MAGDALENA INDROVÁ, LUCIE KUPKOVÁ

ZMĚNY VYUŽITÍ KRAJINY V SUBURBÁNNÍ ZÓNĚ PRAHY V RŮZNÝCH PŘÍSTUPECH PREDIKČNÍHO MODELOVÁNÍ

INDROVÁ, M., KUPKOVÁ, L. (2015): Land use changes in Prague suburban area according to different prediction modelling approaches. Geografie, 120, No. 3, pp. 422–443. – The main objective of this study was to compare the capabilities of the Dyna-CLUE and Land Change Modeler (LCM) software based on the results of land use/cover development predictions in selected cadastres of the Prague suburban area. Time series of land use data, land use plans of the municipalities, and data on soil protection were used for this analysis. Land use prediction maps for the year 2020 were created using both software tools. The results of the comparison showed that the models respect the restriction of development. In accordance with the local land use plans, new residential development was properly allocated. As for commercial areas, the requirements were not completely fulfilled. It is evident that both models are able to produce correct maps of future land use based on specified requirements at the level of several cadastral units (area approx. 2,000 ha). However, the instability of LCM and the necessity of using other software while working with Dyna-CLUE somewhat complicated the work.
KEY WORDS: Dyna-CLUE – Land Change Modeler – predictive modelling – land use – residential and commercial development.

Příspěvek je výstupem řešení projektu GA ČR 13-16084S „Sociální a ekonomické hybné síly ztrát zemědělské půdy v Česku po roce 1990 z regionálního pohledu“ (M. Indrová) a projektu GA ČR P410/12/G113 „Výzkumné centrum historické geografie“ (L. Kupková).

1. Úvod

Změny v krajině jsou výsledkem mnoha vzájemně se ovlivňujících faktorů. Mezi ty nejvýznamnější patří lidské aktivity. S využitím predikčního modelování jsme do určité míry schopni nastínit budoucí obraz stavu využití krajiny, ale i odhalit dynamiku těchto změn. Během posledních desetiletí bylo pro predikci změn využití krajiny vytvořeno množství nejrůznějších modelů. Jejich různorodost, spočívající především v přístupech a metodách modelování, vedla již několik autorů k tomu, aby se pokusili o jejich klasifikaci a roztřídění (např. Lambin, Rounsevell, Geist 2000; Brown a kol. 2004; Agarwal a kol. 2001; Verburg a kol. 2004 a mnoho dalších). Malá pozornost byla ale dosud v literatuře věnována srovnání výstupů a funkčnosti dvou či více modelů / modelovacích nástrojů.

Hlavním cílem studie bylo porovnat možnosti dvou vybraných software *Dyna-CLUE* a *Land Change Modeler (LCM)* pro predikční modelování v suburbánní krajině. Za tímto účelem byl simulován možný budoucí vývoj využití krajiny ve vybraných reprezentativních katastrech v suburbánní zóně Prahy, kde dochází

jak k rezidenční, tak ke komerční suburbanizaci. Simulace byla provedena na základě časové řady dat o využití krajiny získaných klasifikací družicových snímků velmi vysokého prostorového rozlišení.

Porovnání výstupů ze software *Dyna-CLUE* a *Land Change Modeler* bylo provedeno na základě tří požadavků. Prvním požadavkem bylo respektování zákazu výstavby v těch částech území, kde byl rozvoj uživatelem zakázán (například v místech chráněných území nebo v místech s vysokou kvalitou orné půdy), dále byl kladen důraz na vznik nové zástavby v těch místech, kde byl preferován (např. na základě územních plánů), a nakonec bylo porovnáváno, zda v rámci predikce došlo k požadované přeměně některého staveniště zpět na zemědělskou půdu (z důvodu požadavku ochrany a zachování kvalitního zemědělského fondu). Během modelování nešlo o věrohodnost samotné predikce (kterou nejsme ani schopni spolehlivě ověřit), ale především o zhodnocení a porovnání možností obou modelovacích programů a spolehlivosti splnění zadaných požadavků.

Výběr uvedených modelovacích nástrojů byl ovlivněn jednak možností jejich volného stažení (alespoň na omezenou dobu) a také poměrně širokým spektrem nástrojů, které programy k modelování nabízejí. Samotný přístup k modelování je v obou případech poměrně sofistikovaný, což dokazuje i jejich použití v mnoha předchozích studiích (více viz kap. 4), většinou na úrovni regionů nebo krajinných celků větších, než bylo naše zájmové území. Specifikem naší analýzy je využití obou zvolených nástrojů k modelování v relativně malém zájmovém území několika katastrů (rozloha cca 2 000 ha) a jedním z cílů bylo tedy i ověření využitelnosti těchto modelů pro predikci vývoje na této prostorové úrovni.

2. Základní pojmy

Přestože člověk mění krajinu již od nepaměti, za poslední století se intenzita těchto změn velmi zvýšila (Lambin, Geist, eds. 2006; Aspinall, Hill, eds. 2008; Bičík, Jeleček 2009). Porozumění změnám ve využití krajiny je důležité jak z hlediska vědeckého, tak z hlediska ekonomického či politického (Liu a kol. 2009; Kabrda, Jančák 2007; Jeleček, Chromý, Janáč 2010). Definování scénářů a modelování různých variant budoucího vývoje může přispět k odhalení a vysvětlení mechanismů změn. I proto je v posledních desetiletích termín *modelování* velmi aktuální. Analýza je zaměřena na predikční modelování v oblasti rozšiřování zástavby, konkrétně na rozšiřování zástavby v suburbánní zóně Prahy. Právě zóny suburbanizace jsou z důvodu dynamiky probíhajících procesů a změn vhodným územím pro predikční modelování.

Modelování budoucího využití krajiny *(land use)* můžeme označit jako proces vytváření budoucího obrazu území na základě odhalování změn probíhajících v oblasti v určitém časovém horizontu a na základě analýzy zákonitostí těchto změn. Jde o jednu z dostupných metod a přístupů, které jsou schopny objasnit dynamiku změn v krajině a zároveň nastínit podobu jejího možného vývoje (Lambin, Geist 2006). Verburg a kol. (2004) definují modely[1] jako nástroje umož-

[1] V anglicky psané literatuře se setkáváme s pojmem *„land use models“*, *„land use change models“*, *„models of land use change“*, popř. *„urban models“* apod. V našem textu je pro všechny tyto výrazy využit termín „model(ování) změn využití krajiny“.

ňující analýzu příčin a následků změn krajiny, za účelem lepšího porozumění fungování procesů využití krajiny a následného vytváření územní strategie či územního plánu. Modely zaměřené na zástavbu jsou souborem funkcí a procesů zabývajících se zastavěným prostorem. Obvykle jsou reprezentovány počítačovým programem pracujícím s daty krajinného pokryvu, obyvatelstva, zaměstnaností, transportu a dalšími daty, umožňující mimo jiné generovat budoucí vývoj na základě určitých schémat a scénářů vývoje (Batty 2009).

V některých studiích, zabývajících se vývojem krajiny a její predikcí do budoucna, se setkáváme s tzv. scénáři vývoje. Pomocí základního schématu „když…, potom…“ je možné vytvořit několik variant, jakým směrem se bude vývoj zkoumaného území ubírat. Scénáře je možné aplikovat jak na globální, tak i na regionální a lokální úrovni. Např. UNEP *(United Nations Environment Pragramme)* se zabývá globálním projektem s názvem GEO (*Global environment outlook*, http://www.unep.org/geo). Mezi evropskými projekty je možné uvést projekt *EURURALIS* (http://www.eururalis.eu), jehož cílem je analyzovat potenciální změny *land use/cover* v Evropě.

3. Přehled vybraných metod využívaných k modelování

Metodami využívanými pro modelování změn využití krajiny se podrobně zabývali např. Lambin, Rounsevell, Geist (2000), Agarwal a kol. (2001), Verburg a kol. (2004) nebo Indrová (2012). V této práci se zaměříme na metody, které jsou pro modelování použity v software *Land Change Modeler* a *Dyna-CUE*.

3.1. Cellular automata

Cellular automata, česky celulární automaty (dále jen CA), lze určitě považovat za jednu z nejznámějších a nejpoužívanějších metod, vyskytujících se v oboru modelování. To je dáno především flexibilitou této metody, poměrně jednoduchou aplikací a vzhledem k prostorovým vyjádřením i jejím vztahem k DPZ a GIS.

