

Využití fuzzy teorie pro stanovení funkčních ploch

Michaela Čermáková

Katedra informatiky,
Přírodovědecká fakulta,
Univerzita Palackého v Olomouci,
tř. Svobody 26, 77146, Olomouc, Česká republika
misacermakova@gmail.com

Abstrakt. Tato diplomová práce se zabývá implementací fuzzy teorie v procesu odhadu přechodných zón ekologicky odlišných struktur. V teoretické části je vysvětlena matematická podstata této teorie a nezbytné pojmy jako fuzzy region a ekoton, probírané v souvislosti s obdobnými problémy řadou významných autorů působících v dané oblasti. Praktická část pozvolna navazuje a řeší konkrétní případ implementace na konkrétním území chráněné krajinné oblasti Litovelského Pomoraví, pro které byla poskytnuta data biotopů z datové sady NATURA 2000. Důležitým krokem je výpočet krajinně-ekologických indexů a jejich statistické zpracování, na základě kterého jsou odvozeny vzorce pro výpočet jádrových oblastí. Následuje výpočet fuzzy regionů pro jednotlivé plošky ekologických oblastí (biotopů), které jsou vypočítány na základě numerických hodnot zanalyzovaných indexů a vzdáleností od jádrových oblastí. Důležitým faktem je, že tyto odvozené fuzzy regiony se podél okrajů navzájem překrývají, a právě tyto přechody jsou základy ekotonů. Ekotony jsou už jednoduché fuzzy průniky vytvořených fuzzy regionů. Kompletní implementace je zasazena do prostředí ArcGIS a výsledným produktem jsou nástroje Toolboxu napsané v jazyce Python. Tento toolbox umožňuje automatizované zpracování vstupních vrstev biotopů a představuje výpočet odhadu jejich přechodných zón (ekotonů) z prostorového hlediska.

Klíčová slova: fuzzy teorie, ekologie, fuzzy region, ekoton, index, biotop.

Abstract.

This thesis engage the implementation of fuzzy theory in the process of estimating the transitional zones between ecological different structures. There must be described the mathematical fundamentals of this theory and the essential concepts such as fuzzy region and the ecotone which are also discussed by many notable authors participating in the context of similar problems. The practical part slowly builds and solves the case of the implementation in a particular area of protected landscape area called Litovelské Pomoraví, for which the data from the dataset of habitats Natura 2000 was provided. An important step is to calculate the values of landscape ecological indices and their statistic processing analysis on which is based the derived formula for calculating the core areas. The followed calculation of fuzzy regions for each facet of ecological area (habitats) is based on analyzed numerical values of the landscape ecological indices and distances from the core areas. The important fact is that the derived fuzzy regions overlap itselfs along the edges and these transitions are the basics of the ecotones. Final ecotone is crated as a simple fuzzy intersection of fuzzy the regions. Full

implementation is set in a GIS environment and the resultant product is a toolbox composed of scripts written in Python. This toolbox allows automated processing of the input layers of habitat and calculates approximate transition zones (ecotones) in spatial scale.

Keywords: fuzzy theory, ecology, fuzzy region, ekoton, index, habitat.

1 Úvod

Geografické informační systémy jsou schopny poskytnout věrohodnou informaci při aproximaci reality v mnoha aplikacích vymezením ostrou hranicí, avšak existuje řada situací, pro které toto pravidlo neplatí. Takovéto případy zahrnují nepřesnost a neurčitost, které je potřeba zahrnout i do samotného modelu. Implementace fuzzy teorie pro stanovení funkčních ploch v ekologii je dobrým příkladem pro vysvětlení uvedené problematiky. Těžištěm práce je odhad přechodných oblastí v ekologii (ekotonů) s využitím jmenované teorie.

