

Typologie cest a jejich vliv na odtokový režim ve zvláště chráněných územích

LUDEK STROUHAL, VÁCLAV DAVID, JOSEF KRÁSA

Klíčová slova: typologie cestní sítě – hydrologický režim – GIS odtokové analýzy – KRNP – terénní mapování

ABSTRAKT

Článek představuje výsledky projektu „Analýza změn vodního režimu pozemků a vodních toků na území Krkonošského národního parku vyvolaných sítí pozemních komunikací“ (TA ČR, č. TITSMZP945), realizovaného jako veřejná zakázka Ministerstva životního prostředí ČR v programu aplikovaného výzkumu BETA2. Hlavním výstupem projektu je typologie cestní sítě z hlediska ovlivnění povrchového a podpovrchového odtoku, navržená ve dvou úrovních podrobnosti. Ta byla aplikována na území KRNP a prezentována formou mapových atlasů. V článku jsou popsány zásady a kritéria navržené typologie a metodika jejich aplikace při tvorbě map, která v základní úrovni kombinuje prostorové analýzy nad datovými sadami cestní sítě, digitálními modely terénu a hydrografickou sítí a v druhém kroku v detailní úrovni začleňuje výsledky rozsáhlého terénního průzkumu. Autorské analytické postupy zahrnují mimo jiné detekci směrových a výškových zlomů linií komunikací a odvození mikropovodí jednotlivých úseků. Výsledné mapy poskytují Správě KRNP a dalším správcům chráněných území nástroj pro identifikaci úseků cest s nejvyšším potenciálem ovlivnit hydrologický režim a slouží jako podklad pro plánování kompenzačních opatření či renaturačních zásahů.

ÚVOD

Vodní režim horských a podhorských oblastí je v přirozených podmínkách formován působením topografie, půdních a vegetačních charakteristik a atmosférických srážek. V důsledku výstavby liniových staveb však dochází k narušení přirozených hydrologických procesů, zejména v územích s vyšší koncentrací odvodňovacích a zpevněných prvků. Lesní a polní cesty, které často sledují vrstevnice nebo spádnice, přispívají ke změnám retence a akumulace vody a ke vzniku preferenčních drah, které mění směrování povrchového odtoku a jeho koncentraci v terénu. Podle výsledků studií provedených v různých geomorfologických a klimatických podmínkách může docházet ke snížení infiltrační kapacity povodí, přestože celková plocha pozemních komunikací zpravidla nepředstavuje významný podíl v území [1–3].

Značný vliv na hodnoty kulminačních odtoků má hustota komunikací [4–6], jejich prostorové rozmístění a odvodnění. Některé studie dokládají, že cestní síť ovlivňuje v zásadě především směrování a soustředění odtoku, zatímco na objem přímého odtoku má vliv pouze omezeně [7]. Důvodem je to, že komunikace mají výrazně liniový charakter, a proto je jejich plocha ve vztahu k celkové ploše území nevýznamná. Např. v povodí řeky Deschutes ve státě Washington (USA) bylo pozorováno zvýšení hodnot kulminačních průtoků až o cca 12 % [8]. Obě studie se současně zabývaly vlivem odlesňování na odtokový režim, a byť to autoři nepřipouštějí, mohou být dosažené výsledky zkresleny právě skutečností, že ve zkoumaných územích došlo k souběhu několika druhů změn (vybudování komunikací, odlesnění). Problematika urychlení odtokového režimu je relevantní zejména v chráněných oblastech, kde je důraz kladen na zachování přirozeného režimu vodního cyklu a minimalizaci antropogenního narušení.

Projekt „Analýza změn vodního režimu pozemků a vodních toků na území Krkonošského národního parku vyvolaných sítí pozemních komunikací“ (č. TITSMZP945) byl realizován v letech 2021–2024 jako veřejná zakázka Ministerstva životního prostředí, administrovaná Technologickou agenturou ČR v rámci programu aplikovaného výzkumu BETA2. Předmětem soutěže byl konkrétně vymezený soubor výstupů s praktickým využitím při správě chráněného území, mezi nimiž byly: (1) Typologie cestní sítě podle jejího vlivu na hydrologické procesy, (2) Mapa cestní sítě na území KRNP s rozlišením dle vytvořené typologie, (3) Metodika návrhu nových a úprav existujících komunikací s ohledem na minimalizaci povrchového odtoku a (4) Databáze objektů pro převádění vod. Přestože v době publikace tohoto článku byly již výsledky projektu po věcné stránce uzavřeny, proces formálního ukončení projektu ještě nenastal. Z tohoto důvodu a kvůli charakteru projektu jako veřejné zakázky nemohly být výstupy k termínu vydání článku veřejně publikovány. Jejich zveřejnění je plánováno do konce roku 2025.

Vzhledem ke struktuře veřejné zakázky a požadovanému harmonogramu nebyl v rámci projektu prostor pro provádění hydrologických měření v terénu. Řešení bylo proto postaveno na syntéze dostupných odborných poznatků, analýze prostorových dat a kategorizaci komunikací podle jejich morfologie, způsobu odvodnění, interakce s tokovou sítí a umístění vůči terénu. Na základě rešerše byly identifikovány klíčové typy interakcí mezi cestní sítí a odtokovými procesy a návrh klasifikačního rámce komunikací byl zpracován ve dvou úrovních: základní úroveň vycházela čistě z datových analýz a detailní typologie představila zpřesnění základní úrovně prostřednictvím poznatků z terénního mapování, nikoli však z měření skutečné

hydrologické interakce cesty a jejího okolí. Tato metodická omezení a zvolený rámec řešení jsou dále rozvedeny v následujících oddílech.

TEORETICKÉ PRINCIPY A VÝCHODISKA

Přírozený hydrologický režim horských oblastí vzniká jako výsledek interakce topografie, půdních vlastností, vegetačního pokryvu a atmosférických vstupů. V přírozeném stavu se srážková voda částečně infiltruje do půdy a odtéká podpovrchově, zatímco její zbytek odtéká po povrchu, zejména při vyšší intenzitě deště nebo nasyceném profilu. Tento systém však může být významně narušen liniovými stavbami, mezi nimiž sehrávají zvláště výraznou roli pozemní komunikace. Cesty ovlivňují jak povrchový, tak podpovrchový odtok, přičemž důsledky těchto zásahů se liší podle umístění komunikace v terénu, její morfologie, povrchových úprav a odvodňovacích opatření.

Zásah do přírozené morfologie terénu narušuje kontinuitu povrchového toku vody. Komunikace často kopírují spádnicí svahu nebo se nacházejí ve svahových depresích, čímž vytvářejí preferenční dráhy odtoku. Voda stékající z okolního terénu se shromažďuje na povrchu zpevněné nebo zhutněné komunikace a je odváděna podél trasy cesty, případně příkopu nebo kolejem. Takto koncentrovaný odtok pak směřuje buď do nejbližší vodoteče, nebo k okraji svahu, kde může způsobit erozní procesy a destabilizaci půdního profilu. Tento jev bývá označován „funkce cesty jako kolektoru povrchové vody“. V jiných situacích mohou komunikace naopak fungovat jako distributory – tj. voda je z komunikace nebo příkopu rozváděna do okolního prostředí, např. průsakem do svahu nebo příčnými odvodňovacími prvky. V místech přímého napojení příkopů, propustků či erozních rýh na hydrografickou síť pak cesty představují vtokové body, které propojují povrchový odtok přímo s recipienty, a tím výrazně zrychlují odezvu povodí.

Komunikace významně narušují i podpovrchové proudění vody. Vzhledem ke konstrukci a provozu bývá podloží pod cestami vyšších kategorií výrazně zhutněno, což snižuje infiltrační schopnost půdy a přesměrovává vodu do povrchového systému. Kromě toho dochází k přerušení přírodních vodivých horizontů, jež běžně umožňují laterální (svahové) proudění vody v mělkých půdních vrstvách.

