



KATEDRA GEOINFORMATIKY

Univerzita Palackého v Olomouci | Přírodovědecká fakulta

VIZUALIZACE NEJISTOTY V ENVIRONMENTÁLNÍCH STUDIÍCH

AUTOREFERÁT DISERTAČNÍ PRÁCE

Studijní program: P1314 Geografie

Obor studia: 1302V011 Geoinformatika a kartografie

Školitel: doc. RNDr. Jaromír Kaňok, CSc.

RNDr. Jan BRUS

VISUALIZATION OF UNCERTAINTY IN ENVIRONMENTAL STUDIES

Ph.D. THESIS SUMMARY

Study Programme: P1314 Geography

Specialization: 1302V011 Geoinformatics and Cartography

Supervisor: doc. RNDr. Jaromír Kaňok, CSc.

Department of Geoinformatics

Faculty of Science, Palacký University in Olomouc

Olomouc 2013

*Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia
na Katedře geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci.*

*Dissertation thesis was compiled within Ph.D. study
at the Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University in Olomouc.*

Předkladatel / Submitter:

RNDr. Jan Brus

Školitel / Supervisor:

doc. RNDr. Jaromír Kaňok, CSc.

Katedra geoinformatiky

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

17. listopadu 50

771 46 Olomouc

Oponenti / Opponents:

doc. Dr. Ing. Jiří Horák (VŠB-TU Ostrava)

doc. RNDr. Petr Kubiček, CSc. (Masarykova univerzita, Brno)

doc. Ing. Václav Talhofer, CSc. (Univerzita obrany, Brno)

Autoreferát byl zaslán dne / Summary was posted on: _____

Obhajoba disertační práce se koná dne _____ před komisí pro obhajoby
disertačních prací doktorského studia v oboru P1314 Geografie, studijním oboru
1302V011 Geoinformatika a kartografie, v prostorách Katedry geoinformatiky
Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 50, 771 46
Olomouc.

The defence of the dissertation thesis will be held on _____ at the commission
for the defence of dissertation thesis of Ph.D. degree in study programme P1314
Geography, specialization Geoinformatics and cartography, in the premises of the
Department of Geoinformatics, Faculty of Science, Palacký University, Olomouc,
17. listopadu 50, 771 46 Olomouc.

*S disertační prací je možno se seznámit na studijním oddělení Přírodovědecké fakulty
Univerzity Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, 77 46 Olomouc.*

*The dissertation thesis is available at the Study Department, Faculty of Science,
Palacký University in Olomouc, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc.*

© Jan Brus, 2013

ISBN 978-80-244-3536-7

ISSN 1805-7500

Obsah

Anotace	4
1. Úvod.....	5
2. Cíle práce.....	5
3. Metody a postup zpracování.....	5
4. Vymezení pojmu nejistota v environmentálních studiích.....	6
5. Kvalita dat	10
6. Principy vizualizace nejistoty.....	12
7. Vizualizace nejistoty.....	15
8. Případové studie.....	19
9. Uživatelské testování vizualizace nejistoty	21
10. Návrh konceptu vizualizace nejistoty.....	22
11. Diskuse	26
12. Závěr	27
13. Použité zdroje.....	28
Odborný životopis autora	31
Seznam publikací autora	33

Contents

Curriculum Vitae	31
List of author's publications	33
Annotation	36
Summary.....	37

Anotace

Disertační práce je zaměřená na vizualizace nejistoty prostorových dat. Hlavním cílem práce bylo posouzení základních konceptů pro vizualizaci nejistoty prostorových dat, identifikace problémů s nimi spojených a rozšíření rámce pro vizualizaci kvality prostorových dat. Systematicky byly prozkoumány jednotlivé dílčí koncepty z pohledu komponentů kvality prostorových dat, standardů kvality prostorových dat a vizualizačních technik, s cílem navrhnout vylepšený koncept vizualizace nejistoty.

Práce je vzhledem ke svému tématu specifická problematikým vymezením použité terminologie a konkrétního pojetí vizualizace nejistoty, proto je teoretická část disertační práce primárně zaměřena na rozbor jednotlivých aspektů, které ovlivňují vizualizaci nejistoty. Důraz je kladen na kvalitu prostorových dat, jejich standardizaci, a také samotný proces kartografické komunikace se zaměřením na odlišné osobnostní charakteristiky konkrétního uživatele. Část práce týkající se konkrétních vizualizačních metod a přístupů je následně postavena na rešerši a analýze dosavadních nejvýznamnějších pramenů v této oblasti. V teoretické části je provedena analýza jednotlivých komponent kvality prostorových dat a jejich standardizace, studium a analýza faktorů ovlivňujících percepci vizuální informace z map s obsaženou nejistotou, rešerše existujících přístupů k vizualizaci nejistoty s důrazem na environmentální studie a analýza používaných způsobů vizualizace nejistoty v environmentálních studiích se stanovením jejich specifických vlastností.

V případových studiích je prováděn rozbor jednotlivých aspektů a komponentů kvality dat, které mají vliv na výslednou reprezentaci. Z pohledu omezené zobecnitelnosti výsledků při aplikaci pouze na malý počet případových studií byly v rámci environmentálních studií vybrány studie týkající se více oblastí. Na základě výsledků případových studií a teoretických poznatků byl vytvořen návrh objektivního řešení vizualizace nejistoty s důrazem na vizualizační techniky. Pro ověření získaných poznatků bylo provedeno i testování intuitivnosti navržených metod pro konkrétní případovou studii, a to s využitím technologie eye-tracking.

Přínos práce v oblasti řešení problematiky zahrnuje primárně dvě důležité části: práce navrhuje některé nové požadavky na metody vizualizace pro environmentální studie, kdy pro potřeby práce a vizualizačních metod v rámci konkrétních environmentálních studií jsou aplikovány nové přístupy a v práci je představen koncept pro vizualizaci kvality prostorových dat na základě implementace tohoto přístupu do několika případových studií. Cílem je doložit význam užitečnosti vizualizace kvality prostorových dat pro environmentální studie pomocí metod kartografické vizualizace. Nové pojetí tohoto výzkumu představuje rozšíření konceptů vizualizace kvality prostorových dat, integrace dat a realizace vizualizačních metod.

Klíčová slova:

nejistota prostorových dat, vizualizace, kvalita dat, případové studie

1. Úvod

Jakékoliv rozhodnutí může být pouze tak dobré, jak kvalitní jsou informace, nad kterými je rozhodováno. Pokud se však jedná o reálná data složek životního prostředí, a to i data simulovaná, je nejistota nepopiratelnou součástí každodenního života. Nejistota vyplývá z podstaty přírodních procesů a jejich variability, proto se následné modelace a vizualizace těchto procesů neobejdou bez určité míry aproximace.

Kartografové se s problémem zobrazování nejistoty potýkají již velmi dlouhou dobu. Ve většině případů je nejistota v procesu kartografického zpracování ignorována, a to především kvůli předpokladu, že uživatel mapy nebude schopen omezení způsobená právě touto abstrakcí vnímat. Mapy jsou většinou brány jako pomyslný pilíř objektivnosti a pravdivosti, což v konečném důsledku u všech uživatelů těchto map vyvolává pocit důvěry. U map zobrazujících zemský povrch, které jsou velmi obecné, polohová chyba nehraje v praktickém životě téměř žádnou roli. Pro mnoho aplikací je tak použití mapy s velkým množstvím skryté nejistoty přijatelné a pro efektivní komunikaci spíše potřebné. Problém však nastává v okamžiku, kdy se o výsledky těchto analýz začínají zajímat další odborníci, kteří tato kartografická díla využívají jako podklad pro podporu rozhodování. Tehdy se nejistota obsažená v mapě dostává do popředí zájmu a tvoří zcela zásadní informaci.

2. Cíle práce

Hlavním cílem práce je posouzení základních konceptů pro vizualizaci nejistoty prostorových dat, identifikace problémů s nimi spojených a rozšíření rámce pro vizualizaci kvality prostorových dat. Systematicky byly prozkoumány jednotlivé dílčí koncepty z pohledu komponentů kvality prostorových dat, standardů kvality prostorových dat a vizualizačních technik, s cílem navrhnout vylepšený koncept vizualizace nejistoty.

Jednotlivými dílčími cíli práce je vymezení pojmu nejistota v rámci environmentálních studií především s ohledem na kvalitu prostorových dat, analýza jednotlivých komponent kvality prostorových dat a jejich standardizace, studium a analýza faktorů ovlivňujících percepci vizuální informace z map s obsaženou nejistotou, rešerše existujících přístupů k vizualizaci nejistoty s důrazem na environmentální studie a analýza používaných způsobů vizualizace nejistoty v environmentálních studiích a stanovení jejich specifických vlastností. Na základě získaných poznatků byl následně proveden návrh objektivního řešení vizualizace nejistoty pro případové studie s důrazem na vizualizační techniky a bylo realizováno testování intuitivnosti navržených metod pro konkrétní případovou studii.

3. Metody a postup zpracování

Vizualizace nejistoty prostorových dat zahrnuje celou řadu otázek týkajících se údajů o kvalitě jednotlivých komponent, jejich definici, charakteru, návrhu databází, grafických metodách, jejich výběru a implementace, dynamického sledování a popisu šíření chyby během GIS operací a mnohé další. Z uvedených skutečností vyplývá, že je potřebné zkoumat, rozšířit a integrovat stávající výzkum v oblasti vizualizace nejistoty prostorových dat v rámci environmentálních studií, a to především v České republice, kde bylo toto téma doposud řešeno spíše okrajově, respektive existuje pouze několik pracovišť, kde byla tato oblast řešena podrobněji.

Práce je vzhledem ke svému tématu specifická především problematickým vymezením použité terminologie a konkrétního pojetí vizualizace nejistoty. Teoretická část disertační práce je proto primárně zaměřena na rozbor jednotlivých aspektů, které ovlivňují vizualizaci nejistoty. Část práce se zaměřuje na vymezení pojmu nejistota, v dalších částech je důraz kladen na kvalitu prostorových dat, jejich standardizaci, a také samotný proces kartografické komunikace se zaměřením na odlišné osobnostní charakteristiky uživatele. Část práce týkající se konkrétních vizualizačních metod a přístupů je následně postavena na rešerši a analýze dosavadních nejvýznamnějších pramenů v této oblasti.

Obsáhlost zkoumané problematiky se snaží postihnout také aplikační část práce, která se týká aplikace konkrétních vizualizačních technik při vizualizaci kvality prostorových dat v rámci případových studií. V případových studiích je prováděn rozbor jednotlivých aspektů a komponentů kvality dat, které mají vliv na výslednou reprezentaci. V rámci této části je vždy navržena konkrétní vizualizační technika, která odráží povahu vizualizované nejistoty a následně je diskutována vhodnost jejího použití. Z pohledu omezené zobecnitelnosti výsledků při aplikaci pouze na malý počet případových studií byla vybrána témata týkající se více oblastí.

Empirická část práce je zaměřena na testování výsledných vizualizačních technik získaných v rámci řešení případových studií. Hodnocené vizualizace jsou podrobeny uživatelskému testování s využitím eye-tracking zařízení. Celý design experimentu je proveden na principu míry asociativnosti jednotlivých vizualizačních metod přímo implementovaných do konkrétního mapového výstupu. Cílem je objektivně posoudit, zda existuje rozdíl ve vnímání odlišných technik, a zvolit pro konkrétní případovou studii nejvhodnější metodu.

4. Vymezení pojmu nejistota v environmentálních studiích

Pojem nejistota je v zahraniční i české literatuře poměrně často skloňován a v posledních dvaceti letech se dostává do popředí zájmu stále většího počtu odborníků. Současný rozvoj techniky tuto skutečnost jen umocňuje. V oblasti geoinformatiky není situace odlišná, právě naopak. Dochází k prudkému rozvoji implementací jednotlivých teorií pracujících s tímto přístupem a nejistota se stává neoddelitelnou součástí většiny operací s prostorovými daty. I přes uvedenou skutečnost však samotné chápání nejistoty v oblasti geoinformatiky stále naráží na problematické vymezení tohoto pojmu vůči jednotlivým vědním disciplínám.

V literatuře lze nalézt poměrně obsáhlé množství definic nejistoty. Velký počet definic odráží rozsáhlost problematiky, která je skryta pod tento obecný pojem. Velmi často je například debatován rozdíl mezi termíny přesnost a nejistota. V kartografii jsou tyto dva termíny chápány velmi podobně a někdy jsou dokonce považovány za synonyma [Boukhelifa a Duke, 2007]. V souvislosti s nejistotou je možné hovořit o přesnosti, spolehlivosti, jasnosti, výraznosti apod. [Duckham a kol., 2001]. Obecněji lze nejistotu definovat jako nedokonalost znalostí uživatelů o údajích, procesech nebo výsledcích. Nejistota je tedy mnohostranný pojem a zahrnuje řadu typů. Patří mezi ně například nepřesnost, neurčitost, nedokonalá znalost, nedůslednost, chybějící informace, šum, dvojznačnost, nedostatek spolehlivosti, pochybnost a další. Definice nejistoty jsou proto velmi bohaté a odráží její různé vlastnosti.

Díky obsáhlému počtu druhů nejistoty nepanuje v používané terminologii žádná jasná shoda nebo všeobecně přijímaný význam [MacEachren a kol., 2005]. Zásadní vliv na uvedenou skutečnost má také nejednoznačnost překladu z různých jazyků, především z angličtiny, kdy navíc každá vědní disciplína, které se nejistota týká, operuje s další odlišnou terminologií. I v odborné literatuře se

pojmy jako nejistota, neurčitost, nejasnost, vágnost, dvojzřetelnost a další objevují často jako synonyma. Z tohoto pohledu je snaha sledovat autoritativní zahraniční zdroje jistě chvályhodná, je však neméně důležité brát v úvahu i nejrůznější specifika prostředí (profesní, teritoriální, jazyková), v nichž tyto autority svá stanoviska formulují [Kalouda, 2010]. Pro vymezení a správné používání jednotlivých pojmů v rámci geoinformatiky je proto vysoce potřebné s těmito pojmy umět pracovat. Právě geoinformatické vymezení je totiž poměrně specifické a opírá se o celou řadu dílčích teorií.

Velmi často je možné se v praxi setkat se situací, kdy jsou odborníkům poskytovány informace, které jsou nejisté. Problémem však nejsou jen nejisté informace, ale také samotné vymezení znalostí o konkrétních pravidlech v daném oboru. Přes tuto „dvoji“ nejistotu má smysl zvažovat, zda lze z nejistých informací a nejistých znalostí pravidel odvodit závěr s určitou mírou jistoty. Situace je poměrně komplikovaná, neboť ke stejnému závěru je možné dojít na základě několika různých zdrojů a navíc za pomoci (nejistých) pravidel. Přitom často není známo, zda jsou zdroje informace zcela nezávislé, částečně závislé, či snad dokonce je jedna informace či znalost skrytým důsledkem jiné, a informace jsou zcela závislé. Nejistota z tohoto pohledu znamená, že není dostatek informací k charakterizování aktuálního stavu, k předvídání stavů budoucích nebo realizaci činností potřebných k tomu, aby tyto stavy mohly být dosaženy [March a Simon, 1958]. Tradiční modely rozhodování vycházejí z principů dokonalých znalostí (poznání) a jistoty a předpokládají optimální množství informací, tedy ani nedostatek, ani nadbytek. Za těchto předpokladů má každé rozhodnutí pouze jeden důsledek a ten je předem znám. Lze usuzovat, že kdyby byly známy všechny podněty, vlivy a příčiny, působící na daný jev nebo proces a jejich sílu, směr působení a jejich vzájemné interakce, bylo by možné predikovat jistý výsledek jako následek jejich působení. Tento předpoklad je však nesplnitelný. Ve skutečnosti většina rozhodnutí probíhá v podmínkách nejistoty a nedokonalých znalostí, kdy má rozhodnutí více možných důsledků a není předem známo, který z těchto důsledků nastane. Tato nejistota je tedy důsledkem částečné nebo úplné neznalosti procesů (vlivů), které podmiňují určité události a jejich náhodný charakter [Dudek, 1999]. Lze konstatovat, že nejistota je součástí všech přírodních procesů a dotýká se tak všech oborů lidského poznání. Snahy o zpracování nejistot do odborných pojednání lze nalézt již před rokem 1900 [Stigler, 1986]. Nejistota bývá také chápána jako neurčitost, náhodnost podmínek či výsledků určitých procesů a jevů. Proto je v disertační práci termín neurčitost často zmiňován. Z pohledu práce budou termíny nejistota a neurčitost považována za synonyma, i když mohou nést lehce odlišný význam, kdy neurčitost je převážně spojována s nepoznáním, a nejistota spíše s náhodností. Naopak rizikem se nejčastěji rozumí takový druh nejistoty, kdy je pomocí obvyklých statistických metod či subjektivní pravděpodobnosti možno kvantifikovat pravděpodobnost vzniku výsledků odchylných od očekávaného výstupu. Pojem nejistota (anglický ekvivalent uncertainty) je také poměrně často používán k popisu malé jistoty o konkrétním jevu. Z pohledu jistoty informace může samotná míra jistoty velmi kolísat. Lze tedy získávat a pracovat s informacemi, které v sobě nesou velkou nebo naopak malou míru jistoty, až po situaci, kdy se informace stává zcela nedůvěryhodnou. Právě nedůvěra nebo nedostatek jistoty jsou další označení, která jsou často v souvislosti s informacemi používána. Jednotlivá vymezení pojmu nejistota ilustrují různé úhly pohledu a umožňují tak lépe pochopit samotnou podstatu řešené problematiky. To, že nejistotu lze chápat velmi odlišně, dokazují následující ilustrační příklady vymezení: nejistota v souvislosti s přírodními jevy vyjadřuje, že výsledek je neznámý nebo nedokázáný, nejistota v souvislosti s důvěryhodností nějakého výroku vyjadřuje, že závěr není zcela prokazatelný nebo je vyjádřen nejistou informací a nejistota v souvislosti s plánováním činností vyjadřuje, že plán není rozhodnutý.

