

Analýza kartografických reprezentací skalních útvarů v českém státním mapovém díle

Mgr. Günter Kyncl,
RNDr. Jakub Lysák, Ph.D.,
Přírodovědecká fakulta,
Univerzita Karlova

Abstrakt

Analýza kartografických reprezentací skalních útvarů v českém státním mapovém díle je založena na porovnání topografických informací získaných z dat kartografických reprezentací v ZM 10 a z podrobných výškopisných dat z DMR 5G. Z těchto dat jsou odvozeny vybrané terénní hrany, které jsou porovnány, a na základě výsledků jsou zhodnoceny kartografické reprezentace. V příspěvku jsou popsány základní principy tvorby těchto kartografických reprezentací, postupy pro odvozování vybraných topografických informací z takto specifických dat a také postup pro detekci terénních hran z dat DMR 5G. V poslední části jsou porovnány terénní hrany získané na základě obou typů a zhodnoceny výsledky. Výstupem je jednak zhodnocení kvality kartografických reprezentací skalních útvarů, jednak samotná datová sada odvozených čar terénní kostry, která může přispět k řešení automatizované tvorby skalních šraf v českém státním mapovém díle.

Analysis of Cartographic Representations of Rock Formations in the Czech State Map Series

Abstract

Analysis of cartographic representations of rock formations in the Czech state map series is based on the comparison of topographic information derived from cartographic representations in ZM 10 and detailed elevation data in the digital terrain model (DMR 5G). Selected terrain edges are derived from both types of data, compared and the quality of the cartographic representations is evaluated based on the results. The basic principles of creation of cartographic representations are described, as well as approaches for deriving selected topographic information from such specific data. Further, the procedure for detecting terrain edges from DMR 5G data is described. Finally, the comparison of terrain edges obtained from both types and the evaluation of the results is described. The output is both the evaluation of the quality of cartographic representations of rock formations and the dataset of derived terrain lines itself, which could contribute to the solution of automated creation of rock scales in the Czech state map series.

Keywords: rock formations, terrain edges, digital cliff drawing, ZABAGED®, DMR 5G

1. Úvod

Znárodnování skalních útvarů na mapách představuje z pohledu kartografie i v současnosti poměrně náročný úkol. Automatizované postupy tvorby zatím nedosahují kvalit znázornění s využitím manuálně nakreslených skalních šraf, jejichž tvorba je časově náročná. V praxi se proto často hledá kompromis mezi vizuální kvalitou výsledku a rychlostí, resp. možností automatizace tvorby [1]. Jedním z takových „kompromisních“ způsobů znázornění skal je metoda vytvořená Zeměměřickým úřadem (ZÚ), využívaná v českém státním mapovém díle. Jejím základem je digitální zpracování tzv. žebříčkové manýry. Kartografické zpracování skalních útvarů v současném státním mapovém díle – v Základní topografické mapě v měřítkách 1 : 10 000 (ZTM 10) i 1 : 5 000 (ZTM 5) – vychází z Topografické mapy 1 : 10 000 (TM 10), která vznikala v letech 1957–1971. S využitím TM 10 pak následně v období 1970–1988 vznikala Základní mapa v měřítku 1 : 10 000 (ZM 10), přičemž obraz skalních útvarů byl v naprosté většině případů bez významných změn přímo převzatý z TM 10. Následně byly skalní útvary z posledního analogového vydání ZM 10 v letech 1995–2000 digitalizovány do databáze ZABAGED®, na základě níž pak v letech 2001–2006 vzniklo první digitální vydání ZM 10. Při tvorbě skalních šraf se vycházelo z analogové ZM 10. Po roce 2013 po zpracování produktů nového výškopisného mapování České republiky (ČR) pak byly šrafy na některých místech lokálně upraveny na základě informací z dat leteckého laserového skenování. Při

tvorbě ZTM 10 byla pak využita data využívaná pro tvorbu digitální ZM 10. Z výše uvedeného tedy vyplývá, že současná reprezentace skalních útvarů ve státním mapovém díle je tak ze značné části digitálním přepracováním jejich podoby v TM 10 z 50. let 20. století [2].

Technologický pokrok umožnil v letech 2010–2013 nově a významně přesnější zmapování výškopisu na území celé ČR (včetně ploch skal) s využitím leteckého laserového skenování [3]. Z těchto dat bylo odvozeno několik produktů, z nichž nejpodrobnější a pro účely tohoto článku nejvýznamnější je DMR 5G. Přirozenou otázkou, kterou se nabízí zodpovědět, je, nakolik se informace o skalních útvarech z DMR 5G a ze ZM 10 shodují. Článek na tuto otázku odpovídá tak, že z obou uvedených zdrojů odvodí v plochách skalních útvarů vektorovou topografickou informaci, která má podobu čar terénní kostry (ČTK): hřbetnic, údolnic a vnitřních lomových hran. Tyto linie jsou následně porovnávány s využitím různých prostorových statistik. S ohledem na relativní stálost skal v čase se jeví jako smysluplné tato data porovnávat, i když je od sebe časově dělí více než 60 let.

Cílem článku není jen hodnotit kartografickou reprezentaci skalních útvarů v současném státním mapovém díle, respektive kvalitu práce topografů před téměř 70 lety. Hlavní význam získaných ČTK spočívá zejména v tom, že mohou přispět ke zpřesnění informací o skalách ve státním mapovém díle a následné automatizaci tvorby skalních šraf napříč měřítky. V současné době se reprezentace skal zpracovávají v ZTM pro měřítko 1 : 10 000, 1 : 25 000

a 1 : 50 000 zvláště, přičemž ZTM 5 využívá reprezentaci vytvořenou pro měřítko 1 : 10 000. S využitím pouze ploch skalních útvarů ZABAGED® je automatizace tvorby kartografických reprezentací skalních útvarů pomocí šraf obtížná až nemožná, ale v případě informací o vnitřním členění skalního útvaru pro ni již existují experimentální algoritmy [4].

V úvodní části článku jsou představeny a popsány typy ČTK v plochách skalních útvarů, které jsou relevantní z hlediska jejich znázornění šrafami. Následně jsou popsány postupy, pomocí kterých jsou ČTK z dat kartografických reprezentací odvozeny, a dále je vysvětleno, jakým způsobem byla data ČTK získána na základě DMR 5G. Obě datové sady jsou poté porovnány a v závěru jsou shrnuty možnosti jejich využití pro automatizovanou tvorbu kartografických reprezentací skalních útvarů v českém státním mapovém díle.

2. Čáry terénní kostry a skalní útvary

Skalní útvary jsou obvykle strmé a členité, což je také důvod, proč se na mapách nezachycují vrstevnicemi. Kvůli strmosti by se slévaly a kvůli velké členitosti by byly příliš křivolaké, což by vedlo k nepřehlednosti znázornění v mapě. ČTK (též terénní čáry nebo orografické linie) představují způsob, jak vnitřní rozčlenění skalního útvaru popsat, případně i znázornit, jiným způsobem. ČTK představují místa styku dílčích elementárních ploch skalního útvaru, typicky jednotlivých skalních stěn s různým sklonem a orientací.

Pro účely tohoto článku budeme rozlišovat následující typy objektů:

- hřbetnice,
- hřbetnice charakteru bodového objektu,
- údolnice,
- vnitřní lomové hrany,
- horní hrany,
- dolní hrany,
- ostatní (boční) hrany.

Objekty odpovídají těm, které se vyskytují i mimo skalní terén (viz např. [5]). **Hřbetnici** lze charakterizovat jako spojnicí relativně nejvyšších bodů v rámci daného terénního tvaru. Jedná se o linii na styku dvou přilehlých skalních stěn téhož skalního útvaru. Pro rozlišení od následujícího případu je tento objekt dále v textu označován též jako **liniová hřbetnice**. Jako **hřbetnice charakteru bodového objektu** je pak označována velmi krátká hřbetnice, která svým charakterem a umístěním odpovídá vrcholu v rámci daného skalního útvaru (tedy například vrchol skalní věže). **Údolnice** je linie, která kopíruje místa, kde dochází k největšímu vhloubení údolí v daném útvaru. Jako **vnitřní lomové hrany** jsou označovány linie, na nichž dochází v rámci daného skalního útvaru k výrazným změnám sklonu. Uvedené tři typy objektů leží vždy uvnitř plochy skalního útvaru.

Horní a dolní hrany pak leží pouze na obvodu skalního útvaru. **Horní hrana** představuje tu část obvodu skalního útvaru, od níž se jeho vnitřek svažuje směrem dolů, tj. v této části je skalní útvar obecně níže než tato linie. **Dolní hrana** reprezentuje naopak tu část obvodu skalního útvaru, od níž jeho vnitřek vystupuje směrem nahoru, tj. v této části je skalní útvar obecně výše než tato linie. Jde o analogii horní hrany a paty terénního stupně. Z uvedeného popisu vyplývá, že ne každá část obvodu polygonu musí

být klasifikována jako horní nebo dolní hrana. V případě, že je hranice skalního útvaru v daném místě kolmá na vrstevnici (tedy sleduje směr spádu terénu), nebude klasifikována. Tvoří totiž "bok" skalního útvaru. Tyto hrany jsou dále označovány jako **ostatní** (případně **boční**) hrany.

3. Odvození ČTK a klasifikace obvodových hran z dat kartografických reprezentací

Hřbetnice, údolnice a vnitřní lomové hrany nejsou v digitálně zpracovaných datech kartografických reprezentací zachyceny přímo, ale je potřeba je z nich odvodit. Pro pochopení principu odvození je nejprve nutné vysvětlit, jak jsou skalní šrafy vytvářeny.

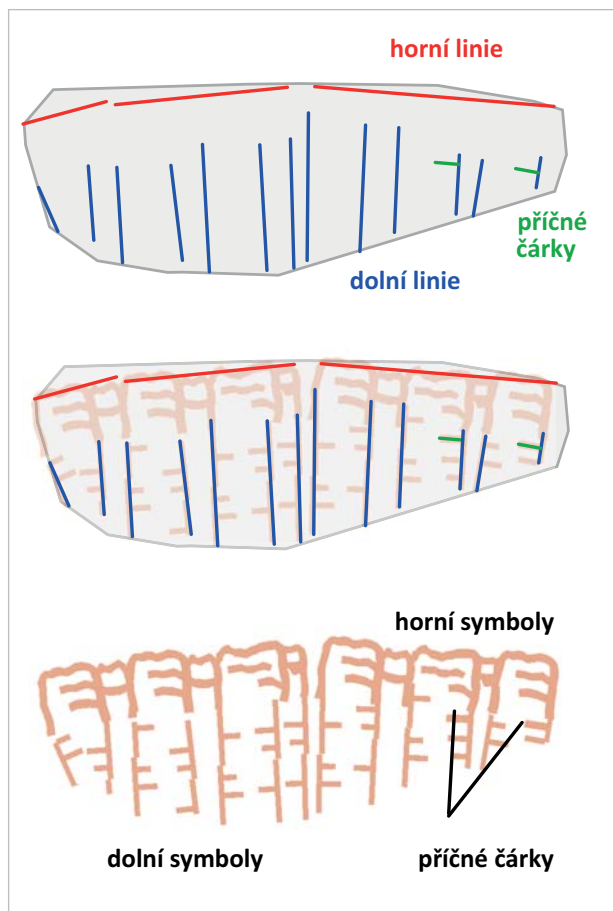
3.1 Základní principy digitální tvorby šraf

Zpracování kartografických reprezentací (mapového znaku) skalních útvarů probíhá podle postupu navrženého na ZÚ. Ten vychází z tzv. žebříčkové manýry [6], varianty skalních šraf používané pro kresbu skal na Topografické mapě (TM) i analogové Základní mapě (ZM) [7]. Základem metody je vyplnění polygonu skalního útvaru pomocí linií podobných stylizovaným šrafám. Pro tento účel jsou vytvořeny speciální liniové symboly. Kombinací těchto liniových symbolů je následně poměrně efektivním způsobem vytvořena kartografická reprezentace (stylizované skalní šrafy) v ploše daného skalního útvaru. Polygony reprezentující půdorys skalních útvarů pak nejsou v mapě přímo znázorněny, ale slouží pouze k odmaskování vrstevnic [2]. Polygonů skal v ZABAGED® je pro území celé ČR přibližně 40 000 (stav k roku 2020; platí i pro dále uváděné počty objektů dalších typů).