Myšlenka CA není nijak nová. CA byly vyvinuty fyzikem Ulamem ve 40. letech dvacátého století a v roce 1966 je použil Neumann k výzkumu sebe-reprodukujících se systémů (White, Engelen 1993). Základní myšlenkou bylo pokusit se vytvořit prostor, který je rozdělený na jednotlivé buňky *(cells)*. Každá buňka je v tomto prostoru charakterizována počátečním stavem, který se dle určitého vývojového pravidla po jednotlivých krocích (iteracích) mění. O další výzkum se pak zasloužil Conway s CA nazvaným Hra života („*Game of Life*“, 1970) a Wolfram, který se v 80. letech zcela zaměřil na jejich výzkum na univerzitě v Princetonu. Protože CA jsou pro geografické obory díky své prostorové podstatě velmi atraktivní, v roce 1979 je Tobler implementoval také do geografického modelování.

Základní princip CA metody je velmi jednoduchý. Wolfram (1984) uvádí, že CA je matematicky odvozená metoda schopná imitovat proces odehrávající se v prostoru a v čase na základě jednoduchých rozhodovacích, přechodových pravidel. Jde o diskrétní a dynamický proces. Buňky jsou pravidelně organizovány

v N-rozměrném (nejčastěji 2D) prostoru a každá buňka může být reprezentována jedním z konečně mnoha stavů. Tyto stavy jsou aktualizovány po každém časovém kroku. Budoucí stav buňky závisí na přechodových pravidlech a na stavech nebo funkcích buněk okolních. Pomocí rozhodovacích pravidel je pak simulován šířící se proces, jeho intenzita a směr. Základní metoda CA je složena ze čtyř komponent (Rafiee a kol. 2009):

– prostor buněk, v našem případě rastr složený z pixelů;
– hodnoty stavů buněk – u binární CA je to 0, nebo 1;
– okolí buněk;
– přechodové funkce, které definují následující stav každé buňky v příštím časovém okamžiku; budoucí stav je založen na stavu předchozím a na stavu okolních buněk.

Co se týče predikce růstu zástavby, White a Engelen (1993) použili tuto metodu již na počátku 90. let. Od té doby byla metoda CA použita v mnoha studiích, např. Engelen a kol. (1995), Clarke, Hoppen, Gaydos (1997) ad., a postupně byla vylepšována a rozšiřována.

Jedním z nejznámějších modelů, fungujících na bázi CA, je *SLEUTH model* (Clarke, Hoppen, Gaydos 1997), formálně nazvaný *„Clarke Celular Automaton Urban Growth Model“*. Jeho název je odvozený od základních vstupních dat potřebných pro jeho použití, konkrétně *„Slope, Land Use, Exlusion zone, Urban, Transportation a Hillshade“* (Rafiee a kol. 2009). Model je schopný odhadnout čtyři případy rozrůstání zástavby, a to spontánní růst, růst z nového centra, růst ovlivněný silniční sítí a rozrůstání okrajových částí města (Silva, Clarke 2002). Z českých autorů pak CA využili např. Grill a kol. (2008). Za pomoci metody CA vytvořili nástroj k simulaci rozvoje zastavěných území.

3.2. Markovovy řetězce

Markovův řetězec (název podle Andreje Markova) je stochastický diskrétní řetězec událostí s Markovovskou vlastností, která říká, že pravděpodobnost další události není závislá na události předchozí. Historie předcházejících stavů je tak zapomenuta.

Markovovy řetězce se nejvíce používají právě při popisu změn land use. Jsou schopny ukázat trend těchto změn, jejich směr a velikost (Zhang a kol. 2011). Byly použity např. ve studii týkající suburbánní oblasti Morelia City (López a kol. 2001) a v práci od Wenga (2002). Markovovy řetězce jsou také implementovány v modulu *MARKOV*, v software *IDRISI*, kde slouží právě ke generování matice přechodu. Tato metoda má ale nedostatek v tom, že výsledné změny jsou vyjádřeny pouze číselně, jejich rozmístění v prostoru je zcela náhodné. Proto je metoda Markovových řetězců nejčastěji používána v kombinací s jinými metodami, např. CA (např. Pointus, Malanson 2005; Zhang a kol. 2011). V již zmíněném software *IDRISI* se setkáváme s nástrojem pro modelování krajinného pokryvu, nazvaným *CA_MARKOV*.

3.3. Logistická regrese

Logistická regrese se zabývá odhadem pravděpodobnosti jevu *y* (vysvětlovaná, závislá proměnná) na základě nezávislých proměnných, které mohou ovlivnit výskyt jevu *y*.

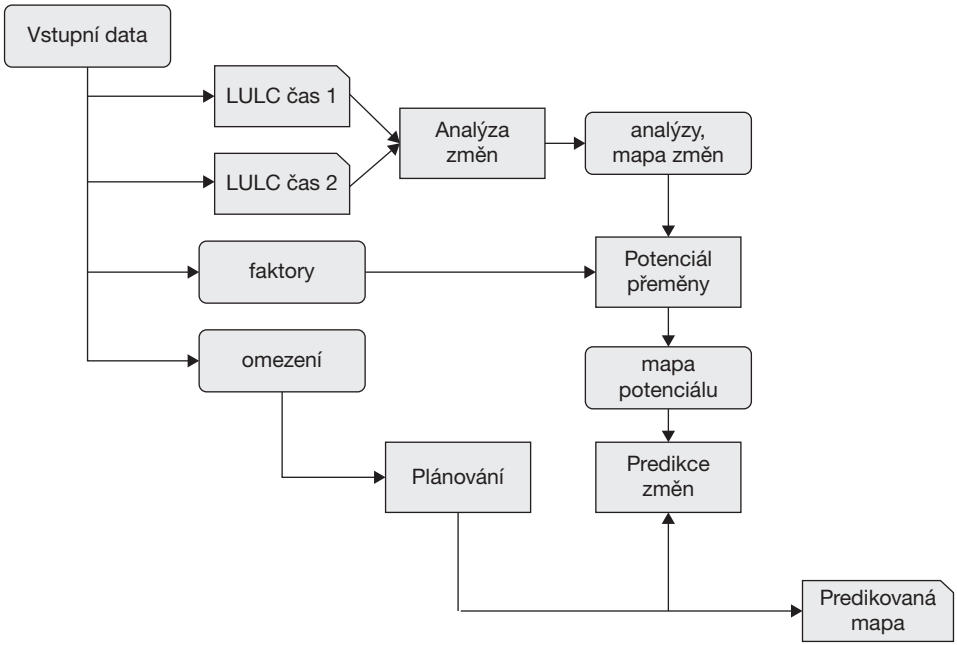
Hu a Lo (2007) použili tuto metodu ve své studii zabývající se modelováním růstu zástavby v Atlantě. Logistickou regresi využívá i model *CLUE (Conversion of Land Use and its Effects)*, popř. *CLUE-S* nebo *Dyna-CLUE*.

3.4. Neuronové sítě

Neuronové sítě (anglicky také *„artificial neural networks“ – ANN*) byly původně využity k modelování přenosů probíhajících v mozku. Účelem bylo prozkoumat a imitovat jeho schopnosti.

Neuronová síť je složena z několika vrstev neuronů (nódů), které simulují strukturu lidského mozku (Li, Yeh 2002). Obvykle se setkáváme s jednou vstupní, jednou výstupní a několika skrytými vrstvami. Spojení mezi vrstvami zajišťují přenos informace skrz síť.

Neurony v síti plní dvě základní funkce. Přijímají signál od neuronů v předchozí vrstvě a jako vstup přenášejí tento signál neuronům v další vrstvě. Signály šířící se z jednoho nódu do druhého jsou modifikovány vahami. Čím je hodnota vah vyšší, tím je signál důležitější. Tyto váhy jsou určeny tzv. trénovacími (učícími) algoritmy, z nichž nejznámější je algoritmus *BP – „Back Propagation“*.



Obr. 1 – Schéma modelovacího procesu s využitím *LCM*, kroky 1, 2, 3 a 5

Učením tedy nastavujeme váhy tak, aby byly výsledky co nepřesnější. Více o BP např. Pijanowski a kol. 2002, nebo Almeida a kol. 2008.

Metoda neuronových sítí byla již úspěšně aplikována v několika disciplínách, jako je ekonomika, medicína, klasifikace krajinného pokryvu, dálkový průzkum Země, analýza obrazu či předpověď změn klimatu. Zásluhu na masivnějším použití této metody má především rozvoj počítačové techniky (Pijanowski a kol. 2002).

Model LTM *(Land Transformation Model)*, založený na metodě neuronových sítí, použili ve své studii např. již citovaný Pijanowski a kol. (2002). Byl vyvinut na modelování změn *land use* za použití dalších socioekonomických, politických a environmentálních dat. V dalších pracích se pak setkáváme především s kombinací neuronových sítí a CA (Almeida a kol. 2008; Li, Yeh 2002).