Pojem nejistota lze tedy považovat za pojem širšího významu a lze ho chápat jako neurčitost nebo náhodnost podmínek, respektive následků těchto podmínek, v podobě výsledků analyzovaných procesů, jevů či událostí, a to v tom smyslu, že tyto podmínky či výsledky jsou buď pouze částečně známé, pouze částečně kvantifikované nebo pouze částečně kvantifikovatelné do té míry, že mezi nimi (tj. mezi výsledky a jejich podmínkami či příčinami) není možné vyjádřit příčinné závislosti.

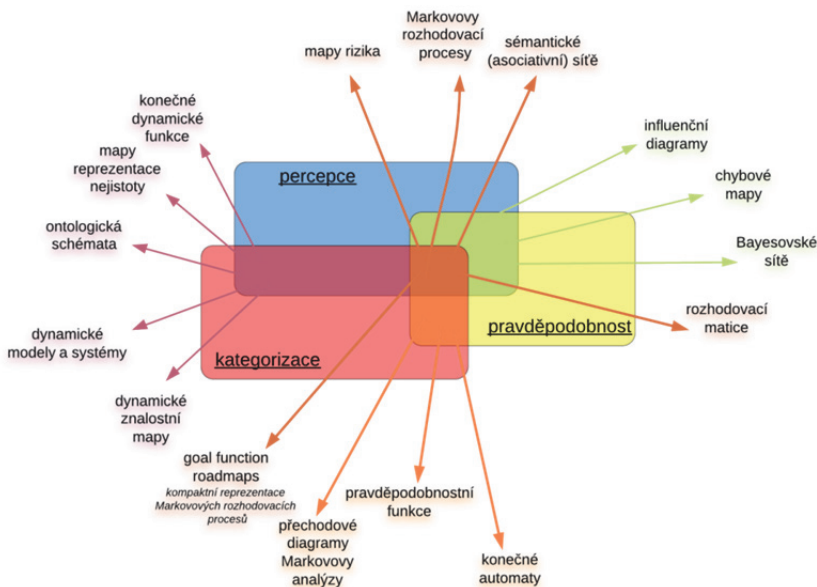
Mezi jeden z nejdůležitějších faktorů, kterému teorie informace a mnohé další obory vděčí za svůj nebyvalý rozvoj v téměř všech oblastech lidského poznání, je paradoxně právě nejistota a neurčitost. Neurčitost, nepřesnost, nejistota, vágnost, nejednoznačnost jsou složkami každé informace, která je vztahována k reálnému světu. Z pohledu nejistoty jsou jisté pouze modely a abstrakce, které vznikly abstraktním myšlením lidí. Co se týká podstaty přírodních procesů, ty jsou vždy nejisté a neurčité. Důkaz je možné vyvodit například v oblasti kvantové mechaniky, kdy se veškeré výsledky pohybují v oblasti neurčitosti. Z tohoto důvodu jsou v kvantové mechanice často využívány metody statistiky a pravděpodobnosti. Příkladem je nejistota popsána Heisenbergem [Heisenberg, 1974] jako princip neurčitosti, který tvrdí, že je nemožné zjistit současně jak polohu, tak hybnost mikroskopické částice. Neurčitost je vlastně dána samotným měřením. Jestliže není možné s naprostou jistotou zjistit počáteční podmínky, pak ani nelze předpovídat, co se stane v budoucnu. Analogii tohoto tvrzení lze nalézt také v geoinformatice, například při sestavování predikčních modelů.

Absolutně přesné mohou tedy být pouze abstraktní matematické poznatky odvozené z jednoznačných axiomů a definic. Jakmile se však tyto nespochybnitelné poznatky aplikují na reálný svět, jako například v odvětvích fyziky nebo chemie, nelze již s touto absolutní vlastností modelů počítat. Pokud do procesů, modelů a vytváření nových informací jakýmkoli způsobem vstupují reálná a experimentální data, je třeba si uvědomit, že původní neurčitost a nejistota dat je stále přítomna. V průběhu zpracování se hromadí, narůstá, a ovlivňuje tak výsledek zpracování. Nejistoty zahrnují všechny etapy zpracování dat, od prostých chyb měření a pozorování až ke komplexním nejistotám předpovědi, nahodilosti přírody, přesnosti modelů, budoucích potřeb, možností, chování lidí a politickým omezením. Jejich povaha může být fyzikální, ekonomická, environmentální nebo společenská. Důležitou otázkou je zvážení, zda nejistota může nějakým zásadním způsobem ovlivnit výsledek. Z tohoto pohledu je tedy velmi nutné se nejistotou a neurčitostí zabývat a procesy, vedoucí k výsledkům, mít z tohoto pohledu pod kontrolou.

Existuje řada dalších teorií, které se zabývají neurčitostí informace, například teorie fuzzy množin [Zadeh, 1996], teorie umělých neuronových sítí [Fausett, 1994] a teorie deterministického chaosu [Ott, 2002]. Nejrozšířenější a teoreticky nejpropracovanější je teorie pravděpodobnosti a teorie fuzzy množin [AVČR, 2013]. Z pohledu těchto dvou teorií je nejistota pouze jednou ze složek neurčitosti. Neurčitost má v tomto pojetí (nejméně) dvě vzájemně komplementární stránky: vágnost a nejistotu. Vágnost lze modelovat pomocí teorie fuzzy množin, zatímco nejistotu lze modelovat pomocí teorie pravděpodobnosti, popřípadě pomocí dalších teorií, jako je teorie možnosti, různé míry věrohodnosti a další [Novák, 2000]. Při snaze řešit problémy pravděpodobnostního (Bayesovského) modelu nastává zpravidla situace, kdy není možno věrohodně rozhodnout, zda jsou nejisté poznatky (fakta i znalosti) zcela nezávislé či nikoliv, a tato skutečnost ovlivňuje vyhodnocení jejich podmíněné pravděpodobnosti. Velmi přehledné pojetí a vymezení pravděpodobnosti je uvedeno v publikaci Duboise a Pradeho [Dubois a Prade, 2001].

V neposlední řadě je nutné do celkového přehledu teorií uvést také teorii percepce. Tato disciplína byla ovlivněna humánní psychologií, komplexitou a později také umělou inteligencí a robotikou. Pojetí nejistoty v této oblasti vyústilo v definování percepčních modelů nejistoty

[Boardman a kol., 2000; Gao, 2002]. Uvedené dílčí modely pro práci s nejistotou a mnohé další lze následně klasifikovat na základě příslušnosti k již zmíněným obecným teoriím (obr. 1).



Obr. 1 Rozdílné modely nejistoty vyplývající z aplikací teorií pravděpodobnosti, kategorizace a percepční teorie [Sager a kol., 2007]

Pro identifikaci neurčitosti existuje několik přístupů v jejich klasifikaci, které jsou výše popsány. Nejistota může vzniknout v datech nebo v modelu samotném [Barry a Elith, 2006; Turley a Ford, 2009]. Regan a kolektiv [Regan a kol., 2002] zahrnuli tyto nejistoty jako „epistemické“ a identifikovali „lingvistickou“ vágnost jako přídavný prvek nejistoty. Foody a Atkinson [Foody a kol., 2002] použili podobnou klasifikaci „měření“ a „porozumění“ nejistoty a identifikovali spojení těchto dvou aspektů jako výzvu při stanovování kvality samotného modelu. Renard a kolektiv [Renard a kol., 2011] identifikovali tři zdroje nejistoty: datovou nejistotu, nejistotu modelových struktur a „pozůstatek“ nejistoty vzhledem k nedostatkům v modelu. Ačkoli jsou typologie příbuzné, liší se do jisté míry sémanticky a také koncepčně. Prostorové explicitní modelování pomocí GIS je v současnosti velmi dobře rozvinuto [Goodchild a kol., 1993, 2007], stále je však pro mnoho lidí velmi problematické přemýšlet nad mapami, které ukazují reálnou oblast, jako nad realizacemi výstupů modelů [Franklin a Miller, 2009] a vnímat chybu v mapě jako statistickou nebo analytickou chybu raději než chybu kartografickou [Goodchild, 1988; Goodchild a Gopal, 2003].

Často je také diskutabilní vztah mezi „přesností“ a „nejistotou“. Tyto termíny mohou být například použity jako nepřesnosti vztahené k obecnému pojmu. Nejistoty se pak týkají konkrétních případů, kdy není nepřesnost známa [Hunter a Goodchild, 1993]. V tomto případě platí, že pokud

je nepřesnost objektivně známa, může být vyjádřena jako chyba. Další autoři pak považují chybu jako část nejistoty, kde je chyba definována jako rozpor mezi danou hodnotu a jeho modelovanou a simulovanou hodnotou [Pang, 2001], což koresponduje s výše uvedeným dělením. Z jiného dělení lze pak odvodit rozdělení na pozitivní aspekty nejistoty jako ty, které se týkají přesnosti, a negativní aspekty nejistoty, zabývající se chybami [Buttenfield a Beard, 1994]. K dispozici je také názor, který rozlišuje mezi nejistotou, která je jevům vlastní, tzv. neurčitostí, a nejistotou v tvrzení tohoto jevu, jako je nejistota měření funkce [Plewe, 2002]. Přes různé pojmy nejistoty a rozmanité použití tohoto termínu tedy panuje obecně přijímaná shoda, že nejistota je chápána jako složení několika pojmů a konceptů. Existují publikace, které se definicí nejistoty zabývají mnohem detailněji. Jako příklad lze uvést publikace Klira a Wiermana [Klir a Wierman, 1999] a Thomsona a kolektivu [Thomson a kol., 2005].

Z výše uvedených skutečností zcela jednoznačně vyplývá, že pojem nejistota je vždy oborově specifický a navíc s problematickým vymezením. Nejistota se tak stává zobecněným pojmem, skýtajícím celou řadu dílčích pojetí a dělení.

5. Kvalita dat

Pro určení a definování kvality prostorových dat je důležité pochopit, co slovo kvalita vlastně znamená. Navíc je také nutné pojem kvalita používat s velkou obezřetností, protože pojem nejistota a kvalita prostorových dat nejsou synonymy, i když v mnoha případech mají k sobě velmi blízko. Mají velmi podobné kategorie, řeší podobné domény a v řadě případů je kvalita s nejistotou zaměňována [Brus a kol., 2013b]. Nejistota je v tomto pojetí považována za vlastnost, která dovoluje posoudit jak dobré (kvalitní) jsou dostupné údaje, přičemž nejistota velmi výrazně ovlivňuje kvalitu prostorových dat. Základním a zásadním rozdílem je, že nejistota může být zavedena v kterékoli fázi výroby mapových podkladů a GIS analýz (pozorování, konceptuální modelování, měření, analýza, vizualizace a další), včetně samotného vnímání konečnými uživateli, a jako taková se netýká pouze kvality prostorových dat samotných, ale celého procesu přenosu geografické informace.

Pojem kvality a jeho obsah prošel a prochází dějinným vývojem a proměnou. Z tohoto pohledu je nutné ho rozklíčovat nejen v rámci daného kontextu a diskurzu vědního oboru, ale i vzhledem k jeho geneticko-sémantickému pojetí. Kvalitu tak lze v pojetí této disertační práce asi nevhodněji definovat jako každou jakost či vlastnost, která něčemu přísluší, nebo se k něčemu připojuje. Jako to, co způsobuje věc k plnění účelu, ke kterému vznikla nebo byla založena [Brugger, 1994], kdy je kvalitou míněna především kvalita získané informace. Z tohoto úhlu pohledu lze za kvalitní informaci považovat takovou, která je užitečná a použitelná pro svého „spotřebitele“, kdy ve spojení s tradiční definicí informace to v geoinformatice znamená, že kvalita informací je velmi závislá nejen na základních datech, ale zejména na samotném uživateli. Informaci s vysokou kvalitou je poté možné definovat jako „přesnou, důvěryhodnou a dostatečnou pro rozhodování uživatele“. Ve spojení s možností data (a informace) mnohověztačně interpretovat však do procesu vstupují tacitní a explicitní znalosti a zkušenosti původce a příjemce informace, proto je zajímavé uvažovat také o efektivní kvalitě informací – skutečné užitečnosti, kdy důležitým faktorem jsou samotné schopnosti uživatele informace. Pro uživatele, kteří nemají dostatečné schopnosti, nebude informace kvalitní (užitečná), ale naopak může kvalita prezentované informace dokonce poklesnout. Tuto skutečnost také odráží běžně používaná definice kvality „vhodnost pro použití“ [Beard a kol., 1991; Hunter, 1999; Chrisman, 1984]. V průmyslovém pojetí je kvalita ve své podstatě míra splnění výrobního procesu, je tedy funkcí nehmotných vlastností, jako je úplnost

a konzistence, které jsou ovlivněny právě výrobním procesem [Veregin, 1998]. Na základě definice kvality vycházející z encyklopedického slovníku [Weber a Buttenfield, 1993] je na kvalitu pohlíženo jako na rozlišovací vlastnost, která umožňuje rozlišit, zda daná vlastnost má pozitivní nebo negativní charakter. Na základě tohoto dělení pak lze odvozovat dva další termíny – přesnost a chybu. Pokud má kvalita pozitivní charakter, lze ji měřit podobností od zvoleného modelu nebo reality, a výsledkem je již zmíněný termín přesnost. Naopak pokud se jedná o negativní přístup, ten je měřen rozparem, tedy chybou. Z pohledu geoinformatiky existuje celá řada dalších pojetí pro definici kvality prostorových dat, protože kvalita má vztah k celé škále datových charakteristik. Jednotlivé definice tak většinou odrážejí různé pohledy na samotnou terminologii pojmu a napříč autory se liší.

Od počátku vývoje kvality prostorových dat tvoří tato oblast klíčovou subdisciplínu geoinformatiky. Je jí přisuzován velký význam jak v oblasti akademických pracovišť, tak také ve vládních a průmyslových organizacích. Kvalita prostorových dat byla, je a bude nosným tématem velkého počtu konferencí a seminářů a mezinárodních aktivit (např. AGILE, GEOIDE, NCGIA a dalších). Nicméně celá tato disciplína s ohledem na nejistotu stále naráží na výše zmiňovaný problém, kterým je nejednotnost používaných definic a nepřesná terminologie. Uvedené lze demonstrovat na příkladu, kdy je položena otázka na téma definice „kvality dat“ a „nejistoty“ zástupcům vládních institucí a vědcům pracujícím na akademické půdě. Pravděpodobně by byly získány odlišné odpovědi, které by navíc byly nejednoznačné. Problém leží v samotné komunitě lidí zabývajících se kvalitou prostorových dat a nejistotou. Ve vědeckých člancích, odborných zprávách a studiích je velmi problematické identifikovat různé koncepty, které jsou pojmenovány stejně, nebo naopak stejné koncepty, které nesou odlišné názvy. Jak bylo uvedeno v předešlých kapitolách, pojmy jako nejistota, chyba, přesnost, vágnost a jejich interpretace vždy odrážejí vědní obor nebo komunitu, ze které dotyčný autor používající terminologii pochází. Z pohledu kvality a nejistoty prostorových dat lze v tomto pojetí také vysledovat dělení na dvě odlišné komunity lidí, zabývajících se primárně pouze kvalitou nebo nejistotou. Každá z těchto skupin navštěvuje „své“ konference jako International Symposium on Spatial Data Quality nebo International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. K míšení informací a výměně názorů mezi těmito skupinami většinou nedochází [Devillers a kol., 2010].

Je všeobecně přijímáno, že kvalita prostorových dat je multikomponentní (obr. 2), a proto neexistuje pouze jedno pojetí prvků kvality prostorových dat.



Obr. 2 Komponenty kvality dat

6. Principy vizualizace nejistoty

Během historického vývoje kartografie se mapy staly nástrojem pro sdílení specifických znalostí. Jsou chápány jako jedinečný nástroj používaný pro různé účely, které mohou být široce seskupeny do dvou hlavních rolí. První je staví do role nástroje pro analýzu, řešení problémů a rozhodování [MacEachren a Kraak, 1997], zatímco druhá do role nástroje pro mezilidskou komunikaci a transfer myšlenek. Mapy jsou tedy jedinečné komunikační prostředky, které umožňují pochopit prostorovou strukturu informací mnohem lépe, než prostřednictvím slovního popisu, kde by bez pomoci vizuálního obrazu, při následném zpětném vybavování zobrazené skutečnosti, byl zapotřebí velký počet dalších deskriptorů a popisů [O’Looney, 2000].