Polygon skalního útvaru je vyplňován dvěma typy linií – horními a dolními liniemi. Podél těchto kartografem nakreslených linií jsou softwarem automaticky rozmístěny liniové symboly (dále je budeme označovat jako horní a dolní symboly). Ilustrace vzniku výsledných šraf na základě kartografem nakreslených linií je znázorněna na **obr. 1**.

Horní linie jsou tvořeny řadou vedle sebe kolmo na linii uspořádaných horních symbolů různé šířky, přičemž symboly jsou vytvářeny ve dvou variantách lišících se výškou symbolů (viz **obr. 2**). V rámci skalního útvaru jsou horní linie umístovány tak, aby kopírovaly lokálně nejvyšší místa a zároveň jsou orientovány tak, že směr dolů je pokaždé napravo od dané linie [2]. Horní linie jsou také poměrně často využívány u plošně rozsáhlých polygonů. U těchto polygonů je relativně problematické vyplnit jejich plochu tak, aby byl výsledek graficky uspokojivý, přičemž jedním z řešení je právě umístování dalších řad horních symbolů. Uvedené využití je ale poněkud problematické, jelikož výsledná reprezentace může evokovat výskyt vnitřních lomových hran, které reálně nemusí existovat. Horních linií je pro území ČR přibližně 220 000.

Po umístění horních linií, resp. horních symbolů, je zbylá plocha skalního útvaru vyplněna dolními liniemi. Dolní linie jsou kresleny tak, aby v daném útvaru kopírovaly směr spádu a zároveň navazovaly na předem umístěné horní symboly. Dolní linie nemusí být použity vždy, pokud je plocha polygonu dostatečně zaplněna horními symboly, dolní linie se již neumísťují. Dolní symboly jsou tvořeny kresbou vlastní dolní linie a krátkými příčnými čárkami (příčkami), které slouží k lepšímu vizuálnímu zaplnění plochy poly-



Obr. 1 Ilustrace tvorby reprezentace skalního útvaru dle metody ZÚ (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)

gonu. Tyto příčky jsou umísťovány na pravou stranu dolních linií a směřují do prostoru pod širšími horními symboly. Symbolizace dolních linií je znázorněna na obr. 3 [2]. Dolních linií je pro území ČR přibližně 530 000.

3.2 Odvození ČTK z kartografických reprezentací

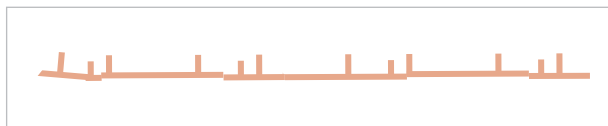
Z popisu v části 3.1 vyplývá, že ČTK popsané v části 2 jsou v datech kartografických reprezentací zachyceny přímo či nepřímo specifickým uspořádáním horních a dolních linií kartografických reprezentací skalních útvarů. Dále jsou popsány hlavní myšlenky celého postupu, podrobnosti včetně všech technických detailů použitého postupu lze nalézt v [8] na s. 33–73.

3.2.1 Hřbetnice

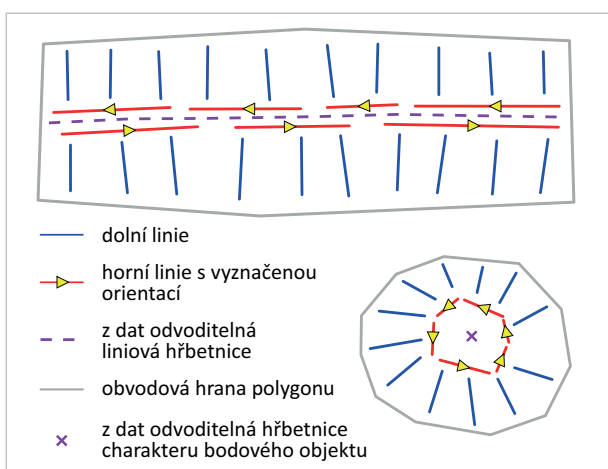
Hřbetnice nejsou v datech kartografických reprezentací obsaženy přímo, avšak jsou reprezentovány prostřednictvím dvojic vzájemně protisměrných a relativně blízkých horních linií. Z dat odvoditelná hřbetnice se pak nachází právě v prostoru mezi nimi. Hřbetnice charakteru bodového objektu jsou v datech reprezentovány jako malé objekty, ve kterých jsou přibližně do kruhu umístěny horní linie. Z dat odvoditelná hřbetnice charakteru bodového objektu je pak reprezentována jako bod umístěný uprostřed prostoru vymezeného horními liniemi (viz obr. 4).



Obr. 2 Dvě varianty horních symbolů (lišící se výškou) (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)



Obr. 3 Symbol pro dolní linii s příčnými čárkami (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)

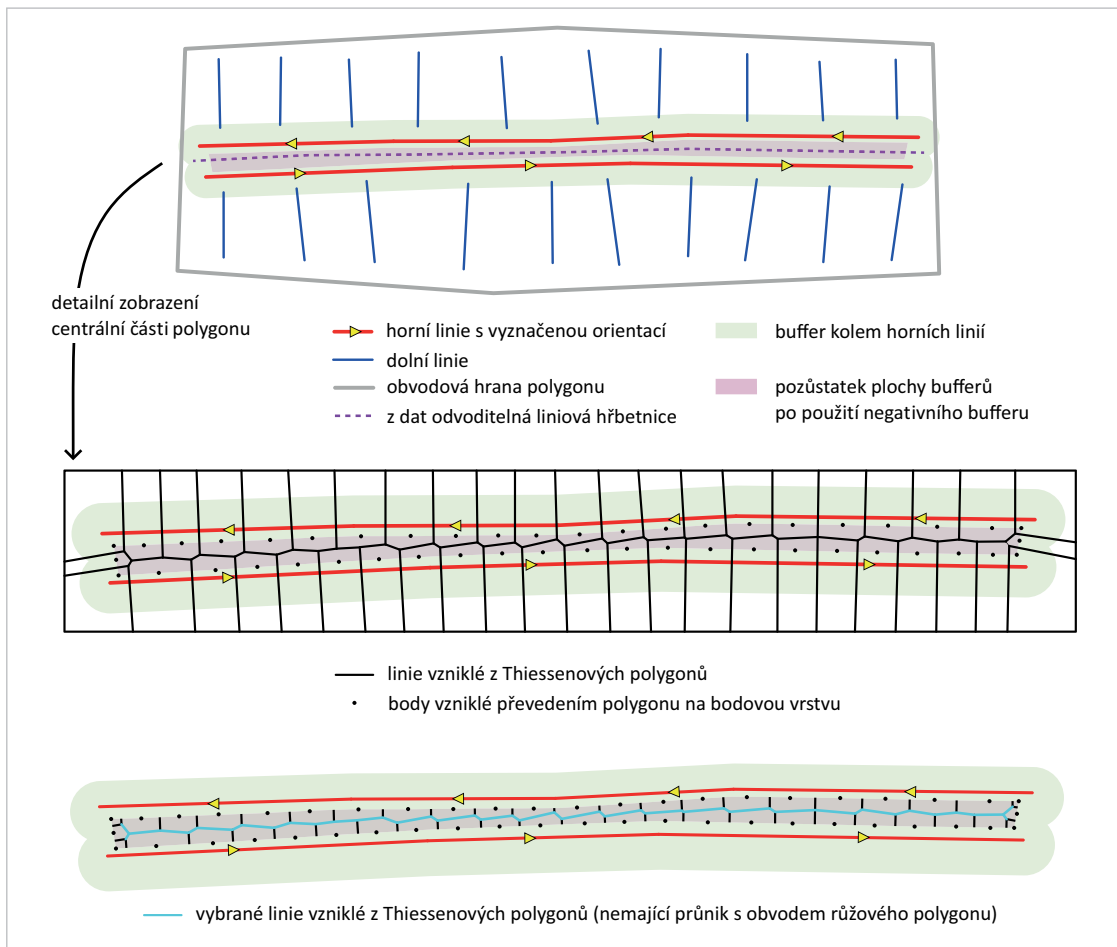


Obr. 4 Ilustrace reprezentace liniových hřbetnic (nahore) a hřbetnic charakteru bodového objektu (dole) v datech kartografických reprezentací

Nalezení hřbetnic na základě kartografických reprezentací je založeno na skutečnosti, že horní linie mají jednotnou orientaci a směr dolů je vždy vpravo od dané linie. V případě liniových hřbetnic to znamená, že dvojice protisměrných linií budou mít vždy na své levé straně horní linii sousedního svahu. U hřbetnic charakteru bodového objektu bude na základě uvedeného platit, že na levé straně horních linií vznikne plocha vymezená horními liniemi (viz obr. 4). Praktický postup pro detekci hřbetnic je pak založen na konstrukci levostranných bufferů nad horními liniemi a nalezení horních linií ležících v ploše vzniklé jejich průnikem. Následné odvození nové geometrické reprezentace hřbetnic pak spočívá v nalezení středové osy plochy, která vznikne průnikem levostranných bufferů. K získání středové osy je využito Thiessenových polygonů, které se vytvoří nad body na obvodu (navzorkovanými ve zvoleném intervalu) dané plošky – viz obr. 5.