4. Software *Land Change Modeler* a *Dyna-CLUE*

Analýza vývoje využití krajiny v zájmovém území pražské suburbánní zóny byla zpracovávána ve dvou softwarech. Prvním z nich je *Land Change Modeler* (dále jen *LCM*) a druhým je volně dostupný *Dyna-CLUE*. Následující kapitola se věnuje podrobnějšímu popisu obou těchto modelů.

4.1. *Land Change Modeler*

LCM, celým názvem *Land Change Modeler for Ecological Sustainability*, je jedním z modelovacích modulů programu IDRISI, který byl uveden na trh v roce 2006. Jde o tzv. vertikální aplikaci, sloužící k analýze a predikci změn krajinného pokryvu / využití krajiny.

U tohoto modelu se můžeme setkat s několika přístupy. Při modelování potenciálu každého pixelu k dané změně je možné použít jak logistickou regresi, tak *MLP (multi-layer perceptron)* neuronovou síť. Pro standardizaci faktorů, jako je např. vzdálenost od silnic, je používána fuzzy logika. Pro predikci budoucího vývoje pak model pracuje s Markovovými řetězci.

LCM nabízí sadu nástrojů umožňujících analýzu změn využití krajiny, monitorování a identifikaci jejich trendu a tvorbu mapových výstupů. S využitím definovaných faktorů, omezení a jiných map, ovlivňujících změnu krajinného pokryvu, je možné predikovat budoucí podobu krajiny.

Jako hlavní vstup vyžaduje *LCM* mapy krajinného pokryvu ze dvou časových horizontů. Modelování pak zahrnuje tyto části:

1. Analýza změn *(Change Analysis)*
2. Potenciál přeměny *(Transition Potentials)*
3. Predikce změn *(Change Prediction)*
4. Implikace *(Implications)*
5. Plánování *(Planning)*

Celý proces modelování zachycuje obrázek 1. Z odborných studií, využívajících *LCM*, je možné uvést např. práci Manandhar, Odeh, Ancev (2006), ve které autoři modelují přeměnu zemědělské půdy a přírodních oblastí na

urbánní a residenční zástavbu, a to až do roku 2025. Dále je to Tewolde (2011), který používá LCM k modelování rozvoje města Asmara v Etiopii v horizontu do roku 2020. Dalším příkladem je práce Henríqueze a kol. (2010), která se zabývá modelováním zastavěného území, konkrétně hlavního města Maputo v Mozambiku.

4.2. *Dyna-CLUE*

Dyna-CLUE („Dynamic Conversion of Land Use and its Effects") je jedním z řady modelů, vyvinutých na Wageningen University and Research Centre v Nizozemsku. Model kombinuje logistickou regresi a informace ze sousedních buněk, podobně jako CA modely. Výsledky jsou použity k tvorbě vhodnostních map, na jejichž základě jsou alokovány jednotlivé změny *land use*. Rozloha těchto změn, respektive rozloha každého typu *land use* v predikovaném čase je dána uživatelem. Každá buňka je charakterizována údajem, ukazujícím pro každý typ *land use*, jak moc by bylo vhodné změnit stávající typ krajinného pokryvu, na jiný daný typ (dále „míra vhodnosti"). Nová půda je tedy rozmístěna do míst s největší mírou vhodnosti pro daný typ krajinného pokryvu.

Model *Dyna-CLUE* kombinuje dva přístupy, a to *„top-down"* a *„bottom-up"*. První z nich se týká rozmístění *land use*, druhý pak určení lokálních konverzních procesů z jednoho typu land use na druhý.

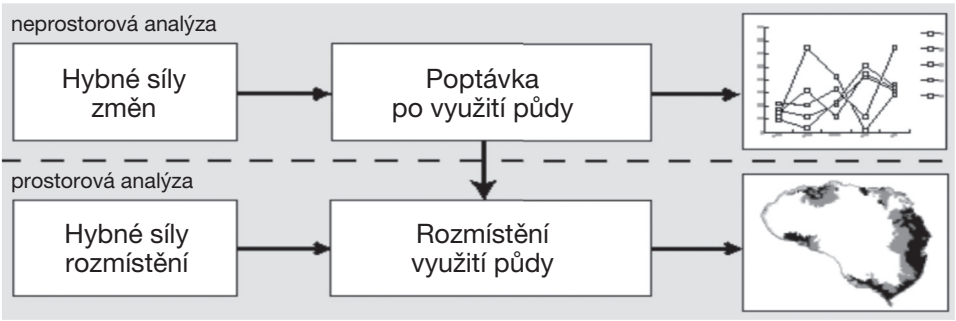
Model je rozdělen na dva samostatné moduly, neprostorovou analýzu *(non--spatial demand module)*, a prostorovou analýzu *(spatially explicit allocation procedure)* – viz obrázek 2.

Na základě uživatelem předem definovaných požadavků na budoucí rozlohu jednotlivých typů využití krajiny (scénáře vývoje), první modul určí celkovou rozlohu změn. Druhý modul pak tyto změny ve sledovaném regionu alokuje.

Procedura „rozmístění" přiřazuje každému místu nejpravděpodobnější typ krajinného pokryvu podle následující rovnice

$$Ptot_{i,t,lu} = Ploc_{i,t,lu} + (Pnbh_{i,t,lu}) + elas_{lu} + comp_{t,lu} \ ,$$

kde i je daná buňka, t je čas, lu je typ *land use*, *Ptot* je výsledná pravděpodobnost, *Ploc* je vhodnost přeměny stávajícího typu buňky na typ lu (lokální



Obr. 2 – Neprostorová a prostorová analýza. Zdroj: Verburg 2010.

míra vhodnosti), *Pnbh* vhodnost přeměny sousedních buněk (nepovinné), *elas* je elasticita změny a *comp* je konkurence.

Dalším důležitým vstupem modelu je *matice přechodu*, pomocí které je možné definovat, jaký typ krajinného pokryvu je možné změnit a jaký ne, jaký jen za určitých podmínek, apod. Po proběhnutí procesu alokace je celková změněná plocha porovnána s plochou, která je definována ve scénáři. Podle výsledné odchylky mezi těmito plochami je iterativně změněna hodnota konkurence a procedura se opakuje, dokud není konečná odchylka menší nebo rovna odchylce povolené. Následně je časový krok zvýšen o jedna a proces se opakuje až do konečného roku. Pokud proces neskončí po 20 000 iteracích, končí automaticky zobrazením chyby.

Model *Dyna-CLUE* použil např. Verburg a Overmars (2009), kteří se zabývají možnostmi modelu *Dyna-CLUE* při predikci krajinného pokryvu, převážně v celoevropském měřítku. Práce od Strakové (2009) je zaměřena na modelování budoucího vývoje regionu o velikost 30 km^2 s využitím různých scénářů vývoje.

5. Modelová studie

Pomocí dvou modelů popsaných v předchozí kapitole byly vytvořeny predikční mapy, zachycující zájmové území v roce 2020. Výsledné predikční mapy, především ale samotné použití obou programů bylo následně porovnáno na základě předem definovaných požadavků.

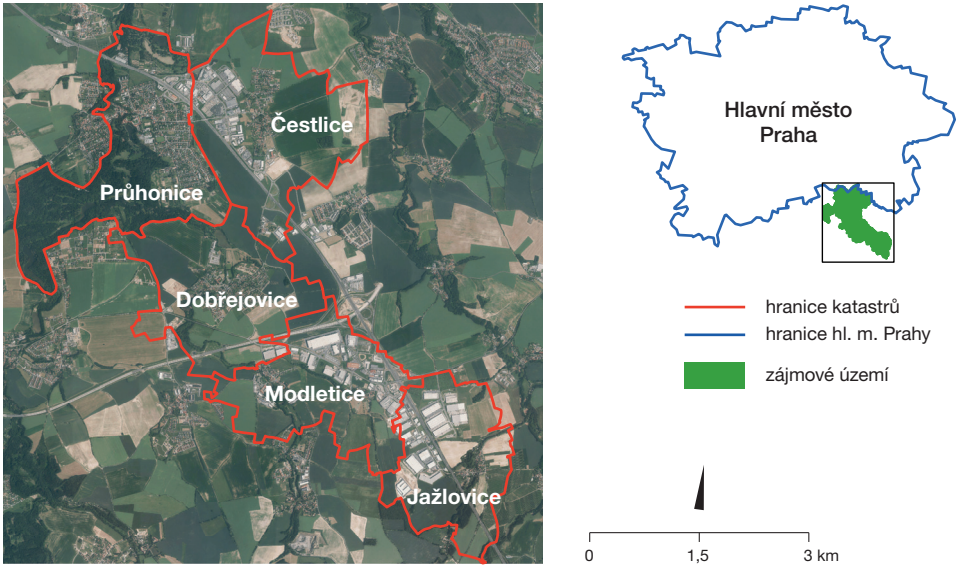
5.1. Zájmové území

Pro analýzu bylo vybráno území na jihovýchod od Prahy (viz obr. 3). Zájmové území zahrnuje čtyři katastry bývalého okresu Praha-východ – Čestlice, Dobřejovice, Modletice a Jažlovice, a jeden katastr bývalého okresu Praha-západ – Průhonice. Celková rozloha území činí 19,347 km^2.