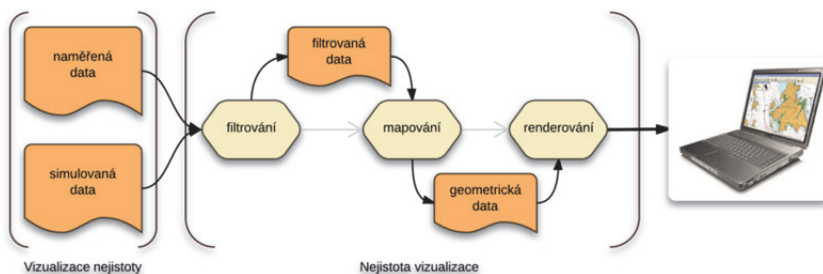
Díky rychlému pokroku v oblasti výpočetní techniky, geoinformačních technologií a internetu byl v posledním desetiletí řadou kartografických vědců, vedených Alanem MacEachrenem [MacEachren a Kraak, 1997; MacEachren a Monmonier, 1992], navrhnut nový způsob pochopení fungování map. Mapy přestaly být viděny jako pouhý nástroj pro komunikaci již známé informace a začaly být považovány jako nástroj pro pochopení neznámých vztahů v podstatě jakékoli informace, která má prostorový charakter. Snahy o vytvoření co „nejlepší“ mapy byly díky moderní počítačové grafice nahrazovány konceptem vytvoření reprezentace, která může být použita pro zodpovězení různých druhů otázek. Ty mohou být položeny jednotlivými vědci a mohou v datech odhalit dosud neprozkoumané vzory a vztahy. Tento nový přístup je nazýván jako kartografická vizualizace [MacEachren, 1995; MacEachren a Kraak, 2001]. Na základě výzkumu v dalších oblastech, včetně počítačové grafiky, neurofyzologie, eye-trackingu, kognitivní psychologie a sémiotiky, bylo toto nové pojetí kartografie dále rozšiřováno a stále otevírá nové obzory pro další metody kartografického výzkumu.

Kartografické vizualizace mají potenciál stát se účinným nástrojem pro vyjádření kvality prostorových dat hned z několika důvodů. Jako první lze znovu uvést skutečnost, že mohou lidem pomoci s pochopením již známých chyb, jejichž velké množství je distribuováno prostorově. Z tohoto pohledu poskytují vizualizace rychlý a ideální mechanismus pro sdělování prostorové distribuce kvality dat. Ve srovnání s jinými metodami tak mohou čtenáře mapy mnohem jednodušeji zaujmout a upozornit jej na problematický aspekt prostorových údajů [Goodchild, 1994]. V druhé řadě poskytují prostředky pro objevování vzájemných prostorových vztahů, distribuci chyb ve vztahu k souborům prostorových modelů, procesů nebo teorií, a prostřednictvím vizualizací tak mohou uživatelé lépe chápat dopady proměnlivé kvality údajů na výsledky prostorových analýz. Na základě těchto informací pak mohou provádět rozhodování přesněji a efektivněji. Goodchild [Goodchild, 1992a] uvádí, že vizualizace jsou klíčem k účasti uživatelů při stanovování klíčových závislostních parametrů v prostorových statistických modelech nejistoty.

V posledním období jsou stále častější požadavky nejistotu v datech vizualizovat, kdy velký vliv na tuto skutečnost mělo i obecné přijetí nejistoty jako důležité složky dat [Schneiderman a Pang, 2005]. I přes výzkumné snahy v tomto odvětví stále chybí návod, jak nejistotu vizualizovat tak, aby se tato činnost stala uživatelsky jednoduchou i pro širší skupinu uživatelů. Tradičně se informace o nejistotě zobrazují pomocí velmi omezených metod a pro dosažení konečného výsledku je navíc nutná kombinace různých softwarů. Obecně platí, že výzkum na poli vizualizace kvality prostorových dat se primárně odvíjí od samotného definování nejistoty, rozvoje metod pro grafické znázornění těchto informací, vytváření vazeb mezi prostorovými složkami kvality dat a vizualizačními metodami.

Mapa jako komunikační prostředek při vizualizaci nejistoty

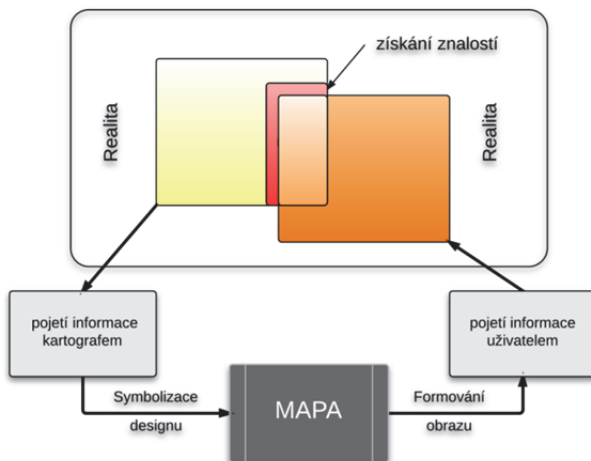
Vývoj nových technologií přesunul zaměření kartografů od oblasti komunikačního modelu mapy ke konceptu kartografických vizualizací. Tyto vizualizace jsou však v současnosti téměř výlučně spojeny s digitální reprezentací dat. Z tohoto hlediska je nutné na celý proces tvorby mapy pohlížet i s přihlédnutím k této skutečnosti. Pro lepší pochopení tohoto procesu a pro prezentaci zdrojů nejistoty lze za referenční model pro vizualizaci nejistoty považovat model představený dvojicí autorů Haber a McNabb [Haber a McNabb, 1990]. Na obrázku 3 je uveden tento rozšířený model jako ve schématické podobě připomínající potrubí. Do tohoto modelu vstupují data získaná měřeními nebo simulacemi získaných dat. Prvním krokem je filtrování dat nebo tzv. rekonstrukce dat, kdy je snaha získaná data pomocí interpolací nebo aproximací modelovat. Výstupy této části modelu poté vstupují do mapovací fáze, ve které pomocí vizualizačních algoritmů vznikají geometrická data. V posledním kroku jsou pak vzniklá geometrická data pomocí renderování překreslována na výsledný obraz zobrazovaný na výstupním zařízení. Rendering obsahuje v závislosti na použitém softwaru mnoho parametrů a nastavení, kterými lze ovlivnit konečný vzhled. I ostatní autoři [Correa a kol., 2009; Griethe a Schumann, 2006; Lopes a Brodlié, 1998; Pang a kol., 1997] jako výchozí referenční model pro vizualizaci nejistoty využívají tento koncept navržený právě Haberem a McNabbem. Nejistota v tomto pojetí vždy narůstá směrem zleva doprava a vyskytuje se ve všech částech modelu. Je také velmi důležité si uvědomit, že zatímco v první části se jedná o vizualizaci nejistoty, v druhé části, začínající fází filtrace, je vhodnější hovořit spíše o nejistotě vizualizace.



Obr. 3 Haberův a McNabbův model: vztah mezi vizualizací nejistoty a nejistotou vizualizace; upraveno podle [Brodlié a kol., 2012; Haber a McNabb, 1990]

Zcela výsadní postavení při vizualizaci nejistoty měla práce a pojetí MacEachrena [MacEachren, 2004], který svým vlastním modelem kartografické komunikace (obr. 4) nastínil koncept, se kterým většina autorů na poli vizualizace nejistoty pracuje a dále jej využívá. Velmi důležitou vlastností tohoto modelu je skutečnost, že lze v této souvislosti hovořit o tzv. přírůstku znalostí (knowledge gain), který může uživatel získat při čtení mapy. V porovnání s ostatními prezentovanými modely je zaveden proces, kdy při čtení mapy dochází k syntéze a integraci nových poznatků. Informace obsažená v mapě není z pohledu uživatele konečná, ale za předpokladu, že uživatel informaci využije i k poznání jiné části reality, může dojít k porozumění i jiných jevů, než těch obsažených v mapě. MacEachren [MacEachren, 2004] se tedy vymezuje proti primárnímu chápání mapy jako kanálu pro přenos kartografické informace a chápe mapu jako jednu z možných reprezentací

objektů či jevů v prostoru. Současně autor zdůrazňuje potřebu studovat percepční a kognitivní procesy, které probíhající jak při čtení mapy, tak při zpracování prostorové informace [Šašínská, 2012].



Obr. 4 Model kartografické komunikace; upraveno podle [MacEachren, 2004]

Percepční a kognitivní teorie

I přes skutečnost, že na základě poznatků z kognitivní psychologie existuje větší množství jednotlivých teorií, které pomáhají v procesu tvorby vizualizací, není někdy zcela zřejmé, jakým způsobem lze následně konkrétní poznatky při vizualizaci nejistoty aplikovat. Z tohoto pohledu je důležitá percepce, která je funkcí kognice (myšlení). Lze ji také chápat jako způsob kódování, uložení a začlenění informace do již stávajících znalostí [Golledge a Stimson, 1997]. Jedná se o soubor psychických procesů, na jejichž základě lze v mozku rozpoznat, třídít, spojovat a přisuzovat význam počátkům, získaným od podnětů z okolního prostředí. Percepce je výrazně ovlivněna kvalitou smyslových orgánů a primárním zpracováním jejich výstupů nervovou soustavou, včetně předchozí zkušenosti [Sternberg, 2002]. Pro studium čtení a používání map je percepce velmi důležitá, protože napomáhá stabilně a konzistentně strukturovat na mapě znázorňovaný prostor. Právě proces přisuzování významu je z pohledu vizualizace nejdůležitější. Nepochopená nebo příliš složitá vizualizace proces přenosu kvalitní informace komplikuje. Na vizualizace nejistoty tedy může být nahlíženo jako na obecné vizualizace, nicméně plnící velmi specifický účel a nesoucí nový význam. Proto jejich složitost a komplexnost vyžaduje také komplexní přístup, který by měl převážně vycházet z předpokladu, že konečným uživatelem dat je čtenář mapy. Vizualizace nejistoty by proto měly ctít obecné zásady a pravidla, které již byly částečně definovány. Před navržením nového konceptu je proto vhodné zvážit stávající percepční a kognitivní rámce, ze kterých je možné vyjít a které posléze umožní lépe pochopit silné a slabé stránky nově navrženého konceptu. V rámci těchto teorií považovány za ty nejvíce ovlivňující výzkum vizualizace nejistoty [Zuk, 2008].

7. Vizualizace nejistoty

Efektivní vizualizace by měly volbou vhodné vizuální metafory prezentovat informace takovým způsobem, který podporuje pochopení dat. V tomto pojetí jsou data využívána především k poskytnutí odpovědí na konkrétní otázky, testy, hypotézy nebo k prozkoumání vzájemných vztahů. V případě GIScience má většina dat navíc prostorový charakter a vizuální prezentace musí v tomto případě usnadňovat také naplnění stanovených cílů. Většina tradičních vizualizačních technik byla vytvářena (a často také používána) především za předpokladu, že všechna dostupná a použitá data jsou přesná a přenos informace je bezproblémový. Jak uvádějí předešlé kapitoly, tyto předpoklady nejsou z popsanych důvodů možné. I kdyby existoval předpoklad, že je možné vytvořit efektivní vizualizaci, stále bude platit, že zobrazovaná data obsahují určitý stupeň nejistoty (obr. 5). Je tedy velmi důležitý konkrétní účel vizualizace a je nutné dobře zvážit, zda přidání informace o kvalitě dat je z pohledu účelu reprezentace vhodné či nikoliv. Pokud je realizována vizualizace kvality dat, je třeba si uvědomit, že efektivní vizualizace jsou zcela odlišné od efektivních vizualizací nejistoty. Vytváření vizualizací nejistoty není z tohoto pohledu vždy možné pouze s využitím aplikace tradičních zobrazovacích metod. Navíc je nutné brát ohled na různé další faktory a je třeba mít na paměti, že různé vizualizační metody a techniky jsou pro daný typ úloh vhodnější než jiné. Z tohoto důvodu neexistuje jediná vizualizační technika, která by řešila všechny jednotlivé aspekty nejistoty. Velmi často má již samotná vizualizace vysokou vizuální komplexitu a přidání další informace v podobě nejistoty velmi komplikuje možnosti čtení. Opět je tedy nutné pečlivě zvažovat konkrétní povahu prostorových dat a účel samotné vizualizace.



Obr. 5 Model znázorňující rostoucí nejistotu; upraveno podle [Roth, 2009]

I přes uvedené komplikace lze vizualizace nejistoty jako způsob komunikace výsledkovat již v počátečních studiích zabývajících se nejistotou obecně [Beard a kol., 1991], kdy v různých odvětvích lidské činnosti je využívána široká paleta vizualizačních algoritmů pro vizualizaci nejistoty, včetně geografických informačních systémů, meteorologie, oceánografie a lékařského výzkumu [Lermusiaux a kol., 2006; MacEachren, 1995; Pang a kol., 1997]. I přesto, že se pohled na vizualizaci nejistoty mění a ta se pomalu dostává do stále většího okruhu studií včetně těch environmentálních, stále se implementačně jedná o velmi pomalý proces a problematickou oblast. Důsledkem těchto skutečností vizualizace nejistoty stále zůstává jednou z nejdůležitějších výzev vizuální analýzy [Wong a kol., 2012].

Vizualizace nejistoty je z pohledu vizualizační techniky velmi specifická. Hlavním důvodem je již zmiňovaná komplexita nově vznikajících vizualizací, kdy je nejistota obsahem samotných dat. Reprezentovaná informace by měla primárně zobrazovat sledovaná data a nejistota by měla být prezentována spíše jako vedlejší a podpůrná informace. Na základě této skutečnosti lze výzkumy v rámci vizualizace nejistoty primárně rozdělit na dva hlavní přístupy v podobě srovnávacích a kombinovaných map. V prvním případě se nejistota v mapě zobrazuje odděleně od primárních dat, takže pro zvolený atribut a vyjádření nejistoty jsou vytvořeny samostatné mapy. V případě kombinovaných map dochází k vizualizaci zvoleného atributu i jeho nejistoty do jedné mapy při

využití vhodných grafických proměnných a dalších prvků. Dalším způsobem je sekvenční vizualizace, kdy dochází k vytvoření sekvence vizualizace nejistoty a vizualizace původních dat. Uživatel mapy může díky tomuto přístupu sledovat stále stejnou část mapy a srovnat tyto dvě vizualizace mezi sebou, což u klasických srovnávacích map není možné. Vrcholem vizualizace nejistoty je vytvoření interaktivního exploračního nástroje [Botchen a kol., 2006], který by umožnil jednoduše vizualizovat zvolený atribut a jeho nejistotu pomocí jednoduchých kroků [Lucieer a Kraak, 2004]. Z pohledu implementace, počtu navržených metod a přístupu jednotlivých autorů jsou vizualizace nejistoty autory více přijímány v podobě kombinovaných map, které jsou proto také nejčastěji využívány. V podstatě se jedná o biviační mapy [Ware, 2004], které využívají kombinace dvou proměnných. V rámci této metody lze dále vytvářet dělení na základě vnějšího nebo vnitřního přístupu [Gershon, 1998]. Vnitřní přístup mění vzhled objektu, například změnou intenzity barvy v závislosti na měnící se nejistotě. V tomto případě se jedná o použití barev v podstatě stejným způsobem, jako u konvenčních tematických map [Tyner, 2010]. Běžné vnitřní metody při tomto přístupu kombinují data a nejistotu společně pomocí dvojrozměrné reprezentace [MacEachren a kol., 2005]. Druhý přístup v podobě vnější reprezentace nejistoty používá další přidanou geometrii k zobrazení dalších informací o objektech [Slocum a kol., 2003]. Tyto další grafické prvky mohou být například grafy, bodové symboly [Tyner, 2010] nebo rozpoznatelné abstraktní grafické symboly, které jsou nezávislé na jakémkoli specifickém designu (tzv. glyfy) [Zehner a kol., 2010].

Samotná data mohou být také díky přidání informací rozšířena o poznámky o nejistotě [Brecheisen a kol., 2009], které nesou informaci o nejistotě způsobem, aby docházelo pouze k minimálnímu překryvu zobrazovaných dat těmito popisky. Jako příklad lze uvést využití prstencových map [Zhao a kol., 2008], kdy je možné zobrazit více druhů nejistoty právě pomocí informací mimo samotná data. Z širokého výběru metod, které jsou používány pro vizualizaci nejistoty, lze metody dále sdružovat do několika hlavních skupin: skupiny založené na využívání parametrů barvy (tón, odstín a jas), metody založené na rozostření, které mění ostrost, rozmazání nebo rozlišení a metody, které mění geometrický tvar objektu. Určení proměnných v zobrazení nejistoty je velmi subjektivní a jednotliví autoři se v rámci tohoto tématu často rozcházejí. Obecně platí, že poměrně velké množství proměnných bylo navrženo za konkrétním účelem, méně jich bylo vyvinuto a ještě mnohem méně jich bylo hodnoceno na uživatelské úkony. Kartografické metody pro zobrazení nejistoty tak nejčastěji využívají již zmiňovanou Bertinovu teorii, případně další publikované přístupy. Ucelený přehled lze nalézt v práci Huntera a Goodchilda [Hunter a Goodchild, 1993]. Kromě toho existuje značný počet zobrazovacích metod, které jsou k dispozici pro vizualizaci nejistoty především v GIS modelech. Různá další dělení je možné najít v publikacích dalších autorů [Gershon, 1998; Griethe a Schumann, 2006; Pang a kol., 1997; Potter a kol., 2012].