3.2.2 Vnitřní lomové hrany

Vnitřní lomové hrany jsou na rozdíl od hřbetnic v reprezentacích vyjádřeny přímo. Odpovídají jim horní linie kartografických reprezentací, které jsou umístěny v ploše polygonu, neleží na jeho okraji a zároveň nejsou reprezentací hřbetnic. Detekce pak spočívá v postupné eliminaci

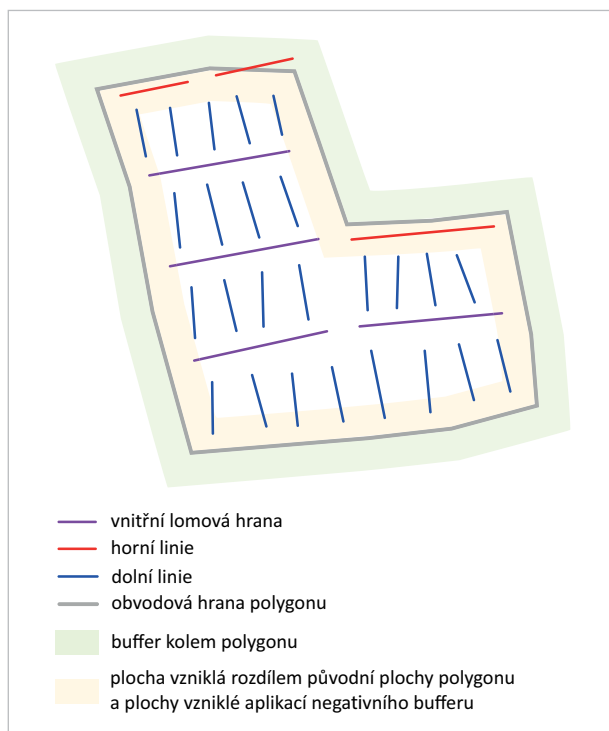


Obr. 5 Ilustrace postupu tvorby nové geometrie pro liniové hřbetnice

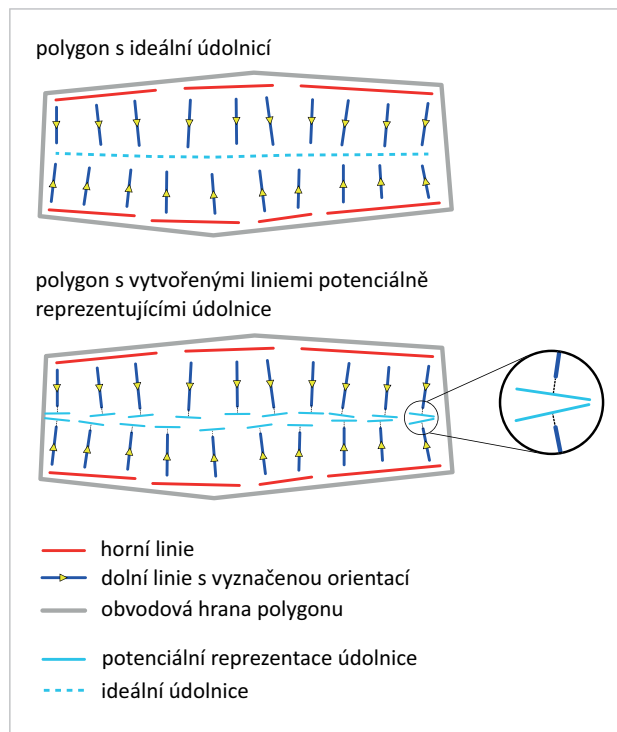
horních linií, které leží při okraji polygonů a těch, které reprezentují hřbetnice. K eliminaci horních linií na obvodu polygonu je využita plocha, která vznikne spojením bufferu na vnitřní a vnější straně obvodu polygonu (viz obr. 6). V dalším kroku jsou postupem z předchozího odstavce eliminovány horní linie reprezentující hřbetnice.

3.2.3 Údolnice

Údolnice nejsou v datech kartografických reprezentací přímo reprezentovány. Postup jejich odvození je nejkomplikovanější. Zahrnuje nejprve kroky vedoucí k vytvoření objektů potenciálně reprezentujících údolnice, na základě kterých jsou pak identifikovány skutečné údolnice a v posledním kroku je vytvořena jejich geometrická reprezentace. Linie potenciálně reprezentující údolnice jsou vytvořeny na základě kolmic umístěných na opačný konec dolní linie, než u kterého se nachází horní linie (viz obr. 7). Tyto linie jsou vytvářeny s proměnlivou délkou na základě vnitřního uspořádání objektu, přičemž na základě těchto linií je následně možné detekovat skutečné údolnice, resp. vytvořit jejich novou geometrickou reprezentaci analogickým postupem jako v případě hřbetnic. Jako skutečné údolnice jsou označeny ty linie, které mají v těsné blízkosti protisměrnou linii (viz obr. 8). K jejich nalezení je nad vytvořenými liniemi zkonstruován orientovaný buffer, přičemž nová geometrická reprezentace údolnic je pak odvozena stejně jako v případě hřbetnic.



Obr. 6 Ilustrace části postupu identifikace vnitřních lomových hran



Obr. 7 Ilustrace ideální reprezentace údolnice a vytvořených linií potenciálně reprezentujících údolnice

Na obr. 9 a 10 jsou vyobrazeny příklady polygonů skalních útvarů a v nich (úspěšně) detekované, resp. odvozené ČTK.

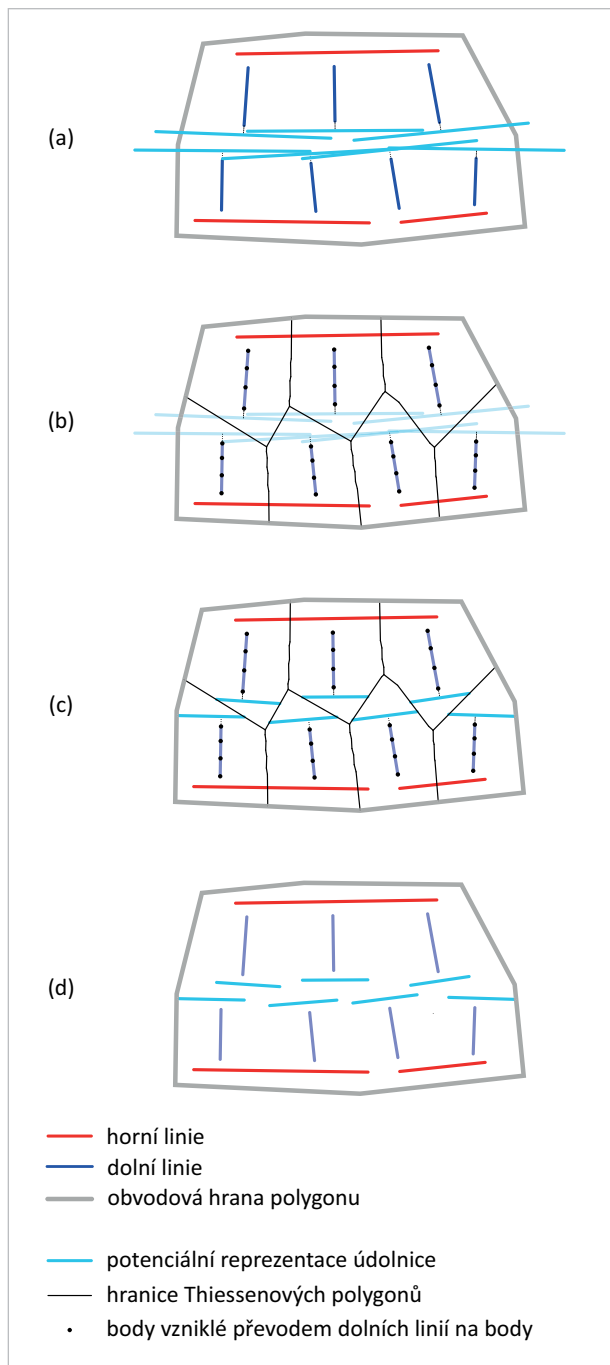
3.3 Klasifikace obvodových hran polygonů skalních útvarů

Dalším krokem v rámci zpracování, resp. analýzy dat kartografických reprezentací je klasifikace obvodových hran polygonů skalních útvarů.

3.3.1 Identifikace horních obvodových hran

K identifikaci horních obvodových hran jsou využity dva přístupy. První přístup je založený na průniku hrany s prodlouženými dolními liniemi. Základní myšlenkou tohoto přístupu je předpoklad, že pokud jsou dolní linie jednotně orientovány (směrem dolů od horních linií) a provede se jejich prodloužení ve směru horních linií, tak by měly protnout právě horní obvodovou hranu daného polygonu (viz obr. 11). K tomuto účelu jsou využity dolní linie bez příčných čárek s jednotnou orientací směrem dolů od horních linií (postupy využitě k přeorientování dolních linií, resp. k odstranění příčných čárek jsou detailně popsány v [8] na s. 24–32).

Každá dolní linie je prodloužena o 15 metrů, což přibližně odpovídá 1,5násobku přepočtené velikosti horních symbolů. Za účelem minimalizace chybných identifikací horních obvodových hran jsou dále využity pouze prodloužené části dolních linií (ty budou mít totiž výrazně menší množství průniků s dolními obvodovými hranami než původní dolní linie), které se nenacházejí na krajích polygonů (tím je minimalizováno množství průniků s bočními

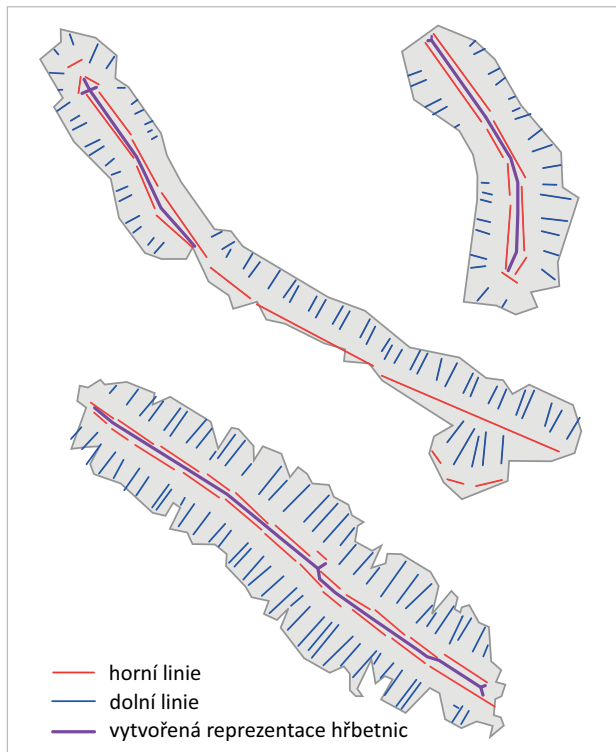


Obr. 8 Ilustrace tvorby linií potenciálně reprezentujících údolnice s proměnlivou délkou

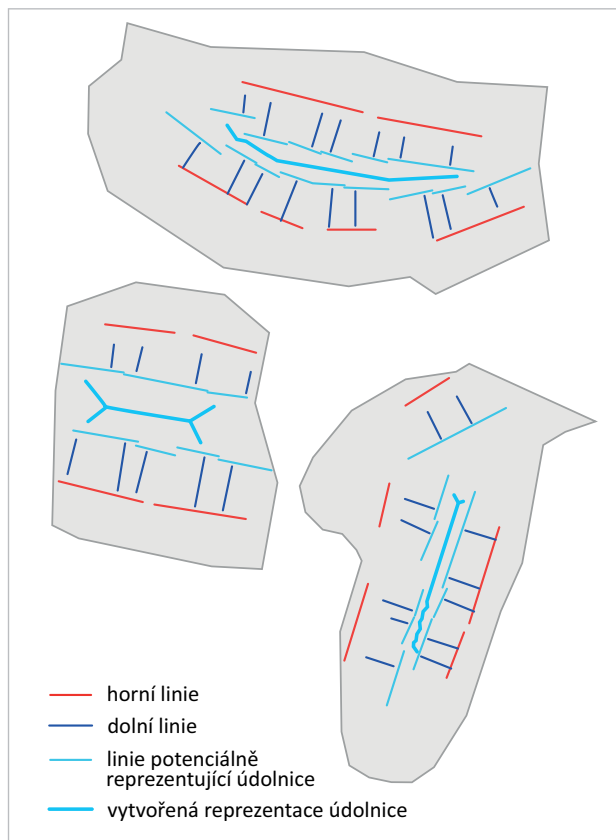
hranami). Jako horní obvodová hrana je následně určena hrana mající průnik s uvedenými liniiovými segmenty.