Zvlášť problematické je, když je cesta zaříznutá do svahu a vedena napříč svahem, téměř nebo zcela podél vrstevnic. V takových případech narušuje svahová pata nebo bok cestního zářezu přírozené mělké drenážní vrstvy, v nichž probíhá podpovrchový tok. Voda pak vytéká na povrch z porušeného svahu a dochází k převodu podpovrchového odtoku na povrchový. Výsledkem je nejen ztráta infiltrační funkce svahu, ale i zvýšené riziko eroze a zrychleného odvodnění. Tento mechanismus může vést ke vzniku sekundárních pramenných vývěrů nebo přímo ke vzniku malých vodních toků podél cestních těles, přestože by za přírodních podmínek k povrchovému odtoku vůbec nedošlo. V některých případech se tyto účinky kombinují – např. když voda v důsledku bariéry naakumuluje nad komunikací, zvýší saturaci profilu a následně se objeví na povrchu jako sekundární pramenný vývěr, čímž se zvyšuje množství povrchového odtoku.

Zmíněné mechanismy jsou podloženy řadou výzkumů, které prokazují změny hydrologického režimu vlivem liniových staveb, stručný výběr uvádí úvod tohoto článku. Na základě těchto hydrologických konceptů byl navržen klasifikační rámec, který zohledňuje způsob interakce cest s povrchovým a podpovrchovým odtokem. Tento rámec tvoří východisko pro typologii cestní sítě, jež je podrobně popsána v následujících oddílech.

TYPOLOGIE CESTNÍ SÍTĚ

Typologie cestní sítě byla definována z hlediska potenciálního dopadu na hydrologický režim, a to jak z pohledu povrchového, tak podpovrchového odtoku. Navržena a otestována byla na cestní síti v horském prostředí Krkonošského národního parku, formulována však byla obecně, aby ji bylo možné uplatnit víceméně kdekoli na území České republiky, primárně pak ve zvláště chráněných územích. Východiskem pro tvorbu typologie byla kombinace digitálních prostorových analýz, terénních poznatků a hydrologických principů popsaných v předchozím oddíle.

Mezi hodnocené druhy cest byly zahrnuty veškeré cesty s potenciálem ovlivnit směřování a množství odtoku srážkových vod: pozemní komunikace ve smyslu zákona o pozemních komunikacích včetně sítě místních a účelových komunikací, cesty kategorie 1L-4L dle ČSN 73 6108 „Lesní cestní síť“ [9], dále významné turistické trasy a další neevidované, ale v mapových podkladech přítomné zpevněné komunikace vedoucí ke stavebním objektům nebo protínající prvek pro převádění vod.

Navržená typologie se aplikuje nikoli na cesty jako nepřerušené celky, nýbrž na jejich homogenní úseky např. s jedním typem konstrukce nebo povrchu vozovky či s určitými sklonovými poměry. Primárním způsobem členění je funkce cesty z hlediska schopnosti přerušení mělkého podpovrchového a povrchového odtoku a poté z hlediska její akumulací/svodné funkce ve smyslu schopnosti zadržet nebo naopak odvádět odtok zrychleně do hydrografické sítě. Bodové prvky pro převádění povrchových vod – mostky, propustky aj. – vstupují do typologie jen omezeně kvůli nízkému stupni zmapování a evidenci. Podrobný postup pro členění cestní sítě na homogenní úseky je uveden dále v tomto textu, v části věnované Mapě cestní sítě.

3.1 Faktory pro členění typologie

Schopnost úseku cesty ovlivnit odtokové poměry závisí na řadě faktorů, které mají v různých kombinacích odlišnou váhu. V navržené klasifikaci byly využity následující hlavní faktory:

- a) Ovlivněná složka odtoku,
- b) Potenciál množství odtoku (plocha sběrné oblasti),
- c) Potenciál ovlivnit rychlost odtoku.

První faktor vstupuje do klasifikace přímo jako kategorická proměnná o dvou třídách. Pro vyjádření potenciálního množství odtoku byla vybrána, ve snaze vyhnout se značným nejistotám souvisejícím s metodami kvantifikace odtoku z horských a lesních porostů v nepozorovaných povodích, univerzální odtoková charakteristika v podobě plochy sběrné oblasti. Poslední hlavní faktor – potenciál ovlivnit rychlost odtoku v praxi závisí na řadě detailních charakteristik, pro navrženou klasifikaci byly vybrány následující:

- přítomnost prvku podélného odvodnění,
- řešení odvodnění vozovky, výskyt příčných svodnic a jejich technické řešení,
- konstrukce zemního tělesa s ohledem na propustnost,
- konstrukce (povrch) vozovky s ohledem na propustnost,
- orientace komunikace vůči svahu,
- uspořádání příčného profilu cesty vůči terénu,
- podélný a příčný sklon,
- objekty na cestách a způsob převádění vod,
- souběh/křížení s vodním tokem.

3.2 Úrovně typologie

Vlastní typologie cest byla navržena ve strukturované podobě ve dvou úrovních podrobnosti: základní a detailní. Základní úroveň typologie umožní klasifikaci úseků cestní sítě čistě na základě analýz běžných datových podkladů, zatímco detailní úroveň představuje další zpřesnění základní typologie využitím terénních průzkumů nebo sofistikovaných datových analýz. Toto členění je nezbytné s ohledem na rozsah cestní sítě v hodnoceném území, který za běžných podmínek dostupných časových a personálních kapacit neumožňuje její kompletní fyzické zmapování.

Základní úroveň typologie

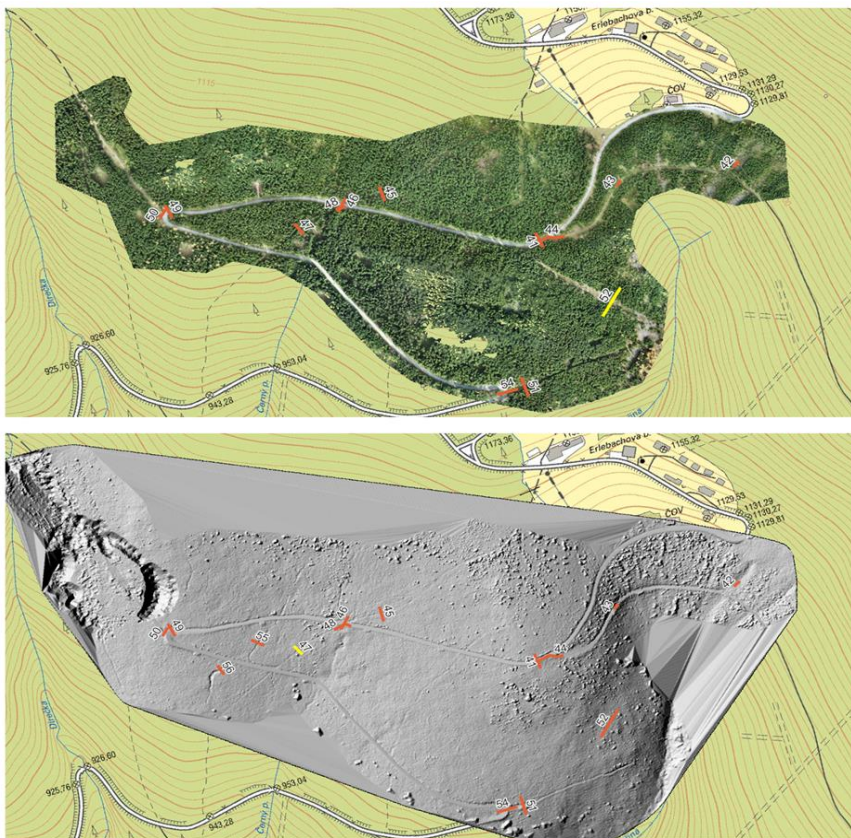
Tato úroveň klasifikace cestní sítě byla navržena k aplikaci pouze na základě snadno dostupných datových podkladů v prostředí GIS. Testována byla v prostorovém měřítku celého území KRNAP s ohledem na její pozdější využití na libovolném jiném území v rámci ČR. Hlavním datovým podkladem je topologická síť liniových objektů cestní sítě tak, jak byla přítomna v databázi ZABAGED (ve verzi pro rok 2021). Pro otestování typologie byla využita specializovaná datová sada cestní sítě udržovaná GIS oddělením Správy KRNAP. Pro určení průměrných sklonových poměrů cestních úseků byl použit výškopisný model DMR4G a pro určení extrémů (vrcholů a lokálních minim) podélných profilů model DMR5G.

