network, which are frequently found in river types F and G.

In the past, human activities have been responsible for repeated deforestation and subsequent afforestation in riparian zones in submontane and mountainous regions in Europe (Liébault and Piégay, 2002; Hupp and Rinaldi, 2007; Zawiejska and Wyzga, 2010; Wyzga et al., 2012; Škarpich et al., 2013, 2016a), which had an impact on sediment supply to the channel and in combination with other factors

also influenced channel pattern changes. In the 20th century, arable land in the floodplains and riparian zones of mountainous and submontane regions in Europe was replaced by grazing land; shrubland and riparian forests have also expanded to cover formerly unvegetated surfaces (e.g., gravel bars) as well as the floodplains themselves (Marston et al., 1995; Liébault and Piégay, 2002; Wyzga et al., 2012; Škarpich et al., 2013, 2016a). In the riparian zones of rivers in the humid, temperate Czech Republic, diverse forested ecosystems should predominate (Hupp and Bornette, 2003). Riparian zones with minimal human impact along rivers from the first group are distinguished by a higher percentage of Natural forests; with increasing human impact on riparian zones, Intensive forests come to predominate. The findings of this study confirm the presence of a significant percentage of forest in riparian zones in comparison with other land cover classes, but at the same time also confirm a significant percentage of Agricultural land cover, including Arable land, as well as Urban fabric cover in the riparian zones (50 m buffer) along many reaches. In riparian zones in agricultural landscapes (the third group of river types frequently occurring throughout the whole territory of the Czech Republic), forestation is minimal or insignificant.

Riparian vegetation patterns, even along heavily impacted rivers, provide information about current and ongoing fluvial forms and processes and also reflect the development stage of the channel (Hupp and Rinaldi, 2007; Gurnell et al., 2016), which this study also confirmed. Hupp and Rinaldi (2007) describe the significant impact of channel types in central Italy on vegetation patterns. At the same time, detailed land cover data may be of significance in locating new RSs or excluding unsuitable sites. Detailed surveying of land cover in riparian zones, as a space where the protection of ecological and socioeconomic targets is in balance (Kondolf et al., 2003b; Dufour and Piégay, 2009), is one important criterion for proposing restoration measures for rivers and their management. The discovered similarities and differences in riparian zone land cover in different river types also validate the approach used for establishing the *nearest unmodified types* for reaches in types F and G.

When the considered river characteristics from 16 RSs were expanded to include KVES land cover data, river type classification for each cross-sectional profile was more marked.

River reaches on the territory of the Czech Republic were divided into river types based on values acquired from available maps (Kujanová et al., 2016), and thus a certain amount of generalization was involved. Data recorded at specific RSs in the field, in contrast to those generalized from maps, were collected from relatively short RSs and may therefore differ. One reason is the variability of assessed characteristics in longer reaches, which is the case for valley floor slope at RSs Rolava (SMO) and Loucka. The valley floor slope of the reach of the Rolava River on which RS Rolava (SMO) is located was calculated to be 1.39%. Field measurements made using a surveying level (accuracy 0.005 m) and a rangefinder (accuracy 0.1 m), however, determined a valley floor slope of 1.94%. Similarly, for the entire main river reach on which RS Loucka is located, the valley floor slope was calculated to be 2.90%. Field measurements, however, determined a valley floor slope of 0.92% at the RS in the lower section of this long reach. For establishing river types in larger areas, a certain amount of generalization is necessary. Generalization also arises in defining reaches, that is, in establishing their optimal lengths. For describing RS characteristics, however, more accurate data acquired in the field should be used. But river types should be established using a uniform method applicable to all main river reaches regardless of field measurements at RSs.

Furthermore, it was discovered that river reaches with deeply entrenched channels need to be assessed independently. For example, Hack and Goodlet (1960) state that there may be a relationship between forest type and slope type, but our data were insufficient to test this hypothesis. Deeply entrenched channels often differ fundamentally from each other due to specific local conditions, primarily lithology. Therefore, land cover data (Fig. 9) can be used for deeply entrenched channels as well, but describing them based on land cover data is not

viable.

## 6. Conclusions

Rivers are dynamic systems created by processes and the mutual interaction of processes and forms, which need to be respected. In each assessed reach, there is, therefore, a variability of characteristics, which are difficult to quantify based on their threshold values because the boundaries between river types are never fully distinct. This study dealt with assessing the applicability of detailed land cover data to riparian zones for improving how river types are described and how hydromorphological reference conditions of rivers are established.

