

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**STANOVENÍ VLIVU GEOMETRICKÝCH
VLASTNOSTÍ POVODÍ NA ODTOK POUŽITÍM
TVAROVÉ METRIKY**

Magisterská práce

Daniela ČEPOVÁ

Vedoucí práce RNDr. Jana Svobodová, Ph.D.

Olomouc 2015

Geoinformatika

ANOTACE

Cílem diplomové práce je využití tvarové metriky pro studium tvaru povodí a říční sítě. Pro povodí III. řádu a pro povodí, která jsou vymezena na základě polohy vodoměrných stanic v oblasti povodí Moravy a Dyje, je vypočítána řada tvarových metrik použitím různých programů (Patch Analyst, V-LATE, FRACTALYSE atd.). Práce se také zaměřuje na využití fraktální geometrie při hodnocení tvaru povodí a říční sítě.

Hodnoty jednotlivých tvarových metrik jsou pak srovnány s daty o odtoku z povodí (konkrétně s hodnotami dlouhodobého průměrného specifického odtoku a průměrného ročního objemu odtoku). Pomocí korelační analýzy je hodnocena závislost mezi výše zmíněnými veličinami.

Výsledkem práce je rešerše softwarových možností pro výpočet tvarových metrik, hodnoty tvarových metrik pro tvar povodí a tvar říční sítě a hodnoty korelačních koeficientů mezi charakteristikami o odtoku a hodnotami tvarových metrik.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tvarové metriky; krajinné metriky; fraktální dimenze; odtok; povodí

Počet stran práce: 90

Počet příloh: 8 (z toho 1 elektronická)

ANOTATION

The main aim of this thesis is an application of shape metrics for studying of shape properties of river basin river network. Many different shape metrics were calculated to evaluate third order river basins and river basins based on the location of water measuring stations in the area of Morava basin and Dyje basin. Various software, applications and extensions were used for calculation of the shape metrics, such as Patch Analyst, V-LATE, FRACTALYSE, etc. The shape characteristics of river basins and river networks are observed also with an application of fractal dimension metrics.

Values of selected metrics were eventually compared with river runoff data (long-term average specific runoff and average annual runoff volume) and the relation between these variables was subsequently evaluated with correlation analysis.

The main outcomes of the thesis can be seen in the analysis of research on software possibilities of calculation shape metrics and fractal dimension. These findings are applied to two selected case studies referring to relation between shape metrics and fractal dimension values and river runoff data.

KEYWORDS

Shape metrics; landscape metrics; fractal dimension; runoff; river basin

Number of pages: 90

Number of appendixes: 8

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědoma, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou/diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, aby jeden výtisk diplomové práce byl uložen v Knihovně UP k prezenčnímu nahlédnutí,

- souhlasím, že údaje o mé diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Olomouci dne

Daniela Čepová

podpis autora

Děkuji vedoucí práce RNDr. Janě Svobodové, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce.

Vložený originál **zadání** bakalářské/magisterské práce (s podpisy vedoucího katedry, vedoucího práce a razítkem katedry). Ve druhém výtisku práce je vevázána fotokopie zadání.

Zde je konec prvního oddílu, kde není číslování stránek. Následující strana patří již do druhého oddílu, který má nastaveno číslování stránek.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 CÍLE PRÁCE	11
2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ	12
2.1 Použitá data	12
2.2 Použité programy	12
2.3 Postup zpracování	12
3 CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ	14
3.1 Povodí Moravy	14
3.2 Povodí Dyje	16
4 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	18
4.1 Krajinné metriky	18
4.2 Taxonomie metrik	19
4.2.1 Klasifikace krajinných metrik	20
4.3 Fraktální geometrie	20
4.3.1 Fraktální dimenze	21
4.3.2 Studium povodí a vodních toků využitím fraktální geometrie	21
5 SOFTWARE MOŽNOSTI PRO VÝPOČET METRIK	23
5.1 Programy pro výpočet krajinných metrik	24
5.2 Programy pro výpočet fraktální dimenze	26
6 HYDROGRAFIE ŘEK A ODTOK Z POVODÍ	28
6.1 Povodí	28
6.1.1 Plocha povodí	28
6.1.2 Tvar povodí	28
6.2 Říční síť	30
6.2.1 Typy uspořádání říční sítě	30
6.3 Odtok	33
6.3.1 Měrné jednotky odtoku	33
6.3.2 Faktory ovlivňující odtok	36
6.4 Vliv geometrických vlastností povodí na odtok	36
7 VÝPOČET TVAROVÝCH METRIK	38
7.1 Vstupní data	38
7.2 Vymezení území	39
7.3 Tvarové metriky	39
7.3.1 Jednoduché tvarové metriky	41
7.3.2 Pokročilejší metriky	41
7.3.3 Fraktální dimenze	46
7.3.4 Sinuosity (vlnitost)	48

8	ZPRACOVÁNÍ DAT O ODTOKU	49
8.1	Vstupní data	49
8.2	Specifický odtok a objem odtoku	49
9	POROVNÁNÍ STRUKTURY KRAJINY POVODÍ	50
9.1	Koeficient ekologické stability (KES)	50
10	STANOVENÍ ZÁVISLOSTI MEZI METRIKAMI A ODTOKEM	53
10.1	Korelace	53
11	VÝSLEDKY.....	55
11.1	Výsledky tvarových metrik	55
11.1.1	Povodí III. řádu.....	55
11.1.2	Povodí vodoměrných stanic.....	66
11.2	Hodnocení vztahu odtoku a tvarových metrik	74
11.2.1	Charakteristiky odtoku.....	74
11.2.2	Korelace charakteristik odtoku s tvarovými metrikami	76
11.2.3	Hodnocení dle struktury krajiny	81
12	DISKUZE	87
13	ZÁVĚR.....	89
	SUMMARY.....	99
	PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
BMP	Windows Bitmap
DIBAVOD	Digitální báze vodohospodářských dat
HEIS VÚV	Hydroekologický informační systém VÚV TGM
KES	Koeficient ekologické stability
PMO	Povodí Moravy
SHP	Shapefile
TXT	Textový soubor
VÚV TGM	Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka

ÚVOD

Tvar povodí je determinován účinkem jednotlivých fyzicko-geografických a socioekonomických jevů. To samé pak platí i pro rozložení říční sítě v povodí. Proto má každé povodí svůj unikátní tvar a specifické uspořádání říční sítě, které je ovlivněné mnoha faktory – geologickým podložím, antropogenními vlivy, sklonem svahů apod. Mnoho z těchto faktorů má i značný vliv na odtok z povodí. Netopil et al. (1984) uvádí, že fyzicko-geografické vlastnosti mají rozhodující vliv na velikost odtoku, jeho plošné a časové rozložení, stejným způsobem působí ale i klimatické poměry, geologické poměry, typ půdy, typ vegetace apod. Sledováním průměrného dlouhodobého specifického odtoku pak lze porovnat celkové podmínky pro odtok na jednotlivých povodích. Pomocí objemu odtoku můžeme zase sledovat množství vody, kterou je povodí schopno odvést ze svého území a stejně jako dlouhodobý průměrný specifický odtok slouží k vystižení vodnosti řek. Existují tedy charakteristiky odtoku, které lze použít k porovnání různých povodí mezi sebou.

Z odborné literatury (např. Netopil et al., 1984; Kemel, 1991; Bao et al., 2013) je znám vliv tvaru povodí na tvoření odtoku při tání sněhu či extrémních srážkových událostech. Někteří autoři se zabývají vztahem mezi plochou povodí a průtokem (Iturbe a Rinaldo, 2001) nebo hledají závislost mezi průtokem a délkou toků podle relativního uspořádání říční sítě (Zavoianu, 2012).

Tato diplomová práce se zabývá hledáním vztahu mezi tvarem povodí, tvarem říční sítě a charakteristikami odtoku, které jsou zastoupeny dlouhodobým průměrným specifickým odtokem a průměrným ročním objemem odtoku. Výzkumné otázky předkládané práce se tedy týkají možnosti využití tvarových metrik při studiu hydrologických charakteristik povodí.

Existuje několik způsobů, hodnocení geometrických vlastností povodí, např. popis tvaru povodí, klasifikace typů říční sítě apod. Některé z těchto metod mají spíše subjektivní povahu. Z tohoto důvodu se nabízí využití tvarových metrik, které mohou podat matematicky podložené objektivní informace, které jsou vhodné k porovnání jednotlivých povodí. Jejich využití vychází původně z krajinné ekologie, přesto se ale v poslední době uplatňují i v jiných vědních oborech, např. k hodnocení sídelní zástavby. Rozvoj výpočetní techniky pak přinesl možnosti efektivnější aplikace tvarových metrik, v současnosti je k dispozici relativně velké množství komerčních i open-source softwarů pro výpočet těchto metrik.

V této diplomové práci je provedeno hodnocení tvaru povodí a říční sítě právě s využitím tvarových metrik. Tyto sledované hodnoty jsou následně porovnány s jednotlivými hydrologickými charakteristikami povodí.

1 CÍLE PRÁCE

Vliv tvaru povodí či tvaru říční sítě na odtok z povodí je již z odborné literatury dobře znám. Cílem této diplomové práce je využít pro studium tohoto vztahu širokých možností metod tvarové metriky. Bude provedena rešerše literatury týkající se tvarových metrik a jejich použití. Pomocí speciálních softwarů pro výpočet tvarových metrik budou nad prostorovými daty vybraných povodí a říční sítí vypočítány hodnoty různých tvarových metrik. Práce bude zaměřena zejména na použití fraktální dimenze, která se jako metrika též řadí do skupiny tvarových indexů.

V rámci případové studie budou v praktické části zkoumány závislosti mezi tvarovými metrikami a odtokem. Zájmovým územím pro účely této pilotní studie byla povodí III. řádu v oblasti povodí řeky Moravy. Vzhledem k nižšímu počtu povodí III. řádu byla oblast rozšířena ještě o oblast povodí Dyje. V návaznosti na tuto studii byla v další části navíc zahrnuta i menší povodí, která jsou vymezena na základě polohy vodoměrných stanic a zároveň k nim byla dostupná hydrologická data o odtoku.

Výsledkem práce budou hodnoty tvarových metrik pro tvar povodí a tvar říční sítě, stanovení závislosti mezi sledovanými veličinami pro jednotlivá subpovodí a jejich srovnání. Výsledky budou kvantifikovány pomocí korelační analýzy a dalších statistických metod.

2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

2.1 Použitá data

Pro výpočet tvarových metrik a tvorbu rastrových vstupů do některých programů byla využita data z databáze DIBAVOD. Konkrétně byly použity liniové vrstvy A02 – vodní tok (jemné úseky), A03 – vodní tok (hrubé úseky), dále polygonové vrstvy A08 – hydrologické členění – povodí III. řádu a A11 – povodí vodoměrných stanic. K lokalizaci vodoměrných stanic byla použita vrstva E04 – vodoměrné stanice. Pro hodnocení struktury krajiny byla použita datová sada Corine Land Cover 2006 s rozlišením pixelu 100m.

Poskytovatelem hydrologických dat je Povodí Moravy, s. p.. Pro účely této diplomové práce byla poskytnuta data o průtocích z vybraných hlásných profilů v oblastech povodí Moravy a Dyje, která byla aktualizovaná k podzimu 2014.

2.2 Použité programy

Data byla zpracována v programu ArcGIS for Desktop 10.2, kde byla vytvořena vstupní data do programů, které pracují s rastrovými formáty. Dále byly použity programy pro výpočet tvarových metrik a fraktální dimenze – Fractal Analysis System, FRACTALYSE, toolboxy a extenze k programu ArcGIS for Desktop 10.2 – V-LATE, StraKA, Patch Analyst a toolbox Shape Metrics Tool, který je kompatibilní s programem ArcGIS 9.3.

Korelační analýzy byly zpracovány ve statistickém programu IBM SPSS Statistics verze 22. Tabulární výstupy byly vytvořeny v programu Microsoft Office Excel 2007. Celá práce byla sepsána v programu Microsoft Office Word 2007.

2.3 Postup zpracování

Po nastudování literatury byla zpracována rešerše týkající se využití krajinných metrik a fraktální dimenze nejen z oblasti krajinné ekologie, ale i v rámci ostatních geografických vědních oborů. Rešerše je zaměřena hlavně na aplikaci tvarových metrik při studiu řek. Teoretická část práce tedy přináší úvod do problematiky krajinných metrik a fraktální dimenze. Dále je zmíněna problematika studia hydrografie řek a odtoku z povodí, informace o tvaru povodí a říční síti a v neposlední řadě dosavadní poznatky o vlivu geometrických vlastností na odtok z povodí.

Ve druhé části práce pak byly získané poznatky analyzovány v případových studiích. Zájmová oblast pro studium tvaru povodí a říční sítě, povodí Moravy, byla stanovena zadáním práce. Nicméně po bližším studiu dostupných hydrologických a prostorových dat bylo území rozšířeno o další oblast a to o povodí Dyje. Cílem rozšíření oblasti bylo navýšení počtu zkoumaných subpovodí. Byly provedeny 2 případové studie na odlišně vymezených subpovodích. Pro studium tvaru povodí a říční sítě byla pro první studii vybrána povodí III. řádu, tak jak jsou vymezena v databázi DIBAVOD. Pro druhou případovou studii pak byla vybrána menší povodí, která jsou vymezena na základě vodoměrných stanic. Výběr těchto povodí byl především ovlivněn dostupností

hydrologických dat. Hydrologická data o průtocích byla použita pro výpočet specifických odtoků v jednotlivých subpovodích a pro výpočet objemu odtoku.

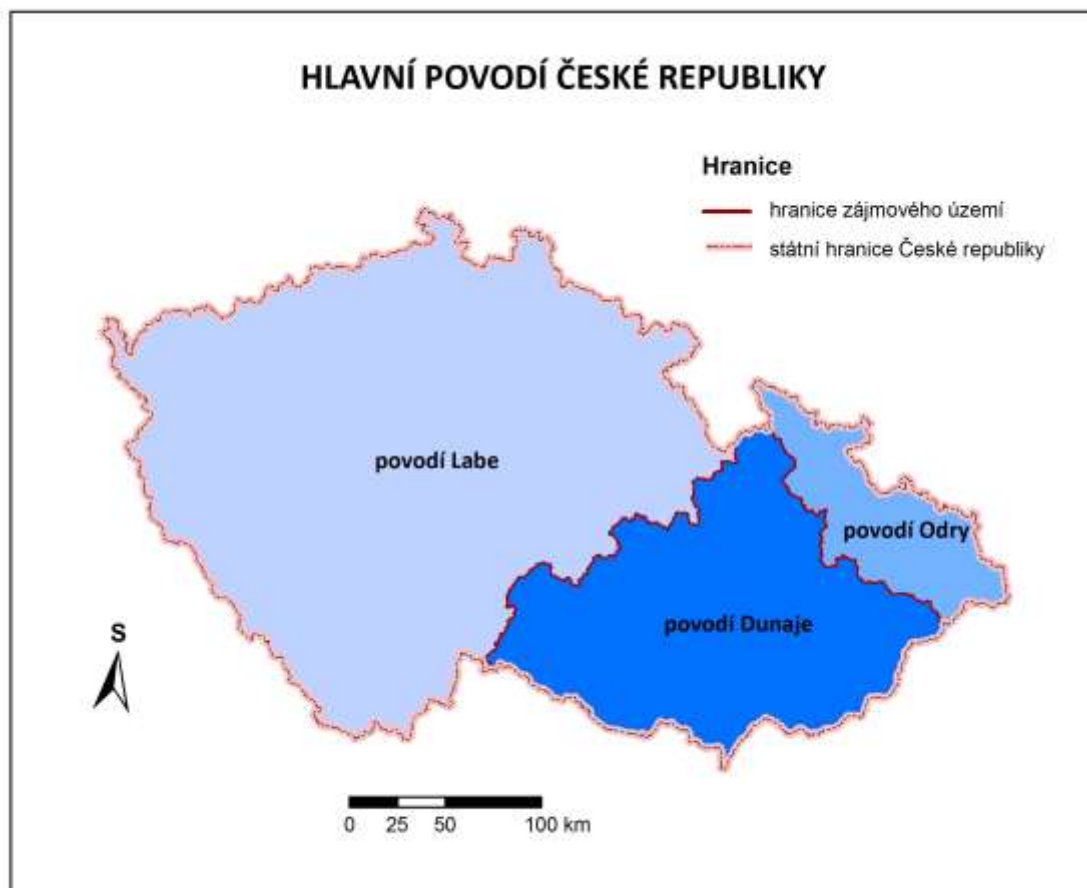
Další fází práce byla příprava prostorových dat pro výpočet tvarových metrik. V programu ArcGIS for Desktop 10.2 byla vytvořena vstupní rastrová data pro programy FRACTALYSE a Fractal Analysis System. Z programu ArcGIS for Desktop 10.2 byly vyexportovány obrázky jednotlivých subpovodí a jim náležící říční sítě ve formátu windows bitmap (*.bmp) s rozlišením 200dpi. Dále byla upravena i vektorová data, konkrétně vrstva říční sítě byla ořezána podle hranic jednotlivých subpovodí.

Výpočet tvarových metrik byl proveden v programech Patch Analyst, V-LATE, Shape Metrics Tool, StraKA, FRACTALYSE a Fractal Analysis System. Před použitím programů byla provedena rešerše softwarových produktů pro výpočet krajinných indexů a fraktální dimenze. Následně byly vybrány programy, které jsou volně dostupné prostřednictvím Internetu a nevyžadují další speciální softwarové požadavky (výjimku tvoří arctoolboxy a extenze pro ArcGIS for Desktop 10.x a ArcGIS 9.3). Výpočtu tvarových metrik předcházelo studium dokumentace jednotlivých programů, s cílem předejít potenciálním nejasnostem např. při nastavení parametrů. Ve vybraných programech byla vypočítána řada indexů pro tvar povodí a tvar říční sítě. Povodí byla také porovnána dle struktury krajiny. Pro jednotlivá povodí byl vypočítán z dat Corine Land Cover 2006 koeficient ekologické stability. Na základě hodnot pak byla povodí zařazena do kategorií dle klasifikace uváděné v literatuře a výsledky vybraných tvarových metrik a charakteristik odtoku byly porovnány mezi kategoriemi dle stability území.

Pomocí korelační analýzy byla hodnocena závislost mezi tvarovými metrikami a daty o odtoku (dlouhodobý průměrný specifický odtok a průměrný roční objem odtoku). Pro výpočet korelačních koeficientů byl využit program IBM SPSS Statistic verze 22, kde byly použity dva typy korelačních koeficientů – tzv. *Pearsonův korelační koeficient* a *Spearmanův korelační koeficient* pořadové korelace. Zjištěné výsledky pak byly popsány a okomentovány.

3 CHARAKTERISTIKA ZÁJMOVÉHO ÚZEMÍ

Zájmovým územím pro studium tvaru povodí a říční sítě této práce je oblast povodí Moravy, která byla dále rozšířena o oblast povodí Dyje. Obě oblasti jsou součástí hlavního povodí Dunaje, jehož hlavními toky jsou řeky Morava a Dyje. V mapě 3.1 jsou znázorněna tři hlavní povodí České republiky, přičemž druhou největší oblastí je právě povodí Dunaje. V následující kapitole jsou popsány základní informace zájmového území.



Mapa 3.1 Hlavní povodí České republiky

3.1 Povodí Moravy

S rozlohou 21 137 km², patří povodí Moravy mezi čtvrté největší povodí na území České republiky. V této souvislosti je ovšem nutné zmínit, že celková rozloha povodí je 26 658 km², protože oblast zasahuje i na rakouské území (viz Mapa 3.1). Jak uvádí PMO (2009), oblast povodí Moravy je dílčím povodím hydrologického povodí Moravy, přičemž tvoří českou část mezinárodní oblasti povodí Dunaje. Hranice povodí je tvořena na severu a západě rozvodnicí řeky Moravy. Východ a jih je ohraničen státní hranicí České republiky.

Povodí Moravy leží v jihovýchodní části České republiky, je protáhlého tvaru ve směru severojižním. Směrem k východu se nachází výběžek, který tvoří povodí řeky

Bečvy. PMO (2009) uvádí největší odlehlost povodí ve směru sever – jih, které činí 180 km, ve směru východ - západ 132 km.

Výškové poměry

Povodí Moravy je poměrně výškově členité, protože horní tok samotné řeky Moravy je situován pod jižními svahy pohoří Hrubý Jeseník a řeka Bečva pramení v Beskydech. V oblasti pohoří Hrubého Jeseníku, kudy prochází severovýchodní rozvodnice oblasti povodí Moravy, vede také zároveň hlavní evropské rozvodí Dunaje a Odry. V této části terén dosahuje maximální nadmořské výšky 1 492 m n. m., ve které se tyčí nejvyšší hora Jeseníků Praděd. Východní část povodí zasahuje do území Beskyd, kde nejvyšší nadmořská výška dosahuje 1323 m n. m. Nejnižším bodem povodí Moravy na území České republiky je závěrový profil u Lanžhotu, kde se nadmořská výška pohybuje pouze kolem 150 m n. m. Podle údajů PMO (2009), dosahuje přes 85 % plochy povodí nadmořských výšek mezi cca 150 a 600 m n. m. Pouze na méně než 4 % území pak přesahuje výška terénu 800 m n. m. Největší svislá odlehlost povodí tedy převyšuje 1 300m.

Geomorfologické a geologické poměry

Oblast povodí Moravy leží na rozhraní obou systémů, na kterých se rozpiná Česká republika. Jedná se o systém Hercynský a Alpsko-Himalájský. Z hlediska regionální geologie zasahuje území do obou základních geologických jednotek České republiky – do provincií Českého masivu a Vnějších Západních Karpat (PMO, 2009).

Jak uvádí PMO (2009), je reliéf oblasti poměrně různorodý a pestrý, protože je zde zastoupena Česká vysočina Krkonošsko-Jesenickou soustavou a provincie Západních Karpat Vnějšími Karpatami (rozpinajícími se na východě území), mezi kterými je rozsáhlý systém nížin, které v rámci geomorfologického členění spadají do subprovincie Vněkarpatské sníženiny. Česká vysočina má pak charakter členité hornatiny, ve které se nachází hluboce zaříznutá údolí Hrubého Jeseníku a Rychlebských hor nebo penepplény Nízkého Jeseníku a Drahanské Vrchoviny. Celý tento reliéf je rozlámán do soustavy ker. Příkrovová stavba podloží v oblasti Karpat zapříčinila vzniku příkrovových pohoří na tomto území. Roviny, které se nacházejí ve středních částech území, byly formovány v době, kdy bylo území zalito mořem, tzv. transgresí.

V oblasti povodí se místy vyskytují i krasové jevy. Mezi příklady krasových jevů patří např. Moravský kras, Konicko-Mladečský kras, Vrbenská krasová oblast, atd. V období pleistocénu, kdy se střídaly doby ledové, vznikly na severu území činnosti ledovců mrazové sruby, skalní moře, suťové proudy, kary, polygonální půdy. Jak uvádí PMO (2009), jedná se dnes spíše o fosilní jevy, které se dále nevyvíjejí a pouze podléhají erozi.

Dnes má na oblast značný vliv i lidská činnost, která se podílí jak na zpomalování, tak v některých oblastech i na urychlování erozní činnosti a má za následek vznik různých antropogenních tvarů.

Hydrologické poměry

Klíčovým tokem povodí je řeka Morava. Po stránce hydrologické patří oblast povodí Moravy k úmoří Černého moře (PMO, 2009). Voda je odváděna řekou Moravou dále do Dunaje.

Z hlediska hydrologického režimu patří horská část Bečvy k horské – sněhové oblasti s maximem vodností v dubnu, příp. březnu. Nejméně vodné měsíce bývají na konci zimního období, výjimečně na podzim. 50 až 60% celoročního množství odtoku odteče v době prosinec – květen. Hlavním zdrojem vody odtékající z Bečvy je voda z tajícího sněhu (PMO 2009).

Zbývající část toků v povodí se dá zařadit do vrchovinno-nížinné oblasti (PMO, 2009). Vyšší vodnost toků je sledována v zimních a jarních měsících, kdy odteče nad 60% celoročního odtoku. V tomto období jsou vodní toky napájeny z velké části vodou z dešťových či sněhových srážek.

3.2 Povodí Dyje

Oblast povodí Dyje je druhá největší z osmi oblastí povodí na území České republiky (PMO, 2009). Společně s oblastí povodí Moravy tvoří českou část mezinárodní oblasti povodí Dunaje. Z hlediska hydrologického dělení se ale jedná o dílčí jednotku v rámci celého povodí Moravy, správcem oblasti je tedy v tomto případě Povodí Moravy, s. p..

Na rozdíl od oblasti povodí Moravy je oblast povodí Dyje spíše vějířovitého tvaru. Jak uvádí PMO (2009), tak je oblast ve vztahu k řece Dyji asymetricky vyvinutá. Největší odlehlost ve směru sever - jih činí 134 km, ve směru východ - západ 150 km. Oblast povodí je rozdělena na 11 základních povodí 3. řádu.

Výškové poměry

Oblast povodí Dyje není příliš výškově členitá, protože nejvýše položené oblasti leží v Českomoravské vrchovině, která nedosahuje tak vysokých nadmořských výšek. Nejvyšší bod oblasti povodí Dyje leží na její západní hranici na hlavním evropském rozvodí Dunaje a Labe (vrchol Javořice 837 m n. m). Místo s nejnižší nadmořskou výškou (cca 150 m n. m), je v oblasti, kde se Dyje vlévá do Moravy. Celých 90 % plochy povodí leží v nadmořských výškách mezi cca 150 a 600 m n. m. (PMO, 2009). Pouze méně jak 1% území se rozkládá ve výšce vyšší než 800 m n.m. Největší svislá odlehlost oblasti povodí je tedy kolem 680m.

Geomorfologické a geologické poměry

Oblast povodí Dyje na území ČR leží na rozhraní systémů Hercynského a Alpsko-Himalájského. Do oblasti povodí zasahují dvě provincie – Česká vysočina (Český masiv) a Západní Karpaty, které ve směru JZ-SV rozdělují území povodí na dvě zhruba stejně velké části (PMO, 2009).

Vzhledem k zastoupení jednotlivých provincií, je reliéf oblasti povodí Dyje velmi pestrý a rozmanitý. Například mezi starší Českou vysočinou na západě a mladým pásemným pohořím Karpat na východě je znatelným rysem reliéfu systém depresí.

V době třetihor byl východní okraj České vysočiny několikrát zaplaven mořem (Chalupa a Horník, 2005). Miocénní mořské sedimenty spočívají místy přímo na skalních horninách, jinde na předmiocenních zvětralinách (např. Šatov nedaleko Znojma). V pliocénu byly také položeny základy pro tvorbu současné říční sítě. V oblasti povodí jsou také významně zastoupeny tektonické tvary reliéfu, např. Blanenský prolom, Boskovická brázda, Miroslavská hrášť. Dále se zde vyskytují také litologicky

podmíněné tvary reliéfu, jedná se především o oblasti Moravského krasu a Pavlovských vrchů, ale i o drobné výskyty v krystalických vápencích Českomoravské vrchoviny s povrchovými i podpovrchovými krasovými jevy.

Hydrologické poměry

Hranice oblasti povodí Dyje jsou tvořeny ze západu rozvodnicí Jihlavy, ze severu rozvodnicemi Oslavy, Svratky a Svitavy a na východě rozvodnicemi Litavy, Kyjovky a částečně Svitavy. Z jihu je hranice tvořena státní hranicí s Rakouskem. Tvar oblasti, jak bylo zmíněno je vějířovitého charakteru, mezi největší toky, které tvoří tento vějíř, patří Dyje, Svratka a Jihlava.

Řeka Dyje je hlavním tokem oblasti povodí Dyje. Stejně jako oblast Moravy, patří oblast povodí Dyje k úmoří Černého moře. Voda je odváděna prostřednictvím řeky Dyje do Moravy, která se následně vlévá do Dunaje. Hlavní pramenná oblast leží ve východní a jižní části Českomoravské vrchoviny. V západní části Dyjsko-svrateckého úvalu je velmi nízká hustota říční sítě, ta patří mezi nejnižší dokonce i v rámci území celé České republiky (PMO, 2009).

4 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Koncem minulého století se při studiu struktury krajiny začaly používat tzv. kvantitativní metody výzkumu, mezi které patří krajinné metriky. Krajinné metriky se ovšem dají aplikovat i v mnoha jiných vědních disciplínách než pouze v oblasti krajinné ekologie, ve které byly poprvé použity. Některé metriky jsou konkrétně úzce zaměřeny na geometrické vlastnosti zkoumaných objektů, tyto veličiny pak lze s úspěchem využít pro řadu úloh i v ostatních vědeckých disciplínách. Následující kapitola představuje úvod do problematiky krajinných metrik, snaží se osvětlit používání různých názvů krajinných metrik a zejména představuje úvod do fraktální geometrie, která je s krajinnými metrikami úzce spjata.

4.1 Krajinné metriky

Laforteza (2008, str. 170,171) uvádí, že právě krajinná ekologie stojí za vznikem některých tvarových metrik. Forman (1995) in Laforteza (2008, str. 171) tvrdí, že zkoumání tvaru jednotlivých krajinných elementů (v anglické literatuře označováno jako „patches“, v česky psané literatuře je používán pojem plošky, viz Forman a Godron, 1993), přináší mnohem bohatší koncept při studiu krajiny, než pouhé zkoumání velikosti plošek v krajinné struktuře. Jednotlivými elementy jsou v tomto případě myšleny plošné části povrchu, které se liší od svého okolí (Forman a Godron, 1993). Vznik metrik, které vycházejí z výpočtu ploch, poukázal na existenci různých prostorových vzorů, jež ovlivňují například ekologické procesy v krajině. Některé tvarové metriky byly převzaty z jiných vědeckých oborů, například z geografie, digitálního zpracování obrazů nebo z fyzikálních věd.

Jak uvádí Janoška (2011), tak v geovědách jsou obecně (což platí i pro geoinformatiku) charakteristiky tvaru důležitou součástí řešení řady úloh. Na základě tvaru říční sítě můžeme například posuzovat podmínky jejího vzniku, plocha a tvar lesních porostů má pak zase vliv na rozšíření určitých druhů rostlin a živočichů (Parent et al., 2009). Gökyer (2013) pomocí tvarových metrik srovnával krajinnou strukturu v turecké provincii Bartın v letech 2000 a 2010. V této souvislosti popisuje jednotlivé metriky a vyzdvihuje přínos metrik v krajinné ekologii právě při studiu krajiny. Pixová a Sklenička (2005) pak porovnávali změny krajiny ve čtyřech vybraných oblastech České republiky mezi lety 1845 a 2000 za použití dvou krajinných indexů – *heterogeneity* a *edge density*. Amiri a Nakane (2008) zase hledali spojitost mezi tvarovými metrikami povodí a kvalitou vody v povodí v japonském distriktu Chugoku.

V sociální geografii našly tvarové metriky také své uplatnění při studiu sídelních struktur. Jak uvádí Hartmannová (2013), jednou z možností využití tvarových a prostorových metrik může být hodnocení projevů (sub)urbanizace za použití demografických údajů a její vliv na životní prostředí, dále se je možné použít metriky k hodnocení *urban sprawl* neboli „sídelní kaše“. Tomášek (2013) aplikuje tvarové metriky opět na hodnocení (sub)urbanizace, využívá výpočty krajinných metrik k hodnocení vlivu procesu (sub)urbanizace na strukturu krajiny v příměstské oblasti Prahy v letech 1990, 2000 a 2006.

Ačkoliv existuje mnoho aplikací krajinných metrik v ekologii, geografii a jiných vědních oborech, o dalších možnostech a rozsahu jejich využití se stále diskutuje. Někteří autoři účinnost krajinných metrik zpochybňují, např. Li a Wu (2004) popisují

problémy, které jsou podle nich spojené s aplikací krajinných metrik a nejasnosti v interpretaci samotných indexů.

4.2 Taxonomie metrik

Při studiu problematiky tvarových metrik lze narazit na nejednotnost v používání samotného termínu tvarové metriky. V českém prostředí může nejednotnost vycházet z odlišných interpretací překladů z anglického jazyka. V praxi jsou v české literatuře používány zejména následující termíny: *krajinné metriky* (tento termín používá např. Balej, 2011), *krajinné indexy* (Tomášek, 2013; Pechanec et al., 2008), *krajinně-ekologické indexy* (Jelínková, 2011), *tvarové metriky* (Hartmannová, 2013) nebo *prostorové metriky* (Hartmannová, 2013). V zahraniční literatuře (popř. v anglicky psané literatuře) se objevují pojmy *landscape metrics* (Goyker, 2013; McGarigall, 2015) *landscape indices* (Rutledge, 2003; Li a Wu, 2003), *shape metrics* (Jiao a Liu, 2012, Pászto et al., 2013), *spatial metrics* (Geoghegan, 1997, Herold et al., 2003).

Jak uvádí UMass Amherst (2015), pojem *landscape metrics* se běžně používá pro metriky, které byly vyvinuty speciálně ke studiu krajinné struktury. Gustafson (1998); Hargis et al. (1998); McGarigal (2015); O'Neill et al. (1988) upozorňují na to, že pod pojmem *landscape metrics* (krajinné metriky), jsou běžně používány právě prostorové metriky. Herold et al. (2005) uvádí, že obecně by se právě krajinné metriky měly označovat pojmem prostorové metriky, neboť jejich využití se postupně rozšířilo i do jiných vědních oborů než je pouze ekologie, příkladem je pak již zmíněné využití metrik při studiu městských oblastí (viz Hartmannová 2013; Herold, 2004). Gustafson (1998) také uvádí, že některé prostorové metriky (např. počet typů krajiny) nemusí při studiu krajiny explicitně vyjadřovat její prostorové rozložení, nicméně odráží její prostorové vlastnosti. Z tohoto důvodu preferuje používání pojmu prostorové metriky (*spatial metrics*).

S pojmem tvarové metriky (*shape metrics*) se setkáme u indexů, které McGarigal (2015) popisuje jako sadu bezrozměrných metrik, které vyjadřují kompaktnost a složitost tvaru plošek. Většina z těchto metrik je založena na vztahu mezi jejich obvodem a plochou. Vztahem mezi obvodem a plochou je v některých programech vyjádřena i fraktální dimenze, konkrétně i McGarigal (2015) ji řadí mezi tvarové metriky (*shape metrics*). Avšak správně by odhad fraktální dimenze měl být založen na pozorování objektu ve více měřítkách, ne jen na vztahu mezi obvodem a plochou (Janoška, 2011).

Uumaa a kol. (2009) analyzují dostupné články o krajinných metrikách, přičemž se zaměřují na používání termínů krajinné metriky (v orig. *landscape metrics*) a krajinné indexy (v orig. *landscape indexes/indices*). Autoři hodnotí četnost užívání těchto termínů v historickém kontextu a poukazují na skutečnost, že není zavedeno pravidlo, které by stanovilo jednotnou terminologii v této oblasti. V této souvislosti je tedy nutné upozornit na nejednoznačnost terminologie v českém prostředí. V této diplomové práci jsou používány následující termíny: krajinné metriky (obecně pro metriky a indexy používané v krajinné ekologii), tvarové metriky (pro metriky, které hodnotí charakteristiky tvaru území).

4.2.1 Klasifikace krajinných metrik

McGarigal (2015) zmiňuje, že krajinné metriky je možné podle úrovně, kterou hodnotí rozdělit do tří kategorií: *patch*, *class* a *landscape* úroveň. Podle zvolené úrovně lze kvantifikovat jednotlivé elementy (plošky) pomocí metrik (*patch* úroveň), lze hodnotit všechny plošky, které patří do stejné třídy (*class* úroveň) nebo celou krajinu jako soubor plošek (*landscape* úroveň).

