

Retenční potenciál bobřích hrází z hlediska akumulace povrchové vody v české krajině

ADAM BABULJAK, MIROSLAV BAUER, MARTIN DOČKAL, PETR KOUDELKA, JITKA UHLÍKOVÁ, JAN MOKRÝ, ALEŠ VOREL, TOMÁŠ DOSTÁL

Klíčová slova: bobr evropský – ekosystémový inženýr – retence vody – bobří hráz – hydrologický režim – GIS analýza – modelování kapacity bobřích hrází – mokřady – management krajiny

ABSTRAKT

Bobr evropský (*Castor fiber*) je významným ekosystémovým inženýrem, který svou aktivitou mění hydrologický režim krajiny. Cílem studie bylo kvantifikovat objem povrchové vody zadržené bobřími hrázemi v české krajině a odhadnout potenciální retenční kapacitu vybraného povodí při maximálním předpokládaném rozsahu bobřího osídlení. Hlavním předmětem výzkumu bylo stanovení objemu povrchové vody akumulované 150 bobřími hrázemi na lokalitách v Plzeňském kraji (v povodí Křemelné a deseti dalších vybraných mokřadech) a stanovení zatopené plochy jejich bobřích zdrží. K výpočtům byly využity GIS analýzy založené na kombinaci přesných geodetických dat a digitálního modelu terénu. Pro povodí Chlístovického potoka (IV. řád, 13,8 km²) byl dále aplikován model kapacity bobřích hrází vycházející z principů fuzzy logiky a parametrů, jako jsou sklon toku, šířka koryta, síla proudu a dostupnost břehové vegetace s cílem odhadnout reálné množství vody, které může být zadrženo bobřími hrázemi v zájmovém území za předpokladu plného osídlení předmětného povodí bobry.

Výsledky terénních měření prokázaly, že 150 sledovaných hrází zadržuje celkem 31 321 m³ povrchové vody, z toho 89 hrází v povodí Křemelné zadržuje na ploše 169 km² 12 389 m³ povrchové vody. Rozdělení objemů vykazuje výraznou pravostrannou asymetrii (medián 41,0 m³, průměr 208,8 m³), což potvrzuje, že drtivá většina hrází zadržuje relativně malé objemy, zatímco zásadní podíl na celkovém zadrženém objemu má malý počet velkých bobřích zdrží – 3 % největších zdrží akumulují 54 % celkového objemu. Obdobný charakter vykazovalo také rozdělení zatopených ploch bobřích zdrží, jejichž celková výměra dosáhla 98 586 m². Mediánová zatopená plocha jedné bobří zdrže činila pouze 168,9 m² oproti průměrné hodnotě 657,2 m² a čtyři největší zdrže tvořily 53 % celkové zatopené plochy. Modelování v povodí Chlístovického potoka o ploše 13,8 km² identifikovalo téměř 6 km vodních toků vhodných pro kolonizaci bobrem. Při plném osídlení model predikuje vznik 13 až 43 hrází. Na základě zjištěných objemů z experimentálních lokalit lze v povodí Chlístovického potoka očekávat povrchovou akumulaci v řádu stovek až jednotek tisíc m³ vody. Významná část retence však probíhá i v podzemní složce, což dále zvyšuje celkový hydrologický přínos. Ekologický význam by mohl představovat vznik bobřích zdrží o celkové ploše v řádu jednotek až nižších desítek tisíc m², poskytující prostor pro rozvoj mokřadních stanovišť. Studie dokládá, že bobří hráze představují významný prvek přírodě blízké retence vody v krajině, jejich význam ale akumulací povrchové vody zdaleka nekončí. Bobří hráze přispívají mimo jiné také k ukládání sedimentů, ke stabilizaci odtokových poměrů a zvýšení ekologické stability krajiny, a proto je žádoucí jim v krajině poskytnout odpovídající prostor.

ÚVOD

Bobr evropský je původním druhem evropské krajiny, jenž historicky obýval rozsáhlá území od Britských ostrovů po východní Sibiř. Intenzivní lov však vedl téměř k jeho vyhubení a na konci 19. století byla evropská populace odhadována pouze na přibližně 1 200 jedinců v osmi izolovaných populacích [1]. Díky ochraně druhu a reintrodukčním programům dochází od 20. století k jeho postupnému návratu a okolo roku 2020 byla evropská populace odhadována již na přibližně 1,5 milionu jedinců [2]. Podobný vývoj proběhl i v České republice (ČR), kde byl bobr po úplném vyhubení znovu zaznamenán v roce 1977 na soutoku Dyje a Kyjovky a jeho populace od začátku 21. století rychle roste [3, 4]. V roce 2020 byla početnost populace v ČR odhadována přibližně na 15 000 jedinců [5, 6].

Bobři jsou často označováni za „ekosystémové inženýry“ díky své schopnosti měnit prostředí stavbou hrází [7], což při rychlém růstu populace vede ke konfliktům s člověkem, ale také k řadě pozitivních efektů. Bobří hráz je konstrukce z přírodních materiálů sloužící k přehrazení vodního toku. Nad hrází vzniká bobří zdrž, tedy objem akumulované vody měnící charakter toku z proudícího na stojatý. Hráze a zdrže často vytvářejí kaskády vedoucí k rozlivu vody do okolní nivy. Tyto komplexy následně tvoří takzvaný bobří mokřad (Obr. 1 a Obr. 2) [6, 8]. Přestože hráze a jimi vytvořené zdrže primárně slouží jako ochrana před predátory a zajištění přístupu k potravě [9], významně ovlivňují také hydrologický režim krajiny. Zpomalují proudění, podporují sedimentaci, posilují interakce mezi povrchovou a podzemní vodou a zvyšují zásoby povrchové i podzemní vody [10–12].

Přínosy bobří činnosti však přesahují samotné zadržování vody. Stavba hrází přispívá k obnově přírodě blízkých říčních pásů a k přirozené členitosti niv, podporuje samovolnou renaturaci technicky upravených vodních toků a omezuje negativní účinky zemědělských nebo lesnických odvodňovacích zařízení [6, 13–15]. Nově vznikající mokřadní biotopy posilují stanovištní pestrost a biodiverzitu, k čemuž přispívá skutečnost, že bobři svou činností ve vodních tocích zvyšují množství ekologicky cenného mrtvého dřeva [6, 13, 16, 17].

Hlavním předmětem této studie je stanovení objemu povrchové vody, který bobří hráze zadrží. Naprostá většina studií, jež se tomuto tématu věnují, pochází ze Severní Ameriky a ukazuje, že bobří hráze výrazně zvyšují objem vody akumulovaný ve vodních tocích a mokřadech [18–20]. Beedle [18] např. zjistil, že bobří zdrže na Aljašce zadržovaly až 37krát více vody než přirozené úseky vodních toků, přičemž objemy jednotlivých zdrží dosahovaly od desítek po více než 11 000 m³. Karran et al. [19] na čtyřech lokalitách v Severní a Jižní Americe stanovili objemy zdrží v rozsahu 1–9 001 m³. Také ojedinělé evropské studie potvrzují významný retenční efekt bobřích hrází, např. v povodí Krzemianka v Polsku byl celkový objem vody zadržené 22 bobřími hrázemi odhadnut na 15 000 m³ [21].

Kromě zadržených objemů tato studie kvantifikuje také zatopenou plochu bobřích zdrží, která je významná nejen z hydrologického hlediska, ale i z hlediska ekologického, protože větší rozsah bobřích mokřadů je spojen s vyšší druhovou bohatostí a abundancí ptáků a současně rozšiřuje nabídku lentických a litorálních stanovišť v nivě [22, 23].

Přestože chování bobrů a vývoj jejich teritorií nelze spolehlivě predikovat, na základě určitých parametrů je možné stanovit vhodnost území pro potenciální osídlení bobry [24]. Výzkumy ukazují souvislosti mezi výskytem bobrů a charakteristikami vodních toků, jako jsou sklon, šířka koryta nebo dostupnost břehové vegetace [25]. Na těchto poznatcích vznikají prostorové modely umožňující predikovat kapacitu prostředí pro stavbu hrází [26]. Tyto modely se dále využívají i pro odhady potenciální retence vody v krajině. Např. studie ze Sierra Nevady v Kalifornii odhadla, že bobří hráze by zde mohly akumulovat až 120 milionů m³ povrchové vody a současně přispět ke zvýšení odolnosti krajiny vůči požárům [27].

V naší studii jsme pomocí přesných geodetických metod stanovili objem povrchové vody akumulovaný 150 bobřími hrázemi v povodí Křemelné a na deseti dalších vybraných mokřadech v Plzeňském kraji, převážně na Šumavě, s cílem přispět k hodnocení významu

bobra v naší krajině na základě reálných čísel. Součástí vyhodnocení byla také zatopená plocha bobřích zdrží. Současně jsme modelovali potenciální počet hrází, které by mohly vzniknout ve vybraném povodí IV. řádu při kolonizaci území bobry a při minimálním omezení bobří aktivity člověkem. Na základě těchto výsledků jsme kvantifikovali, kolik vody by v povodí mohli bobři svou činností zadržet.

Cílem studie tak bylo rozšířit poznání v oblasti kvantifikace pozitivních přínosů bobřího osídlení z hlediska zadržování povrchové vody v krajině, která je jedním z předpokladů pro efektivní management bobra evropského a objektivní hodnocení konfliktů spojených s jeho výskytem. Retence povrchové vody je přitom pouze jedním z přínosů bobřích hrází, na který navazuje řada dalších hydrologických a ekologických procesů. Vedle zadržování vody a sedimentů mohou bobří stavby přispívat např. k podpoře průtoků během období sucha, zlepšení mikroklimatu, ke vzniku cenných mokřadních biotopů nebo zvýšení množství mrtvého dřeva ve vodních tocích [11, 18, 28].



Obr. 1. Dronový snímek mokřadu na Litohlavském potoce zobrazuje dvě hráze a přilehlé zdrže tvořící kaskádu a mokřad, který vznikl na pravém břehu potoka (foto: T. Laburda)

Fig. 1. Drone image of a beaver wetland on the Litohlavský potok stream showing two beaver dams and associated beaver ponds forming a cascade and a wetland that developed on the right bank of the stream (photo: T. Laburda)



Obr. 2. Mokřad na Litohlavském potoce při pohledu proti vodě; hlavní bobří hráz (vpravo) rozlévá vodu mimo koryto a vytváří mokřad (vlevo) (foto: A. Babuljak)

Fig. 2. Beaver wetland on the Litohlavský potok stream, viewed upstream; the main beaver dam (right) causes water to flow outside the stream channel, creating a wetland (left) (photo: A. Babuljak)

METODIKA

V povodí Křemelné na Šumavě, kde se v geograficky a hydrologicky uceleném území v době průzkumu na jaře 2023 nacházelo 89 bobřích hrází, a na 10 vybraných bobřích mokřadech v Plzeňském kraji, byly pomocí přesného geodetického zaměření v terénu stanoveny objemy povrchové vody, které tyto hráze zadržují, a zatopené plochy bobřích zdrží. V povodí Chlístovického potoka byl dále modelován potenciální výskyt bobřích hrází z hlediska vhodnosti jednotlivých úseků vodních toků pro jejich stavbu.