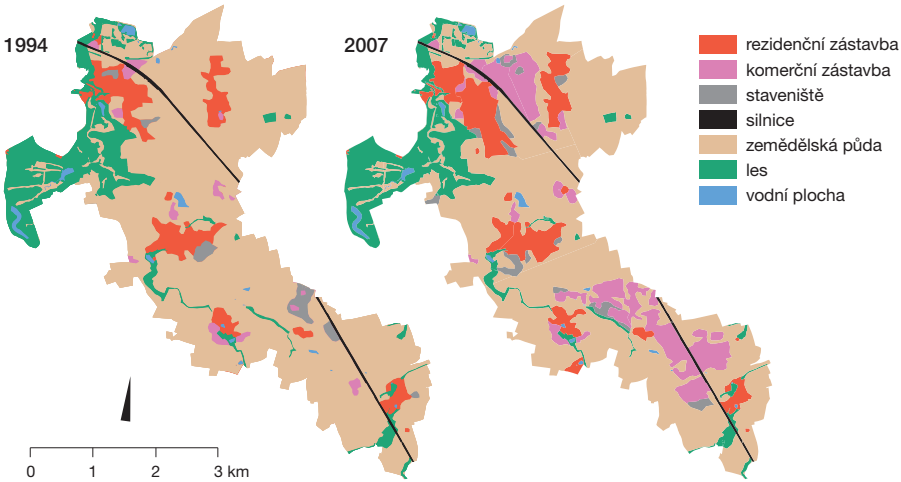
Všechna výše uvedená katastrální území prošla od poloviny 90. let výraznou změnou. Především díky své velmi výhodné dopravní poloze v blízkosti dálnice D1 se tyto obce staly atraktivním místem pro novou výstavbu. Setkáváme se tu jak s rozvojem rezidenční, tak komerční zástavby (viz obr. 4).

5.2. Použitá data a základní vstupní předpoklady pro modelování

V práci byla použita data z několika různých zdrojů. Základním datovým zdrojem byly dvě vektorové sady dat *land use/cover* pro oblasti Průhonice – Čestlice a Dobřejovice – Modletice – Jažlovice, reprezentující využití krajiny sledovaného území ve dvou časových horizontech (1994 a 2007), které vznikly manuální vektorizací snímků velmi vysokého prostorového rozlišení (velikost pixelu 2,4 m) družice *QuickBird* na základě vizuální interpretace (viz obr. 4). Dále byly použity vrstevnice z databáze *ZABAGED*, územní plány obcí a informace o BPEJ (bonitované půdně ekologické jednotky). Podle vyhlášky o stanovení



Obr. 3 – Zájmové území



Obr. 4 – Využití krajiny zájmového území v letech 1994 a 2007

tříd ochrany (Předpis č. 48/2011 Sb.) byla v zájmovém území zemědělská půda zařazena buď do kategorie půdy, kde je výstavba zakázaná (třída kategorie ochrany 1) nebo do kategorie, kterou lze využít pro výstavbu (třídy ochrany 2–5). Veškerá použitá data musela být převedena do rastrových formátů či formátu *ASCII*, přesně dle požadavků LCM a *Dyna CLUE*.

Dalším krokem bylo vytvoření map „faktorů“ *(driving factors)* a map „omezení“ *(constraints)*. Zatímco faktory jsou většinou spojitého charakteru, omezení

jsou vždy booleanovská a slouží především k vyloučení nevhodných území. Celkem bylo vytvořeno sedm map faktorů: vzdálenost od stávající i nedostavěné rezidenční a komerční zástavby, vzdálenost od silnic, nadmořská výška a sklon. Mapy faktorů byly normalizovány. Vhodnost všech faktorů byla v *LCM* testována pomocí Cramerova koeficientu, který u všech použitých dat vykazoval pozitivní výsledek.

Nedílnou součástí *Dyna CLUE* je logistická regrese, kde byly faktory použity jako proměnné, které mohou ovlivnit výskyt nové zástavby. Výsledky, ověřené ROC analýzou, vykazovaly vysokou vypovídající hodnotu modelu, a tedy použití vhodných faktorů.

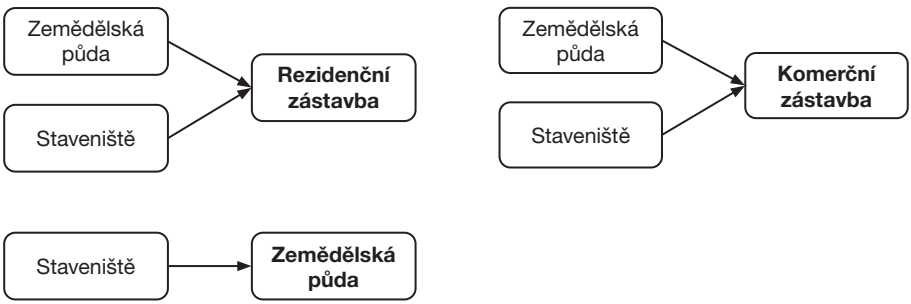
Omezení pro predikci byla určena podle následujících poměrně jednoduchých pravidel: (1) Zákaz výstavby na půdě I. kategorie třídy ochrany, (2) zákaz přeměny lesa a vodních ploch a (3) zákaz přeměny již zastavěného území v jiné kategorie krajinného pokryvu.

5.3. Modelování v software *Land Change Modeler* (LCM)

Při práci s *LCM* je nutné postupovat po jednotlivých, předem určených krocích. Nejprve byla provedena základní analýza změn, které se v zájmovém území během sledovaného časového horizontu odehrály. Poté byly určeny tři sub-modely a pro každý z nich byly vytvořeny mapy potenciálu (buňky v tomto rastru reprezentují potenciál daného místa ke změně). Následně byla v kroku „plánování“ definována jednotlivá omezení a upřednostnění budoucího vývoje (byla určena území, kde je rozvoj zakázán – vodní plochy, lesní porosty, zemědělská půda I. kategorie ochrany) a kde naopak upřednostněn (např. v místech určených pro rozvoj zástavby v územních plánech nebo v sousedství ploch, kde došlo k výstavbě v období 1994–2007). Nakonec byla pomocí *„hard“* predikce vytvořena mapa krajinného pokryvu pro rok 2020.

Důležité kroky zahrnuje především část „Potenciál přeměny“. Vyústěním jsou mapy, zobrazující potenciál přeměny z jednoho typu krajinného pokryvu na druhý. Tyto mapy jsou pak použity při samotné predikci.

Prvním krokem je definování tzv. sub-modelů. Každý sub-model zahrnuje přeměnu různých typů krajinného pokryvu na jeden vybraný. V práci byly



Obr. 5 – Sub-modely použité v *LCM*

Tab. 1 – Použité faktory v sub-modelech

Sub-model	Použité faktory
Rezidenční zástavba	vzdálenost od silnic vzdálenost k rezidenční zástavbě vzdálenost od nedostavěné rezidenční zástavby nadmořská výška sklonitost
Komerční zástavba	vzdálenost od silnic vzdálenost ke komerční zástavbě vzdálenost od nedostavěných komerčních ploch nadmořská výška sklonitost
Zemědělská půda	nadmořská výška sklonitost

definovány tři sub-modely (rezidenční zástavba, komerční zástavba, zemědělská půda), jejichž schéma je zobrazeno na obrázku 5.

Použití jednotlivých sub-modelů je nutné, aby bylo možné určit samostatný vývoj některých kategorií, v tomto případě tedy rezidenční a komerční zástavby. Sub-model zemědělská půda byl přidán z důvodu ochrany půd.

Pro každý sub-model pak byly definovány faktory (tab. 1), které mohou tuto přeměnu ovlivnit.