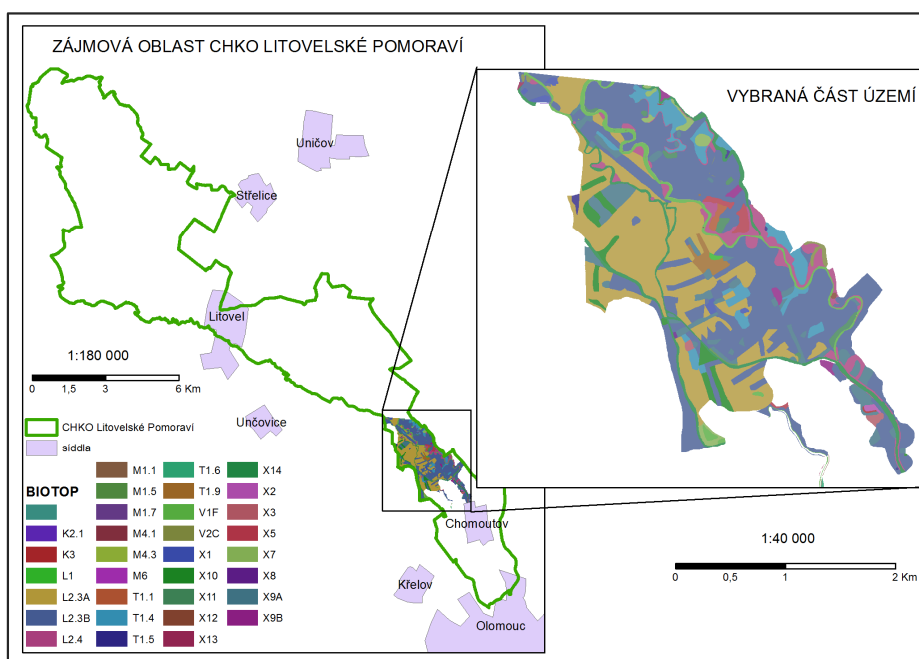
2 Proces tvorby modelu pro odhad ekotonů

Přechodné oblasti se v praxi analyzují z několika hledisek. Odborníci na ekologii berou v potaz celou řadu faktorů pro odhad ekotonů. Vytvářený model pro odhad přechodných oblastí je zohledněn pouze z hlediska prostorového vymezení. Prostorové vymezení je založeno na struktuře krajinné matrix, která vypovídá o druhovém složení ploch, jejich tvarů a velikostí. Pro vyčíslení charakteristik krajinné struktury poslouží řada definovaných vzorců, které lze buď jednoduše odvodit a spočítat za pomoci kalkulátorů dostupných u většiny geografických informačních systémů, nebo lze využít už hotové nástroje sestavené na míru pro výpočet různých charakteristik krajinné struktury. Pro konkrétní model je vybráno několik vzorců vstupujících jako faktory ovlivňující výsledný prostorový rozsah ekologických oblastí. Důležité je zahrnutí typologie vstupních plošek, pro které jsou definovány koeficienty ekologické stability a ty jako numerické hodnoty vstupují přímo do finálního modelu a jsou postaveny do příslušného vzorce jako primární vlivy. Dále jsou do modelového vzorce na další úrovni důležitosti zahrnuty koeficienty vycházející z obsahů, obvodů a tvarů plošek různých ekoregionů. Uvedené faktory jsou zcela dostačující pro prostorové vymezení ekologických oblastí. Schéma modelu je v zásadě jednoduché, jde o to, vymežit co možno nejpřesněji nejdříve jádrové oblasti a zóny vlivu do okolí pro jednotlivé plošky se zohledněním právě jejich tvarových a velikostních vlastností a typu plochy, která vypovídá o ekologické stabilitě. Na základě takto připravených ploch vzniknou navzájem se překrývající regiony, jejichž protínající části představují přechodné oblasti. Zahrnutí fuzzy teorie do modelu spočívá v převedení ostře definovaných ploch na fuzzy regiony se sférami vlivu do okolí, přičemž průniky překrývajících se oblastí představují přechodové oblasti a stupeň příslušnosti naznačí sílu vazby mezi sousedícími plochami. Je zřejmé, že fuzzy regiony musí být v rastrovém formátu. Stále je řeč pouze o prostorovém

vymezení ekotonů, ale už se nejedná o pouhé vykreslení ostré liniové hranice, nýbrž o výpočet přechodového pásma, pro něž lze vypočítat obvod i obsah, případně charakteristiky tvaru. U klasické ostré hranice je jediným ukazatelem jen délka, případně tvar hranice. Samozřejmě, plocha u fuzzy ekotonu se spočítá odlišným způsobem, než jak je tomu u klasické plochy.

2.1 Testovací data

Před samotným začátkem vytváření struktury modelu bylo nutné si uvědomit, jaká data jsou k dispozici a co je možné z nich získat, zohlednit je v souvislosti se studovaným územím a cílem modelu. Testová data jsou v podobě vektorových shapefile biotopů celého chráněného krajinného území (CHKO) Litovelské Pomoraví z datové sady NATURA 2000. Pro potřeby modelu bylo vybráno malé území, protože cílem není analyzovat celou oblast, ale pouze vytvořit funkční model. Na obr. 8 je mapa vybraného území.