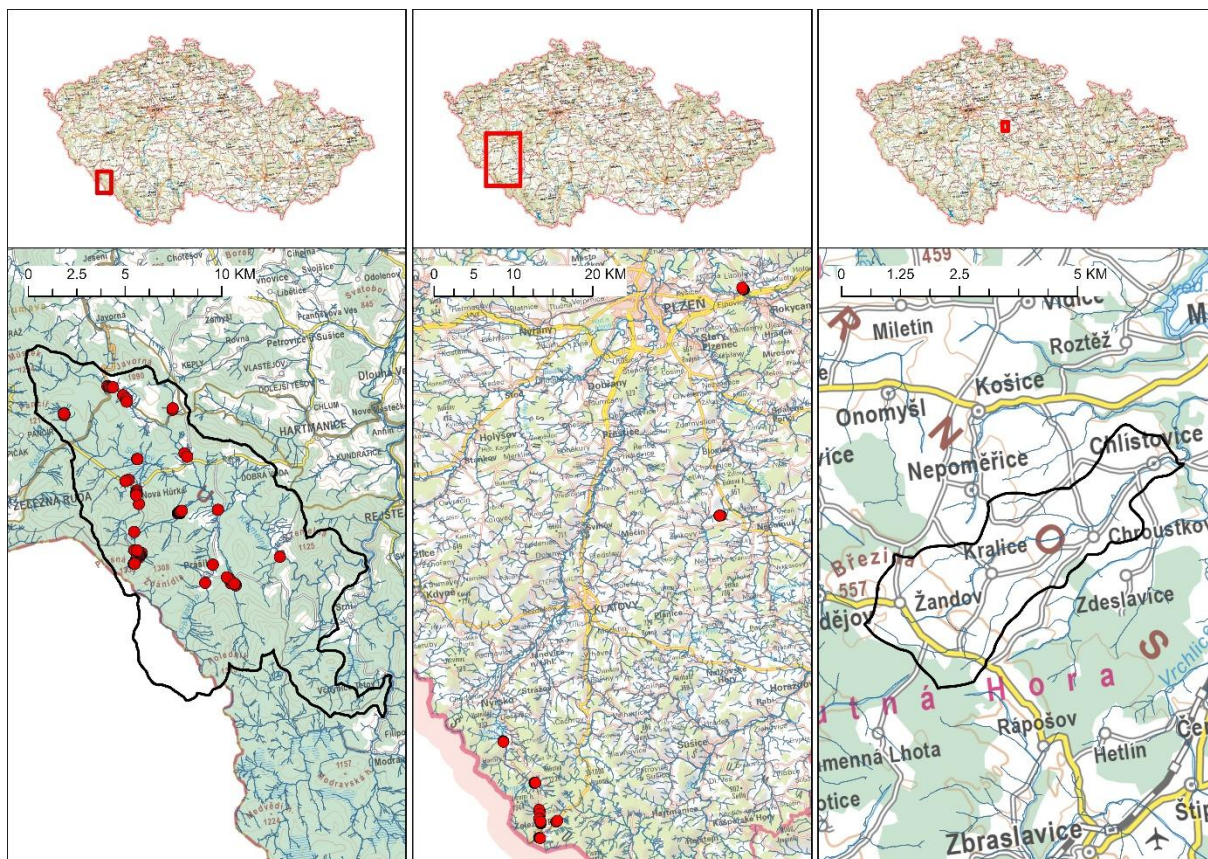
Řešené lokality

V rámci studie byly řešeny tři lokality, jež jsou znázorněny na Obr. 3. Terénní měření a stanovení skutečných objemů vody zadržené bobřími hrázemi a zatopených ploch jejich zdrží bylo provedeno na 89 bobřích hrázích v povodí Křemelné a na 10 bobřích mokřadech na Železnorudsku, Úslavě a Voldušském potoce.

Povodí Křemelné bylo vybráno ve spolupráci s NP Šumava pro účely studie „*Terénní měření a mapování bobřích hrází v povodí Křemelné*“ [29] jako příklad krajiny, kde je přítomnost bobrů jen zcela minimálně omezena člověkem. Zkoumány byly všechny známé bobří hráze v rámci povodí od malých zdrží v korytech vodních toků po rozsáhlé zdrže tvořící mokřady v potočních nivách. Díky tomu výzkum v povodí Křemelné poskytl ucelený obrázek o charakteru bobřích hrází a zdrží v regionálním měřítku.

10 vybraných mokřadů v Plzeňském kraji bylo vybráno ve spolupráci s AOPK pro účely studie „*Vliv bobrů na ekosystémy říční krajiny*“ [30] jako příklady území reprezentující cílový stav vývoje toku a jeho blízkého okolí po osídlení bobrem. Jedná se o mokřady s různým počtem, charakterem a velikostí bobřích hrází a přilehlých zdrží, v průměru jde ale spíše o rozlehlejší bobří zdrže než v povodí Křemelné.

Třetí lokalita, povodí Chlístovického potoka, byla využita pro modelování kapacity bobříh hrází. Tato úloha byla řešena v rámci projektu „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu“, kde bylo povodí Chlístovického potoka využíváno pro další modelování v oblasti retence vody v krajině a srážkoodtokových vztahů, a proto bylo vybráno také pro účel modelování kapacity potenciálních bobříh hrází.



Obr. 3. Řešené lokality – vlevo povodí Křemelné, uprostřed deset vybraných mokřadů v Plzeňském kraji, vpravo povodí Chlístovického potoka (podkladové mapy: Základní topografická mapa ČR ČÚZK)

Fig. 3. Study sites – left: the Křemelná River catchment; centre: ten selected beaver wetlands in the Plzeň Region; right: the Chlístovický potok catchment (basemaps: Basic Topographic Map of the Czech Republic, Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre; ČÚZK)

Povodí Křemelné

Zaměření a stanovení skutečného objemu vody akumulovaného bobřími hrázemi a zatopených ploch bobříh zdrží bylo realizováno v povodí řeky Křemelné v NP Šumava. Zájmové území, jehož páteřním tokem je řeka Křemelná s délkou přesahující 30 km, leží v severozápadní části parku, převážně na území ČR, okrajově však zasahuje i do Německa. Celková rozloha povodí činí přibližně 169 km², což odpovídá asi jedné čtvrtině rozlohy NP Šumava.

Vlivem orografických podmínek dosahují srážkové úhrny v povodí dlouhodobě nadprůměrných hodnot (srážkoměrná stanice Prášily uvádí průměrný roční úhrn srážek v letech 1991 až 2020 1 413,7 mm), což se projevuje dostatkem vody a hustou hydrografickou sítí. Ta zahrnuje jak bystřinné úseky v zaříznutých horských údolích, tak meandrující drobné vodní toky na náhorních plošinách.

Vodní toky a jejich nivy si díky vysokému stupni ochrany i historicky omezené antropogenní činnosti zachovaly relativně přirozený charakter. Tyto podmínky vytvářejí vhodné prostředí pro bobra evropského, jehož populace zde prosperuje a svou činností dále zvyšuje retenční kapacitu krajiny.

Správa NP Šumava v území dlouhodobě provádí monitoring aktivity bobra evropského. Výsledná data z tohoto monitoringu jsme využili k identifikaci lokalit s výskytem bobřích hrází, jež jsme následně podrobili terénnímu šetření.

Jedna z bobřích hrází v povodí Křemelné poblíž osady Mechov je zachycena na Obr. 4.



Obr. 4. Jedna z největších bobřích hrází a přilehlých zdrží v povodí Křemelné, součást mokřadu u osady Mechov (foto: A. Babuljak)

Fig. 4. One of the largest beaver dams and associated beaver ponds in the Křemelná catchment, forming part of the wetland near the Mechov settlement (photo: A. Babuljak)

Deset bobřích mokřadů v Plzeňském kraji

Stanovení skutečných objemů vody zadržené bobřími zdržemi proběhlo také na 10 vybraných bobřích mokřadech v Plzeňském kraji. Osm z nich bylo vybráno v okolí Železné Rudy, v povodí Řezné a v povodí Úhlavy, která sousedí s povodím Křemelné. Tyto mokřady se nacházejí mimo území národního parku a lokality jsou zde více ovlivněny lidskou činností než v povodí Křemelné, přesto je zde ochrana přírody posílena statutem CHKO Šumava.

Zbývající dva sledované mokřady se nacházely na řece Úslavě u obce Prádlo a na Voldušském potoce u Litohlav. Obě lokality již leží mimo chráněná území, v typické české zemědělské krajině. Zatímco mokřad na Úslavě vznikl v otevřené krajině, mokřad na Voldušském potoce se nachází částečně v lesním prostředí. 10 sledovaných mokřadů zahrnovalo celkem 61 dílčích, často přímo navazujících bobřích zdrží.

Jedna ze čtyř hrází, které tvoří bobří mokřad na řece Úslavě, je zachycena na Obr. 5.



Obr. 5. Jedna ze čtyř hrází tvořících bobří mokřad na řece Úslavě u obce Prádlo (foto: A. Babuljak)

Fig. 5. One of the four dams that make up the beaver wetland on the Úslava River near the village of Prádlo (photo: A. Babuljak)

Povodí Chlístovického potoka

Modelování potenciálního výskytu bobřích hrází bylo provedeno v povodí Chlístovického potoka. Jde o povodí IV. řádu o rozloze 13,8 km² s výrazně zemědělským charakterem. Povodí se nachází ve Středočeském kraji nedaleko obce Malešov. Hlavním vodním tokem povodí je Chlístovický potok, levostranný přítok řeky Vrchlice, do níž se vlévá u Malešova přibližně 3 km nad začátkem vzdutí vodní nádrže Vrchlice.

Vyhodnocování zadržených objemů a zatopených ploch

Objem vody zadržený skutečnými hrázemi v experimentálních lokalitách a zatopená plocha bobřích zdrží byly určeny analýzou výstupů geodetického zaměření s využitím nástrojů GIS.

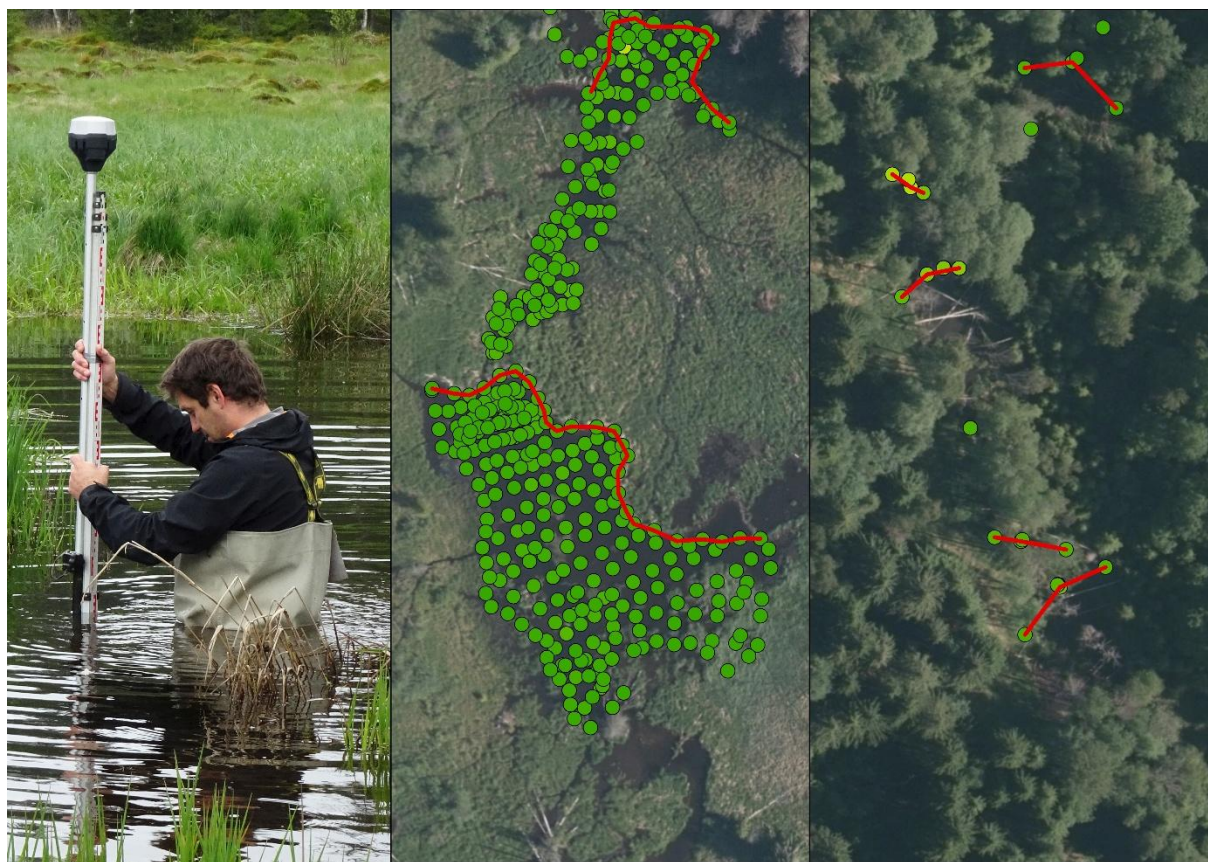
Zaměření

Geodetické měření bobřích hrází a zdrží v povodí Křemelné proběhlo na jaře roku 2023, měření bobřích mokřadů na Železnorudsku, Úslavě a Voldušském potoce na jaře let 2024 a 2025. Geodetické měření bylo provedeno pomocí tří přesných GPS zařízení. Na všech lokalitách byly využity GPS Emlid Reach RS+ a Emlid Reach RS2, v povodí Křemelné byl navíc použit přístroj GPS CHC X91.