V první fázi řešení byla formulována obecná kritéria pro klasifikaci cestních úseků do tříd základní úrovně typologie, a to samostatně pro povrchový (PO) a podpovrchový odtok (PPO). Přehledně jsou shrnuta v *tab. 1*.

Tab. 1. Třídy základní úrovně typologie cest a obecná kombinace klíčových charakteristik pro zařazení jednotlivých úseků
 Tab. 1. Classes of the basic level of road typology and general combination of key characteristics for classification of individual segments

Třída	Potenciál ovlivnění složky odtoku	Charakteristiky ovlivňující PO	Charakteristiky ovlivňující PPO nebo převod PPO na PO
A	velmi významný	zpevněné komunikace, vyšší podélný sklon	významná přispívající plocha, značně sklonité území, velký odklon od spádnice (tedy blízký vrstevnicovému vedení)
B	významný	zpevněné komunikace, mírný podélný sklon	významná přispívající plocha, úsek ve svahu (značně sklonité území), v kontaktu s lokálním minimem, střední odklon od spádnice
C	střední	nezpevněný povrch, vyšší podélný sklon	významná přispívající plocha, úsek s vyšším podélným sklonem
D	nízký	nezpevněný povrch a mírný podélný sklon, zpevněné komunikace s velmi malým podélným sklonem	významná přispívající plocha, ostatní kritéria bez rizika
E	minimální	nezpevněný povrch, přibližně vrstevnicové vedení	bez přispívající plochy, ostatní kritéria nerelevantní

V prvním návrhu základní úrovně typologie byly jako klíčové charakteristiky zvažovány i existence prvků podélného odvodnění a terénní konfigurace – poloha cesty vůči okolnímu terénu. Tyto charakteristiky nelze sice vyčíst z běžných datových podkladů, ale v rámci řešeného projektu byly testovány postupy pro analýzu podrobných DMT pořízených technikami leteckého laserového skenování, jež se stávají v posledních letech stále dostupnější. Pro analýzu pilotních lokalit vybraných v rámci řešení projektu byl k dispozici DMT z roku 2012 v rozlišení 100 cm dodaný Správou KRNP a DMT s prostorovým rozlišením 50 cm pořízený vlastními prostředky UAV. V obou případech šlo o produkty laserového skenování. Analyzováno bylo přibližně 20 příčných profilů ve dvou lokalitách, příklad lokality pod Špindlerovkou včetně polohy zkoumaných profilů ukazuje obr. 1.

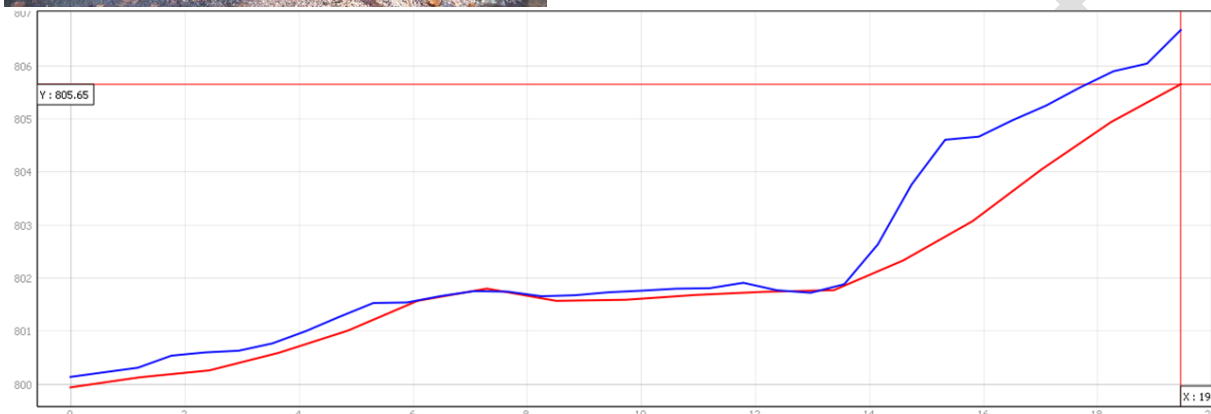


Obr. 1. Ortofoto snímek (nahore) a podrobný DMR (dole) odvozené pomocí dat z UAV; červeně příčné profily pro testování identifikace prvků podélného odvodnění

Fig. 1. Orthophoto (top) and detailed DTM (bottom) derived from UAV data; cross-sections in red are used for testing the identification of roadside drainage features

Analýzy získaných příčných profilů se pro získání informace o terénní konfiguraci cestního úseku, případně o objektech podélného odvodnění ukázaly jako podmíněně použitelné. Na obr. 2 je zachycen asi nejzřetelnější z analyzovaných příčných profilů v pilotní lokalitě pod Rennerovkami. Na metrovém digitálním modelu cestní příkopy většinou rozeznatelné nejsou, v případě detailnějšího rozlišení většinou ano. Nezřídka je však těžké je identifikovat v šumu způsobeném relikty zpracování výškopisných dat. Terénní konfigurace cesty byla většinou uspokojivě patrná i na méně podrobném metrovém modelu, standardní dvoumetrový model DMR5G publikovaný službami ČÚZK už však na tuto úlohu nestačil.

Obecně se ukázal značný problém s georeferencováním leteckých dat v prostředí lesních porostů a s filtrováním zachycených bodových mračen. Analýzu dále komplikovala i pro tuto úlohu již nedostačující polohová přesnost linií cestní sítě, a to i v případě korigovaného mapového podkladu od Správy KRNP, který obecně vykazoval vyšší přesnost než polohopis ZABAGED. Automatizace procesu generování příčných profilů a identifikace prvků podélného odvodnění z podrobných DMT se ukázala jako nereálná a manuální analýzy jako neefektivní oproti jednoduchému terénnímu průzkumu. Z těchto důvodů nebyly charakteristiky terénní konfigurace a výskyt prvků podélného odvodnění použity pro základní úroveň typologie cestní sítě a byly přesunuty až do úrovně detailní.



Obr. 2a, b. Příčný profil cesty odvozený z DMR z leteckého laserového skenování s rozlišením 1 m (červeně, Správa KRNAP) a 50 cm (modře, ČVUT) pro testování identifikace terénní konfigurace cesty a výskytu prvků podélného odvodnění; nahore fotografie skutečného stavu z terénního průzkumu

Fig. 2a, b. Cross-section of the road derived from DTMs based on LiDAR scanning with 1 m resolution (red, KRNAP Administration) and 50 cm resolution (blue, CTU) for testing the identification of road alignment in terrain and roadside drainage features; photograph of the actual condition from a field survey (top)

Pro výslednou klasifikaci cestních úseků dle základní úrovně typologie bylo použito následujících šest charakteristik:

- Z – cesta zpevněná/nezpevněná (1/0),
- M – návaznost na lokální minimum nebo křížení s tokem ANO/NE (1/0),
- S – průměrný podélný sklon úseku (%),
- D – odklon cest od spádnice (0° – 90°),
- T – příčný sklon terénu v okolí úseků (%),
- W – plocha přispívajícího dílčího povodí (ha).