Obr. 1. Testová data

2.2 Výpočet krajinně-ekologických indexů

Jestliže krajinu chápeme jako mozaiku plošek, pak tyto plošky musí nejprve být dobře definovány a pak je lze teprve analyzovat v prostoru. K interpretaci kvantitativních údajů pomáhají indexy krajinné metriky, které kvantifikují strukturální vlastnosti krajiny. Vyčíslení těchto vlastností představuje měření diverzity, homogenity či heterogenity krajiny. Za účelem exaktně matematicky zachytit tyto vlastnosti krajinné struktury.

Pro sestavení konkrétního modelu jsou využity indexy poměru obsahu a obvodu plošky (MPAR), index fraktální dimenze (MPFD), index velikosti (MPS) a index tvaru (MSI) dostupné v extenzi Patch Analyst, případně i V-LATE a dále jsou využity skripty pro výpočet přístupnosti a_i , tvaru D_i a geometrie plošek dostupné pouze v extenzi StraKa.

Index přístupnosti plošky a_i je spočítán na základě délky její společné hranice se sousedními ploškami

$$a_i = \sum_{j=l}^{j=n} d_{ij} \quad (1)$$

kde d_{ij} je vzdálenost měřená podél spojnice mezi ploškou i a sousední ploškou j . Na základě zjištění celkové délky společných hranic podél přiléhajících koridorů se zjišťuje možná míra přístupnosti plošky z okolí.

Index tvaru plošky D_i u extenze StraKa je tentýž jako MSI u extenze Patch Analyst a na rozdíl od MPAR, pouhého podílu obvodu a obsahu, je spočítán jako poměr obvodu dvěma odmocninami obsahu násobeného koeficientem π , tedy

$$D_i = P / 2\sqrt{A\pi} \quad (2)$$

kde P je obvod a A je obsah. Tento typ výpočtu je vhodnější pro následnou normalizaci hodnot, jehož výsledné rozpětí nenabude tak širokého rozpětí, jako tomu je v případě MPAR. Za užitečný výsledek autor považuje relativní výměru plošky, kterou spočítá skript pro geometrii.

Všechny tyto indexy byly normalizovány podle vzorce

$$\delta = d / \sqrt{d^2 + a} \quad (3)$$

kde d je hodnota prvku a a je konstanta vyšší než 0, přičemž pro $a = 5$ je dosaženo nejideálnějších hodnot. δ je pak normalizovaný výsledek, který ukládá číslo do intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Tento vzorec pro normalizaci byl zadán pro každý konkrétní index do Field Calculatoru a vypočteny nové hodnoty nových atributů v jedné vrstvě.

Takto normalizované hodnoty lze dobře použít pro výpočty fuzzy regionů, s tím, že je možné si vybrat dílčí indexy, které budou do tohoto výpočtu vstupovat. Pro zahrnutí všech normalizovaných indexů je jednoduše proveden výpočet průměrného normalizovaného indexu, v tomto konkrétním případě součet pěti normalizovaných indexových hodnot vydělený jejich počtem, tedy pěti, opět vypočteno ve Field Calculatoru jako další atribut průměrných hodnot normalizovaných indexů. Příkaz z Field Calculatoru může vypadat např. takto: $([\text{normAi}] + [\text{normDi}] + [\text{normRelaAr}] + [\text{normFRD}] + [\text{normMPS}])/5$.

Poznámka. Poznámky Další způsob pro výpočet průměrné hodnoty indexu umožňuje přidělit různé váhy dílčím normalizovaným indexům, přičemž součet těchto vah musí dát v součtu hodnotu jedna, např. takto $([\text{normAi}] * 0,15 + [\text{normDi}] * 0,3 +$

$[\text{normRelaAr}] * 0,1 + [\text{normFRD}] * 0,25 + [\text{normMPS}] * 0,2) / 5$. U tohoto druhého způsobu je nasnadě dobře zvážit nastavení vah důležitosti pro jednotlivé indexy. Z hlediska nedostatečné znalosti problematiky ekologie a tudíž potenciální špatné nastavení těchto vah, není tento krok naplněn pro konstruovaný model.