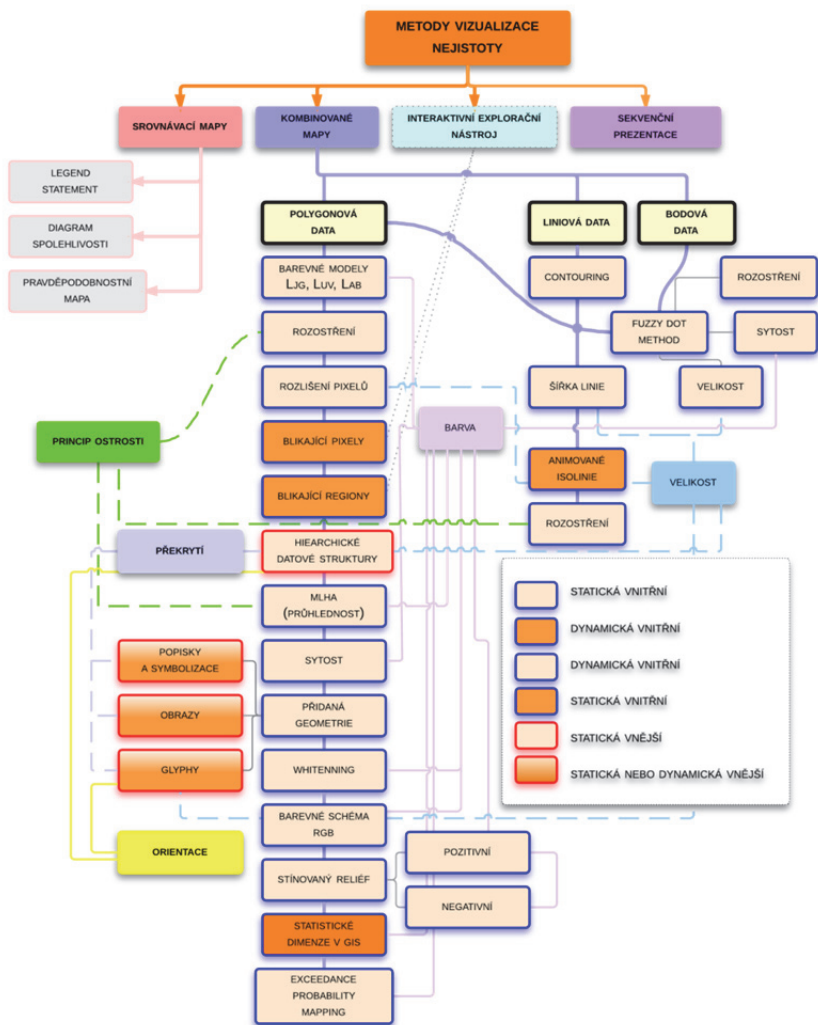
Mezi nejdůležitější přístupy a metody patří:

- *Využití vizuálních proměnných:* barvy [Potter a kol., 2009; Slocum a kol., 2003], velikosti, pozice, ostrosti, jasnosti, „fuzziness“, saturace, průhlednosti a ostrosti hran. Lze také nalézt případy využití jiných barevných modelů [Burt a kol., 2011; Hengl, 2003] nebo aplikaci různých textur nebo Perlínova šumu [Coninx a kol., 2011].
- *Přidané objekty:* popisky, obrazy nebo symboly (glyfy). V práci Wittenbrinka [Wittenbrink a kol., 1996] jsou reprezentovány přístupy ve využití glyfů právě pro vizualizaci nejistoty [Zehner a kol., 2010]. Problém většiny technik založených na glyfech je, že vnímání velikosti glyfů uživatelem často závisí na směru pohledu. Vnímání velikosti glyfů může být také ovlivněno okolní scénou, která může vytvářet iluzi změny velikosti [Sterzer a Rees, 2006].

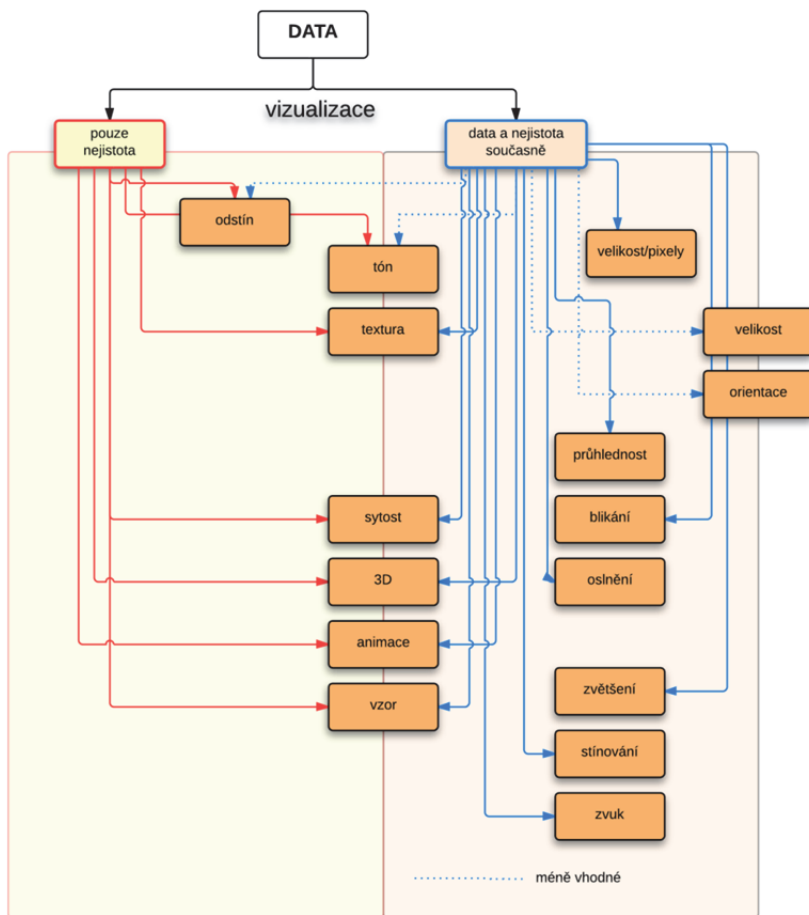
- *Animace*: pro vizualizaci nejistoty je využito standardních parametrů – počet změn, změna polohy, průhlednost, pořadí, datum zobrazení, frekvence, synchronizace [Gerharz a Pebesma, 2009].
- *Interaktivní reprezentace*: nejistotu lze například zobrazovat pomocí interakce myši [Van der Wel a kol., 1998].
- *Sonifikace a psycho-vizualní vizualizace*: vnesení akustických proměnných pro vizualizaci nejistoty (změna rytmu, hlasitosti, vibrací nebo pomocí blikajících textových zpráv [Fisher, 1994; Lodha a kol., 2001]. Zásadní problém při využití zvuku je skutečnost, že zvuk je většinou spojen pouze s konkrétními body, zatímco grafické metody umožňují globální pohled na danou situaci.

Poměrně méně vizualizačních metod bylo vytvořeno za účelem vizualizace nejistoty v případě 3D vizualizací. Z běžných technik se využívá barva, průhlednost, textura a přidání objektů. Dalším způsobem může být využití objemového renderování [Deitrick, 2007] nebo tvorba isopovrchů [Lucieer, 2006] a dalších postupů [Jones a kol., 2013]. Uvedené metody a vizuální proměnné jsou rozděleny podle jejich vhodnosti při použití kombinovaných nebo srovnávacích map (obr. 6).

I přes velké množství navržených metod (obr. 7) stále zůstává nezodpovězeno velké množství otázek spojených s vizualizací nejistoty. Díky velkému množství metod pro různé typy dat chybí ucelený přehled všech metod, již zmiňovaná komplexní typologie vizualizace nejistoty a převážně nástroje, které by s vizualizací nejistoty dovedly jednoduše pracovat. Pro jednotlivé techniky je nutné vybírat specifické programové prostředky. Z tohoto pohledu je nutné mít o metodách přehled a je důležité vědět, kde jednotlivé metody v konkrétních programech najít a jak je použít. Tato skutečnost zcela jistě brání ve větším rozšíření těchto vizualizací. Je vhodné podotknout, že nejpůsobivější vizualizace nejistoty byly vždy vytvářeny týmem vědců a specialistů jak na uvedenou doménu tak také na kartografické vizualizace. Důvodem je právě složitost samotných vizualizačních technik a jejich softwarová náročnost. V neposlední řadě velký počet vizualizačních technik postrádá výsledky, které by kvantifikovaly jejich dopad na rozhodovací procesy. Proto zůstávají některé vizualizační techniky pouze možností, jak nejistotu vizualizovat, bohužel bez jednoznačné odpovědi na otázku smysluplnosti takovýchto vizualizací.



Obr. 6 Přehled jednotlivých metod vizualizace nejistoty; vychází z kombinace poznatků z publikací[Aerts a kol., 2003; Drecki, 2009; Griethe a Schumann, 2006; McGranaghan, 1993; Pang, 2001; Senaratne a kol., 2012; Slocum, 2005]



Obr. 7 Shrnutí vizuálních proměnných a některých vizualizačních a dalších technik

8. Případové studie

Většina kartografických výstupů, převážně pak v podobě tištěných map, je uživateli vnímána reprezentativně a autoritativně. Jakkoli důvěryhodně však mapy vypadají na první pohled, je při jejich užívání nutné počítat s jistou dávkou nejistoty v datech a také v samotné vizualizaci. U velké části map tato nejistota nemá zásadní význam a v důsledku toho je také velká část populace zvyklá mapy běžně využívat a považovat informaci obsaženou v mapách za pravdivou. Například v případě prostorové přesnosti hranic států, okresů a jiných administrativních jednotek je chyba většinou vzhledem k použitému měřítku mapy zanedbatelná a tuto informaci tak většina uživatelů bere jako odpovídající obraz reality.

Diametrálně odlišná situace však může nastat při vizualizaci dat obsažených většinou ve specializovaných tematických mapách. Mapy předpovědi počasí, potenciálního uniku znečištění, krajinné pokrývky, složení půd a řada dalších osahují značnou míru aproximace a s tím spojené nejistoty. V tomto případě použití pouze jednoduchých vizualizací může vést k nepřesným výsledkům a nedorozuměním. Vizualizace nejistoty proto v mnoha případech pomáhají odhalit a vyjádřit realitu více přesně [Zhang a Goodchild, 2002] a mohou být způsobem jak následně zvýšit začlenění nejistých dat do rozhodovacích procesů. Navíc právě geovizualizace odvozené na základě GIS analýz environmentálních dat slouží k široké řadě účelů jako je plánování, analýza, odvozování a již zmíněné rozhodování [Monmonier a Branden, 1997]. Navzdory svému potenciálu tak mapy mohou být zavádějící a dokonce i kontroverzní, v případech, kdy je obsahová stránka podhodnocena nebo nadhodnocena [Monmonier, 1996]. Podhodnocená obsahová stránka může být také zcela zásadní u mapových výstupů vztahených ke krizovému managementu. Časové a věcné hledisko v tomto případě dává vizualizacím nejistoty zcela nový rozměr.

Pokud je mapa používána jako komunikační prostředek pro sdělování geoprostorové informace, je nutné do procesu mapové tvorby zahrnout i jednotlivé údaje o povaze a kvalitě zobrazovaných dat tak, aby byl výsledný přenos informací efektivní a nedocházelo k desinterpretaci dat. Uvedenou situaci si i odborná veřejnost začala uvědomovat především díky zvyšující se dostupnosti rastrových, vektorových a vícerozměrných dat v rámci environmentálních studií. Díky této zkušenosti jsou v posledních několika letech vizualizace nejistoty environmentálních dat v zájmu velké skupiny odborníků, protože velká část mapových výstupů vznikla v rámci environmentálních studií je určena právě na podporu rozhodování. V kontextu předešlých informací tak potřeba nejistoty vizualizovat následně přinesla výzvy k novým přístupům a k nalezení lepších strategií jak se vypořádat s tímto specifickým druhem informací.

I přes velký potenciál vizualizací nejistoty je vždy nutné počítat převážně s potenciálními čtenáři mapy a vzít v potaz i účel pro jaký je mapa určena. Je zcela zásadní racionálně zvážit, zda má v daném případě vizualizace nejistoty smysl. Pokud je následně vizualizace nejistoty potřebná, je nutné využít vhodnou metodu a zvolit takový postup, aby neodcházelo k prezentaci zavádějících vizualizací a metoda byla správně pochopena. Účelnost zvolených vizualizací proto byla v disertační práci demonstrována na případových studiích. V každé studii byl uveden rozbor jednotlivých komponentů kvality dat, popsána metoda pro výpočet nejistoty a vybraný prvek kvality dat byl vizualizován s důrazem na to, aby čtenář mapy byl schopen vizualizaci pochopit a následně začlenit do rozhodovacího procesu. U všech studií jde primárně o vizualizaci nejistoty.

Provedené případové studie:

- Územní plánování a suburbanizace města Olomouce – vizualizace stabilních ploch
- Vizualizace nejistoty v DEM – Rusavská hornatina
- Vizualizace ekotonů v povodí Trkmanky
- Změny půdního krytu dobývacího prostoru Heřmanice mezi lety 1966–2003
- Vizualizace nejistoty meteorologických dat na příkladu interpolace průměrných teplot vzduchu v České republice

V případových studiích byla demonstrována řada metod vizualizace nejistoty, od známých a často používaných až po kombinaci metod vytvořených při realizaci disertační práce. Všechny metody jsou podrobně popsány a okomentovány, včetně hodnocení vhodnosti jejich použití pro různé tematické oblasti a typy dat.

9. Uživatelské testování vizualizace nejistoty

V rámci několika kapitol práce byl zmiňován konečný uživatel mapy jako zcela zásadní a klíčový prvek navržených vizualizací. Vizualizace nejistoty z tohoto pohledu přináší celou řadu výzev, jak se vypořádat s tímto specifickým typem informací. Z pohledu navržených metod existuje celá řada způsobů vizualizace, ale jen některé lze považovat za vhodně navržené, protože existuje jen málo studií, které by následně řešily jejich použitelnost. Ta je přitom zcela zásadní v procesu komunikace mezi mapou a jejím čtenářem. Půžitelnost představuje také jeden z klíčových faktorů pro rozhodování uživatele nad předkládanou reprezentací, protože determinuje „do jaké míry může být produkt používán specifickými uživateli, aby dosáhli specifických cílů účinnou, efektivní a uspokojivou cestou ve specifickém kontextu použití“. Podle standardu ISO 9241 [ISO, 1998] je termín „půžitelnost“ (angl. usability) definován jako „efektivita, účinnost a spokojenost s prostředím, pomocí něhož uživatelé dosáhnou stanovených cílů“. ISO definice použitelnosti je založena na interakci člověka a počítače (Human-Computer Interaction, HCI) a ergonomickém designu pracoviště [Dykes a kol., 2005].

Z pohledu možnosti navrhování nových vizualizačních metod a aplikaci navrhnutých metod pro konkrétní účely lze z pohledu efektivnosti těchto vizualizací konstatovat, že existuje poměrně malý počet prací, které by se přímo zabývaly testováním konkrétních metod v případových studiích. Stejně tak chybí komplexní a ucelený přehled účinnosti těchto metod [Drečki, 2000; Nedovic-Budic, 1999]. Lze však vycházet z vědeckých studií, které popisují významnost pochopení nejistoty uživateli, a stejně tak upozorňují na to, že faktor uživatele v případě těchto vizualizací nelze pominout. Výzkumy v rámci použitelnosti vizualizace nejistoty jsou v pozornosti odborníků již více než 20 let. Relevantní a komplexní studie byly prováděny autory Leitnerem, Battenfeldem [Leitner a Battenfeld, 2000] a Watkinsem [Watkins, 2000]. Tito autoři popisují experimenty pro hodnocení vizualizačních technik pro zobrazování nejistoty a zdůrazňují potřebu dalšího empirického výzkumu k testování vizuálních proměnných a jejich významu pro vyjadřování kvality geodat. Evans [Evans, 1997] ve své studii potvrdil, že všichni účastníci testu byli schopni vizualizovanou nejistotu pochopit a interpretovat. Také Pappenberger a Beven [Pappenberger a kol., 2006] odmítají argument, že lidé tvořící rozhodnutí nejsou schopni pochopit vizualizovanou nejistotu, ale spíše se přiklání k názoru, že se jedná o problém v komunikaci, než v samotném nepochopení věci [Sayers a kol., 2006]. Kolektiv odborníků vedený Sanyalem [Sanyal a kol., 2009] zjistil, že vnímání nejistoty není jednotné a na základě testování lze odvodit, že vnímání oblastí s nízkou mírou nejistoty se liší od vnímání míst s vysokou mírou nejistoty. Lze také dojít k závěru, že u některých metod je legenda důležitým prvkem pro pochopení zobrazované nejistoty [Brus a kol., 2012b]. Mezi odborníky také panuje nesouhlas v názoru na vliv efektu učení a získaných znalostí. Výsledky studie Kobuse a kolektivu [Kobus a kol., 2001] a Hope a Hunter [Hope a Hunter, 2007] předpokládají, že znalost uživatele má zásadní vliv na jejich rozhodnutí. Tyto studie stojí v rozporu s dříve provedenými studiemi Aertse a kolektivu [Aerts a kol., 2003] a již zmíněného Evanse [Evans, 1997]. Je také potvrzeno, že v porovnání s jinými způsoby komunikace dávají mapy mnohem větší náhled na prostorové uspořádání. V souladu s pojetím Panga [Pang a kol., 1997] se vizualizace nejistoty snaží o prezentaci dat společně s vnější informací o nejistotě dat. S ohledem na testování konkrétních vizualizačních technik lze vysledovat také dlouhodobé snahy tyto vizualizační techniky podrobit uživatelskému testování.

Polohová nejistota byla testována Kubíčkem a Šašínkou [Kubíček a Šašínková, 2011]. Sanyal a kolektiv [Sanyal a kol., 2009] při testování vizualizačních metod pro 2D a 3D data zjistili, že

vnímání nejistoty u těchto dvou skupin není jednotné. Animace byly hodnoceny Fisherem [Fisher, 1993], sousední mapy byly testovány MacEachrenem [MacEachren a kol., 1998], metoda překrytí texturou metoda byla hodnocena Kardosem [Kardos a kol., 2003]. Výsledky studie Kobuse [Kobus a kol., 2001] naznačují, že znalost uživatelů má podstatný vliv na jejich rozhodnutí. Více informací o uživatelském testování lze nalézt v publikaci Senaratne a kol. [Senaratne a kol., 2012]. Zajímavé výsledky přinesla také studie zaměřená na sémiologii jednotlivých symbolů realizována MacEachrenem [MacEachren a kol., 2012]. I přes snahu jednotlivé techniky pro vizualizaci nejistoty testovat stále existuje značný nepoměr mezi teorií vizualizace nejistoty, kognitivním testováním a poznatky o vlivu jednotlivých metod na uživatele [Kubíček, 2011]. Tato situace byla také jedním z důvodů uživatelského testování v práci navržených vizualizací.