Dále můžeme metriky rozdělit podle aspektů vzoru, které hodnotí. McGarigal (2015) uvádí následující kategorie: *Area a edge*, *Shape*, *Core area*, *Contrast*, *Aggregation*, *Subdivision*, *Isolation*, *Diversity*. Právě z tohoto dělení metrik pravděpodobně vychází pojem *tvarové metriky*, který byl zmíněn v předchozím textu. Jedná se právě o kategorii metrik, které jsou využívány pro kvantitativní popis tvaru plošek (Pászto et al., 2013).

Díky metrikám je tedy možné hodnotit různé vlastnosti krajiny podle výše zmíněných úrovní a podle aspektů vzoru, který je možné hodnotit. Z tohoto důvodu je nutné rozumět jednotlivým metrikám a posoudit, které metriky je vhodné pro sledování různých charakteristik krajiny používat a které mají smysl. To samé platí i při aplikaci metrik v jiných vědních disciplínách.

Je třeba ještě zmínit, že zkoumání některých metrik může být v některých případech redundantní, a tedy i zcela nadbytečné. McGarigal (2015) uvádí příklad použití metrik *patch density* a *mean patch size* na *landscape* úrovni, kdy výsledky těchto metrik spolu korelují, protože reprezentují stejnou informaci. Nicméně tyto redundantní metriky jsou většinou k dispozici ve většině programů, protože představují alternativní formy, jak reprezentovat stejnou informaci a způsob reprezentace výsledků se může lišit dle požadavků uživatele a sféry aplikace metrik.

4.3 Fraktální geometrie

Objevení neceločíselné fraktální dimenze bylo revolučním krokem pro mnoho vědních oborů, avšak zájem o fraktální geometrii výrazně vzrostl až po vydání knižního díla *The Fractal Geometry of Nature*, od zakladatele fraktální geometrie Benoita B. Mandelbrota. Mandelbrot (1983) poukázal na skutečnost, že přírodní objekty jsou mnohem složitější než například ty, vytvořené člověkem, k jejichž popisu stačí Euklidovská nebo klasická geometrie (Schuller et al., 2000).

Benoit B. Mandelbrot použil poprvé v roce 1975 termín fraktál ve své knize *Les objets fractals, forme, hasard et dimension* a začal se věnovat fraktální geometrii, která slouží právě k popisu složitých přírodních struktur a vzorů. Ve studiu fraktálů došlo od té doby ke značnému posunu, v dnešní době již existuje mnoho vědeckých článků, studií a publikací, které se zabývají problematikou fraktální geometrie.

Fraktální geometrie našla své uplatnění nejen v ekonomii, medicíně, biologii, matematice, ale i v geovědách. Mezi konkrétní příklady využití fraktální geometrie patří obecně studium komplexnosti a složitosti struktur, které vykazují fraktální znaky. Může se jednat o studium tvaru sídel, kterému se věnují Batty a Longley (1994), Janoška (2011) nebo studium tvaru říční sítě (Mandelbrot, 1983; La Barbera et al., 1989; Iturbe et al., 2001). Dalším příkladem je problematika délky pobřežní linie, kterou ve své eseji *How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension* rozebíral Mandelbrot už v roce 1967. Mandelbrot poukazuje na paradox při

měření délky pobřežní linie, kdy délka pobřeží závisí na velikosti měřítka, ve kterém je měřena. Schuller et al. (2000) uvádí, že právě pobřeží je významným příkladem fraktálu. Pokud se snažíme změřit délku pobřežní linie pomocí kružítka, výsledná délka pobřeží je závislá na rozpětí mezi oběma nožičkami kružítka. Čím menší je rozpětí mezi nožičkami kružítka, tím detailněji je možné délku pobřeží změřit a výsledná délka pobřeží bude delší. Tento jev se objevuje v důsledku fraktální povahy objektu a lze jej tedy sledovat například i u tvaru povodí. Mandelbrot (1982, str. 111 - 112) dále uvádí, že geometrické uspořádání říční sítě může být také vnímáno jako fraktál s charakteristickou dimenzí, to samé pak platí i pro jednotlivé říční kanály.

4.3.1 Fraktální dimenze

Mezi krajinné metriky je v mnoha programech pro výpočet krajinných metrik zařazena i fraktální dimenze. Ačkoliv je fraktální dimenzi možné exaktně spočítat pouze pro matematické fraktály, vzhledem ke skutečnosti, že centrem zájmu geoinformatických disciplín jsou objekty reálného světa, bylo navrženo i mnoho metod, kterými je možné fraktální dimenzi s menší či větší přesností odhadnout. Z tohoto důvodu však někteří autoři, například Janoška (2011), nesouhlasí v tomto případě s použitím pojmu fraktální dimenze, ale doporučují namísto tuto charakteristiku nazývat *složitostí objektu*. V této práci bude ale dále používán termín fraktální dimenze.

Jedná se tedy o charakteristiku tvaru, která popisuje tvarovou složitost. Schuller, et al. (2000) uvádí, že fraktální dimenze nám neříká, jaký má objekt tvar, nicméně kvantifikuje složitost či nepravidelnost tohoto tvaru. Na rozdíl od klasické Euklidovské geometrie, která je celočíselná, tedy fraktální dimenze nabývá hodnot, které jsou neceločíselné.

4.3.2 Studium povodí a vodních toků využitím fraktální geometrie

Pohled na vodní toky a jimi tvořené říční sítě jako na fraktální struktury byl použit v mnoha studiích (Tarboton et al., 1988; La Barbera, 1989; Iturbe a Rinaldo, 2001). Už Mandelbrot (1983) popisuje řeky jako přírodní fraktály. Výpočet fraktální dimenze při studiu řek pak použila například Fac-Benada (2013), která uvádí, že teoreticky, nezávisle na podmínkách prostředí, by měla fraktální dimenze povodí nabývat hodnoty 2. Fraktální dimenze povodí se ovšem v přírodě ve skutečnosti pohybují mezi hodnotami 1,5 – 2 (La Barbera a Rosso, 1989). Podle studie, kterou realizovali La Barbera a Rosso (1989), se průměrné hodnoty fraktální dimenze říční sítě pohybují mezi hodnotami 1,6 – 1,7. Bajkiewicz-Grabowska (2002) počítá fraktální dimenzi říční sítě v severním Polsku metodou box counting (tzv. rastrová fraktální dimenze), výsledky se pohybují v rozmezí 1,08 – 1,63. Další tři různé metody pro studium fraktální dimenze říční sítě celkem sedmnácti povodí v Kalábrii uvádí Veltri et al. (1996). Autoři pracují s topografickými mapami ve třech různých měřítkách a pro jednotlivá měřítka dostávají odlišné výsledky hodnot fraktální dimenze říční sítě. Využitím dalších metod fraktální geometrie, konkrétně odhadem fraktální dimenze pomocí metody zavedené Pawelzikem a Schusterem, hodnotí řeky Bartolo et al. (2005). Výsledkem je zhodnocení šesti říčních sítí v Itálii, jejichž hodnoty fraktální dimenze se pohybují od 1,7 do 1,9. Autor také

porovnává získané výsledky s výsledky získané box counting metodou, které jsou podle něho velmi podobné.

Nikdo z výše uvedených autorů ovšem nepřichází s žádnou podrobnou klasifikací říčních sítí, která by byla založena na základě získaných hodnot fraktální dimenze. Angeles et al. (2004) se ve své práci zabývali hodnotami fraktální dimenze vybraných říčních kanálů v oblasti města Bahía Blanca v Argentině, kde se snažili pomocí hodnot fraktální dimenze vytvořit nový systém klasifikace meandrujících kanálů. V práci mezi sebou porovnávají hodnoty fraktální dimenze devíti různě meandrujících říčních kanálů, které vypočetli dvěma různými metodami (box counting metodou a metodou „kontiguity“, navrženou Richardsonem, 1961). Autoři zmiňují, že mnoho metod založených na principech fraktální geometrie bylo použito pro studium celé říční sítě, nikoliv jen pro jednotlivé říční kanály. I z tohoto důvodu svými výsledky dochází k závěru, že fraktální dimenze komplexně nevystihuje meandrující vzory charakteristické právě pro vodní toky.

Porovnáním různých metod výpočtu fraktální dimenze se zabývali i Shen et al. (2011), kteří ve své studii hledali spojitost mezi fraktální dimenzí Žluté řeky v závislosti na odlišných tektonických provinciích, kterými Žlutá řeka protéká. Vycházeli pak z hypotézy, že průběh říčního koryta je ovlivněn tektonickou oblastí a v ní probíhajícími procesy. Za účelem aproximace hodnot fraktální dimenze na jednotlivých úsecích toku řeky aplikovali dvě různé metody pro výpočet fraktální dimenze. Hodnoty jednotlivých segmentů řeky pak porovnávali i s hodnotou fraktální dimenze celé řeky. Výsledky fraktální dimenze úseků Žluté řeky se podle výsledků pohybují v rozsahu 1.03 až 1.27, přičemž autoři zvažují možnost, že právě rozdíly mezi hodnotami fraktální dimenze na jejich jednotlivých úsecích poukazují na rozdílné tektonické provincie, kterými řeka protéká. V oblastech, kde řeka prochází staršími tektonickými provinciemi je průběh řeky rovnější, oproti tomu v mladších tektonických provinciích je nižší intenzita zvětrávání a eroze, což má za následek relativně klikatý průběh říčního koryta. Všechny tyto vlastnosti lze právě pozorovat i na postupných změnách hodnot fraktální dimenze.

Ni Zhihui et al. (2013) pak zkoumali možnost využití fraktální dimenze při studiu povodní. Ve své práci využívají fraktální geometrii při studiu vodního toku a hledají závislost s pravděpodobností povodně porovnáním výšky hladiny. Obdobně jako Shen et al. (2011) rozděluje řeku do několika úseků a přichází se závěrem, že hodnoty fraktální dimenze odráží vývoj a charakteristiku jednotlivých úseků daného vodního toku, tedy zejména s ohledem na morfologii tohoto vodního toku. Čím vyšší jsou hodnoty fraktální dimenze, tím více vodní tok meandruje, a naopak, čímž se svým závěrem shodují s tvrzením Shen et al. (2011).

Khanbabaei et al. (2013) používají výpočet fraktální dimenze, který vychází z tzv. Hortonových koeficientů, které se získají poměrem počtu větví říční sítě nebo délky přítoků či rozlohy jednoho řádu říčního toku klasifikovaného podle Strahlerovy klasifikace říční sítě¹, k hodnotám řádu vyššího. Výsledky pak porovnávají s morfometrickými charakteristikami povodí. Khanbabaei et al. (2013) vyvodil závěr, že např. povodí, která mají protáhlý tvar, dosahují vyšších hodnot fraktální dimenze, oproti tomu povodí kruhového tvaru mají nižší fraktální dimenzi. Autoři porovnávají ještě další charakteristiky a obecně dochází k závěru, že fraktální geometrie je vhodným nástrojem ke studiu geomorfologie řek.

¹ Strahlerova klasifikace z roku 1957 je založena na principu označování úseků vodních toků po soutoky. Pramenné úseky jsou označeny jako 1. řád. Při soutoku dvou úseků vodních toků stejného řádu vznikne vodní tok vyššího řádu. Při soutoku dvou úseků vodních toků různého řádu se zachovává číslo vyššího řádu, jež se však nenavýšuje (Pavelková Chmelová et al., 2013).

5 SOFTWAREVÉ MOŽNOSTI PRO VÝPOČET METRIK

Vývoj počítačových technologií stojí za usnadněním výpočtů metrik. Pechanec, et al. (2008) uvádí, že s pronikáním geografických informačních systémů do odvětví studia krajiny se začala objevovat řešení, jak výpočty indexů zjednodušit a hlavně zefektivnit. Pro aplikaci krajinných metrik vzniklo mnoho softwarů, extenzí a toolboxů. V rámci této diplomové práce byla provedena rešerše softwarových možností pro výpočet krajinných metrik a fraktální dimenze (zde diplomová práce částečně vychází z předchozí bakalářské práce autorky – viz Čepová, 2012), která je obsahem této kapitoly.

Walz (2008) popisuje, že jedním z prvních programů navržených k výpočtu krajinných metrik byl software Fragstats. Následně vznikly toolboxy pro program ArcGIS. Mezi ně patří např. PatchAnalyst, V-LATE, PolyFrag, Shape Metrics Tool a arcToolbox pro práci s rastry vyvinutý na půdě americké vědecké společnosti U. S. Geological Survey. Pattern a Texture moduly pracují v prostředí softwaru IDRISI Taiga a balíčky r.le a r.li vznikly pro výpočet krajinných metrik v programu GRASS. Dalším nástrojem je například LECOS (Land cover statistics), plugin pro QGIS software. IncSIM je aplikace, která také umožňuje výpočet krajinných metrik pro kategorizovaná vektorová a rastrová data, za jejím vznikem stojí Earth Observation Group², která je divizí Kosmického výzkumného centra polské akademie věd (Space Research Centre of Polish Academy of Sciences³). IncSIM je k dispozici pod freeware licenci. Většina zmíněných toolboxů a programů je bezplatně k dispozici. O softwarových možnostech pro studium krajiny a pro výpočet krajinných metrik podrobněji píše například Zaragozí (2011) nebo Steiniger a Hay (2008).

Výpočet fraktální dimenze je implementován ve většině programů, které počítají krajinné indexy, nicméně pro samotný výpočet fraktální dimenze vznikla taktéž řada speciálně zaměřených programů. BENOITTM je software pro výpočet fraktální dimenze vyvinutý společností TruSoft Int'l Inc. Tato společnost stojí i za vznikem toolboxu pro software MATLAB, který nese název BENOIT for Matlab. V obou případech se ovšem jedná o komerční produkty. K dispozici je ale také řada programů, které jsou neplacené. Do této skupiny softwarů se řadí například FRACTALYSE, vyvinutý vědeckým týmem "Mobilities, city and transport"⁴, který spadá pod výzkumné centrum Théma⁵, Fractal analysis system for Windows, který vytvořil Hiroyuki Sasaki (zdarma k dispozici pouze pro vědecké účely), HarFA, FracLac a např. FracTop. FDim je program, jehož autorem je Martin Reuter, který počítá fraktální dimenzi obrazů ve stupních šedi. V programu jsou implementovány 4 algoritmy pro odhad fraktální dimenze.

V následujících kapitolách jsou z výše uvedených obecně popsány ty programy, popř. extenze, které byly použity v praktické části této diplomové práce.

² <http://zoz.cbk.waw.pl/index.php/en/>

³ <http://www.cbk.waw.pl/en/>

⁴ <http://thema.univ-fcomte.fr/en/teams/mobility-cities-and-transport>

⁵ <http://thema.univ-fcomte.fr/en/?lang=en>

5.1 Programy pro výpočet krajinných metrik

StraKa (Struktura krajiny)⁶

StraKa je GIS nástroj pro analýzu struktury krajiny, který používá pro výpočet krajinných metrik vzorce publikované Formanem a Godronem (1993). Toolbox vznikl v období 2007–2008 na půdě katedry geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci, jako výstup Diplomové práce Kateřiny Pavkové. StraKa obsahuje nástroje pro výpočet krajinných indexů, statistické a geometrické charakteristiky. Toolbox je rozdělen na dva toolsety: Indexy krajiny a Popis krajiny. Pro komplexní analýzu struktury krajiny počítá StraKa následující indexy: *Index tvaru plošky*, *index izolovanosti plošky*, *index přístupnosti plošek*, *interakce mezi ploškami*, *izolovanosti plošek (rozptyl)* a *index rozptýlenosti plošek*. StraKa patří mezi nástroje, které nabízí výpočet i pokročilejších indexů jako je právě přístupnost či rozptýlenost plošek.

V-LATE⁷

V-LATE (*Vector-based Landscape Analysis Tools Extension*) poskytuje řadu nejběžnějších metrik, které se používají při studiu krajiny. Metriky jsou rozděleny do 7 hlavních kategorií podle hlavních aspektů konstrukčního vzorce metrik a typu analýzy. Jedná se o *Area Analysis* (analýza ploch), *Edge Analysis* (analýza okrajů neboli hran), *Form Analysis* (analýza tvaru), *Proximity Analysis* (analýza sousedství), *Diversity Analysis* (analýza diverzity), *Core Analysis* (analýza jádrových ploch) a *Subdivision Analysis* (analýza pododdělení), české překlady jsou převzaty z Pechanec et al. (2008). Extenze byla vyvinuta v rámci programu SPIN⁸, který byl spolufinancován Katedrou Geoinformatiky na Univerzitě v Salzburgu. Aktuální verzi je extenze Vector-based Landscape Analysis Tools Extension for ArcGIS 10 - 2.0 beta.

Jedná se o extenzi, která podporuje pouze vektorově orientovaná data polygonové topologie ve formátu ESRI shapefile (*.shp). Při práci s nástrojem musí být vrstvy nahrány do ArcMapu, jinak extenze není aktivní. Metriky, které slouží k hodnocení tvaru plošek, se nachází v kategorii Form Analysis (jedná se o *mean shape index*, *mean-perimeter-area ratio*, *mean fractal dimension*, *perimeter-area ratio*, *shape index*). Výsledky výpočtů metrik se zobrazují v novém okně a lze je vyexportovat do textového formátu (*.txt).

Hawth's Analysis Tools⁹

Hawth's Analysis Tool je extenze navržená pro ArcGIS for Desktop za účelem provádět nejen prostorové analýzy. Většina analytických nástrojů byla prvotně navržená pro aplikaci v ekologii, nicméně, jak uvádí Hawthorne (2015), snaha autora byla navrhnout nástroje tak, aby byly použitelné pro široké spektrum uživatelů z jiných vědních oborů.

Hawth's Analysis Tools zahrnuje několik nástrojů, které jsou rozděleny do následujících podskupin dle oblastí použití: *Analysis Tools*, *Sampling Tools*, *Animal Movements*, *KernelTools*, *Raster Tools*, *Table Tools*, *Vector Editing Tools*, *Specialist Tools*,

⁶ <http://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/bakalarske/pavkova08/index.html>

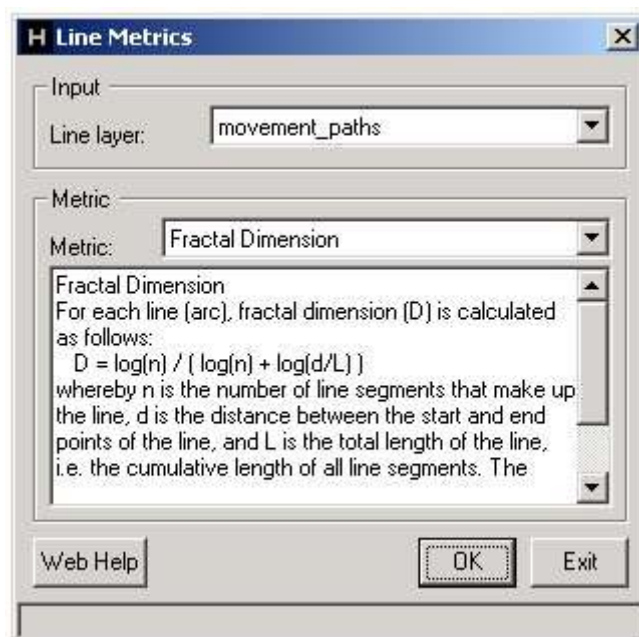
⁷ <https://sites.google.com/site/largvlate/gis-tools/v-late>

⁸ http://cordis.europa.eu/project/rcn/54877_en.html

⁹ <http://www.spatialecology.com/htools/overview.php>

Other Tools. Tyto skupiny nástrojů obsahují další funkce. Do podskupiny Analysis Tools je zařazen nástroj Line metrics Tool, který byl využit v této diplomové práci.

Line Metrics Tool, jehož dialogové okno je zobrazeno na obrázku 5.1, pracuje s liniovými prvky, konkrétně počítá *fraktální dimenzi* a *sinuosity* liniových prvků (volně zde přeloženo jako vlnitost linií). Před použitím tohoto nástroje musí být liniové vrstvy nahrány do ArcMapu, jinak nástroj nelze použít. Dokumentace programu dále uvádí, že linie je třeba rozdělit do logických úseků. Výsledky výpočtu jsou pak zapsány automaticky do atributové tabulky dané liniové vrstvy.



Obr. č. 5.1: Dialogové okno nástroje Line Metrics

Patch Analyst¹⁰

Jedná se o extenzi pro produkty z řady ArcGIS for Desktop. Aktuální verze PatchAnalyst 5.1 je navržena pro ArcGIS for Desktop 10.

Extenze je určena k analýzám krajiny. První verze pro ArcView byla naprogramována Angusem Carrem za podpory Sustainable Forest Management Network Legacy (NCE)¹¹ a Ministerstva přírodních zdrojů a lesnictví státu Ontario¹². Modifikace nástroje pro verzi ArcGIS 9.x vyžadovala kompletní přepsání, na kterém se podílel Daniel Kaukinen. Patch Analyst © and Patch Analyst (Grid) © nejsou volným dílem (public domain), nicméně mohou být zdarma použity v rámci svých licenčních smluv.

Extenze počítá různé krajinné metriky, např. *edge density*, *shape index*, *fractal dimension*, *mean* a *median patch size* apod. Souhrnné statistiky jsou dostupné jak pro *patch* úroveň, tak pro *landscape* úroveň. Extenze zahrnuje 2 verze, Patch Analyst pro práci s vektorovými daty a Patch Analyst Grid pro práci s rastrovými daty. Implementované metriky vycházejí z metrik definovaných v programu Fragstats (Mc Garigal, 2015).

¹⁰ <http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>

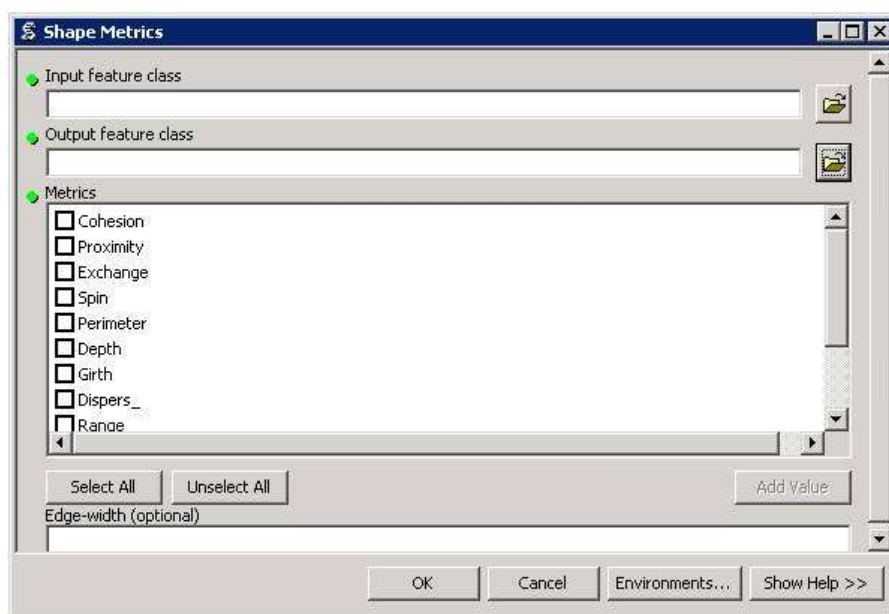
¹¹ <http://www.sfmn.ales.ualberta.ca/>

¹² <http://www.ontario.ca/ministry-natural-resources-and-forestry>

Shape Metrics Tool¹³

Shape metrics tool je nástroj vyvinutý týmem Jasona Parenta na Univerzitě v Connecticutu. Jedná se o skript napsaný v Pythonu, který běží jako ArcToolbox v programu ArcGIS 9.3. Další extenze sice ke spuštění nejsou potřeba, nicméně je nutné dodat, že tento toolbox již není kompatibilní s novějšími verzemi softwaru ArcGIS for Desktop.

Nástroj umí vypočítat 12 tvarových metrik a jejich normalizované hodnoty (principy výpočtů jednotlivých indexů jsou popsány v kapitole 7). Metriky jsou normalizované za použití tzv. Equal Area Circle. Jedná se o kruh s rozlohou, která je shodná s rozlohou zkoumaného území. Výsledkem výpočtů je kopie vstupní vrstvy, která obsahuje ve své atributové tabulce výsledky metrik.



Obr. č. 5.2: Dialogové okno Arctoolboxu Shape Metric Tool

5.2 Programy pro výpočet fraktální dimenze

FRACTALYSE¹⁴

Program FRACTALYSE byl původně vyvinut pro výpočet fraktální dimenze zastavěných ploch měst výzkumným týmem „Mobilities, city and transport“ ve výzkumném centru ThéMA¹⁵ spadajícího pod *Centre National de la Recherche Scientifique*¹⁶ a zároveň i pod dvě francouzské univerzity Franche-Comté¹⁷ a Univerzitu v Burgundách. Software pracuje s formáty TIFF a BMP, má několik funkcí pro výpočet fraktální dimenze černobílých obrazů, křivek a liniových sítí. V programu je implementováno několik odlišných metod pro měření fraktální dimenze. Výpočet fraktální dimenze je rozdělen do dvou kroků: metoda výpočtu a modul pro odhad dimenze. Metoda výpočtu je založena na principu iterací, kdy je v každé iteraci spočítán

¹³ http://clear.uconn.edu/tools/Shape_Metrics/

¹⁴ <http://www.fractalyse.org/>

¹⁵ <http://thema.univ-fcomte.fr/erreur>

¹⁶ <http://www.cnrs.fr/index.php>

¹⁷ <http://www.univ-fcomte.fr/>

počet černých pixelů, které leží uvnitř „počítacího“ okna, které se postupně zvětšuje. Na základě počtu černých pixelů a velikosti počítacího okna, které vyneseme do grafu, se odhaduje hodnota fraktální dimenze.

FRACTALYSE nabízí sedm metod pro měření fraktální dimenze: *grid*, *radius mass*, *box counting*, *correlation*, *dilation*, *gaussian convolution*, *network*. Mezi další funkce patří testování multifraktálů nebo výpočet lakunarity.

Modul pro odhad dimenze je dalším krokem při výpočtu fraktální dimenze, kdy se program snaží aproximovat získanou křivku s odhadnutou křivkou. V případě, že se jedná o fraktální objekt, křivka má tvar paraboly nebo hyperboly, jak uvádí dokumentace programu. Aproximace křivky se provádí pomocí následujících možností:

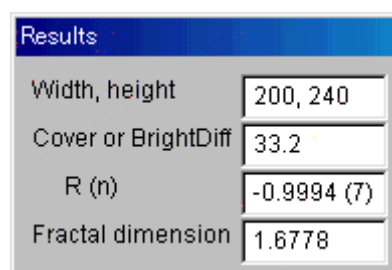
- Nelineární regrese
- Lineární logaritmická regrese
- Nelineární diferenciální regrese



Obr. č. 5.3: Princip měření fraktální dimenze v programu FRACTALYSE (zdroj: <http://www.fractalyse.org/>).

Fractal Analysis System¹⁸

Fractal Analysis System byl vytvořen vyloženě pro výpočet fraktální dimenze, která je počítána box counting metodou. Vstupní data musí být v rastrové podobě. Je možné definovat si vlastní oblast pro výpočet fraktální dimenze nebo počítat fraktální dimenzi pro celý obraz. Výsledek je pak prezentován jak hodnotou fraktální dimenze, tak grafem, který zobrazuje logaritmickou závislost mezi počtem černých pixelů a velikostí boxu, ve kterém se pixely počítají. Autorem aplikace je Hiroyuki Sasaki z japonského Národního vědeckého institutu pro hospodářská zvířata a travní porosty¹⁹, který poskytuje program pro vědecké účely, použití v komerční sféře není povoleno.



Obr. č. 5.4: Ukázka dialogového okna, které prezentuje výsledky výpočtu programu Fractal Analysis System (zdroj: vlastní)

¹⁸ <http://cse.naro.affrc.go.jp/sasaki/fractal/fractal-e.html>

¹⁹ <http://www.naro.affrc.go.jp/english/nilgs/>

6 HYDROGRAFIE ŘEK A ODTOK Z POVODÍ

Celá problematika tvarové metriky je v praktické části této práce aplikována do oblasti hydrologie, a to na příkladu popisu charakteristiky vodních toků a jejich sítí. Vzhledem k tomuto zaměření je nutné si předem vysvětlit a definovat terminologii používanou pro popis této charakteristiky, která se vyskytuje v dalším textu. Následující kapitola proto shrnuje základní poznatky z hydrografie řek a poznatky o odtoku z povodí. V kapitole jsou uvedeny základní informace o měrných jednotkách odtoku, informace o faktorech, které ovlivňují odtok z povodí a dále jsou v textu shrnuty dosavadní poznatky o vlivu tvaru povodí a říční sítě na odtok z povodí.

6.1 Povodí

Základní hydrologická oblast, na které se zkoumá odtokový proces a zjišťuje vzájemný vztah bilančních prvků, se nazývá povodí. Kemel (1991) definuje povodí jako území, ze kterého má voda možnost (za předpokladu, že se nevypaří, nevsákne do půdy apod.), stéci povrchově do říčního systému tohoto povodí a protéci jeho uzávěrovým profilem. Hranicí povodí je tzv. rozvodnice, která je definována jako pomyslná linie, která reprezentuje hranici mezi sousedními povodími. Rozvodnice může být buď orografická, nebo hydrogeologická. Orografická rozvodnice zpravidla prochází po horských vrcholcích, hřebenech nebo jiných vysokých útvarech a ohraničuje povodí povrchových vod. Oproti tomu rozvodnice hydrogeologická ohraničuje povodí podzemních vod. Určení průběhu hydrogeologické rozvodnice je komplikovanější, protože je nutné znát především geologické složení podpovrchových vrstev. Jak uvádí Kemel (1991), průběh rozvodnice orografické se tedy nemusí shodovat s rozvodnicí hydrogeologickou. U větších povodí jsou podle Kemela (1991) rozdíly v rozvodnicích zpravidla malé, proto mohou být zanedbány.

6.1.1 Plocha povodí

Kemel (1991) definuje plochu povodí jako plochu půdorysného průmětu povodí do vodorovné roviny. Plocha se zpravidla udává v km². Netopil et al. (1984) uvádí, že plocha povodí vždy poskytuje prvotní představu o významu dané řeky, která je ve většině případů determinována právě její velikostí a vodností. Parametr velikosti povodí je potřeba k výpočtu některých měrných jednotek odtoku.

6.1.2 Tvar povodí

Fryirs a Brierle (2012) uvádí, že tvar povodí má zásadní vliv na hydrologické poměry v krajině, popisují např. vztah mezi velikostí povodí a délkou toků v povodí. Netopil et al. (1984) dále zmiňuje vliv tvaru povodí na tvoření průtoku při deštích a v obdobích tání sněhu. Tvar povodí také podmiňuje uspořádání říční sítě, ovlivňuje dobu, za kterou se voda dostane z jednotlivých částí povodí do hlavního toku. Němec (1965) pak doplňuje, že tvar daného povodí má vliv i na extrémní charakteristiky jeho odtoku.

Tvar povodí se dá hodnotit z mnoha hledisek. Můžeme hodnotit, jak moc se tvar povodí podobá například kruhu, nebo naopak jak moc je povodí protáhlé. Dále se dá zkoumat souměrnost povodí podle osy hlavního toku. Všechny tyto vlastnosti je možné vyjádřit číselnou hodnotou, která je podle Sudy a Herbera (1994, str. 12) nutná ke srovnání jednotlivých povodí. Pro účely srovnání tvaru různých povodí existuje hned několik koeficientů, které vyjadřují jejich tvarové vlastnosti.

Charakteristika povodí

Jedná se koeficient, který hodnotí tvar povodí. Výpočet koeficientu se provádí dle podle následujícího vzorce (6.1):

$$a = \frac{\bar{s}}{L} = \frac{F}{L^2} \quad (6.1),$$

kde $\bar{s}$ je průměrná šířka povodí, L je průměrná délka. Případně F zastupuje plochu povodí a L^2 hodnotu mocniny délky povodí (tzv. čtverec délky povodí).

Podle hodnot charakteristiky povodí se rozlišují 3 typy povodí (Netopil et al., 1984). Zařazení do skupiny povodí ovšem záleží nejen na hodnotě charakteristiky povodí (a), ale také na ploše povodí. K určení tvaru povodí se rozlišují dvě skupiny podle plochy. Jedná se o povodí do 50km² a povodí nad 50km². V těchto 2 skupinách se rozmezí hodnot charakteristiky povodí k přiřazení typu povodí liší, jak uvádí tabulka 6.1.

Tab. 6.1: Rozlišení povodí podle hodnot charakteristiky povodí (a) (upraveno dle Netopil et al., 1984)

Typ povodí	hodnoty a (plocha povodí do 50km ²)	hodnoty a (plocha povodí nad 50km ²)
Protáhlé	< 0,24	< 0,18
přechodný typ	0,24-0,26	0,18 – 0,20
Vějířovité	> 0,26	> 0,20

Gravelliův koeficient

K dalším metodám kvantitativního hodnocení tvaru povodí patří podle Langhammera (2007) vyjádření míry kruhovitosti nebo protáhlosti povodí. K vyjádření těchto měr slouží *Gravelliův koeficient*. Gravelliův koeficient se vypočítá jako podíl délky rozvodnice k obvodu kruhu o stejném obsahu jako plocha povodí P podle vzorce (6.2):

$$K_G = \frac{L_R}{2\sqrt{P\pi}} \quad (6.2),$$

kde L_R je délka rozvodnice (tudiž obvod povodí) a P je plocha povodí.

Hodnota Gravelliova koeficientu je větší nebo rovna 1 (Pavelková Chmelová et al., 2013). V případě, kdy se jedná o kruhové povodí, koeficient nabývá hodnoty 1.

Koeficient protáhlosti povodí

Koeficient protáhlosti povodí (R_E), někdy též označován jako *elongation ratio* (viz Pavelková Chmelová et al., 2013) se vyjadřuje jako podíl průměru kruhu o stejné ploše jako je plocha povodí s délkou povodí, podle vzorce (6.3):

$$R_E = \frac{2\sqrt{\frac{P}{\pi}}}{L} \quad (6.3),$$

kde L je délka povodí.

Čím blíže se hodnota koeficientu protáhlosti povodí přibližuje 0, tím více je povodí protáhlé. Fryirs a Brierle (2012) uvádí následující vzorec (6.4) pro výpočet protáhlosti povodí:

$$E_r = A^{0,5}/L \quad (6.4),$$

kde A je plocha povodí a L je délka povodí.

Podle autorů je povodí s hodnotou koeficientu 0,6 relativně protáhlé, čím více se opět hodnota blíží 1, tím více se tvar podobá kruhu. Fryirs a Brierle (2012) dále dodávají teoretický předpoklad, že čím více je dané povodí protáhlé, tím pomalejší je i odtok.

Koeficient souměrnosti

Herber a Suda (1994, str. 11) tvrdí, že velmi malá část povodí je souměrná. Důvodem nesouměrnosti povodí je skutečnost, že povodí řeky se vyvíjí v odlišně sklonitém terénu, je tedy z velké části podmíněno morfologií. Geologické podloží se v různých částech povodí (pokud se nejedná o krátké vodní toky) také mění, proto jsou podmínky pro souměrný vývoj povodí odlišné. Koeficient souměrnosti vyjadřuje stupeň souměrnosti plochy povodí. Osu souměrnosti tvoří hlavní tok v povodí. Koeficient souměrnosti vyjádříme jako poměr rozdílu součtů ploch povodí levostranných (P_L) a pravostranných (P_P) přítoků k jejich součtu, čili k celé ploše povodí (P), viz vzorec (6.5):

$$K_S = \frac{|P_L - P_P|}{P} \quad (6.5)$$

Čím více se hodnota koeficientu souměrnosti blíží hodnotě 1, tím více je povodí souměrné.