2.3 Charakteristiky biotopů

Na zvoleném testovacím území se nachází 33 druhů biotopů (Tab.1) různého původu. Většina je však původu přírodního, protože se nachází v chráněné krajinné oblasti. Z ekologického hlediska jsou rozděleny do skupin a podskupin s podobnými charakteristikami, především místem výskytu, strukturou a druhovým složením. Pro model odhadu ekotonů jsou důležité faktory pro vytvoření stabilního prostředí. Obecně lze říci, že významné přechodové oblasti se vytváří na rozhraní výrazných stabilních ekosystémů. Vliv faktorů lze jednoduše rozdělit na negativní a pozitivní, přičemž pro udržitelné ekosystémy jsou důležité pozitivní faktory.

Koeficienty ekologické významnosti (KEV) pro jednotlivé kategorie využití půdy jsou podle Klementové (2005) stanoveny 0,00 pro zastavěné a dopravní plochy, 0,14 pro orné půdy a chmelnice, 0,29 vinice a 0,38 pro smrkové monokultury. Ovocné sady a akátové lesy mají koeficient 0,34, zahrady 0,5, louky 0,62, bukové a jedlové lesy 0,63 a pastviny 0,68. Nejvyššími koeficienty jsou hodnoceny vodní plochy včetně rybníků (0,73) a lužní lesy, přirozené smrčiny a kosodřevina (1,0). Koeficienty ekologické významnosti mají důležitou vlastnost při určování ekologické stability a právě stabilita ekosystému má silný vliv na vznik fungujícího ekotonu. Jestliže se v sousedství vyskytují dva silně stabilní ekosystémy, bude i jejich přechodná oblast vykazovat trvalejší charakter. Proto jsou i hodnoty koeficientů ekologické významnosti použity v modelu jako normalizované hodnoty při výpočtu průměrné hodnoty z vybraných indexů. V tabulce 1 jsou shrnuty všechny biotopy z testované oblasti a k nim jsou přiřazeny koeficienty ekologické významnosti podle charakteru využití půdy.

Tabulka 1. Biotopy s koeficienty ekologické významnosti

<i>Kód</i>	<i>Charakteristika</i>	<i>KEV</i>
K2.1	Vrbové křoviny hlinitých a písčitých náplavů	1
K3	Vysoké mezofilní a xerofilní křoviny	1
L1	Mokřadní olšiny	1
L2.3A	Tvrdé luhy podél nížinných řek, pralesovité porosty	1
L2.3B	Tvrdé luhy podél nížinných řek, více ovlivněné člověkem	1
L2.4	Měkké luhy nížinných řek	1
V1F	Makrofytní vegetace přirozeně eutrofních a mezotrofních stojatých vod	0,73
V2C	Makrofytní vegetace mělkých stojatých voda	0,73
M1.1	Rákosiny eutrofních stojatých vod	0,73
M1.5	Pobřežní vegetace potoků	0,73
M1.7	Vegetace vysokých ostřic	0,73
M4.1	Štěrkové náplavy bez vegetace	0,73
M4.3	Štěrkové náplavy s třinou pobřežní	0,73
M6	Bahnité říční náplavy	0,73
T1.1	Mezofilní ovsíkové louky	0,62
T1.4	Aluviální psárkové louky	0,62
T1.5	Vlhké pcháčové louky	0,62
T1.6	Vlhká tužebníková lada	0,62
T1.9	Střídavě vlhké bezkolencové louky	0,62
X1	Urbanizovaná území	0
X2	Intenzivně obhospodařovaná pole	0,14
X3	Extenzivně obhospodařovaná pole	0,14
X5	Intenzivně obhospodařované louky	0,14
X7	Ruderální bylinná vegetace mimo sídla	0,34
X8	Křoviny s ruderálními a nepůvodními druhy	0,34
X9A	Lesní kultury s nepůvodními jehličnatými dřevinami	0,38
X9B	Lesní kultury s nepůvodními listnatými dřevinami	0,63
X10	Paseky s podrostem původního lesa	0,62
X11	Paseky s nitrofilní vegetací	0,62
X12	Nálety pionýrských dřevin	0,38
X13	Nelesní stromové výsadby mimo sídla	0,34
X14	Vodní toky a nádrže bez ochranné významné vegetace	0,73