KVES land cover data for riparian zones enable categorizing river types based on a set of classes, which contribute to explaining the present environmental conditions (particularly altitude, climate, and anthropogenic impact) under which river types occur, and thus their natural channel behavior as well (valley floor slope, channel slope, channel pattern, valley type, entrenchment ratio). Detailed land cover data thus contribute to characterizing river types and are a suitable addition to hydromorphological characteristics for establishing reference conditions. For river types in riparian zones with no or slight anthropogenic impact (A2, B, C2, C3, D), significant KVES land cover classes were determined that distinguish the given type from the others and which thus allow types to be described using land cover data. KVES land cover data contain valuable information about channel width, which in combination with other land cover characteristics contributes to identifying flow character and planform as well as riverbed structures. Land cover data help when searching for RSs and also contribute to determining the level of anthropogenic impact in the riparian zone, which as a rule has an effect on the river channel itself.

The results of river corridor analyses conducted on a sample of 3937 main river reaches brought new knowledge about anthropogenic impact on riparian zones and about the gradual changes of this impact with distance from the channel and also confirmed that it makes sense to use information about land cover in riparian zones for describing river morphology.

Delimiting river reaches, establishing river types, and analyzing land cover data always involves the simplification of real situations which should help identify natural channel behavior. But at the same time specific local conditions should always be assessed individually (e.g., river reaches consisting of deeply entrenched channels).

## Acknowledgements

This research was realized under the framework of the research projects GAČR 13-32133S “Headwaters retention potential with respect to hydrological extremes”, PROGRES Q44, and SVV 260 438.

This research was realized with the use of Consolidated Layer of Ecosystems created by the Nature Conservation Agency of the Czech Republic and CzechGlobe thanks to project TD010066 “Integrated Assessment of Ecosystem Services in the Czech Republic”.

## References

Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*. Blackwell Publishing, Oxford.

Cebecauerová, M., Lehotský, M., 2012. Komplexita ripariální zóny - příklad rurálního segmentu vodného toku Torysa (Complexity of riparian zone - case study of rural segment of the River Torysa). *Geografický časopis* 64 (2), 133–154.

CEN, 2004. EN 14614:2004 Water Quality—Guidance Standard for Assessing the Hydromorphological Features of Rivers.

Dufour, S., Piégay, H., 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River Res. Appl.* 25, 568–581.

European Commission, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23rd October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. *Off. J. Eur. Communities* L 327/1, Luxembourg.

Gurnell, A.M., Grabowski, R.C., 2016. Vegetation–hydrogeomorphology interactions in a low-energy, human-impacted river. *River Res. Appl.* 32, 202–215.

Gurnell, A.M., Corenblit, D., García de Jalón, D., González del Tánago, M., Grabowski, R.C., O'Haref, M.T., Szewczyk, M., 2016. Conceptual model of vegetation–hydrogeomorphology interactions within river corridors. *River Res. Appl.* 32, 142–163.

Hack, J.T., Goodlett, J.C., 1960. *Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians*. Geological Survey Professional Paper 347. United States government printing office, Washington.

Hey, R.D., 1997. Stable river morphology. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 223–236.

Höningová, I., Chobot, K., 2014. Jemné předivo české krajiny v GIS: konsolidovaná vrstva ekosystémů. *Ochrana přírody* 4, 26–30.

Hupp, C.R., Osterkamp, W.R., 1996. Riparian vegetation and fluvial geomorphic processes. *Geomorphology* 14, 277–295.

Hupp, C.R., Bornette, G., 2003. Vegetation as a tool in the interpretation of fluvial geomorphic processes and landforms in humid temperate areas. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 269–288.

Hupp, C.R., Rinaldi, M., 2007. Riparian vegetation patterns in relation to fluvial landforms and channel evolution along selected rivers of Tuscany (Central Italy). *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 97 (1), 12–30.

Kondolf, G.M., Montgomery, D.R., Piégay, H., Schmitt, L., 2003a. Geomorphic classification of rivers and streams. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 171–204.

Kondolf, G.M., Piégay, H., Sear, D., 2003b. Integrating geomorphological tools in ecological and management studies. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 633–660.