6.2 Říční síť

Řeky vznikají na místech trvalého výronu vody, která jsou právě pramenem dané řeky. Pramenné úseky se označují jako zdrojnice, postupně se spojují a vznikají tak potoky a řeky. Výsledkem dlouhodobě trvající činnosti řek je vznik údolní sítě, tedy soustavy podlouhlých sníženin s jednostranně souvislým sklonem, v jejich nejnižších částech odtéká voda soustavou vodních toků. Hlavní tok s přítoky vytváří říční soustavu. Říční soustavy v krajině označujeme jako říční síť (Pavelková Chmelová et al., 2013).

6.2.1 Typy uspořádání říční sítě

Říční síť je v přírodě uspořádána velmi rozličně. Uspořádání říční sítě se odvíjí od mnoha faktorů. Podle Fryirs a Brierley (2008) je vzor říční sítě výsledkem litologie a struktury regionu, závisí zejména na geologické stavbě území daného povodí. V odborné literatuře je definováno několik typů uspořádání říční sítě. Mezi nejčastěji jmenované patří např. *rovnoběžná síť*, *mřížkovitá síť*, *pravoúhlá síť*, *prstencová* a *radiální síť* (Pavelková Chmelová et al., 2013; Netopil et al., 1984).

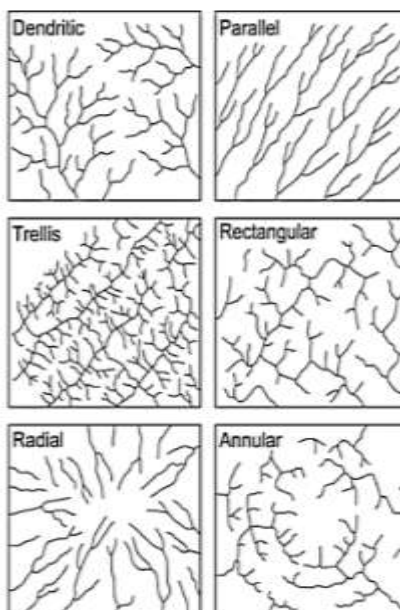
Stromovité uspořádání říční sítě patří mezi nejběžnější uspořádání. Typ této říční sítě se vyskytuje většinou v oblastech s homogenním terénem, kde se nachází horniny stejné geomorfologické odolnosti (Fryirs a Brierley, 2008). Podle Grygara a Jelínka (2015) je tvar tohoto typu říční sítě určen především sklonovými poměry georeliéfu. síť.

V případě, kdy se vodní toky a úseky vodních toků vyvíjejí ve dvou na sebe zhruba kolmých směrech, jedná se o mřížkovitou síť. V tomto případě jeden ze směrů výrazně převládá. V tomto směru tečou tedy dlouhé úseky vodních toků, zatímco ve druhém směru tečou pouze kratší přítoky nebo krátké úseky hlavních toků. Tvar této říční soustavy je typický především pro jednoduchá vrásavá pohoří jurského typu (Grygar a Jelínek, 2015).

Pravoúhlá říční síť se vytváří velmi často v tektonicky narušených oblastech (např. kerná a vrásno-zlomová pohoří), kdy jednotlivé toky sledují směr zlomů a jsou na sebe kolmé. Tato říční síť má velmi podobné vlastnosti jako stromovitá říční síť (Fryirs a Brierley, 2008).

Pokud se vodní toky paprskovitě sbíhají nebo rozbíhají, jedná se o radiální říční síť. Tento typ je typický pro vulkanické oblasti.

V klenbách nebo rozsáhlých pánvích vzniká tzv. prstencovitá říční síť, označovaná též jako anulární. Tato síť je tvořena dlouhými toky nebo dlouhými prstencově prohnutými úseky s krátkými přítoky.



Obr. č. 6.1: Typy říční sítě – levý sloupec shora: stromové, mřížkovité, radiální; pravý sloupec shora: rovnoběžné, pravoúhlé, prstencovité uspořádání (zdroj: Fryirs a Brierley, 2008)

Kromě základních typů říční sítě (některé základní typy jsou zobrazeny na obr. 6.1) existuje i řada jiných odlišností. V případě, kdy v rámci jednotlivých typů říčních sítí dochází k vějířovitému uspořádání několika toků, můžeme říční síť označit jako vějířovitou říční síť, pro kterou je charakteristický soutok několika řek s vyrovnanou délkou a vodností v jednom uzlovém bodě. Fryirs a Brierley (2008) zmiňují mezi základními typy říční sítě ještě tzv. *multi-basinal* říční síť, která se vyskytuje v oblastech, kde byl narušen původní říční systém, většinou na vápencovém podloží. Dalším typem je *contorted* neboli zkroucená říční síť vyskytující se v povodích, která byla narušena tektonickou nebo vulkanickou aktivitou (Fryirs a Brierley, 2008).

Jak již bylo zmíněno, tvar a uspořádání říční sítě mají vliv na průběh povodňové vlny. Netopil et al. (1984) popisuje vliv typů říční sítě na tvorbu povodňové vlny. Uspořádání ovlivňuje převážně úseky pod soutoky hlavních větví říční sítě. Stromovitá říční síť odvádí vodu postupně. Povodňová vlna z pramenné části dospívá tedy do dolního toku v době, kdy vysoký odtok z dolní části již pominul. Vysoký odtok je díky tomuto uspořádání rozložen na delší časové období a průtoky jsou v okamžicích, kdy povodeň vrcholí, podstatně nižší. Oproti tomu vějířovité uspořádání říční sítě je příznačné soutokem několika rovnocenných řek v jednom bodě, proto povodeň většinou

vrcholí právě v místě soutoku, kam odeče voda ze všech větví ve stejném okamžiku. Toto uspořádání říční sítě je pak charakteristické velkou povodní při které dochází k inundacím (Kemel, 1991).

Hustota říční sítě

Jak uvádí Netopil et al. (1984), hustota říční sítě je na povodích rozdílná. Její míru vyjadřuje podíl úhrnné délky všech toků v povodí a plochy povodí. Lze ji vypočítat dle vzorce (6.6):

$$h = \frac{\Sigma L}{P} \quad (6.6),$$

kde L je délka toku a P rozloha povodí.

Netopil et al. (1984) dále zmiňuje, že přesnost výpočtu hustoty říční sítě je závislá na přesnosti měření délky řek. Míra hustoty říční sítě může být ukazatelem velikosti povrchového odtoku, dále může odrážet i složitý vývoj povrchu celého povodí, který probíhal v geologické minulosti, tudíž byly jiné přírodní poměry než v současné době.

Stoddart (1997) poukazuje na skutečnost, že měření hustoty říční sítě je spíše velmi často subjektivní záležitostí, protože není stanoveno, jak přesně měřit délku říčních toků. Povodí má základní říční síť, která je trvalého charakteru, avšak některé další přítoky jsou např. občasného typu. Záleží tedy na konkrétním autorovi, které říční kanály zahrne do svého měření. Stoddart (1997) se přiklání k měření délky pouze aktivních říčních toků. Měříme-li délku říčních toků z map, musíme zvážit, zda užité měřítko mapy je dostačující a zobrazuje všechny říční toky. Touto problematikou se zabývají např. Chorley a Dale (1972) nebo Morisawa (1957).

Stupeň vývoje toku (koeficient křivolakosti)

Herber a Suda (1994, str. 13) uvádí, že křivolaký průběh koryta řek je přirozeným znakem řek. Skutečnost, jak je koryto řeky křivolaké, je ovlivněna mnoha činiteli, např. sklonitostí svahu, vegetačním pokryvem či nadmořskou výškou. Podle Netopila et al. (1984, str. 169) se průběh řek může měnit v čase. Řeky totiž reagují na změny v povodí a zásahy v jejich řečištích, proto může být jejich křivolakost proměnlivá. Koeficient křivolakosti vyjadřuje, jak moc je tok klikatý, tedy jak moc se tok v prostředí „kroutí“ a jak moc složitý má tvar. Koeficient vývoje toku se vyjadřuje poměrem skutečné délky toku k nejkratší možné délce toku (Pavelková, Chmelová et al., 2013), jak naznačuje vzorec (6.7):

$$K = \frac{L}{L_x} \quad (6.7),$$

kde L je skutečná délka vodního toku a L_x je nejkratší přímá vzdálenost pramene a ústí.

V případě, kdy počítáme koeficient pouze pro část toku, je přímková spojnice pramene a ústí nahrazena přímkovou spojnici mezi počátečním profilem toku a konečným profilem zkoumaného úseku toku. Koeficient nabývá vždy hodnot $K \geq 1$. Vyšší hodnoty koeficientu naznačují, že tok je více křivolaký (jeho průběh je doprovázen meandry, zákruty apod.).

6.3 Odtok

Atmosférické srážky, které dopadnou na zemský povrch, se následně rozdělují. Část srážkové vody se vypaří nebo vsákne, zbytek se pohybuje po povrchu krajiny jako povrchový odtok. Povrchový odtok je složka celkového odtoku, který odtéká z povodí po povrchu krajiny (Grygar a Jelínek, 2015). Můžeme sledovat plošný odtok a soustředěný odtok. Plošný odtok je nesoustředěné stékání vody po povrchu terénu, též označované jako ron (Pavelková Chmelová et al., 2013), který lze zejména pozorovat v místech, kde se nevyskytuje vegetační pokryv (Trewartha et al., 1957). Přítomnost vegetace a skalního podloží způsobuje soustředění ronů do erozních rýh a stružek, které se postupně mění v soustředěný odtok. Soustředěný odtok je tedy soustředěné odtékání vody v korytech vodních toků (Grygar a Jelínek, 2015).

6.3.1 Měrné jednotky odtoku

Souhrn charakteristických změn stavu vodních objektů v čase se označuje jako vodní nebo hydrologický režim (Netopil et al., 1984). Podle prostředí hydrosféry či její části, ve kterém se tyto změny odehrávají, můžeme pozorovat vodní režim řek, jezer, bažin apod. Vodní režim řek je tvořen dlouhodobými, ročními, sezonními či denními výkyvy vodních stavů, průtoků, ledových jevů, teploty vody, změnami v množství a druhu rozpuštěných látek ve vodě, změnami tvaru a průběhu říčního koryta, apod. V konkrétním případě můžeme tedy sledovat změny stavů, průtoků, teploty vody apod.

Netopil et al. (1984) dále popisuje měrné veličiny, které se používají k vystižení režimu řek a vzájemnému porovnání odtokových poměrů jednotlivých řek i podmínek pro odtok na jejich povodích. Jedná se o absolutní i relativní měrné jednotky odtoku:

- průtok
- množství nebo objem odtoku
- specifický (poměrný) odtok
- výška odtoku
- součinitel odtoku

Průtok

Průtok je podle Netopila (1984) definován jako množství vody, které proteče za jednu vteřinu příčným průřezem koryta řeky označovaného jako průtočný profil. Obecněji lze průtok charakterizovat jako množství vody, které proteče příčným profilem za jednotku času (Alho, 2013). Průtok se značí Q a vyjadřuje se obvykle měrnou jednotkou $\text{m}^3 \times \text{s}^{-1}$, popř. v $\text{l} \times \text{s}^{-1}$ (Kemel, 1991). Hodnota průtoků se vztahuje vždy na určitou dobu a na určité místo vodního toku nebo jeho krátký úsek, v jehož těsné blízkosti byla naměřena. V závislosti na době, ke které se tento parametr váže, pak lze vodnost vyjádřit následujícími veličinami:

- Okamžitý průtok (Q)
- Denní průtok (Q_d)

- Měsíční průtok (Q_m)
- Roční průtok (Q_r)
- Dlouhodobý průměrný průtok, který je označován jako *normál* (Q_a)

Pavelková Chmelová et al. (2013) uvádí, že denní průtok se může označit pojmem průměrný denní průtok pouze v případě, kdy je jeho hodnota stanovena na základě limnigrafického záznamu. Pokud je hodnota průtoku stanovena na základě měrné křivky průtoků, označuje se pouze jako denní průtok. Z denních průtoků se následně stanovují nejen měsíční průtoky (Q_m), ale také roční průtoky (Q_r).

Specifickou charakteristikou je pak dlouhodobý roční průměrný průtok (Q_a) který je jednou ze základních hydrologických veličin (Starý, 2005). Jeho hodnotu lze obecně považovat za výsledek průměrného vlivu klimatických i geografických činitelů daného povodí. Tento průtok je také jinak nazýván jako normál (Netopil, 1984). Hodnota průměrného ročního průtoku je samozřejmě závislá na sezónní vodnosti toku a v jednotlivých letech může být rozdílná. Pavelková Chmelová et al. (2013) uvádí, že dlouhodobý roční průměrný průtok lze stanovit několika způsoby. Je-li pro daný profil k dispozici dostatečně dlouhá řada pozorování, výsledná hodnota je pak aritmetickým průměrem této řady průměrných denních průtoků (Q_d) z tohoto určitého časového období. Další možností je pak i prodloužení řady průměrných ročních průtoků (Q_r) grafickou extrapolací (do značné míry přibližná a subjektivní metoda), použití statistických metod nebo stanovení průtoku z bilanční rovnice povodí. Starý (2005) uvádí, že přesnost dlouhodobého průměrného průtoku přímo závisí na délce sledovaného období a nepřímo na rozkolísanosti jednotlivých průměrných ročních průtoků.

Starý (2005) zmiňuje další potenciálně důležité charakteristiky toků, mezi které patří extrémní hodnoty odtoku. Jedná se o nejvyšší (nebo nejnižší) hodnoty, které se vyskytly ve zkoumaném určitém časovém období.

Maximální průtok Q_{max} je tedy definován jako největší kulminační průtok povodňové vlny v určitém období. N-letý maximální průtok je kulminační průtok povodňové vlny, který je dosažen nebo překročen v dlouhodobém průměru jednou za N let (označuje se jako Q_1 , Q_2 , Q_5 , Q_{10} atd.) Stejně jako maximální hodnoty průtoků, se analogicky sledují se i hodnoty minimální – např. N-letý minimální průtok.

Objem odtoku

Celkové množství vody, které proteče korytem řeky za vymezený časový úsek, se nazývá jako množství odtoku (označováno jako O , viz Netopil, 1984) nebo objem odtoku (někde označován jako V_o , viz Pavelková Chmelová et al., 2013). Odtok se vyjadřuje v jednotkách objemu za delší časové období, zpravidla se počítá pro období jednoho roku (Langhammer, 2007), ale také pro dobu povodně, roční období či měsíc apod. Pro výpočet se používá jednoduchý vzorec, kde se průměrný průtok vynásobí potřebným časovým úsekem ve vteřinách (Netopil et al., 1984 a Kemel, 1991). Odtok pro danou dobu můžeme vypočítat dle vzorců (6.9), (6.10), (6.11) a (6.12), které jsou uvedeny v následující tabulce 6.2.

Tab. 6.2: Vztahy pro výpočet objemu odtoku (podle Havlík, 2015)

Odtok	Vzorec	poznámka
Denní odtok	$O_d = 86400 \times Q_d$ (6.9)	
Měsíční odtok	$O_m = 86400 \times n \times Q_d$ (6.10)	N – počet dní v měsíci
Roční odtok	$O_r = 31\,536 \times 10^3 \times Q_r$ (6.11)	
Průměrný roční odtok	$O_a = 31\,557 \times 10^3 \times Q_a$ (6.12)	

Specifický odtok

Jak uvádí Netopil et al. (1984, str. 162), plošný odtok z povodí lze určovat velmi omezeně a jeho určení není jednoduché. Hodnoty specifického odtoku na menších plochách není možné aplikovat na plochy větší či dokonce na celá povodí. Rozložení odtoku na ploše povodí není totiž rovnoměrné. Z tohoto důvodu se používají k vyjádření plošného odtoku relativní odvozené průměrné hodnoty, k jejichž odvození slouží průměrné hodnoty průtoku. Tyto relativní průměrné hodnoty odtoku z povodí jsou pouze orientační, nicméně i přesto umožňují porovnat podmínky odtoku na jednotlivých povodích či na jeho částech (Pavelková Chmelová et al., 2013). Specifické odtoky totiž závisí na podmínkách geografických i klimatických.

Specifický odtok, označovaný podle Netopil et al. (1984, str. 162) též jako poměrný odtok (q) nebo jednotková vydatnost, vyjadřuje množství vody odtékající z jednotky plochy povodí za určitý časový úsek. K odvození hodnot specifického odtoku se používá následující vztah (6.13):

$$q = \frac{Q}{F} \quad (6.13),$$

kde Q je průtok a F plocha povodí, pro kterou platí průtok.

Specifický odtok se určuje v jednotkách $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ nebo v $\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Ze vztahu vyplývá, že v závislosti na povaze hodnot průtoku, se může jednat o specifický odtok okamžitý (q), průměrný denní (q_d), měsíční (q_m), roční (q_r) či dlouhodobý průměrný (q_a), který je používán v této diplomové práci.

Specifické odtoky jsou závislé zejména na velikosti povodí a jeho využití. Na velmi malých povodích (do 20 ha) vychází specifické odtoky i přes $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Na povodích větších jsou pak specifické odtoky do $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, převažují však hodnoty okolo $3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Envicons, 2013). Specifický odtok je významným způsobem ovlivněn přítomností vegetace. Přítomnost lesa snižuje hodnoty specifického odtoku, protože voda je zadržena vegetací. V případě, že je povodí z poloviny a více pokryto lesem, klesá specifický odtok i na malých povodích na cca $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, a výrazně se prodlužuje doba koncentrace, jež je časem, který je potřebný pro odtok z nejvzdálenějšího bodu v povodí do uzávěrového profilu (Kupsová, 2007). Obecně pak lze říci, že doba koncentrace roste s velikostí povodí. Tento fakt dokládá Jakšlová (2009) na příkladu specifického odtoku na polích, který bývá vyšší než v ostatních případech. Voda ze srážek zde není zadržena vegetací a rovnou odtéká. Jakšlová (2009) dále uvádí, že nízký specifický odtok také ale může znamenat infiltraci vody do hlubokého oběhu podzemních vod.

Výška odtoku

Výška odtoku (h_o) neboli odtoková výška je další veličinou, která může být měřena v souvislosti s vodním režimem. Jedná se o vrstvu vody rovnoměrně rozloženou na ploše povodí, která otekla za určité období, nejčastěji měřená v milimetrech za rok (Netopil et

al., 1984, str. 162). Hodnoty je následně možné porovnávat s množstvím srážek, které spadnou na dané povodí za stejnou dobu. Kemel (1991) uvádí vzorec (6.14), pro výpočet roční výšky (h_o) z průměrného ročního specifického odtoku:

$$h_o [mm] = q \times 31,536 [l.s^{-1}.km^{-2}] \quad (6.14)$$

Součinitel odtoku

Součinitel odtoku, též označovaný jako koeficient odtoku (φ) je vyjádřen poměrem mezi výškou odtoku a srážkami (popř. je vyjádřen poměrem mezi objemem odtoku a srážkami, jež spadnou na plochu povodí). Podle Merze et al. (2006) in Kalkus (2012) zjednodušeně součinitel odtoku udává, jaká část spadlých srážek se změní v přímý odtok. Koeficient odtoku se vypočítá dle následujícího vztahu (6.15):

$$\varphi = \frac{H_o mm}{H_s mm} = \frac{O km^3}{S km^3} \quad (6.15)$$

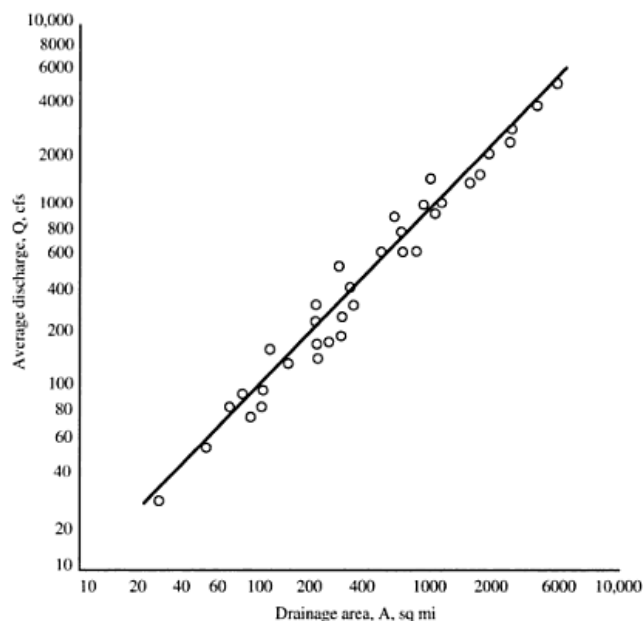
Netopil et al. (1984, str. 163) uvádí, že koeficient se vyjadřuje v procentech nebo desetinným číslem. Hodnota součinitele odtoku jinými slovy ilustruje podíl, který je z celkového množství spadlých srážek odváděn z povodí právě řekami. Matoušek (2010) in Kalkus (2012) pak doplňuje, že pokud odtokový koeficient dosáhne hodnoty 0,95, je povodí vodou již zcela nasyceno a veškeré srážky se mění v povrchový odtok. Součinitel odtoku je ovlivněn zejména vegetačním krytem a předchozí nasyceností povodí. Použití koeficientu odtoku je jednou ze základních metod, jak mezi sebou porovnat několik povodí a jak zjistit jejich odtokové vlastnosti.

6.3.2 Faktory ovlivňující odtok

Odtok z povodí je ovlivněn mnoha faktory. Jak uvádí Netopil et al. (1984, str. 164), fyzicko-geografické poměry mají rozhodující vliv na celkový vývoj odtoku, na velikost odtoku a na jeho plošné a časové rozložení. Zeměpisná poloha povodí hraje taktéž důležitou roli, neboť podmiňuje klimatické poměry daného povodí. Vliv na odtok mají také orografické podmínky povodí, sklonitost svahů, výškové poměry, geologické a půdní poměry a v neposlední řadě také vegetační kryt. V této souvislosti se s přibývajícím zásahy člověka do přírody se projevuje antropogenní činnost jako zásadní faktor ovlivňující odtok z povodí. Nicméně i geometrické vlastnosti povodí mají vliv na odtok z povodí, v tomto případě se jedná především o velikost a tvar povodí.

6.4 Vliv geometrických vlastností povodí na odtok

Vztah mezi velikostí povodí a průtokem popisuje Iturbe a Rinaldo (2001). Průměrný roční průtok podle autorů charakterizuje povodí z dlouhodobého hlediska. Proto vychází z hodnot této veličiny a popisují vztah mezi průtokem a kumulativní velikostí povodí podle relativní řádovosti říční sítě. Ve své studii dochází ke stanovení závislosti mezi rozlohou povodí a průtokem, který je znázorněn na obrázku 6.2. Iturbe a Rinaldo (2001) však dále poukazují na to, že ilustrovaný vztah platí pro povodí, na kterých nejsou velké rozdíly v průměrných ročních srážkách spadlých na povodí. V případě, že se jedná o povodí, kde jsou srážky rozmístěny nerovnoměrně, uvádí, že exponenciální závislost mezi průtokem a plochou má nižší koeficient 0,75 (oproti koeficientu 1).



Obrázek č. 6.2: Vztah mezi průtokem a rozlohou povodí. Exponenciální závislost se sklonem linie 1 (zdroj: Iturbe a Rinaldo, 2001).

Hack (1957 in Iturbe a Rinaldo, 2001) demonstruje vztah mezi délkou toků a rozlohou povodí ve své studii zaměřené na údolí Shenandoah ve Virginii. Autor ve své práci našel vztah mezi délkou toků a rozlohou, který vyjadřuje následující rovnicí (6.8):

$$L = 1,4 A^{0,6} \quad (6.8),$$

kde L je délka nejdelšího toku a A je rozloha povodí.

Autor se detailně zabýval i zkoumáním závislosti mezi délkou a rozlohou na dalších povodích v USA i po celém světě, přičemž dospěl právě k hodnotě exponentu 0,6, kterou dosazuje do rovnice (6.8). V neposlední řadě došel i k závěru, že tvar povodí se s rostoucí rozlohou protahuje ve směru hlavního toku.

7 VÝPOČET TVAROVÝCH METRIK

Praktická část práce zahrnuje dvě případové studie. Pro první studii byla zvolena subpovodí III. řádu v zájmovém území povodí Moravy a Dyje. Ve druhé studii byla vybrána povodí menší, konkrétně povodí, která jsou vymezena na základě vodoměrných stanic. Výběr konkrétních subpovodí byl ovlivněn dostupností hydrologických dat, z výše zmíněných skupin povodí bylo tedy vybráno 17 povodí III. řádu a 27 menších povodí. Pro jednotlivá povodí byly vypočítány hodnoty tvarových metrik tvaru povodí a tvaru říční sítě. V následující kapitole jsou popsána vstupní data pro výpočet tvarových metrik a popsány použité tvarové metriky.

7.1 Vstupní data

K výpočtu tvarových metrik byla použita prostorová data z Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD). Jedná se o referenční geografickou databázi, která je primárně vytvořená z odpovídajících vrstev ZABAGED®. Tato databáze je především určená pro tvorbu tematických kartografických výstupů s vodohospodářskou tematikou a tematikou ochrany vod nad Základní mapou ČR 1:10 000, resp. 1: 50 000, včetně Mapy záplavových území ČR 1:10 000, a dále pro prostorové analýzy v prostředí geografických informačních systémů a zpracování reportingových dat podle Rámcové směrnice 2000/60/ES v oblasti vodní politiky. Tvůrcem a správcem celé databáze je Oddělení geografických informačních systémů a kartografie Výzkumný Ústav Vodohospodářský T. G. Masaryka, který je veřejnou vědeckou institucí zřízenou Ministerstvem životního prostředí. Vybrané datové vrstvy objektů DIBAVOD jsou poskytovány zdarma ve formátu ESRI shapefile.

Konkrétně byly použity liniové vrstvy A02 – vodní tok (jemné úseky)²⁰, A03 – vodní tok (hrubé úseky)²¹, dále polygonové vrstvy A08 – hydrologické členění – povodí III. řádu²² a A11 – povodí vodoměrných stanic²³. K lokalizaci vodoměrných stanic byla použita vrstva E04 – vodoměrné stanice²⁴.

Model říční sítě

Strukturální model povodí a vodních toků je logickou reprezentací systému povodí a vodních toků. Základními prvky struktury povodí a vodních toků jsou primární povodí DIBAVOD, povodí IV. řádu, respektive jim odpovídající úseky vodních toků. Tento model je zpracovaný ve dvou úrovních podrobnosti. Existuje model hrubého dělení vodních úseků a model jemného dělení vodních úseků.

Model hrubého dělení reprezentuje vodní toky 1. až 4. řádu /3/ a jejich hydrologické úseky. Jak uvádí Linhartová a Zbořil (2006) reprezentuje tedy říční síť, která tvoří páteř primárního hydrologického členění území České republiky reprezentovaného rozvodnicemi DIBAVOD. Jeden úsek toku odpovídá příslušnému hydrologickému povodí/ mezipovodí 4. řádu. Toky podrobnějšího řádu nejsou zobrazeny. Dceřinou vrstvou je model jemného dělení vodních toků, který obsahuje shodnou říční síť

²⁰ http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&id_dib=2

²¹ http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&id_dib=3

²² http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&id_dib=8

²³ http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&id_dib=11

²⁴ http://www.dibavod.cz/index.php?id=27&id_dib=45

s modelem hrubého dělení a dále je rozšířen o toky a jejich úseky, pro které nejsou v DIBAVOD k dispozici rozvodnice IV. řádu a nejsou ani Českým hydrologickým ústavem sledovány jejich standardní hydrologické charakteristiky povodí. Reprezentuje tedy všechny vodní toky zobrazené v Základní vodohospodářské mapě 1:50 000 a jejich hydrologické úseky – tzv. jemné dělení. V této práci byly použity pro výpočet tvarových metrik oba modely.

Povodí

Povodí III. řádu jsou vymezena na základě rozvodnice velkých hydrologických celků, které jsou dále děleny rozvodnicí na menší části dle hydrologického pořadí dalšího dělení dílčích povodí. Povodí vodoměrných stanic jsou vymezena na základě části povodí IV. řádu určené vodoměrnou stanicí (Zbořil, 2005).

7.2 Vymezení území

Oblast povodí Dyje a Moravy je rozdělena do 35 subpovodí III. řádu, nicméně některá subpovodí sahají přes státní hranici České republiky. Právě oblasti přesahující hranici České republiky nebyly do výpočtů zahrnuty, protože nebyla k dispozici všechna potřebná data (včetně dat týkajících se charakteristik odtoku, a všech potřebných prostorových dat říční sítě). Ze zmíněných 35 subpovodí bylo tedy vybráno pouze 17 subpovodí III. řádu (viz Příloha 6).

V práci je použito vlastní označení jednotlivých subpovodí. Podle příslušnosti k oblasti povodí Moravy a oblasti povodí Dyje nesou označení názvy PMO (příslušnost k povodí Moravy) a PDY (příslušnost k povodí Dyje), dále jsou označena číslem.

Ve druhé studii pak byla použita menší subpovodí. Vzhledem k rozmístění vodoměrných stanic, byla zvolena subpovodí, která jsou vymezena na základě polohy vodoměrných stanic. Vrstva těchto povodí je dostupná v databázi DIBAVOD. Z této vrstvy bylo vybráno 27 povodí, ve většině případů se jedná o povodí, která leží na horních tocích (viz Příloha 7). V práci jsou tato subpovodí označena názvem vodoměrné stanice (Baliny, Luhačovice apod.).

7.3 Tvarové metriky

Přehled indexů, které byly vybrány pro potřeby diplomové práce, je prezentován v následujícím textu. Názvy indexů jsou přebrány tak, jak jsou použity v programech, které byly použity k jejich výpočtu. Vzorce pro výpočet hodnot jednotlivých indexů vycházejí z dokumentace k jednotlivým softwarům. Výsledky indexů **Patch Area**, **Patch Perimeter** byly získány z extenze V-LATE, výsledky **Perimeter- Area Ratio** byly získány z extenze Patch Analyst. **Shape index** byl počítán v extenzích V-LATE, Patch Analyst a v toolboxu StraKA, kde je index nazván jako *index tvaru plošky*. **Proximity**, **Cohesion**, **Dispersion**, **Depth**, **Spin**, **Range**, **Exchange**, **Traversal**, **Detour**, **Perimeter** a **Girth indexy** jsou implementovány v Arctoolboxu Shape Metrics Tool. K dispozici jsou jak absolutní, tak normalizované hodnoty tohoto indexu, které jsou normalizovány na základě tzv. Equal Area Circle²⁵. Normalizace na základě kruhu o stejné rozloze jako

²⁵ http://clear.uconn.edu/tools/Shape_Metrics/graphics/EAC.htm

zkoumaná plocha. Normalizované indexy umožňují porovnávat plochy mezi sebou bez vlivu jejich rozlohy, hodnoty těchto indexů se pohybují v rozpětí 0 až 1. Pro výpočet **fraktální dimenze** byly použity programy FRACTALYSE, Fractal Analysis System, extenze Patch Analyst, V-LATE a Hawth's Analysis Tools . Jednotlivé softwary používají různé metody výpočtu fraktální dimenze, které jsou taktéž popsány v této kapitole. Pro přehled jsou v tabulce 7.1 uvedeny jednotlivé programy a indexy, které v nich byly vypočítány. Další tabulka 7.2 uvádí metody výpočtu fraktální dimenze pro konkrétní programy použité v této práci.

Tabulka č. 7.1: Přehled použitých tvarových metrik podle použitého softwaru

Software	Použité metriky
V-LATE	Patch Area, Patch Perimeter, Shape index, Fraktální dimenze
Patch Analyst	Perimeter-Area Ratio, Shape index, fraktální dimenze
StraKA	index tvaru plošky
Shape Metrics Tool	Proximity, Cohesion, Dispersion, Depth, Spin, Range, Exchange, Traversal, Detour, Perimeter a Girth
FRACTALYSE	fraktální dimenze
Fractal Analysis System	fraktální dimenze
Hawth's Analysis Tools	fraktální dimenze, sinuosity

Tabulka č. 7.2: Přehled metod výpočtu fraktální dimenze podle použitého softwaru.

Software	Metoda výpočtu fraktální dimenze
FRACTALYSE	box counting metoda, radius mass metoda
Fractal Analysis System	box counting metoda
V-LATE	Ostatní metody (dle vzorce 7.12 uvedeného v následující kapitole)
Patch Analyst	Ostatní metody (dle vzorce 7.12 uvedeného v následující kapitole)
Hawth's Analysis Tools	Ostatní metody (dle vzorce 7.13 uvedeného v následující kapitole)

7.3.1 Jednoduché tvarové metriky

Patch Area

Index Patch area vyjadřuje rozlohu plochy daného povodí. Např. extenze V-LATE vyžaduje výpočet rozlohy plochy před výpočtem ostatních metrik, protože právě z této metriky vychází výpočet většiny dalších metrik.

Patch Perimeter

Jedná se o obvod plochy daného území, stejně jako v případě indexu *Patch Area* pak vstupuje do výpočtu dalších pokročilejších metrik.

Perimeter- Area Ratio

Index, jehož hodnota je získána na základě poměru obvodu (P) a plochy (A), dle vzorce (7.1). Tato metrika vyjadřuje obecnou tvarovou komplexnost. V programu Patch Analyst je výsledek udáván v metrech na hektar.

$$\text{Perimeter} - \text{Area Ratio} = \frac{P}{A} \quad (7.1)$$

Shape index

Shape index hodnotí tvar dané plošky (případně celého hodnoceného území), a to ve smyslu jeho podobnosti k ideálnímu kruhu. Hodnoty indexu jsou vyšší nebo rovny 1 (v případě, že se jedná o ideálně kruhové území), výpočet vychází z následujícího vzorce (7.2).

$$\text{Shape index} = \frac{P}{2\sqrt{A\pi}} \quad (7.2),$$

kde P je obvod plošky a A je rozloha plošky.

7.3.2 Pokročilejší metriky

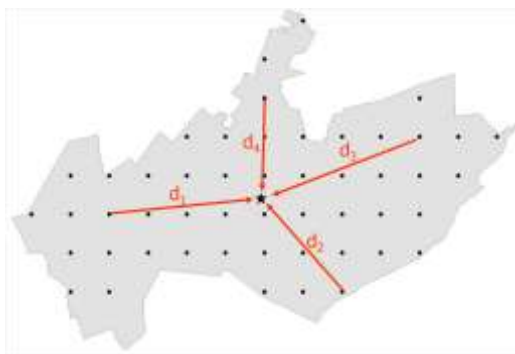
Proximity index

Proximity index hodnotí kompaktnost daného území. Jedná se o metriku, která vyjadřuje průměrnou vzdálenost vnitřních bodů plošky od centroidu (těžiště), přičemž se při výpočtu všem bodům přisuzuje stejná váha. Index se počítá dle následujícího vzorce (7.3):

$$\text{Proximity} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \quad (7.3),$$

kde d je vzdálenost mezi vnitřním bodem a centrem, n je počet bodů.

Objekty, jejichž hodnota Proximity indexu se blíží 1, se více podobají kruhu.



Obr. 7.1 Princip výpočtu proximity indexu (autor: J. Parent, 2009).