2.4 Core Area a Buffer Zone

Průměrné hodnoty normalizovaných indexů a koeficientů ekologické významnosti poslouží v následujícím kroku pro stanovení vzdálenosti jádrových oblastí (Core Area) a obalových zón (Buffer zone). Jejich výpočet je nezbytný pro vytvoření fuzzy regionů, které vzniknou interpolací stupňů příslušnosti stanovených pro vytvořené zóny od středů k okrajům. Právě obalové zóny zajistí překrývání vytvořených regionů a v zápětí možnost vypočítat jejich průniky, které nepředstavují nic jiného než odhadované fuzzy ekotony. Výpočet jádrové oblasti i obalové zóny je vypočten podle vzorce zapsaného v příslušném skriptu napsaném v jazyce Python:

$$\text{core_dist} = \text{Area} / (\text{Perimeter} * \text{fd} * 2 * \text{pnik}) * (-1) \quad (4)$$

kde fd je fraktální dimenze a pnik je koeficient průměru normalizovaných indexů, které, jak je uvedeno výše, zahrnují přístupnost plošky a_i , její průměrný tvar D_i a velikost MPS , fraktální dimenzi $MPFD$, hodnotu relativní plochy $RelArea$ a také koeficient ekologické významnosti KEV . -1 zajistí výpočet vnitřního bufferu, jinými slovy jádrové oblasti. Vzorec pro výpočet obalové (buffer) zóny je v principiálně podobný:

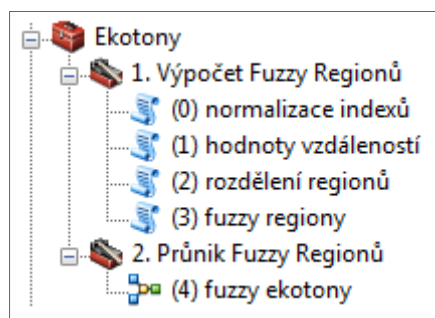
$$\text{buff_dist} = \text{Area} * \text{kes} / (\text{Perimeter} * \text{fd} * 2 * \text{pnik}) \quad (5)$$

Hodnoty plochy ve jmenovateli jsou násobeny hodnotou KES, která normalizuje dosah vlivu vně plošku u buffer. Tzn., jestliže je hodnota KES rovna nule pro zastavěná území, nebude mít žádný vliv na sousední plošky.

2.5 Výsledný toolbox

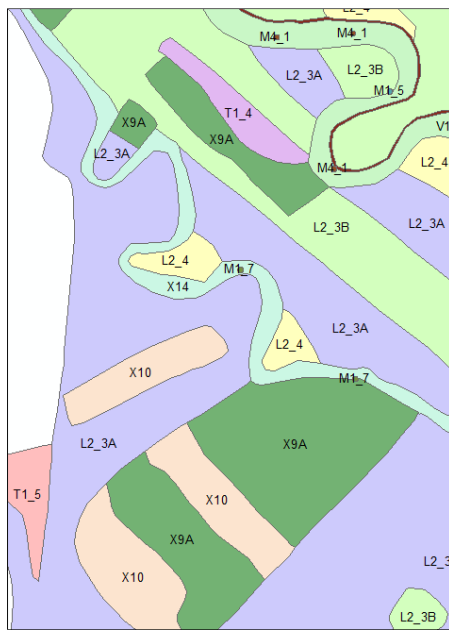
Finální model pro výpočet fuzzy ekotonů je toolbox v ArcGIS 10.1, který je kombinací skriptů napsaných v jazyce Python a modelů vytvořených v Model Builderu. Vstupní vrstva však musí mít spočítané atributy hodnot ekologických indexů, které lze v současné době spočítat pomocí extenze Patch Analyst 4.1 a StraKa.

Kompletní nástroj pro generování ekotonů (obr. 2) obsahuje dva toolsety. První toolset slouží k výpočtu fuzzy regionů a druhý toolset tvoří model pro výpočet fuzzy ekotonu.