V povodí Křemelné bylo zaměřeno celkem 89 bobřích hrází a jejich zátop. U převážné většiny hrází byla trojbodově zaměřena hráz (levé zavázání, pravé zavázání, střed koruny), dále bylo zaměřeno dno pod hrází, v zátopě nad hrází a kraj zátopy na přítoku. Několik hrází s komplikovaným tvarem zátopy nebo linií hráze bylo zaměřeno podrobněji, pro pět vybraných hrází byly podrobně proměřeny i zdrže včetně hloubek pro validaci GISové metody k určení zadržených objemů (Obr. 6). Celkem bylo v povodí Křemelné zaměřeno 1 445 bodů.

Na 10 vybraných mokřadech na Železnorudsku, Voldušském potoce a na Úslavě bylo zaměřeno dohromady 61 bobřích hrází a jejich zátop. Byly zaměřeny linie hrází, obvody zátop

i hloubky vody ve zdržích. Na rozdíl od povodí Křemelné se díky morfologickým podmínkám jednalo většinou o větší zdrže. Celkem bylo v těchto lokalitách zaměřeno 3 716 bodů.



Obr. 6. Zaměření bobřích zdrží a hrází – vlevo systém měření pomocí GPS a odečítání hloubky vody, uprostřed podrobné zaměření zdrže bobřích hrází, vpravo zjednodušené zaměření bobřích hrází a kraje zátop (foto: A. Babuljak; podkladové mapy: Ortofoto České republiky ČÚZK)

Fig. 6. Surveying of beaver ponds and dams – left: GPS-based surveying system and water depth measurements, centre: detailed survey of a beaver pond, right: simplified survey of beaver dams and inundation boundaries (photo: A. Babuljak; basemap: Orthophoto of the Czech Republic, Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre; ČÚZK)

GIS nástroje

Na základě terénního GPS měření popsaného v předchozí kapitole byly pro stanovení objemu vody zadržené bobřími hrázemi aplikovány GIS analýzy ve dvou experimentálních lokalitách. Použité přístupy vycházejí ze společného principu kombinace přesných geodetických dat s digitálním modelem terénu (DMR), přičemž jejich konkrétní implementace byla přizpůsobena charakteru jednotlivých lokalit a dostupnosti dat.

Pro 89 hrází v povodí Křemelné zaměřených na jaře 2023 byla použita metoda stanovení objemu pomocí GIS založená na kombinaci linií bobřích hrází zaměřených pomocí přesné GPS a podrobného digitálního modelu terénu reprezentujícího stav před vznikem zdrží. Linie hrází byly odvozeny z geodetického zaměření, použit byl přesný DMR s jemným prostorovým rozlišením, jenž zachycuje morfologii dna zdrže (LIDAR DTM v rozlišení 50 x 50 cm z roku 2017, který byl pro NPŠ zpracován německými partnery v rámci společného přeshraničního projektu).

Linie hrází byly v prostředí GIS převedeny do rastrové podoby a na jejich základě byla určena úroveň hladiny v jednotlivých zátopách jako nejvyšší hodnota úrovně terénu v rámci linie bobří hráže (pravidelně v levém nebo pravém závězu hráže). Dále byl vymezen rozsah přispívajících povodí tak, aby jednotlivé zdrže byly hodnoceny odděleně i v případě bezprostředně na sebe navazujících zdrží v kaskádách. Rozsah jednotlivých zátop byl poté stanoven jako průnik přispívajících povodí a ploch s úrovní terénu pod stanovenou úrovní hladiny.

Samotný výpočet objemu spočíval v porovnání výšky hladiny s digitálním modelem terénu v rámci vymezené zátopy, z čehož byla odvozena prostorová distribuce hloubek. Celkový objem vody byl následně stanoven jako suma dílčích objemů odpovídajících jednotlivým prvkům rastru. Tento postup byl implementován formou skriptu v jazyce Python v prostředí ArcGIS Pro, což umožnilo efektivní zpracování většího množství hrází i generování doprovodných rastrových výstupů.

Metoda byla validována na základě podrobného geodetického zaměření pěti hrází. U těchto hrází bylo provedeno podrobné proměření hloubek v zátopě i detailní zaměření obvodu a koruny hráže, objem byl stanoven metodou Thiessenových poligonů a porovnán s hodnotou určenou na základě GIS analýzy hrázových linií a modelu terénu. Srovnání potvrdilo vhodnost užití této metody pro účely stanovení objemu povrchové vody zadržené bobřími hrázemi.

Pro stanovení objemu, který zadrží 61 hrází v rámci bobřích mokřadů na Železnorudsku, na Úslavě a na Voldušském potoce, byla metoda mírně upravena, a to ze dvou důvodů: bobří hráže v těchto lokalitách v některých případech vytvořily rozlehlé mokřady s více úrovněmi hladiny v mokřadní nivě, což původní metoda nebyla schopná reflektovat. Druhým důvodem bylo podrobnější zaměření obvodů zátop i hloubek vody v oblastech zátop a snaha o zahrnutí těchto hodnot do přesnějšího výpočtu. Pro optimální využití výstupů zaměření a zahrnutí proměnlivé úrovně hladiny byla aplikována modifikovaná metoda kombinující bodová měření hloubek s digitálním modelem terénu DMR 5G v rozlišení 1 x 1 m.

Z naměřených hloubek a odpovídajících výšek digitálního modelu terénu byla odvozena úroveň hladiny v jednotlivých bodech, jež byla následně interpolována do spojitého rastru úrovně hladiny. Porovnáním této hladiny s modelem terénu byla získána prostorová distribuce hloubek a následně i objem vody a zatopená plocha jednotlivých zdrží. Metoda tak zachovává vysokou přesnost v místech, kde jsou k dispozici přímá měření, a současně minimalizuje nejistoty spojené s řídkou pokrytí partiemi s obtížně přístupným terénem nebo příliš velkou hloubkou z hlediska zajištění bezpečí měřičského týmu.

Modelování potenciálního výskytu bobřích hrází

Na základě zahraničních modelů byl v prostředí ArcGIS Pro vytvořen model kapacity bobřích hrází přizpůsobený českým datovým zdrojům. Výstupem modelu je klasifikace dílčích úseků vodních toků podle potenciálního počtu bobřích hrází, jež na nich mohou vzniknout po osídlení bobry. Každému úseku je přiřazena příslušná kategorie spolu s odhadem minimálního a maximálního očekávaného počtu hrází.

Model kapacity bobřích hrází použitý pro povodí Chlístovického potoka vychází z britského modelu, který byl odvozen z amerického modelu BRAT (Beaver Restoration Assessment Tool). Tento americký model vytvořil vědecký tým vedený Williamem W. Macfarlanem [26], následně byl opakovaně validován v několika lokalitách v Severní Americe [14, 31] a využit v řadě studií [27, 32, 33]. V evropských podmínkách byl model upraven týmem vedeným Hughem A. Grahamem z University of Exeter [24], přičemž z této úpravy vychází i model aplikovaný na povodí Chlístovického potoka.

Studie Graham et al. [24] představuje modely BFI (Beaver Foraging Index) a BDC (Beaver Dam Capacity), které byly vyvinuty, validovány a aplikovány na britských povodích Tay, Otter a Coombeshead. Model BFI klasifikuje dostupnost vegetace pro potravu a stavbu

hrází ve dvou klíčových zónách: v bezprostřední blízkosti břehu (10 m) a v širším břehovém pásmu (40 m). Výstupy BFI jsou následně využity jako jeden ze vstupů pro model BDC, který dále analyzuje podélný sklon koryta a sílu vodního proudu (stream power) při nízkých (Q80% – 80% kvantil) i vysokých (Q2% – 2% kvantil) průtocích, čímž hodnotí schopnost bobří hráze postavit a jejich potenciální odolnost vůči povodním. K integraci těchto proměnných model využívá systém fuzzy inference (FIS). Hlavním výstupem BDC je klasifikace úseků do kategorií teoretické maximální kapacity, jež jsou vyjádřeny prostřednictvím intervalů počtu hrází na kilometr vodního toku.

Validaci Graham et al. [24] provedli porovnáním predikcí s daty z terénního průzkumu zahrnujícího 258 km vodních toků a 89 identifikovaných bobřích hrází.

Model použitý pro povodí Chlístovického potoka zachovává stejné parametry a principy fuzzy logiky jako britský model, liší se však ve vstupních datech, která byla v původní verzi částečně specifická pro území Velké Británie. Další úpravou je zavedení dvou limitních hodnot: maximální šířky vodního toku a minimálního průtoku Q80%. Podle Hartman et al. [34] bobří staví hráze téměř výhradně na vodních tocích užších než 6 m; v případě Chlístovického potoka se sice takto široké toky nevyskytují, omezení však slouží k vyloučení malých vodních nádrží. Druhou zavedenou limitní hodnotou byl minimální průtok, což reflektuje skutečnost, že bobří budují hráze pouze na vodních tocích s celoročním průtokem, zatímco občasné vodoteče vhodné nejsou. Úseky vodních toků, které některou z limitních hodnot nesplňovaly, byly v modelu automaticky klasifikovány jako „none“ (žádné), tedy s nulovou kapacitou pro výstavbu bobřích hrází. Jednotlivé parametry a použitá vstupní data jsou shrnuty v ***Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.***

Tab. 1. Vstupní parametry modelu kapacity bobřích hrází

Tab. 1. Input parameters of the beaver dam capacity model

Parametr	Vstupní data	Způsob odvození / Poznámka
Síť vodních toků	Jemné vodní toky – DIBAVOD	Vodní toky byly přijaty z databáze DIBAVOD, úseky delší než 100 m byly dále děleny na poloviny, dokud všechny dílčí úseky nebyly kratší než 100 m.
Sklon vodního toku	DMR 5G	Odvození zonální statistikou modelu terénu pro každý dílčí úsek vodního toku.
Síla vodního proudu Q2% a Q80%	DMR 5G, Denní data limnigrafických stanic ČHMÚ	Síla vodního proudu pro nízký průtok Q80% a vysoký průtok Q2% byla odvozena na základě sklonu terénu a odhadovaných průtoků Q80% a Q2%. Odhad průtoků byl stanoven analýzou řad denních průtoků ČHMÚ, kdy pro 7 stanic v regionu s plochou povodí do 100 km ² byly stanoveny hodnoty Q2% a Q80% a pro Q2% i Q80% pak byly stanoveny regionální regresní rovnice v závislosti na ploše povodí. Pro každý úsek vodního toku byla stanovena plocha zdrojového povodí a aplikací regresních rovnic pak byly stanoveny odhady průtoků Q2% a Q80%.
Vegetace	Copernicus Tree Cover Density	Na základě TCD byla určena průměrná hustota stromového porostu pro přímé okolí vodního toku (do 10 m – pro stavbu hrází) a pro blízké okolí vodního toku (do 40 m – pro potravu), ta byla dále klasifikována do kategorií dle Graham et al. [24]. TCD sice nereflektuje druhovou skladbu porostu, což u jehličnatých lesů může vést k zavádějícím výsledkům,

		pro povodí Chlístovického potoka s listnatými a smíšenými lesy je však tento dataset vhodný.
Šířka vodních toků	ZABAGED	U drobných toků byl přijat předpoklad, že jsou užší než 6 m. U širších toků a úseků protínajících vodní nádrže byla šířka stanovena GIS analýzou polygonové vrstvy vodních ploch.
Minimální průtok	Denní data limnigrafických stanic ČHMÚ	Limitní hodnota Q80% stanovená jako $10 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ byla porovnávána s hodnotami Q80% určenými v rámci stanovení síly vodního proudu (viz výše).