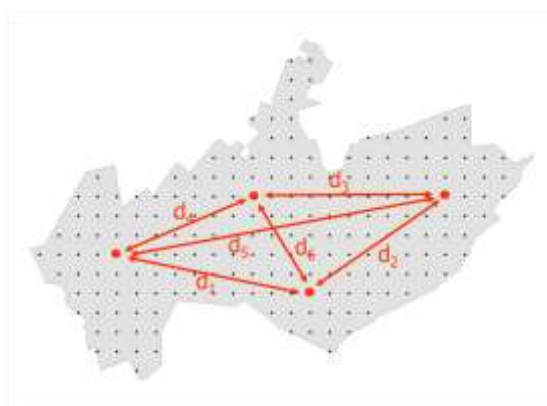
Cohesion index

Tento index hodnotí průměrné vzdálenosti mezi vnitřními body. Pro výpočet je nad polygonem vytvořena síť náhodně rozmístěných bodů (viz dokumentace Arctoolboxu Shape Metrics Tool²⁶), vzdálenosti mezi těmito body pak vstupují do výpočtu indexu. Index se vypočítá dle vzorce (7.4):

$$cohesion = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{\#} \quad (7.4),$$

kde d je vzdálenost mezi náhodně zvolenými body, $\#$ počet párů bodů.

V případě Cohesion indexu vstupuje do výpočtu pouze 30 bodů z 1000 náhodně rozmístěných bodů uvnitř polygonu.



Obr. 7.2 Princip výpočtu cohesion indexu (autor: J. Parent, 2009).

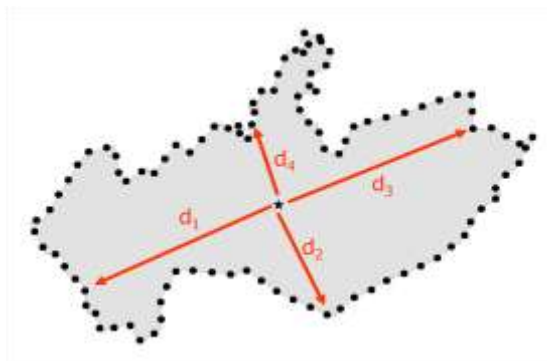
Dispersion index

Dispersion index, na rozdíl od Proximity indexu (který hodnotí vzdálenost mezi vnitřními body k těžišti), hodnotí vzdálenosti mezi body na obvodu území vůči těžišti. Jeho hodnota vychází ze vzorce (7.5). Metrika hodnotí, zda se objekt rozptyluje rovnoměrně ve všech směrech.

$$dispersion = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \quad (7.5),$$

kde d je vzdálenost mezi bodem na obvodu a centrem, n je počet bodů.

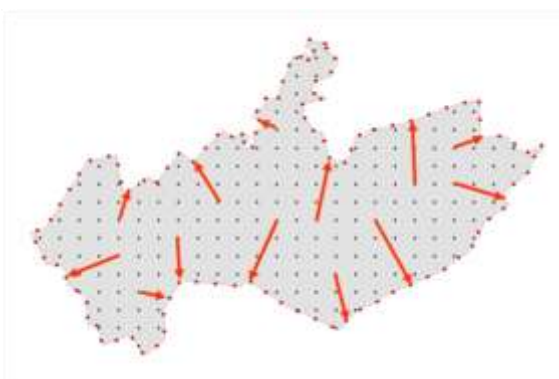
²⁶ http://clear.uconn.edu/tools/Shape_Metrics/index.htm



Obr. 7.3 Princip výpočtu dispersion indexu (autor: J. Parent, 2009).

Depth index

Tento index vyjadřuje průměrnou vzdálenost náhodně vybraných vnitřních bodů k nejbližším bodům, které leží na obvodu. Index opět hodnotí kompaktnost objektu



Obr. 7.4 Princip výpočtu pedth indexu (autor: J. Parent, 2009).

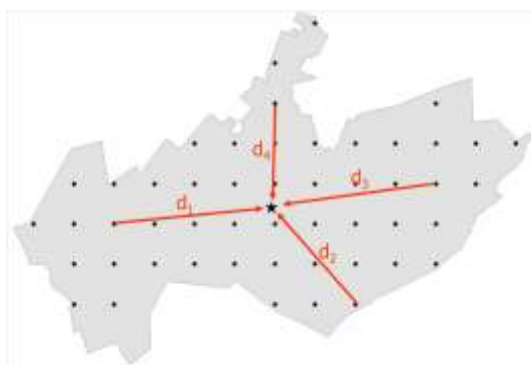
Spin index

Metoda výpočtu Spin indexu je podobná Proximity indexu, avšak dává vyšší váhu bodům, které leží dále od centra dané plochy. Při výpočtu jsou totiž brány v úvahu druhé mocniny jednotlivých vzdáleností vnitřních bodů od centra území (viz vzorec 7.6).

$$spin = \frac{d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2}{\#} \quad (7.6),$$

kde d je vzdálenost mezi vnitřním bodem a centrem, $\#$ počet párů bodů).

Pomocí výpočtu Spin indexu je tedy možné lépe identifikovat plochy s různými výběžky. Tento index je znám taktéž pod pojmem Moment of Inertia (Parent, 2009).



Obr. 7.5 Princip výpočtu spin indexu (autor: J. Parent, 2009).

Range index

Pomocí výpočtu Range indexu se udává vzdálenost dvou nejvzdálenějších bodů v rámci dané plochy, které leží na obvodu kružnice opsané zkoumané ploše.

Exchange index

Tento index vyjadřuje rozlohu plochy, která je obsažena v tzv. Equal Area Circle, která má střed v centroidu plochy.



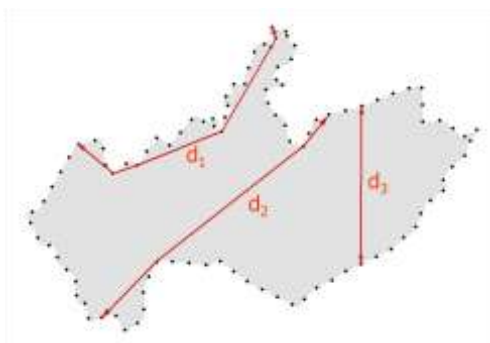
Obr.7.6 Princip výpočtu exchange indexu (autor: J. Parent, 2009).

Traversal index

Traversal index představuje průměr nejkratších cest mezi dvěma náhodně vybranými body, které leží na obvodu plochy. Cesta z jednoho do druhého bodu musí vést vnitřkem plochy. Index se počítá dle vzorce (7.7):

$$traversal = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{\#} \quad (7.7),$$

kde d je nejkratší vzdálenost mezi vybranými body ležícími na obvodu plochy, $\#$ počet párů bodů.



Obr. 7.7 Princip výpočtu traversal indexu (autor: J.Parent, 2009).

Detour index

Tento index znázorňuje délku obvodu tzv. convex hull²⁷. Convex hull představuje polygon s nejmenším obvodem, který obsahuje celý objekt (Parrent, 2009).

²⁷ http://clear.uconn.edu/tools/Shape_Metrics/graphics/Convex%20Hull.htm



Obr. 7.8 Princip výpočtu detour indexu (autor: J.Parent, 2009).

Perimeter index

Reprezentuje obvod plochy. Obvod je definován lomovými body. Jedná se vlastně o stejný index jako **Patch perimeter**, pomocí nástroje Shape Metrics Tool lze navíc získat normalizované hodnoty tohoto indexu.

Girth index

Index udává poloměr největší kružnice, kterou lze vepsat do tvaru plochy.



Obr. 7.9 Princip výpočtu girth indexu (autor: J.Parent, 2009).

7.3.3 Fraktální dimenze

Fraktální dimenze vyjadřuje složitost objektu nezávisle na měřítku velikosti daného objektu. Pro odhad fraktální dimenze existuje mnoho metod (více o metodách píše např. Hotař, 2006; Čepová, 2012). V následující části je uveden přehled metod použitých v této praktické části.

Box counting metoda

Nejnámější a nejpoužívanější metodou pro odhad fraktální dimenze je box counting metoda. Základní principy této metody popisuje Hotař (2006). Box counting metoda spočívá v tom, že se plocha pokrývá mřížkami (boxy) s různě dlouhými stranami buněk. Stranu buňky označíme r , přičemž pro každé pokrytí sledujeme, v kolika boxech se studovaný objekt nachází. Tento počet buněk označíme $N(r)$. Počet boxů je dán vztahem:

$$N(r) = konst. \left(\frac{1}{r}\right)^{D_B} = konst. * r^{-D_B} \quad (7.8),$$

kde D_B je hledaná fraktální dimenze.

Pro odhad fraktální dimenze je použit algoritmus, jenž stanovuje plochu potřebnou pro pokrytí objektu. Za použití vztahu (7.8) je celková plocha pokrytí $A(r)$ boxy o straně r dána vztahem:

$$A(r) = N(r) * r^2 = konst. * r^{-D_B} * r^2 = konst. * r^{2-D_B} \quad (7.9)$$

D_B je pak získána ze sklonu regresní přímky v Richardson-Mandelbrotově grafu – jedná se log-log graf, který využívá dvojkový logaritmus (Hotař, 2006). Výše zmíněný graf znázorňuje logaritmickou závislost mezi plochou $\log_2 A$ a velikostí strany $\log_2 r$:

$$2 - D_B = \frac{\Delta \log A(r)}{\Delta \log r} = s \Rightarrow D_B = 2 - s = 2 - \frac{\Delta \log A(r)}{\Delta \log r} \quad (7.10)$$

D_B reprezentuje odhad fraktální dimenze, v ideálním případě by se tato hodnota měla rovnat skutečné fraktální dimenzi. Kusák (2014) uvádí, že čím blíže je velikost „pokrývacího boxu“ rovna 0, tím přesnějšího odhadu fraktální dimenze lze dosáhnout. Velikost boxu se při výpočtu v každém kroku zmenšuje, což přináší i zmenšení mřížky a studovaný objekt se stává mnohem podrobnějším. Tato metoda může být také aplikovaná při odhadu fraktální dimenze linie (např. pobřeží). Pro linii pak platí následující vztah (7.11) a dimenze se opět určuje pomocí směrnice regresní přímky (Hotař, 2006).

$$L(r) = N(r) * r = konst. * r^{1-D_B} \quad (7.11)$$

Hodnoty fraktální dimenze tvaru povodí a říční sítě byly použitím box counting metody získány z programů FRACTALYSE a Fractal Analysis System. Program FRACTALYSE vyžaduje nastavení parametrů velikosti boxu, algoritmu a popř. nastavení počtu iterací (záleží na volbě algoritmu). Nastavení parametrů bylo provedeno následovně: velikost boxu byla nastavena na exponenciální s hodnotou exponentu 2. Maximální velikost boxu byla ponechána podle předvyplněné hodnoty programem, a to na velikost 2340. Nastavení nabízí 2 možnosti pro výběr algoritmu – Grid a Free Box. Pro výpočet byla nastavena první metoda - Grid.

Program Fractal Analysis System nevyžaduje nastavení parametrů před výpočtem fraktální dimenze, kromě volby barvy, kterou chceme v obraze analyzovat (*black, except black, gray scale*). Obrázky povodí byly vyexportovány černobíle, proto byla zvolena volba „black“. Velikost boxu pokrývacího objektu při výpočtu je opět exponenciální s hodnotou exponentu 2. Maximální velikost boxu je automaticky v tomto programu

nastavena pouze na velikost 512, větší velikost boxu nelze nastavit. Pravděpodobně z tohoto důvodu se výsledky z obou programů liší. Bylo otestováno stejné nastavení parametrů v obou programech (v programu FRACTALYSE byla nastavena hodnota maximální velikosti okna na 512, zvolen algoritmus Grid), oba softwary pak přinesly shodné výsledky.

Radius Mass metoda

Radius Mass metoda (jak uvádí Ševčík, 2014, nazývána jako *metoda plochy*, resp. *metoda hmotnosti*) je další metodou pro odhad fraktální dimenze. Tato metoda je založena na principu stanovení závislosti mezi počtem pixelů ve vymezené kruhové (resp. čtvercové) oblasti vzhledem k těžišti objektu. Je tedy zvolen bod (centrum) ve sledovaném území, kolem kterého se zkonstruuje kruh (resp. čtverec) s postupně rostoucím poloměrem (Morency et al., 2003). V každém kroku se pak počítá počet bodů (pixelů), které leží v tomto kruhu. Hodnota fraktální dimenze je pak určena ze směrnice závislosti logaritmu počtu pixelů na poloměru analyzované oblasti. Zmeškal et al. (2001) uvádí, že výsledek této metody by měl být téměř stejný s výsledky fraktální dimenze vypočítané *Box counting metodou*.

Tato metoda byla otestována v programu FRACTALYSE. Radius mass metoda, (jak uvádí dokumentace programu²⁸), je založena na principu, při kterém je nejprve zvolen počáteční bod, který slouží jako střed, ze kterého se kreslí buď kružnice, nebo čtverec (podle nastavení parametru v programu). Poloměr této kružnice (popř. délka strany čtverce) se zvětšují a počítá se počet pixelů objektu, které leží v oblasti vymezené právě kružnicí nebo čtvercem. Při výpočtu je tedy nutné nastavit 2 parametry. Prvním je volba tvaru oblasti, kterou bude daný objekt pokrýván. Jedná se o volbu mezi *Quadratic* (čtverec) a *Circular* (kruh). Dále se nastavuje střed. Může být nastaven střed pomocí souřadnic X a Y, volbou kurzorem nebo program automaticky najde *barycentrum* (těžiště) objektu. V tomto případě byla zvolena pouze varianta oblasti *Circular* a střed byl ve všech výpočtech nastaven na *barycentrum*.

Další metody

Softwarové extenze V-LATE a Patch Analyst, počítají fraktální dimenzi pouze pro vektorová data. Vzorec (7.12) pro výpočet fraktální dimenze vychází ze vzorce podle McGarigala a kol. (2002):

$$FD = \frac{2\log(p)}{\log(A)} \quad (7.12)$$

, kde p je obvod plošky a A je rozloha plošky.

Janoška (2011) upřesňuje, že při použití této metody mohou protáhlá území s velkým obvodem a malou plochou dosáhnout hodnot fraktální dimenze vyšších jak 2, což je ovšem z teoretického hlediska v případě fraktální geometrie u plošných objektů vyloučeno. V takových případech obě zmíněné extenze (v případě překročení hodnoty 2) automaticky sníží výslednou hodnotu fraktální dimenze na 2.

Nástroj Hawth's Analysis Tools pak počítá fraktální dimenzi linie trochu odlišným způsobem- viz vzorec (7.13):

²⁸ <http://www.fractalyse.org/en-doc.html>

$$FD = \frac{\log n}{(\log n + \log \frac{d}{L})} \quad (7.13),$$

kde n je počet úseček, které tvoří linii, d je vzdálenost mezi počátečním a koncovým bodem linie, a L je celková délka linie, také jinak kumulativní délka všech úseček, které tvoří linii.

Pro tento výpočet, jak uvádí dokumentace programu Hawth's Analysis Tools, musí být linie rozdělené do logických úseků. V této práci bylo tedy použito dělení na úseky vodních toků, které je použito v databázi DIBAVOD (to samé platí i pro *sinuosity*, viz následující kapitola 7.3.4).

7.3.4 Sinuosity (vlnitost)

Sinuosity je metrika, kterou lze vypočítat pro každou linii, přičemž charakterizuje míru jejího zvlnění. Metriku lze vypočítat v programu Hawth's Analysis Tools s. Hodnotu vlnitosti lze získat dle následujícího vzorce (7.14):

$$sinuosity = \frac{L_t}{L_{sf}} \quad (7.14),$$

kde L_t je celková délka vedení, tedy kumulativní délka všech úseček, a L_{sf} je vzdálenost mezi počátečním a koncovým bodem linie.

8 ZPRACOVÁNÍ DAT O ODTOKU

8.1 Vstupní data

Pro potřeby diplomové práce poskytlo Povodí Moravy s. p. data z hlásných profilů kategorií A, B a C na ucelených tocích povodí řeky Moravy a Dyje. Jedná se o data dlouhodobých průměrných ročních průtoků, v některých případech N-letých a m-denních průtoků, hodnotách průtoků a výšky vodních stavů, při kterých se vyhláší stupně povodňové aktivity. Všechna data byla poskytnuta v tabelární podobě. Data se vztahují ke konkrétním profilům nebo stanicím (pro některé stanice je uveden identifikátor používaný Českým hydrometeorologickým ústavem). Pomocí identifikátoru vodoměrných stanic, který je veden ve vrstvě vodoměrných stanic získané z prostorové databáze DIBAVOD a topografických map byly lokalizované vodoměrné stanice. Dle vizuálního posouzení nad topografickými mapami a prostorovými daty o povodích III. řádu, říční síti a vodoměrnými stanicemi byly vybrány stanice či profily, které se nacházejí nejbližně uzávěrovému profilu povodí a použity hodnoty dlouhodobého průměrného ročního průtoku (data jsou k dispozici na přiloženém DVD k diplomové práci). Data o průtocích byla také porovnána s informacemi v průvodních listech Plánu oblasti povodí Moravy a Plánu oblasti povodí Dyje, které uvádějí průtoky uzávěrových profilů útvarů povrchových vod, hodnoty jsou velmi podobné.

Pro povodí vodoměrných stanic byl výběr patřičné stanice či profilu jednoznačný, protože tato povodí jsou vymezena právě na základě polohy vodoměrných stanic.

8.2 Specifický odtok a objem odtoku

Na základě vztahu (6.12) a vzorce (6.13), uvedeného v kapitole 6 byl vypočítán specifický odtok a objem odtoku z hodnot dlouhodobých průměrných ročních průtoků. Jak uvádí Netopil et al. (1984), jedná se tedy o dlouhodobý průměrný specifický odtok (q_a) a průměrný roční objem odtoku (O_a). Tyto charakteristiky jsou podle literatury (Netopil et al., 1984) vhodné k vzájemnému porovnání povodí, umožňují porovnat podmínky pro odtok na jednotlivých povodích a vyjadřují vodnost řek v daném povodí.

Rozloha povodí vstupující do výpočtů byla vypočítána nad prostorovými daty z databáze DIBAVOD v prostředí ArcGIS for Desktop 10.x. Pro získání rozlohy byl využit nástroj *Calculate geometry*, který zapisuje výsledné hodnoty rozlohy do zvoleného sloupce atributové tabulky konkrétní vrstvy. Samotný výpočet dlouhodobého průměrného specifického odtoku a průměrného ročního objemu odtoku byl pak proveden v programu Microsoft Excel.

9 POROVNÁNÍ STRUKTURY KRAJINY POVODÍ

Krajina je dynamický systém, který se neustále mění. Vývoj krajiny je výsledkem specifických dlouhodobých geomorfologických pochodů, různých forem osidlování krajiny jednotlivými organismy a působením místních organismů (Karvánková, 2010). Jak uvádí Večerník (2008), stav krajinné struktury je možné kvantifikovat pomocí tzv. makrostruktur a mikrostruktur. Pojem makrostruktura krajiny se používá pro vyjádření hrubého plošného zastoupení základních forem využití krajiny, nebo krajinného pokryvu označovaného též jako land cover (Skaloš, 2011). Na rozdíl od tzv. mikrostruktury krajiny, makrostruktura krajiny nepodává informace o vzájemném působení (interakci) a prostorovém uspořádání jednotlivých krajinných složek. Večerník (2008) uvádí několik typů tzv. **koeficientů ekologické stability** (dále KES), které se používají ke kvantifikování makrostruktury krajiny. Tyto koeficienty vycházejí z relativního plošného zastoupení základních forem využití země. V této práci byl pro účely porovnání struktury krajiny jednotlivých povodí vypočítán koeficient ekologické stability (viz dále).

9.1 Koeficient ekologické stability (KES)

Růžička et al., (1983 in Lipský, 1994) zmiňuje, že řada prací považuje strukturu krajiny za základní kritérium pro hodnocení ekologické stability krajiny. Večerník (2008) uvádí několik verzí koeficientu ekologické stability, např. modifikace vzorce podle Miklós (1986), dále pak výpočet dle metodiky Agroprojektu (Löw et al., 1987 in Lipský, 2000). Všechny tyto metody jsou založeny na poměrném zastoupení jednotlivých krajinných segmentů.

Jak uvádí Lipský (1998), koeficienty hodnotí poměrné zastoupení ploch stabilních a relativně nestabilních. Jedná se o nejjednodušší vyjádření představy o stabilitě, resp. nestabilitě (labilitě) studovaného území. Večerník (2008) doplňuje, že koeficient ekologické stability se používá např. pro orientační srovnání různě vymezených území k témuž okamžiku, kterým může být povodí. Ke srovnávání vývoje území v čase ovšem koeficient ekologické stability není příliš vhodným nástrojem (Večerník, 2008). Důvod toho faktu zdůvodňuje Lipský (2000) tím, že koeficient ekologické stability nebere v úvahu historicky různou ekologickou kvalitu a strukturu (celkovou stabilitu) ploch v rámci stejné kategorie využití půdy.

Čím vyšší je hodnota tohoto koeficientu, tím větší je podíl trvalých vegetačních útvarů, které znamenají příznivé podmínky pro ekologickou stabilitu, a naopak je menší intenzita lidských zásahů v rámci daného území.

Koeficient ekologické stability lze vypočítat podle Míchala (1985) podle následujícího vzorce (9.1):

$$KES = \frac{S}{L} \quad (9.1),$$

kde S je výměra ploch relativně stabilních (lesní porosty, louky, pastviny, sady a zahrady, vinice, vodní plochy) a L je výměra ploch relativně nestabilních (orná půda, urbanizovaná a zastavěná plocha, chmelnice, ostatní kategorie).

Území je pak možné klasifikovat podle hodnot KES do kategorií dle následující tabulky 9.1.

Tabulka 9.1 Hodnoty koeficientu ekologické stability s obecnou klasifikací území podle Lipský (1998)

Kategorie	Hodnoty koeficientu	Klasifikace území
1	$KES < 0,10$	území s maximálním narušením přírodních struktur, základní ekologické funkce musí být intenzivně a trvale nahrazovány technickými zásahy
2	$0,11 < KES < 0,30$	území nadprůměrně využívané, se zřetelným narušením přírodních struktur, základní ekologické funkce musí být soustavně nahrazovány technickými zásahy
3	$0,31 < KES < 1,10$	území intenzivně využívané, zejména zemědělskou velkovýrobou, oslabení autoregulačních pochodů v agrosystémech způsobuje jejich značnou ekologickou labilitu a vyžaduje vysoké vklady dodatkové energie
4	$1,10 < KES < 3,00$	vcelku vyvážená krajina, v níž jsou technické objekty relativně v souladu s dochovanými přírodními strukturami, důsledkem je i nižší potřeba energomateriálových vkladů
5	$KES > 3$	přírodní a přírodě blízká krajina s výraznou převahou ekologicky stabilních struktur a nízkou intenzitou využívání krajiny člověkem

Český statistický úřad zveřejňuje KES např. pro jednotlivé obce v rámci Územně analytických podkladů. KES je počítán dle následující metodiky²⁹: poměr druhů pozemků (chmelnice + vinice + zahrady + ovocné sady + trvalé travní porosty + lesní půda + vodní plochy) / (orná půda + zastavěné plochy + ostatní). Oproti způsobu použitému podle Michal (1985), jsou chmelnice zařazeny mezi stabilní (ekologicky příznivé) plochy. V této práci byl použit stejný přístup, chmelnice tedy byly zařazeny do kategorie stabilních ploch. Vzhledem k tomu, že tato kategorie nemá v našem případě na celkovém podílu významný vliv, tak nelze předpokládat téměř žádný vliv na vypočtené hodnoty KES.

Jinou metodiku výpočtu KES pak přináší Miklós (1986). Na rozdíl od předchozích dvou metod, nejsou v tomto případě plochy rozděleny pouze na stabilní a labilní, ale jsou dále modifikovány i na základě tzv. koeficientu ekologické významnosti. Tento koeficient uvádí odlišné hodnoty pro různé typy ploch (viz tabulka 9.2).

Tab. 9.2 Hodnoty koeficientu ekologické významnosti pro typy kultur podle Lipský (1998)

Typ kultury	les	vodní plocha	louka	pastvina	pole	zahrada	ovocné sady	ostatní
Koef. ekol. významnosti	1,0	1,0	0,62	0,68	0,14	0,5	0,3	0,1

²⁹ http://vdb.czso.cz/vdbvo/mi/mi_ukazatel.jsp?kodukaz=6267

Koeficient ekologické stability je pak vypočítán na základě následujícího vztahu (9.2):

$$KES = \frac{\sum P_{mi} \cdot K_{pmi}}{P} \quad (9.2),$$

kde P_{mi} je výměra jednotlivých kultur, K_{pmi} koeficient ekologické významnosti kultur a P je výměra zájmového území.

Podle hodnoty koeficientu ekologické stability dle Miklóse (1986) můžeme klasifikovat území do kategorií, které jsou uvedeny v tabulce 9.3.

Tab. 9.3 Klasifikace území podle hodnoty koeficientu ekologické stability dle Miklóse (1986) podle Večerník (2008)

Hodnota K_{ES}	Kategorie
$K_{ES} \leq 0,33$	Území nestabilní
$0,33 < K_{ES} \leq 0,5$	Území málo stabilní
$0,5 < K_{ES} \leq 0,66$	Území středně stabilní
$K_{ES} \geq 0,66$	Území nejstabilnější

V kapitole 6 byly zmíněny některé faktory ovlivňující odtok z povodí. Stejně tak i využití území má značný vliv na odtok z povodí. Tento vliv je modelován právě pomocí KES, který je založen na relativním plošném zastoupení stabilních a nestabilních kategoriích využití země, a odráží tedy skutečnost, jak je dané území využíváno.

Z dat Corine Land Cover 2006 byl pro orientační posouzení využití země v jednotlivých subpovodích vypočten koeficient ekologické stability. Vzhledem k použití dat Corine Land Cover 2006, kde nejsou chmelnice zvlášť vyčleněné jako samostatná kategorie a jsou zahrnuty mezi trvalé zemědělské kultury, byl pro výpočet KES použit postup podle ČSÚ a dále vzorec podle Miklóse (1986). Subpovodí pak byla zařazena do příslušných kategorií dle tabulky 9.1 a tabulky 9.2.

Z výsledků koeficientu ekologické stability podle Michala (1985) většina subpovodí III. řádu spadá do 3. kategorie, kde se hodnoty KES pohybují v intervalu 0,31 – 1, zastoupeny pak jsou ještě kategorie 4 a 5. Z vybraných povodí vodoměrných stanic spadá 12 povodí do kategorie 5, sedm povodí do kategorie 4 a zbylých osm povodí do kategorie 3. První 2 kategorie nejsou v obou případech vůbec zastoupeny.

Výsledky koeficientu ekologické stability podle Miklóse (1986) přináší odlišné výsledky, avšak rozdíly mezi zařazením povodí do jednotlivých kategorií nejsou až tak markantní. Vzhledem k metodice výpočtu, při které je jednotlivým kulturám přiřazena váha ekologické významnosti, lze předpokládat, že spolehlivěji vypovídá o ekologické stabilitě povodí. Z tohoto důvodu je dále používán v této práci právě KES podle Miklóse (1986). Zastoupeny jsou všechny kategorie stability území. V rámci povodí III. řádu, patří nejvíce povodí do kategorie málo stabilních (viz Příloha 6). Většina povodí vodoměrných stanic patří do kategorie nestabilních území (11 povodí), čtyři povodí jsou málo stabilní, pět povodí je středně stabilních a sedm jich lze zařadit do kategorie nejstabilnějších území (viz Příloha 7).

10 STANOVENÍ ZÁVISLOSTI MEZI METRIKAMI A ODTOKEM

Cílem této práce je stanovení vlivu geometrických vlastností povodí a říční sítě na odtok z povodí. Geometrické vlastnosti povodí a říční sítě byly zhodnoceny použitím různých tvarových metrik. Hodnocení závislosti mezi zmíněnými proměnnými – hodnotami tvarových indexů a daty o odtoku pak bylo provedeno využitím korelační analýzy.

10.1 Korelace

Vzájemný vztah mezi dvěma procesy nebo veličinami se nazývá korelace. V případě, kdy spolu veličiny či procesy korelují, je velmi pravděpodobné, že na sobě závisí, nicméně nelze usoudit, že by jeden z nich byl příčinou a druhý následkem (Walker, 2013). Tuto skutečnost není možné za pomoci korelace rozhodnout, k tomu je třeba závislost logicky zdůvodnit.

Korelace vyjadřuje pouze sílu závislosti (neboli těsnosti) dvou a více numerických proměnných. Tato závislost se hodnotí výpočtem korelačního koeficientu, který nabývá hodnot v intervalu $<-1;1>$ (Walker, 2013). V případě, že korelační koeficient $K > 0$, jedná se o pozitivní korelační závislost, pokud $K < 0$, jedná se o negativní korelační závislost. Z pohledu vztahu dvou veličin jsou extrémními hodnotami $K = 0$, který vyjadřuje nekorelovatelnost mezi veličinami, oproti tomu $|K| = 1$ naopak naznačuje, že mezi veličinami je matematická/funkční závislost. Podle hodnot korelačního koeficientu lze závislost hodnotit a interpretovat následovně (dle Biskupa, 2009):

$|K| = 0$ korelační nezávislost

$|K| < 0,3$ nízký stupeň korelační závislosti

$0,3 \leq |K| < 0,5$ mírný stupeň korelační závislosti

$0,5 \leq |K| < 0,7$ střední stupeň korelační závislosti

$0,7 \leq |K| < 0,9$ vysoký stupeň korelační závislosti

$0,9 \leq |K| < 1$ velmi vysoký stupeň korelační závislosti

$|K| = 1$ matematická/funkční závislost

Výpočty korelačních koeficientů byly provedeny v programu IBM SPSS Statistics. Byla aplikována tzv. **Pearsonova korelace**, přičemž její aplikace předpokládá, že obě proměnné jsou náhodné veličiny a mají společné dvourozměrné normální rozdělení. Při dodržení těchto podmínek platí, že nabývá-li korelační koeficient hodnoty 0, veličiny jsou nezávislé. Pokud není splněn předpoklad dvourozměrné normality, z nulové hodnoty korelačního koeficientu nelze usuzovat na nic víc, než že mezi oběma veličinami nelze prokázat žádný vztah.

Další metodou pro stanovení závislosti mezi veličinami je využití **Spearmanova koeficientu** pořadové korelace. Jedná se o neparametrickou metodu, která využívá při výpočtu pořadí hodnot sledovaných veličin (Walker, 2013). Tato metoda nevyžaduje normalitu dat, lze ji tedy použít pro popis jakékoliv závislosti (lineární i nelineární). V této práci byly pro hodnocení závislosti použity obě zmíněné metody.

Do korelační analýzy vstupovali v této práci dvě skupiny proměnných. První skupinou byly hodnoty tvarových metrik (bezrozměrné metriky) a druhou data týkající se odtoku daných povodí. Data o odtoku byla zastoupena dlouhodobým průměrným specifickým odtokem, který byl vypočítán ze získaných hydrologických dat a hodnotou celkového průměrného ročního objemu odtoku (hodnoty dlouhodobého specifického průměrného odtoku a průměrného ročního objemu odtoku byly získány na základě vztahu dle Netopil et al., 1984 a Kemel, 1991; viz kapitola 6). Výsledky korelačních koeficientů jsou zhodnoceny v kapitole 11, kompletní výsledky jsou pak v Příloze 8.

11 VÝSLEDKY

11.1 Výsledky tvarových metrik

Kompletní výsledky všech tvarových metrik se nacházejí na přiloženém DVD (Příloha 8), výsledky metrik jsou také v Příloze 2,4 a 5. Hodnoty některých tvarových metrik charakterizují tvar povodí z různých hledisek, např. jak moc je protáhlé nebo podobné pravidelnému kruhu. Pro představu o tvaru povodí jsou v Příloze 1 náhledy jednotlivých tvarů povodí.

11.1.1 Povodí III. řádu

Následující část hodnotí výsledky tvarových metrik pro povodí III. řádu. Podle principů výpočtu tvarových metrik je rozdělena na 5 částí:

- A. Jednoduché tvarové metriky
- B. Shape Metrics Tool indexy
- C. Fraktální dimenze tvaru povodí
- D. Fraktální dimenze tvaru říční sítě
- E. Fraktální dimenze a sinuosity úseků říční sítě

A. Jednoduché tvarové metriky

Mezi nejjednodušší indexy patří **Patch Area** a **Patch Perimeter**. Charakterizují rozlohu povodí a její obvod. Obecně by mělo platit, že objekty s větší rozlohou budou mít delší obvodovou linii, avšak některá povodí srovnatelné velikosti mají mnohem delší obvodovou linii (viz tabulka 11.1). Porovnáme-li například PMO10 a PMO5, která mají srovnatelnou rozlohu, PMO10 má téměř o čtvrtinu delší obvodovou linii. Z obrázku 10.1 je zřejmé, že rozdíl v délce obvodové linie je způsoben přítomností výraznějšího výběžku ve spodní části povodí PMO10 (náhledy tvaru povodí jsou v Příloze 1)



Obr. 11.1 Vlevo povodí s delší obvodovou linií (PMO10), vpravo povodí s kratší obvodovou linií (PMO5).

Poměr mezi výše zmíněnými metrikami pak vyjadřuje **Perimeter-Area Ratio**. Metrika nabývá vyšších hodnot, má-li objekt relativně členitý tvar, což dokazují výsledky z tabulky 11.1. Nejvyšší hodnoty této metriky mají povodí s označením PDY6 a PMO9. Obrázek 11.2 ilustruje jejich členité tvary. Vysoká hodnota metriky pro PDY6 je zapříčiněna přítomností úzkého výběžku, PMO9 má pak relativně složitý tvar.



Obr. 11.2 Vlevo povodí PDY6 (hodnota Perimeter-Area Ratio 3,3), vpravo povodí PMO9 (hodnota Perimeter-Area Ratio 3,2)

Tab. 11.1 Hodnoty metrik Patch Area, Patch Perimeter, Perimeter-Area Ratio a Shape indexu pro povodí III. řádu

Označení povodí	Patch Area	Patch Perimeter	Perimeter-area ratio	Shape index
PDY1	1149425638,79	255416,88	2,2	2,125
PDY2	1239242210,98	283424,34	2,3	2,271
PDY3	1206136735,26	284925,58	2,4	2,314
PDY4	869250036,54	215957,90	2,5	2,066
PDY5	584312341,51	179063,04	3,1	2,090
PDY6	337986827,37	111666,71	3,3	1,713
PDY7	1718869188,53	270841,69	1,6	1,843
PDY20	1006103151,62	260387,65	2,6	2,316
PDY21	1729243541,82	268704,99	1,6	1,823
PMO5	818665394,07	153752,15	1,9	1,516
PMO6	1322118930,04	243168,86	1,8	1,887
PMO7	1435526016,31	258483,10	1,8	1,925
PMO8	988385146,01	165279,93	1,7	1,483
PMO9	631585011,72	201218,70	3,2	2,259
PMO10	809652180,76	191953,53	2,4	1,903
PMO11	1425920405,56	265012,01	1,9	1,980
PMO12	1316681050,37	201692,89	1,5	1,568

Hodnota **Shape indexu** byla vypočítaná pro vektorovou vrstvu povodí v extenzích V-LATE, Patch Analyst a v toolboxu StraKA, kde je index nazván jako *index tvaru plošky*. Všechny programy přinesly shodné výsledky. Výsledky se pohybují v rozmezí 1,483 až 2,316 (viz tabulka č. 11.1). Jak již bylo zmíněno v kapitole 7, Shape index udává míru kruhovitosti povodí. Žádné ze subpovodí III. řádu nemá ideálně kruhovitý tvar (hodnota koeficientu není v žádném případě rovna 1). Nejvíce se kruhovému tvaru blíží povodí s označením PMO8. Pro představu tvaru povodí, jsou povodí s nejnižší a nejvyšší hodnotou zobrazeny na obrázku 11.3.