Pro aplikaci základní úrovně typologie při tvorbě Mapy cestní sítě KRNAP byl použit klasifikační klíč dle tab 2. Prahové hodnoty kritérií a jejich kombinace určené pro klasifikaci úseků cest byly založeny na frekvenční analýze výskytu hodnot jednotlivých parametrů na území KRNAP, a mohou být proto ovlivněny specifickým charakterem tohoto území. Při aplikaci typologie v jiných územích je žádoucí provést obdobnou frekvenční analýzu a prahové hodnoty pro hranice tříd případně mírně upravit. Pro úpravu kombinací použitých kritérií by však zpracovatel měl mít závažný objektivní důvod, jako např. neexistenci některých datových podkladů (nedostupné mohou být informace o charakteru povrchu cest). Základní úroveň typologie cestní sítě je navržena jako explicitní kombinace hodnocení potenciálu ovlivnění obou složek přímého odtoku, tedy např. B/C. Doplněním faktorů zjištěných v rámci detailního terénního průzkumu je možné ji rozšířit do detailní úrovně. Aplikací typologie a zobrazením výsledků se zabývá oddíl věnovaný Mapě cestní sítě.

Tab. 2. Kombinace a hodnoty charakteristik pro zařazení úseku cesty dle základní úrovně typologie

Tab. 2. Combinations and values of characteristics for classifying road segments according to the basic level of typology

Potenciál ovlivnění povrchového odtoku		Potenciál ovlivnění podpovrchového odtoku nebo převedení na odtok povrchový
A	$Z = 1; S \geq 10 \%$	$D > 70^\circ; T > 20 \%; W > 0,5 \text{ ha}$
B	$Z = 1; 4 \% \leq S < 10 \%$	$M = 1; 50^\circ < D \leq 70^\circ; T > 20 \%; W > 0,5 \text{ ha}$
C	$Z = 0; S \geq 10 \%$	Není A+B; $S > 10 \%; W > 0,5 \text{ ha}$
D	$Z = 1; S < 4 \%$ NEBO $Z = 0; 4 \% \leq S < 10 \%$	Není A+B+C; $W > 0,5 \text{ ha}$
E	$Z = 0; S < 4 \%$	$W \leq 0,5 \text{ ha}$

Detailní úroveň typologie

Na základní úroveň typologie cestní sítě vyjadřující potenciál ovlivnění odtokových charakteristik dotčeného území navazuje detailní úroveň, jež slouží k podrobnějšímu rozboru ovlivnění odtokových poměrů v jednotlivých konkrétních případech. Doplnjuje základní úroveň typologie o charakteristiky cestní sítě, které je za současného stavu podkladových dat možné určit pouze terénním průzkumem.

Pro detailní průzkum na území KRNAP bylo vymezeno pět pilotních území. Průzkum byl realizován v období od července do listopadu 2022 a mírně doplněn v roce 2023. Pro sběr dat byla využita otevřená mobilní aplikace QField na technologii QGIS, jež umožňuje souběžný sběr dat více pracovníky a následnou synchronizaci. Datový model pro sběr dat byl po dvou počátečních úpravách ustálen do podoby tří oddělených bodových vrstev dle tab. 3 s fotografickými anotacemi. Kategorie jednotlivých charakteristik neuvádíme, po formálním uzavření výše zmíněného projektu č. TITSMZP945 je bude možné dohledat v plném textu výsledku V1 – Typologie cestní sítě.

Tab. 3. Bodové vrstvy pro sběr terénních dat a evidované charakteristiky

Tab. 3. Point data layers for field data collection and recorded characteristics

Označení	Název vrstvy	Evidované charakteristiky
A	Objekty pro převádění vod	Typ objektu, tvar na vtoku, tvar na výtoku, rozměry, materiál, foto
B	Charakteristické body	Třída cesty, sklon, terénní konfigurace, podélné odvodnění, příčné odvodnění, povrch, foto, poškození
C	Specifické body	Typ bodu, příslušenství lesní cesty, překážka přítoku vod, foto

Při tvorbě základní úrovně typologie, resp. její aplikace do mapy, byly definovány dílčí úseky a uzlové body cestní sítě. Toto členění je pro účely aplikace detailní typologie doplněno o významné specifické body typu C (tab. 3) identifikované při terénním průzkumu (např. ukončení prvku podélného odvodnění, změna povrchu apod.). K výsledným úsekům jsou následně přiřazeny zjištěné detailní charakteristiky z příslušných charakteristických bodů typu B. Z evidovaných charakteristik byly vybrány čtyři, které byly převzaty jako kritéria detailní úrovně typologie dle tab. 4.

Tab 4. Kritéria detailní úrovně typologie cestní sítě

Tab 4. Criteria of the detailed level of road typology

Kritérium	Kategorie
Příčné odvodnění	S příčným odvodněním, bez příčného odvodnění

Podélné odvodnění	Bez podélného odvodnění, s neopevněným podélným odvodněním, s opevněným podélným odvodněním
Terénní konfigurace	Vedení na povrchu terénu, ve výkopu, v násypu, kombinované vedení v násypu/výkopu
Povrch cesty	Zemní povrch, propustná krycí vrstva, nesouvislé zpevnění, souvislé zpevnění s nepropustnou krycí vrstvou

Je zřejmé, že jednotlivá kritéria spolu navzájem větší či menší měrou souvisejí a výsledné posuzování z hlediska ovlivnění povrchového či podpovrchového odtoku tedy musí být zákonitě založeno na všech najednou, což mimo jiné vyžaduje určitou expertizu v oboru odtoku vody z území a hydrologie celkově. Působení na jednotlivé složky odtoku a určitý návod pro hodnocení cest dle těchto kritérií poskytnou k publikaci připravené výsledky projektu V1 – Typologie cestní sítě a V3 – Metodika pro doporučení budování nových a pro úpravy existujících pozemních komunikací s ohledem na minimalizaci povrchového odtoku (dále jen metodika). Uvedená kritéria byla aplikována a graficky znázorněna ve výsledku V2 – Mapa cestní sítě KRNAP, jejíž odvození je popsáno v následující části tohoto textu.

MAPA CESTNÍ SÍTĚ

Jako druhý požadovaný výsledek v úvodu zmíněného projektu byla vytvořena Mapa cestní sítě KRNAP (dále jen mapa) aplikující typologii cestní sítě pro hodnocení jejího vlivu na hydrologický režim území. Vydána byla v podobě tří mapových atlasů. První zachycuje celé území KRNAP s aplikovanou základní úrovní typologie cestní sítě a zbylé dva atlasy rozvádějí základní úroveň o detailní kritéria typologie na území pěti pilotních území pro podrobnější hodnocení potenciálu ovlivnění podpovrchového, resp. povrchového odtoku. Mapa má sloužit zejména jako jeden z důležitých podkladů pro výběr lokalit vhodných pro realizaci renaturací nebo opatření ke snížení negativních dopadů cestní sítě na odtokový režim v území národního parku. Vedle toho má spolu s průvodní dokumentací mapy a metodikou sloužit budoucím zpracovatelům obdobných studií v dalších chráněných územích ČR jako metodický návod a vzor pro aplikaci Typologie cestní sítě a hodnocení hydrologických dopadů cestní sítě. Následuje stručný popis metodiky tvorby mapy, plné znění je uvedeno v průvodní dokumentaci připravené k publikaci v nejbližší době společně s mapou.

4.1 Vstupní data

Základním podkladem pro tvorbu mapy byla liniová vrstva cestní sítě poskytnutá Správou KRNAP, která byla upřednostněna před daty ZABAGED díky vyšší polohové přesnosti a širší atributové výbavě. Protože ne všechna chráněná území v ČR, kde bylo předpokládáno využití sestavené metodiky, disponují obdobným detailním datasetem, byla tvorba mapy úspěšně otestována na polohopisných vrstvách ZABAGED, konkrétně na sjednocení následujících vrstev:

- Silnice, dálnice,
- Silnice neevidovaná,
- Ulice,
- Cesta.