Aplikací modelu kapacity bobřích hrází byly jednotlivé úseky vodních toků v povodí Chlístovického potoka rozděleny do čtyř kategorií podle potenciální četnosti bobřích hrází v případě kolonizace povodí bobrem. Každá kategorie představuje rozsah maximální a minimální četnosti bobřích hrází na kilometr, kterou je možné očekávat při kolonizaci vodního toku bobrem. Výstupem modelu je tedy následná kategorizace a rozmezí předpokládaného počtu bobřích hrází převzatá ze studií Graham et al. [24] a MacFarlane et al. [26]:

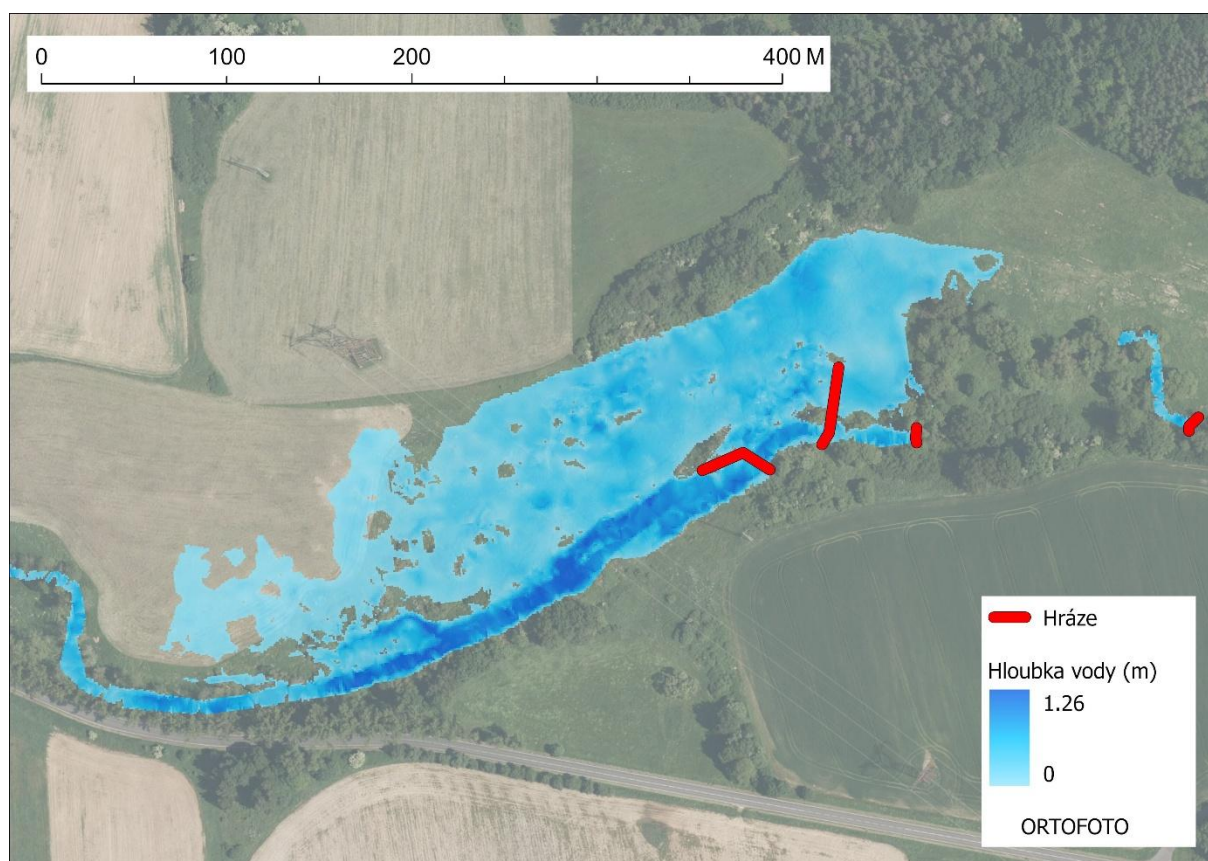
- **Frequent** – časté – kapacita 5 až 15 bobřích hrází na kilometr toku
- **Occasional** – občasné – kapacita 1 až 4 bobří hráze na kilometr toku
- **Rare** – vzácné – kapacita 0 až 1 bobří hráz na kilometr toku
- **None** – žádné – kapacita 0 bobřích hrází na kilometr toku

VÝSLEDKY

Skutečný objem zadržený bobřími hrázemi v experimentálních lokalitách

Celkem 150 bobřích hrází v experimentálních lokalitách zadržuje $31\,321 \text{ m}^3$ vody. Soubor měření objemů povrchové vody zadržené bobřími hrázemi vykazuje výrazně pravostranně asymetrické rozdělení s vysokou variabilitou hodnot. Průměrný objem činí $208,8 \text{ m}^3$, medián $41,0 \text{ m}^3$ a směrodatná odchylka dosahuje $681,5 \text{ m}^3$, což dokládá značnou variabilitu velikosti bobřích zdrží. Zaznamenané objemy se pohybují v rozmezí od 0,02 do $6\,583 \text{ m}^3$. Vysoká hodnota šikmosti (6,83) a špičatosti (53,78) potvrzuje výraznou asymetrii rozdělení a přítomnost extrémních hodnot, zatímco test normality prokázal statisticky významnou odchylku od normálního rozdělení ($p < 0,001$).

Největší zdrž je součástí bobřího mokřadu na řece Úslavě a zadržuje $6\,583 \text{ m}^3$ vody. Celý tento mokřad, tvořený čtyřmi hrázemi, akumuluje celkem $9\,991 \text{ m}^3$ vody. Rozložení hloubek v tomto mokřadu je znázorněno na Obr. 7.

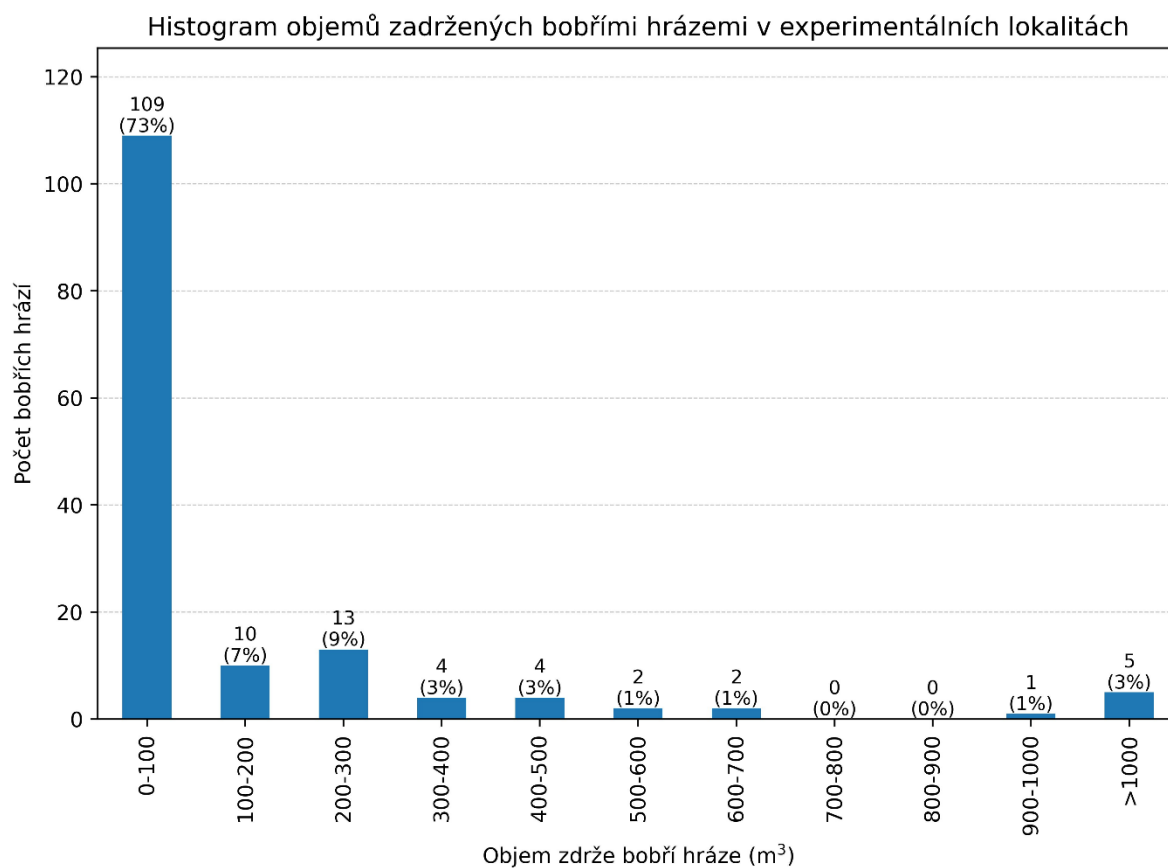


Obr. 7. Hloubky vody v bobřím mokřadu na řece Úslavě, který je tvořen čtyřmi hrázemi a přilehlými zdržemi (podkladové mapy: Ortofoto České republiky ČÚZK)

Fig. 7. Water depths in a beaver wetland on the Úslava River formed by four dams and their associated beaver ponds (basemap: Orthophoto of the Czech Republic, Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre; ČÚZK)