Obr. 11.3 Povodí III. řádu s nejnižší hodnotou Shape indexu vlevo (PMO 8) a nejvyšší vpravo (PDY 20)

Při bližším srovnání vzorců pro výpočet Shape indexu (7.2) a Gravellova koeficientu, který je v hydrologii již používán, je zřejmé, že se jedná o identické koeficienty. Gravellova koeficient lze vypočítat dle vzorce (6.1):

$$K_G = \frac{L_R}{2\sqrt{P\pi}} \quad (6.1),$$

kde L_R je délka rozvodnice (tudíž obvod povodí) a P je plocha povodí.

B. Shape Metrics Tool indexy

Shape Metrics Tool přináší výsledky 11 metrik (kompletní výsledky jsou v Příloze 2, zde jsou představeny pouze vybrané metriky). Nástroj nerozlišuje úrovně analýzy na *patch*, *class* a *landscape*, hodnotí vždy jednotlivé polygony. Díky normalizaci metrik je možné srovnávat povodí mezi sebou bez vlivu rozlohy povodí. Rozloha povodí hraje rovněž klíčovou roli při odtoku z povodí, proto byly v práci při stanovení závislosti mezi charakteristikami o odtoku a tvarovými metrikami použity i absolutní hodnoty indexů. Absolutní hodnoty indexů sami o sobě nemají moc vysokou vypovídající hodnotu, neporovnáváme-li povodí mezi sebou. Oproti tomu hodnota normalizovaných indexů obecně poukazuje na to, jak moc se tvar plochy podobá kruhu. Platí čím vyšší hodnota metriky, tím je tvar více podobný tvaru kruhu.

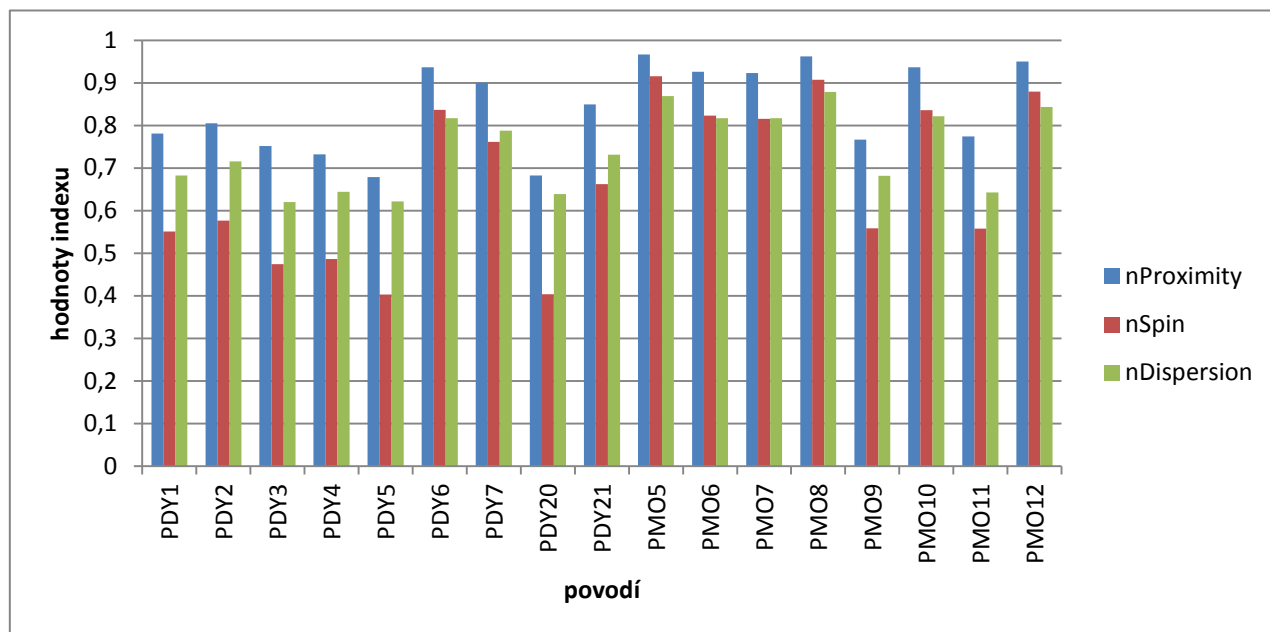
Každá metrika je založena na jiném principu výpočtu (jak je popsáno v kapitole 7). Některé metriky mohou poukázat na přítomnost tvarových výběžků (**Spin index**, **Proximity index**), zhodnotit velikost souvislé plochy (**Girth index**). Na rovnoměrný růst plochy do všech směrů poukazuje **Dispersion index**. Délku obvodu charakterizuje **Perimeter index**, který může signalizovat kompaktnost plochy (náhledy tvaru povodí jsou v Příloze 1).

Povodí III. řádu dosahují hodnot Proximity indexu vyšších jak 0,60, z náhledů obrázků v Příloze 1 je však zřejmé, že na výrazně kruhovitá povodí poukazuje až hodnota vyšší než 0,9. Hodnoty normalizovaného Spin indexu kolem 0,4 zřetelně vystihují povodí, která mají podlouhlý tvar v jednom směru a na koncích jsou lehce zúžená. Výrazně protáhlý tvar s několika výběžky mají povodí PDY5 a PDY20, čemuž právě nasvědčují nízké hodnoty normalizovaného **Proximity indexu** (hodnota se pohybuje kolem 0,68) a **Spin indexu** (hodnota se pohybuje kolem 0,40). Navíc ještě větší rozdíly mezi hodnotami normalizovaného Proximity indexu a Spin indexu (viz graf 11.1) poukazují na to, že ač některá povodí jsou protáhlá, některá navíc ještě mají podlouhlé tvarové výběžky, protože Spin index dává vzdálenějším bodům vyšší váhu (viz

kapitola 7). Velké rozdíly mezi těmito hodnotami lze pozorovat například u povodí PDY5 a PDY20.

Dispersion index dosahuje u všech povodí hodnoty vyšší jak 0,6, avšak povodí s hodnotou 0,6 mohou být velmi podlouhlá, ve směru protažení jsou někdy i několikrát delší než je jejich šířka. Rovnoměrný růst plochy do všech stran je nejvyrovnanější u povodí PMO5, **Dispersion index** dosahuje hodnoty 0,87 a dále u povodí PMO 8 (hodnota 0,88). Nejméně souvislé plochy obsahují povodí PMO11 a PMO9. Jedná se totiž o povodí velmi složitého nepravidelného tvaru.

Graf 11.1 Hodnoty normalizovaných indexů Proximity, Spin a Dispersion

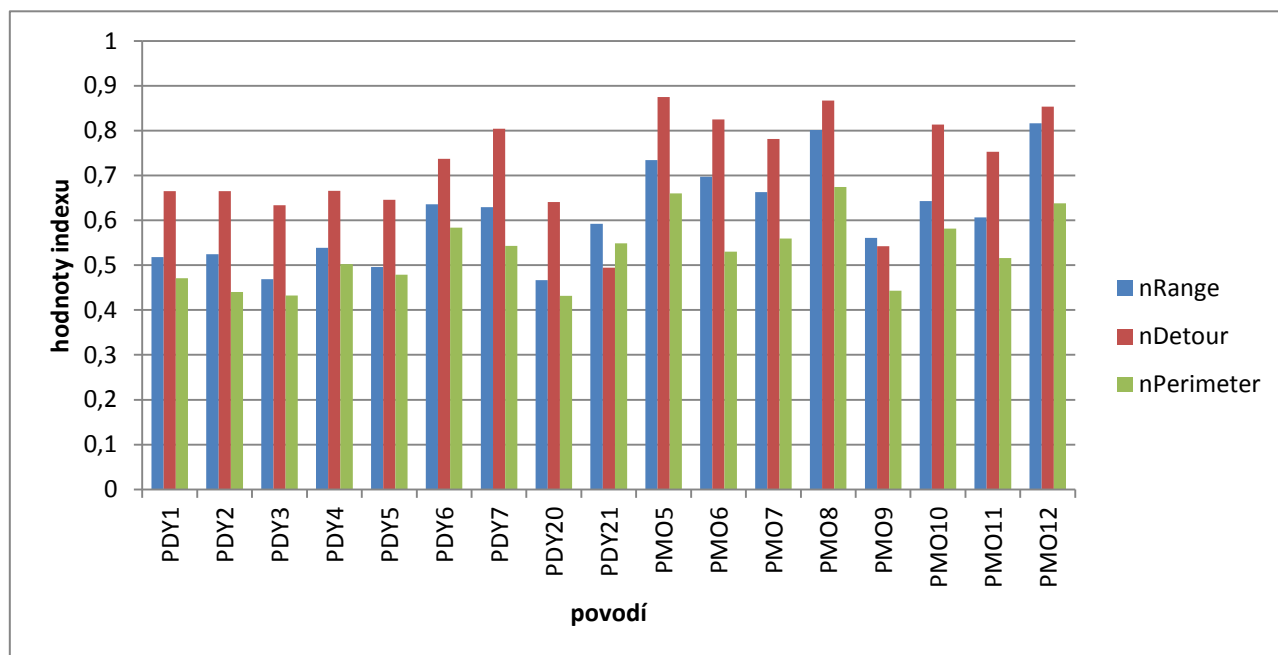


poznámka: nProximity= normalizovaný Proximity index, nSpin= normalizovaný Spin index, nDispersion= normalizovaný Dispersion index

Hodnoty normalizovaného **Range indexu** se pohybují od 0,47 do 0,82. Teprve až hodnoty vyšší než 0,8 spolehlivě poukazují na povodí, která mají velmi kompaktní tvar podobný kruhu. Range index totiž počítá vzdálenost mezi dvěma nejvzdálenějšími body povodí. Je-li hodnota indexu vyšší, vzdálenost mezi body je menší. Vysoké hodnoty normalizovaného Range indexu mají PMO8 a PMO12 - viz graf 11.2).

Perimeter index nepřesahuje u žádného povodí hodnotu 0,7. Hodnoty nižší jak 0,5 poukazují na povodí velmi složitých nepravidelných tvarů (viz Příloha 1). Dosahuje-li **Detour index** hodnot vyšších než 0,8, neznámá to zcela podobnost tvaru kruhu, spíše to poukazuje na méně složitý tvar povodí. Až hodnota 0,85 spolehlivě ukazuje na povodí, která mají tvar nejvíce podobný kruhu. Některá povodí mají sice větší obvod (naznačují to nízké hodnoty normalizovaného **Perimeter indexu**), ale nemají extrémně velké tvarové výběžky, pouze jejich hraniční linie je „vlnitá“ a velmi členitá, čemuž naznačují totiž vysoké hodnoty normalizovaného **Detour indexu** (příkladem takového povodí je povodí PDY7).

Graf 11.2 Hodnoty normalizovaných indexů Range, Detour a Perimeter



poznámka: nRange= normalizovaný Range index, nDetour= normalizovaný Detour index, nPerimeter= normalizovaný Perimeter index

C. Fraktální dimenze tvaru povodí

Z tabulky 11.4 můžeme zjistit, že hodnoty fraktální dimenze získané box counting metodou se pohybují v rozsahu 1,529 do 1,8114 (hodnotíme-li hodnoty získané ze všech otestovaných programů). Povodí lze tedy považovat za fraktály, protože jejich fraktální dimenze nabývá neceločíslné hodnoty. Geometricky hladký plošný útvar³⁰ (např. čtverec nebo kruh) má hodnotu fraktální dimenze 2 (Hotař, 2006). Ze získaných hodnot můžeme tedy usuzovat, že tvar všech povodí není zcela pravidelný (jako právě čtverec), je členitý, relativně tvarově složitý. Teoreticky pro plošné objekty platí, čím více se hodnota fraktální dimenze objektu blíží hodnotě 2, tím více se blíží geometricky hladkému plošnému útvaru (Hotař, 2007).

Výsledky odhadu fraktální dimenze získané z programu Fractal Analysis System nabývají vyšších hodnot než výsledky z programu FRACTALYSE, extrémní hodnoty z obou programů nejsou stejné pro stejná povodí, jak je z výsledků patrné (viz tabulka 10.4). Je tedy zřejmé, že nastavení parametrů výpočtu hraje velmi důležitou roli při odhadu fraktální dimenze a nelze vyhodnotit, které povodí má nejvyšší fraktální dimenzi.

Při porovnání výsledků box counting metodou a radius mass metodou (výsledky jsou uvedeny v tabulce 11.4), nelze souhlasit s tvrzením Zmeškala a kol. (2001), že tyto metody poskytují téměř stejné výsledky (i v případě, porovnáme-li hodnoty ze stejného programu). Z tabulky 10.4 je zjevné, že mezi hodnotami fraktální dimenze jsou velké rozdíly.

Výsledky fraktální dimenze získané z extenze V-LATE a Patch Analyst, mají shodné hodnoty, pro jejich výpočet je tedy patrně použitý stejný vzorec. Tyto výsledky fraktální

³⁰ Geometricky hladké útvary mají konečný počet parametrů, kterými lze popsat jejich tvar. Existují totiž pro ně vzorce, díky kterým je možné vypočítat různé charakteristiky (objem, délka, plocha, apod.) Danému útvaru je možné také přiřadit konkrétní celé číslo, které se nazývá počet rozměrů neboli dimenze (Tišnovský, 1999).

dimenze dosahují mnohem nižších hodnot, což dle principů fraktální geometrie znamená, že povodí představují objekt, který je něco mezi hladkou křivkou a plochou, ale více se podobá hladké křivce (Hotař, 2006). Důvodem nižších hodnot v porovnání s ostatními výsledky samozřejmě může být způsob výpočtu. Janoška (2011) nazývá způsob výpočtu fraktální dimenze, který je použitý ve výše zmíněných programech spíše jako „složitost“ objektu než fraktální dimenzi (viz více kapitola 7). Dalším důvodem samozřejmě může být i skutečnost, že tento program pracuje s vektorovými daty.

Při srovnávání hodnot fraktální dimenze není možné provádět absolutní srovnání hodnot získaných odlišnými metodami. Je tedy nutné brát v potaz povahu získaných hodnot, jaké je nastavení parametrů metody výpočtu fraktální dimenze a volba metody pro odhad fraktální dimenze.

Tab. 11.2 Hodnoty fraktální dimenze pro povodí III. řádu

software	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE	V-LATE
metoda	box counting	box counting	radius mass	ostatní
PDY1	1,659	1,787	1,461	1,194
PDY2	1,648	1,772	1,503	1,199
PDY3	1,649	1,750	1,569	1,201
PDY4	1,597	1,707	1,413	1,193
PDY5	1,554	1,695	1,272	1,198
PDY6	1,529	1,718	1,350	1,184
PDY7	1,690	1,801	1,618	1,177
PDY20	1,631	1,750	1,410	1,203
PDY21	1,693	1,805	1,595	1,175
PMO5	1,634	1,811	1,367	1,164
PMO6	1,660	1,790	1,550	1,181
PMO7	1,666	1,785	1,559	1,182
PMO8	1,627	1,784	1,408	1,160
PMO9	1,575	1,723	1,531	1,205
PMO10	1,616	1,768	1,355	1,186
PMO11	1,669	1,793	1,576	1,185
PMO12	1,662	1,799	1,538	1,163

D. Fraktální dimenze tvaru říční sítě

Říční síť je tvořena řekami, které jsou reprezentovány v databázi DIBAVOD liniemi. Fraktální dimenze úsečky nebo přímky je 1. V případě, že linie má složitější tvar fraktální podoby, její fraktální dimenze může přesáhnout hodnotu 1 (Tišnovský, 1999). Hodnoty fraktální dimenze říční sítě nabývají vyšších hodnot než 1, avšak nižších hodnot než hodnoty tvaru povodí. Opět lze tvrdit, že se tedy jedná o fraktály, protože dimenze říční sítě je neceločíselná (viz tabulka 11.3), nicméně oproti tvaru povodí, které

je plošného charakteru zabírají v prostoru méně místa, což lze očekávat, protože se jedná o síť tvořenou liniemi.

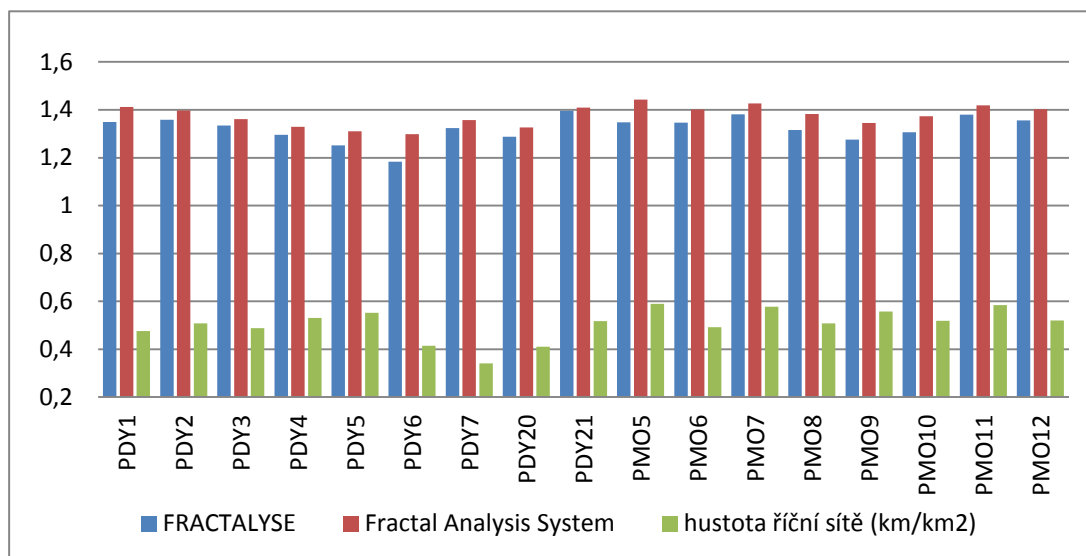
Fraktální dimenze také vlastně hodnotí, jakou mírou objekt zaplňuje prostor. Jsou – li hodnoty fraktální dimenze objektu vyšší než jemu odpovídající geometricky hladký objekt, útvar zaplňuje více prostoru, je mnohem členitější (např. PDY1, PMO7, PMO11). Lze tedy hledat spojitost mezi fraktální dimenzí říční sítě a hustotou říční sítě. Právě vyšší hodnoty fraktální dimenze říční sítě totiž poukazují na skutečnost, že tato síť je složitější, komplikovanější a zabírá více prostoru, proto lze předpokládat, že bude dosahovat v rámci povodí i vyšší hustoty. Příkladem jsou povodí PDY21 a PMO11, pro která fraktální dimenze dosahuje téměř hodnoty 1,4, jejich hustota říční sítě také patří k vyšším v rámci povodí III. řádu (viz graf 11.3). Schuller a kol. (2001) uvádí, že povodí, kde je vyšší hustota říční sítě, mají také vyšší fraktální dimenzi říční sítě. Výsledné hodnoty fraktální dimenze říční sítě byly tedy také porovnány s hustotou říční sítě. Tabulka 11.3 prezentuje hodnoty fraktální dimenze hrubých úseků náležících do uvedených povodí a jejich hustotu.

Tab. 11.3 Hodnoty fraktální dimenze říční sítě a hustota říční sítě pro povodí III. řádu

software	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE	hustota říční sítě (km/km²)
metoda	box counting	box counting	radius mass	
PDY1	1,349	1,412	1,348	0,477
PDY2	1,358	1,397	1,436	0,508
PDY3	1,334	1,361	1,447	0,488
PDY4	1,296	1,329	1,779	0,530
PDY5	1,252	1,311	1,644	0,552
PDY6	1,184	1,298	0,991	0,414
PDY7	1,324	1,357	1,698	0,341
PDY20	1,288	1,327	1,660	0,410
PDY21	1,396	1,409	1,906	0,518
PMO5	1,348	1,443	1,429	0,590
PMO6	1,347	1,401	1,489	0,491
PMO7	1,381	1,427	1,525	0,577
PMO8	1,316	1,383	1,378	0,508
PMO9	1,276	1,345	1,704	0,557
PMO10	1,307	1,373	1,363	0,518
PMO11	1,380	1,419	1,470	0,584
PMO12	1,356	1,403	1,494	0,520

poznámka: říční síť je v tomto případě prezentována modelem hrubých úseků vodních toků

Graf 11.3 Hodnoty fraktální dimenze říční sítě a hustoty říční sítě



poznámka: FRACTALYSE= hodnoty z programu FRACTALYSE (metoda výpočtu box counting), Fractal Analysis System= hodnoty fraktální dimenze z programu Fractal Analysis System (metoda výpočtu box counting), říční síť je v tomto případě prezentována modelem hrubých úseků vodních toků

Použijeme- li k posouzení závislosti mezi fraktální dimenzí (hodnoty získané z programu FRACTALYSE a Fractal Analysis System box counting metodou) a hustotou říční sítě daného povodí korelační analýzu, výsledky korelačních koeficientů poukazují na jistý stupeň závislosti mezi fraktální dimenzí a hustotou říční sítě (viz tabulka 11.4).

Tab. 11.4 Hodnoty korelačních koeficientů mezi fraktální dimenzí říční sítě a její hustotou.

Fraktální dimenze (box counting metoda)		
software	FRACTALYSE	Fractal Analysis System
hustota HU	0,358	0,472*
hustota JU	0,754*	0,756*

poznámka: hustota JU= hustota říční sítě jemných úseků, hustota HU= hustota říční sítě hrubých úseků

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

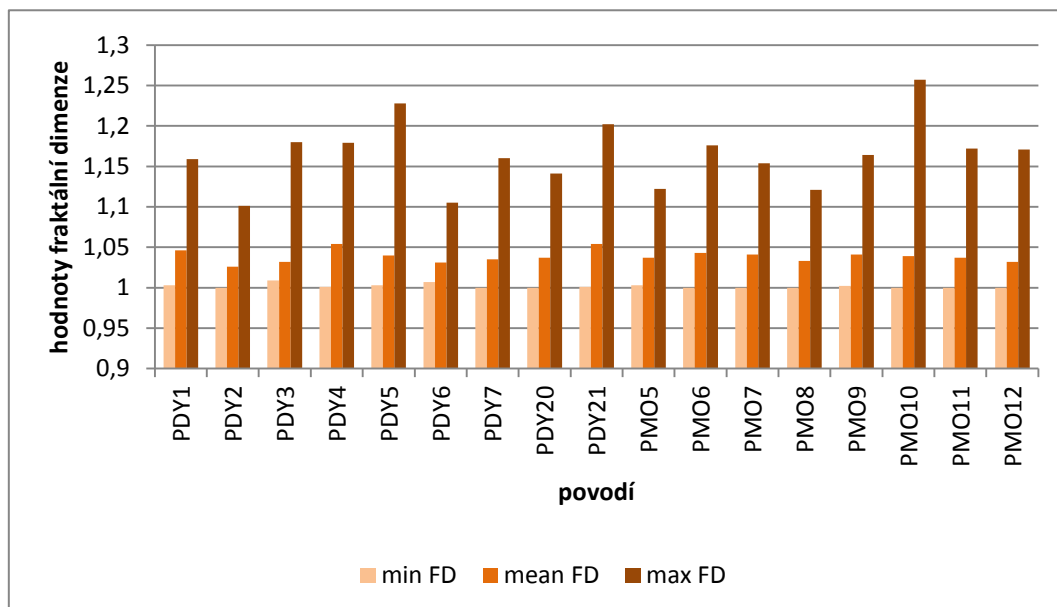
Z výsledků korelačních koeficientů je tedy patrné, že mírný stupeň korelační závislosti (klasifikace dle Biskup, 2009) mezi těmito veličinami v případě porovnání hrubých úseků říční sítě existuje. Porovnáme-li výsledky pro hustotu říční sítě jemných úseků, hodnoty korelačních koeficientů přesahují dokonce hodnotu 0,7, což znamená vysoký stupeň korelační závislosti. Hodnoty hustoty říční sítě (jak hrubých, tak jemných úseků) jsou k nahlédnutí v Příloze 3, hodnoty fraktální dimenze v Příloze 5.

E. Fraktální dimenze a sinuosity úseků říční sítě

Pomocí nástroje Hawth's Analysis Tools byla vypočítaná fraktální dimenze a sinuosity úseků říční sítě (konkrétně hrubého modelu říční sítě). Zhihui et al. (2013) a Shen et al. (2011) rozdělují ve svých studiích řeku na úseky a porovnávají výsledné hodnoty fraktální dimenze jednotlivých segmentů řeky. Shen et al. (2011) poukazují na fakt, že fraktální dimenze není po celé délce toku stejná, v určitých částech se totiž liší. Box counting metoda podle nich není schopná toto chování řeky zachytit, protože se jedná o dimenzi, která charakterizuje celý objekt, tedy celou říční síť, popř. jednotlivý vodní tok. Proto byla v této práci vypočítaná fraktální dimenze a sinuosity jednotlivých

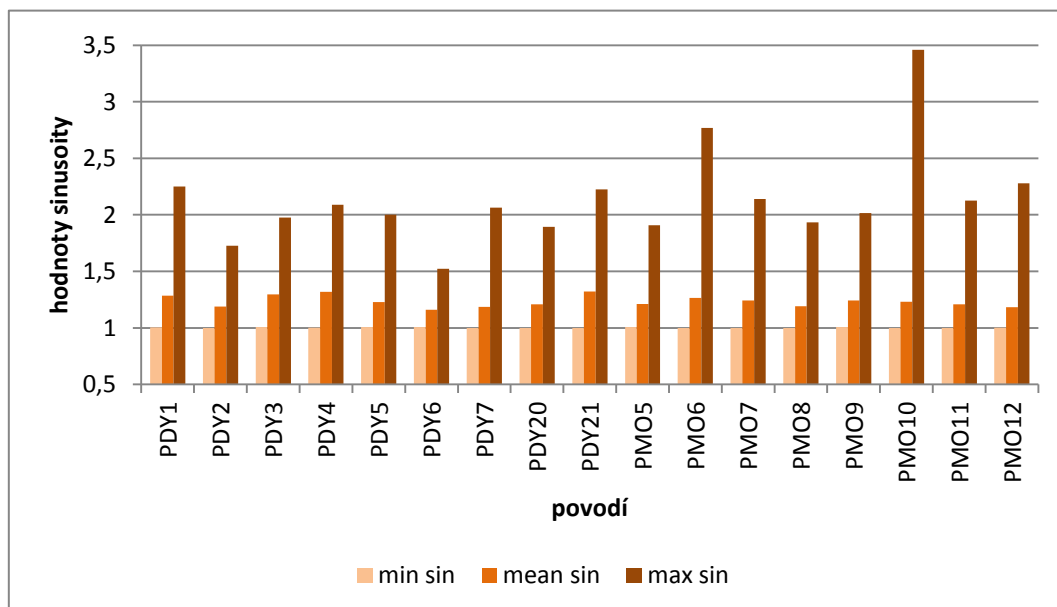
úseků vodních toků. Následující grafy 11.4 a 11.5 prezentují maximální, minimální a průměrnou hodnotu fraktální dimenze a vlnitosti (sinuosity), pro úseky vodních toků ve vybraných povodí III. řádu.

Graf. 11.4 Hodnoty minimální, průměrné a maximální fraktální dimenze



poznámka: min FD= minimální hodnoty fraktální dimenze, mean FD= průměrné hodnoty fraktální dimenze, max FD= maximální hodnoty fraktální dimenze

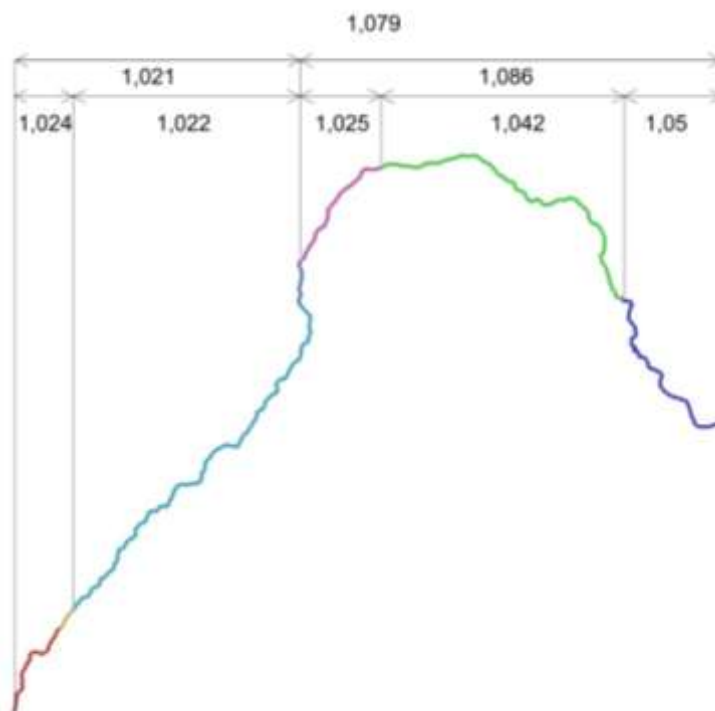
Graf. 11.5 Hodnoty minimální, průměrné a maximální sinuosity



poznámka: min sin= minimální hodnoty sinuosity, mean sin= průměrné hodnoty sinuosity, max sin= maximální hodnoty sinuosity

Při vzájemném porovnání hodnot fraktální dimenze a vlnitosti je z grafu 11.4 a 11.5 patrné, že v povodích, kde je vyšší průměrná fraktální dimenze, vlnitost dosahuje taktéž vyšších hodnot. Hodnocení výsledků fraktální dimenze a sinuosity jednotlivých říčních úseků je vzhledem k rozsahu výsledných hodnot relativně složité. Samozřejmě také má vliv na hodnotu fraktální dimenze a sinuosity způsob rozdělení na jednotlivé úseky.

Shen a kol. (2011) demonstrují rozdíly v hodnotách fraktální dimenze úseků Žluté řeky, řeku postupně rozdělují na 6, 4 a 1 segmentů. Pro srovnání těchto rozdílů byla vybrána část toku (konkrétně část vodního toku Desná) v povodí Moravy, na které byly jednotlivé úseky postupně sloučeny do 5, 2 a 1 segmentu. Rozdíly fraktální dimenze jsou znatelné, hodnoty znázorňuje obrázek 11.4. Spočítáme-li průměrnou hodnotu pro 5 segmentů, její výsledek je 1,033, pro 2 segmenty pak 1,054. Průměrné hodnoty se tedy velmi liší od hodnoty fraktální dimenze pro celý úsek.

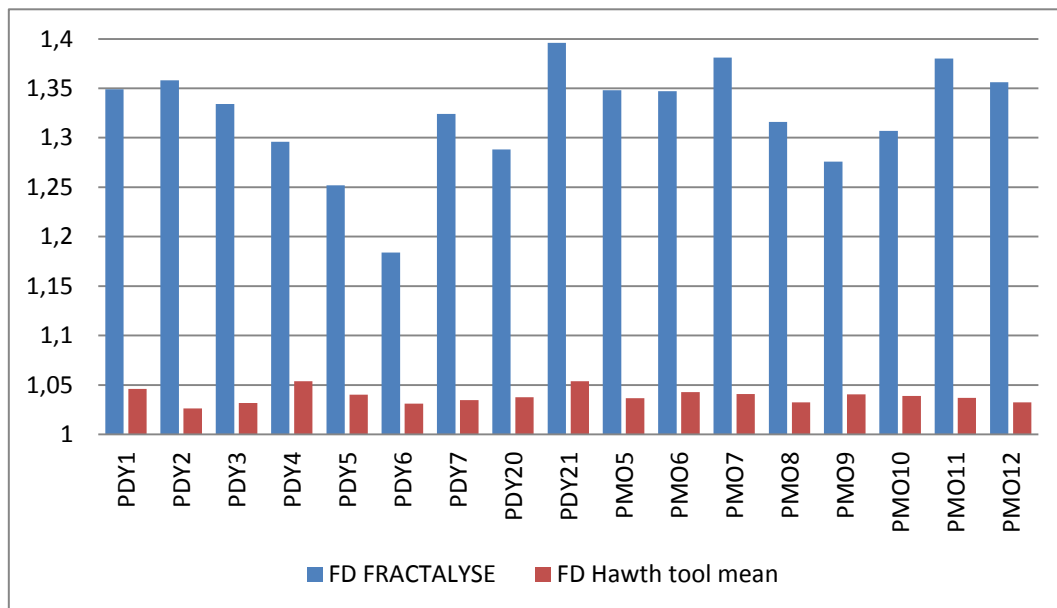


Obr. č. 11.4: Rozdíly fraktální dimenze úseků říčního toku v závislosti na rozdělení úseků

Z výsledků získaných nástrojem Hawth's Analysis Tools byly pro hodnocení závislosti tvarových metrik a odtoku použity průměrné hodnoty metrik úseků říční sítě pro jednotlivá povodí. Hodnoty pro jednotlivé úseky říční sítě jsou v Příloze 4.

Graf 11.6 srovnává průměrné hodnoty fraktální dimenze říční úseků pro jednotlivá povodí s hodnotami fraktální dimenze říční sítě získané z programu FRACTALYSE box counting metodou. Porovnáme-li povodí mezi sebou, z výsledků je patrné, že ne ve všech povodích, kde jsou vyšší hodnoty fraktální dimenze říční sítě, jsou průměrné hodnoty fraktální dimenze úseků říční sítě vyšší.

Graf. 11.6 Hodnoty fraktální dimenze říční sítě a průměrné fraktální dimenze úseků vodních toků



poznámka: FD FRACTALYSE= hodnoty fraktální dimenze říční sítě pro model hrubých úseků z programu FRACTALYSE použitím box counting metody, FD Hawth tool mean = průměrné hodnoty fraktální dimenze úseků říční sítě pro model hrubého dělení úseků.

Hodnoty fraktální dimenze úseků říční sítě poukazují na složitost této sítě v jednotlivých částech, lze tedy lépe zachytit chování úseků řeky. Nelze však hodnotit říční síť jako celek, protože průměrná fraktální dimenze úseků neodráží fraktální dimenzi celého objektu, resp. říční sítě. Rozhodujícím faktorem výsledných hodnot je také samozřejmě samotné rozdělení říční sítě na úseky vodních toků.

11.1.2 Povodí vodoměrných stanic

Následující část hodnotí výsledky tvarových metrik pro povodí vodoměrných stanic. Stejně jako předchozí kapitola 11.1.1 je podle principů výpočtu tvarových metrik rozdělena na pět částí. V Příloze 1 jsou náhledy tvarů povodí.

A. Jednoduché tvarové metriky

Velikost povodí vymezených vodoměrnými stanicemi se pohybuje od necelých 20km² po povodí s rozlohou přes 250km². Všechna povodí byla vybrána tak, aby zahrnovala horní toky řek. Hodnoty jednoduchých tvarových metrik prezentuje následující tabulka 11.5.