Posledně jmenovaný objekt *Cesta* je vhodné ve výsledné liniové vrstvě rozlišit dle dostupných detailních atributů. Od roku 2024 došlo k nahrazení původního členění objektu typu *Cesta zpevněná/nezpevněná* novým rozdělením na *Cesta udržovaná/neudržovaná*. Povahu a dopady této změny nebylo možné v rámci zmíněného projektu podrobněji analyzovat a posoudit. Uvedené liniové vrstvy je vhodné doplnit daty o kategorizaci lesní cestní sítě, jimiž by měl disponovat její správce.

Při tvorbě mapy byly dále využity digitální modely reliéfu DMR4G a DMR5G a vrstva *Vodní tok* z polohopisu ZABAGED. Pro aplikaci detailní úrovně typologie byly využity bodové vrstvy charakteristických a specifických bodů z terénního průzkumu popsané v předchozím oddíle.

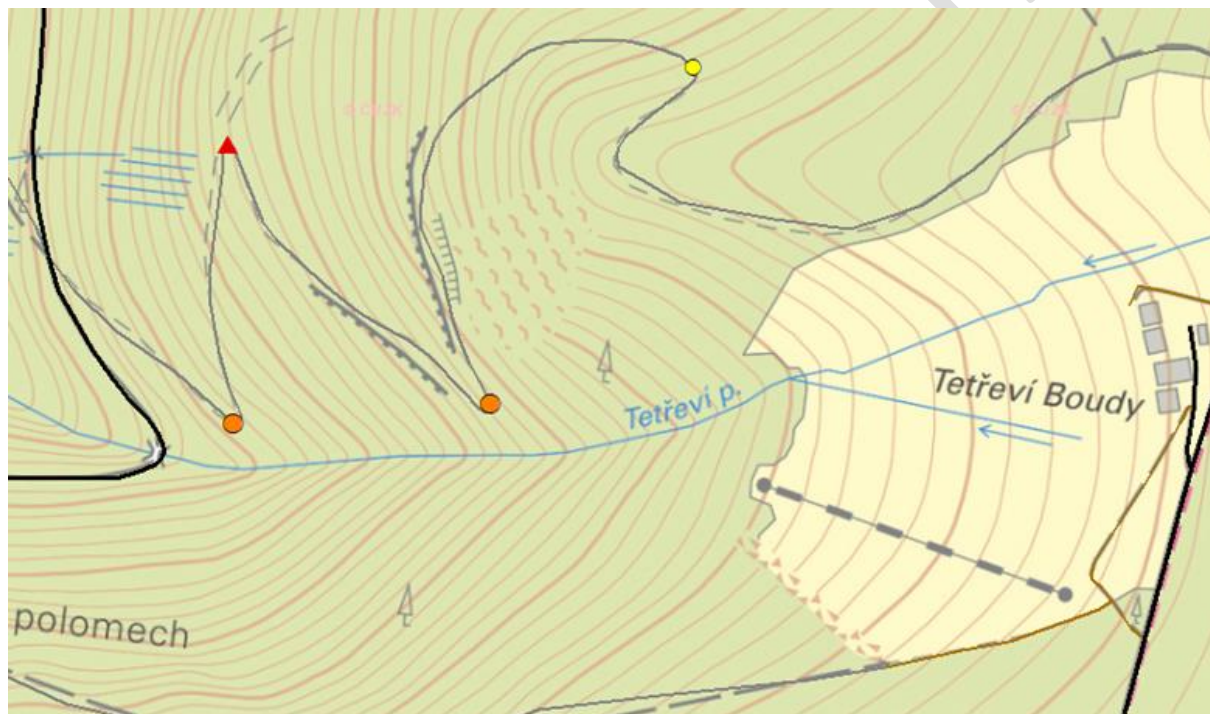
4.2 Metodika tvorby mapy základní úrovně typologie

Dříve než bylo přistoupeno k určování hodnot charakteristik pro klasifikaci cest dle navržené typologie, bylo nejprve nutné rozdělit liniové prvky cest na úseky homogenní z hlediska směrového a výškového vedení, povrchu cesty a obdobné délky. Tato segmentace byla provedena v několika krocích, které zde budou stručně shrnuty, komplexní postup je uveden v průvodní dokumentaci mapy.

Nezbytným prvním krokem byla oprava topologie linií tak, aby byly přerušeny v uzlech cestní sítě. Nežádoucí jsou přesahy a nedotažené linie. Pseudouzly, tedy styk dvou liniiových prvků, je povolen jen v místě změny atributu klíčového pro klasifikaci úseku dle typologie, v tomto případě pouze změna povrchu cesty. V podkladové vrstvě od Správy KRNAP byla tato pravidla porušena ve stovkách případů a musela být poloautomaticky odstraněna. V případě použití polohopisu ZABAGED je nutné po sloučení uvedených liniiových vrstev topologii výsledné sítě vyčistit dle těchto pravidel.

Dělení v místech směrových zlomů

Prudké směrové zlomy a oblouky jsou častým místem změny řady charakteristik cesty – podélného sklonu, konfigurace vůči terénu, existence prvků podélného odvodnění aj. Jelikož běžné GIS nástroje tato místa na liniích identifikovat nedokážou, byly za tímto účelem vytvořeny vlastní analytické skripty v prostředí R project. V prvním kroku byly identifikovány ostré směrové zlomy tam, kde sousední vertexy svíraly úhel menší než 100° , na obr. 3 je takový zlom označen červeným trojúhelníkem. V druhém kroku byly identifikovány ostré oblouky, jež jsou v liniiové reprezentaci složeny z řady velmi krátkých úseků. K tomuto účelu byla vytvořena aproximace každé linie z bodů s konstantním rozestupem 15 m a aplikací empirické prahové hodnoty 120° pro sousední body – na obr. 3 jsou ostré oblouky indikovány kruhem s barvou dle významnosti. Pro výsledné dělení linií byly odfiltrovány vzájemně blízké body a body v blízkosti uzlů cestní sítě, které by jinak způsobily nežádoucí fragmentaci cestní sítě.



Obr. 3. Ostrý zlomový bod (červený trojúhelník) a tři výrazné oblouky (oranžové a žlutý kruh) jako dělicí body linie přístupové cesty k Tetřevím boudám

Fig. 3. Sharp break point (red triangle) and three prominent curves (orange and yellow circles) as split points of the access road to Tetřeví boudy

Křížení s vodními toky

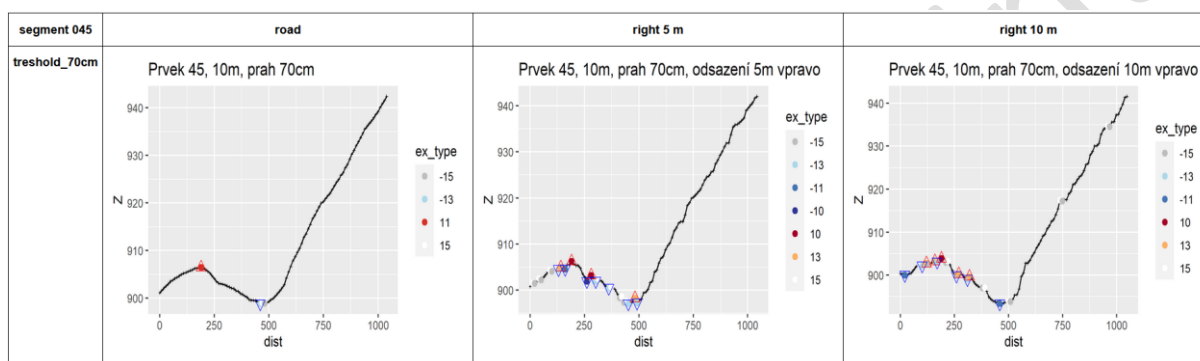
Linie cest je vhodné rozdělit v místě křížení s vodním tokem, protože často (ne vždy) jde o místa se změnou výškového vedení. Návaznost úseku na vodní tok, respektive lokální výškové minimum, je zároveň jednou z charakteristik pro klasifikaci úseků dle navržené typologie. Blízko křížení se však často nacházejí uzlové body cestní sítě (křižovatky) a v takových místech není žádoucí úseky cest dělit, aby nedocházelo k nadbytečné fragmentaci. V širším řešeném území KRNAP bylo identifikováno přes 2 700 průsečíků s povrchovým úsekem vodního toku, po odfiltrování nežádoucích bodů jich byla použita méně než polovina.