Vhodnost všech faktorů lze předem otestovat pomocí Cramerova koeficientu (Cramerovo V), který vyjadřuje, jak moc dobře jednotlivé faktory vysvětlují výskyt jednotlivých kategorií krajinného pokryvu. Obecně se doporučuje použít faktor s koeficientem vyšším než 0,15. V modelu tuto hranici překročily všechny zvolené faktory.

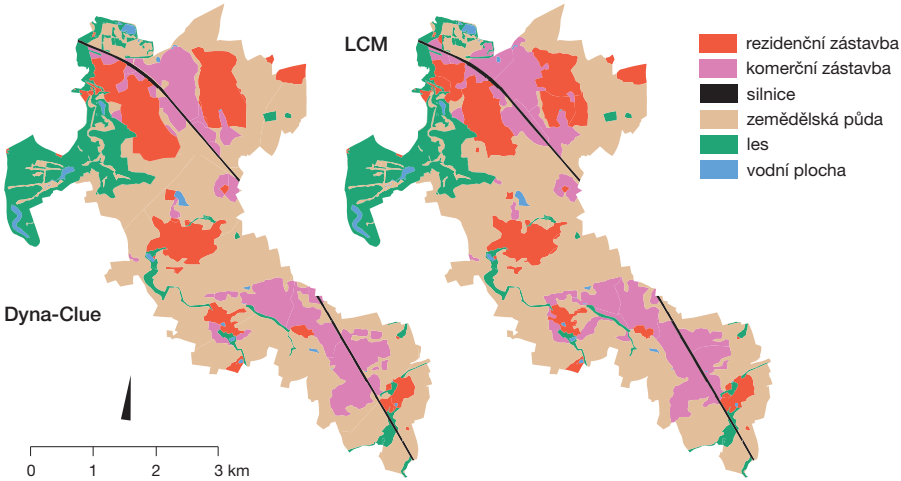
Pomocí neuronových sítí pak bylo vytvořeno pět map potenciálu. Následoval krok Plánování, kdy byla definována omezení a oblasti přednostně určené k přeměně.

V další části, nazvané Predikce změn, bylo třeba definovat matici přechodu. K tomuto byl použit Markovovův řetězec. Pomocí této metody bylo na základě vstupních dat krajinného pokryvu a map potenciálu určeno množství změn a pravděpodobnost přeměny v predikovaném období. Výsledek predikce je zobrazen na obrázku 6.

5.4. Modelování v software *DYNA-CLUE*

Nejdůležitějším souborem v *Dyna-CLUE* jsou tzv. hlavní parametry *(main parameters)*. Jedná se o textový soubor, ve kterém jsou uloženy nezbytné informace o zpracovávaném území i o dalších vstupních, ale i výstupních datech.

Další nezbytnou součástí modelování v programu *Dyna-CLUE* je výpočet parametrů logistické regrese. Tento výpočet byl proveden pro kategorie staveniště, rezidenční zástavba, komerční zástavba a zemědělská půda. S těmito kategoriemi bylo zacházeno jako se závislými proměnnými. Nezávislé proměnné (jednotlivé faktory, které mohou výskyt závislé proměnné ovlivnit), byly každé kategorii určeny zvlášť. Byly použity stejné faktory jako v případě



Obr. 6 – Výsledek modelování – predikce využití krajiny zájmového území v roce 2020. Vlevo: *Dyna-CLUE*, vpravo: *LCM*.

modelování v *LCM* (tab. 1). Po výpočtu koeficientů logistické regrese byly výsledky úspěšně ověřeny pomocí *ROC (Receiver Operating Characteristic)* křivky. V našem případě dosahovala přesnost modelu od 88 % u komerční zástavby do 95 % u rezidenční zástavby. Během procesu byla také sledována RMS křivka, která byla po celou dobu iterací hladká a klesající. Na základě těchto výsledků bylo potvrzeno, že se jedná o reálné modely (více o ROC např. Fawcett 2006).

V *Dyna-CLUE* lze také definovat nejrůznější scénáře vývoje, a to za pomoci speciálního souboru obsahujícího požadavky na využití území. Tento textový soubor obsahuje informace o využití krajiny po dobu simulace. Pro každou kategorii krajinného pokryvu a pro každý simulovaný rok obsahuje počet hektarů, které jednotlivé kategorie zaujímají. Na základě územních plánů byla stanovena hodnota pro rok 2020. Protože vstupní předpoklad byl rovnoměrný růst, byly zbývající hodnoty mezi rokem 2007 a 2020 rovnoměrně rozpočítány. U kategorií les, vodní plochy a silnice byly hodnoty ponechány pro všechny roky stejné, protože u těchto kategorií nebyl vývoj povolen.

Podobně jako u *LCM*, i v *Dyna-CLUE* byla vytvořena matice přechodu (tab. 2). V tomto případě se jedná o matici o velikosti 7×7, kde řádky odpovídají současnému typu krajinného pokryvu v čase t, a sloupce typu krajinného pokryvu v čase t+1. Hodnota 1 v matici označuje povolenou přeměnu určitého typu krajinného pokryvu na jiný, hodnota 0 tuto přeměnu zakazuje.

Protože bylo nutné rozdělit kategorii staveniště na nedostavěné rezidenční plochy (A) a nedostavěnou komerční zástavbu (B) a také bylo třeba umožnit zpětnou přeměnu ploch s nedokončenou zástavbou na zemědělskou půdu (C), byly pro simulaci použity další tři speciální rastrové vstupy, které zajistí správnou přeměnu kategorie staveniště.

Mezi další velmi užitečné soubory patří mapové vstupy, označující oblasti, kde by mělo dojít k jisté změně s větší pravděpodobností než v jiných oblastech.

Tab. 2 – Matice přechodu

čas t \ Čas t+1	Staveniště	Rezidenční zástavba	Komerční zástavba	Silnice	Zemědělská půda	Les	Vodní plochy
Staveniště	1	A	B	0	C	0	0
Rezidenční zástavba	0	1	0	0	0	0	0
Komerční zástavba	0	0	1	0	0	0	0
Silnice	0	0	0	1	0	0	0
Zemědělská půda	1	1	1	0	1	1	0
Les	0	0	0	0	0	1	0
Vodní plochy	0	0	0	0	0	0	1

Zdroj: Autoři

Tuto možnost lze využít v případě, kdy je v určitých místech očekáván vývoj využití krajiny. V našem případě byly použity tyto soubory pro rozvoj zástavby (rezidenční i komerční) na základě územních plánů a rozestavěných ploch.

Na základě výsledků z logistické regrese nabízí *Dyna-CLUE* výpočet tzv. pravděpodobnostních map, které udávají pravděpodobnost rozšiřování daného typu krajinného pokryvu. Mapy byly vypočteny pro kategorie rezidenční a komerční zástavba. Výsledky modelování viz obrázek 6.

6. Výsledky

Jedním z cílů práce bylo porovnat výstupy modelování v prostředí obou programů. Přestože vstupní předpoklady a použitá omezení a faktory byly stejné, postupy modelování i použité metody se odlišovaly. I proto nebyly dosažené výsledky stejné – viz obrázek 6.

Nejvíce rozdílů je patrných u kategorie komerční zástavba, které *LCM* v jižní i v severní části zájmového území nasimuloval více než *Dyna-CLUE*. V případě zástavby rezidenční byla v obou výstupech nasimulována poměrně srovnatelná rozloha, i když o něco více jí je tentokrát ve výstupu z *Dyna-CLUE*. V obou výstupech se také již nevyskytuje kategorie staveniště, která byla přeměněna buď na rezidenční nebo komerční zástavbu nebo na zemědělskou půdu.

Tab. 3 – Vývoj využití krajiny 1994 a 2007 a predikce do roku 2020

Kategorie \ Rok	1994	2007	2020	
			LCM	Dyna-CLUE
Staveniště	30,7	37,2	0,0	0,0
Rezidenční zástavba	126,6	170,8	236,4	258,3
Komerční zástavba	28,9	187,6	328,1	267,8
Silnice	71,4	88,5	88,5	88,5
Zemědělská půda	1 388,8	1 161,6	992,7	1 031,0
Les	255,3	254,8	254,8	254,8
Vodní plochy	16,8	19,4	19,4	19,4

Z tabulky 3 je zřejmé, jak se měnila rozloha jednotlivých kategorií využití krajiny ve sledovaném časovém horizontu, i s predikcí do roku 2020. Zatímco některé plochy zůstaly zcela nebo téměř nezměněné (např. lesní porosty, silnice a vodní plochy), jiné kategorie prošly velkým vývojem. Již od roku 1994 vidíme prudký nárůst komerčních ploch, které v roce 2020 zabírají podle *LCM* ještě o 60 ha více než predikce dle *Dyna-CLUE*. Naopak rezidenčních ploch nasimuloval více *Dyna-CLUE*, a to o více než 20 ha. Obě tyto změny nejvíce ovlivnily vývoj zemědělské půdy, jejíž rozloha klesla podle LCM o 14 % a podle *Dyna-CLUE* o 11 %.