Tab. 11.5 Hodnoty jednoduchých tvarových metrik

povodí	Patch Area	Patch Perimeter	Perimeter-Area ratio	Shape index
Baliny	166250675,15	69314,45	4,2	1,516
Batelov	73605361,47	45016,42	6,1	1,480
Borovnice	127875924,09	59587,77	4,7	1,486
Boskovice	56248275,81	42712,81	7,6	1,607
Brtnice	97273852,08	56125,88	5,8	1,605
Dolní Bory	210365359,97	75971,19	3,6	1,478
Habartice	109327555,43	52728,07	4,8	1,423
Hoštejn	129700780,20	67482,93	5,2	1,672
Hubenov	19626532,48	28305,36	14,4	1,802
Jemnice	144849001,92	76604,21	5,3	1,796
Jindřichov	90306546,80	53363,89	5,9	1,584
Kašava	36691149,44	29249,53	8,0	1,362
Kokory	95335267,45	60926,71	6,4	1,760
Kouty nad Desnou	43395374,65	32925,18	7,6	1,410
Luhačovice	44965322,23	33855,09	7,5	1,424
Mezihoří	177403124,37	62380,53	3,5	1,321
Nová Říše	23625029,05	27287,94	11,6	1,584
Otaslavice	75561745,33	44625,49	5,9	1,448
Popov	169997585,87	69008,97	4,1	1,493
Prusy	230133325,35	78916,20	3,4	1,467
Příštpo	262468412,36	93274,28	3,6	1,624
Rozhraní	226940937,96	68940,56	3,0	1,291
Skryje	222426699,55	104443,81	4,7	1,976
Stražisko	52953093,63	36532,83	6,9	1,416
Uničov	176319568,88	74049,12	4,2	1,573
Velká Bystřice	231335171,83	108818,57	4,7	2,018
Vlaské	96542314,71	49610,88	5,1	1,424

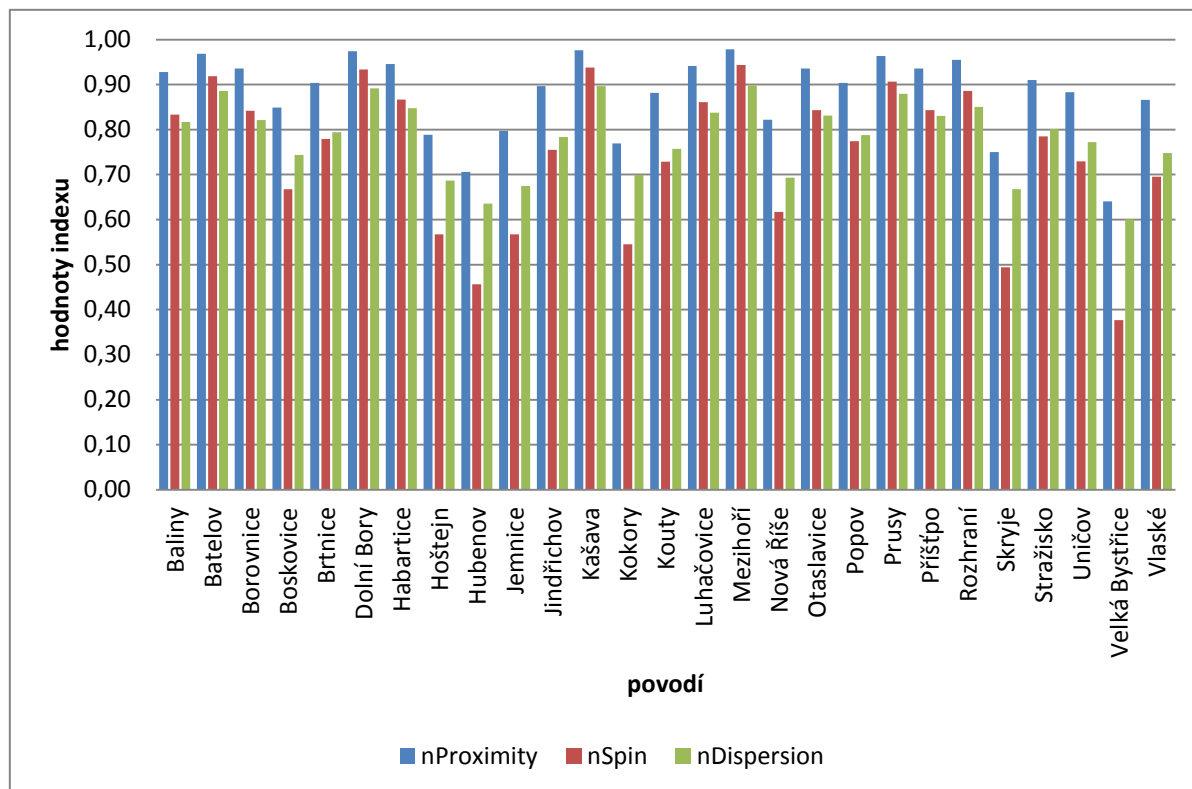
Oproti povodím III. řádu, má tato skupina povodí obecně nižší hodnoty **Shape indexu**, Jejich tvar se tedy více blíží kruhu. Pouze jedno povodí (Velká Bystřice) dosahuje hodnoty indexu převyšující 2, což znamená, že je nejvíce protáhlého tvaru dle této metriky.

B. Shape metrics Tool indexy

Hodnoty všech indexů získané pomocí nástroje Shape Metrics Tool jsou uvedeny v Příloze 2. V níže uvedeném textu jsou popsány pouze vybrané indexy.

Normalizované hodnoty Proximity indexu dosahují ve všech případech hodnot vyšších jak 0,6, avšak z náhledu tvaru povodí v Příloze 1, lze usuzovat, že povodí s hodnotami vyššími jak 0,8 se jeví jako relativně kruhovitá. Hodnoty **normalizovaného Spin indexu** mají mnohem větší rozsah hodnot než Proximity index (0,37 – 0,94). Povodí s hodnotami indexu nižšími než 0,4 mají obecně velmi protáhlý tvar, na koncích jsou relativně zúžená. Právě tyto nízké hodnoty **normalizovaného Spin indexu** poukazují na povodí, která mají velmi protáhlý tvar s podlouhlými výběžky. Patří mezi ně především Skryje (0,49) a Velká Bystřice (0,37). **Normalizovaný Dispersion index** má obecně hodnoty u všech povodí vyšší jak 0,60, avšak povodí s touto hodnotou může mít velmi podlouhlý tvar, který je ve směru protažení dokonce i několikrát delší než jeho šířka. Jeho hodnoty vyšší než 0,85 poukazují na kruhovitá povodí (viz Příloha 1). Jak se tvar povodí rozpiná rovnoměrně do všech stran, hodnotí tedy nejlépe **Dispersion index**. V tomto směru má nejpravidelnější tvar povodí Prusy (0,88) a Dolní Bory (0,89). Hodnoty Spin indexu, Proximity indexu, který podobně jako Spin index poukazuje na výběžky ve tvaru povodí, a Dispersion indexu, prezentuje graf 11.7.

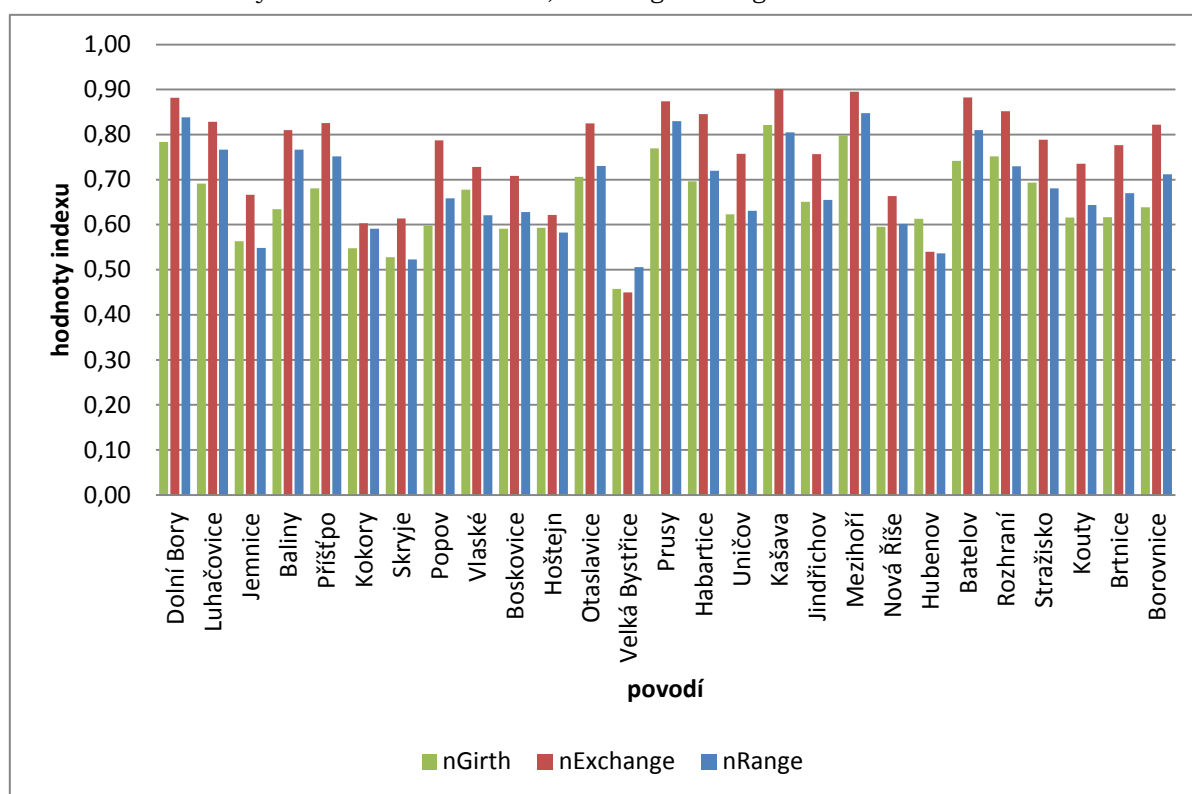
Graf 11.7 Hodnoty normalizovaného Proximity, Spin a Dispersion indexu



poznámka: nProximity= normalizovaný Proximity index, nSpin= normalizovaný Spin index, nDispersion= normalizovaný Dispersion index

Normalizovaný Girth index se pohybuje u většiny povodí mezi hodnotami 0,55 až 0,65. Tato povodí mají obecně spíše protáhlý tvar, ale ne tak výrazně. Již zmíněná povodí Prusy a Dolní Bory, která mají nejvyšší hodnoty **normalizovaného Dispersion indexu** také obsahují největší souvislou plochu, která je vyjádřena právě **normalizovaným Girth indexem** (viz graf 11.8). Exchange index nabývá hodnot až 0,9 u některých povodí, v těchto případech je možné povodí považovat za nejvíce podobné kruhu. Porovnáme-li tvar povodí (viz Příloha 1), jedná se o povodí, která mají kruhovitý tvar bez výrazných výběžků. Naopak Hoštejn, Skryje a Kokory jsou nejméně kompaktní v oblasti svého centroidu, naznačují tomu nízké hodnoty **normalizovaného Exchange indexu**. Avšak při porovnání hodnot indexů pro povodí Skryje, je zajímavé, že **normalizovaný Exchange index** dosahuje vyšších hodnot. Z náhledů tvaru povodí (viz Příloha 1) je zřejmé, že tvar povodí je sice významně protáhlý v jednom směru, avšak v části blízko centroidu je výběžek, který je protáhlý i do směru druhého a vzniká zde tedy relativně souvislá plocha. Hodnoty normalizovaného indexu jsou ve všech povodích vyšší jak 0,5. Index je založen na principu, kdy se ploše opisuje kružnice a hodnotí se průměr kružnice opsané. Vysoké hodnoty opět napovídají, že tvar povodí se podobá kruhu. Mezihoří má nejvyšší hodnoty **normalizovaného Range indexu**.

Graf 11.8 Hodnoty normalizovaného Girth, Exchange a Range indexu



poznámka: nGirth= normalizovaný Girth index, nExchange= normalizovaný Exchange index, nRange= normalizovaný Range index

C. Fraktální dimenze tvaru povodí

Hodnoty fraktální dimenze prezentuje tabulka 11.6. Výsledky získané metodou box counting dosahují většího rozpětí hodnot než u povodí III. řádu. Zároveň dosahují v mnoha případech i vyšších hodnot, což poukazuje na to, že povodí zabírají více prostoru. Hodnoty fraktální dimenze vypočítané metodou Radius mass jsou ve 2 případech nižší než 1. Tento výsledek by v případě hodnocení plochy, kdy se hodnoty

fraktální dimenze mají pohybovat v otevřeném intervalu 1 až 2 (Hotař, 2006), neměl vyjít. Zajímavé je, že tyto hodnoty jsou vypočítány pro povodí s nejmenší rozlohou. Výsledek je tedy ovlivněn metodou výpočtu a způsobem, který program FRACTALYSE používá. Za zmínku stojí i porovnání hodnot box counting metodou a radius mass metodou, které se výrazně liší nejen v absolutních hodnotách, ale i při vzájemném relativním porovnání hodnot mezi sebou.

Tab. 11.6 Hodnoty fraktální dimenze tvaru povodí

software	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE	V-LATE
metoda	box counting	box counting	radius mass	ostatní
Baliny	1,698	1,805	1,641	1,178
Batelov	1,63	1,800	1,348	1,183
Borovnice	1,678	1,818	1,554	1,178
Boskovice	1,562	1,733	1,267	1,195
Brtnice	1,636	1,783	1,478	1,189
Dolní Bory	1,732	1,830	1,733	1,173
Habartice	1,640	1,777	1,492	1,175
Hoštejn	1,693	1,820	1,570	1,190
Hubenov	1,458	1,644	0,960	1,221
Jemnice	1,680	1,791	1,570	1,197
Jindřichov	1,636	1,768	1,410	1,188
Kašava	1,518	1,699	1,097	1,181
Kokory	1,619	1,746	1,450	1,199
Kouty	1,544	1,719	1,172	1,183
Luhačovice	1,525	1,699	1,168	1,184
Mezihoří	1,713	1,825	1,684	1,163
Nová Říše	1,491	1,689	0,976	1,203
Otaslavice	1,598	1,753	1,356	1,180
Popov	1,711	1,828	1,633	1,176
Prusy	1,744	1,838	1,762	1,171
Příštpoo	1,758	1,839	1,766	1,181
Rozhraní	1,749	1,853	1,754	1,158
Skryje	1,739	1,800	1,729	1,203
Stražisko	1,573	1,741	1,229	1,181
Uničov	1,717	1,836	1,650	1,181
Velká Bystřice	1,738	1,818	1,641	1,204
Vlaské	1,654	1,795	1,446	1,176

D. Fraktální dimenze tvaru říční sítě

Fraktální dimenze říční sítě dosahuje nižších hodnot než fraktální dimenze tvaru povodí, což se vzhledem k povaze dat předpokládá (říční síť je tvořena liniemi, tvar povodí je vyjádřen plošným objektem). Některé výsledky však dosahují hodnot nižších než 1, což je nejspíš zapříčiněno metodou výpočtu, protože podle principů fraktální geometrie by linie měla fraktální dimenze být rovna nebo vyšší jak 1. Oproti výsledkům

pro povodí III. řádu, jsou také hodnoty nižší, viz tabulka 11.7). Tato skutečnost je nejspíš zapříčiněna tím, že povodí jsou menší, jejich říční síť není tedy tak komplikovaná.

Tab. 11.7 Hodnoty fraktální dimenze říční sítě modelu hrubých úseků a hustota říční sítě pro povodí vodoměrných stanic

software	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE	hustota říční sítě (km/km²)
metoda	box counting	box counting	radius mass	
Baliny	1,222	1,240	1,439	0,862
Batelov	1,143	1,223	1,045	1,171
Borovnice	1,121	1,155	1,110	1,040
Boskovice	1,130	1,218	1,336	0,912
Brtnice	1,129	1,186	1,528	0,776
Dolní Bory	1,215	1,215	2,449	0,496
Habartice	1,180	1,228	1,151	1,066
Hoštejn	1,137	1,177	1,307	0,901
Hubenov	0,954	1,066	0,960	1,111
Jemnice	1,196	1,219	1,272	0,958
Jindřichov	1,191	1,258	1,528	0,823
Kašava	1,055	1,135	0,947	1,199
Kokory	1,128	1,157	1,673	0,691
Kouty	1,097	1,207	0,748	1,614
Luhačovice	1,035	1,123	1,376	0,816
Mezihoří	1,191	1,216	1,756	0,692
Nová Říše	0,980	1,107	0,832	1,331
Otaslavice	1,156	1,230	1,090	1,129
Popov	1,242	1,258	1,530	0,822
Příštpo	1,270	1,256	1,813	0,693
Prusy	1,273	1,278	1,856	0,688
Rozhraní	1,157	1,157	1,663	0,695
Skryje	1,254	1,227	1,901	0,645
Stražisko	1,100	1,173	1,406	0,834
Uničov	1,229	1,244	2,245	0,554
Velká Bystřice	1,232	1,218	1,506	0,809
Vlaské	1,151	1,196	1,581	0,757

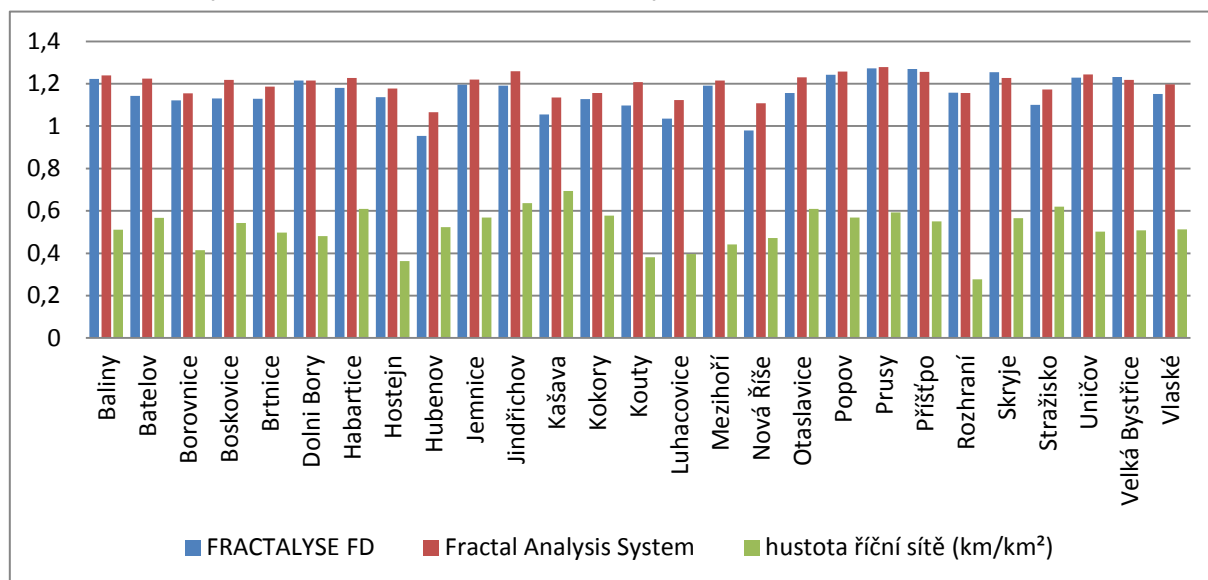
poznámka: říční síť je v tomto případě prezentována modelem hrubých úseků vodních toků

Porovnání hodnot fraktální dimenze říční sítě a hustoty říční sítě prezentuje graf 11.9. Ve většině případů platí, že je-li vyšší fraktální dimenze říční sítě, je i vyšší hustota říční sítě. V tabulce 11.8 je závislost mezi fraktální dimenzí říční sítě a hustotou říční sítě posouzena využitím korelační analýzy. Stupeň korelační závislosti je v případě vodoměrných stanic nižší než u povodí III. řádu. Rozdíly v hodnotách fraktální dimenze dle použitého programu jsou velké, podle toho jsou i rozdíly v hodnotách korelačních koeficientů.

Tab. 11.8 Hodnoty korelačních koeficientů mezi fraktální dimenzí říční sítě a její hustotou.

Fraktální dimenze (box counting metoda)		
software	FRACTALYSE	Fractal Analysis System
hustota HU	0,165	0,305
hustota JU	0,040	0,441

Graf 11.9 Hodnoty fraktální dimenze říční sítě a hustoty říční sítě

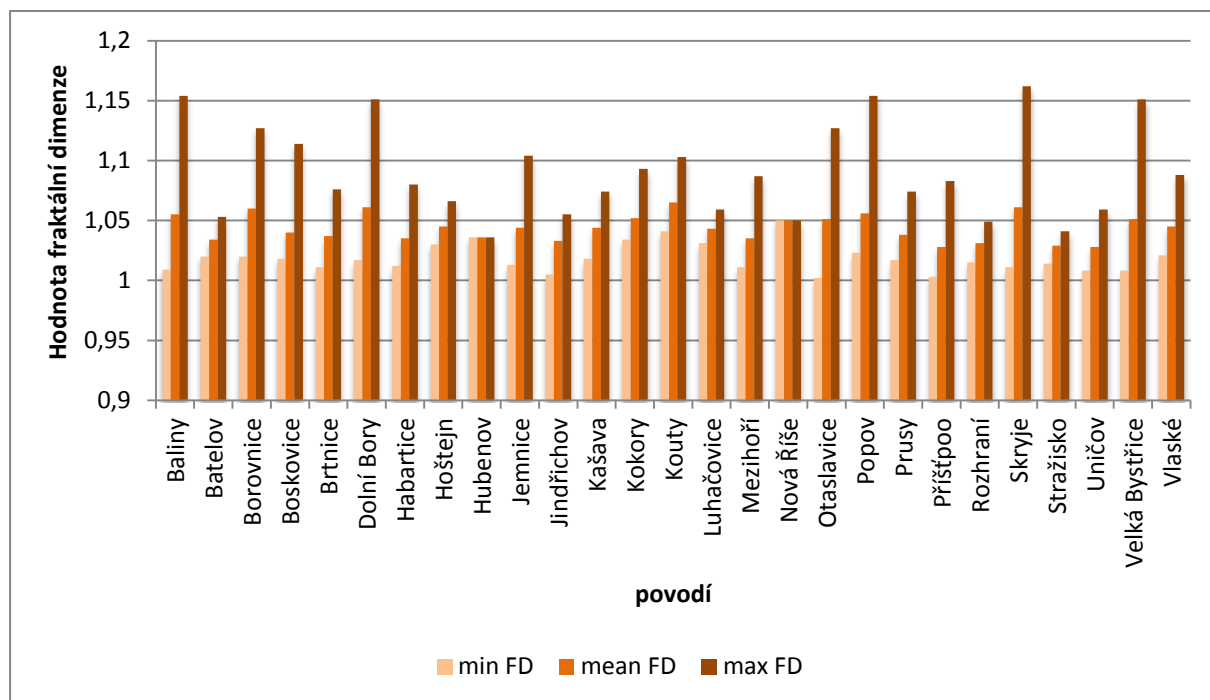


poznámka: FRACTALYSE= hodnoty z programu FRACTALYSE (metoda výpočtu box counting), Fractal Analysis System= hodnoty fraktální dimenze z programu Fractal Analysis System (metoda výpočtu box counting), říční síť je v tomto případě prezentována modelem hrubých úseků vodních toků

E. Fraktální dimenze a sinuosity úseků říční sítě

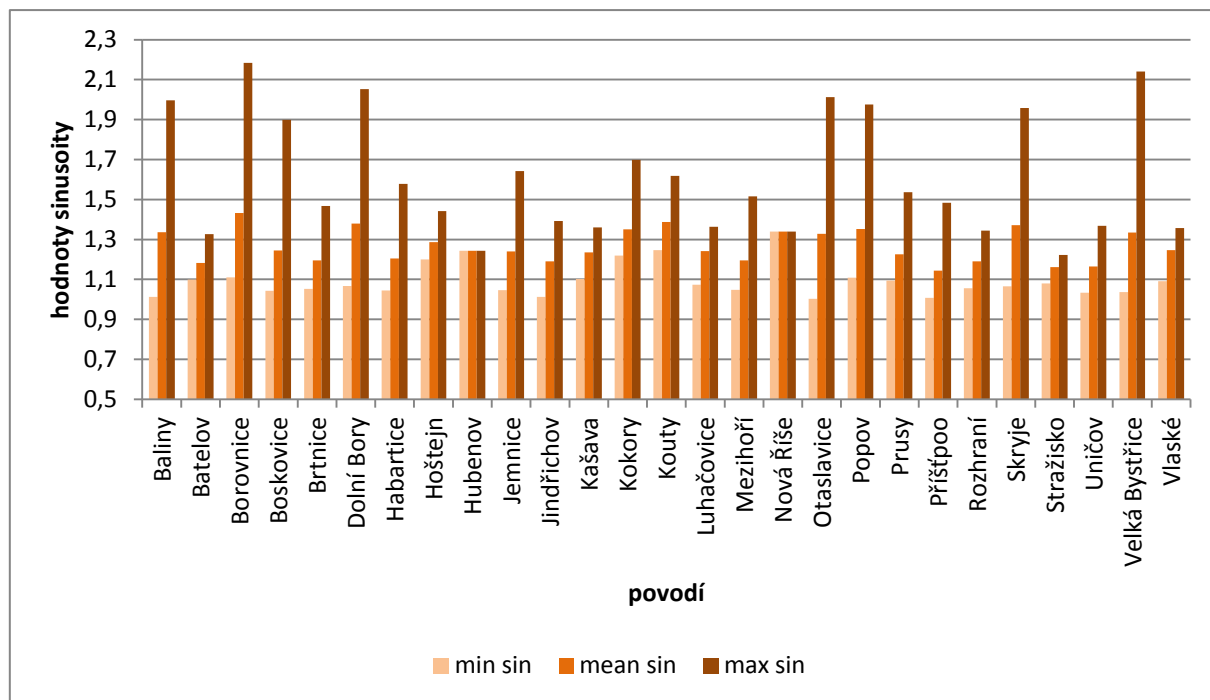
Fraktální dimenze vodních toků a sinuosity byly analogicky jako pro povodí III. řádu vypočítány i pro povodí vodoměrných stanic. Hodnoty fraktální dimenze a sinuosity úseků vodních toků jsou k nahlédnutí v Příloze 4. Následující grafy 11.10 a 11.11 prezentují minimální, průměrné a maximální hodnoty metrik pro jednotlivá povodí vodoměrných stanic. Stejně jako u předchozí studie pro povodí III. řádu, lze dojít k závěru, že povodí, ve kterých se nachází úseky s vyšší průměrnou fraktální dimenzí, dosahují rovněž vyšších hodnot sinuosity (viz graf 11.10 a 11.11). Podobný vztah platí i pro maximální hodnoty, což lze vzhledem k tomu, že fraktální dimenze hodnotí složitost tvaru a sinuosity hodnotí, jak se linie kroučí, předpokládat.

Graf 11.10 Hodnoty fraktální dimenze úseků vodních toků povodí vodoměrných stanic



poznámka: min FD= minimální hodnoty fraktální dimenze, mean FD= průměrné hodnoty fraktální dimenze, max FD= maximální hodnoty fraktální dimenze

Graf 11.11 Hodnoty sinuosity úseků vodních toků povodí vodoměrných stanic



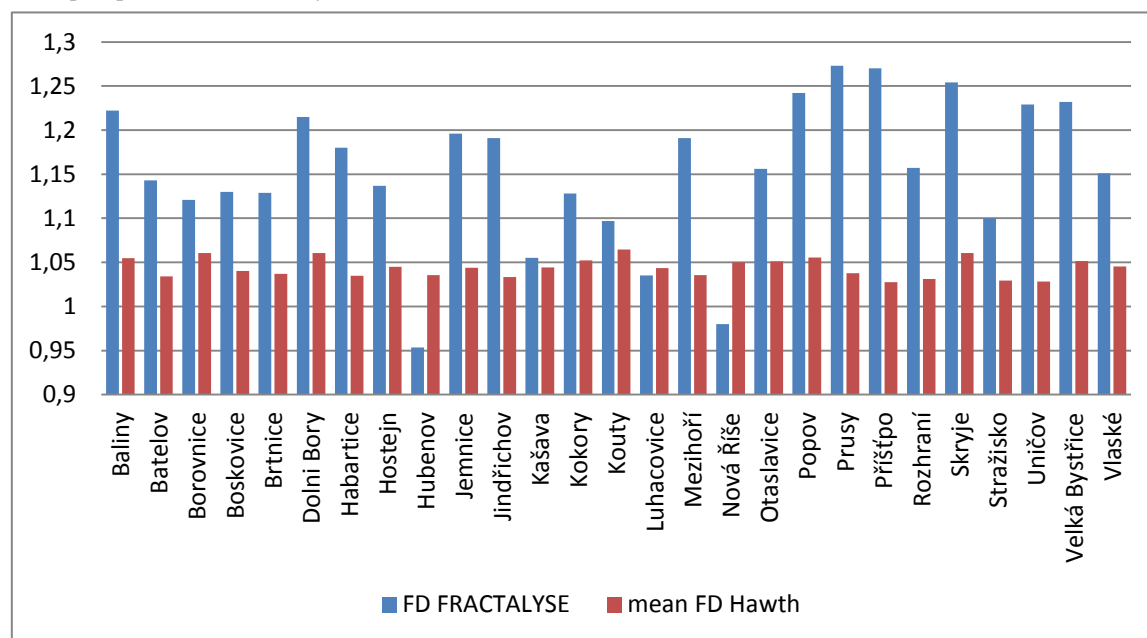
poznámka: min sin= minimální hodnoty sinuosity, mean sin= průměrné hodnoty sinuosity, max sin= maximální hodnoty sinuosity

Následující graf 11.12 srovnává průměrné hodnoty úseků říční sítě s hodnotami fraktální dimenze říční sítě z programu FRACTALYSE získané box counting metodou. Rozdíly v průměrné fraktální dimenzi úseků říční sítě nejsou tak velké jako ve fraktální dimenzi celé říční sítě, avšak v některých případech platí, že jsou-li hodnoty fraktální

dimenze říční sítě vyšší v porovnání s ostatními povodí, jsou vyšší i hodnoty průměrné fraktální dimenze úseků říční sítě. Konkrétně lze zmíněný stav sledovat u povodí Skryje (hodnoty fraktální dimenze 1,254 a a průměrné fraktální dimenze úseků 1,061), Popov (hodnoty fraktální dimenze 1,242 a průměrné fraktální dimenze úseků 1,056) nebo Velká Bystřice (hodnoty fraktální dimenze 1,232 a průměrné fraktální dimenze úseků 1,051). Avšak například povodí Příštpo má vysokou hodnotu fraktální dimenze celé říční sítě (1,270), ale úseky vodních toků dosahují nejnižší průměrné fraktální dimenze 1,028.

Stejně jako u předchozí studie (povodí III. řádu), lze dojít k závěru, že hodnoty fraktální dimenze úseků říční sítě poukazují na složitost této sítě pouze v jednotlivých částech (na které jsou rozděleny). Není však vhodné hodnotit říční síť jako celek použitím průměrných hodnot, protože tato výsledná hodnota neodráží fraktální dimenzi celého objektu, resp. říční sítě.

Graf 11.12 Hodnoty fraktální dimenze říční sítě a průměrné fraktální dimenze pro úseky vodních toků pro povodí vodoměrných stanic



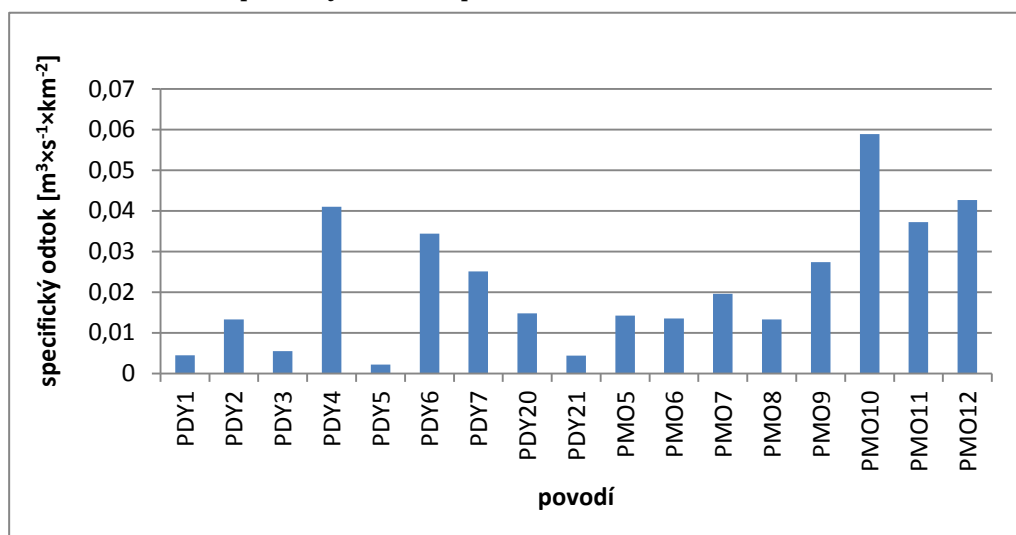
poznámka: FD FRACTALYSE= hodnoty fraktální dimenze říční sítě pro model hrubých úseků z programu FRACTALYSE použitím box counting metody, FD Hawth tool mean= průměrné hodnoty fraktální dimenze úseků říční sítě pro model hrubého dělení úseků

11.2 Hodnocení vztahu odtoku a tvarových metrik

11.2.1 Charakteristiky odtoku

Dlouhodobý průměrný specifický odtok na povodích III. řádu dosahuje nejnižších hodnot $0,0022 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1} \times \text{km}^{-2}$, konkrétně v povodí PDY5, největší specifický odtok je na území povodí PMO10, konkrétně $0,0589 \text{ m}^3 \times \text{s}^{-1} \times \text{km}^{-2}$ (viz graf 11.13).