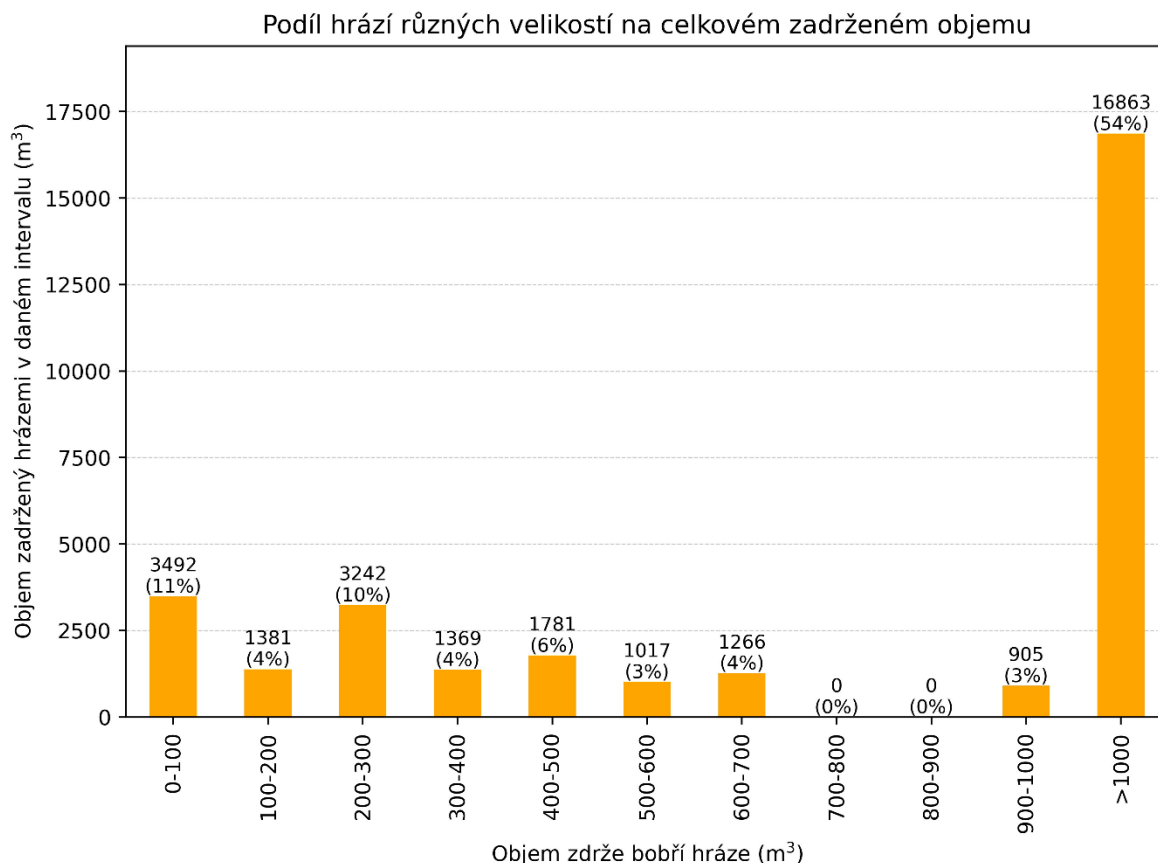
Data ukazují, že většina bobřích hrází zadržuje relativně malé objemy vody, zatímco pouze malý počet lokalit akumuluje výrazně vyšší objemy a zásadně ovlivňuje celkovou distribuci dat.

Z obr. 8 a 9 je patrné, že pět největších zdrží, představujících 3 % z celkového počtu zdrží, akumulovalo 54 % celkového objemu vody. Naopak 80 % nejmenších zdrží s kapacitou do 200 m³ zadrželo pouze 15 % celkového objemu.



Obr. 8. Histogram objemů zadržených bobřími hrázemi v experimentálních lokalitách

Fig. 8. Histogram of water storage volumes in beaver ponds at the experimental sites



Obr. 9. Podíl zdrží různých velikostí na celkovém zadrženém objemu

Fig. 9. Share of different storage size classes in the total retained volume

Tento trend je zesílen zahrnutím několika rozlehlých bobřích mokřadů, především mokřadu na řece Úslavě. Výrazný však zůstává i při zúžení souboru dat pouze na povodí Křemelné, tedy geograficky a hydrologicky ucelené území, kde byly stanoveny objemy zadržené všemi známými bobřími hrázi. Také zde vykazuje soubor 89 hrází výrazně pravostranně asymetrické nenormální rozdělení. Průměrný objem činí 139,2 m³, medián 33,9 m³ a směrodatná odchylka 404,9 m³. Hodnoty šikmosti (6,14) a špičatosti (41,27) opět potvrzují vysokou asymetrii dat a vliv několika extrémních hodnot.

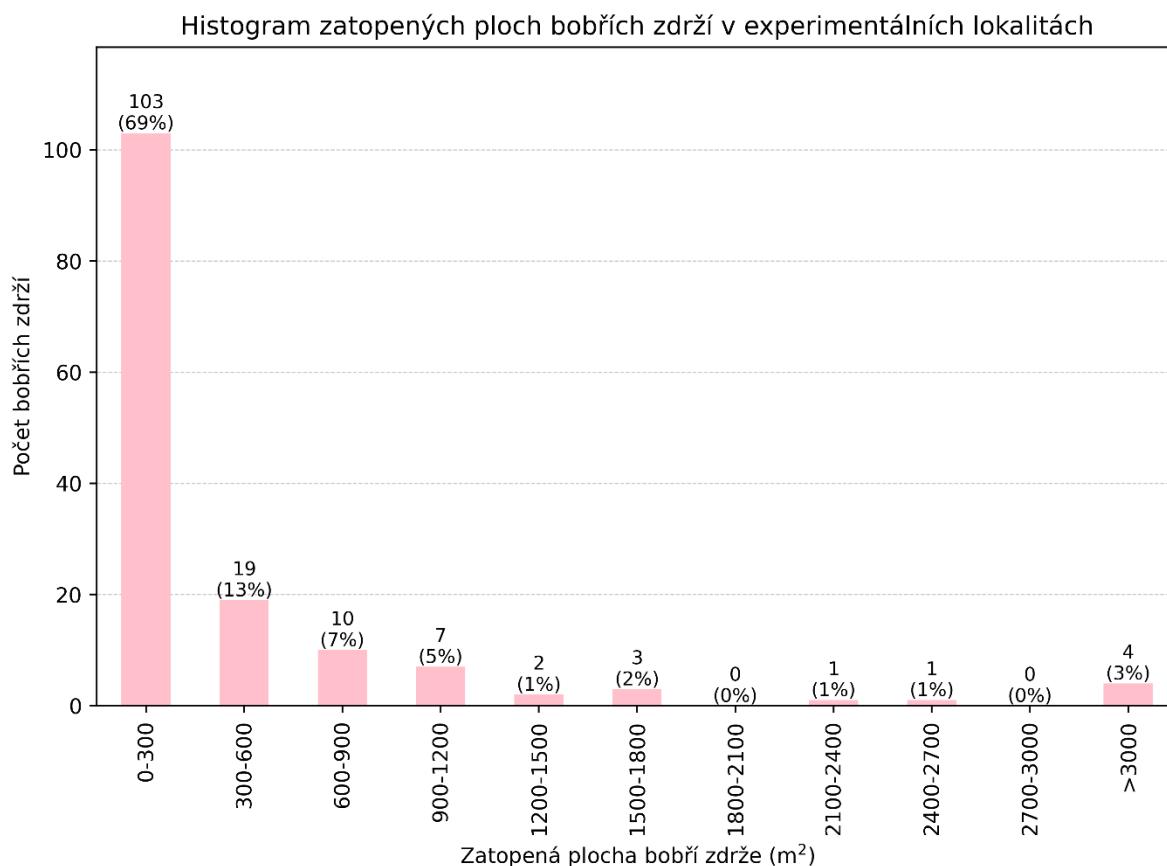
V povodí Křemelné představuje největší zdrž 26 % celkového zadrženého objemu, konkrétně 3 274 m³ z celkových 12 389 m³. Deset procent největších hrází zde zadrží přibližně dvě třetiny celkového objemu vody. V průměru zadrží bobří hráze v povodí Křemelné 73,3 m³ na kilometr čtvereční plochy.

Výsledky ukazují, že naprostá většina hrází v experimentálních lokalitách zadržuje pouze malé objemy vody – 73 % hrází mělo objem 0–100 m³. Tyto objemy nejsou v celkovém měřítku zásadní. Rozhodující roli naopak představuje malé procento rozlehlých zdrží, které akumulují tisíce metrů krychlových vody. Malé zdrže sice nehrají výraznou roli z pohledu celkového zadrženého objemu, mohou ale mít velký význam z hlediska biodiverzity a dalších výše uvedených souvisejících aspektů.

Zatopená plocha bobřích zdrží v experimentálních lokalitách

Celkem 150 bobřích hrází v experimentálních lokalitách vytváří zatopenou plochu o celkové výměře 98 586 m². Stejně jako v případě objemů zadržené vody vykazuje také soubor

zatopených ploch bobřích zdrží výrazně pravostranně asymetrické rozdělení s převahou menších zdrží a malým počtem extrémně rozsáhlých zdrží. Průměrná zatopená plocha činí 657,2 m², zatímco medián dosahuje pouze 168,9 m², přičemž zaznamenané hodnoty se pohybovaly v rozmezí od 0,5 do 27 941 m². Výrazné hodnoty šikmosti (8,84) a špičatosti (85,73) potvrzují silný vliv extrémních hodnot na charakter rozdělení; ve srovnání s objemy zadržené vody vyšší hodnoty těchto charakteristik indikují ještě výraznější dominanci několika nejrozsáhlejších bobřích zdrží. Rozdělení zatopených ploch bobřích zdrží je dobře patrné z obr. 10.



Obr. 10. Histogram zatopených ploch bobřích zdrží v experimentálních lokalitách

Fig. 10. Histogram of beaver pond flooded areas at the experimental sites

Největší zatopená plocha byla zaznamenána u stejné zdrže na řece Úslavě, která zároveň představovala největší zdrž z hlediska objemu zadržené vody, a dosáhla hodnoty 27 941 m². Celý tento bobří mokřad, tvořený čtyřmi bobřími hrázemi, dosahuje celkové zatopené plochy 41 740 m², což představuje více než 40 % celkové zatopené plochy ve sledovaném souboru (mokřad na řece Úslavě zachycený na 11).



Obr. 11. Dronový snímek bobřího mokřadu na řece Úslavě, jehož plocha představuje více než 40 % celkové plochy všech 150 bobřích zdrží (foto: T. Laburda)

Fig. 11. A drone image of a beaver wetland on the Úslava River, which covers more than 40 % of the total flooded area of all 150 beaver ponds (photo: T. Laburda)

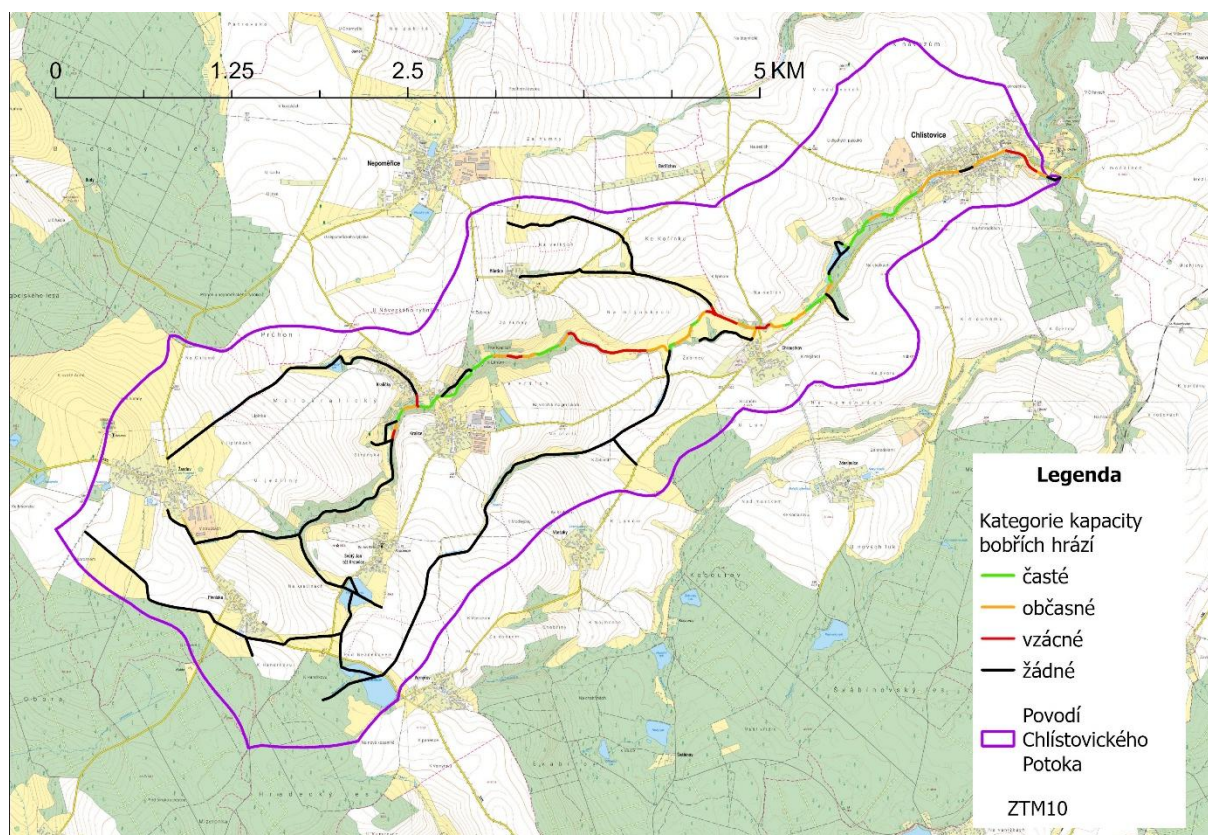
Výsledky ukazují, že stejně jako u objemů zadržené vody je i v případě zatopených ploch celková hodnota výrazně ovlivněna několika největšími zdržemi. Čtyři největší zdrže se zatopenou plochou nad 4 000 m², které představují pouze 2,7 % sledovaných lokalit, tvoří 53 % celkové zatopené plochy.