6.1. Hodnocení výsledků

Protože neexistuje způsob, jak bychom mohli zjistit, zda opravdu v roce 2020 bude krajina této modelové oblasti vypadat tak, jak ji nasimuloval jeden nebo druhý program, byly výsledky zhodnoceny na základě požadavků, které byly na program kladeny. Celkem byly v každém programu definovány tři požadavky.

1. Nejdůležitějším z nich bylo respektování zákazu výstavby v těch částech území, kde je rozvoj zakázán, ať už z důvodu ochrany půd či například kvůli zákazu rozrůstání zástavby do oblastí lesních porostů nebo rušení vodních ploch. Tento požadavek byl splněn oběma programy.
2. Dále se jedná o místa, kde byl naopak vznik nové zástavby preferován, a to především na základě územních plánů, získaných od jednotlivých obcí, nebo z důvodu přeměny rozestavěných ploch na dokončené budovy.
   Co se týče rezidenční zástavby, oba programy úspěšně rozšířily tuto kategorii do míst, která byla určena vstupními soubory. U kategorie komerční zástavba se ale vyskytly i plochy, kde tento požadavek nebyl splněn. Tento fakt lze u *Dyna-CLUE* vysvětlit pomocí pravděpodobnostních map, kdy byla pravděpodobnost přeměny na tuto kategorii v některých, převážně okrajových místech menší než na místech nově vzniklých komerčních ploch. Pro dosažení 100% úspěšnosti ve vzniku požadovaných ploch by v tomto případě bylo nutné zvětšit rozlohu kategorie komerční plochy v souboru obsahujícím požadavky na využití území.
   U programu *LCM* lze tento nedostatek vysvětlit pomocí mapy potenciálu vyjadřující potenciál přeměny nedostavěných ploch na zemědělskou půdu a matice přechodu. Hodnoty v této mapě jsou nejvyšší právě v oblasti, kde místo komerční zástavby byla navržena zemědělská půda. To spolu s poměrně vysokou hodnotou v matici přechodu (0,28) dává velkou pravděpodobnost simulace zemědělské půdy namísto požadované komerční zástavby.
3. Nakonec bylo také hodnoceno splnění požadavku *na zrušení některé nedokončené výstavby* z důvodu její polohy na území, které by nemělo být vyjmuto ze zemědělského půdního fondu z důvodu jeho ochrany. Tento, do značné míry v praxi nerealizovatelný požadavek, se v rámci simulace podařilo splnit v obou programech.

Výsledky z obou modelů jsou velmi ovlivněny samotnou strukturou použitých programů. Prvním zásadním rozdílem je již podoba vstupních souborů. Zatímco *LCM* vyžaduje informace o historickém vývoji území ze dvou rastrových map (v tomto případě z roku 1994 a 2007), program *Dyna-CLUE* pracuje pouze s jedním časovým řezem (2007). Historický vývoj oblasti nemá tedy na jeho budoucí podobu žádný vliv.

Dalším velkým rozdílem je vytváření pravděpodobnostních map, případně map potenciálu. U programu *Dyna-CLUE* jsou tyto mapy vytvářeny na základě výsledků z logistické regrese, ale v *LCM* je místo logistické regrese použita metoda vícevrstvých neuronových sítí *(MLP neural network)*. Protože vstupní množiny, použité v metodě *MLP,* jsou vždy tvořeny náhodnými pixely, mohou se také výsledné mapy potenciálu při několika spuštěních tohoto algoritmu mírně lišit. Bylo ale zjištěno, že tyto mírné změny nijak výrazně neovlivnily celkový výsledek.

Dále je třeba zmínit způsob, jak je v obou modelech určena kvantita změnových pixelů. *LCM* si tento ukazatel určí ze vstupních dat, ale program *Dyna-CLUE* vyžaduje, aby počet změnových pixelů zadal uživatel. Iterační proces pak probíhá tak dlouho, dokud Dyna-CLUE nedosáhne minimální povolené odchylky od vypočtených a uživatelem zadaných pixelů.

Tento výše popsaný rozdíl je také důvodem, proč ve výsledku *LCM* nasimuloval mnohem více komerční zástavby než program *Dyna-CLUE*. Bylo to právě na základě historických dat. Mezi lety 1994 a 2007 došlo k velkému rozšíření komerční zástavby, a protože výsledná pravděpodobnost dalšího rozšíření komerční zástavby v roce 2020 byla stejná, došlo i ve výsledné simulaci k jejímu velkému nárůstu. Zatímco u *Dyna-CLUE*, kde byl počet pixelů komerční zástavby v roce 2020 určen uživatelem, byla zvolena o něco střízlivější hodnota, která již nepočítá se stejně rychlým vývojem komerčních ploch i v dalších letech.

Popsané rozdíly obou modelů se ukázaly v průběhu zpracovávání této práce. Protože oba software nabízejí další možnosti modelování, které nebyly v práci využity, bude rozdílů jistě více.

7. Diskuse a závěry

Pomocí dvou různých softwarů *Land Change Modeler* a *Dyna-CLUE* byl simulován vývoj rezidenční a komerční zástavby. V obou softwarech byly vytvořeny predikční mapy, zachycující zájmové území v roce 2020. Výstupy z obou programů pak byly porovnány a zhodnoceny. Pro porovnání dvou software se jako možný postup nabízí namodelovat z historických dat stav současného land use a zhodnotit, který software vývoj predikoval věrohodněji. Pro tento experiment však nebyla k dispozici data (*LCM* predikuje na základě dat ze dvou časových horizontů, takže pro ověření koncového stavu bychom nutně potřebovali data ze třetího časového horizontu, ale ta nebyla k dispozici). Jak bylo uvedeno, cílem simulace nebylo hodnocení věrohodnosti predikce, ale především hodnocení splnění zadaných požadavků a srovnání možností obou modelovacích programů.

Dva ze tří požadavků zadaných uživatelem byly v případě obou modelů zcela splněny. Jednak byl respektován zákaz výstavby v předem definovaném území a dále byl splněn požadavek přeměny některých rozestavěných ploch na zemědělskou půdu. U třetího požadavku, jímž byl vznik nové zástavby v preferovaných místech, se u obou modelů vyskytly malé nedostatky. Ani jeden výstup zcela nesplnil požadavek preferenčního rozmístění komerční zástavby, což byla zároveň také kategorie, jejíž simulovaná rozloha se v obou výsledcích nejvíce lišila.

Z porovnání dále vyplývá, že u programu *Dyna-CLUE* lze ocenit jeho stabilitu. Výhodou je řízená simulace, kdy lze pomocí preferenčních map dosáhnout požadovaného vývoje i v odlehlých oblastech, kde by pouze na základě pravděpodobnosti k vývoji nedošlo. Preferenční mapy nabízí i *LCM*. Zde však malá změna v kategorii rezidenční zástavba mezi lety 1994–2007 určila i její velmi malý rozvoj do budoucna. Největším nedostatkem LCM je ale bezesporu jeho nestabilita. Během zpracovávání dat tento software častokrát informoval o chybách nesouvisejících se samotným modelováním (např. problémy s desetinnými čárkami a tečkami nebo údajný nedostatek místa v paměti PC). Tyto problémy se vyskytovaly zcela náhodně, třeba i vzápětí po úspěšné simulaci. S podobnými problémy se setkal i Malach (2009), který používal *LCM* při analýze a predikci změn ve využití půdy. Pokud ve své práci použil více než dva sub-modely, *LCM* se choval velmi nestabilně. U programu *Dyna-CLUE* tyto problémy nenastaly.

Na druhou stranu je ale důležité poznamenat, že samotné modelování v *LCM* je méně složité než modelování v *Dyna-CLUE*. Uživatelské prostředí je přizpůsobeno tak, aby byly jednotlivé kroky plněny ve správném pořadí, a modelování je tak více intuitivní. Prostředí *Dyna-CLUE* je sice velice jednoduché, ale uživatel se s ním setká v podstatě pouze při konečné predikci. Příprava dat pro *Dyna-CLUE* je velmi časově náročná a pro tvorbu vstupních dat i pro získání výsledků logistické regrese je nezbytně nutné využít jiný software. Pro modelování v *LCM* není jiný software potřeba.