Druhý přístup je založen na průniku hrany s levostranným bufferem vytvořeným nad horními liniemi. Jelikož jsou horní linie jednotně orientovány (směr dolů je vpravo), lze předpokládat, že dostatečně široký levostranný buffer nad nimi zkonstruovaný bude mít průnik právě s horními obvodovými hranami polygonů (viz obr. 12).

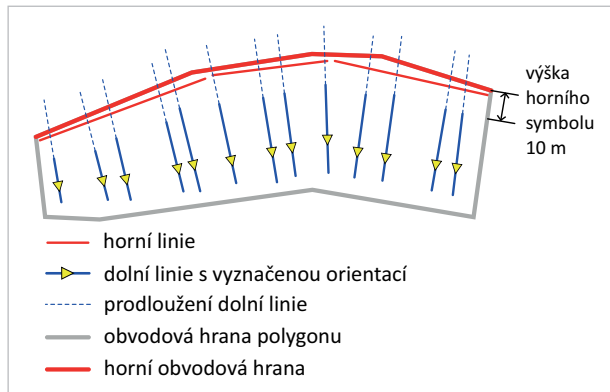
Nad horními liniemi je tedy vytvořen levostranný flat buffer o šířce 10 m (hodnota zvolena na základě testování nad vybranými objekty) a zároveň menší, pravostranný buffer o šířce 3 m, který by měl postihnout situace, kdy jsou horní linie umístěny mimo polygon skalního útvaru.



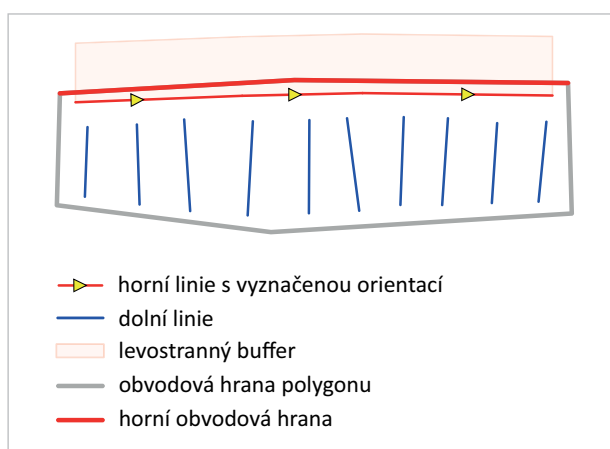
Obr. 9 Ukázka identifikovaných, resp. odvozených hřbetnic v datech kartografických reprezentací (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)



Obr. 10 Ukázka identifikovaných, resp. odvozených údolnic v datech kartografických reprezentací (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)



Obr. 11 Ilustrace postupu identifikace horních obvodových hran na základě jednosměrného prodloužení dolních linií



Obr. 12 Ilustrace postupu identifikace horních obvodových hran na základě levostranného bufferu nad horními liniemi

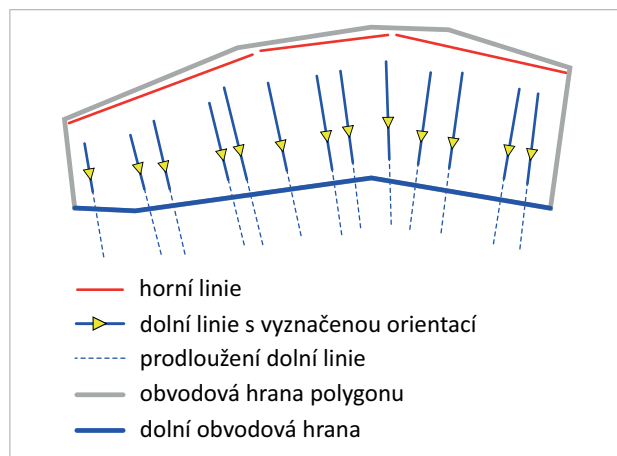
Jako horní obvodové hrany jsou pak označeny ty hrany, které mají průnik s vytvořenými buffery.

Polygony jsou v obou případech procházeny jednotlivě, a tak nehrozí situace, že by došlo k chybné identifikaci hran sousedních polygonů.

3.3.2 Identifikace dolních obvodových hran

Dolní obvodové hrany jsou detekovány na základě existence průniku s prodlouženými dolními liniemi. Stejně jako v případě identifikace horních obvodových hran se počítá s tím, že vstupní dolní linie jsou jednotně orientovány (směrem dolů od horních obvodových hran) a neobsahují příčné čárky. Dolní linie jsou prodlouženy v jejich směru o 15 m (zvoleno na základě testovacích objektů) a jako dolní obvodové hrany jsou následně vyhodnoceny ty, které mají s těmito prodlouženými liniemi průnik (viz obr. 13). Jednotlivé zpracovávání polygonů opět zajišťuje nemožnost chybné identifikace hran v okolních polygonech.

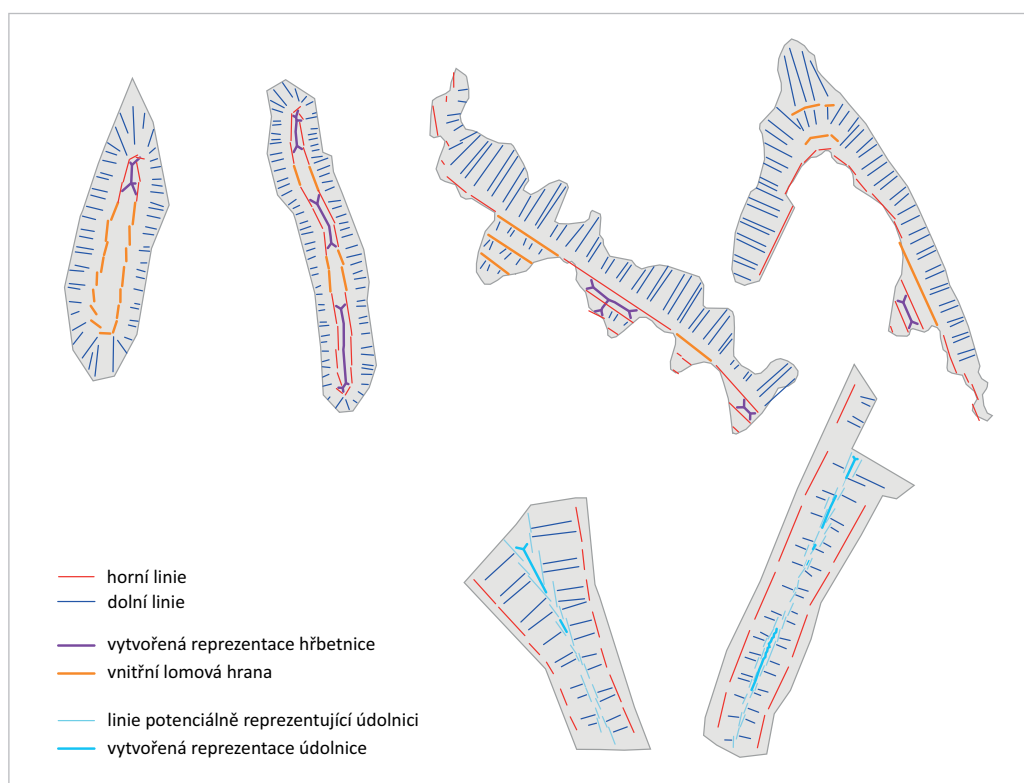
Obvodové hrany polygonů byly na základě již uvedeného klasifikovány jako horní nebo dolní. Jako horní byly označeny ty hrany, které byly jako horní vyhodnoceny alespoň jedním z popsaných postupů. Jako dolní byly určeny hrany identifikované výše popsaným postupem pro detekci dolních hran. Zbylé hrany (neurčené ani jako dolní ani jako horní) jsou v této fázi označeny jako ostatní.



Obr. 13 Ilustrace postupu identifikace dolních obvodových hran na základě jednosměrného prodloužení dolních linií

Tab. 1 Výsledky detekce ČTK z dat kartografických reprezentací (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)

typ ČTK	počet objektů	počet polygonů s daným typem ČTK
liniová hřbetnice	1 394	921
hřbetnice charakteru bodového objektu	373	281
údolnice	187	141
vnitřní lomová hrana	22 422	4 941



Obr. 14 Ukázka vybraných problémů při detekci ČTK z dat kartografických reprezentací (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)

3.4 Výsledky analýzy dat kartografických reprezentací

3.4.1 Detekce ČTK

Na základě popsaných postupů byly v datech kartografických reprezentací detekovány vybrané ČTK a byla pro ně vytvořena nová geometrická reprezentace. Počty jednotlivých typů objektů jsou uvedeny v **tab. 1**.

Úspěšnost představených postupů se v rámci dat výrazně liší. Hlavním faktorem ovlivňujícím výsledek je komplexnost polygonů skalních útvarů, přičemž převážně pla-

tí, že u polygonů s jednoduchou vnitřní strukturou jsou výsledky výrazně lepší než v případě rozsáhlých a komplexních polygonů, vyskytujících se například v oblastech pískovcových skalních měst. U těchto polygonů pak vznikají při detekci vybraných hran určité problémy.

V případě liniových hřbetnic vznikají problémy související s volbou mezní hodnoty, ze které následně vychází šířka bufferu využitá pro detekci hřbetnic. Problémem jsou situace, kdy vzdálenost protisměrných horních linií reprezentujících hřbetnici osciluje kolem mezní hodnoty, což vede k tomu, že liniová hřbetnice vznikne pouze v částech objektu (viz **obr. 14**), resp. část horních linií je chybně identifikována jako vnitřní lomové hrany. V případě vnitř-

ních lomových hran jsou problematické situace u malých polygonů, kde se horní hrany vyskytují relativně blízko okraji nebo v úzkých výbězcích větších polygonů. Taktéž v případě údolnic se objevují situace, kde vznikají chyby. Jedním z nedostatků v případě údolnic je jejich přílišná segmentace (tj. vznik několika menších navzájem nepropojených liniových segmentů). Větší míra segmentace se projevuje zejména v situacích, kdy jsou protisměrné linie potenciálně reprezentující údolnice výrazněji nerovnoběžné (viz obr. 14). U všech typů hran pak nastává problém v případech, kdy je rozmístění dolních a horních linií z nějakého důvodu nestandardní (například při křížení dolních linií).

3.4.2 Klasifikace obvodových hran

V tab. 2 jsou uvedeny výsledky klasifikace obvodových hran polygonů skalních útvarů popsáním postupem, konkrétně počty tří rozlišovaných typů hran, resp. jejich celkové délky. Objektem se chápe segment na obvodu polygonu skalního útvaru tvořený spojnici dvou bodů. Tento postup hodnocení byl zvolen pro účely následného porovnání s výsledky odvozenými z DMR 5G.