Tento trend zůstává patrný i po omezení souboru pouze na povodí Křemelné. Soubor 89 bobřích zdrží vykazuje stejně jako celkový soubor výrazně pravostranně asymetrické nenormální rozdělení. Ve srovnání s celkovým souborem jsou však hodnoty šikmosti (5,69) a špičatosti (39,40) nižší, což odráží absenci několika extrémně rozsáhlých lokalit, zejména bobřího mokřadu na řece Úslavě. Průměrná zatopená plocha činí 379,6 m², medián 137,8 m² a celková zatopená plocha všech sledovaných zdrží v povodí Křemelné dosahuje 33 785 m².

Největší zdrž v povodí Křemelné dosahuje zatopené plochy 6 639 m² a představuje přibližně 20 % celkové zatopené plochy bobřích zdrží v povodí. Devět největších zdrží, představujících 10 % lokalit v povodí Křemelné, tvoří 54 % celkové zatopené plochy. Obdobné procento přitom v celém souboru tvoří pouze čtyři nejrozsáhlejší zdrže. Průměrná zatopená plocha bobřích zdrží v povodí Křemelné odpovídá přibližně 200 m² na kilometr čtvereční plochy povodí.

Modelování kapacity potenciálních bobřích hrází na vodních tocích v povodí Chlístovického potoka

Veškeré úseky vodních toků v povodí Chlístovického potoka byly klasifikovány do čtyř kategorií podle potenciální četnosti bobřích hrází na kilometr vodního toku. Výsledná klasifikace dílčích úseků vodních toků je znázorněna na 12.



Obr. 12. Klasifikace vodních toků podle kapacity bobřích hrází v povodí Chlístovického potoka (podkladová mapa: Základní topografická mapa ČR ČÚZK)

Fig. 12. Classification of watercourses based on the beaver dam capacity in the Chlístovický potok catchment (basemap: Basic Topographic Map of the Czech Republic, Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre; ČÚZK)

Po rozdělení všech vodních toků v povodí (Chlístovický potok a všechny jeho přítoky) na úseky maximální délky 100 m bylo identifikováno 274 úseků vodních toků o celkové délce 23,1 km. Celkově bylo v povodí klasifikováno:

- 28 úseků vodních toků s charakteristikou **frequent – časté**, s celkovou délkou 2 200 m a kapacitou 11 až 33 bobřích hrází;
- 27 úseků vodních toků s charakteristikou **occasional – občasné**, s celkovou délkou 2 225 m a kapacitou 2 až 9 bobřích hrází;
- 17 úseků vodních toků s charakteristikou **rare – vzácné**, s celkovou délkou 1 540 m a kapacitou 0 až 2 bobřích hrází;
- Zbývajících 202 úseků vodních toků celkové délky 17,1 km bylo klasifikováno jako **none – žádné**. Tyto úseky nejsou pro bobří hráze vhodné.

Celkově bylo v povodí modelem definováno téměř 6 km vodních toků vhodných pro kolonizaci bobrem a stavbu bobřích hrází. Při plném osídlení povodí zde může bobr postavit 13 až 43 bobřích hrází.

Na základě našeho vyhodnocení objemů povrchové vody, které zadrží 150 bobřích hrází v experimentálních lokalitách povodí Křemelné a mokřadů v Plzeňském kraji, lze odhadnout, kolik vody by zadržely případné bobří hráze v povodí Chlístovického potoka a jak velkou zatopenou plochu by tyto hráze mohly vytvořit. Je ale třeba zdůraznit, že odhadované hodnoty vycházejí z objemových parametrů bobřích zdrží v odlišném území, než ve kterých je objem odhadován.

Při uvažování mediánového zadrženého objemu zaokrouhleného na 40 m³ by 13 bobřích hrází zadrželo přibližně 520 m³ vody, zatímco 43 hrází by zadrželo 1 720 m³ vody. Při uvažování průměrného zadrženého objemu zaokrouhleného na 200 m³ a přijetí předpokladu, že v povodí vznikne několik větších bobřích zdrží, by 13 bobřích hrází zadrželo 2 600 m³ vody a 43 bobřích hrází by zadrželo dokonce 8 600 m³ vody.

Analogicky lze pro zatopenou plochu při uvažování mediánové hodnoty z povodí Křemelné a 10 mokřadů v Plzeňském kraji odhadnout, že 13 až 43 bobřích zdrží v povodí Chlístovického potoka by vytvořilo zatopenou plochu o celkové výměře přibližně 2 200–7 200 m². Při předpokladu vzniku několika větších zdrží a využití průměrné zatopené plochy by celková plocha mohla dosáhnout celkové výměry 8 500–28 000 m².

Velké rozsahy limitních hodnot očekávaných objemů jsou způsobeny charakterem použitého modelu kapacity bobřích hrází, reflektují ale i různorodost a nepravidelnost, která je pro bobří zdrže charakteristická. Čísla lze pravděpodobně zpřesnit geomorfologickou analýzou území, výsledek bobří činnosti v dané lokalitě je ale vždy unikátní a nelze jej přesně předpovědět. Lze proto říci, že kolonizace bobrem by v povodí Chlístovického potoka vedla ke vzniku nižších desítek bobřích hrází, které by vytvořily objem zadržené povrchové vody v řádu jednotek tisíc metrů krychlových a zatopily území v ploše jednotek tisíc až nižších desítek tisíc metrů čtverečních. Při ploše povodí 13,8 km² by to představovalo nižší stovky metrů krychlových a stovky až nižší tisíce metrů čtverečních na kilometr čtvereční plochy povodí.

DISKUZE

V české krajině jsme zkoumali objem povrchové vody, který zadrží bobří hráze. 150 zkoumaných hrází v Plzeňském kraji zadržovalo 31 321 m³ povrchové vody s průměrným objemem zdrže 208,8 m³ a mediánovým objemem zdrže 41,0 m³. Ve srovnání s publikovanými studiemi ze severoamerických lokalit vykazují bobří zdrže zjištěné v této práci výrazně nižší objemy, neboť pouze 3 % zkoumaných hrází zadržovalo více než 1 000 m³ vody a většina zdrží měla objem do 200 m³, zatímco v severoamerických studiích dosahují objemy zdrží zpravidla řádu jednotek tisíc metrů krychlových. Výrazně vyšší objemy uvádějí např. Burns a McDonnell [35], kteří kvantifikovali objem jedné bobří zdrže na 7 500 m³, nebo Westbrook et al. [20], kteří na rašeliništi Sibbald stanovili u čtyř zdrží celkový objem 18 992 m³. Beedle [18] při zaměření 44 hrází na Aljašce zjistil průměrný objem jedné zdrže 1 020 m³, přičemž hodnoty se pohybovaly od 10 do 11 400 m³. Přestože průměrné objemy byly vyšší než v našem souboru, charakter distribuce odpovídal našim výsledkům – zadržené objemy vykazovaly výraznou pravostrannou asymetrii s výskytem několika extrémně velkých zdrží. Naopak evropské studie poskytují s našimi výsledky srovnatelnější hodnoty. Puttock et al. [36] stanovili u 13 hrází v jihovýchodní Anglii celkový objem přibližně 1 000 m³ a Grygoruk et al. [21] odhadli v polském povodí Krzemianka retenční objem 15 000 m³ pro 22 hrází, přičemž po poklesu bobří aktivity a počtu hrází na 19 objem zdrží klesl na 7 000 m³. To také poukazuje na skutečnost, že zadržené objemy se v čase mění s tím, jak se vyvíjí stupeň rozvoje bobřího mokřadu, jak dlouho trvá osídlení a jak roste nebo naopak klesá aktivita bobrů v dané lokalitě.

Podobný charakter jako objemy zadržené vody vykazovaly také zatopené plochy bobřích zdrží. Celková plocha 98 586 m² při průměrné hodnotě 657 m² a mediánu 169 m² ukazuje, že většina bobřích zdrží vytváří jen relativně malou zatopenou plochu, zatímco několik rozsáhlých

zdrží výrazně ovlivňuje celkovou bilanci. Tento efekt byl u zatopených ploch ještě výraznější než u objemů zadržené vody – čtyři největší zdrže představující 2,7 % všech lokalit tvořily více než polovinu celkové zatopené plochy.

Modelování v povodí Chlístovického potoka ukázalo, že by zde bobří mohli potenciálně vybudovat 13 až 43 hrází. Na základě objemů zjištěných v této studii v povodí Křemelné a na 10 dalších bobřích mokřadech v Plzeňském kraji lze odhadovat, že by tyto hráze mohly akumulovat přibližně 520–1 720 m³ vody při uvažování mediánového objemu zdrže, případně až 2 600–8 600 m³ při použití průměrných hodnot zahrnujících vznik několika větších zdrží. Tyto hodnoty představují pouze objem povrchově akumulované vody, zatímco významná část retence probíhá též v půdě. Dittbrenner et al. [37] a Hafen et al. [38] odhadují, že pod povrchem je navíc akumulován 2 až 2,4násobek objemu povrchové vody zadržené bobřími hrázemi. V případě Chlístovického potoka by tak mohlo dojít k navýšení zásob podzemní vody až o přibližně 20 000 m³.

Vedle samotného objemu zadržené vody by bobří hráze posílily ekologickou hodnotu území také rozšířením vodních ploch [22, 23]. Při využití hodnot zjištěných v této studii lze odhadovat celkovou zatopenou plochu bobřích zdrží v povodí Chlístovického potoka přibližně na 2 200–7 200 m² při mediánových hodnotách a až 8 500–28 000 m² při průměrných hodnotách s předpokladem vzniku několika větších zdrží.

Významný je také vliv bobřích hrází na transport sedimentu. Hráze zpomalují proudění a vytvářejí podmínky pro ukládání sedimentů, přičemž publikované sedimentační rychlosti se výrazně liší podle charakteru lokality – od 0,4 cm · rok⁻¹ dle Polvi et al. [12] v Rocky Mountains až po 28 cm · rok⁻¹ v Montaně [39]. Při předpokládané celkové ploše zdrží v povodí Chlístovického potoka 2 200 – 28 000 m² by tak mohlo velmi orientačně docházet k ukládání desítek až – při extrémním scénáři – nižších tisíců metrů krychlových sedimentu ročně. Rozsah tohoto procesu je však silně závislý na charakteru povodí, produkci sedimentu i hydrologických podmínkách.