Kondolf, G.M., Piégay, H., Landon, N., 2007. Changes in the riparian zone of the lower Eygues River, France, since 1830. *Landsc. Ecol.* 22, 367–384.

Kujanová, K., Matoušková, M., 2017. Identification of hydromorphological reference sites using the new REFCON method, with an application to rivers in the Czech Republic. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 17 (3), 235–245.

Kujanová, K., Matoušková, M., Kliment, Z., 2016. Hydromorphological parameters of natural channel behavior in conditions of the Hercynian system and the flysch belt of the Western Carpathians on the territory of the Czech Republic. *Geomorphology* 258, 69–81.

Leopold, L.B., Wolman, M.G., Miller, J.P., 1964. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Freeman, San Francisco.

Liébault, F., Piégay, H., 2002. Causes of 20<sup>th</sup> century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surf. Process. Landforms* 27, 425–444.

Marston, R.A., Guy Pautou, J.G., Piégay, H., Bravard, J.-P., Arneson, C., 1995. Channel metamorphosis, floodplain disturbance, and vegetation development: Ain River, France. *Geomorphology* 13, 121–131.

Matoušková, M., 2008. Assessment of the river habitat quality within European water framework directive: application to different catchments in Czechia. *Geografie* 113 (3), 223–236.

NCA CR, 2013. Consolidated layer of ecosystems [ESRI shapefile]. Detailed Land use/Land Cover Data in 41 Classes Over the Entire Territory of the Czech Republic. Version 2013. Nature Conservation Agency of the Czech Republic, Prague.

Osterkamp, W.R., Hupp, C.R., 1984. Geomorphic and vegetative characteristics along three Northern Virginian streams. *Geol. Soc. Am. Bull.* 95, 1093–1101.

Rinaldi, M., Surian, N., Comiti, F., Bussetini, 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.

Rinaldi, M., Gurnell, A.M., González del Tánago, M., Bussetini, M., Hendriks, D., 2016. Classification of river morphology and hydrology to support management and restoration. *Aquat. Sci.* 78, 17–33.

Rosgen, D.L., 1994. A classification of natural rivers. *Catena* 22, 169–199.

Schumm, S.A., 1977. *The Fluvial System*. John Wiley & Sons, New York.

Schumm, S.A., 1985. Patterns of alluvial rivers. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 13, 5–27.

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.

Škarpich, V., Kašpárek, Z., Galia, T., Hradecký, J., 2016a. Anthropogenic impact and morphology channel response of Beskydian gravel-bed rivers: a case study of the Ostravice River, Czechia. *Geografie* 121 (1), 99–120.

Škarpich, V., Horáček, M., Galia, T., Kapustová, V., Šála, V., 2016b. The effects of river patterns on riparian vegetation: a comparison of anabranching and single-thread incised channels. *Morav. Geogr. Rep.* 24 (3), 24–31.

Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Am. Geophys. Union* 38 (6), 913–920.

Swanson, F.J., Kratz, T.K., Caine, N., Woodmansee, R.G., 1988. Landform effects on ecosystem patterns and processes. *BioScience* 38 (2), 92–98.

Thorne, C.R., 1997. Channel types and morphological classification. In: Thorne, C.R., Hey, R.D., Newson, M.D. (Eds.), *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 175–222.

Vannote, R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R., Cushing, C.E., 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37, 130–137.

Vaughan, I.P., Diamond, M., Gurnell, A.M., Hall, K.A., Jenkins, A., Milner, N.J., Naylor, L.A., Sear, D.A., Woodward, G., Ormerod, S.J., 2009. Integrating ecology with hydrogeomorphology: a priority for river science and management. *Aquat. Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst.* 19 (1), 113–125.

Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Trans. Am. Geophys. Union* 35 (6), 951–956.

Wyźga, B., Zawiejska, J., Radecki-Pawlik, A., Hajdukiewicz, H., 2012. Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 1213–1226.

Zawiejska, J., Wyźga, B., 2010. Twentieth-century channel change on the Dunajec River, southern Poland: patterns, causes and controls. *Geomorphology* 117, 234–246.

## **PŘÍLOHY**

- 1. Typově specifické referenční podmínky z pohledu hydromorfologie pro vodní toky na území ČR**
- 2. Metoda REFCON**
- 3. Typy vodních toků stanovené pro úseky vodních útvarů v kategorii řeka**