Modelování v programu *Dyna-CLUE* lze považovat za více řízené uživatelem. A to především díky nutnosti zadání budoucí rozlohy jednotlivých kategorií krajinného pokryvu. I když se na výsledku simulace podílí více faktorů (pravděpodobnostní mapy, elasticita jednotlivých kategorií nebo preferenční mapy), určením těchto rozloh je možné predikci velmi ovlivnit. Program *LCM* se v tomto ohledu vyznačuje více nezávislým modelováním. Konečný počet pixelů v kategoriích krajinného pokryvu si určí sám na základě historických dat, totéž platí i pro pravděpodobnosti přechodu. Ovšem i tento software je možné ovlivnit například pomocí ruční editace matice.

Zde se ale nabízí otázka, do jaké míry pak software *Dyna-CLUE* pracuje sám a do jaké míry jen rozmístí přesně daný počet pixelů podle přání uživatele. Z výsledků je patrné, že i přes nastavení všech požadovaných parametrů nedošlo k přesné alokaci všech pixelů tak, jak bylo požadováno, a že naopak vznikly i oblasti nové zástavby mimo místa zadaná preferenčními mapami. Je tedy patrné, že program je schopný určit vývoj oblasti i bez preferenčních map, pouze na základě výsledků z logistické regrese. Uživatel ale v každém případě ovlivní míru změny území. Pozitivním dopadem tohoto kroku může být reálnější predikce vývoje území, založená na konkrétní situaci. V případě *LCM* by se dalo říci, že sice nabízí možnost nezávislejšího modelování, které

uživatel ovlivní pouze vstupními daty (pokud to nepotřebuje jinak). Zato je ale možné, že výsledky budou méně reálné.

Lze tedy shrnout, že v průběhu modelování bylo zjištěno několik faktorů, které zkomplikovaly nebo naopak usnadnily práci s oběma modely. Pozitivně lze hodnotit především intuitivní práci s *LCM* a jasné definování všech požadavků u *Dyna-CLUE*. Na druhé straně ale práci znepříjemnila velká nestabilita *LCM* a nutnost použití jiných softwarů při modelování v *Dyna-CLUE*. Možná vylepšení obou softwarů jsou tedy v odstranění těchto nedostatků. Také možnost alespoň hrubé vizualizace výsledků přímo v *Dyna-CLUE* by jistě zefektivnila celý proces modelování. Stejně tak vylepšení stability softwaru *LCM* tak, aby nebylo nutné poměrně často program restartovat. U *Dyna-CLUE* by bylo vhodné vzít v úvahu i historický vývoj území, tedy umožnit vložení alespoň dvou historických datových sad popisujících vývoj využití krajiny (land use) zájmového území.

V případě našeho modelování jsme jistě nevyužili všechny implementované funkce. K predikcím v *LCM* lze využít například také ekologické aspekty modelování (např. hodnocení vývoje a dopadů změn na biodiverzitu, modelování výskytu chráněných koridorů, stanovišť a jiných přirozených prostředí a predikce beroucí ohled na ekologickou stabilitu území). Co se týče modelování zástavby, bylo by vhodné ho rozšířit o modelování vývoje silniční sítě. Software *LCM* tuto možnost nabízí, i když zatím pouze v experimentální fázi. Dyna-CLUE ale nedisponuje vhodnými nástroji k tomuto účelu.

Pokud se týká hodnocení obou software v dostupných zdrojích, bylo zjištěno, že autoři hodnotí výsledky modelování prakticky pouze z hlediska změn, které se v jejich zájmovém území odehrály. A to v případě modelování v programu *Dyna-CLUE* (Verburg, Overmars 2009; Morávek 2011; Trisurat, Alkemade, Verburg 2010) i v případě modelování v programu *Land Change Modeler* (Manandhar, Odeh, Ancev 2006; Tewolde, Cabral 2011). Autoři se nezaměřují na hodnocení výsledků z hlediska použitých metod nebo vstupů. Není mnoho autorů, kteří by se zabývali hodnocením samotného softwaru. Jednou z mála takových studií byla již výše zmíněná práce Malacha (2009), který hodnotil program *LCM* i z hlediska uživatelského. Podrobnějšímu zhodnocení modelování v prostředí *LCM* se dále věnují Khoi a Murayama (2010), kteří se zabývali přeměnou lesních porostů v národním parku Tam Dao ve Vietnamu. Kromě klasického číselného vyjádření změn autoři hodnotí své výsledky i s přihlédnutím k použitým faktorům. Co se týče programu *Dyna-CLUE*, El Khoury (2012) použil model k predikci krajinného pokryvu v South Nation na jihovýchodě Kanady. Ve své práci použil několik scénářů vývoje, aby zhodnotil možnosti tohoto softwaru. I když autor pracoval s jinými daty týkajícími se jiného typu území, dospěl k podobným závěrům. Stejně jako bylo zjištěno v této práci, i jeho výsledky poukazují na schopnost modelu *Dyna-CLUE* respektovat zákaz dalšího rozvoje v určitém místě. V žádné z uvedených prací autoři použité modely neporovnávají mezi sebou ani s jinými modely, a neanalyzují tak jejich přednosti a nedostatky.

V dostupné literatuře, týkající se obou modelů, nebylo zjištěno, že by *Dyna-CLUE* nebo *LCM* byly v dřívějších studiích použity pro modelování území na katastrální úrovni. Oba nástroje byly dosud používány pro území rozsáhlejší, navíc spíše pro krajinu venkovskou než suburbánní. Z výsledků dosažených v této studii vyplývá, že *Dyna-CLUE* i *LCM* umožňují predikovat *land use*

v daném budoucím okamžiku v suburbánním území v detailní prostorové úrovni několika modelových katastrů.

Možné rozšíření této práce v budoucnu lze spatřovat například ve výše zmíněném zahrnutí modelování silniční sítě, která by predikci mohla dát ještě reálnější podobu. Dále by bylo vhodné zařadit i demografické aspekty studované oblasti, např. vývoj počtu obyvatel nebo migraci. Rozšíření tématu by bylo možné i zpracováním více scénářů vývoje, např. scénáře s podporou výstavby nebo naopak s omezením výstavby a rozvojem zemědělských ploch.

Literatura:

AGARWAL, C. a kol. (2001): A Review and Assessment of Land Use Change Models. Dynamics of Space, Time, and Human Choice. Indiana University and USDA Forest Service, Newton square, 61 s.

ALMEIDA, C. M. a kol. (2008): Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics. International Journal of Geographical Information Science, 22, č. 9, s. 943–963.

ASPINALL, R. J., HILL, M. J., eds. (2008): Land Use Change. Science, Policy and Management. Boca Raton, FL, USA, xxvii + 185 s.

BATTY, M. (2009): Urban Modeling. International Encyclopedia of Human Geography. Oxford: Elsevier, s. 51–58.

BIČÍK, I., JELEČEK, L. (2009): Land use and landscape changes in Czechia during the period of transformation 1990–2007. Geografie, 114, č. 4, s. 263–281.

BROWN, D. a kol. (2004): Modeling land use and land-cover chase, http://www-personal.umich.edu/~danbrown/papers/lcluc_book.pdf/> (15. 7. 2012).

CLARKE, K. C. HOPPEN, S., GAYDOS, L. (1997): A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. Environment and Planning B: Planning and Design, 24, s. 247–226.

EL KHOURY, A. (2012): Modeling Land-Use Changes in the South Nation Watershed using Dyna-CLUE. University of Ottawa, Ottawa, http://www.ruor.uottawa.ca/en/bitstream/handle/10393/22902/El%20Khoury_Antoun_2012_Thesis.pdf?sequence=1/ (18. 8. 2012).

ENGELEN, G. a kol. (1995): Using cellular automata for integrated modelling of socio-environmental systems. Environmental Monitoring and Assessment, 34, s. 203–214.

FAWCETT, T. (2006): An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, č. 27, s. 861–874.

GRILL, S., VOREL, J., MAIER, K., ČTYROKÝ, J., DRDA, F. (2008): Simulation and assessment model of urban development. In: *GIS Ostrava 2008*. Ostrava, http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/ GIS_Ova_2008/sbornik/Lists/Papers/042.pdf, s. 1–11.

HENRÍQUEZ, C. a kol. (2010): Mapping Urban Change to Plan the Future: Maputo City Change Model and the Municipal Structure Plan Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage, 3, s. 139–146.

HU, Z. Y., LO, C. P. (2007): Modeling urban growth in Atlanta using logistic regression. Computers. Environment and Urban Systems, 29, s. 291–298.