Přestože se tato studie zaměřila na kvantifikaci objemu povrchové vody zadržené bobřími hrázemi, retenční efekt představuje pouze jednu část jejich působení. Jak ukazují publikované studie, bobří činnost má významný vliv na řadu hydrologických a ekologických procesů, mezi něž patří např. renaturace vodních toků a niv, omezení účinků historických odvodňovacích systémů, zvýšení stanovištní pestrosti a množství říčního dřeva nebo podpora biodiverzity [6, 13–15, 17].

ZÁVĚR

Naše studie kvantifikovala objem povrchové vody zadržené 150 bobřími hrázemi v experimentálních lokalitách v české krajině a současně posoudila potenciál výskytu bobřích hrází v povodí Chlístovického potoka jakožto modelového povodí v běžně využívané středočeské zemědělské krajině.

Celkový objem povrchové vody zadržené bobřími hrázemi v experimentálních lokalitách přesáhl 31 tisíc m³. Distribuce objemů byla však velmi nerovnoměrná – zatímco medián činil 41,0 m³, průměrná hodnota dosáhla 208,8 m³. Více než polovinu celkového objemu vody (54 %) zadržovalo pouze pět největších zdrží, zatímco 80 % menších zdrží akumulovalo dohromady jen 15 % celkového objemu. V povodí Křemelné bobří hráze zadržely 73,3 m³ povrchové vody na kilometr čtvereční.

Srovnání se zahraničními studiemi ukázalo, že objemy bobřích zdrží jsou v českých podmínkách obecně nižší než v severoamerických lokalitách, charakter jejich distribuce je však obdobný. Toto srovnání naznačuje, že retenční schopnost bobřích hrází závisí nejen na geomorfologických a hydrologických podmínkách lokality, ale také na dalších faktorech, jako je délka bobřího osídlení nebo to, kolik prostoru člověk bobrům v krajině poskytne.

Obdobně jako objemy zadržené vody vykazovaly také zatopené plochy bobřích zdrží výrazně nerovnoměrné rozdělení. Celková zatopená plocha přesáhla 98 tisíc m², z této hodnoty však 53 % připadalo pouze na čtyři největší zdrže. Mediánová zatopená plocha činila jen 168,9 m² oproti průměrné hodnotě 657,2 m², což stejně jako u objemů zadržené vody ukazuje na vysokou heterogenitu bobřích zdrží podmíněnou především rozdílnými lokálními podmínkami jednotlivých lokalit.

Modelování potenciální kolonizace povodí Chlístovického potoka ukázalo, že na ploše 13,8 km² se nachází přibližně 6 km vodních toků vhodných pro stavbu bobřích hrází. Při plném osídlení by zde mohlo vzniknout 13 až 43 bobřích hrází. Na základě objemů stanovených v experimentálních lokalitách lze očekávat akumulaci stovek až jednotek tisíc m³ povrchové vody. Na základě dostupných poznatků lze předpokládat, že celkový retenční efekt může být vyšší také díky akumulaci podzemní vody, jež představuje významnou součást retence vody v bobřích mokřadech. Na základě zatopených ploch bobřích zdrží lze navíc odhadnout, že bobří hráze by zatopily plochu o rozloze v řádu tisíců až nižších desetitisíců m², a posílily tak ekologickou hodnotu území. Kromě toho jsou bobřím hrázím připisovány i další přínosy, zejména ukládání sedimentu, podpora mokřadních biotopů, stabilizace odtokových poměrů a zvýšení ekologické stability krajiny.

Výsledky studie potvrzují význam role bobra evropského jako ekosystémového inženýra schopného lokálně výrazně ovlivňovat hydrologický režim krajiny. Přestože většina jednotlivých hrází zadržuje relativně malé objemy vody, soustava více hrází a vznik rozsáhlejších mokřadů mohou představovat významný prvek přírodě blízké retence vody v krajině. Stejně jako u jiných přírodě blízkých opatření v boji proti dopadům změny klimatu platí, že v některých dílčích funkcích nedosahují takové účinnosti jako cílená technická opatření – několik menších vodních nádrží může akumulovat větší objem vody než výrazně vyšší počet bobřích hrází. Současně je ale z odborné literatury dobře známo, že stavbou hrází bobří přinášejí také široké spektrum dalších pozitivních efektů přispívajících k hydrologické i ekologické stabilizaci krajiny, jejíž jsou přirozenou součástí a do níž historicky patří. Proto je důležité, aby v krajině dostali odpovídající prostor.

Poděkování

Výzkum prezentovaný v této studii byl realizován za přispění projektu Technologické agentury ČR č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda)“, č. SGS26/149/OHK1/3T/11 „Dlouhodobý monitoring a experimentální metody výzkumu srážkoodtokových a erozních procesů“ a dále zakázek Agentury ochrany přírody a krajiny ČR „Vliv bobrů na ekosystémy říční krajiny“ a Národního parku Šumava „Terénní měření a mapování bobřích hrází v povodí Křemelné“. Děkujeme tímto uvedeným institucím i odpovědným osobám za podporu a umožnění realizace výzkumu. Poděkování dále patří Matouši Oukropcovi, Oldřichu Vojtěchovi, Micol Genazzi, Michalu Vránovi a Tomáši Laburdovi za pomoc při terénních měřeních a poslednímu jmenovanému rovněž za poskytnutí dronových snímků bobřích mokřadů.

Literatura

[1] HALLEY, D. J., ROSELL, F. The Beaver's Reconquest of Eurasia: Status, Population Development and Management of a Conservation Success. *Mammal Review*. 2002, 32(3), s. 153–178. ISSN 03051838. Dostupné z: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2907.2002.00106.x>

- [2] HALLEY, D. J., SAVELJEV, A. P., ROSELL, F. *Population and Distribution of Beavers Castor Fiber and Castor Canadensis in Eurasia. Mammal Review* [on-line]. 2021, 51(1), s. 1–24. ISSN 13652907. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/mam.12216>
- [3] VOREL, A., ŠAFÁŘ, J., ŠIMŮNKOVÁ, K. Recentní rozšíření bobra evropského (*Castor fiber*) v České republice v letech 2002–2012 (*Rodentia: Castoridae*). *Lynx, Series Nova*. 2012, 43(1–2), s. 149–179. Dostupné z: <https://publikace.nm.cz/periodicke-publikace/lnsr/43-1-2/recentni-rozsireni-bobra-evropskeho-castor-fiber-v-ceske-republice-v-letech-20022012-rodentia-castoridae-recent-expansion-of-castor-fiber-in-the-czech-republic-during-20022012-rodentia-castoridae>
- [4] VOREL, A., KORBELOVÁ, J. (eds.). *Handbook for Coexisting with Beavers*. Prague: Czech University of Life Sciences, 2016. 137 s. ISBN 978-80-213-2672-9.
- [5] VOREL, A., KORBELOVÁ, J. *Rozšíření a početnost bobra evropského v ČR*. 2020.
- [6] JUST, T., BEJČKOVÁ, K., BRANWEN HELEBRANDOVÁ, J., DAJČ, L., FISCHER, D., FIŠER, B., HAVLÁT, A., HLAVÁČ, V., HRŮZOVÁ, L., CHLAPEK, J., KNEBLOVÁ, I., KOLÁŘ, V., KOŽENÝ, P., KRÁLOVCOVÁ, P., LUKAVSKÝ, J., MORAVEC, P., POJER, F., SOUČEK, M., SOVÍK, Z., STODOLA, J., ŠENIGL, F., ŠREJBEROVÁ, J., ŠTASTNÝ, V., TRÁVNÍČEK, D., UHLÍKOVÁ, J., VLČEK, J., VOGELTANZ, L., VRÁNA, P. *Renaturace vodních toků a tvorba mokřadů činností bobra evropského*. Praha: Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky, 2024. 171 s. ISBN 978-80-7620-176-7.
- [7] WRIGHT, J. P., JONES, C. G., FLECKER, A. S. An Ecosystem Engineer, the Beaver, Increases Species Richness at the Landscape Scale. *Oecologia*. 2002, 132(1), s. 96–101. ISSN 00298549. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0929-1>
- [8] BRAZIER, R. E., PUTTOCK, A., GRAHAM, H. A., AUSTER, R. E., DAVIES, K. H., BROWN, CH. M. L. Beaver: Nature's Ecosystem Engineers. *WIREs Water*. 2021, 8(1), e1494. ISSN 20491948. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/wat2.1494>
- [9] COLLEN, P., GIBSON, R. J. *The General Ecology of Beavers (Castor spp.), as Related to Their Influence on Stream Ecosystems and Riparian Habitats, and the Subsequent Effects on Fish – A Review. Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 2000, 10, s. 439–461. Dostupné z: <https://doi.org/10.1023/A:1012262217012> 2001
- [10] BUTLER, D. R., MALANSON, G. P. The Geomorphic Influences of Beaver Dams and Failures of Beaver Dams. *Geomorphology*. 2005, 71(1–2), s. 48–60 [citováno 2024-02-20]. ISSN 0169-555X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2004.08.016>
- [11] HOOD, G. A., BAYLEY, S. E. Beaver (*Castor canadensis*) Mitigate the Effects of Climate on the Area of Open Water in Boreal Wetlands in Western Canada. *Biological Conservation*.

- 2008, 141(2), s. 556–567. ISSN 00063207. Dostupné z: -
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.003>
- [12] POLVI, L. E., WOHL, E. The Beaver Meadow Complex Revisited – The Role of Beavers in Post-Glacial Floodplain Development. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2012, 37(3), s. 332–346. ISSN 01979337. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/esp.2261>
- [13] LARSEN, A., LARSEN, J. R., LANE, S. N. Dam Builders and Their Works: Beaver Influences on the Structure and Function of River Corridor Hydrology, Geomorphology, Biogeochemistry and Ecosystems. *Earth-Science Reviews*. 2021, 218, 103623 [citováno 2025-01-13]. ISSN 0012-8252. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2021.103623>
- [14] SCAMARDO, J. E. *Rivers and Beaver-Related Restoration in Colorado. Thesis*. Fort Collins: Colorado State University, 2019. Dostupné z: <https://doi.org/10.25675/3.020881>
- [15] LAMSODIS, R. Attempt to Manage After-Effects of Beaver Impounding Activities in Drainage Systems: One Trial Assay. *Irrigation and Drainage*. 2011, 60(2), s. 207–215. ISSN 15310353. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ird.566>
- [16] ROMANSIC, J. M., NELSON, N. L., MOFFETT, K. B., PIOVIA-SCOTT, J. Beaver Dams Are Associated with Enhanced Amphibian Diversity Via Lengthened Hydroperiods and Increased Representation of Slow-Developing Species. *Freshwater Biology*. 2021, 66(3), s. 481–494. ISSN 13652427. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/fwb.13654>
- [17] THOMPSON, S., VEHKAOJA, M., NUMMI, P. Beaver-Created Deadwood Dynamics in the Boreal Forest. *Forest Ecology and Management*. 2016, 360, s. 1–8 [citováno 2026-08-05]. ISSN 0378-1127. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2015.10.019>
- [18] BEEDLE, D. *Physical Dimensions and Hydrologic Effects of Beaver Ponds on Kuiu Island in Southeast Alaska. A Thesis*. Corvallis, OR: Oregon State University, 1991. 94 s. Dostupné z: <https://www.seakfhp.org/wp-content/uploads/2015/04/Beedle-1991.pdf>
- [19] KARRAN, D. J., WESTBROOK, CH. J., WHEATON, J. M., JOHNSTON, C. A., BEDARD-HAUGHN, A. Rapid Surface-Water Volume Estimations in Beaver Ponds. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017, 21(2), s. 1 039–1 050. ISSN 16077938. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/hess-21-1039-2017>
- [20] WESTBROOK, CH. J., RONNQUIST, A., BEDARD-HAUGHN, A. Hydrological Functioning of a Beaver Dam Sequence and Regional Dam Persistence during an Extreme Rainstorm. *Hydrological Processes*. 2020, 34(18), s. 3 726–3 737. ISSN 10991085. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.13828>