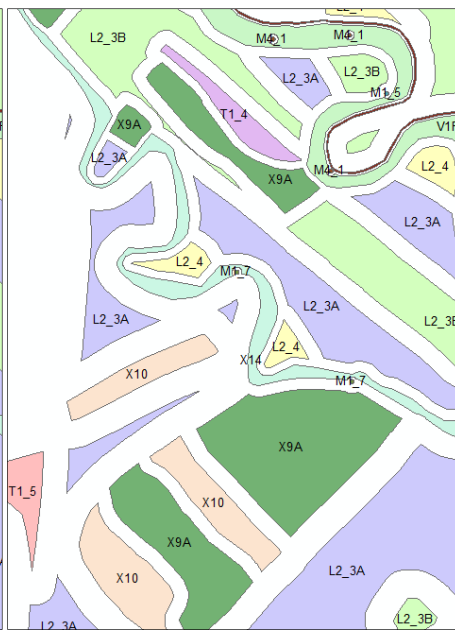


Obr. 2. Toolbox

Vstupní vrstva je polygonový shapefile s rozlišením ploch jednotlivých biotopů (Obr. 3). První skript - (0) normalizace indexů - pro tuto vrstvu vypočítá normalizované hodnoty indexů a druhý skript - (1) hodnoty vzdáleností - na základě toho odvodí hodnoty vzdáleností jádrových oblastí (Obr. 4) a obalových zón. Vše je zachováno v atributech jedné vrstvy, proto je nutné tuto vrstvu rozdělit na dílčí biotopy, což provede třetí skript - (2) rozdělení indexů -, který uloží vrstvy biotopů do jedné složky. V dalším kroku už stačí načíst cesku k těmto vrstvám a vypočítat nad všemi vrstvami biotopů jejich fuzzy regiony, které se navzájem překrývají. Toto provede čtvrtý skript - (3) fuzzy region - který napojí jádrové oblasti, původní vrstvy a obalové zóny do celků, přičemž těmto plochám přiřadí postupně stupně příslušností 1, 0,5 a 0,1 (Obr. 5). Dále tentýž skript extrahuje lomové body nad jednotlivými řezy (Obr. 6) a ty pak zinterpoluje ve výsledné překrývající se fuzzy regiony daných biotopů (Obr. 7). Poslední nástroj je přímo pro výpočet přechodných oblastí (ekotonů) pro ty překrývající se fuzzy regiony a funguje na principu přiřazení fuzzy membershipu a následném výpočtu fuzzy intersection (Obr. 8).



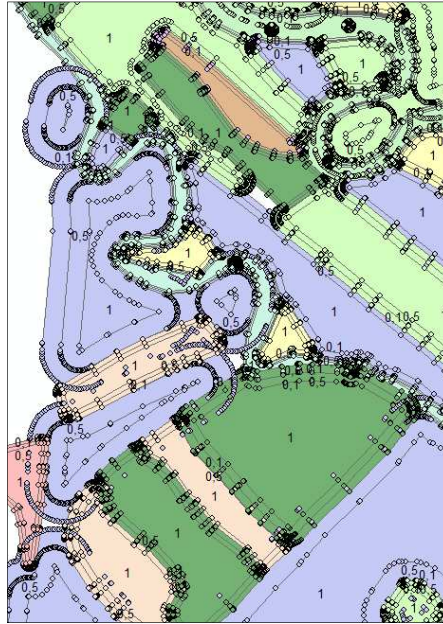
Obr. 3. Vstupní vrstva



Obr. 4. Jádrové oblasti



Obr. 5. Stupně příslušností



Obr. 6. Lomové body



Obr. 7. Fuzzy regiony



Obr. 8. Fuzzy ekotony

3 Závěr

Předmětem této práce bylo sestavit funkční model implementující fuzzy teorii pro vhodný odhad přechodných oblastí mezi ekologicky odlišnými plochami. Model pracuje na bázi výpočtu fuzzy regionů odvozených z prostorových, strukturních a ekologických charakteristik. Překrývající se části vypočítaných regionů, tzn. jejich průniky, představují výsledné odhady přechodných zón, tedy ekotonů.

Model je nastaven na vstupní vektorová data. Konkrétní model byl testován na datech biotopů vybrané oblasti ve formátu shapefile. U takovéto vstupní vrstvy je zapotřebí, aby měla spočítané konkrétní hodnoty krajinně-ekologických indexů. Pro jejich výpočet byly využity extenze Patch Analyst 4.2 a StraKa. Takto připravená vrstva může bez problému vstoupit do posloupnosti nástrojů vedoucích k výpočtu ekotonů. Posloupnost tížených nástrojů představuje onen finální nástroj, který je zasazen do prostředí ArcGIS verze 10.1 jako toolbox. Tento toolbox obsahuje jednak skript pro výpočet normalizovaných hodnot krajinně-ekologických indexů a jejich aritmetického průměru, následně skript pro výpočet jádrových oblastí a obalových zón, poté skript pro rozdělení polygonové vrstvy na dílčí plochy podle typu biotopů, čtvrtý skript pak vypočítá stěžejní fuzzy regiony pro jednotlivé druhy biotopů a nakonec poslední nástroj slouží pro výpočet průniků překrývajících se fuzzy regionů a funguje na bázi přiřazení fuzzy stupně příslušnosti a použití funkce fuzzy AND. Jednotlivé skripty jsou sepsány v jazyce Python 2.6 a datový model pro výpočet fuzzy průniků je složen v prostředí Model Builder.