V disertační práci byl pro potřeby testování a tvorby experimentů využíván systém eye-tracking, který lze využít pro hodnocení map [Popelka a kol., 2012]. Tato technologie je podle Gienka a Levina [Gienko a Levin, 2005] založena na principu sledování pohybu lidských očí při vnímání vizuálního vjemu. Zařízení, které je schopné tyto pohyby sledovat a měřit, je známé jako eye-tracker. Tuto metodu je podle Goldberga a Kotvala [Goldberg a Kotval, 1999] možné považovat za objektivní, protože není ovlivněna názorem sledované osoby. Objektivnost eye-tracking metod někteří autoři znevažují a dodávají, že pro objektivní výsledky je třeba provádět současně i další druhy testování [Van Elzakker, 2013], přesto metoda eye-tracking může podpořit tradiční metody testování vizualizace nejistoty.

Pro ověření předpokladů a doplnění navrženého konceptu vizualizace nejistoty byla analýza očních pohybů řešena problematika intuitivnosti vytvořených vizualizací s cílem nelézt pro daný typ případové studie nevhodnější metodou. Práce byla prováděna na základě rešerše více publikací s důrazem na publikace MacEachrena [MacEachren a kol., 2012]. V rámci testování se jednalo o vyjádření nejistoty spojené s vektorovým zobrazením kategorií krajinného krytu v případové studii Změny půdního krytu dobývacího prostoru Heřmanice mezi lety 1966–2003. V těchto případech se jednalo o kombinaci polohové a atributové nejistoty při vymezení hranic. Důvody kombinace těchto dvou komponentů kvality dat do jedné vizualizace byly detailně popsány u problematiky vizuální interpretace krajinného krytu.

10. Návrh konceptu vizualizace nejistoty

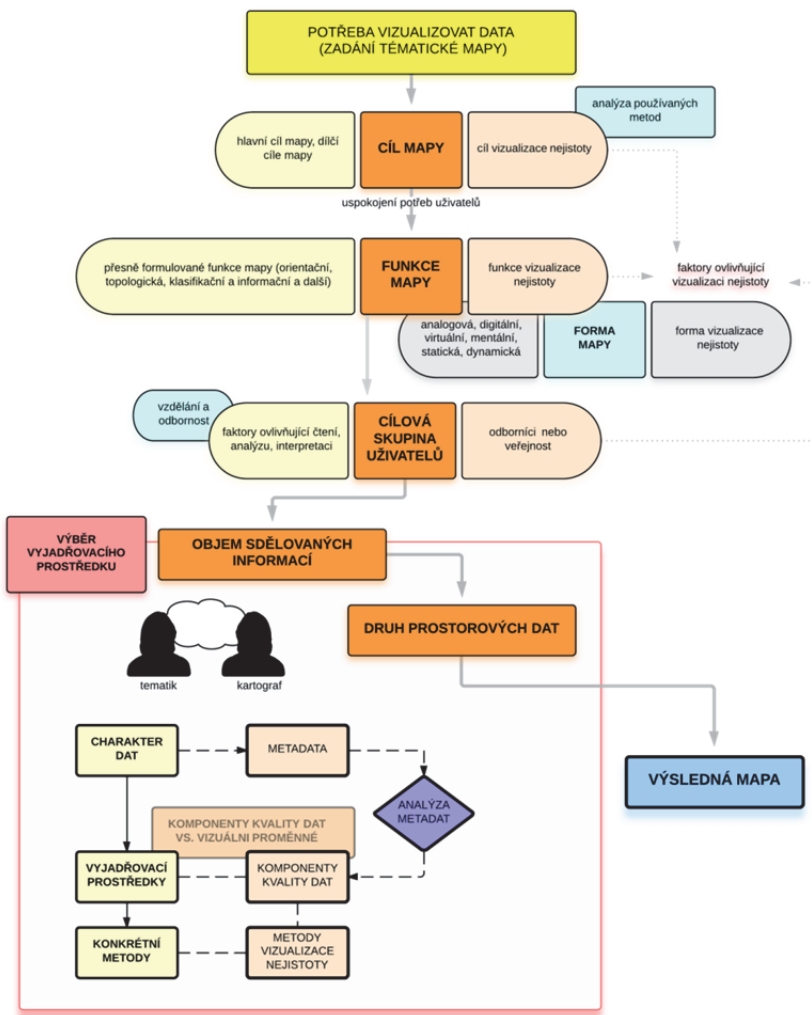
Nejistota je neoddelitelnou součástí nejen veškerých operací s prostorovými daty, ale také součástí všech výstupů a kartografických reprezentací. Z pohledu disertační práce byla nejistotou chápána především kvalita prostorových dat, jako zásadní a klíčový prvek, který má vliv na celou řadu dalších faktorů. Vizualizací nejistoty je ovlivněn také celkový proces přenosu mezi původcem a příjemcem informace, protože dochází k celé řadě problémů při kartografické komunikaci. Při vymezování konceptu vizualizace nejistoty je nutné uvést, že existuje více pojetí nejistoty a nebylo v možnostech práce se všemi těmito nejistotami zabývat.

Jednotlivé komponenty prostorových dat vymezené v této disertační práci byly zkoumány z pohledu jednotlivých standardů a utvářejí skupiny popisných parametrů dat, které lze následně využít pro vizualizaci nejistoty. Většina těchto komponent je popsána pomocí metadat. Metadatový zápis jednotlivých komponent proto v popisu nejistoty hraje zásadní roli. Tato sdělení o informacích nesoucí údaje o míře kvality dat však i přes veškeré snahy v GIScience komunitě stále neobsahují popisy, návody nebo alespoň doporučení, jak následně informaci o kvalitě dat

reprezentovat. Tato situace je navíc umocněna skutečností, že v rámci výzkumu na poli vizualizace nejistoty je jen malé množství prací, které se zabývají komplexní problematikou vizualizace nejistoty z pohledu kartografie. Tento fakt je výchozím předpokladem pro navržení konceptu pro rozhodovací proces pro vizualizaci nejistoty v environmentálních studiích. Samotný návrh konceptu vychází z rozhodovacího procesu pro výběr vyjadřovacího prostředku v rámci tematické kartografie [Voženilek, Kaňok a kol., 2011]. Jako neoddelitelnou součást jednotlivých kritérií v rozhodovacím procesu při tvorbě mapy jsou následně doplněny jednotlivé aspekty vizualizace nejistoty tak, aby byl vytvořen celkový koncept. Navržený koncept je také doplněn o řadu poznatků získaných při řešení projektu Inteligentní systém pro interaktivní podporu tvorby tematických map, který byl řešen na Katedře geoinformatiky Univerzity Palackého v Olomouci a v rámci kterého byla problematika rozhodovacích procesů a aspektů vizualizace detailně studována [Brus a kol., 2010; Brus a kol., 2009; Dobešová a Brus, 2011].

Při tvorbě tematické mapy je výchozím krokem požadavek na samotnou vizualizaci, daný buď zadáním tematické mapy, nebo pouze potřebou data vizualizovat z důvodu lepšího pochopení studovaných dat a jevů. V tomto okamžiku se autor vizualizace dostává do situace, kdy se musí rozhodovat nad následnou variantou a jednotlivými kroky v procesu tvorby mapy. Na výběr je většinou větší množství možností a existuje více variant, ze kterých se dá při řešení konkrétní úlohy vycházet. Rozhodovací proces nad konkrétními vlastnostmi výsledné reprezentace je následně vždy ovlivněn především již nabytými kartografickými schopnostmi tvůrce mapy a také znalostí o vizualizačních technikách obecně. Primárním zdrojem informací tedy bývá studium odborné literatury. Během této fáze by si odborník měl předem shromáždit a utřídit všechny běžně dostupné informace, na jejichž základě si osvojí základní znalosti, zejména terminologii v dané doméně. Vzhledem k faktu, že téměř 95 % všech mapových výstupů je spojeno s digitální reprezentací dat, je nutné do potřebných znalostí započítat také znalosti počítačové grafiky a příbuzných disciplín. Z pohledu zpracování dat a jejich následné vizualizace je nutno upozornit také na schopnost autora pracovat s různými dostupnými softwary, protože znalost a dostupnost technického a softwarového vybavení zásadně ovlivňuje celý proces mapové tvorby. U environmentálních studií je nutné tuto situaci ještě více zdůraznit, vzhledem ke skutečnosti, že jsou často porušovány zásady optimálního procesu tvorby mapy a autory konečných vizualizací jsou často přímo tematikové. Spolupráce tematika s kartografem je u environmentálních studií spíše výjimkou. Skupina uživatelů, která vizualizuje a dále zpracovává prostorová data s využitím programů pro tvorbu map týkajících se například územního plánování, ochrany přírody a dalších oblastí, tyto mapy velmi často tvoří intuitivně a nerespektuje kartografická pravidla. Touto situací se mění tradiční vztah mezi kartografem a mapovým uživatelem. Z tohoto důvodu je potřeba v rámci navrhovaného konceptu tyto výchozí znalosti tvůrce mapy zdůraznit a brát jako klíčové.

Pro navrhované schéma (obr. 8) je prvotním krokem stanovení cíle mapy. Hlavní cíl mapy by měl být vždy stanoven před samotnou vizualizací a následně rozpracován do jednotlivých dílčích cílů tak, aby bylo zajištěno, že budou všechny cíle naplněny. Cíle vizualizací s obsaženou nejistotou by měly být vždy předem kriticky zhodnoceny v návaznosti na následně formulované funkce vznikající vizualizace. Tento postup byl také aplikován při řešení jednotlivých případových studií. Na používané metody je však třeba nahlížet s velkou obezřetností a také kriticky, protože jak již bylo popsáno v disertační práci, řada vizualizačních metod byla pouze navržena, ale již nebyly testovány na uživatelské aspekty. Celkově je také třeba ctít kartografické zásady a pravidla, aby se vizualizace nejistoty staly nástrojem, který napomůže realitu pochopit komplexněji.



Obr. 8 Návrh konceptu vizualizace nejistoty v environmentálních studiích

Primární náplní hlavních i vedlejších cílů mapy je především uspokojení potřeb předpokládaných cílových uživatelů mapy. Tvůrce vizualizace, který má v úmyslu vizualizovat také kvalitu prostorových dat a s ní spojenou nejistotu, si musí uvědomit, že jednotlivé kroky v procesu čtení map jsou ovlivněny mnoha faktory. O této problematice pojednává celá kapitola práce. Komunikační funkce mapy je závislá na vzdělání, ale především na odbornosti uživatele mapy. Zcela odlišně pracuje s mapou uživatel bez jakékoli znalosti vizualizačních technik pro zobrazování nejistoty a zcela odlišně také odborník, který se podobnému tématu věnuje delší dobu. Tato

skutečnost byla potvrzena provedeným uživatelským testováním navržených vizualizací nejistoty, kdy mezi respondenty byly zjištěny zcela zásadní rozdíly v jednotlivých odpovědích. Z pohledu kartografie je také důležitý fakt, že existuje rozdíl mezi čtením mapy s obsaženou nejistotou kartografem a čtenářem bez kartografického vzdělání. Kartograf je schopen během čtení odlišit jemné detaily a může se soustředit na techniky pro vizualizaci nejistoty. Většina konečných uživatelů map s obsaženou nejistotou z tohoto pohledu nejsou kartografové, a kvůli tomuto faktoru je rozdílnost čtení map kartografem při navrhování vizualizace nepodstatná. Problém při čtení map je spojen také s věkem a vzděláním čtenářů map. Vědecké mapy a vizualizace nejistoty používají náročné kartografické metody, kdy jsou tyto metody sice u specialistů běžně používány, přesto čtení map s nejistotou vyžaduje po uživateli značný přehled a orientaci v daném oboru. Po uživateli se vyžaduje především znalost specifické terminologie. Terminologie je nutná z důvodu pochopení studované domény a hlavně specifčnosti samotné vizualizace nejistoty. Tato nejistota je pevně spojena s daty a pro pochopení vizualizací musí být čtenář mapy s těmito fakty seznámen. Bez znalosti terminologie, procesů a specifikace konkrétních datových sad jsou pro uživatele navržené mapy často nesrozumitelné. Proto je cílová skupina uživatelů zcela klíčová pro výběr vizualizačních metod, její náročnosti a také míry potřebné abstrakce pro její pochopení.

Navržený koncept přes problematiku uživatelů vizualizací pokračuje dále problematikou výběru nevhodnějšího vyjadřovacího prostředku. Tato část je spojena s dalšími dvěma kritérii, která spolu souvisejí. Jedná se o objem sdělovaných informací a druh prostorových dat. Při stanovování míry komplexity mapy a výsledného objemu informací je nutné vycházet z již zavedených principů. Doporučení lze nalézt také v jednotlivých percepčních teoriích a zmiňovaných principech vizualizace informace. Následně je obsah mapy zcela zásadně ovlivněn cílem mapy, který následně dedikuje i výběr vhodných metod pro vizualizaci. Výběr konkrétních metod musí být ovlivněn především tím, co je primární zobrazovanou skutečností a kolik informace musí být v mapě obsaženo, aby se naplnil hlavní cíl mapy a z pohledu vizualizace nejistoty byly také naplněny tyto cíle. Závěry těchto úvah významně ovlivní celkové množství informací, a tím i grafické zaplnění mapy. Volba metod pro vizualizaci nejistoty je následně přímo závislá na výběru kartografických metod pro zobrazování jevu. Výběr metody se řídí také kritériem hodnocení druhu prostorových dat, které se provádí podle charakteru popisu vlastností znázorňovaných jevů [Dobešová a kol., 2011]. V této fázi je tvorba vizualizace většinou ovlivněna expertem na danou problematiku a kartografem.

Získané expertní znalosti mají základ ve vzdělání, nasbíraných zkušenostech, inteligenci a intuici a komunikace s expertem. Efektivní integrace zmíněných složek vede k tvorbě rozhodnutí a výběru kartografické vyjadřovací metody pro vizualizaci nejistoty. Nezbytným předpokladem jsou informace o vizualizovaných datech, jedná se především o metadatový popis dat. Na základě podrobné analýzy jednotlivých komponentů kvality dat je dále nutné vybírat vhodné vizuální proměnné a umět touto integrací docílit správného přenosu informace o kvalitě dat pomocí konkrétní vizualizační metody nebo kombinací metod.

Pokud nejsou jednotlivá doporučení pro vizualizaci nejistoty dodržována, dochází k porušení teorie percepce a v mapových výstupech vznikají chyby a nepřesnosti, čímž dochází ke špatné interpretaci nejen jednotlivých částí, ale celého systému zobrazovaných dat. Z pohledu náročnosti vizualizací nejistoty tak účelná a správná mapa může vzniknout pouze za předpokladu, že dojde ke spolupráci třech odborníků (tematik, kartograf, geoinformatik) nebo týmu vědců, což dokládají i reálné situace, kdy nejpropracovanější vizualizace nejistoty lze najít právě u projektových záměrů a vzájemné spolupráce mezi týmy odborníků.

Celý proces vizualizace nejistoty lze na základě studia jednotlivých klíčových aspektů vizualizace nejistoty rozdělit do několika základních oblastí. Toto dělení koresponduje s dělením v jednotlivých kapitolách práce, nicméně v celé práci nebylo komplexně hodnoceno. Nejistota vzniká ve všech částech procesu kartografické komunikace a z pohledu možné eliminace se jedná o neodstranitelný element. Podle vzniku nejistoty lze hovořit o nejistotě při prezentaci prostorových dat kvůli odlišné kvalitě dat způsobené sběrem, transformací a dalšími vlivy. Vizualizační nejistota (nejistota vizualizace) vzniká následně celou řadou faktorů, kdy se zásadní procesy týkají převodu informací do digitální podoby a následného zobrazování konečným uživateli. I samotní uživatelé jsou zdrojem nejistoty, protože na percepci má vliv celá řada osobnostních a dalších charakteristik. Je nutné zdůraznit, že některé faktory při vizualizaci nejistoty lze odstranit úplně, jiné je možné částečně eliminovat a některé je nutné brát jako výchozí a neměnný předpoklad při navrhování nově vznikajících vizualizací.

11. Diskuse

Z pohledu práce je zcela zásadní kriticky pohlížet na samotné vymezení pojmu nejistota v environmentálních studiích. Neexistuje pouze jedno pojetí nejistoty, ale lze najít rozdílné koncepty, názory a definice. Na základě této rozporuplnosti je velmi problematické nalézt vhodné nástroje a teorie, které by postihovaly celou problematiku této vědní disciplíny. Kvůli komplexnosti dané problematiky také neexistuje jednotná metodologie. Při řešení disertační práce bylo přistoupeno k vymezení tohoto termínu a byla využívána terminologie, která je využívána v rámci GIScience komunity. Vzhledem k této skutečnosti může být na práci jinými odborníky, převážně z oboru matematiky a informatiky, nahlíženo poněkud kriticky. V práci byly pro možnosti vizualizace nejistoty definovány jednotlivé komponenty kvality prostorových dat, které vycházejí ze standardů prostorových dat. Z těchto standardů jsou v disertační práci vybrány pouze některé zásadní komponenty. Z důvodu obsáhlosti některých případových studií je vymezení všech komponentů kvality dat a jiných faktorů v rámci jedné práce prakticky nemožné. Zatímco některé studie se zabývají v podstatě jen jednou komponentou kvality dat, v rámci jiných studií je řešeno komponent mnohem více.