Výsledky jsou do značné míry závislé na uspořádání horních a dolních linií v rámci polygonů skalních útvarů, resp. na přesnosti jejich zakreslení. Využitý postup předpokládá, že se v polygonu skalního útvaru standardně nacházejí jak horní, tak dolní linie v určitém geometrickém uspořádání. Relativně často však nastávají situace, že v polygonu chybí dolní linie, což znemožňuje identifikaci dolních obvodových hran a komplikuje detekci horních obvodových hran. Další komplikací je výrazně nepravidelné rozmístění dolních linií v některých polygonech, kvůli čemuž dochází k tomu, že dolní obvodová hrana v daných polygonech je tvořena větším množstvím kratších nepropojených segmentů.

4. Odvození ČTK a klasifikace obvodových hran z dat DMR 5G

Druhým využitím přístupem k detekci ČTK v plochách skalních útvarů, je přístup založený na analýze DMR 5G v rastrové podobě. Zvláště byly detekovány vnitřní ČTK a zvláště byly klasifikovány obvodové hrany polygonů skalních útvarů.

4.1 Detekce ČTK v ploše skalních útvarů

Základem celého postupu je metoda navržená [9], která spočívá v konstrukci a analýze příčných profilů vytvořených nad rastrovým digitálním modelem terénu. Jelikož je detekce ČTK v plochách skalních útvarů relativně specifickým problémem, bylo třeba původní metodu určitým způsobem modifikovat. Postup zahrnoval následující kroky.

4.1.1 Příprava dat

Základem postupu je využití DMR 5G převedeného do rastrové podoby. Tato data poskytuje ČÚZK v podobě síťové prohlížecké služby ESRI ArcGIS Server [10] pro celou ČR s prostorovým rozlišením 2 m. Takové rozlišení je pro daný účel dostatečné. Z důvodů deklarované polohové přesnosti polygonů skalních útvarů v ZABAGED® [11] byly pro účely detekce ČTK pro jednotlivé polygony pořízeny výřezy DMR 5G v jejich ploše i blízkém okolí (minimální ohraničující obdélník skalního útvaru zvětšený ve všech směrech o 5 m) a další výpočet probíhal v takto rozšířené ploše skal.

4.1.2 Dekompozice DMR 5G na příčné profily

Výřez DMR 5G byl dekomponován na dílčí příčné profily, ve kterých jsou v dalších krocích hledány lomové body ČTK. Profily jsou vytvářeny ve 4 základních směrech rastru: ve směru řádků, ve směru sloupců a v obou diagonálních směrech. Tvorba profilů ve 4 různých směrech by měla maximalizovat pravděpodobnost správné detekce terénních hran v různých směrech a s různou orientací.

4.1.3 Generalizace příčných profilů

Jednotlivé příčné profily jsou následně generalizovány, s cílem eliminovat lomové body méně významných ČTK. Tento bod je velmi důležitý, protože lze očekávat, že v ploše a okolí skalních útvarů bude terén poměrně členitý a bude se zde vyskytovat relativně velké množství různých terénních tvarů, ze kterých je třeba vybrat ty nejvýznamnější. Ke generalizaci příčných profilů je využit Douglas-Peuckerův algoritmus se zvolenou minimální kolmou vzdáleností. Hodnota tohoto parametru byla zvolena na základě testování nad reálnými objekty na hodnotu 1 m, přičemž tato

Tab. 2 Výsledky klasifikace obvodových hran na základě kartografických reprezentací (zdrojová data: © ČÚZK, 2019)

typ obvodové hrany	počet objektů	celková délka [km]
horní hrana	405 609 (50,2 %)	4 924,2 (48,7 %)
dolní hrana	257 633 (31,9 %)	3 863,2 (38,2 %)
ostatní hrany	144 288 (17,9 %)	1 330 (13,1 %)
celkem	807 530 (100 %)	10 117,4 (100 %)

hodnota byla stejná pro všechny objekty. Tuto hodnotu lze chápat jako prvotní zjednodušení průběhu terénu shodné pro všechny skalní útvary; následná generalizace při odvozování ČTK již charakter konkrétního objektu zohledňuje.

4.1.4 Detekce jednotlivých typů ČTK a určení významnosti v rámci profilu

Generalizované příčné profily jsou v dalším kroku analyzovány s cílem detekovat lomové body každého ze tří typů ČTK. Každý příčný profil je postupně analyzován po trojicích sousedních pixelů (body profilu). Daný prostřední pixel je hodnocen na základě nadmořské výšky dvou sousedních pixelů. Rozhodujícím kritériem při vyhodnocení daného pixelu jsou dva sklony – sklon svahu mezi předchozím a aktuálním pixelem a sklon svahu mezi aktuálním a následujícím pixelem. Podle hodnot těchto sklonů lze pak určit, o který typ ČTK se jedná.

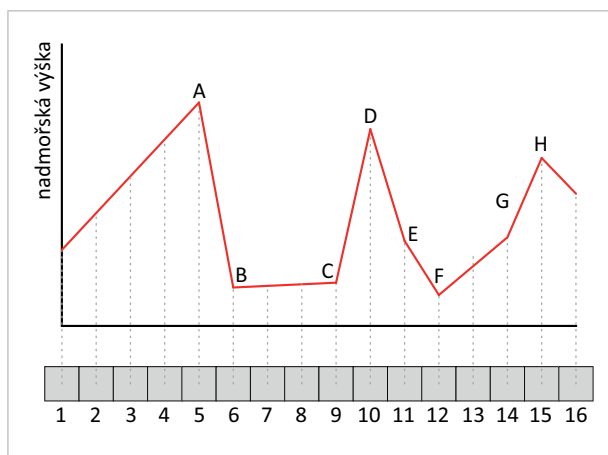
Aby byl daný bod vyhodnocen jako součást hřbetnice, musí platit, že sklon svahu před daným bodem je kladný (svah stoupá), sklon svahu za daným bodem je záporný (svah klesá) a zároveň ani jeden ze svahů není rovina. Rovinou se pro účely výpočtu chápe hodnota sklonu v absolutní hodnotě menší než stanovená mez (úhel o velikosti 5°). Uvedený předpoklad na modelovém profilu na obr. 15 splňují body A, D, H. Pro bod údolnice bude podmínka právě opačná – sklon svahu před daným bodem je záporný (klesající svah) a sklon svahu za daným bodem je kladný (stoupající svah), přičemž pro oba svahy musí rovněž platit, že jejich sklon je v absolutní hodnotě větší než mezní sklon roviny. Těmto předpokladům pak odpovídá v modelovém profilu bod F. Posledním případem jsou body na vnitřních lomových hranách. Pro tyto body je klíčový rozdíl sklonů dvou přilehlých svahů. Bod profilu je označen jako součást vnitřní lomové hrany, pokud je rozdíl sklonů dvou jemu přilehlých svahů větší (v absolutní hodnotě) než zvolená mezní hodnota (úhel o velikosti 15°). Těto podmínky odpovídají situace B, C a G. Zbylé situace nesplňující žádnou z podmínek jsou vyhodnoceny jako součást svahu, resp. roviny (bod E).

Určení typů jednotlivých lomových bodů představuje první část identifikace. Druhým krokem je pak určení významnosti daného bodu, protože jednak lze očekávat, že uvedených lomových bodů bude obecně mnoho (i když generalizace v předchozím kroku jejich počet snížila), a jednak ČTK detekované tímto postupem nebudou všechny stejně významné. Na základě významnosti jednotlivých bodů se pak posuzuje významnost celé ČTK, která se z těchto bodů skládá. Zavedení určité míry pro kvantifikaci míry významnosti terénních hran následně také umožní lokální adaptaci detekce hran pro jednotlivé skalní útvary.

K určení míry významnosti hřbetnic jsou využita dvě základní kritéria: převýšení pravého a levého svahu a šikmá délka pravého a levého svahu. Na základě těchto kritérií je následně sestaven vztah pro určení míry významnosti pro body hřbetnic:

$$Hrb_v = \frac{\frac{|\Delta H_l| + |\Delta H_p|}{2}}{\frac{d_l}{\Delta H_l} + \frac{d_p}{\Delta H_p}},$$

kde ΔH_l a ΔH_p jsou převýšení levého, resp. pravého svahu a proměnné d_l a d_p odpovídají délce levého, resp. pravého svahu [12].



Obr. 15 Modelový profil s vyznačenými terénními hranami; na ose x jsou znázorněny a očíslovány jednotlivé pixely v rámci profilu, na ose y jsou hodnoty nadmořských výšek těchto pixelů

Stejná kritéria jsou využita i pro údolnice.

Míra významnosti vnitřních lomových hran je posuzována na základě dvou parametrů: délka strmějšího svahu (měřená šikmo jako spojnice krajních bodů) a rozdíl sklonů (sklon svahu před a za analyzovaným bodem). Formálně zapsáno jako:

$$LoH_v = d_s \cdot |\varphi_1 - \varphi_2|,$$

kde d_s je délka strmějšího svahu, φ_1 sklon mezi pixelem před analyzovaným pixelem a analyzovaným pixelem, φ_2 pak sklon mezi analyzovaným pixelem a pixelem následujícím [12].

4.1.5 Kombinace informací z profilů

Proces detekce ČTK probíhá po jednotlivých polygonech skalních útvarů. Pro každý polygon jsou vypočteny hodnoty míry významnosti jednotlivých terénních hran. To je provedeno postupnou analýzou jednotlivých příčných profilů ve všech 4 směrech. Pro detekovaný bod (pixel) je určen typ hrany a vypočtena míra významnosti, která je zapsána v podobě buňky nového rastru. Tak vzniknou pro každý typ hrany 4 rastry (pro každý směr jeden), jejichž hodnoty se následně sečtou, a vznikne tak pro každý typ hrany jeden výsledný rastr s hodnotami významnosti. V místě, kde je v daném rastru nenulová hodnota, se tedy hrana daného typu vyskytuje. Čím je nenulová hodnota vyšší, tím významnější hrany je příslušný bod součástí.

4.1.6 Převod na vektorovou reprezentaci

Pro další využití je účelné z vytvořených rastrů odvodit vektorovou reprezentaci jednotlivých ČTK. Prvním krokem při zpracování rastrů je převod rastru se spojitými hodnotami významnosti na binární rastr s hodnotami 0 a 1, kde hodnoty 1 znamenají přítomnost dané ČTK. K tomuto účelu jsou využity vybrané standardní metody digitálního zpracování obrazu (prahování s hysterezí, potlačení ne-maximálních hodnot a morfologické operátory), podrobněji viz [12]. Práhování hodnot, které je v rámci procesu využito, je adaptivní – hodnoty prahů jsou zvoleny rela-

tivně vzhledem k hodnotám významnosti v rámci daného skalního útvaru. Tato adaptace umožní u méně členitých skal zachovat i méně významné hrany a u více členitějších skal naopak vybrat ty nejdůležitější. V dalším kroku jsou vybrané segmenty binárních rastrů převedeny na vektorové linie reprezentující průběh ČTK. Vektorizace rastrových segmentů je založena na převodu segmentů rastru na polygony, pro které je následně hledána jejich střední osa (medial axis) s využitím Thiessenových polygonů, které jsou vytvořeny nad obvodovými body daného segmentu. V posledním kroku jsou vzniklé linie generalizovány s ohledem na jejich specifické vlastnosti dané využitím Thiessenových polygonů. Technické detaily implementace lze nalézt opět v [12]. Na závěr jsou výsledné ČTK oříznuty na plochu skalního útvaru.