Skripty obsahují důležité vzorce pro výpočet jádrových oblastí a obalových zón, které jsou výchozími strukturami pro odvození fuzzy regionů. Tyto vzorce byly pečlivě odvozeny a výsledky porovnávány s ohledem na reálné situace. Největší hodnoty šířek se pak u výsledných fuzzy ekotonů pohybují okolo 30 metrů. Souhrn nástrojů, které se ukrývají v kódech jednotlivých skriptů, obsahují nástroje z kategorií Analysis Tools, Conversion Tools, Data Management Tools a Spatial Analyst Tools.

Nástroje finálního toolboxu jsou srozumitelně popsány tak, aby uživatel byl schopen intuitivně vkládat vstupní vrstvy a výsledné vrstvy ukládat do volitelných souborů. Pořadí je dáno popisem názvů skriptů vždy s počátečním očíslováním v pořadí 0 – 4, tzn. je nutné tyto dílčí nástroje spustit popořadě. Pro případ nepochopení funkcionality toolboxu je přiložen stručný návod v textovém souboru readme.txt, kde je i upozorněno na formát vstupních dat a nutnost použití extenzí pro výpočet nezbytných indexů.

Závěrem lze říci, že výsledný nástroj dobře funguje pro výpočet přechodných oblastí, jinými slovy ekotonů, možno říci i fuzzy ekotonů, které přibližně kopírují proporce styčných ploch sousedících biotopů.

Reference

- Burrough, P.A. (1996): Natural objects with indeterminate boundaries, in Burrough, P.A., and Frank, A.U., eds., *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. London: Taylor & Francis, pp. 3-28.
- Burrough, P.A., McDonell, R.A. (1998): *Principles of Geographical Information Systems* 1st.ed. Oxford: Oxford University Press.
- Černý, T. (2005): Rostlinná společenstva v hraničních podmínkách lučních biotopů – příklad z labské nivy. Konference České botanické společnosti „Doktorandské inspirace v botanice“ – sborník, Praha, s. 34.
- Di Castri, F., Hansen, A. J., Holland, M. M. (eds) (1988): *A new look at ecotones. Emerging Projects on Landscape Boundaries*. IUBS, UNESCO, MAB
- Dubois, D., Prade, H. (1997): The Three Semantics of Fuzzy Sets, *Fuzzy Sets and Systems*, 90: 141-150.
- Farina, A. (1998): *Principles and methods in landscape ecology*. Chapman & Hall, London
- Fisher, P.F., Arnot, C., Wadsworth, R., and Wellens, J. (2006): Detecting change in vague interpretations of landscapes, *Ecological Informatics* 1: 163-178
- Fisher, P.F. (2009): Remote sensing of land cover classes as type 2 fuzzy sets, *Remote Sensing of Environment* 114: 309-321.
- Fonte, C. C., & Lodwick, W. A. (2004): Areas of fuzzy geographical entities. *International Journal of Geographical Information Science*, 18, 127–150.
- Forman, R.T.T., and Gordon, M. (1986): *Landscape Ecology*, Chichester: Wiley & sons.
- Forman, R.T.T. (1995): Some general-principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology* 10, 133–142.
- Fortin, M.-J., Olson, R.J., Ferson, S., Iverson, L., Hunsaker, C., Edwards, G., Levine, D., Butera, K., Klemas, V. (2000): Issues related to the detection of boundaries. *Landscape Ecology* 15, 453–466.
- Hobbs, R. J., Saunders, D. A., Hussey B. M. T. (1990): Nature conservation: The role of corridors (Synopsis). – *Ambio* 19, s. 94–95
- Cheng, T., Molenaar, M. (1999): Diachronic analysis of fuzzy objects. *GeoInformatica* 4, 337–355.