Identifikace výškových extrémů

Pro zajištění korektního výpočtu sklonových poměrů je nezbytné rozdělit linie cest v místech lokálních výškových extrémů. Běžné GIS nástroje identifikaci těchto míst neumožňují, proto byly opět sestaveny a otestovány vlastní analytické postupy v prostředí R project.

Pro identifikaci optimálního nastavení nástrojů byly v rámci každého úseku cesty vygenerovány body postupně ve čtyřech variantách odlehlostí 2, 5, 10 a 20 m a těmto bodům přiřazena výška dle DMR5G. V každém bodě pak byla posuzována jeho výška v kontextu výšky dvou sousedních bodů a indikována lokální maxima a minima s ohledem na požadovaný práh výškového rozdílu (pět variant v rozmezí 10–150 cm). Extrémy byly klasifikovány do šesti úrovní významnosti podle výšky/hloubky extrému a podle jeho šířky a monotonie (výskyt inflexe) v posuzovaném okolí.

Kvůli prověření potenciálních chyb ve směrovém vedení cest byla stejná analýza zopakována pro rovnoběžné linie po obou stranách cest s odstupem 5 a 10 m. Automaticky generované grafy podélných profilů byly systematicky vizuálně analyzovány ve skupinách, jednu z nich ukazuje *obr. 4*. Tento přístup prokázal dostatečnou přesnost směrového vedení linií cest ve srovnání s jejich ekvidistantami. Jako ideální pro tvorbu podélných profilů se ukázala odlehlost bodů 10 m a výškový práh 70 cm. Na závěr byly opět odstraněny body v blízkosti uzlů cestní sítě a ošetřen byl výskyt blízkých opačných extrémů.



Obr. 4. Příklad podélných profilů osy cestního úseku (vlevo) a dvou rovnoběžek ve vzdálenosti 5 a 10 m (uprostřed a vpravo) a identifikovaných lokálních výškových extrémů. Zobrazeny jsou profily z bodů s odlehlostí 10 m a výškovým prahem 70 cm pro indikaci významného extrému

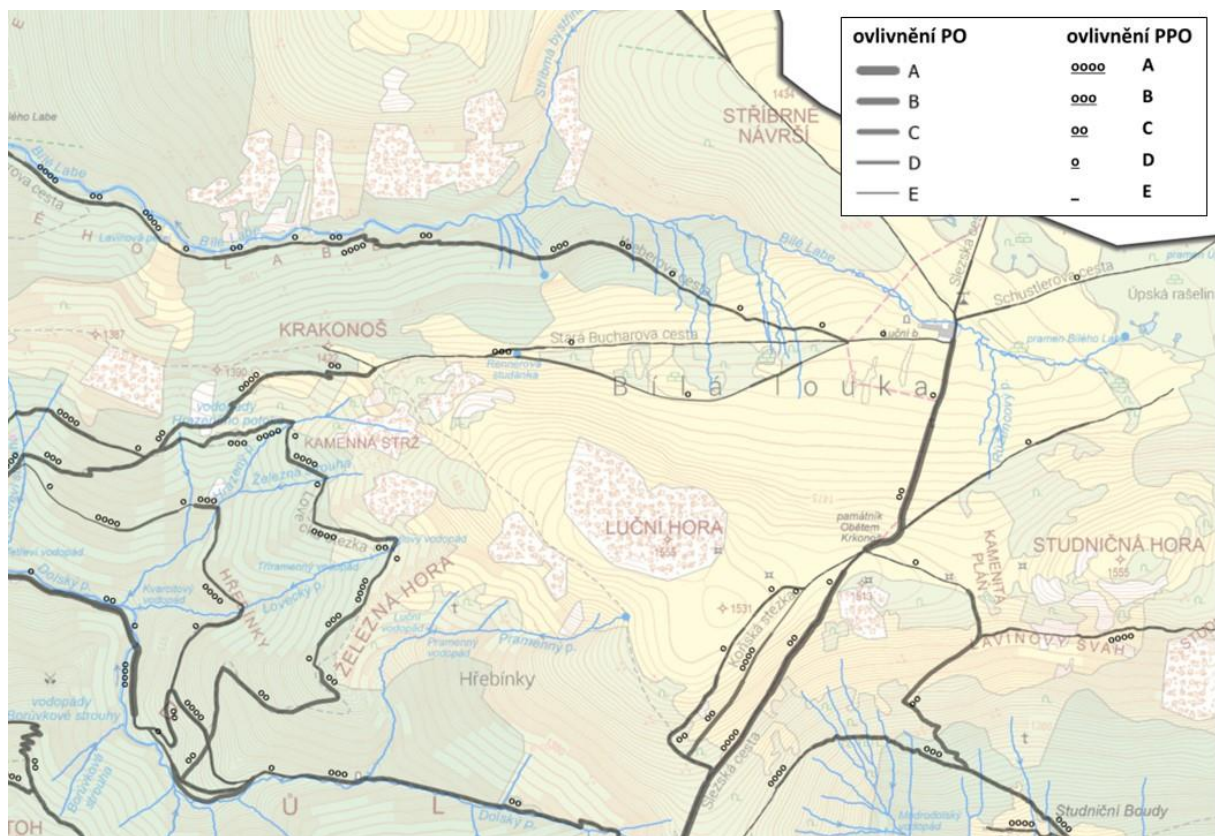
Fig. 4. Example of longitudinal profiles of the road centerline (left) and two equidistant lines at offset of 5 and 10 m (center and right), along with the identified local elevation extremes. The profiles were derived from points with 10 m spacing, with a vertical threshold of 70 cm used to indicate significant extremes

Dělení dle délky a stanovení charakteristik úseků

Po zohlednění směrových zlomů, křížení s vodním tokem a výškových extrémů byly získané úseky cest rozděleny po 200 m. Tím byla dokončena homogenizace úseků cestní sítě a následoval výpočet charakteristik pro aplikaci typologie. Z DMR5G podél úseků cest byl vyčíslen jejich průměrný sklon. Z vyhlazeného rastru DMR4G byl odvozen rastr sklonů a v rámci 20m obalové zóny kolem os úseků byly vyhodnoceny průměrné sklonové poměry jejich okolí. Podrobnější DMR5G pro tento účel není vhodný, protože zachycuje i výškové poměry cesty samotné, např. zářezy v terénu nebo cestní příkopy. Ze stejného důvodu byl DMR4G použit i pro odvození sběrných ploch (mikropovodí) cestních úseků. Pro jejich určení byl zaveden zjednodušující předpoklad dokonalého přerušení odtoku cestou, protože reálnou schopnost cesty zadržovat odtok nelze bez detailního pozemního průzkumu stanovit. Pro odvození sběrných ploch byla sestavena komplexní procedura zahrnující odstranění os cestní sítě a povrchových vodních toků z DMR a rozšíření rastrové reprezentace cest. Podrobný popis procedury je mimo možnosti tohoto článku.

Aplikace základní úrovně typologie a tvorba mapy

Nástroji databázového zpracování byla vektorovým úsekům cestní sítě přiřazena hodnota charakteristik určujících význam daného úseku pro ovlivnění povrchového i podpovrchového odtoku dle zpracované Typologie cestní sítě. Po zařazení každého úseku do kombinovaných kategorií (PO a PPO) byla vytvořena finální mapa pro celé území KRNAP. S ohledem na rozsah a detail zobrazovaných informací byla mapa uspořádána do atlasu mapových listů v měřítku 1 : 25 000. Potenciál ovlivnění povrchového odtoku byl zobrazen pomocí proměnlivé tloušťky linie, potenciál ovlivnění podpovrchového odtoku je pak vyznačen pomocí jednoduchého doprovodného popisku. Příklad mapového listu je na *obr. 5*.