4.2 Klasifikace obvodových hran polygonů skalních útvarů

Použitý postup (inspirovaný [13]) vychází z rozdělení obvodové linie plochy skalního útvaru na jednotlivé segmenty a z počítání směru spádu s využitím DMR 5G pro počáteční a koncový bod každého segmentu. Bod segmentu je označen +1, pokud spádový vektor spočítaný v daném bodě směřuje do stejné poloroviny, ve které je vnitřek polygonu. Pokud spádový vektor směřuje do poloroviny, kde je vnějšek polygonu, je tento bod označen -1. V případě, že spádový vektor kopíruje nebo se s určitou tolerancí blíží hraniční polorovině, je označen 0. Ilustrace popisovaného postupu je na **obr. 16**.

S využitím označení vrcholů lze klasifikovat jednotlivé segmenty obvodové linie polygonu podle následujících pravidel:

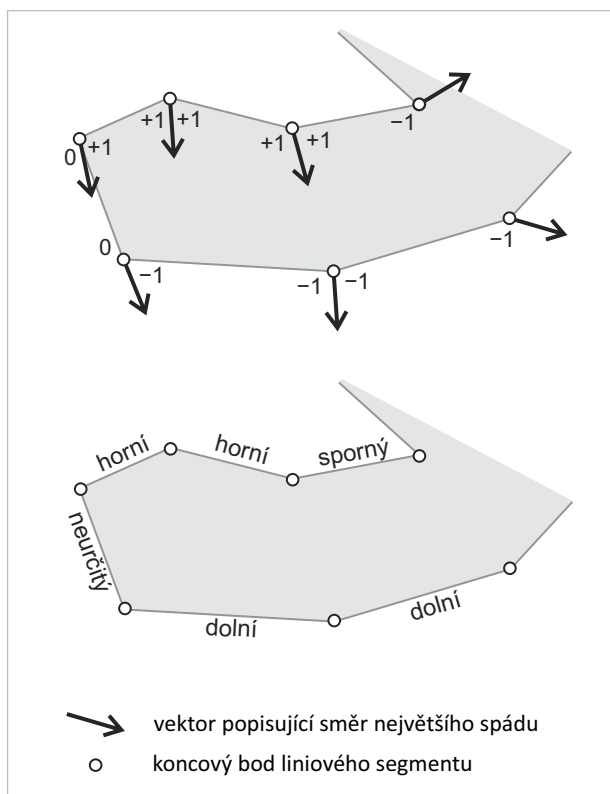
- segment bude označen jako horní, pokud jsou oba jeho vrcholy označeny +1 nebo jeden je označen +1 a druhý je označen 0,
- segment bude označen jako dolní, pokud jsou oba jeho vrcholy označeny -1 nebo jeden je označen -1 a druhý je označen 0,
- segment bude označen jako neurčitý, pokud jsou oba vrcholy označeny 0,
- segment bude označen jako sporný v ostatních případech (tj. jeden vrchol je označen +1, druhý -1).

Posledním krokem je generalizace označených segmentů, která snižuje počet neurčitých a sporných segmentů. Nejprve jsou sloučeny sousedící segmenty stejného typu do jedné linie. Následně jsou překlasifikovány krátké neurčitě a sporné segmenty, které jsou z obou stran obklopeny výrazně delšími úseky dolních nebo horních sloučených linií. Neurčitý nebo sporný segment splňující uvedenou podmínku se pak překlasifikuje na dolní (byl-li obklopen dolními sloučenými liniemi), resp. na horní (byl-li obklopen horními sloučenými liniemi). Z horních sloučených linií pak vzniknou horní hrany, a z dolních sloučených linií dolní hrany. Detaily postupu lze nalézt v [2], s. 110–113.

4.3 Výsledky analýzy dat DMR 5G

4.3.1 Detekce ČTK

Počty linií detekovaných z DMR 5G popsaným postupem, resp. počty polygonů s vybranými typy linií jsou uvedeny v **tab. 3**.



Obr. 16 Ilustrace postupu klasifikace obvodových hran skalního útvaru na základě DMR 5G

Tab. 3 Výsledky detekce ČTK z dat DMR 5G

typ ČTK	počet objektů	počet polygonů s daným typem ČTK
hřbetnice	65 451	20 195
údolnice	37 288	18 710
vnitřní lomová hrana	84 030	28 759

Z porovnání **tab. 1 a 3** je na první pohled patrné, že nalezených ČTK je v tomto případě výrazně více než v případě linií odvozených z dat kartografických reprezentací. Určitým problémem detekovaných linií je jejich přílišná podrobnost ve srovnání s liniemi odvozenými z kartografických reprezentací, která je dána odlišnou mírou detailu vstupních dat. Nesrovnatelná podrobnost je problematická i s ohledem na cíl analýzy – srovnání s ČTK z kartografických reprezentací. Zpracování také v některých případech odhalilo nesoulad DMR 5G a vymezení plochy skal v ZABAGED®, kdy je z modelu a detekovaných ČTK zřejmé, že plocha skalního útvaru není zcela polohově správně.

4.3.2 Klasifikace obvodových hran

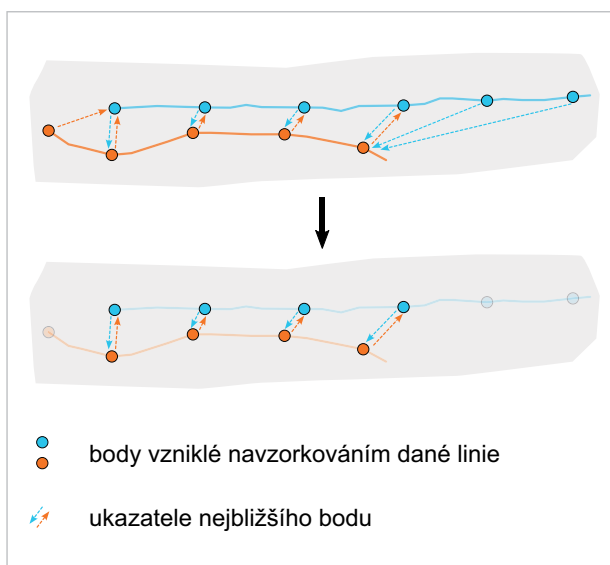
Na základě postupu založeného na analýze DMR 5G byly v průběhu detekce obvodových hran rozlišovány 4 typy hran: horní, dolní, neurčitě a sporné. Pro účely následného porovnání s výsledky popsanými v části 3.4.2 byly neurčitě

Tab. 4 Výsledky klasifikace obvodových hran na základě dat DMR 5G

typ obvodové hrany	počet objektů	celková délka [km]
horní hrana	326 922 (40,5 %)	3 968,6 (39,2 %)
dolní hrana	347 319 (43,0 %)	4 517,5 (44,7 %)
ostatní hrany	133 289 (16,5 %)	1 631,3 (16,1 %)
celkem	807 530 (100 %)	10 117,4 (100 %)

a sporné hrany sloučeny do jedné kategorie a tyto hrany jsou dále označovány jako ostatní. Počty, resp. celková délka detekovaných obvodových hran jsou uvedeny v tab. 4.

Analýza výsledků provedená na náhodném vzorku tvořeném 1 672 objekty ukázala, že hlavním problémem výsledné klasifikace je místy ne zcela dokonalý soulad půdorysu skalních útvarů v ZABAGED® s terémem zachyceným v DMR 5G. Posuny objektů vyvolávají pak vznik sporných hran, případně i jejich chybnou klasifikaci. Další potíž pak představují rozsáhlé a tvarově velmi komplikované polygony, které vznikly obkreslením oblastí se šrafami na ZM 10 a průběh jejich hranic neodpovídá morfologii terénu. Potíž podobného charakteru představuje míra podrobnosti některých polygonů, která je vzhledem k reálné generalizaci objektů příliš velká a vede k extrémně krátkým segmentům. Většina chybně klasifikovaných segmentů představuje záměnu neurčitých hran za horní nebo dolní. To představuje méně závažný typ chyby, resp. existují dokonce případy, kdy je při manuální klasifikaci obtížné rozhodnout, zda jde o neurčitou či horní, resp. dolní hranu. Záměn segmentů tvořících horní a dolní hranu bylo zjištěno jen málo (necelá 3 % celkové délky) a stejně tak sporné segmenty představovaly velmi malou část výsledku (necelá 0,4 % celkové délky).



Obr. 17 Ilustrace nalezení blízkých bodů

5. Porovnání výsledných ČTK a obvodových hran z obou postupů

5.1 Porovnání výsledných ČTK

Před samotným porovnáním byly obě datové sady upraveny. Jako první byla provedena generalizace ČTK odvozených z kartografických reprezentací, a to stejným způsobem jako u linií odvozených z DMR 5G, aby byla zaručena lepší porovnatelnost výsledku. Druhým krokem provedeným čistě pro účely porovnání je převod ČTK z obou datových sad na bodovou reprezentaci. Tento krok byl proveden s ohledem na charakter dat. Průběh terénních hran je totiž oběma datovými sadami reprezentován pouze s určitou přesností, na kterou mají vliv postupy použité pro odvození obou sad. Standardní metriky pro porovnávání polohové přesnosti linií očekávají velkou geometrickou podobnost srovnávaných linií, což zde nebylo splněno, a proto nebylo možné je použít. Z tohoto důvodu je využito srovnání linií vycházející z množin bodů vzniklých navzorkováním jednotlivých linií se zvoleným jednotným krokem (viz obr. 17).

Míra shody je následně vyhodnocována na dvou úrovních: jednak na úrovni všech polygonů skalních útvarů,

Tab. 5 Rozdělení polygonů dle výskytu různých druhů ČTK

		ČTK odvozené z kartografických reprezentací	
		ano	ne
ČTK odvozené z DMR 5G	ano	typ 1	typ 2
	ne	typ 3	typ 4

jednak na úrovni jednotlivých polygonů. Porovnání bodových množin má totiž smysl provádět pouze v takových polygonech, kde se vyskytují data z obou sad ČTK. Prvním krokem tedy bylo nalezení polygonů, v nichž se vyskytují shodné typy linií odvozené z každé sady, resp. rozdělení polygonů dle výskytu dat z obou sad (viz tab. 5).

Rozdělení polygonů do těchto 4 kategorií umožňuje provést základní hodnocení míry shody na úrovni všech polygonů. Polygony, v nichž se vyskytují shodné typy linií odvozené z každé sady (typ 1) jsou dále analyzovány detailněji, jelikož samotný výskyt obou typů linií nutně neznamená, že se jedná o reprezentaci téže hrany ČTK v rám-

ci příslušného skalního útvaru. K detailnějšímu porovnání míry shody linií jsou využity 3 charakteristiky:

- **délka linie** – ta je reprezentována počtem bodů, tedy první charakteristikou je absolutní hodnota rozdílu počtu bodů obou datových sad, odpovídající tedy rozdílu délek ČTK,
- **tvárová podobnost linie vycházející z podílu blízkých bodů** – hodnota ukazatele se určí tak, že pro každý bod linie odvozené z DMR 5G je nalezen nejbližší bod linie odvozené z kartografických reprezentací a naopak; následně se vyberou dvojice bodů, pro které platí, že si jsou navzájem nejbližšími body (blízké body), přičemž procentuální podíl těchto bodů z celkového počtu bodů určuje hodnotu ukazatele (viz **obr. 17**),
- **průměrná odchylka blízkých bodů** – ta měří polohovou odchylku linií (bodových množin) a vypočítá se jako průměrná vzdálenost blízkých bodů (viz předchozí krok). S využitím popsaného postupu bylo provedeno vyhodnocení míry shody pro jednotlivé typy ČTK.