- John, R. I. (1998). Type 2 fuzzy sets: An appraisal of theory and applications. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems*, 6, 563-576.
- Kent, M., Gill, W.J., Weaver, R.E., Armitage, R.P. (1997): Landscape and plant community boundaries in biogeography. *Progress in Physical Geography* 21: 315-353.
- Kiliánová, H., Pechanec, V., Lacina, J., Halas, P., a kol. (2009): *Ekotony v současné krajině*. Vydavatelství UP, Olomouc, 168 s.
- Klir, G.J., Yuan, B. (1995): *Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications*, New Jersey: Prentice-Hall.
- Leopold, A. (1933): *Game management*. Charles Schribner's Sons. New York
- Leung, Y.C. (1987): On the imprecision of boundaries, *Geographical Analysis* 19: 125-151.
- Li, Y., Sun, X. (2007): Modelling dynamic niche and community model by type-2 fuzzy set, *Ecological Modelling* 211: 375-382
- Lidicker, W. Z. (1999): Responses of mammals to habitat edges: an overview. *Landscape Ecology* 14, s. 333–343.
- Luczaj, L., Sadowska, B. (1997): Edge effect in different groups of organisms: Vasculare plant, Bryophyte and Fungi species richness across a forest – grassland border. *Folia Geobotanica & Phytotaxonomica* 32:343-353
- Mendel, J.M. (2001): *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Mendel, J. M., & John, R. I. (2002). Type 2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10, 117-127.
- Morris, A., Kokhan, S. (2007): *Geographic Uncertainty in Environmental Security*. Springer, Dordecht, The Netherlands, 287 s.
- Novák, V. (2000): *Základy fuzzy modelování*. BEN, Praha, 176 s.
- Orczewska, A., Glista, A. (2005): Floristic analysis of the two woodland-meadow ecotones differing in orientation of the forest edge. *POLISH JOURNAL OF ECOLOGY* 53 (3): 365–382
- Petluš, P., Vanková, V. (2007): Analýza okrajové zóny lesného ekosystému. 8. Ved. konferencia doktorandov a mladých vedeckých pracovníkov, 18.–19. 4. 2007, FPV UKF Nitra, s. 378–384

Ries, L., Fletcher, R.J., Battin, J., Sisk, T.D. (2004): Ecological responses to habitat edges: Mechanisms, models, and variability explained, *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics* 35: 491-522.

Rigaux, P., Scholl, M., Voisard, A. (2002): *Spatial Databases with Applications to GIS*, Moran Kaufman Publishers

Rusek, J. (1992): 9. Distribution and dynamics of soil organisms across ecotones. In: di Castri, F., Hansen, A. J. (eds.), *Landscape Boundaries. Consequences for Biotic Diversity and Ecological Flows*. Ecological Studies, Vol. 92, Springer-Verlag, New York, s. 196–214.

Sklenička, P., Lhota, T., Cecetka, J. (2002): Soil porosity along a gradient from forest to field. *Die Bodenkultur*, 53 (4), s. 181–187

Sklenička, P. (2003): *Základy krajinného plánování*. Praha, Naděžda Skleničková, 321 s.

Sklenička, P., Bittnerová, B. (2004): Ekotony v krajině. *Pozemkové úpravy*, Praha. Vol. 46, s. 16–18

Sklenička, P., Šálek, (2005): Effects of forest edges on the yield of silage maize. *Die Bodenkultur*, 56 (3), s.109–116

Strayer, D. L., Power, M. E., Fagan, W. F., Pickett, S., Belnap, J. (2003): A Classification of Ecological Boundaries. *Bioscience* Vol. 53 No. 8

Talašová, J. (2003): *Fuzzy metody vícekritériálního hodnocení a rozhodování*. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, 175 s.

Verstraete, J., de Tré, G., de Caluwe, R., Hallez, A. (2005): Field based method for the modelling of fuzzy spatial data, in: F. Petry, V. Robinson, and M. Cobb (eds.), *Fuzzy Modeling with Spatial Information for Geographic Problems*, Springer, New York, pp. 41-69

Favier, Ch., Chave, J., Fabing, A., Schwartz, D., Dubois, A. M (2004): Modelling forest-savanna mosaic dynamics in main-influenced environments: effects of fire, climate and soil heterogeneity. *Science Direct. Ecological Modeling* 171: 85-102

Hufkens, K., Ceulemans, R., Scheunders, P. (2008): Estimating the ecotone width in patchy ecotones using a sigmoid wave approach. *Science Direct. Ecological Informatics* 3: 97-104

Tapia, R., Stein, A., Bijker, W. (2005): Optimization of sampling schemes for vegetation mapping using fuzzy classification. *Science Direct. Remote Sensing of Environment* 99: 425-433