Obr. 5. Výsek mapy cestní sítě s aplikovanou základní úrovní typologie zobrazuje potenciál ovlivnění složek odtoku

Fig. 5. Excerpt of the road network map with the applied basic level of typology showing the potential impact on runoff components

4.3 Metodika tvorby mapy detailní úrovně typologie

Mapa detailní úrovně typologie cestní sítě rozšiřuje mapu základní úrovně o poznatky z terénních průzkumů, konkrétně o charakteristiky dle tab. 4. Tyto a další charakteristiky cest byly sbírány a shromážděny ve třech bodových vrstvách včetně fotografických anotací, které lze vhodně zobrazit běžnými GIS nástroji, přestože zobrazení více fotografických příloh jednoho bodu představovala v ArcGIS Desktop značnou výzvu. Nasbírané body přirozeně neodpovídaly svoji hustotou odvozenému členění cestní sítě, jež byla vytvořena při tvorbě základní úrovně mapy. Stejně tak body nebyly zpravidla umístěny přímo na linii úseku cesty, ať už z důvodu nepřesného záznamu polohy bodu vlivem špatného signálu GPS v lesním horském prostředí, nebo kvůli chybné poloze, či dokonce absenci linie cesty v mapovém podkladu. Před aplikací detailní typologie proto musela být provedena řada přípravných kroků.

Harmonizace a kompletace dat průzkumů

Pro zdárnou aplikaci detailní typologie na úseky cest je klíčová kvalita a naplněnost atributů bodů z terénního průzkumu. V důsledku různých mapovacích strategií jednotlivých terénních pracovníků např. v případě charakteristiky „příčné odvodnění“ z téměř 2 600 charakteristických bodů něco přes 1 000 neobsahovalo žádnou informaci nebo jen kategorii „jiné“. Chybějící charakteristiky musely být doplněny podle nasbírané fotodokumentace, případně validovány dle sousedních bodů. Kromě doplnění chybějících charakteristik byla namátkově kontrolována a korigována konzistence charakteristik přiřazených jednotlivými editory pro odstranění subjektivního hodnocení, např. konfigurace cesty vůči terénu.

Přiřazení bodů úsekům cest

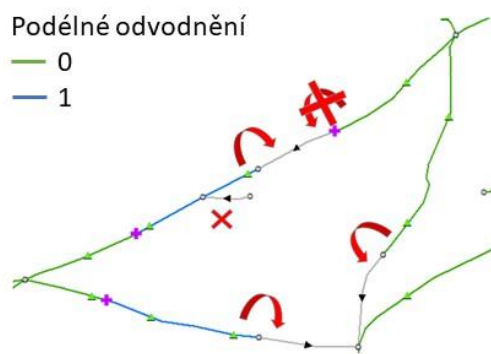
Pozice bodů z terénního průzkumu zaznamenaná prostřednictvím GPS byla následně korigována a body propojeny s úseky cestní sítě. Odchylna GPS polohy bodů vůči ose cesty v mapovém podkladu se pohybovala v jednotkách až desítkách metrů. Přestože v řadě případů existovaly důkazy pro chybu v mapových podkladech, nebyla za účelem konzistence s původními daty poskytovatele (Správa KRNP) prováděna korekce linií cestní sítě, nýbrž byly zaznamenané body automatizovaně přesunuty na nejbližší pozici na těchto liniích. Jako limitní hodnota pro přesun bodu byla po testování různých hodnot zvolena vzdálenost

20 m. Body nad tímto prahem bylo nutné přiřadit ručně nebo zcela vyřadit, aby nedošlo např. k přiřazení bodu charakterizujícího cestu neevidovanou v mapovém podkladu. Nutná byla důkladná vizuální inspekce a korekce chybně přiřazených bodů zejména v oblasti křižovatek.

Dodatečná segmentace a přenos charakteristik

Některé z charakteristik cestní sítě zahrnutých v detailní typologii se mohou měnit náhle (změna povrchu, podélného odvodnění) a v tomto místě změny je nutné rozdělit hodnocený úsek cesty. K dělení byla využita podmnožina specifických bodů z terénního průzkumu. Evidovaný zlom nivelety byl prověřen z hlediska blízkosti uzlového bodu nebo lokálního extrému identifikovaného z DMR. Změny povrchu nebo podélného odvodnění byly ověřeny dle fotodokumentace a okolních charakteristických bodů. Celkem bylo dodatečnému dělení podrobeno cca 130 úseků cest.

Na základě prostorové incidence měly být následně úsekům cest přiřazeny atributy z vrstvy charakteristických bodů. Předtím však byla nutná kontrola úseků s vícenásobným přiřazením charakteristických bodů. Samotný počet není v zásadě překážkou, pokud body obsahují identické charakteristiky. Díky snadné identifikaci v terénu byl nejčistším atributem typ povrchu. Na druhé straně nejvíce problematickou byla charakteristika konfigurace terénu (přes 100 nejednoznačných přiřazení), neboť tyto změny jsou v terénu vždy spíše pozvolné a nebyla pro ně zavedena speciální kategorie specifického bodu. Po kontrole konzistence těchto údajů s pomocí fotodokumentace byla cestní síť naposledy dodatečně rozdělena přibližně v polovině mezi dvěma body s odlišnou charakteristikou. Následně byly liniovým úsekům přiřazeny atributy z charakteristických bodů.



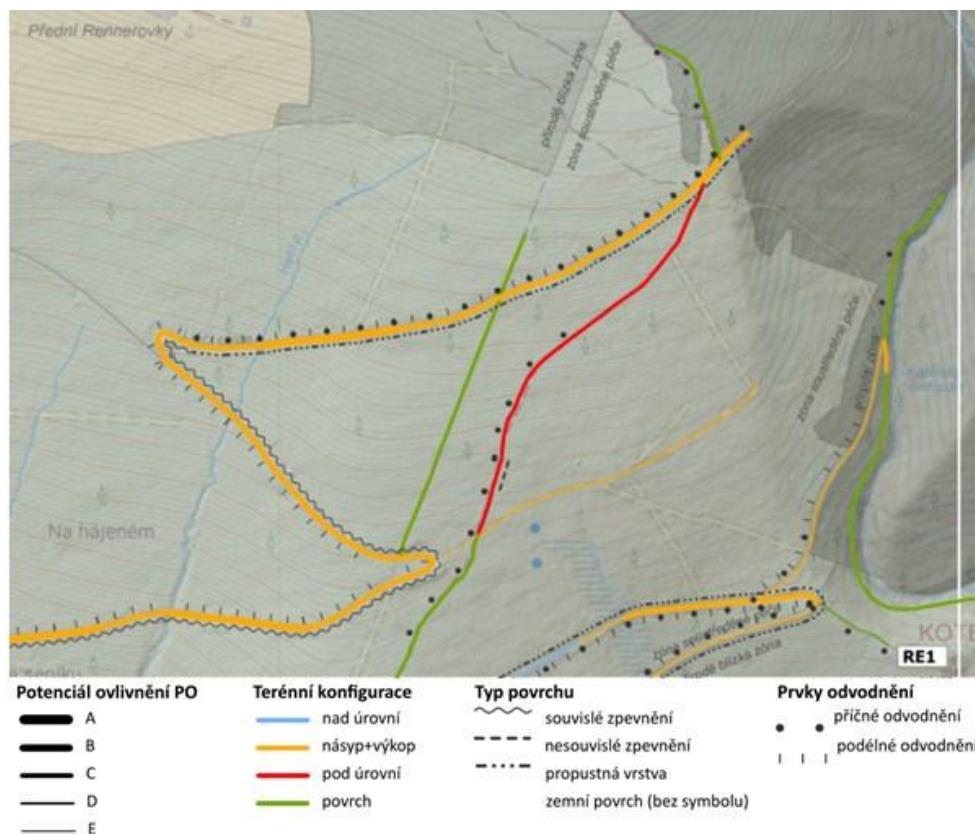
Obr. 6. Schéma přenesení příznaku podélného odvodnění do sousedních úseků se zohledněním specifických bodů (fialové křížky) se zaznamenanou změnou podélného odvodnění; zelené trojúhelníky jsou charakteristické body

Fig. 6. Diagram of transferring the roadside drainage attribute to adjacent segments, taking into account specific points (purple crosses) marking changes in roadside drainage system; green triangles indicate characteristic points

Posledním krokem bylo ošetření úseků bez odpovídajícího charakteristického bodu. Jejich počet je závislý na hustotě bodů z terénního průzkumu. Typický příklad situace po promítnutí bodů k cestním úsekům ukazuje obr. 6. Do prázdných úseků byly iterativním postupem (vpřed/vzad) přeneseny atributy ze sousedních úseků, pokud mezi nimi neexistoval specifický bod indikující změnu daného atributu.