5.1.1 Porovnání výsledných hřbetnic

V případě hřbetnic byly oba typy linií (odvozené z kartografických reprezentací i z DMR 5G) detekovány ve 2 % polygonů (797 polygonů). Největší podíl z celkového počtu polygonů představují polygony, v nichž nenachází ani jeden druh linií (49 %) a polygony, ve kterých je detekována pouze linie odvozená z DMR 5G (48,7 %). Tento výsledek byl poměrně očekávatelný s ohledem na počty linií detekovaných oběma metodami. Velký nesoulad je velmi pravděpodobně dán odlišnou mírou generalizace, resp. větší mírou generalizace v případě linií odvozených z kartografických reprezentací. Podrobné rozdělení polygonů podle výskytu hřbetnic je pak uvedeno v **tab. 6**.

Tab. 6 Rozdělení polygonů dle výskytu obou typů hřbetnic

		ČTK odvozené z kartografických reprezentací		součet řádků
		ano	ne	
ČTK odvozené z DMR 5G	ano	797 (2,0 %)	19 398 (48,7 %)	20 195 (50,7 %)
	ne	118 (0,3 %)	19 538 (49,0 %)	19 656 (49,3 %)
součet sloupců		915 (2,3 %)	38 936 (97,7 %)	39 851 (100 %)

Hodnoty charakteristik míry shody v 797 polygonech s oběma typy linií jsou uvedeny v **tab. 7**.

U všech parametrů je patrné poměrně velké rozpětí hodnot. V případě rozdílu počtu bodů jsou však velmi vysoké hodnoty spíše ojedinělé (75 % hodnot je menších než 50). Z pohledu délky jsou tedy detekované hřbetnice srovnatelné. U podílu blízkých bodů, který reprezentuje tvarovou podobnost, je u 90 % všech hřbetnic menší než 57 % a pouze u 2 % hřbetnic je dosažena velmi dobrá tvarová shoda (více než 75 % blízkých bodů). Z toho vyplývá, že vysoká míra tvarové podobnosti je v datech spíše výjimečná, což ovlivňuje i výsledné hodnoty průměrných odchylek. Pro ně platí, že u 90 % všech hodnot je menších než 12,7 m. Průměrná odchylka pak klesá s rostoucí tvarovou podobností linií (v polygonech s podílem blízkých bodů větším než 75 % je její hodnota jen 4,1 m).

5.1.2 Porovnání výsledných údolnic

Míra shody na úrovni všech polygonů je v případě údolnic ještě nižší – oba typy ČTK jsou detekovány pouze v 0,33 % polygonů (132 polygonů). Toto může být dáno skutečností, že detekce údolnic z dat kartografických reprezentací je poměrně komplikovaná a ve srovnání se zbylými typy ČTK méně spolehlivá. Největší podíl zaujímají stejné typy polygonů jako u hřbetnic – polygony neobsahující ani jeden typ linií (53 %) a polygony pouze s linií odvozenou z DMR 5G (47 %). Detailní rozdělení je uvedeno v **tab. 8**.

Detailnější hodnocení míry shody je následně provedeno pro 132 polygonů s oběma typy linií. Hodnoty základních charakteristik jsou uvedeny v **tab. 9**.

Hodnoty rozdílu počtu bodů jsou oproti hřbetnicím obecně vyšší (50 % hodnot je menších než 45). Jelikož převládají spíše vysoké hodnoty rozdílu indikující nesou-

Tab. 7 Základní popisné statistiky parametrů míry shody na úrovni jednotlivých polygonů pro hřbetnice

	minimum	maximum	průměr	medián
rozdíl počtu bodů obou datových sad	0	1 365	47,4	15
podíl blízkých bodů [%]	0	100	27,1	22,2
průměrná odchylka blízkých bodů [m]	0,4	681,1	9,1	4,5

Tab. 8 Rozdělení polygonů dle výskytu obou typů údolnic

		ČTK odvozené z kartografických reprezentací		součet řádků
		ano	ne	
ČTK odvozené z DMR 5G	ano	132 (0,33 %)	18 578 (46,62 %)	18 710 (46,95 %)
	ne	9 (0,02 %)	21 132 (53,03 %)	21 141 (53,05 %)
součet sloupců		141 (0,35 %)	39 710 (99,65 %)	39 851 (100 %)

Tab. 9 Základní popisné statistiky parametrů míry shody na úrovni jednotlivých polygonů pro údolnice

	minimum	maximum	průměr	medián
rozdíl počtu bodů obou datových sad	1	956	108,2	45
podíl blízkých bodů [%]	0,3	88,0	10,8	6,2
průměrná odchylka blízkých bodů [m]	0,8	98,4	12,4	7,0

Tab. 10 Rozdělení polygonů dle výskytu obou typů vnitřních lomových hran

		ČTK odvozené z kartografických reprezentací		součet řádků
		ano	ne	
ČTK odvozené z DMR 5G	ano	4 554 (11,43 %)	24 205 (60,74 %)	28 759 (72,17 %)
	ne	382 (0,96 %)	10 710 (26,88 %)	11 092 (27,83 %)
součet sloupců		4 936 (12,39 %)	34 915 (87,61 %)	39 851 (100 %)

lad v délkách dvojíc údolnic, tak i tvarová shoda je relativně nízká (90 % všech hodnot podílů blízkých bodů je menších než 28 % a pouze v 1 % hodnot přesahuje 70 %). Tvarová podobnost je tak v případě údolnic ještě vzácnější jev než v případě hřbetnic, což má za následek i poměrně vysoké hodnoty průměrných odchylek.

5.1.3 Porovnání výsledných vnitřních lomových hran

Pro vnitřní lomové hrany dosahuje míra shody na úrovni všech polygonů nejvyšší hodnoty – oba typy linií jsou v 11,43 % polygonů. Největší část polygonů tvoří polygony pouze s linií odvozenou z DMR 5G (60,74 %), polygony neobsahující ani jeden typ linií zde tvoří pouze 26,88 %. Podrobnější vyhodnocení je uvedeno v **tab. 10**.

V 4 554 polygonech s oběma typy linií bylo provedeno detailnější srovnání. Základní hodnoty charakteristik jsou uvedeny v **tab. 11**.

Hodnoty rozdílu počtu bodů jsou u vnitřních lomových hran v průměru spíše nižší, celkem 50 % hodnot je menších než 14. Dobrá tvarová shoda je v datech ovšem relativně vzácná. Celkem u 90 % vnitřních lomových hran je podíl blízkých bodů menší než 40 % a jen 0,5 % vnitřních lomových hran přesahuje 75% podíl blízkých bodů. Toto vede i k poměrně vysokým hodnotám průměrných odchylek, srovnatelných s hodnotami pro hřbetnice.

5.2 Porovnání výsledků klasifikace obvodových hran

Základní srovnání klasifikace obvodových hran polygonu s využitím kartografických reprezentací a DMR 5G dle počtu prvků, resp. jejich celkové délky, je uvedeno v **tab. 12** a **tab. 13**.

Z výsledků vyplývá, že na rozdíl od ČTK je míra dosažené shody mnohem lepší: nastává v 73,0 % délky obvodo-

Tab. 11 Základní popisné statistiky parametrů míry shody na úrovni jednotlivých polygonů pro vnitřní lomové hrany

	minimum	maximum	průměr	medián
rozdíl počtu bodů obou datových sad	0	1 123	37,9	14
podíl blízkých bodů [%]	0	100,0	18,7	10,3
průměrná odchylka blízkých bodů [m]	0,1	200,0	8,1	5,1

Tab. 12 Porovnání metod klasifikace obvodových hran na základě počtu objektů

		klasifikace pomocí kartografických reprezentací			
		horní hrana	dolní hrana	ostatní hrany	součet řádků
klasifikace pomocí DMR 5G	horní hrana	286 368 (35,5 %)	15 885 (2,0 %)	24 669 (3,1 %)	326 922 (40,5 %)
	dolní hrana	65 658 (8,1 %)	216 102 (26,8 %)	65 559 (8,1 %)	347 319 (43,0 %)
	ostatní hrany	53 583 (6,6 %)	25 646 (3,2 %)	54 060 (6,7 %)	133 289 (16,5 %)
	součet sloupců	405 609 (50,2 %)	257 633 (31,9 %)	144 288 (17,9 %)	807 530 (100 %)

Tab. 13 Porovnání metod klasifikace obvodových hran na základě délky hran – délka uvedena v km

		klasifikace pomocí kartografických reprezentací			
		horní hrana	dolní hrana	ostatní hrany	součet řádků
klasifikace pomocí DMR 5G	horní hrana	3 559,8 (35,2 %)	211,0 (2,1 %)	197,8 (2,0 %)	3 986,6 (39,2 %)
	dolní hrana	697,9 (6,8 %)	3 253,0 (32,2 %)	566,6 (5,6 %)	4 517,5 (44,7 %)
	ostatní hrany	666,6 (6,6 %)	399,1 (3,9 %)	565,6 (5,6 %)	1 631,3 (16,1 %)
	součet sloupců	4 924,2 (48,7 %)	3 863,2 (38,2 %)	1 330,0 (13,1 %)	10 117,4 (100 %)

vých linií. V přibližně 18,1 % délky dochází k záměnám horních a dolních hran za ostatní hrany a naopak. Tyto chyby nejsou z pohledu analýzy tak závažné. Mohou být způsobeny částečně tím, že ostatní hrany jsou na základě kartografických reprezentací určeny jako hrany zbylé po detekci horních a dolních hran a není pro jejich detekci využit specifický postup.

Větší problém představují záměny horních a dolních hran, ke kterým dochází v 8,9 % délky. Poměrně častou příčinou těchto záměn je špatné umístění polygonu skalního útvaru vzhledem k DMR 5G a jemu náležících horních a dolních linií, čímž dochází k tomu, že polygon na daném místě neodpovídá morfologii terénu a obě metody detekce hran dojdou k jinému výsledku. Dalším případem jsou ne-

standardně orientované skalní útvary, a to například tak, že jejich horní linie kopírují v daném místě směr spádu (tedy jsou kolmo na vrstevnice). V některých polygonech pak neodpovídá kresba šraf reálnému průběhu terénu. V těchto situacích dochází u klasifikace obvodových hran na základě kartografických reprezentací k poměrně častým chybám a tím pádem k nesouladu s výsledky druhé metody.

5.3 Celkové výsledky a diskuze

Jedním ze stanovených cílů bylo zhodnotit kartografické reprezentace, resp. vyjádřit se k tomu, do jaké míry odpo-

Tab. 14 Vybrané statistické údaje – výstupy analýz dvojic ČTK

	hřbetnice	údolnice	vnitřní lomové hrany
počet polygonů s ČTK odvozenými z kartografických reprezentací	915	141	4 936
počet polygonů se shodou	797	132	4 554
podíl polygonů se shodou vzhledem k počtu polygonů s ČTK odvozenými z kartografických reprezentací [%]	87,1	93,6	92,3
počet polygonů s ČTK odvozenými z DMR 5G	20 195	18 710	28 759
podíl polygonů se shodou vzhledem k počtu polygonů s ČTK odvozenými z DMR 5G [%]	3,9	0,7	15,8

vídají „realitě“ reprezentované rastrovým DMR 5G, resp. z něj odvozenými liniemi. Určitou informaci o shodě lze získat na základě podílu počtu polygonů s liniemi odvozenými z obou zdrojů a počtu polygonů s liniemi odvozenými z kartografických reprezentací. Hodnoty těchto podílů jsou uvedeny v tab. 14.