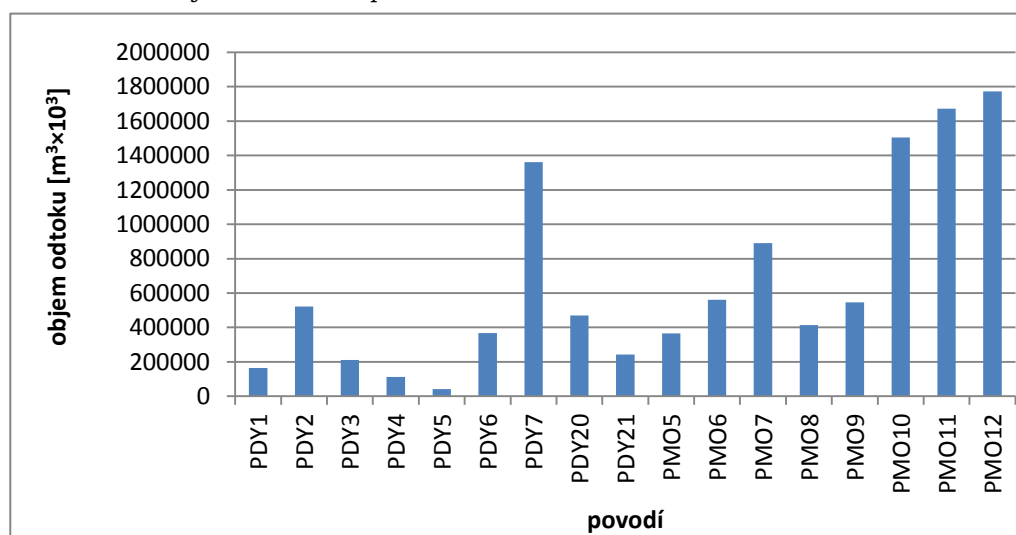
Graf č. 11.13: Specifický odtok na povodích III. řádu



poznámka: specifický odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok

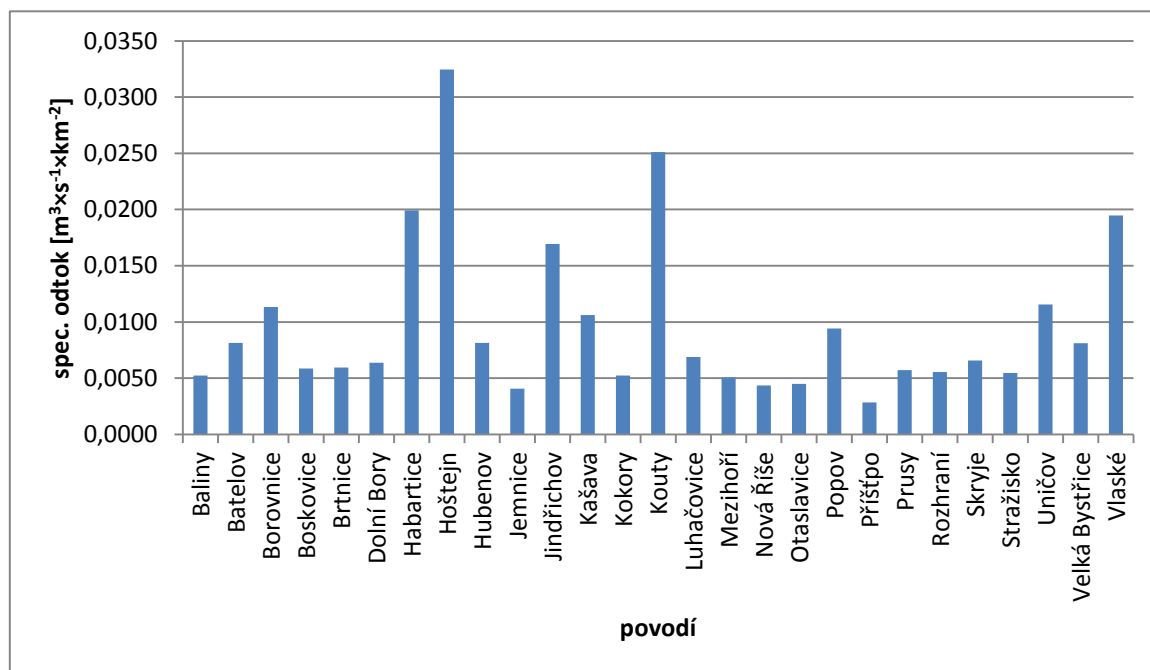
Povodí PDY má nejen nejnižší hodnoty specifického odtoku (viz graf 11.13), ale také průměrného ročního objemu odtoku, který nabývá hodnot $40\,676\,973 \text{ m}^3$. Jak je zřejmé z grafu 11.14, nejvíce vody je odvedeno z povodí PMO12 ($1\,773\,503\,400 \text{ m}^3$).

Graf č. 11.14: Objem odtoku na povodích III. řádu



poznámka: objem odtoku= průměrný roční objem odtoku

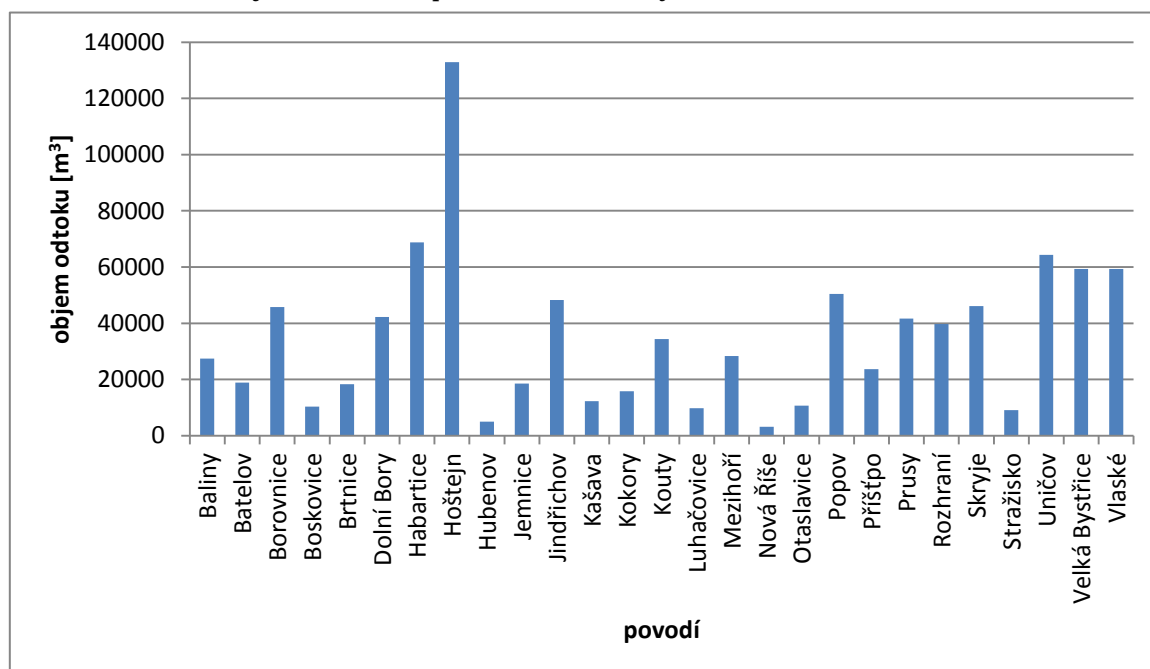
Graf č. 11.15: Specifický odtok na povodích vodoměrných stanic



poznámka: specifický odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok

Střední hodnota specifického odtoku na povodích vodoměrných stanic je $0,0066 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Extrémní hodnoty se vyskytují na povodí Hoštejn ($0,0325 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) a povodí Příštpo ($0,0029 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) – viz graf 11.15.

Graf č. 11.16: Objem odtoku na povodích vodoměrných stanic



poznámka: objem odtoku= průměrný roční objem odtoku

V rámci povodí vymezených dle vodoměrných stanic je nejméně vody odvedeno z povodí Nová Říše ($3\,250\,371 \text{ m}^3$), nejvíce z povodí Hoštejn ($132\,854\,970 \text{ m}^3$), kde je také nejvyšší specifický odtok (viz graf 11.16).

11.2.2 Korelace charakteristik odtoku s tvarovými metrikami

Následující kapitola hodnotí pomocí korelační analýzy závislost mezi hodnotami metrik a charakteristikami odtoku. Obdobně jako kapitoly 11.1.1 a 11.1.2 je rozdělena podle principů výpočtu tvarových metrik do pěti částí.

Pro hodnocení korelační závislosti byla aplikována tzv. Pearsonova korelace, jejíž výsledky korelačních koeficientů jsou prezentovány v následující kapitole. Vzhledem k nedodržení normality rozdělení některých dat (především dat o odtoku) byla otestována i tzv. pořadová korelace využitím Spearmanova koeficientu (viz kapitola 10), která patří mezi neparametrické testy (Walker, 2013). Výsledky Spearmanova koeficientu jsou v Příloze 4. Výsledky Spearmanova koeficientu přináší velmi podobné výsledky Pearsonovu koeficientu.

A. Jednoduché tvarové metriky

Následující tabulky 11.9 a 11.10 prezentují výsledky korelačních koeficientů mezi charakteristikami odtoku a jednoduchými tvarovými metrikami. Mírný stupeň korelační závislosti mezi metrikami a charakteristikami odtoku je v rámci povodí III. řádu mezi metrikou **Patch Area**, **Perimeter-area ratio** a **průměrným ročním objemem odtoku**. Metrika Perimeter-area ratio hodnotí poměr mezi obvodem povodí a jeho velikostí, hodnota korelačního koeficientu s průměrným ročním objemem odtoku je záporná, znamená tedy negativní stupeň závislosti. Má-li tedy povodí nižší hodnotu metriky, objem odtoku je vyšší.

Tab. 11.9 Hodnoty korelačních koeficientů pro povodí III. řádu

	Patch Area	Patch Perimeter	Perimeter-area ratio	Shape index
spec. odtok	-0,111	-0,279	-0,014	-0,289
obj. odtoku	0,371	0,117	-0,433*	-0,283

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Pro povodí vodoměrných stanic je závislost mezi hodnotami **Patch Area** a hodnotami **průměrného ročního objemu odtoku** podle výsledků korelačních koeficientů ještě vyšší než pro povodí III. řádu (viz tabulka 11.10). **Patch Perimeter** v případě povodí vodoměrných stanic vykazuje s hodnotami průměrného ročního objemu odtoku mírný stupeň korelační závislosti, což je opět vyšší stupeň závislosti než pro povodí III. řádu. Závislost mezi **Perimeter- Area ratio** a **průměrným ročním objemem odtoku** je negativní (mírný stupeň korelační závislosti), stejně jako pro povodí III. řádu.

Tab. 11.10 Hodnoty korelačních koeficientů pro povodí vodoměrných stanic

	Patch Area	Patch Perimeter	Perimeter-Area ratio	Shape index
spec. odtok	-0,182	-0,143	-0,018	-0,109
obj. odtoku	0,400*	0,437*	-0,465*	0,110

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Mezi jednoduchými metrikami a dlouhodobým specifickým průměrným odtokem je ve všech případech (jak u povodí III. řádu, tak u povodí vodoměrných stanic) nízký stupeň korelační závislosti (kategorizace dle Biskup, 2009).

B. Shape metrics Tool indexy

Pomocí korelační analýzy byla také hledána závislost mezi hodnotami tvarových metrik z programu Shape metrics Tool a charakteristikami o odtoku (viz tabulka 11.11). Pro povodí III. řádu spolu v mnoha případech hodnoty tvarových metrik a charakteristiky odtoku korelují, přesněji je mezi nimi mírný stupeň korelační závislosti (dle kategorizace Biskup, 2009). Velmi podobné jsou hodnoty korelačních koeficientů pro **normalizované indexy** a hodnoty **dlouhodobého průměrného specifického odtoku**, pohybují se v rozsahu 0,358 – 0,488, dle kategorizace podle Biskupa (2009) se jedná o mírný stupeň korelační závislosti. Tato skupina indexů (jak je popsáno v kapitole 5) obecně popisuje podobnost tvaru povodí k pravidelnému kruhu. Avšak každý index je založen na jiném principu výpočtu a dosahuje jiných hodnot (viz kapitola 5, dále výsledky indexů v Příloze 2). Za zmínku stojí, že stupeň korelační závislosti mezi těmito indexy a charakteristikami o odtoku je obecně vyšší než stupeň korelační závislosti charakteristik o odtoku a hodnotami Shape indexu.

Dále spolu významně **korelují Exchange index, Depth index, normalizovaný Range index, normalizovaný Detour index a normalizovaný Traversal index s průměrným ročním objemem odtoku.**

Tab. 11.11 Hodnoty korelačních koeficientů pro povodí III. řádu

	Cohesion	nCohesion	Proximity	nProximity	Exchange	nExchange
spec. odtok	-0,367	0,466*	-0,366	0,457*	0,043	0,465*
obj. odtoku	0,097	0,402	0,100	0,394	0,464*	0,365
	Spin	nSpin	Depth	nDepth	Girth	nGirth
spec. odtok	-0,384	0,468*	0,154	0,421*	0,097	0,361
obj. odtoku	0,032	0,396	0,479*	0,321	0,397	0,196
	Dispersion	nDispersion	Range	nRange	Detour	nDetour
spec. odtok	-0,324	0,408	-0,428*	0,425*	-0,384	0,435*
obj. odtoku	0,137	0,327	-0,069	0,463*	-0,086	0,501*
	Traversal	nTraversal	nPerimeter			
obj. odtoku	0,119	0,502*	0,322			
spec. odtok	-0,350	0,488*	0,358			

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% (p=0,05)

Při hodnocení závislosti mezi tvarovými metrikami z programu Shape Metrics Tool a charakteristikami o odtoku u povodí vodoměrných stanic, lze z hodnot

korelačních koeficientů dojit ke zcela odlišným závěrům, než pro povodí III. řádu (výsledky jsou uvedeny v tabulce 11.12).

Vyšší stupně korelační závislosti s průměrným ročním objemem odtoku vykazují spíše absolutní hodnoty indexů než jejich normalizované podoby. Mírný stupeň korelační závislosti je mezi **průměrným ročním objemem odtoku** a **Cohesion, Proximity, Exchange, Spin, Depth, Girth, Dispersion, Detour a Traversal indexy**. Jedná se tedy o všechny nenormalizované indexy. Nejvyšší hodnota korelačního koeficientu je pro **Range index**, který s **průměrným ročním objemem odtoku** vykazuje střední stupeň korelační závislosti. Mezi hodnotami metrik a dlouhodobým průměrným specifickým odtokem nebyla nalezena významná závislost, hodnoty korelačních koeficientů se pohybují v rozmezí -0,214 až 0,094, což dle klasifikace podle Biskupa (2009) znamená nízký stupeň korelační závislosti až korelační nezávislost mezi veličinami.

Tab. 11.12 Hodnoty korelačních koeficientů pro vybraná povodí vodoměrných stanic

	Cohesion	nCohesion	Proximity	nProximity	Exchange	nExchange
spec. odtok	-0,096	-0,081	-0,095	-0,079	-0,214	-0,119
obj. odtoku	0,486*	-0,147	0,486*	-0,148	0,302	-0,163
	Spin	nSpin	Depth	nDepth	Girth	nGirth
spec. odtok	-0,110	-0,106	-0,165	-0,079	-0,156	-0,068
obj. odtoku	0,427*	-0,154	0,331*	-0,139	0,330*	-0,169
	Dispersion	nDispersion	Range	nRange	Detour	nDetour
spec. odtok	-0,121	-0,128	-0,046	-0,184	-0,127	0,013
obj. odtoku	0,471*	-0,152	0,512*	-0,191	0,450*	-0,116
	Traversal	nTraversal	nPerimeter			
spec. odtok	-0,117	-0,050	0,094			
obj. odtoku	0,476*	-0,097	-0,105			

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Stanovení závislosti mezi metrikami z programu Shape Metric Tool je opět velmi složité, protože závislosti mezi hodnotami metrik pro povodí III. řádu a pro povodí vodoměrných stanic s charakteristikami o odtoku jsou zcela rozdílné. U povodí III. řádu spolu významněji korelují hodnoty normalizovaných indexů a průměrný roční objem odtoku i dlouhodobý specifický průměrný odtok, oproti tomu u povodí vodoměrných stanic je závislost vyšší jen pro hodnoty indexů v absolutní podobě s průměrným ročním objemem odtoku.

C. Fraktální dimenze tvaru povodí

Mezi hodnotami fraktální dimenze tvaru povodí a hodnotami dlouhodobého průměrného specifického odtoku v rámci povodí III. řádu nalezena významná korelační

závislost. Avšak závislost mezi hodnotami **průměrného ročního objemu odtoku** a **fraktální dimenzí** dosahuje v některých případech hodnot korelačních koeficientů 0,459 (výsledky fraktální dimenze pro tvar povodí z programu Fractal Analysis System), což poukazuje na mírný stupeň korelační závislosti (klasifikace dle Biskup, 2009). Mezi hodnotami fraktální dimenze z programu V-LATE a charakteristikami o odtoku je nízký až střední stupeň korelační závislosti, přičemž závislost mezi veličinami je negativní. Výsledky korelační analýzy mezi fraktální dimenzí tvaru povodí a charakteristikami o odtoku pro povodí III. řádu uvádí následující tabulka 11.13.

Tab. 11.13 Výsledky korelačních koeficientů mezi fraktální dimenzí tvaru povodí a charakteristikami o odtoku pro povodí III. řádu

Fraktální dimenze tvaru povodí III. Řádu				
program	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE	V-LATE
metoda	Box counting	Box counting	Radius mass	další
spec. odtok	-0,073	0,158	0,005	-0,223
obj. odtoku	0,381	0,459*	0,368	-0,345

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Porovnáme-li hodnoty korelačních koeficientů pro povodí vodoměrných stanic (viz tabulka 11.14), tak lze mezi **fraktální dimenzí tvaru** povodí a **průměrným ročním objemem odtoku** nalézt dokonce i střední stupeň korelační závislosti (platí pro hodnoty fraktální dimenze z obou programů, získaných jak box counting metodou).

Tab. 11.14 Výsledky korelačních koeficientů mezi fraktální dimenzí tvaru povodí a charakteristikami o odtoku pro povodí vodoměrných stanic

Fraktální dimenze tvaru povodí vodoměrných stanic				
program	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE	V-LATE
metoda	Box counting	Box counting	Radius mass	další
spec. odtok	-0,036	0,019	-0,073	-0,168
obj. odtoku	0,533*	0,552*	0,492*	-0,038

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Vzhledem k rozdílným výsledkům fraktálních dimenzí tvaru povodí při použití různých metod, je složité stanovit závislost mezi charakteristikami o odtoku a fraktální dimenzí. Hodnoty fraktální dimenze z některých programů vykazují vyšší stupně korelační závislosti, než hodnoty z jiných programů. Obecně se však mírný až střední stupeň korelační závislosti objevuje při hodnocení tvaru povodí a průměrného ročního objemu odtoku. V případě povodí vodoměrných stanic jsou závislosti vyšší než u povodí III. řádu.

D. Fraktální dimenze tvaru říční sítě

Hodnoty korelačních koeficientů mezi fraktální dimenzí tvaru říční sítě a charakteristikami odtoku prezentují tabulky 11.15 a 11.16. Stejně jako u hodnocení fraktální dimenze tvaru povodí, jsou rozdíly mezi hodnotami fraktálních dimenzí závislé na použitém softwaru a dané metodě, což se odráží na výsledcích korelačních koeficientů, a hodnocení výsledků je proto složitější.

Tab. 11.15 Výsledky korelačních koeficientů mezi fraktální dimenzí tvaru říční sítě a charakteristikami odtoku pro povodí III. řádu

Fraktální dimenze říční sítě (hrubých úseků) povodí III. řádu			
program	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE
metoda	Box counting	Box counting	Radius mass
spec. odtok	-0,116	0,030	-0,377
obj. odtoku	0,302	0,306	-0,087
Fraktální dimenze říční sítě (jemných úseků) povodí III. řádu			
program	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE
metoda	Box counting	Box counting	Radius mass
spec. odtok	-0,098	-0,068	0,010
obj. odtoku	0,235	0,256	0,378

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Tab. 11.16 Výsledky korelačních koeficientů mezi fraktální dimenzí tvaru povodí a charakteristikami odtoku pro povodí vodoměrných stanic

Fraktální dimenze říční sítě (hrubých úseků) povodí vodoměrných stanic			
program	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE
metoda	Box counting	Box counting	Radius mass
spec. odtok	-0,059	0,034	-0,236
obj. odtoku	0,410*	0,303	0,261
Fraktální dimenze říční sítě (jemných úseků) povodí vodoměrných stanic			
program	FRACTALYSE	Fractal Analysis System	FRACTALYSE
metoda	Box counting	Box counting	Radius mass
spec. odtok	0,223	0,447*	-0,022
obj. odtoku	0,663*	0,655*	0,418*

poznámka: spec. odtok= dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtok= průměrný roční objem odtoku

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Hodnoty fraktální dimenze tvaru říční sítě a dlouhodobého průměrného specifického odtoku spolu významněji korelují v případě hodnocení tvaru říční sítě jemných úseků na povodích vodoměrných stanic (hodnoty z programu Fractal Analysis System). Korelační koeficient značí podle klasifikace dle Biskupa (2009) střední stupeň korelační závislosti. Jsou-li tedy hodnoty fraktální dimenze vyšší (složitější tvar říční sítě, říční síť více zaplňuje prostor), můžeme pravděpodobně předpokládat i vyšší průměrný roční objem odtoku. V ostatních případech se jedná spíše o nízký až mírný stupeň závislosti.

E. Fraktální dimenze pro úseky říční sítě

Tabulky 11.17 a 11.18 uvádí hodnoty korelačních koeficientů mezi průměrnou fraktální dimenzí či průměrnou hodnotou sinuositou úseků říční sítě a charakteristikami o odtoku. Pro povodí III. řádu vychází střední stupeň korelační závislosti pro **sinuosity** a **dlouhodobý průměrný specifický odtok**. Závislost je však v tomto případě negativní. Čím více se tedy řeka kroutí, tím nižší jsou hodnoty dlouhodobého průměrného specifického odtoku. To samé platí pro hodnoty fraktální dimenze, zde je však nižší stupeň korelační závislosti. V případě povodí vodoměrných stanic nebyla mezi veličinami nalezena významná závislost (viz tabulky 11.17 a 11.18).

Tab. 11.17 Hodnoty korelačních koeficientů mezi průměrnou fraktální dimenzí, sinuosity úseků říční sítě a charakteristikami o odtoku pro povodí III. řádu

Fraktální dimenze a sinuosity úseků říční sítě povodí III. řádu		
	mean FD	mean sin
spec. odtok	-0,355	-0,529*
obj. odtoku	-0,314	-0,457*

poznámka: spec. odtok = dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku = průměrný roční objem odtoku, mean FD = průměrná hodnota fraktální dimenze úseků říční sítě, mean sin = průměrná hodnota sinuosity hrubých úseků říční sítě

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

Tab. 11.18 Hodnoty korelačních koeficientů mezi průměrnou fraktální dimenzí, sinuosity úseků říční sítě a charakteristikami o odtoku pro povodí vodoměrných stanic

Fraktální dimenze a sinuosity úseků říční sítě povodí vodoměrných stanic		
	mean FD	mean sin
spec. odtok	0,086	0,059
obj. odtoku	0,052	0,070

poznámka: spec. odtok = dlouhodobý průměrný specifický odtok, obj. odtoku = průměrný roční objem odtoku, mean FD = průměrná hodnota fraktální dimenze úseků říční sítě, mean sin = průměrná hodnota sinuosity hrubých úseků říční sítě

* Korelace je signifikantní na hladině významnosti 5% ($p=0,05$)

11.2.3 Hodnocení dle struktury krajiny

Klasifikace povodí dle koeficientu ekologické stability podle Miklóse (1986) odráží strukturu krajiny dle využití území. Díky tomu lze KES využít pro vyjádření vztahu mezi využitím území a hodnotami dlouhodobého průměrného specifického odtoku a hustotou říční sítě. Dále je možné porovnat, zda mezi hodnotami tvarových metrik a klasifikací povodí dle KES neexistuje nějaký vztah.

Na základě klasifikace povodí podle hodnot koeficientu ekologické stability dle Miklóse (1986), byly porovnány hodnoty specifického odtoku a výsledky vybraných tvarových metrik mezi jednotlivými kategoriemi podle KES (viz tabulky 11.19, 11.20, 11.21, 11.22, 11.23 a 11.24). Pro porovnání byly vybrány hodnoty Shape indexu, 2 indexy ze skupiny Shape Metrics Tool indexů, konkrétně normalizovaná podoba Spin a Exchange indexu a hodnoty fraktální dimenze vypočítané programem FRACTALYSE za použití box counting metody. Shape index byl vybrán, proto, že je v hydrologii již

využíván pod názvem Graveliův koeficient (viz kapitola 6) a hodnotí podobnost tvaru povodí ke kruhu. Spin index hodnotí jak je povodí protáhlé, přičemž jeho nižší hodnoty poukazují na významné tvarové výběžky povodí (viz kapitola 7), Exchange index je pak vhodný k hodnocení kompaktnosti povodí, hodnotí rozlohu plochy, která je obsažena v tzv. Equal Area Circle, která má střed v centroidu plochy (viz kapitola 7). Složitost tvaru povodí hodnotí fraktální dimenze, proto byly také porovnány hodnoty fraktální dimenze (jak tvaru povodí, tak říční sítě) v rámci kategorií KES. Dále byly také porovnány hodnoty specifického odtoku a hustoty říční sítě. Vše bylo provedeno jak pro povodí III. řádu, tak pro povodí vodoměrných stanic. Následující tabulky prezentují rozsah hodnot a průměrné hodnoty sledovaných veličin pro jednotlivé kategorie.

Tab. 11.19 Hodnoty Shape indexu a specifického odtoku pro povodí III. řádu

Koeficient ekologické stability		Shape index		Specifický odtok [m ³ ×s ⁻¹ ×km ⁻²]	
Kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
≤ 0,33	2	1,713-1,903	1,808	0,0344 - 0,0589	0,0467
0,33 < K _{ES} ≤ 0,5	10	1,568 - 2,316	2,063	0,0022 - 0,0427	0,0229
0,5 < K _{ES} ≤ 0,66	3	1,823 - 2,125	1,945	0,0044 - 0,0135	0,0075
K _{ES} ≥ 0,66	2	1,483 - 1,516	1,500	0,0133 - 0,0142	0,0138

poznámka: specifický odtok = dlouhodobý průměrný specifický odtok

Tab. 11.20 Hodnoty Shape indexu a specifického odtoku pro povodí vodoměrných stanic

Koeficient ekologické stability		Shape index		Specifický odtok [m ³ ×s ⁻¹ ×km ⁻²]	
Kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
≤ 0,33	11	1,291-1,976	1,543	0,0029 - 0,0082	0,0055
0,33 < K _{ES} ≤ 0,5	4	1,486-1,802	1,655	0,0052 - 0,0116	0,0091
0,5 < K _{ES} ≤ 0,66	5	1,420-1,670	1,560	0,0044 - 0,0325	0,0118
K _{ES} ≥ 0,66	7	1,362-2,018	1,524	0,0045 - 0,0251	0,0161

poznámka: specifický odtok = dlouhodobý průměrný specifický odtok

Povodí III. řádu, která byla vyhodnocena jako nejstabilnější, mají nejnížší průměrné hodnoty Shape indexu (viz tabulka 11.19). Tvar povodí s nízkou hodnotou shape indexu se tedy nejvíce podobá pravidelnému kruhu a lze tvrdit, že jejich tvar je kompaktnější. Pro povodí vodoměrných stanic lze z výsledků průměrných hodnot Shape indexu vyvodit stejný závěr, avšak porovnáme-li rozsah hodnot, v rámci povodí vodoměrných stanic spadá do nejstabilnější kategorie i povodí s nejvyšší hodnotou Shape indexu. Pro povodí vodoměrných stanic není tedy vztah mezi hodnotou Shape indexu a kategorií územní stability tak jednoznačný jako u povodí III. řádu.

Hodnoty specifického odtoku dosahují nižších hodnot ve stabilnějších povodích III. řádu než v povodích málo stabilních. Tato skutečnost může být způsobena zadržením vody vegetací. V povodích pokrytých z větší části lesy totiž hodnoty specifického odtoku klesají. Dalším faktorem, který snižuje hodnoty specifického odtoku, může být ovšem i infiltrace vody. Nejvyšší hodnoty specifického odtoku jsou

v povodí označeném PMO10, které je kategorizováno jako nestabilní území. Tato skutečnost zase může být způsobena přítomností např. zemědělské půdy, protože voda na polích nebývá zadržena vegetací a rovnou odtéká. Dále to může být způsobeno úpravou říčních koryt v obydlených oblastech apod. Při hodnocení specifického odtoku v rámci povodí vodoměrných stanic, platí následující vztah: čím stabilnější území, tím vyšší průměrné hodnoty dlouhodobého průměrného specifického odtoku (viz tabulka 11.20). Rozdíly v porovnání s povodími III. řádu jsou pravděpodobně způsobeny rozlohou jednotlivých povodí, která má na specifický odtok významný vliv (viz kapitola 6). Samozřejmě důležitými faktory mohou být i fyzicko-geografické podmínky povodí (sklon, typ podloží apod.).

Porovnáme-li hustotu říční sítě hrubých úseků (viz tabulka 11.21), tak pro nejstabilnější povodí III. řádu i povodí vodoměrných stanic platí, že mají nejvyšší hodnoty průměrné hustoty říční sítě. Podobně i u říční sítě jemných úseků platí pro povodí III. řádu i pro povodí vodoměrných stanic, že čím stabilnější území, tím je hustší říční síť. Z následujících výsledků lze poukázat na problematiku při měření hustoty říční sítě, na kterou upozorňuje Stoddart (1997) – viz kapitola 6. Výsledek hustoty říční sítě se totiž odráží od toho, jak podrobná je říční síť a které všechny vodní toky jsou zahrnuty do výpočtu. Zvolené modely říční sítě (model hrubých úseků a model jemných úseků) se totiž liší podrobností zobrazených vodních toků (viz kapitola 7). Proto vodní toky, které nejsou zobrazeny v modelu hrubých úseků, mohou při hodnocení hustoty říční sítě hrát velmi důležitou roli.

Tab. 11.21 Hodnoty hustoty říční sítě pro povodí III. řádu

Koeficient ekologické stability		Hustota HU (km/km²)		Hustota JU (km/km²)	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
≤ 0,33	2	0,414 - 0,518	0,466	0,736 - 0,982	0,859
0,33 < K _{ES} ≤ 0,5	10	0,508 - 0,520	0,507	0,809 - 1,653	1,209
0,5 < K _{ES} ≤ 0,66	3	0,341 - 0,584	0,495	1,171 - 1,444	1,297
K _{ES} ≥ 0,66	2	0,508 - 0,590	0,549	1,680 - 2,079	1,879

poznámka: hustota HU= hustota říční sítě modelu hrubých úseků, hustota JU= hustota říční sítě modelu jemných úseků

Tab. 11.22 Hodnoty hustoty říční sítě pro povodí vodoměrných stanic

Koeficient ekologické stability		Hustota HU (km/km²)		Hustota JU (km/km²)	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
≤ 0,33	11	0,277 - 0,620	0,516	0,440 - 1,478	1,223
0,33 < K _{ES} ≤ 0,5	4	0,414 - 0,577	0,504	1,342 - 1,780	1,564
0,5 < K _{ES} ≤ 0,66	5	0,363 - 0,568	0,468	1,336 - 1,994	1,694
K _{ES} ≥ 0,66	7	0,382 - 0,693	0,564	1,384 - 2,108	1,729

poznámka: hustota HU= hustota říční sítě modelu hrubých úseků, hustota JU= hustota říční sítě modelu jemných úseků

Normalizovaný Spin index dosahuje nejnižší průměrné hodnoty pro nejméně stabilní území, pro stabilnější povodí jeho průměrná hodnota roste, avšak ne zcela lineárně. To samé platí i pro normalizovaný Exchange index. Lze tedy říct, že stabilnější povodí mají kompaktnější tvar. Pro povodí vodoměrných stanic však nelze vyvodit stejný závěr, nejvyšší průměrné hodnoty indexů se vyskytují v nejméně stabilní kategorii povodí.

Tab. 11.23 Hodnoty spin indexu a Exchange indexu pro povodí III. řádu

Koeficient ekologické stability		nSpin		nExchange	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
$\leq 0,33$	2	0,551 - 0,577	0,564	0,617 - 0,698	0,658
$0,33 < K_{ES} \leq 0,5$	10	0,402 - 0,915	0,658	0,522 - 0,882	0,708
$0,5 < K_{ES} \leq 0,66$	3	0,558 - 0,907	0,767	0,638 - 0,875	0,785
$K_{ES} \geq 0,66$	2	0,557 - 0,840	0,718	0,622 - 0,840	0,731

poznámka: spin = normalizovaný Spin index, Exchange= normalizovaný Exchange index

Tab. 11.24 Hodnoty spin indexu a Exchange indexu pro povodí vodoměrných stanic

Koeficient ekologické stability		nSpin		nExchange	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
$\leq 0,33$	11	0,494 - 0,918	0,773	0,614 - 0,882	0,779
$0,33 < K_{ES} \leq 0,5$	4	0,377 - 0,842	0,629	0,450 - 0,822	0,668
$0,5 < K_{ES} \leq 0,66$	5	0,456 - 0,944	0,763	0,540 - 0,896	0,768
$K_{ES} \geq 0,66$	7	0,545 - 0,938	0,759	0,603 - 0,901	0,764

poznámka: spin = normalizovaný Spin index, Exchange= normalizovaný Exchange index

Následující tabulky 11.25, 11.26, 11.27 a 11.28 prezentují hodnoty fraktální dimenze tvaru povodí a tvaru říční sítě. Z výsledků průměrných hodnot fraktální dimenze nelze stanovit jednoznačně obecný vztah mezi kategorií koeficientu ekologické stability. U povodí III. řádu je nejnižší průměrná hodnota fraktální dimenze tvaru povodí u nejméně stabilních povodí, pro následující kategorie hodnota stoupá, avšak nejstabilnější povodí ($K_{ES} \geq 0,66$) mají nižší hodnoty fraktální dimenze než předcházející kategorie $0,5 < K_{ES} \leq 0,66$).

Tab. 11.25 Hodnoty fraktální dimenze tvaru povodí pro povodí III. řádu

Koeficient ekologické stability		FD tvar	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr
$\leq 0,33$	2	1,529 - 1,616	1,573
$0,33 < K_{ES} \leq 0,5$	10	1,554 - 1,669	1,634
$0,5 < K_{ES} \leq 0,66$	3	1,659 - 1,693	1,671
$K_{ES} \geq 0,66$	2	1,627 - 1,634	1,631

poznámka: FD tvar = fraktální dimenze tvaru povodí

Tab. 11. 26 Hodnoty fraktální dimenze tvaru říční sítě pro povodí III. řádu

Koeficient ekologické stability		FD HU		FD JU	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
$\leq 0,33$	2	1,184 - 1,307	1,246	1,262 - 1,444	1,353
$0,33 < K_{ES} \leq 0,5$	10	1,252 - 1,381	1,325	1,373 - 1,546	1,461
$0,5 < K_{ES} \leq 0,66$	3	1,347 - 1,396	1,364	1,479 - 1,534	1,514
$K_{ES} \geq 0,66$	2	1,316 - 1,348	1,332	1,484 - 1,549	1,517

poznámka: FD HU = fraktální dimenze říční sítě modelu hrubých úseků, FD JU = fraktální dimenze sítě modelu jemných úsek

Průměrné hodnoty fraktální dimenze tvaru povodí vodoměrných stanic jsou nejvyšší u nejméně stabilních povodí (kategorie $\leq 0,33$). Fraktální dimenze říční sítě (modelu hrubých i jemných úseků) je také nejvyšší pro kategorii nejméně stabilních povodí (kategorie $\leq 0,33$).

Tab. 11.27 Hodnoty fraktální dimenze tvaru povodí pro povodí vodoměrných stanic

Koeficient ekologické stability		FD tvar	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr
$\leq 0,33$	11	1,573 - 1,749	1,696
$0,33 < K_{ES} \leq 0,5$	4	1,458 - 1,717	1,618
$0,5 < K_{ES} \leq 0,66$	5	1,491 - 1,711	1,596
$K_{ES} \geq 0,66$	7	1,518 - 1,738	1,618

poznámka: FD tvar = fraktální dimenze tvaru povodí

Tab. 11.28 Hodnoty fraktální dimenze tvaru říční sítě pro povodí vodoměrných stanic

Koeficient ekologické stability		FD HU		FD JU	
kategorie	počet povodí v kategorii	rozsah	průměr	rozsah	průměr
$\leq 0,33$	11	1,100 - 1,273	1,195	1,209 - 1,418	1,326
$0,33 < K_{ES} \leq 0,5$	4	0,953 - 1,229	1,108	1,139 - 1,364	1,285
$0,5 < K_{ES} \leq 0,66$	5	0,980 - 1,242	1,105	1,151 - 1,416	1,288
$K_{ES} \geq 0,66$	7	1,055 - 1,232	1,152	1,244 - 1,392	1,312

poznámka: FD HU = fraktální dimenze říční sítě modelu hrubých úseků, FD JU = fraktální dimenze říční sítě modelu jemných úseků

12 DISKUZE

Klíčovou rolí při výpočtu tvarových metrik mají vstupní data a hlavně jejich podrobnost – měřítko. V databázi DIBAVOD jsou data o povodí a říční síti k dispozici v měřítku 1:10 000. Dalším poskytovatelem prostorových dat z oblasti hydrologie v České republice je Hydroekologický informační systém (HEIS VÚV), který je centrálním informačním systémem VÚV TGM, v.v.i. v oblasti vodního hospodářství a ochrany vod a informačním zdrojem pro uživatele z řad veřejné správy a odborné i laické veřejnosti. Osobní konzultací s vedoucím oddělení GIS a kartografie VÚV TGM, v.v.i. (Fojtík, 2015), bylo zjištěno, že dostupná data o povodí a vodních tocích jsou jednotná pro celý VÚV T.G.M., tj. v rámci databáze HEIS i DIBAVOD. Přesnější a podrobnější data spravuje v České republice jediné Český hydrometeorologický ústav, data však nejsou dostupná veřejnosti a v současnosti jsou aktualizována (Fojtík, 2015). Potřebná data (povodí a vodní toky) nebyla v průběhu zpracování této práce k dispozici v rámci HEIS, proto byl jako zdroj prostorových dat využita databáze DIBAVOD.