Konečným a hlavním cílem vizualizací je ovlivnit rozhodovací proces čtenáře mapy. Z pohledu vizuální odlišitelnosti jednotlivých kartografických znaků je největším problémem a námětem k diskuzi nedostatek softwarových prostředků pro vizualizaci nejistoty. Současné geografické informační systémy v sobě nemají implementovány téměř žádné nástroje pro vizualizaci nejistoty, které by s nejistotou dovedly komplexněji pracovat. Vždy se jedná o pouze částečnou funkcionalitu možných způsobů vizualizace. Samotné výpočetní zázemí programové prostředky sice poskytují, ale pouze v rámci některých přístupů pro modelování nejistot. Chybí zde nástroj, který by uživateli umožňoval jednoduché a rychlé zobrazení pomocí více metod bez nutnosti konverze dat mezi různými programy.

Pro zpracování relativně jednoduchých úloh bylo třeba vynaložit značné množství času hledáním vhodného programového prostředku pro vizualizaci. Tato skutečnost je zcela v rozporu se základním doporučením Wareho používat nové přístupy pouze pokud prokazatelně přinesou větší přínos v porovnání s časem a energií nutných pro jejich implementaci. Z tohoto pohledu je část metod aplikovaná na případové studie spíše možnou metodou vizualizace, pokud se testováním neprokáže jejich použitelnost. Současné poznání vlivu vizualizace nejistoty na rozhodovací procesy tak vždy vyžaduje praktické ověření volby správné vizualizační techniky na daný typ dat a situaci.

Z tohoto důvodu je součástí práce i praktické testování vizualizačních přístupů s cílem pochopit a prohloubit poznatky k problematice vizualizace nejistoty z pohledu percepčních a kognitivních procesů.

Možnost jak v mapě zobrazit všechny aspekty nejistoty je nesplnitelná. Zásadním a limitujícím prvkem jsou kartografické vyjadřovací prostředky, limity formy mapy a především samotní uživatelé dat. Z tohoto pohledu je zcela zásadní a nejvíce kritickou podmínkou smysluplnosti vizualizací jejich účel a především koncový uživatel. Práce v tomto ohledu jasně vymezuje pojem uživatelská nejistota vůči pojmu nejistota dat.

12. Závěr

Hlavním cílem práce posouzení základních konceptů pro vizualizaci nejistoty prostorových dat, identifikace problémů s nimi spojených a rozšíření rámce pro vizualizaci kvality prostorových dat. Nové pojetí tohoto výzkumu představuje rozšíření konceptů vizualizace kvality prostorových dat, integrace dat a realizace vizualizačních metod.

V rámci kapitol disertační práce jsou jednotlivé dílčí aspekty vizualizace nejistoty analyzovány, specifikovány a hodnoceny z pohledu samotné vizualizace nejistoty. Systematicky jsou prozkoumány jednotlivé dílčí koncepty z pohledu komponentů kvality prostorových dat, standardů kvality prostorových dat a vizualizačních technik s cílem navrhnout vylepšený koncept vizualizace nejistoty. Práce se zaměřuje na přehled jednotlivých faktorů ovlivňujících vizualizaci nejistoty za účelem vytvoření schématu jak nejistotu prostorových dat v environmentálních studiích pochopit, analyzovat a implementovat do efektivních vizualizací s cílem umožnit čtenářům mapy dosáhnout lepších výsledků při rozhodování. Jednotlivými dílčími cíli práce je vymezení pojmu nejistota v rámci environmentálních studií především s ohledem na kvalitu prostorových dat, analýza jednotlivých komponent kvality prostorových dat a jejich standardizace, studium a analýza faktorů ovlivňujících percepci vizuální informace z map s obsaženou nejistotou, řešení existujících přístupů k vizualizaci nejistoty s důrazem na environmentální studie a analýza používaných způsobů vizualizace nejistoty v environmentálních studiích a stanovení jejich specifických vlastností. Pro ověření poznatků byla provedena řada případových studií – vizualizace stabilních ploch v územním plánování, vizualizace nejistoty v digitálních modelech terénu, vizualizace ekotonů, vizualizace u změn půdního krytu dobývacího prostoru a vizualizace nejistoty meteorologických dat na příkladu interpolace průměrných teplot. V každé studii je uveden rozbor jednotlivých komponentů kvality dat, popsána metoda pro výpočet nejistoty a vybraný prvek kvality dat je vizualizován s důrazem na to, aby čtenář mapy byl schopen vizualizaci pochopit a následně začlenit do rozhodovacího procesu.

Na základě získaných poznatků byl proveden návrh objektivního řešení vizualizace nejistoty pro případové studie s důrazem na vizualizační techniky a bylo realizováno testování intuitivnosti navržených metod pro konkrétní případovou studii, a to s využitím technologie eye-tracking. Současně byl také vytvořen přehled jednotlivých vizualizačních metod pro vizualizaci nejistoty v prostorových datech. Na základě poznatků získaných při řešení práce bude následující výzkum věnován prohlubování testování navržených metod a také implementaci konkrétních vizualizačních pravidel a doporučení do formy expertního systému, který napomůže uživatelům s výběrem správné vizualizační metody pro konkrétní typ dat a úlohy. Vzhledem ke specifčnosti procesu vizualizace nejistoty a povaze nejistoty obsažené ve všech prostorových datech bude následné vytvoření tohoto systému přínosné pro vizualizaci dat v dalších environmentálních studiích.

13. Použité zdroje

- AERTS, J. C., CLARKE, K. C., KEUPER, A. D. Testing popular visualization techniques for representing model uncertainty. *Cartography and Geographic Information Science*, 2003, 30(3), 249-261.
- AVČR: Proč je náš výzkum důležitý? [online]. Ústav teorie informace a automatizace AV ČR, v.v.i., 2013, [cit. 12-3-2013]. Dostupné na WWW: <http://archiv.otevrena-veda.cz/index.php?p=proc_je_dulezity&site=utia>.
- BARRY, S., ELITH, J. Error and uncertainty in habitat models. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(3), 413-423.
- BEARD, M. K., BUTTENFIELD, B. P., CLAPHAM, S. B. NCGIA Research Initiative 7: Visualization of Spatial Data Quality: Scientific Report for the Specialist Meeting 8-12 June 1991, Castine, Maine. Santa Barbara, 1991. National Center for Geographic Information and Analysis.
- BOARDMAN, J., PEARCE, K., PONTING, A. Applications of probabilistic consequence assessment uncertainty analysis for plant management. *Radiation protection dosimetry*, 2000, 90(3), 373-376.
- BOTCHEN, R. P., WEISKOPF, D., ERTL, T. Interactive visualization of uncertainty in flow fields using texture-based techniques. In *Proceedings of the Proc. Intl. Symp. on Flow Visualization*, 2006.
- BOUKHELIFA, N., DUKE, D. The uncertain reality of underground assets. In *Proceedings of the Joint Workshop "Visualization and Exploration of Geospatial Data"*, ISPRS, ICA, DGfK. June, 2007, 27-29.
- BRECHENSEN, R., VILANOVA, A., PLATEL, B., et al. Parameter sensitivity visualization for DTI fiber tracking. *Visualization and Computer Graphics*, IEEE Transactions on, 2009, 15(6), 1441-1448.
- BRODLIE, K., OSORIO, R. A., LOPES, A. A Review of Uncertainty in Data Visualization. In *Expanding the Frontiers of Visual Analytics and Visualization*. Springer, 2012, 81-109 s. ISBN 978-1-4471-2803-8.
- BRUGGER, W. *Filosofický slovník*. Praha: Naše vojsko, 1994. 639 s. ISBN 978-80-206-0409-5.
- BRUS, J. The role of standards in spatial data quality visualisation. In *Proceedings of the 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, v tisku, 2013.
- BRUS, J., DOBEŠOVÁ, Z., KANOK, J. Utilization of expert systems in thematic cartography. 2009 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (Incocs 2009), 2009, 285-289.
- BRUS, J., DOBEŠOVÁ, Z., KANOK, J., et al. Design of Intelligent System in Cartography. 9th Roedunet IEEE International Conference, 2010, 112-117.
- BRUS, J., POPELKA, S., SVOBODOVA, J. Exploring Effectiveness of Uncertainty Visualization Methods by Eye-Tracking. In *Proceedings of the Tenth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, Florianopolis, Brazil, C. VIEIRA, V. BOGORNY, A.R. AQUINO eds., 2012.
- BURT, J. E., ZHU, A.-X., HARROWER, M. Depicting classification uncertainty using perception-based color models. *Annals of GIS*, 2011, 17(3), 147-153.
- BUTTENFIELD, B., BEARD, M. K. Graphical and geographical components of data quality. *Visualization in geographic information systems*, 1994, 150-157.
- CONINX, A., BONNEAU, G.-P., DROULEZ, J., et al. Visualization of uncertain scalar data fields using color scales and perceptually adapted noise. In *Proc. ACM SIGGRAPH Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, ACM, 2011, 59-66.
- CORREA, C. D., CHAN, Y. H., MA, K. L. A framework for uncertainty-aware visual analytics. In *Proceedings of the Visual Analytics Science and Technology*, IEEE, 2009, 51-58.
- DEITRICK, S. A. Uncertainty visualization and decision making: Does visualizing uncertain information change decisions. In *Proceedings of the XXIII International Cartographic Conference Moskva*, 2007.
- DEVILLERS, R., STEIN, A., BÉDARD, Y., et al. Thirty Years of Research on Spatial Data Quality: Achievements, Failures, and Opportunities. *Transactions in GIS*, 2010, 14(4), 387-400.
- DOBEŠOVÁ, Z., BRUS, J. Coping with Cartographical Ontology. 11th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (Sgem 2011), Vol II, 2011, 377-384.
- DOBEŠOVÁ, Z., PENÁZ TOMÁŠ, BRUS JAN, et al. *Inteligentní systémy v tematické kartografii*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2011. ISBN 9788024429502 8024429500.
- DRECKI, I. Visualisation of uncertainty in geographical data. In *Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Quality*, Hong Kong, W.Z. SHI, M.F. GOODCHILD, P.F. FISHER eds., 2000 260-271.
- DRECKI, I. Representing geographical information uncertainty: cartographic solutions and challenges. *Proceedings of 24th International Cartographic Conference*, vol., s. [cit. 12-3-2013]. Dostupné na WWW: <http://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/Oral%20Presentations%20PDF/B1-Data%20quality/CO-085.pdf>.
- DUBOIS, D., PRADE, H. Possibility theory, probability theory and multiple-valued logics: A clarification. *Annals of mathematics and Artificial Intelligence*, 2001, 32(1-4), 35-66.
- DUCKHAM, M., MASON, K., STELL, J., et al. A formal approach to imperfection in geographic information. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2001, 25(1), 89-103.
- DUDEK, I. Poznání a neurčitost základní racionální přístupy a praktické metody. *E-Logos: Electronic Journal for Philosophy*, vol., s. [cit. Dostupné na WWW.
- DYKES, J., MACEACHREN, A. M., KRAAK, M. J. *Exploring Geovisualization* Burlington: Elsevier, 2005. ISBN 978-0-08-053147-2.
- EVANS, B. J. Dynamic display of spatial data-reliability: Does it benefit the map user? *Computers & Geosciences*, 1997, 23(4), 409-422.
- FAUSETT, L. V. *Fundamentals of neural networks: architectures, algorithms, and applications*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall 1994. ISBN 978-0-13-334186-7.
- FISHER, P. Animation and sound for the visualization of uncertain spatial information. *Visualisation in Geographical Information Systems*, 1994, 181-185.
- FISHER, P. F. Visualizing uncertainty in soil maps by animation. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 1993, 30(2), 20-27.
- FOODY, G. M., ATKINSON, P. M., WILEY, J. *Uncertainty in remote sensing and GIS*. Hluboken: Wiley Online Library, 2002. ISBN 978-0-470-84408-3.
- FRANKLIN, J., MILLER, J. A. *Mapping species distributions : spatial inference and prediction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-52-187635-3

- GERHARZ, L. E., PEBESMA, E. J. Usability of interactive and non-interactive visualisation of uncertain geospatial information. In Proceedings of the Geoinformatik 2009 Konferenzband, W. REINHARDT, A. KRÜGER, M. EHLERS eds., 2009, 223-230.
- GERSHON, N. Visualization of an imperfect world. Computer Graphics and Applications, IEEE, 1998, 18(4), 43-45.
- GIENKO, G., LEVIN, E. Eye-tracking in augmented photogrammetric technologies. In Proceedings of the ASPRS International Conference, Baltimore, USA, 2005.
- GOLDBERG, J. H., KOTVAL, X. P. Computer interface evaluation using eye movements: methods and constructs. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24(6), 631-645.
- GOLLEDGE, R. G., STIMSON, R. J. Spatial behavior : a geographic perspective. NY: Guilford Press, 1997. ISBN 978-1-57230-050-7.
- GOODCHILD, M., HAINING, R., WISE, S. Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. International Journal of Geographical Information Systems, 1992, 6(5), 407-423.
- GOODCHILD, M. F. Stepping over the line: technological constraints and the new cartography. The American Cartographer, 1988, 15(3), 311-319.
- GOODCHILD, M. F. Integrating GIS and remote sensing for vegetation analysis and modeling: methodological issues. Journal of Vegetation Science, 1994, 5(5), 615-626.
- GOODCHILD, M. F., GOPAL, S. The accuracy of spatial databases. London: Taylor & Francis 2003. 308 s. ISBN 978-0-85066-847-6.
- GOODCHILD, M. F., PARKS, B. O., STEYAERT, L. T. Environmental modeling with GIS 1993.
- GRIETHE, H., SCHUMANN, H. The visualization of uncertain data: Methods and problems. In Proceedings of the SimVis, 2006, 143-156.
- HABER, R. B., MCNABB, D. A. Visualization idioms: A conceptual model for scientific visualization systems. Visualization in scientific computing, 1990, 74, 74-93.
- HEISENBERG, W. The uncertainty principle. Educational Materials and Equipment, 1974.
- HENGL, T. Visualisation of uncertainty using the HSI colour model: computations with colours. In Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation, 2003, 8-17.
- HOPE, S., HUNTER, G. Testing the effects of positional uncertainty on spatial decision-making. International Journal of Geographical Information Science, 2007, 21(6), 645-665.
- HUNTER, G. J. Managing uncertainty in GIS. Geographical information systems, 1999, 2, 633-641.
- HUNTER, G. J., GOODCHILD, M. Managing uncertainty in spatial databases: Putting theory into practice. In Proceedings of the THE ANNUAL CONFERENCE-URBAN AND REGIONAL INFORMATION SYSTEMS ASSOCIATION, URISA URBAN AND REGIONAL INFORMATION SYSTEMS, 1993, 15-15.
- CHRISMAN, N. R. Part 2: Issues and Problems Relating to Cartographic Data Use, Exchange and Transfer: The Role Of Quality Information In The Long-Term Functioning Of A Geographic Information System. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1984, 21(2), 79-88.
- JONES, K., DEVILLERS, R., BÉDARD, Y., et al. Visualizing perceived spatial data quality of 3D objects within virtual globes. International Journal of Digital Earth, 2013.
- KALOUDA, F. Riziko a nejistota–příspěvek k precizaci pojmů. In Proceedings of the 5. mezinárodní konference Řízení a modelování finančních rizik, Ostrava, VŠB-TU Ostrava, Ekonomická fakulta, katedra Financí, 2010.
- KLIJ, G. J., WIJERMAN, M. J. Uncertainty-based information: elements of generalized information theory. New York: Physica Verlag, 1999. ISBN 978-3-7908-1242-8.
- KOBUS, D. A., PROCTOR, S., HOLSTE, S. Effects of experience and uncertainty during dynamic decision making. International Journal of Industrial Ergonomics, 2001, 28(5), 275-290.
- KUBÍČEK, P., ŠAŠINKA, Č. Thematic uncertainty visualization usability–comparison of basic methods. Annals of GIS, 2011, 17(4), 253-263.
- LERMUSIAUX, P. F., CHIU, C., S, GAWARKIEWICZ, G. G., et al. Quantifying uncertainties in ocean predictions. Oceanography, 2006, 19(1).
- LODHA, S. K., VENABLE, E., MARSH, D., et al. Use of natural sounds and metaphors for data perceptualization. In Proceedings of the Photonics West 2001-Electronic Imaging, International Society for Optics and Photonics, 2001, 180-190.
- LOPES, A., BRODLIE, K. Accuracy in 3D particle tracing. In Mathematical Visualization. Springer, 1998, 329-341 s. ISBN 978-3-642-08373-0.
- LUCIEER, A. Visualization for exploration of uncertainty related to fuzzy classification. In Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006. IGARSS 2006. IEEE International Conference on, IEEE, 2006, 903-906.
- LUCIEER, A., KRAAK, M.-J. Interactive and visual fuzzy classification of remotely sensed imagery for exploration of uncertainty. International Journal of Geographical Information Science, 2004, 18(5), 491-512.
- MACEACHREN, A. M. How maps work : representation, visualization, and design. New York: Guilford Press, 1995. ISBN 978-0-89862-589-9.
- MACEACHREN, A. M., KRAAK, M.-J. Exploratory cartographic visualization: advancing the agenda. Computers & Geosciences, 1997, 23(4), 335-343.
- MACEACHREN, A. M., KRAAK, M.-J. Research challenges in geovisualization. Cartography and Geographic Information Science, 2001, 28(1), 3-12.
- MACEACHREN, A. M., MONMONIER, M. Geographic Visualization - Introduction. Cartography and Geographic Information Systems, Oct 1992, 19(4), 197-200.
- MACEACHREN, A. M., ROBINSON, A., HOPPER, S., et al. Visualizing geospatial information uncertainty: What we know and what we need to know. Cartography and Geographic Information Science, 2005, 32(3), 139-160.
- MACEACHREN, A. M., ROTH, R. E., O'BRIEN, J., et al. Visual Semiotics & Uncertainty Visualization: An Empirical Study. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 2012, 18(12), 2496-2505.
- MARCH, J. G., SIMON, H. A. Organizations. New York: Wiley, 1958. ISBN 978-0-471-56793-6
- MCGRANAGHAN, M. A cartographic view of spatial data quality. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1993, 30(2), 8-19.
- MONMONIER, M., BRANDEN, J. B. Design guide for environmental maps. Trenton, NJ: Dept. of Environmental Protection, Division of Science and Research, 1997.
- MONMONIER, M. S. How to lie with maps. Chicago: University of Chicago Press, 1996. ISBN 978-0-226-53421-3.
- NEDOVIC-BUDIC, Z. Evaluating the effects of GIS technology: review of methods. Journal of Planning Literature, 1999, 13(3), 284-295.