- [21] GRYGORUK, M., NOWAK, M. Spatial and Temporal Variability of Channel Retention in a Lowland Temperate Forest Stream Settled by European Beaver (*Castor Fiber*). *Forests*. 2014, 5(9), s. 2 276–2 288. ISSN 19994907. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/f5092276>
- [22] FEDYŃ, I., SOBOCÍŃSKI, W., CZYŻOWICZ, S., WYKA, J., CIACH, M. Ecosystem Engineers Cause Biodiversity Spill-Over: Beavers Are Associated with Breeding Bird Assemblages on Both Wetlands and Adjacent Terrestrial Habitats. *Science of The Total Environment*. 2024, 950, 175166 [citováno 2026-08-06]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.175166>
- [23] BASHINSKIY, I. W., ANDRIUSHKEVICH, E. N., KADETOV, N. G., OSIPOV, V. V. Ecosystem Engineering at the Regional Scale – Beaver Impact on Floodplain Pondscales. *Limnologica*. 2024, 109, 126214 [citováno 2026-08-06]. ISSN 0075-9511. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.LIMNO.2024.126214>
- [24] GRAHAM, H. A., PUTTOCK, A., MACFARLANE, W. W., WHEATON, J. M., GILBERT, J. T., CAMPBELL-PALMER, R., ELLIOTT, M., GAYWOOD, M. J., ANDERSON, K., BRAZIER, R. E. Modelling Eurasian Beaver Foraging Habitat and Dam Suitability, for Predicting the Location and Number of Dams throughout Catchments in Great Britain. *European Journal of Wildlife Research*. 2020, 66, 42. ISSN 14390574. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10344-020-01379-w>
- [25] GURNELL, A. M. The Hydrogeomorphological Effects of Beaver Dam-Building Activity. *Progress in Physical Geography*. 1998, 22(2), s. 167–189. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/030913339802200202>
- [26] MACFARLANE, W. W., WHEATON, J. M., BOUWES, N., JENSEN, M. L., GILBERT, J. T., HOUGH-SNEE, N., SHIVIK, J. A. Modeling the Capacity of Riverscapes to Support Beaver Dams. *Geomorphology*. 2017, 277, s. 72–99 [citováno 2025-01-09]. ISSN 0169-555X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2015.11.019>
- [27] MORAVEK, J. A., BRASHARES, J., GIROTTO, M., SPIVAK, R., KERR, A., MOLOD, A., FEIRER, S., JOHNSON, R., GETIRANA, A., FAIRFAX, E., RUHÍ, A. Maximizing the Potential Benefits of Beaver Restoration for Fire Resilience and Water Storage. *Ecological Applications*. 2025, 35(7), e70102. ISSN 19395582. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/eap.70102>
- [28] NYSSSEN, J., PONTZEELE, J., BILLI, P. Effect of Beaver Dams on the Hydrology of Small Mountain Streams: Example from the Chevral in the Ourthe Orientale Basin, Ardennes, Belgium. *Journal of Hydrology*. 2011, 402(1–2), s. 92–102 [citováno 2024-02-20]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.03.008>

- [29] DOSTÁL, T., VOREL, A., BAUER, M., DOČKAL, M., BABULJAK, A., VOJTĚCH, O., GENAZZI, M., OUKROPEC, M. *Terénní měření a mapování bobřích hrází v povodí Křemelné*. 2023.
- [30] VOREL, A., DOSTÁL, T., BUDSKÁ, D., MACHÁČ, J. *Vliv bobrů na ekosystémy říční krajiny*. 2025.
- [31] MACFARLANE, W. W., GILBERT, J., BAKER, D., GUNNELL, C., GILBERT, J., D'SOUZA, N., SARGEANT, P., SEEBORG, CH. *Montana Beaver Dam Census & Beaver Restoration Assessment Tool (BRAT) Verification Report Prepared for Montana Fish, Wildlife and Parks – Region 2 Riverscapes Assessment & Monitoring (RAM) Lab*. Logan, UT: Utah State University, 2024. 36 s.
- [32] STOLL, N. L., WESTBROOK, CH. J. Beaver Dam Capacity of Canada's Boreal Plain in Response to Environmental Change. *Scientific Reports*. 2020, 10, 16800. ISSN 20452322. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73095-z>
- [33] SCAMARDO, J. E., MARSHALL, S., WOHL, E. Estimating Widespread Beaver Dam Loss: Habitat Decline and Surface Storage Loss at a Regional Scale. *Ecosphere*. 2022, 13(3), e3962. ISSN 21508925. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ecs2.3962>
- [34] HARTMAN, G., TÖRNLÖV, S. Influence of Watercourse Depth and Width on Dam-Building Behaviour by Eurasian Beaver (*Castor Fiber*). *Journal of Zoology*. 2006, 268(2), s. 127–131. ISSN 09528369. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2005.00025.x>
- [35] BURNS, D. A., MCDONNELL, J. J. Effects of a Beaver Pond on Runoff Processes: Comparison of Two Headwater Catchments. *Journal of Hydrology*. 1998, 205(3–4), s. 248–264 [citováno 2024-02-20]. ISSN 0022-1694. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00081-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00081-X)
- [36] PUTTOCK, A., GRAHAM, H. A., CUNLIFFE, A. M., ELLIOTT, M., BRAZIER, R. E. Eurasian Beaver Activity Increases Water Storage, Attenuates Flow and Mitigates Diffuse Pollution from Intensively-Managed Grasslands. *Science of The Total Environment*. 2017, 576, s. 430–443 [citováno 2024-02-20]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.10.122>
- [37] DITTBRENNER, B. J., SCHILLING, J. W., TORGERSEN, CH. E., LAWLER, J. J. Relocated Beaver Can Increase Water Storage and Decrease Stream Temperature in Headwater Streams. *Ecosphere*. 2022, 13(7), e4168. ISSN 21508925. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ecs2.4168>
- [38] HAFEN, K. C., WHEATON, J. M., ROPER, B. B., BAILEY, P., MACFARLANE, W. W., NEILSON, B. T., TENNANT, C. J. Estimating Increased Transient Water Storage with

Increases in Beaver Dam Activity. *Water (Switzerland)*. 2024, 16(11), 1515. ISSN 20734441.

Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w16111515>

[39] BUTLER, D. R., MALANSON, G. P. Sedimentation Rates and Patterns in Beaver Ponds in a Mountain Environment. *Geomorphology*. 1995, 13(1–4), s. 255–269 [citováno 2024-02-20]. ISSN 0169-555X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00031-Y](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00031-Y)

Autoři

Ing. Adam Babuljak¹
ORCID: 0009-0008-8972-8693
adam.babuljak@fsv.cvut.cz

Ing. Miroslav Bauer, Ph.D.¹
ORCID: 0000-0001-5178-7497
miroslav.bauer@cvut.cz

Ing. Martin Dočkal Ph.D.¹
ORCID: 0000-0002-1529-4908
dockal@fsv.cvut.cz

Ing. Petr Koudelka, Ph.D.¹
ORCID: 0000-0001-6961-2249
petr.koudelka@fsv.cvut.cz

RNDr. Jitka Uhlíková, Ph.D.³
ORCID: 0009-0004-0546-2471
jitka.uhlikova@aopk.gov.cz

Ing. Jan Mokřý⁴
jan.mokry@npsumava.cz

Ing. Aleš Vorel, Ph.D.²
ORCID: 0000-0002-5716-3711
vorel@fzp.czu.cz

prof. Dr. Ing. Tomáš Dostál¹
ORCID: 0000-0003-3984-3462
dostal@fsv.cvut.cz

¹Katedra vodního hospodářství krajiny, Fakulta stavební ČVUT v Praze (Česká republika)

²Katedra ekologie, Fakulta životního prostředí ČZU v Praze (Česká republika)

³Oddělení druhové ochrany živočichů, Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha (Česká republika)

⁴Oddělení zoologie, Odbor ochrany přírody, Národní park Šumava, Vimperk (Česká republika)

Průběh práce prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.07.003

RETENTION POTENTIAL OF BEAVER DAMS FOR SURFACE WATER STORAGE IN THE CZECH LANDSCAPE

BABULJAK, A.¹; BAUER, M.¹; DOČKAL, M.¹; KOUDELKA, P.¹; UHLÍKOVÁ, J.³; MOKRÝ, J.⁴; VOREL, A.²; DOSTÁL, T.¹

Keywords: eurasian beaver – ecosystem engineer – water retention – beaver dam – hydrological regime – GIS analysis – beaver dam capacity modelling – wetlands – landscape management

The Eurasian beaver (*Castor fiber*) is an important ecosystem engineer that alters the hydrological regime of the landscape through its activities. The aim of this study was to quantify the volume of surface water stored by beaver dams in the Czech landscape and to estimate the potential water retention capacity of a selected catchment under the assumption of maximum potential beaver colonization. The main focus of the research was to determine the volume of surface water accumulated behind 150 beaver dams at sites in the Plzeň Region (in the Křemelná catchment and at ten other selected wetlands) and to determine the flooded area of associated beaver ponds. GIS analyses based on a combination of precise geodetic data and a digital terrain model were used for the calculations. In parallel, a beaver dam capacity model based on fuzzy logic principles and parameters such as stream slope, channel width, flow intensity, and availability of riparian vegetation was applied to the Chlístovický potok catchment (4th-order stream, 13,8 km²). The aim was to estimate the realistic amount of water that could be retained by beaver dams in the study area under the assumption of full beaver colonization of the catchment.

Field measurements showed that the 150 surveyed beaver dams retain a total of 31 321 m³ of surface water, of which 89 beaver dams in the Křemelná catchment retain 12 389 m³ of surface water across an area of 169 km². The distribution of stored volumes exhibits pronounced right skewness (median 41,0 m³, mean 208,8 m³), confirming that the vast majority of beaver dams retain relatively small volumes, while a small number of large beaver ponds account for a substantial proportion of the total stored volume – the largest 3 % of beaver ponds account for 54 % of the total volume. A similar distribution pattern was observed for the beaver pond flooded area, with a total flooded area of 98 586 m². The median flooded area of an individual beaver pond was only 168,9 m², compared with a mean value of 657,2 m², and the four largest beaver ponds accounted for 53 % of the total flooded area. Modelling in the 13,8 km² Chlístovický potok catchment identified nearly 6 km of watercourses suitable for beaver colonization. Under full colonization, the model predicts the formation of 13 to 43 beaver dams. Based on the volumes measured at the experimental sites, surface water accumulation in the Chlístovický potok catchment can be expected to reach hundreds to several thousand cubic metres. A significant proportion of water retention, however, also occurs in the subsurface component, further increasing the overall hydrological contribution. An important ecological benefit could be the formation of beaver ponds with a total flooded area on the order of several thousand to tens of thousands of square metres, providing space for the development of wetland

habitats. The study demonstrates that beaver dams represent an important component of nature-based water retention in the landscape; however, their importance extends far beyond surface water accumulation. Beaver dams also contribute to sediment deposition, stabilization of runoff patterns, and increased ecological stability of the landscape, and therefore it is desirable to provide them with adequate space within the landscape.

Accepted for print