Vzhledem k rozmístění vodoměrných stanic, nebylo možné pro všechna povodí III. řádu získat data z míst z uzávěrových profilů, proto byla použita data ze stanic, které leží nejbližší uzávěrovému profilu povodí. Z tohoto důvodu nemusí být výsledky dlouhodobého průměrného specifického odtoku či průměrného ročního objemu odtoku zcela přesné, avšak lze předpokládat, že v hodnotách dlouhodobého průměrného průtoku nebudou tak velké rozdíly.

V diplomové práci jsou posuzovány pouze geometrické vlastnosti povodí. Odtok z povodí je ovlivněn i mnoha jinými faktory, než je pouze tvar povodí či říční sítě, nicméně tyto další faktory nebyly v práci zvlášť hodnoceny. Jediné srovnání povodí bylo provedeno posouzením struktury krajiny na základě výpočtu koeficientu ekologické stability.

Vymezení povodí III. řádu bylo převzato tak, jak je prezentováno v databázi DIBAVOD, konkrétně dle hydrologického členění České republiky, které je dáno obsahem části publikace Hydrologické poměry vydávané Českým hydrometeorologickým úřadem (Linhartová a Zbořil, 2005). Langhammer et al. (2010) uvádí, že úroveň členění povodí III. řádu dle absolutního modelu řádovosti členění území České republiky na povodí, která jsou z hlediska přírodních podmínek výrazně variabilní. Na povodích je vysoká variabilita charakteristik reliéfu, podloží i nadmořských výšek. Tyto faktory samozřejmě ovlivňují vývoj vodních toků a odtokové podmínky, na území se tedy nachází i velmi rozmanité typy vodních toků (Langhammer et al., 2010). Jedná se pak tedy o relativně heterogenní povodí. V hydrologii se používá mnoho metod pro stanovení řádovosti toků. Pavelková Chmelová et al., 2013 uvádí, že v současnosti existuje asi 11 různých klasifikací řádovosti vodních toků. Mezi nejvýznamnější metody patří Graveliova metoda (jedná se o klasifikaci absolutní řádovosti vodních toků), relativní řádovost toků je klasifikována pomocí Strahlerovy klasifikace, Hortonovy klasifikace nebo např. Shrevovy klasifikace (Pavelková Chmelová et al., 2013). Nabízí se tedy otázka, zda některá z těchto zmíněných metod relativní klasifikace říční sítě a následného vymezení povodí dle zmíněných klasifikací není vhodnější pro vymezení zájmových povodí. Například řád toku podle Strahlera je totiž v ekologické literatuře používán jako základní souhrnná typologická charakteristika, v tocích stejného řádu lze pak nalézt srovnatelná společenstva vodních organismů nebo stejné fyzikální podmínky (Langhammer, 2007). Na druhou stranu Langhammer et al. (2010) srovnává povodí III. řádu s úrovní povodí IV. řádu, která představuje detailnější členění a poukazuje na to,

že toto členění povodí IV. řádu umožňuje velmi dobře postihnout variabilitu přírodních podmínek. Právě povodí vodoměrných stanic jsou vymezena rozvodnicí povodí IV. řádu. Lze tedy předpokládat, že tato povodí jsou více homogenní než vybraná povodí III. řádu.

Výpočet fraktální dimenze objektů, které se nachází v přírodě je velmi složitý, téměř nemožný (Tišnovský, 1999). Proto byly zavedeny metody, které slouží k odhadu fraktální dimenze. Výsledky těchto metod jsou však ve většině případů prezentovány jako fraktální dimenze daného objektu, jedná se ovšem v některých případech o výpočet jiných dimenzí než je právě fraktální dimenze. Například box counting metoda počítá tzv. mřížkovou dimenzi (Weisner, 2006). Hotař (2006) ale uvádí, že výsledky získané box counting metodou by se v ideálním případě měly rovnat skutečné fraktální dimenzi. Hotař (2006) dále uvádí, že pro každý objekt může být vhodná jiná metoda odhadu fraktální dimenze, proto je vhodné pro každý objekt provést i více odhadů za použití různých metod. Avšak nikde není uvedeno, která metoda je nejvhodnější pro daný objekt, v této diplomové práci byly k odhadu fraktální dimenze použity různé metody (box counting metoda, radius mass a metoda implementovaná v programu V-LATE). Právě použití různých metod přineslo různé hodnoty odhadu fraktální dimenze. Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledky výpočtu je samozřejmě i samotné nastavení parametrů metody pro odhad fraktální dimenze (viz kapitola 7, kde je rozebráno nastavení parametrů box counting metody) a parametry vstupních dat (např. typ dat a prostorové rozlišení). Vzhledem k rozdílům mezi hodnotami fraktálních dimenzí, je tedy těžké stanovit vztah mezi touto metrikou a charakteristikami o odtoku. Rozdíly v hodnotách korelačních koeficientů jsou totiž také značné.

Janoška (2011) diskutuje způsob výpočtu fraktální dimenze nad vektorovými daty v programech V-LATE a Patch Analyst. Janoška (2011) upřesňuje, že se v podstatě nejedná o odhad fraktální dimenze, protože není splněna podmínka, kdy je objekt sledován v různých měřítkách, což například v případě box counting metody dodrženo je (Hotař, 2006; Tišnovský, 1999). Ač jsou výsledky prezentovány jako fraktální dimenze, tak stojí za zvážení, zda je zde pojem fraktální dimenze použit správně a nejedná-li se pouze charakteristiku složitosti tvaru.

Dnes již existuje řada programů pro výpočet krajinných metrik nebo odhad fraktální dimenze (viz kapitola 5). Mnoho programů je však vytvořeno nadšenými programátory nebo vědeckými pracovníky z různých oborů. Uživatelská dokumentace pro některé programy je pak velmi stručná a není zabezpečena technická podpora pro uživatele. Nástroj Shape Metrics Tool je například kompatibilní pouze s verzí ArcGIS 9.3. V průběhu práce bylo vyzkoušeno více softwarů a nástrojů, než uvádí kapitola 5, avšak jejich instalace byla problematická (např. PolyFrac) nebo uživatelská podpora nebyla dostatečná k použití programu (incSIM).

Z literatury je znám vliv tvaru povodí na odtok při povodních. Tato diplomová práce se však snažila zhodnotit vliv geometrických vlastností povodí a říční sítě na dlouhodobé charakteristiky o odtoku, které jsou běžně sledovány v měrných profilech řek a vodoměrných stanicích. Neexistuje-li vztah mezi výše zmíněnými dlouhodobými charakteristikami o odtoku, závislost mezi tvarovou metrikou a například tvarem hydrogramu povodně se však nevyklučuje. Některé tvarové metriky hodnotí tvar povodí např. z pohledu jeho protáhlosti (normalizovaný Spin index, Proximity Index) či podobný kruhu (Shape index). V hydrologii jsou již používány indexy pro hodnocení tvaru povodí, dokonce byla nalezena shoda mezi Shape indexem a Gravellovým koeficientem (vzorec pro jejich výpočet je založen na stejném principu, viz vzorec 6.1 a 7.2). Na základě těchto faktů lze předpokládat, že tvarové metriky jsou vhodný nástroj pro hodnocení tvaru povodí.

13 ZÁVĚR

Tato práce se snaží přiblížit možnosti použití tvarových metrik v geovědách, konkrétně v hydrologii při studiu tvaru povodí a tvaru říční sítě. Cílem diplomové práce bylo stanovení vlivu geometrických vlastností povodí použitím tvarových metrik na odtok z povodí. Tvarové metriky spadají do skupiny metrik, které jsou využívány v krajinné ekologii, avšak své uplatnění nachází i v jiných vědeckých oborech. Jedná se totiž o metriky, které poskytují matematicky podložené informace o plochách, popř. liniích.

Významným výstupem této diplomové práce je také její teoretická část, která přináší přehled aplikace krajinných metrik v různých vědních disciplínách, poukazuje na nejednotnost v používání termínů týkajících se krajinných, tvarových a prostorových metrik, přináší přehled dosavadních poznatků využití fraktální geometrie v oblasti studia řek (kapitola 4). Součástí této práce je i rešerše softwarových možností pro výpočet krajinných metrik a fraktální dimenze, která podává přehled o dostupných programech pro jejich výpočet (kapitola 5). Teoretická část práce se dále věnuje hydrografii řek a odtoku z povodí. V kapitole 6 jsou popsány základní pojmy z oblasti hydrologie, jakým jsou povodí a říční síť, charakteristiky, které se využívají k popisu povodí či říční sítě, dále měrné jednotky odtoku a v neposlední řadě jsou v kapitole 6 shrnuty i dosavadní poznatky o vlivu geometrických vlastností na odtok z povodí.

Zájmovou oblastí diplomové práce jsou oblasti povodí Moravy a Dyje, pro které byly provedeny 2 případové studie. První studie hodnotí pomocí tvarových metrik povodí III. řádu dle hydrologického členění v České republice. Pro druhou studii byla vybrána některá povodí, která jsou vymezená na základě polohy vodoměrných stanic (jedná se tedy o menší povodí než v první studii). Lze tedy porovnat aplikaci tvarových metrik ve dvou odlišných úrovních velikosti povodí. Celkem tedy bylo vybráno 17 povodí III. řádu a 27 menších povodí. Pro tvar výše zmíněných povodí a pro jejich říční síť byla vypočítána řada tvarových metrik v různých programech (Patch Analyst, V-LATE, StraKA, Shape Metrics Tool). Také byly použity programy pro výpočet fraktální dimenze (konkrétně programy FRACTALYSE a Fractal Analysis Software).

Tvarové metriky byly vypočítány nad prostorovými daty z databáze DIBAVOD. Výsledky hodnot jednotlivých metrik pro obě kategorie povodí jsou představeny a popsány v kapitole 11, některé výsledky jsou přiloženy v Příloze 2, 4 a 5, kompletní výsledky jsou v Příloze 8. Vzájemný vztah mezi hodnotami metrik a daty o odtoku byl hodnocen využitím korelační analýzy. Z dat o průměrných dlouhodobých ročních průtocích, která poskytl státní podnik Povodí Moravy s. p., byly vypočítány hodnoty specifického odtoku a objem odtoku pro jednotlivá povodí. Tyto veličiny vstupovaly jako proměnná reprezentující data o odtoku do korelační analýzy. Výsledky a hodnocení korelačních koeficientů mezi tvarovými metrikami a veličinami o odtoku jsou pak prezentovány v kapitole 11.

Dále bylo provedeno srovnání povodí na základě hodnot koeficientu ekologické stability. Koeficient ekologické stability byl pro jednotlivá povodí vypočítán na základě kategorií využití země z dat Corine Land Cover 2006, přičemž pro výpočet koeficientu byly použity 2 metodiky. První podle Míchala (1985), která pouze srovnává podíl ploch stabilních a nestabilních a druhá podle Miklóse (1986), která jednotlivým kulturám přiřazuje navíc koeficient ekologické významnosti, který pak vstupuje do výpočtu. Dle hodnot ekologického koeficientu byla provedena kategorizace povodí, která je běžně využívána (Večerník, 2008; Lipský, 1994). Dle struktury krajiny podle KES dle Miklóse

(1986) byly zhodnoceny vybrané metriky a charakteristiky o odtoku. Výsledky hodnocení jsou popsány v kapitole 11.

Tvarové metriky jsou vhodným nástrojem k hodnocení tvaru ploch, resp. povodí, z jejich výsledků lze jistě identifikovat kompaktnost či roztříštěnost ploch. Při pohledu na tvar jednotlivých povodí (náhledy obrázků jsou v Příloze 1), lze výsledné hodnoty tvarových metrik pokládat za spolehlivé. Avšak jejich interpretace je relativně složitá, v mnoha případech do jisté míry subjektivní.

Vzhledem k širokému spektru tvarových metrik je velmi těžké obecně zhodnotit vztah mezi tvarovými metrikami a charakteristikami o odtoku. Některé hodnoty metrik vykazují nízký až mírný stupeň závislosti s charakteristikami o odtoku, vyššího stupeň závislosti bylo dosaženo pouze v případě použití nenormalizované podoby Range indexu (index ze skupiny Shape metrics Tool indexů) pro povodí vodoměrných stanic. Právě i podle skupiny povodí (povodí III. řádu a povodí vodoměrných stanic) se výsledky závislosti mezi veličinami liší. To samé lze tvrdit i při využití fraktální geometrie. Odhad fraktální dimenze je velmi citlivý na zvolenou metodu výpočtu a nastavení parametrů, výsledky se tedy velmi liší v závislosti na použitém programu a metodě odhadu fraktální dimenze a také podle skupiny povodí, pro kterou jsou metriky počítány.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

AMIRI, Bahman Jabbarian a Kaneyuki NAKANE. Modeling the Linkage Between River Water Quality and Landscape Metrics in the Chugoku District of Japan. *Water Resources Management*. 2008, vol. 23, issue 5, s. 931-956. DOI: 10.1007/s11269-008-9307-z.

ANGELES, Guillermo R, Gerardo M. E PERILLO, M.Cintia PICCOLO a Jorge O PIERINI. Fractal analysis of tidal channels in the Bahía Blanca Estuary (Argentina). *Geomorphology*. 2004, vol. 57, 3-4, s. 263-274. DOI: 10.1016/s0169-555x(03)00106-5.

BAJKIEWICZ-GRABOWSKA, E., Olszewski, R., 2001. Czy prawa Hortona poprawnie opisują fraktalną strukturę sieci rzecznych? (Do Horton's laws describe the fractal structure of river networks correctly?). *Przegl. Geofiz.* 46 (3), 223–239.

BALEJ, M.: Landscape Ecology and Landscape Metrics – Potential and/or Risk for Landscape Assessment. *Životné prostredie*, 2011, 45, 4, p. 171 – 175.

BAO, Tran Quang a Melinda J. LAITURI. The effects of watershed characteristics on storm runoff relationships in Vietnam. *Journal of Environmental Science and Water Resources*. 2013, č. 2. Dostupné z: <http://www.wudpeckerresearchjournals.org/JESWR/pdf/2013/March/Bao%20and%20Laituri.pdf>

BARTOLO, Samuele G. De, Massimo VELTRI a Leonardo PRIMAVERA. Estimated generalized dimensions of river networks. *Journal of Hydrology*. 2006, vol. 322, 1-4, s. 181-191. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.02.033.

BATTY M., LONGLEY P., 1994, *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, Academic Press Ltd., London, San Diego, 1994, 394 s.

BISKUP, Roman. 2009. Regresní a korelační analýza – Úvod do problému [online prezentace]. České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Ekonomická fakulta (Zemědělská fakulta), Katedra aplikované matematiky a informatiky, [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://home.ef.jcu.cz/~birom/stat/prednasky/17.pdf>

ČEPOVÁ, Daniela. 2012. *Softwarové možnosti výpočtu fraktální dimenze geografických jevů* [online]. Olomouc [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://theses.cz/id/1kr59n>. bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

ENVICONS. 1. ODTOKOVÉ POMĚRY V ÚZEMÍ: Píšť - Protipovodňová a protieroční ochrana. [online]. 2013 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.pist.cz/UserFiles/files/odtokove-pomery-v-uzemi/761720896689947308.pdf>

FAC-BENEDA, Joanna. Fractal structure of the Kashubian hydrographic system. *Journal of Hydrology*. 2013, vol. 488, s. 25-47. DOI: 10.1515/9783110813388.25. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216941300156X>

FOJTÍK, Tomáš. Osobní rozhovor s vedoucím oddělení GIS a kartografie VÚV TGM, v.v.i., 10. 4. 2015.

FORMAN, R. T. T., GODRON, M.: Krajinná ekologie, Praha: Academia, 1993. 582 s. ISBN 80-200-0464-5.

FRYIRS, Kirstie A. a Gary J. BRIERLEY. *Geomorphic Analysis of River Systems: An Approach to Reading the Landscap*. New York: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 9781118305447.

GEOGHEGAN, Jacqueline, Lisa A. WAINGER a Nancy E. BOCKSTAEL. Spatial landscape indices in a hedonic framework: an ecological economics analysis using GIS. *Ecological Economist*. 1997, č. 23. Dostupné z: ftp://131.252.97.79/Transfer/ES_Pubs/ESVal/hedonics/geoghegan_97_LandscapeIndicator_and_Hedonic.pdf

GÖKYER, Ercan (2013). Understanding Landscape Structure Using Landscape Metrics, *Advances in Landscape Architecture*, Dr. Murat Ozyavuz (Ed.), ISBN: 978-953-51-1167-2, InTech, DOI: 10.5772/55758. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-landscape-architecture/understanding-landscape-structure-using-landscape-metrics>

GRYGAR, Radomír a Jan JELÍNEK. Fluviální procesy. *Geomorfologie pro technické obory* [online]. c2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/geomorfologie/Prednasky/9_kapitola.htm

GUSTAFSON, Eric J. Minireview: Quantifying Landscape Spatial Pattern. *Ecosystems*. 1998, vol. 1, issue 2, s. 143-156. DOI: 10.1007/s100219900011. Dostupné z: <http://landscape.forest.wisc.edu/courses/readings/Gustafson%201998.pdf>

HAVLÍK, Aleš. *Základy hydrologie* [online prezentace]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Vin/ke_stazeni/Hydrologie.pdf

HAWTHORNE, Beyer. *Hawth's Analysis Tools for ArcGIS* [online]. c2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://www.spatial ecology.com/htools/index.php>

HERBER, V. SUDA, J. 1994. Cvičení z fyzické geografie I. Hydrologie. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 93 s.

HEROLD, Martin, Helen COUCLELIS a Keith C. CLARKE. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2005, vol. 29, issue 4, s. 369-399. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2003.12.001. Dostupné z: ftp://148.231.212.8/Backups/CISE/RESPALDO_ARTTESIS/CUS/spacialanalysisdina micasurbanas.pdf

HEROLD, Martin. *Remote Sensing and Spatial Metrics for Mapping and Modeling of Urban Structures and Growth Dynamics*. Santa Barbara, 2004. Dostupné z: http://www.geog.ucsb.edu/graduates/phd-dissertations/pdf/Herold_Martin_Dissertation_2004.pdf. Disertační práce. University of California.

HOTAŘ, Vlastimil. Fraktální geometrie [online]. 2006, 21. 11. 2011 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/index.html>.

CHALUPA P., HORNÍK S., *Zeměpis České republiky*, 2. vyd., 72 str., SPN, Praha 2005. ISBN: 80-7235-307-1.

CHORLEY, R. J., and P. F. DALE, Cartographic problems in stream channel delineation, *Cartography*, 7, 150–162, 1972

ITURBE, Rodríguez Ignacio a Andrea RINALDO. *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization: chance and self-organization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. ISBN 05-210-0405-5.

JAKŠLOVÁ, Šárka. *Režim podzemních vod vybraných povodí v oblasti Dolní Rožínky*. Brno, 2009. 39 l. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/151177/prif_m/Diplomka-Rozinka.txt. Diplomová práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce Mgr. Tomáš Kuchovský, Ph.D.

JANOŠKA, Zbyněk. Hausdorffova dimenze při studiu sídel [online]. Olomouc, 2011, 11. 4. 2011 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: http://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/janoska11/files/dp_janoska.pdf. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci.

JIAO, L. a Y. LIU. *Analyzing the shape characteristics of land use classes in remote sensing imagery*. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia*. 2012, s. 135-140. DOI: 10.5194/isprsannals-i-7-135-2012. Dostupné z: <http://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/I-7/135/2012/isprsannals-I-7-135-2012.pdf>

KALKUS, Jan. Možnosti hodnocení variability odtoku v experimentálních povodích na šumavě. Praha, 2012. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/118677/?lang=en>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce RNDr. Zdeněk Kliment, CSc.

KARVÁNKOVÁ, Petra. 2010. *Lokální environmentální témata v Dyjské části Znojemska* [online]. Brno [cit. 2015-05-08]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/41596/prif_d/Karvankova_P_disertacni_prace.pdf. disertační práce. Masarykova univerzita.

KEMEL, Miroslav. *Hydrologie*. Praha: ČVUT, 1991. 222 s. ISBN 80-01-00509-7.

KHANBABAEI, Zahra, Amir KARAM a Ghobad ROSTAMIZAD. Studying Relationships between the Fractal Dimension of the Drainage Basins and Some of Their Geomorphological Characteristics. *International Journal of Geosciences*. 2013, vol. 04, issue 03, s. 636-642. DOI: 10.4236/ijg.2013.43058.

KUPSOVÁ, Vendula. *Ochrana a organizace povodí* [online]. Brno, 2007 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/lide/clovek.pl?id=2764;zalozka=13;studium=22556>. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce František Toman.

LA BARBERA, ROSSO. On the fractal dimension of stream network. *Water Resour. Res.*, 1989, vol. 25, issue 4, s. 735–741.

LAFORTEZZA, Raffaele. *Patterns and processes in forest landscapes multiple use and sustainable management*. Dordrecht: Springer, 2008. ISBN 14-020-8504-4.

LANGHAMMER, Jakub. 2007. *Hydrologie – odtokový proces* [online prezentace]. Praha: Karlova univerzita v Praze, [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~langhamr/lectures/hydro/pdf/Hydrologie_1_Langhammer_odtok_proces.pdf

LANGHAMMER, Jakub, Filip HARTVICH a Aleš ZBOŘIL. *Metodika vymezení útvarů povrchových vod* [online]. Praha, 2010 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.dibavod.cz/data/metodika_vymezeni_vu.pdf

LI, H. a J. WU, 2004. Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*. 19, 389-399. ISSN 1184-5669.

LINHARTOVÁ, Irena a Aleš ZBOŘIL. *Charakteristiky vodních toků a povodí ČR*. 1. vyd. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, 2006, [250] s. ISBN 80-859-0062-9. Dostupné z: http://www.dibavod.cz/data/text_charakteristiky_toku.pdf

LIPSKÝ, Zdeněk. *Krajinná ekologie pro studenty geografických oborů*. Praha: Karolinum, 1998. ISBN 80-7184-545-0

LIPSKÝ, Zdeněk. *Sledování změn v kulturní krajině: učební text pro cvičení z předmětu Krajinná ekologie*. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, 2000, 71 s., 4 s. obr. příl. ISBN 80-213-0643-2.

LIPSKÝ, Zdeněk. Změna struktury české venkovské krajiny. *Sborník ČGS*, 1994, 99.1994: 4.

MANDELBROT, Benoît B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W. H. Freeman. ISBN 0-7167-1186-9.

MANDELBROT, Benoît B. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. *Science, New Series*, 1967, Vol. 156, No. 3775. (May 5, 1967), s. 636-638. doi:10.1126/science.156.3775.636

MCGARIGAL, Kevin. UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS, Amherst. *Fragstats HELP*. 2015. Dostupné z: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf>

MIKLÓS, L. 1986. Stabilita krajiny v Ekologickom genereli SSR. Bratislava, *Životné prostredie*, 20, 2, p. 87-93.

MORENCY, Catherine a Robert CHAPLEAU. Fractal geometry for the characterisation of urban-related states: Greater Montreal Case. *HarFa: Harmonic and Fractal Image Analysis* [online]. 2003 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download_ejournal/09_C.Morency.pdf

MORISAWA, M., 1957. Accuracy of determination of stream lengths from topographic maps. *Transactions, American Geophysical Union* 38, 86-88

NETOPIL, Rostislav, Rudolf BRÁZDIL, Jaromír DEMEK a Pavel PROŠEK. *Fyzická geografie 1*. Vyd. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1984, 258 s. Učebnice pro vysoké školy. ISBN 14-383-84.

O'NEILL, R. V., KRUMMEL, J. R., GARDNER, R. H., SUGIHARA, G., JACKSON, B., DEANGELIS, D. L., MILNE, B. T., TURNER, M. G., ZYGMUNT, B., CHRISTENSEN, S. W., DALE, V. H., & GRAHAM, R. L. (1988). Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1, 153–162. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: http://deepeco.ucsd.edu/~george/Publications/88_indices_of_landscape_pattern.pdf

PARENT, Jason, Daniel CIVCO a Shlomo ANGEL. Shape Metrics. In: *Center for Land Use Education and Research* [online]. 2009 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://clear.uconn.edu/tools/Shape_Metrics/pubs.htm

PÁSZTO, Vít; MAREK, Lukáš; TUČEK, Pavel. Are Shape Metrics Useful for a Geocomputation? CORINE Land-Cover Analysis Case Study. In: *DATESO*. 2013. p. 26-35.

PAVELKOVÁ CHMELOVÁ, Renata a Jindřich FRAJER. *Základy fyzické geografie 1: Hydrologie*. 1. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013, 141 s. Studijní opory. ISBN 978-802-4438-436.

PECHANEC, V., PAVKOVÁ, K, DOBEŠOVÁ, Z. (2008): STRAKA a spol. – GIS nástroje pro analýzu struktury krajiny, Sborník příspěvků semináře "ÚSES – zelená páteř krajiny", Brno, 10 s.

PIXOVÁ, K. a P. SKLENIČKA, 2005. Applying spatial heterogeneity indices in changing landscapes in the Czech Republic. In BÄRBEL, T. (Ed.). *From Landscape Research to Landscape planning { Aspects of Integration, Education and Application*. Dordrecht: Springer, 355-364. ISBN 1-4020-3978-6.

REMPEL, Robert. Centre for northern forest ecosystem research. *Patch analyst for ArcGIS®*. c2015. [cit. 2015-01-12]. Dostupné z: <http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/images/patchanalyst.pdf>

RICHARDSON, L. (1961) The Problem of Contiguity: An Appendix of Statistic of Deadly Quarrels. *General Systems Year Book*, 61, 139-187.

RUTLEDGE, Daniel. Landscape indices as measures of the effects of fragmentation: can pattern reflect process?. *DOC SCIENCE INTERNAL SERIES* 9. 2003. [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://doc.govt.nz/Documents/science-and-technical/DSIS98.pdf>

SASAKI, Hiroyuki. *Fractal analysis software* [online]. c2015 [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: <http://cse.naro.affrc.go.jp/sasaki/fractal/fractal-e.html>

SHEN, X. H., L. J. ZOU, G. F. ZHANG, N. SU, W. Y. WU a S. F. YANG. Fractal characteristics of the main channel of Yellow River and its relation to regional tectonic evolution. *Geomorphology*. 2011, vol. 127, 1-2, s. 64-70. DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.12.007.

SCHULLER, D. J., A. R. RAO a G. D. JEONG. Fractal characteristics of dense stream networks. *Journal of Hydrology*. 2001, vol. 243, 1-2, s. 1-16. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00395-4.

STARÝ, Miloš. *Hydrologie: Modul 02*. Brno, 2005. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BR51-Hydraulika%20a%20hydrologie%20%28K%29,%28V%29/M02-Hydrologie%20-%20pokracovani.pdf>

ŠEVČÍK, Jan. *Studium populace bakterií pomocí metod obrazové analýzy*. Brno, 2014. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83184. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Oldřich Změškal.

TARBOTON, DG, Bras, RL, RODRÍGUEZ-ITURBE, I (1988) The fractal nature of river networks. *Water Resour Res* 24: pp. 1317-1322

TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Interaktivní editor afinních transformací*[online]. (c)1999 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/publikace/diplomka/doc/ifscad.html>.

TOMÁŠEK, P. Využití krajinných indexů pro hodnocení suburbanizované krajiny. *Littera Scripta*. 2013, 6(1), 183{197. ISSN 1805-9112.

TREWARTHA, G., T., ROBINSON, A., H., HAMMOND, E., H. (1957): *Elements of geography*. McGraw-Hill Book Company, New York, 660 s.

UMASS AMHERST. *LANDSCAPE METRICS*. *UMass Amherst* [online]. c2015 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/Conceptual%20Backgroud/Landscape%20Metrics/Landscape%20Metrics.htm>

UUEMAA, Evelin, Marc ANTROP, Jüri ROOSAARE, Riho MARJA a Ülo MANDER. 2009. Landscape Metrics and Indices: An Overview of Their Use in Landscape Research. *Living Reviews in Landscape Research* [online]. 3(1) [cit. 2014-10-11]. DOI: 10.12942/lrlr-2009-1. Dostupné z: <http://landscaperesearch.livingreviews.org/Articles/lrlr-2009-1/>

VELTRI, M., P. VELTRI, M. MAIOLO. On the fractal description of natural channel networks. *Journal of Hydrology*. 1996, vol. 187, 1-2, s. 432-443. DOI: 10.4016/6696.01.

WALKER, Ian. *Výzkumné metody a statistika*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2013, 218 s. Z pohledu psychologie. ISBN 978-80-247-3920-5.

WALZ, Ulrich, "Landscape Structure, Landscape Metrics and Biodiversity", *Living Rev. Landscape Res.* 5, (2011), 3. URL [cit. 2014-23-09]. Dostupné z: <http://www.livingreviews.org/lrlr-2011-3>

WIESNER, Robert. *Užití a zneužití fraktálů*. Brno, 2006. 56 l. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/3506/fi_m/diplomka.pdf. Diplomová práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Zdeněk Pospíšil.

ZARAGOZÍ, B., A. BELDA, J. LINARES, J. E. MARTÍNEZ-PÉREZ, J. T. NAVARRO a J. ESPARZA. A free and open source programming library for landscape metrics calculations. *Environmental Modelling*. 2012, vol. 31, s. 131-140. DOI: 10.1016/j.envsoft.2011.10.009.

ZBOŘIL, Aleš. *DIGITÁLNÍ BÁZE VODOHOSPODÁŘSKÝCH DAT: DIBAVOD* [online]. Praha, 2005 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://heis.vuv.cz/informace/cojeto/VUV_DIBAVOD.pdf

ZHIHUI, Ni, Wu LICHUN, Wang MING-HUI, Yi JING a Zeng QIANG. The Fractal Dimension of River Length Based on the Observed Data. *Journal of Applied Mathematics*. 2013, vol. 2013, Article ID 327297, s. 1-9. DOI: 10.1155/2013/327297. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/jam/2013/327297/>

ZMEŠKAL, Oldřich, Michal VESELÝ, Martin NEŽÁDAL a Miroslav BUCHNÍČEK. Fractal Analysis of Image Structures. *HarFA e-journal*. 2001, č. 1 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download_ejournal/harfaejournal.pdf

Odkazy na webové stránky zmíněných softwarů:

Basic Raster Landscape Metrics Tools:

http://www.umesc.usgs.gov/management/dss/raster_landscape_tools.html

Shape Metrics Tool: http://clear.uconn.edu/tools/Shape_Metrics/

FRACTALYSE: <http://www.fractalyse.org/>

Fractal Analysis System: <http://cse.naro.affrc.go.jp/sasaki/fractal/fractal-e.html>

LECOS: <https://conservationecology.wordpress.com/qgis-plugins-and-scripts/lecos-land-cover-statistics/>

Fragstats: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>

Patch Analyst: <http://www.cnfer.on.ca/SEP/patchanalyst/>

Polyfrag: <http://www.nhview.unh.edu/polyfrag.html>

V-LATE: <https://sites.google.com/site/largvlate/gis-tools/v-late>

FracLac: <http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/fraclac/FLHelp/Introduction.htm>

HarFA: http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/includes/harfa_download.inc.php

r.li: <http://grass.osgeo.org/grass64/manuals/r.li.html>

StraKa:

<http://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/bakalarske/pavkova08/toolbox.html>

incSIM: <http://zoz.cbk.waw.pl/index.php/en/software-en/incsim>

FDim: <http://reuter.mit.edu/software/fdim/>

SUMMARY

Landscape metrics are one of the current topics in geography. Their application is discussed in various research fields focused on cities and urbanization processes, road networks or rivers. Although these metrics were originally designed for ecology, they are nowadays used in diverse scientific fields. Shape metrics are generally considered as a group of landscape metrics for evaluation of shape properties of patches. Another group of metrics describing the characteristics of a shape is fractal dimension. Various types of basic shape metrics were constructed to describe area, perimeter of a patch, as well as some advanced metrics, such as distances between interior points of a patch or distances between interior points and the centroid. The application of these metrics depends primarily on the purpose of the research and on the particular patch type which is studied. The choice of a shape metric could rapidly influence the results and their final interpretation. From this reason, we have to carefully choose the appropriate metrics.

The selected shape metrics were applied on the area of interest covering Morava basin and Dyje basin in the south-eastern part of the Czech Republic. Two different types of patches were used for two case studies in the second part of the thesis. The third order river basins of both rivers, as well as river basins defined by the location of water measuring stations were used in these two case studies. For the purpose of the case studies, 17 third order basins and 27 smaller basins were chosen. The number of the basins was influenced by the availability of runoff data for the basins located partly behind the borderline of the Czech Republic.

The main aim of this thesis was the application of selected shape metrics for studying the shape of river basins and the shape of river networks. Many different shape metrics were calculated for third order river basins and for river basins based on location of water measuring stations in the area of interest. Various software, applications and extensions were used for shape metrics calculation (Patch Analyst, V-LATE, FRACTALYSE, etc.). The thesis is also focused on the application of fractal dimension in studying the shape properties of river basins and rivers. Software FRACTALYSE and Fractal Analysis System were used for calculation of fractal dimension metrics. Values of fractal dimension were estimated by two different methods – box counting and radius mass. The later method is also implemented in V-LATE software.

Values of shape metrics were finally compared with river runoff data, specifically with the long-term average specific runoff and the average annual runoff volume. Dependence between these variables was evaluated by the correlation analysis, including both parametric and non-parametric methods (Pearson and Spearman correlation).

One of the main results of the thesis is the research on possibilities of calculation of shape metrics and fractal dimension of river basins and networks. These properties were subsequently compared with runoff data. To summarize the findings of the thesis, the shape metrics could be considered as an appropriate way of evaluation of shape of river basins. However, the interpretation of these metrics is a complicated process which is hugely dependent on their correct application. Eventually, there is some relation between the metrics and river runoff data. Correlation analysis showed some low or moderate relations between the data.

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

- Příloha 1 Obrázky tvaru povodí III. řádu a tvaru povodí vodoměrných stanic
- Příloha 2 Výsledky hodnot tvarových metrik z programu Shape Metrics Tool
- Příloha 3 Hustota říční sítě
- Příloha 4 Hodnoty průměrné fraktální dimenze a sinuosity
- Příloha 5 Hodnoty fraktální dimenze
- Příloha 6 Mapa stability povodí III. řádu
- Příloha 7 Mapa stability povodí vodoměrných stanic

Volné přílohy

- Příloha 8 DVD