- NOVÁK, V. Základy fuzzy modelování. Praha: BEN - technická literatura, 2000. ISBN 978-80-7300-009-7.
- O'LOONEY, J. Beyond maps : GIS and decision making in local government. Redlands, California: ESRI Press, 2000. ISBN 978-1-879102-79-8.
- OTT, E. Chaos in dynamical systems. Cambridge: Cambridge university press, 2002. ISBN 978-0-521-01084-9.
- PANG, A. Visualizing uncertainty in geo-spatial data. In Proceedings of the Workshop on the Intersections between Geospatial Information and Information Technology, 2001, 1-14.
- PANG, A. T., WITTENBRINK, C. M., LODHA, S. K. Approaches to uncertainty visualization. The Visual Computer, 1997, 13(8), 370-390.
- PAPPENBERGER, F., MATGEN, P., BEVEN, K. J., et al. Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions. Advances in Water Resources, 2006, 29(10), 1430-1449.
- PLEWE, B. The nature of uncertainty in historical geographic information. Transactions in GIS, 2002, 6(4), 431-456.
- POPELKA, S., BRYCHTOVA, A., BRUS, J., et al. Advanced Map Optimization Based on Eye-Tracking. In C. BATEIRA ed. Cartography – A Tool for Spatial Analysis. Rijeka: Intech, 2012, 99-118 s. ISBN.
- POTTER, K., ROSEN, P., JOHNSON, C. R. From Quantification to Visualization: A Taxonomy of Uncertainty Visualization Approaches. In Uncertainty Quantification in Scientific Computing. Springer, 2012, 226-249 s. ISBN 978-3-642-32676-9.
- POTTER, K., WILSON, A., BREMER, P.-T., et al. Ensemble-vis: A framework for the statistical visualization of ensemble data. In Proceedings of the Data Mining Workshops, 2009. ICDMW'09. IEEE International Conference on, IEEE, 2009, 233-240.
- REGAN, H. M., COLYVAN, M., BURGMAN, M. A. A taxonomy and treatment of uncertainty for ecology and conservation biology. Ecological applications, 2002, 12(2), 618-628.
- RENARD, B., KAVETSKI, D., LEBLOIS, E., et al. Toward a reliable decomposition of predictive uncertainty in hydrological modeling: Characterizing rainfall errors using conditional simulation. Water Resources Research, 2011, 47(11).
- ROTH, R., E. Cartography 2.0 - The Nature of Geospatial Uncertainty [online]. GITHUB, 2009, [cit. 11-11-2012]. Dostupné na WWW: <<https://github.com/ajturner/neocartography/wiki/GeospatialUncertainty>>.
- SAGER, L., GRIER, R., JACKSON, C., et al. Visualization Techniques for Revealing Uncertainty to Decision Makers. In Proceedings of the Human Systems Integration symposium (HSIS), 2007.
- SANYAL, J., ZHANG, S., BHATTACHARYA, G., et al. A user study to compare four uncertainty visualization methods for 1d and 2d datasets. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 2009, 15(6), 1209-1218.
- SAYERS, P., GOULDBY, B., SIMM, J., et al. Risk, performance and uncertainty in flood and coastal defence: A review. London: Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2006.
- SENARATNE, H., GERHARZ, L., PEBESMA, E., et al. Usability of Spatio-Temporal Uncertainty Visualisation Methods. Bridging the Geographic Information Sciences, 2012, 3-23.
- SCHNEIDERMAN, B., PANG, A. T. Visualizing Uncertainty: Computer Science Perspective. In Proceedings of the Toward Improved Visualization of Uncertain Information, Washington, National Academy of Sciences, 2005.
- SLOCUM, T. A. Thematic cartography and geographic visualization. Upper Saddle River: Pearson/Prentice Hall, 2005. ISBN 978-0-13-035123-4.
- SLOCUM, T. A., CLIBURN, D. C., FEDDEMA, J. J., et al. Evaluating the usability of a tool for visualizing the uncertainty of the future global water balance. Cartography and Geographic Information Science, 2003, 30(4), 299-316.
- STERNBERG, R. J. Kognitivní psychologie. Praha: Portál, 2002. ISBN 80-7178-376-5.
- STERZER, P., REES, G. Perceived size matters. Nature neuroscience, 2006, 9(3), 302-302.
- STIGLER, S. M. The history of statistics : the measurement of uncertainty before 1900. Cambridge, Mass.: Belknap Press of Harvard University Press, 1986. ISBN 978-0-674-40340-6
- ŠAŠINKA, Č. Interindividuální rozdíly v percepci prostoru a map. Brno, 2012. Disertační práce. Masarykova univerzita , Filozofická fakulta. Psychologický ústav.
- THOMSON, J., HETZLER, E., MACEACHREN, A., et al. A typology for visualizing uncertainty. In Proceedings of the SPIE, 2005, 146-157.
- TYNER, J. A. Principles of map design. New York: Guilford Press, 2010. ISBN 978-1-60623-544-7.
- VAN DER WEL, F. J., VAN DER GAAG, L. C., GORTE, B. G. Visual exploration of uncertainty in remote-sensing classification. Computers & Geosciences, 1998, 24(4), 335-343.
- VAN ELZAKKER, C. Needs for use, user & usability research in geo-information science and cartography. In. Department of Geoinformatics, Palacký University in Olomouc , 2013.
- VEREGIN, H. Data quality measurement and assessment. NCGIA Core Curriculum in Geographic Information Science, 1998, 1-10.
- VOŽENILEK, V., KAŇOK, J. Metody tematické kartografie : vizualizace prostorových jevů. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Katedra geoinformatiky, 2011. ISBN 978-80-244-2790-4.
- WARE, C.: Information visualization perception for design [online]. San Francisco, CA Morgan Kaufman, 2004, [cit. Dostupné na WWW: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=114168>>.
- WATKINS, E. T. Improving the analyst and decision-maker's perspective through uncertainty visualization. 2000. Diplomová práce. Air University. Department of Systems and Engineering Management.
- WEBER, C. R., BUTTENFIELD, B. P. A cartographic animation of average yearly surface temperatures for the 48 contiguous United States: 1897-1986. Cartography and Geographic Information Systems, 1993, 20(3), 141-150.
- WITTENBRINK, C. M., PANG, A. T., LODHA, S. K. Glyphs for visualizing uncertainty in vector fields. Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on, 1996, 2(3), 266-279.
- WONG, P. C., SHEN, H.-W., JOHNSON, C. R., et al. The top 10 challenges in extreme-scale visual analytics. Computer Graphics and Applications, IEEE, 2012, 32(4), 63-67.
- ZADEH, L. A. K. G. J. Y. B. Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems : selected papers. Singapore: World Scientific, 1996. ISBN 978-981-02-2422-6.
- ZEHNER, B., WATANABE, N., KOLDITZ, O. Visualization of gridded scalar data with uncertainty in geosciences. Computers & Geosciences, 2010, 36(10), 1268-1275.
- ZHANG, J., GOODCHILD, M. F. Uncertainty in geographical information. New York: CRC press, 2002. ISBN 0-415-24334-3.
- ZHAO, J., FORER, P., HARVEY, A. S. Activities, ringmaps and geovisualization of large human movement fields. Information Visualization, 2008, 7(3-4), 198-209.
- ZUK, T. D. Visualizing uncertainty. Calgary, Alberta, 2008. Disertační práce. University of Calgary. DEPARTMENT OF COMPUTER SCIENCE.

Odborný životopis autora / *Curriculum Vitae*



OSOBNÍ ÚDAJE / PERSONAL INFORMATION

Jméno / Name Jan Brus
Bydliště / Address Trnávka 131, Trnávka 742 58
Kontaktní adresa / Post Address
Zeyerova 843/3, Olomouc 772 00
Kontakt / Contact jan.brus@upol.cz, +420 775 666 188
Narozen / Birth 17. 10. 1982

VZDĚLÁNÍ / EDUCATION

2009 Ostravská univerzita v Ostravě, **státní rigorózní zkouška** / *rigorous degree obor Fyzická geografie / specialization Physical Geography*
2008–dosud Univerzita Palackého v Olomouci, **doktorské studium** / *PhD study obor Geoinformatika a kartografie / specialization Geoinformatics and Cartography*
2006–2008 Ostravská univerzita v Ostravě, **Bc. studium Aplikovaná ekologie** / *Bachelor's degree: specialization Applied Ecology*
2002–2007 Ostravská univerzita v Ostravě, **Mgr. studium Ochrana a tvorba krajiny** / *Master's degree: specialization Protection and Landscape Forming*

PRAXE / EXPERIENCE

2013–2015 Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy OP VK
Centrum teorie vzdělávání přírodovědných oborů CETPO
CZ.1.07/2.3.00/20.0166 – člen řešitelského týmu
2012–2014 Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy OP VK
NeoCartoLink - Podpora tvorby národní sítě kartografie nové generace
CZ.1.07/2.4.00/31.0010 – hlavní řešitel
2011–2014 Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy OP VK
GEOINFONET - Propojení a rozvoj spolupráce subjektů v geoinformatic
CZ.1.07/2.4.00/17.0069 – spoluřešitel
2012–2013 Studentská grantová soutěž na UP v Olomouci
Maloformátové snímkování při studiu vlivu heterogenity povrchu na charakter stanoviště – člen řešitelského týmu
2011 EEA, Norway funds
Integration of the sensor network and the small format remote sensing for prediction of the snow hazard B/CZ0046/4/0001 – spoluřešitel
2009–2011 Grantová agentura České republiky (GA ČR)
The Intelligent System for Interactive Support of Thematic Map Design
GA205/09/1159 – člen řešitelského týmu
2009–2011 Grantová agentura České republiky (GA ČR)
Methods of artificial intelligence in GIS
GA205/09/1079 – člen řešitelského týmu – publikační aktivita

2010	EEA, Norway funds Collaborating in understanding of an uncertainty in natural phenomenons using GIS – hlavní řešitel
2010	Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy FRVŠ Bezdrátový kontinuální monitoring hlavní řešitel
2010	Studentská grantová soutěž na UP v Olomouci Research of persons movement at the intersection of urban and sub-urban areas PrF_2010_14 – člen řešitelského týmu
2007–2009	Grantová agentura České republiky (GA ČR) Analysis and modelling of the dynamics of spatial relations of ecotones using GIS GA205-07 – člen řešitelského týmu

VÝUKOVÉ AKTIVITY / TEACHING

2009–dosud	cvičení na Katedře geoinformatiky UP: <i>Kartografický projekt, Modelování přírodních hazardů, Stylistika tvorby map, Geoinformatika v péči o životní prostředí, lesnictví a zemědělství, Základy kartografie, Modelování v GIS</i> <i>seminars of Cartographic design, Modeling of natural hazards, Stylistics in map creation, Geoinformatics in the environment, forestry and agriculture, Computer science, Cartography, GIS modeling</i>
------------	--

STÁŽE / MOBILITY

01–05/2012	Finsko, Turku – University of Turku, Department of Geography and geology
10/2011	Rakousko, Vídeň, Švýcarsko, Bern, Itálie, Mestre – EPA network
03–04/2011	Island, Reykjavík – University of Iceland
08/2010	Francie, Paříž – Paris AeroFilm Photo services – Tréning SFAP
04–05/2010	Norsko, Trondheim – Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Civil Engineering, Department of Geomatics
03/2009	Polsko, Krakow – Jagiellonian University in Cracow, Institute of Geography and Spatial Management, Department of GIS, Cartography and Remote Sensing

ČLENSTVÍ V ORGANIZACÍCH / MEMBERSHIP

Kartografická společnost ČR / *Carographic Society of the Czech Republic*
 Geografická společnost ČR / *Czech Geographical Society*
 ICA Commission on Cognitive Visualization

ODBOBNÉ CERTIFIKÁTY / CERTIFICATES

02/2012	Lund Eye-Tracking Academy (LETA)
01–02/2013	English for Special Purposes – Cartography and GIS – LAL Language school

Seznam publikací autora / List of author's publications

Článek v odborném periodiku v databázi Web of Science (J-imp)

Contribution in a scientific journal indexed on the Web of Science (J-imp)

- Burian, J., Brus, J., Voženílek, V. (2013): Development of Olomouc city in 1930–2009: based on analysis of functional areas. Volume 9, Issue 1 Journal of Maps, 64–67 s.
DOI:10.1080/17445647.2013.778800

Článek v odborném periodiku ze Seznamu neimpaktovaných recenzovaných periodik ČR (J-rec)

Contribution in a scientific journal (List of Czech non-impact peer-reviewed journals) (J-rec)

- Pechanec, V., Janíková, V., Brus, J., Kilianová, H. (2009): Typological data in the process of landscape potential identification with using GIS. Moravian geographical reports. Vol. 17, 4/2009 Brno, Institute of Geonics ASCR, 12–24 s.

Článek v jiném odborném recenzovaném periodiku (J)

Contribution in other scientific journal (J)

- Kaňok J., Brus, J. (2009): Možnosti využití expertních systémů v kartografii. Kartografické listy 17, Geografický ústav SAV, 72–77 s.

Odborná kniha (B) a kapitola (C) / Scientific book (B) and chapter (C)

- Popelka, S., Brychtová, A., Brus, J. (2012): Advanced Map Optimization Based on Eye-tracking. Ed.: Carlos Bateira, Cartography InTech, Rieka, Croatia, 312 s.
ISBN: 978-953-51-0689-0
- Dobešová, Z., Brus, J. (2012): Intelligent Systems in Cartography. Ed.: V. M. Koleshko, Intelligent Systems, InTech, Rieka, Croatia, 257–276 s. ISBN 978-953-51-0054-6
- Dobešová, Z., Peňáz, T., Brus, J., Dostál, R., Kaňok, J., Maršík, V., Voženílek, V. (2011): Intelligentní systémy v tematické kartografii [Intelligent Systems in Thematic Cartography]. Univerzita Palackého, 142 s. ISBN 978-80-244-2950-2
- Brus, J., Dobešová, Z. (2011): Intelligentní systémy v digitální kartografii. In: Voženílek, V., (ED.) - Dvorský, J. (ED.) - Húsek, D. (ED.) Metody umělé inteligence v geoinformatice, Univerzita Palackého, 169–173 s. ISBN: 978-80-244-2945-8
- Kilianová, H., Pechanec, V., Lacina, J., Halas, P. a kol. (2009): Ekotony v současné krajině. Olomouc. Univerzita Palackého v Olomouci., 167 s. ISBN: 978-80-244-2473-6

Článek ve sborníku – indexováno na ISI WOS (D) / Conference papers indexed in ISI WOS (D)

- Brus, J., Voženílek, V., Popelka, S. (2013): An Assessment of Quantitative Uncertainty Visualization Methods for Interpolated Meteorological Data. In: Proceedings of International Conference on Computational Science ICSSA 2013, Saigon, Vietnam (přijato)
- Brus, J., Pechanec, V., Kilianová, H., Machar, I. (2013): The Evolution of the Floodplain Forests as Indicators of Landscape Changes in the Alluvium of the Morava. In: Proceedings of The 21st International Conference on Geoinformatics, Kaifeng, China River (přijato)
- Popelka, S., Brychtová, A., Svobodová, J., Brus, J., Dolezal, J. (2013): Advanced visibility analyses and visibility evaluation using eye-tracking. In: Proceedings of The 21st International Conference on Geoinformatics, Kaifeng, China (přijato)
- Brus, J., Pechanec, V., Kilianová, H. (2013): Uncertainty vs. spatial data quality visualisations: A case study on ecotones. In: Proceedings of SGEM 2013, 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Albena, Bulgaria (přijato)
- Brus, J., (2013): The role of standards in spatial data quality visualisation. In: Proceedings of SGEM 2013, 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, Albena, Bulgaria (přijato)