Aplikace detailní úrovně typologie a tvorba mapy

Mapa s aplikovanou detailní úrovní obdobně vychází z mapy základní úrovně a doplňuje ji vhodným zobrazením kritérií detailní úrovně typologie. Detailní mapa byla navržena jako soubor dvou mapových atlasů, jeden pro podpovrchovou a druhý pro povrchovou složku odtoku. Grafické řešení sestává z čitelné kombinace tloušťky čáry (potenciál ovlivnění složky odtoku ze základní úrovně typologie), barevného kódu pro vyjádření terénní konfigurace jako zásadního faktoru pro ovlivnění hydrologického režimu a doprovodných symbolů pro znázornění zbylých charakteristik detailní typologie. Výsledné zobrazení ukazuje obr. 7.



Obr. 7. Příklad aplikace detailní typologie na cestní síť v pilotním území Rennerovky

Fig. 7. Example of applying detailed typology to the road network in the Rennerovky pilot area

ZÁVĚR

Liniové prvky v krajině a zejména síť komunikací mají významný potenciál ovlivňovat odtok vody z území. Tento vliv může být za specifických podmínek i pozitivní, zpravidla jde však spíše o vliv směřující k urychlení odtoku vody z území, které je obecně považováno za nežádoucí. Projekt, jehož vybrané výsledky jsou prezentovány v tomto textu, měl za cíl především poskytnout podklady a nástroje pro identifikaci problematických úseků cestní sítě a minimalizaci jejich nežádoucích efektů, které vedou k urychlení odtoku vody z území se zvláštní ochranou přírody. Prezentovaná typologie a metodika její aplikace do mapových výstupů pomohou taková problematická místa identifikovat, a to ve dvou možných úrovních podrobnosti – v základní úrovni čistě s využitím dostupných mapových podkladů a v detailní úrovni s využitím výsledků terénního průzkumu zaměřeného na několik jasně definovaných charakteristik cest. Odvozené mapy mohou sloužit jako podklad pro výběr a prioritizaci úseků cest v chráněných územích vhodných k realizaci kompenzačních opatření, nebo dokonce úplnému odstranění a renaturaci cesty. Zásadami takových opatření se zabývá další z výstupů zmíněného projektu – *Metodika pro doporučení budování nových a pro úpravy existujících pozemních komunikací s ohledem na minimalizaci povrchového odtoku*, která je připravována k publikaci do konce roku 2025. Společně tyto výstupy poskytují nástroje správcům přírodních území, ať už pod zvláštní, nebo jen obecnou ochranou, k lepšímu sladění zájmů člověka na zpřístupnění krajiny s ochranou v ní probíhajících přirozených odtokových procesů.

Poděkování

Článek vznikl díky podpoře výzkumného úkolu VÚI Výzkum a hodnocení hydrologického režimu v současných a výhledových podmínkách v rámci Dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace VÚV TGM pro rok 2025.

Literatura

- [1] SOULIS, K. X., DERCAS, N., PAPADAKI, C. H. Effects of Forest Roads on the Hydrological Response. *Hydrological Processes*. 2015, 29(7), 1 772–1 782. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.10301>
- [2] ZIEGLER, A. D., GIAMBELLUCA, T. W. Importance of Rural Roads as Source Areas for Runoff. *Journal of Hydrology*. 1997, 196, s. 204–229. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03288-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03288-X)
- [3] TAKKEN, I., CROKE, J., LANE, P. A Methodology to Assess the Delivery of Road Runoff in Forestry Environment. *Hydrological Processes*. 2008, 22(2), s. 254–264. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.6581>
- [4] CARLSTON, C. W. Drainage Density and Streamflow. *U.S. Geological Survey*. 1963.
- [5] OGDEN, F. L. et al. Relative Importance of Impervious Area, Drainage Density, width Function, and Subsurface Storm Drainage on Flood Runoff from an Urbanized Catchment. *Water Resources Research*. 2011, 47(12). Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2011WR010550>
- [6] PALLARD, B., CASTELLARIN, A., MONTANARI, A. A Look at the Links between Drainage Density and Flood Statistics. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2009, 13(7), s. 1 019–1 029. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/hess-13-1019-2009>
- [7] HARR, R. D., HARPER, W. C., KRYGIER, J. T., HSIEH, F. S. Changes in Storm Hydrographs after Road Building and Clear-Cutting in the Oregon Coast Range. *Water Resources Research*. 1975, 11(3), s. 436–444. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR011i003p00436>
- [8] LA MARCHE, J. L., LETTENMAIER, D. P. Effects of Forest Roads on Flood Flows in the Deschutes River, Washington. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001, 26(2), s. 115–134. Dostupné z: [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200102\)26:2<115::AID-ESP166>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200102)26:2<115::AID-ESP166>3.0.CO;2-O)
- [9] ČSN 73 6108. *Lesní cestní síť*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. (Třídící znak: 736108)

Autoři

Ing. Luděk Strouhal, Ph.D.¹

ludek.strouhal@vuv.cz

ORCID: 0000-0002-3979-4894

Ing. Václav David, Ph.D.²

vaclav.david@fsv.cvut.cz

ORCID: 0000-0002-7792-9470

Doc. Ing. Josef Krása, Ph.D.²

josef.krása@cvut.cz

ORCID: 0000-0003-4067-5806

¹ Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha (Česká republika)

² České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2025.07.002

ISSN 0322-8916/© 2025 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

T TYPOLOGY AND EFFECTS OF ROADS ON RUNOFF REGIME IN PROTECTED AREAS

STROUHAL, L.¹; DAVID, V.²; KRÁSA, J.²

¹T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague (Czech Republic)

²Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering, Prague (Czech Republic)

Keywords: road network typology – hydrological regime – GIS runoff analyses – Krkonoše National Park – field mapping

The article presents the results of the project “*Analysis of changes in the water regime of land and watercourses in the Krkonoše National Park caused by the network of roads*” (TA CR, no. TITSMZP945), implemented as a public contract commissioned by the Ministry of the Environment of the Czech Republic within the BETA2 applied research programme. The main output of the project is a two-level typology of the road network in terms of its impact on surface and subsurface runoff. This typology was applied to the territory of the Krkonoše National Park (KRNAP) in the Czech Republic and presented in the form of map atlases. The article describes the principles and criteria of the proposed typology and the methodology of its application in map production, which at the basic level combines spatial analyses of road network datasets, digital terrain models and the hydrographic network, and at the detailed level incorporates the results of extensive field surveys. The original analytical procedures include, among other things, the detection of directional and elevation breaks in road segments and the delineation of micro-catchments for individual sections. The resulting maps provide the Krkonoše National Park Administration and other managers of protected areas with a tool for identifying road segments with the highest potential impact on the hydrological regime and serve as a basis for planning compensatory measures or restoration interventions.