Na základě uvedeného podílu vychází z hlediska úplnosti kartografických reprezentací nejlépe údolnice, potom vnitřní lomové hrany a nejhůře hřbetnice. Nejlepší výsledek údolnic může být dán tím, že se jedná o nejméně častý typ linie, a tedy, pokud byla někde zakreslena, pravděpodobně se tam skutečně nachází. Poměrně překvapivý je výsledek vnitřních lomových hran. S ohledem na to, že kartografické reprezentace vnitřních lomových hran bývají poměrně často využívány spíše ke grafickému zaplnění plochy polygonu skalního útvaru než k vyjádření topografické informace, byly očekávány spíše nižší hodnoty uvedeného podílu. Obecně lze ale konstatovat velmi dobrou práci topografů před 70 lety: pokud při tvorbě mapy ČTK v ploše skalního útvaru znázornili, v naprosté většině případů se objevila i v datech odvozených z DMR 5G.

Obecně ale platí, že ve velké části polygonů se nevyskytují ČTK odvozené z kartografických reprezentací, ačkoliv tam byly detekovány ČTK z DMR 5G. Hlavní příčinou je odlišná míra generalizace ČTK. Pro reprezentaci skal pomocí šraf byla stanovena pouze obecná pravidla [13], [2], nikoliv exaktní hodnoty délky a převýšení, se kterými se pracovalo ve výše popsaném odvozování z DMR 5G. V praxi zůstal výsledek na individuálním posouzení každého topografa, a s ohledem na dostupnost podkladů, morfologicky odlišné typy terénu a zanedbatelnou významnost skal postačilo zachytit opravdu jen základní charakter skalního útvaru. K určité ztrátě informace navíc došlo i při přechodu na digitální tvorbu, protože způsob kresby popsaný v části 3.1 neumožňoval zachytit úplně všechny informace vyjádřené pomocí šraf, a tak došlo z pohledu zachycení topografie skalního terénu k dalšímu zjednodušení (viz též [2], s. 172). Pro zajímavost lze uvést, že mezi dvěma uvedenými sadami není výrazný rozdíl v délce jednotlivých linií. Délková generalizace ČTK byla tedy topografy dodržena. I tato skutečnost podporuje výše uvedenou hypotézu, že detaily topografie konkrétního objektu se řešily pouze v případě, že byly významné, a pokud ano, projeví se i v datech odvozených z DMR 5G.

Z hlediska tvarové podobnosti nejlepších výsledků dosahují hřbetnice, kde je průměrná hodnota podílu blíz-

kých bodů 27,1 %. Nejhorších výsledků dosahují údolnice, jejichž průměrný podíl blízkých bodů je jen 10,8 %. U vnitřních lomových hran je průměrná hodnota podílu blízkých bodů 18,7 %. Obecně pro všechny 3 typy ČTK platí, že vyšší míra tvarové shody je v datech relativně vzácná. Co se týče polohové shody, dosahují nejlepších výsledků vnitřní lomové hrany (průměrná odchylka blízkých bodů 8,1 m), potom hřbetnice (průměrná odchylka blízkých bodů 9,1 m) a nejhorších výsledků údolnice s hodnotou průměrné odchylky blízkých bodů 12,4 m.

Výsledky na základě tvarové a polohové shody úplně neodpovídají výsledkům získaným na základě hodnocení úplnosti kartografické kresby. Z kombinace přístupů vyplývá, že údolnice odvozené z dat kartografických reprezentací jsou z většiny umístěny ve správných polygonech, ale tvarově a polohově odpovídají „reálným“ terénním hranám poměrně málo. Hřbetnice jsou naopak v kartografických reprezentacích sice častěji zakresleny v polygonech, kde není hřbetnice z DMR 5G, ale dosahují lepších výsledků z pohledu tvarové a polohové shody. U vnitřních lomových hran platí, že jsou z většiny umístěny ve správných polygonech (jen mírně horší výsledky než v případě údolnic, viz tab. 14), přičemž jejich tvarová shoda je horší než u hřbetnic, ale lepší než v případě údolnic. Jejich polohová shoda s liniemi odvozenými z DMR 5G je pak nejlepší ze všech 3 typů linií.

Výsledky míry tvarové podobnosti jsou dále ovlivněny i velikostí, resp. komplexností polygonů. U větších a komplexnějších polygonů jsou hodnoty tvarové podobnosti obecně nižší. Například pro polygony obsahující oba typy hřbetnic s rozlohou větší než 50 000 m² je průměrná hodnota podílu blízkých bodů pouze 2,4 % a naopak pro polygony s oběma typy hřbetnic s rozlohou menší než 5 000 m² je tato hodnota 36,1 %. Velké a komplexní polygony se vyskytují zejména v oblastech skalních měst, kde jeden plošný objekt zahrnuje morfologicky velmi složitou oblast. Tento problém vznikl už v době prvotní vektorizace ze ZM 10, v níž v těchto oblastech byly často pouze šrafy bez vazby na přesné členění terénu (srov. [2], s. 79–81). Výplň má tak spíše charakter kresby bez vazby na ČTK, tudíž porovnání s reálnou morfologií terénu končí jen nepatrnou mírou shody.

Při hodnocení míry shody linií je potřeba vzít v úvahu také skutečnost, že samotný proces odvození ČTK z dat kartografických reprezentací, tak z dat DMR 5G, má určitou spolehlivost. Výsledek je tak nutně zatížen chybou, která dosaženou míru shody také ovlivňuje.

6. Závěr

Předkládaný text se zabývá analýzou kartografických reprezentací skalních útvarů v českém státním mapovém díle. Hlavním cílem bylo zhodnotit, do jaké míry odpovídají kartografické reprezentace skalních útvarů „realitě“ reprezentované DMR 5G. K tomu byly využity ČTK (hřbetnice, údolnice, vnitřní lomové hrany) a klasifikované obvodové hrany, odvozené v plochách všech skalních útvarů v ZABAGED® jak z kartografických reprezentací, tak z DMR 5G. Obecně lze výsledek popsat tak, že co je v kartografických reprezentacích (a tedy v mapě), se v naprosté většině případů dá identifikovat i v DMR 5G. Opačně to ale neplatí: skalní útvary jsou v mapě příliš generalizované a mapa by tedy mohla reprezentovat více informací o jejich morfologii. Uvedené o analogové ZM 10 ve své práci tvrdil již [6]. Obzvláště relevantní je tento problém v souvislosti s novým státním mapovým dílem, kdy ZTM 5 pro větší míru detailu prostor jednoznačně nabízí. Reprezentace skal v této mapě je řešena prostým zvětšením reprezentace z mapy menšího měřítká (ZTM 10). Není ale vůbec jednoduchý úkol tuto ideu prakticky zrealizovat.

Z metodického pohledu článek přináší také návod, jak porovnávat dvě liniové datové sady, u kterých je velmi omezená míra shody. Stávající postupy totiž vychází obvykle z opačného předpokladu, tj. velmi omezené míry neshody.

Z praktického pohledu jsou spíše než vlastní porovnání užitečné vzniklé datové sady, zvláště ČTK odvozené z DMR 5G. Analýza ukázala, že využít ČTK odvozené z kartografických reprezentací jako topografickou informaci není správný krok z důvodů značné neúplnosti dat. Sada ČTK odvozená z DMR 5G naproti tomu poměrně exaktně a systematicky získanou topografickou informaci představuje, ale není úplně zřejmé, že bude přímo využitelná pro účely kartografického zpracování (tj. tvorby šraf). To bude předmětem navazujícího výzkumu. Algoritmus pro automatizovanou tvorbu šraf za použití ČTK a klasifikovaných hran byl již publikován [4] a získaná data umožňují jeho důkladné otestování nad rozsáhlou datovou sadou. Tím se zjistí, zda zvolená míra generalizace při tvorbě ČTK z DMR 5G byla dostatečná.

Při využití vhodného generalizačního mechanismu by pak bylo možné z jedné topografické informace vytvářet skalní šrafy v různých měřítkách. To se nyní dělá pro každé měřítko zvlášť. Využití topografické informace o skalách by tedy nejen ušetřilo čas kartografům, ale zařídilo by i konzistenci reprezentace skal napříč měřítky. K dosažení tohoto cíle je ovšem potřeba ještě ujit značný kus cesty.

LITERATURA:

- [1] MIKLÍN, J. a kol.: Tvorba map. Ostrava, Ostravský univerzita, 2018, 302 s.
- [2] LYSÁK, J.: Topografické mapování skalních útvarů s využitím dat leteckého laserového skenování. Dizertační práce. Praha, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 2016, 248 s.
- [3] BRÁZDIL, K.: Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. Geodetický a kartografický obzor, 55/97, 2009, č. 7, s. 145–151.
- [4] LYSÁK, J.: An algorithm for automated digital rock drawing in the style used in Czech topographic maps. AUC Geographica, 51/1, 2016, p. 5–16.
- [5] DEMEK, J.: Obecná geomorfologie. Praha, Academia 1987. 476 s.
- [6] ČAPEK, R.: Znázorňování skal. Rigorózní práce. Praha, Katedra kartografie a fyzické geografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 1973, 184 s.
- [7] LUDAČKOVÁ, M.: Analýza skalních šraf vytvořených žebříčkovou manýrou. Diplomová práce. Praha, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 2022, 98 s.
- [8] KYNCL, G.: Využití kartografické reprezentace skal ze SMD pro doplnění topografických dat o skalních útvarech v ZABAGED. Bakalářská práce. Praha, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 2020, 85 s.
- [9] JAROŠ, J.–LYSÁK, J.: Detekce vybraných terénních čar z dat leteckého laserového skenování. Geodetický a kartografický obzor, 58/11, 2012, č. 11, s. 249–256.
- [10] ČÚZK: IMAGE služba Esri ArcGIS Server – DMR 5G [online]. Dostupné na: <https://ags.cuzk.cz/arcgis2/rest/services/dmr5g/ImageServer> (cit. 12. 12. 2023).
- [11] ČÚZK: Katalog objektů ZABAGED® [online]. Dostupné na: https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/ZABAGED_katalog/CS/index.html (cit. 12. 12. 2023).
- [12] KYNCL, G.: Analýza čar terénní kostry v plochách skalních útvarů: srovnání informací odvozených ze ZM 10 a DMR 5G. Diplomová práce. Praha, Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 2022, 118 s.
- [13] LYSÁK, J.: Digital rock drawing on Czech topographic maps: the current state and historical circumstances. AUC Geographica, 50/2, 2015, p. 193–199.

Do redakce došlo: 11. 1. 2024

Lektorovali:

**Ing. Róbert Fencík, PhD.,
Katedra globálnej geodézie a geoinformatiky,
Stavebná fakulta STU v Bratislave**

**a
Mgr. Miroslav Kožuch, PhD.,
Katedra fyzickej geografie a geoinformatiky,
Přírodovědecká fakulta UK v Bratislave**