- Brus, J., Svobodová, J. (2012): THE SPATIAL EXPRESSION OF AN UNCERTAINTY FOR THE QUALITY ASSESSMENT OF THE DIGITAL ELEVATION MODELS. Conference Proceedings SGEM 2012, 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 417-424 s. 1314-2704
- Brus, J., Popelka, S., Brychtová, A., Svobodová, J. (2012): Exploring Effectiveness of Uncertainty Visualization Methods by Eye-Tracking. Symposium proceedings Accuracy 2012, 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Science Florianópolis, SC, Brazil, 215-220 s.
- Pechanec, V., Brus, J. (2012): Expert system for landscape assesment based on GIS. Conference Proceedings SGEM 2012, 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 369-376 s. ISSN 1341-2704, DOI: 10.5593/sgem2012
- Brus, J., Pechanec, V., Kilianová, H. (2012): Ecotones - challenge in visualisation of landscape heterogeneity. Conference Proceedings SGEM 2012, 12th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 1013-1020 s. ISSN 1341-2704, DOI: 10.5593/sgem2012
- Svobodová, J., Miřijovský, J., Vávra, A., Brus, J., Kilianová, H. (2012): Using of local indicators of spatial association for evaluation of spatial accuracy of DEM. Symposium proceedings Accuracy 2012, 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences Florianópolis, SC, Brazil, 115-120 s.
- Pechanec, V., Brus, J., Kilianová, H. (2011): MODELING SPATIAL DISTRIBUTION OF ECOTONES IN GIS. Conference Proceedings SGEM 2011, 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 637-644 s. ISSN: 1314-2704
- Pechanec, V., Brus, J., Miřijovský, J. (2011): MONITORING OF SNOW RISKS BY GEOSENSORS IN URBAN AREAS. Conference Proceedings SGEM 2011, 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 653-660 s. ISSN: 1314-2704
- Miřijovský, J., Brus, J., Pechanec, V. (2011): UTILIZATION OF A SMALL FORMAT AERIAL PHOTOGRAPHY FROM DRONE PIXY CONCEPT IN THE EVALUATION OF THE LANDSCAPE CHANGES. Conference Proceedings SGEM 2011, 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 345-352 s. ISSN: 1314-2704
- Dobešová, Z., Brus, J. (2011): COPING WITH CARTOGRAPHICAL ONTOLOGY. Conference Proceedings SGEM 2011, 11th International Multidisciplinary Scientific GeoConference. STEF92 Technology Ltd., Sofia, Bulgaria, 377-384 s. ISSN 1314-2704, DOI: 10.5593/sgem2011/s09.104
- Brus, J., Dobešová, Z., Kaňok, J. (2009): Utilization of expert systems in thematic cartography. International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems INCoS 2009, Barcelona, Spain IEEE Computer Society Press, 421 s. ISBN 978-0-7695-3858-7

Článek ve sborníku – ostatní (D) / Other conference papers (D)

- Pechanec, V., Brus, J., Caha, J. (2011): Determining Ecotones by Decision Support Systems. In. Snášel, V., Pokorný, K., Richta, K., (Eds.): Dateso 2011, VSB - Technical University of Ostrava, FEECS, Department of Computer Science, 2011., 206-215 s. ISBN 978-80-248-2391-1
- Brus, J., Burián, J., Popelka, S. (2013): Visualization of uncertainty in determining the rate of suburbanization on the example of the Olomouc city. In: Proceedings of 12th South East Asian Survey Congress - SEASC 2013, Manila – Filipíny

- Popelka, S., Brus, J., Dědková, P. (2013): 3D Visualization of Extinct Village and its Evaluation using Eye-tracking In: Proceedings of 12th South East Asian Survey Congress - SEASC 2013, Manila - Filipíny
- Néték, R., Brus, J. (2012): SMI Eye-tracking device for control map application by sight. Conference Proceedings SWAET 2012, The Scandinavian Workshop on Applied Eye Tracking Karolinska Institutet, Stockholm, 56 s.
- Popelka, S., Brychtová, A., Brus, J. (2012): Evaluation of user preferences during reading of 2D and 3D cartographic visualizations. Conference Proceedings SWAET 2012, The Scandinavian Workshop on Applied Eye Tracking Karolinska Institutet, Stockholm, 56 s.
- Miřijovský, J., Martínek, J., Brus, J. (2011): Reconstruction of historical paths with using of smallformat aerial photography. Proceedings of XXIIIrd International CIPA Symposium CTU in Prague, Prague, 80 s. ISBN 978-80-01-04885-6
- Popelka, S., Brus, J. (2011): Space-Time-Cube visualization of Eye-tracking data. Proceedings of EyeTrackBehavior 2011 - Tobii Eye Tracking Conference on Behavioral Research, Frankfurt am Main Tobii, 50 s.
- Dobešová Z., Brus J., Kaňok J., Karvaš P. (2011): Návrh ontologie pro kartografii. Gálová, Fencík eds.: Kartografia a geoinformatika ve svetle dneška, Zborník referátov 19. kartografickej konferencie Kartografická spoločnosť Slovenskej republiky, 66 – 73 s. ISBN 978-80-89060-19-1
- Brus, J., Kaňok, J., Dobešová, Z. (2010): Asistovaná kartografie: vize nebo realita?. In: Geografie pro život ve 21. století: Sborník příspěvků z XXII. sjezdu České geografické společnosti pořádaného Ostravskou univerzitou v Ostravě 31. srpna - 3. září 2010. Ostrava Ostravská univerzita v Ostravě, 875 s. ISBN 978-80-7368-903-2
- Brus, J., Dobešová, Z., Kaňok, J. (2010): Knowledge for expert systems in cartography. Sborník Symposia GIS Ostrava 2010 Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, 6 s. ISBN 978-80-248-2171-9
- Kilianová, H., Brus J., Pechová, O. (2009): Mentální mapa: výklad, pojetí, možnosti využit. In: Tomáš, M. - Vysoudil, M. Mezinárodní vědecká konference k 50. výročí geografie na PřF UP v Olomouci. Sborník abstraktů. UP Olomouc, s. ISBN 978 -80 -244 -2290 -9
- Dobešová, Z., Brus J., Valent T. (2010): Automatická tvorba kartodiagramů v ArcGIS. Aktivita v kartografii. Zborník referátov zo seminára, Kartografická spoločnosť SR a Geografický ústav SAV, Bratislava, Slovensko, 32-39 s. ISBN 978-80-89060-17-7

Specializovaná mapa s odborným obsahem (N-map) / *Specialized map (N-map)*

- Burian, J., Zapletalová, Z., Brus, J., Svobodová, J., Hladišová, B., Vondráková, A. (2010): Stabilní funkční plochy v Olomouci v období 1930–2009. Univerzita Palackého v Olomouci, 1s.
- Burian, J., Zapletalová, Z., Brus, J., Svobodová, J., Hladišová, B., Vondráková, A. (2010): Změny funkčních ploch v Olomouci v období 1930–2009. Univerzita Palackého v Olomouci, 1s.
- Burian, J., Zapletalová, Z., Brus, J., Svobodová, J., Hladišová, B., Vondráková, A. (2010): Projevy urbanizace a suburbanizace v Olomouci podle stavů územních plánů z let 1985, 1999 a 2009. Univerzita Palackého v Olomouci, 1s.
- Burian, J., Zapletalová, Z., Brus, J., Svobodová, J., Hladišová, B., Vondráková, A. (2010): Vývoj města Olomouce v letech 1930–2009 (Na základě analýzy funkčních ploch). Univerzita Palackého v Olomouci, 16s.
- Pechanec, V., Kilianová, H., Brus, J. (2010): Časoprostorová změna hranic prvků krajinné struktury povodí Trkmanky, Katedra geoinformatiky UP v Olomouci
- Pechanec, V., Kilianová, H., Brus, J. (2010): Persistence prvků krajinné struktury v povodí Trkmanky, Katedra geoinformatiky UP v Olomouci

Annotation

The dissertation thesis is focused on the visualization of spatial data uncertainty. The main aim was to evaluate the basic concepts for the visualization of spatial data uncertainty, identification of problems associated with them and extension of the framework for the visualization of spatial data quality. Each of component sub-concepts has been systematically explored in terms of quality components for spatial data, quality standards of spatial data and visualisation techniques to design improved visualization concept of uncertainty.

The dissertation thesis is specific due to problematic definition of the terminology and particular concept of uncertainty visualization. Therefore, the theoretical part of the work focuses primarily on the analysis of various aspects that affect the visualization of uncertainty. The emphasis is placed on the quality of spatial data, their standardization as well as on the process of cartographic communication focused on different personality characteristics of the particular user. The part of the work concerning specific visualization methods and approaches is subsequently based on research and analysis of existing major sources in this area. Afterwards, the theoretical part contains the analysis of each component of spatial data quality and their standardization, study and analysis of the factors influencing the perception of visual information from maps including uncertainty, research of existing approaches to visualizing uncertainty with emphasis on environmental studies and analysis of uncertainty visualization methods used in environmental studies with the determination of their specific attributes.

The case studies contain the analysis of individual aspects and components of data quality, which influence the resulting representation. From the limited perspective of generalizability of the results the practical part of work is divided into several case studies concerning multiple fields. Based on the results of case studies and theoretical knowledge the concept of the objective solution of the uncertainty visualization was made with an emphasis on visualization techniques. The verification of the acquired knowledge was also performed by testing the intuitiveness of the proposed methods for a particular case study, with the use of eye-tracking technology.

The benefit of this work within the studied issue primarily involves two important parts: the work proposes some new requirements on visualization methods for environmental studies. New approaches are applied for the needs of the work and visualizing methods in concrete environmental studies. The second benefit consists in presentation of concept for visualizing spatial data on the basis of the implementation of this approach into several case studies. The aim is to demonstrate the importance of the usefulness of visualization of the spatial data quality for environmental studies using methods of cartographic visualization. New concept of this research presents the extension of the concepts of visualization of spatial data quality, data integration and implementation of visualization methods.

Keywords:

spatial data uncertainty, visualization, spatial data quality, case studies

Summary

Introduction

Any decision can only be as good as the quality of the information above which it is decided. If we are talking about real environmental data, including simulated data, the uncertainty is an undeniable part of everyday life. Uncertainty arises from the essence of natural processes and their variability. That is why the subsequent modelling and visualizations of these processes cannot be made without a certain degree of approximation. Cartographers deal with the problem of displaying uncertainty for a very long time. In most cases, the uncertainty in the process of cartographic processing is ignored mainly due to the assumption that the user will not be able to perceive map limitations caused by this very abstraction.

Maps are usually considered as an imaginary pillar of objectivity and truth, which results in a sense of confidence of all users of these maps. For maps showing the earth's surface, which are very general, positional error almost does not play any role in real life. Thus for many applications is acceptable to use the map with a large number of hidden uncertainty. Equally for effective communication it is rather necessary. However, a problem arises when others professionals using these cartographic works as a basis for their decision support begin to be interested in the results of these analyses. Then the uncertainty contained in the map gets to the forefront and makes crucial information.

Aims of the study

The main aim of the dissertation thesis is to **evaluate the basic concepts for the visualization of spatial data uncertainty**, identification of problems associated with them and extension of the framework for the visualization of spatial data quality.

Each of the individual sub-concepts has been systematically explored in terms of quality components for spatial data quality, quality standards of spatial data and visualization techniques to design improved visualization concept of uncertainty.

The sub-aims of the work is to give a definition of uncertainty in environmental studies especially with regard to the quality of spatial data, analysis and standardization of individual components of spatial data quality, study and analysis of factors influencing the perception of visual information from maps containing uncertainty, research of existing approaches of visualizing uncertainty with an emphasis on environmental studies and finally analysis of uncertainty visualization methods used in environmental studies and determination of their specific attributes. The proposal of objective uncertainty visualization solutions for case studies was made with an emphasis on visualization techniques. Moreover, the testing of intuitiveness of the proposed methods was realised for a specific case study.

Methods

Visualization of uncertainty of spatial data includes a wide range of issues relating to data quality of the individual components, their definition, nature, database design, graphic methods, selection and implementation, dynamic monitoring and description of the error propagation in GIS operations, and many more. It follows that it is necessary to explore, extend and integrate existing research in uncertainty visualization of spatial data in environmental studies, particularly in the Czech Republic, where the topic was not developed so much. More precisely there are only a few departments which have been interested in this field more in detail.

The dissertation thesis is specific due to problematic definition of terminology used and the specific concept of uncertainty visualization. The theoretical part of the thesis is therefore primarily focused on the analysis of various aspects that affect the visualization of uncertainty. Part of the thesis is focused on defining the notion of uncertainty. In other parts of the work the emphasis is laid on the quality of spatial data, their standardization and also the process of cartographic communication focused on different personal characteristics of the user. Next part of the work concerning the visualization of specific methods and approaches is then based on research and analysis of existing major sources in this area.

The application part of the thesis concerning the application of specific visualization techniques in the case studies tries to capture the extensiveness of the studied issue. The analysis of different aspects and components of data quality, which influence the resulting representation, is developed in the case studies. The specific visualization techniques reflecting nature of the visualized uncertainty is always designed within this section. At the same time the appropriateness of its use is discussed. Because of the limited generalizability of the results in application of only a small number of case studies, the various topics related to various areas have been selected.

The research is aimed at testing the resulting visualization techniques acquired through case studies. Evaluated visualizations are tested by using the eye-tracking device. The experiment is designed on the principle of associativity degree of visualization methods directly implemented in a particular map output. The aim of the research is to evaluate objectively whether there are differences in the perception of different techniques and then choose the specific suitable method for the case study.

Results of the work

In the first section of the theoretical part of the dissertation thesis is largely defined notion of uncertainty, with an emphasis on environmental studies. In the same part there is also described in detail the issue of data quality as a variable which is used for visualization of uncertainty in spatial data. The necessary concepts and relationships as well as the data and information containing geographical or spatial aspects are defined too.

The principals of uncertainty visualization are discussed individually with emphasis on basic theories that have major impact on shaping the contemporary concept of uncertainty visualization. The attention is focused primarily on issues related to communication models, cognition, perception and semiotics. It is emphasized the need to perform research not only in particular visualizations, but also to carry out research which develops specific framework and concepts of visualization of spatial data quality. On the basis of obtained findings and results the widen framework of uncertainty visualization is proposed. This framework is able to reflect the various hierarchical natures of spatial data and integrate the various parameters of quality of environmental data in the case studies as a basis for visualization. Specific visualization techniques have been studied mainly with regard to the construction requirements and their ability to correctly transmit the information to end users has been evaluated too.

To verify the findings, a number of case studies was realised – e.g. visualization of stable areas in urban planning, visualization of uncertainty in digital elevations models, visualization of ecotones, visualization of land cover changes in mining area and uncertainty visualization of meteorological data in example of interpolation of average temperatures. In each study there is an analysis of individual components of data quality as well as a description of a method for calculating the uncertainty of a selected element. Chosen quality element is visualized so as the reader would be

able to understand the visualization and to incorporate it into his decision-making process afterwards. The point of all case studies is to visualize the uncertainty. The verification of the acquired information was performed by testing the intuitiveness of the proposed methods for a particular case study. The testing was realised with the use of eye-tracking technology.

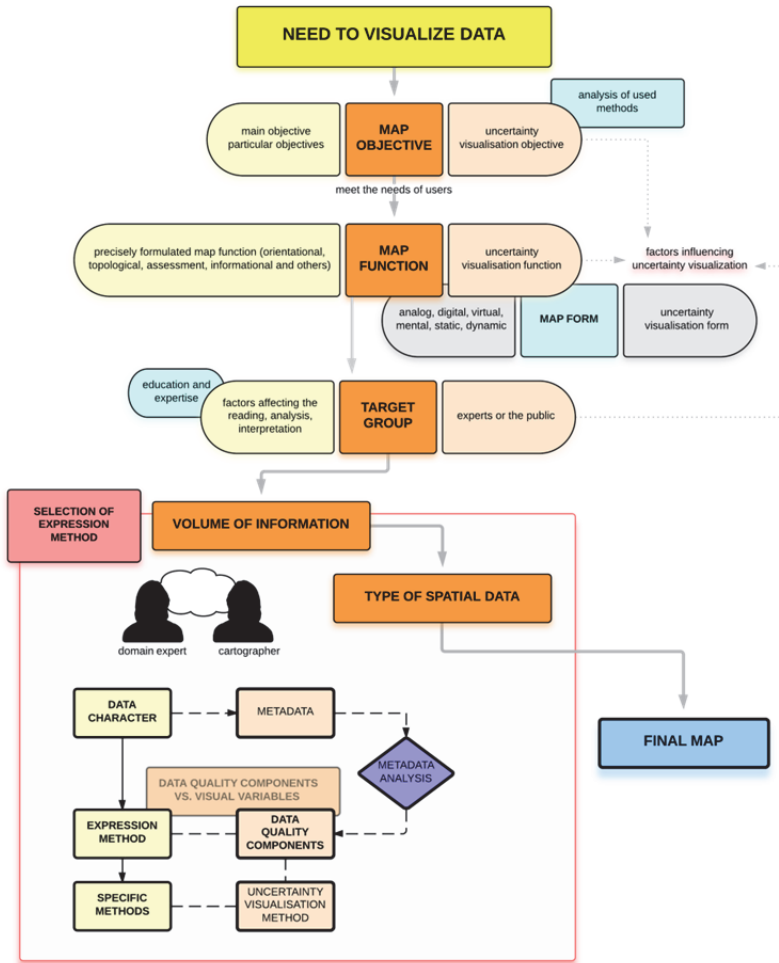


Fig. 1 Design concept visualization of uncertainty in environmental studies

The dissertation thesis proposes some new requirements on visualization methods for environmental studies. For an uncertainty visualisation in the context of specific environmental studies are used new approaches. The result of the thesis is a concept for the visualization of spatial data quality, which is applicable while dealing with other studies.

RNDr. Jan Brus

VIZUALIZACE NEJISTOTY V ENVIRONMENTÁLNÍCH STUDIÍCH
VISUALIZATION OF UNCERTAINTY IN ENVIRONMENTAL STUDIES

Určeno pro studenty, partnerská akademická pracoviště a veřejnost.

Výkonný redaktor prof. RNDr. Tomáš Opatrný, Dr.
Odpovědná redaktorka Mgr. Jana Kreiselová
Technická redakce RNDr. Alena Vondráková

Publikace neprošla redakční jazykovou úpravou.

Vydala a vytiskla Univerzita Palackého v Olomouci
Křížkovského 8, 771 47 Olomouc
www.vydavatelstvi.upol.cz
www.e-shop.upol.cz
vup@upol.cz

1. vydání
Olomouc 2013
Edice GEOINFO-CARTO THESIS, svazek IV.
ISSN 1805-7500
ISBN 978-80-244-3536-7

Neprodejná publikace