INDROVÁ, M. (2012): Srovnání možností software Dyna-CLUE a Land Change Modeler pro predikční modelování suburbánního rozvoje modelového území v zázemí Prahy. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Praha, 93 s.

JELEČEK, L., CHROMÝ, P., JANÁČ, J. (2010): LUCC in East Central and Southeast Europe post-communist countries from 1960s to the end of the 20th century and its historic-geographical roots. AUC–Geographica, 45, č. 2, s. 19–30.

KABRDA, J., JANČÁK, V. (2007): Vliv vybraných politických a institucionálních faktorů na české zemědělství a krajinu. Geografie, 112, č. 1, s. 48–60.

KHOI, D. D., MURAYAMA, Y. (2010): Forecasting Areas Vulnerable to Forest Conversion in the Tam Dao National Park Region, Vietnam. Remote Sensing, 2, č. 5, s. 1249–1272.

LAMBIN, E. F., GEIST, H. J., eds. (2006): Land-Use and Land-Cover Change. Local Processes nad Global Impacts. Springer, 222 s.
LAMBIN, E. F., ROUNSEVELL, M. D. A., GEIST, H. J. (2000): Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? Agriculture, Ecosystems & Environment, 82, č. 1–3, s. 321–331.
LI, X., YEH, A. G. O. (2002): Neural-network-based cellular automata for simultaning multiple land use change using GIS. International Journal of Geographical Information Science, 16, č. 4, s. 323–343.
LIU, M. a kol. (2009): Land use and land cover change analysis and prediction in the Upper Reaches of the Minjiang river, China. Environmental Management, 43, s. 899–907.
LÓPEZ, E. a kol. (2001): Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe: A case in Morelia city, Mexico. Landscape and Urban Planning. 55, č. 4, s. 271–285.
MALACH, Š. (2009): Zkušenosti s Land Change Modelerem (LCM) při analýze a predikci změn ve využití půdy. In: Misáková, L., Klimánek, M. (ed.): 10. seminář uživatelů IDRISI. 1., Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, s. 36–48.
MANANDHAR, R., ODEH, I., ANCEV, T. (2006): Modelling of spatio-temporal expansion of built-up and residential-commercial dwellings and their socioeconomic implication in the lower hunter of NSW, Australia. Proceedings of the Surveying & Spatial Sciences Institute Biennial International Conference Adelaide, Surveying & Spatial Sciences Institute, s. 101–108.
MORÁVEK, A. (2011): Analysis and modelling of landcover changes in a mountain area: the Barcelonnette basin, South French Alps . Strasbourg, Diplomová práce, Universite de Strasbourg, 110 s.
PIJANOWSKI, B. C. a kol. (2002): Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a Land transformation Model. Computers, Environment and Urban System, 26, č. 6, s. 553–575
POINTUS, R. G., MALANSON, J. (2005): Comparison of the structure and accuracy of two land change models. International Journal of Geographical Information Science, 19, č. 2, s. 243–265.
RAFIEE, R. a kol. (2009): Simulating urban growth in Mashad City, Iran through the SLEUTH model (UGM). Cities, č. 26, s. 19–26.
SILVA, E. A., CLARKE, K. C. (2002): Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. Computers, Environment and Urban systems, 26, s. 525–552.
STRAKOVÁ, J. (2009): Applicability of the EURURALIS Scenarios at the Fine Spatial Scales. Diplomová práce. JČU, České Budějovice, 81 s.
TEWOLDE, M. G. (2011): Urban Sprawl Analysis and Modeling in Asmara, Eritrea: Application of Geospatial Tools. Eritrea. Diplomová práce. Hamelmalo Agricultural College, 91 s.
TEWOLDE, M. G., CABRAL, P. (2011): Urban Sprawl Analysis and Modeling in Asmara, Eritrea. Remote Sensing, 3, č. 10, s. 2148–2165.
TRISURAT, Y., ALKEMADE, R., VERBURG, P. H. (2010): Projecting land use change and its consequences for biodiversity in Northern Thailand. Environmental Management, 45, s. 626–639.
VERBURG, P. H. a kol. (2004): Land use change modelling: current practice and research priorities. Geojournal, 61, č. 4, s. 309–324.
VERBURG, P. H., OVERMARS, K. P. (2009): Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. Landscape Ecology, 24, s. 1167–1181.
VERBURG, P. H. (2010): The CLUE model. Course material. VU Amsterdam. Institute for Environmental Studies, http://www.ivm.vu.nl/en/Images/Exercises_tcm53-284019.pdf, 53 s. (2. 2. 2015).
WENG, Q. (2002): Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. Journal of Environmental Management, č. 64, s. 273–284.
WHITE, R., ENGELEN, G. (1993): Cellular automata and fractal urban form: a cellularmodelling approach to the evolution of urban land-use patterns. Environment and Planning A, 25, č. 8, s. 1175–1199.

WOLFRAM, S. (1984): Cellular automata as models of complexity. Nature, 311, č. 5985, s. 419–424.
ZHANG, Q. a kol. (2011): Simulation and analysis of urban growth scenarios for the Greater Shanghai Area, China.Computers, Environment and Urban Systems, 35, s. 126–139.

Summary

LAND USE CHANGES IN PRAGUE SUBURBAN AREA ACCORDING TO DIFFERENT PREDICTION MODELLING APPROACHES

The main goal of the study was to compare the possibilities of two selected predictive modelling software tools, *Dyna-CLUE* a *Land Change Modeler (LCM)*, for land use modelling in suburban landscape. The future development was simulated for 5 cadastres in the Prague suburban area. Simulation was based on land use data time series from 1994 and 2007 classified from satellite imagery with very high spatial resolution (manual vectorization based on visual classification). Besides the land use data, *ZABAGED (The Fundamental Base of Geographic Data of the Czech Republic)*, land use plans of the municipalities, and data on soil quality/protection (estimated pedologic-ecological units) were used as well. Several input raster files were created to define conditions and factors influencing the modelling result. E.g. rasters determining restricted changes in the area of interest (for example, change of forests, water areas, and built-up areas to different land use categories were restricted) and also rasters for some significant factors (i.e. digital terrain model, slope, distance rasters).

The *Dyna-CLUE* and *Land Change Modeler* comparison was provided on the basis of three requirements. The first requirement was to respect a prohibition of housing development in places defined by the user, the second requirement was to propose housing development in places that were preferred by the user (based for example on land use plans of the municipalities) and finally the third requirement was to change some construction sites back to original agricultural land (the third requirement was based on the demand to preserve agricultural land).

The models were selected because of their accessibility (free access at least for some time period) and also because of the rather wide variety of tools and functions offered by these softwares. Both tools enable rather sophisticated modelling demonstrated by many previous studies mostly on a regional level or on a level of landscape units. The specific nature of our study consists in the use of the both models for modelling on a small scale covering just 5 cadastres (total area about 2,000 ha).

The area of interest is situated south-east of Prague and covers 4 cadastres of the former district Prague-East – Čestlice, Dobřejovice, Modletice a Jažlovice, and one cadastre of the former district Prague-West – Průhonice. The total area covers 19.347 km^2. All cadastres have undergone significant changes from the mid-1990s. Primarily due to their proximity to the capital and the D1 highway, these municipalities have become attractive for new constructions, residential and also commercial suburbanization have expanded on their territories. 160.5 ha of new commercial areas and 46 ha of new residential areas were recorded between 1994 and 2007 (see Fig. 4).

Land Change Modeler for Ecological Sustainability (LCM) is one of IDRISI modelling modules that uses several modelling approaches. Logistic regression or multi-layer perceptron (MLP) neural net can be used for modelling of pixels change, fuzzy logic is used for factors standardization (i.e. distance from roads), Markov chains are used for future development prediction.

Dynamic Conversion of Land Use and its Effects *(Dyna-CLUE)* was developed at the Wageningen University in the Netherlands. The model combines logistic regression and information from neighbouring cells like cellular automata models. Results are used to produce suitability maps for land use change allocation.

Though the input conditions, requirements, and restrictions for modelling in the both software tools in this study were the same, the modelling methods and approaches (as seen above) are different for each model. The results obtained were therefore somewhat different

(see Fig. 6). Differences were recorded especially in the case of commercial suburbanization. For both the northern and southern parts of the study area, *LCM* simulated more extensive commercial development than *Dyna-CLUE* (the difference is 60 ha). In the case of residential areas, the simulated areas were relatively comparable. The mentioned changes – the predicted increase of commercial and residential areas – influenced significantly predicted decrease of arable land (decrease of 14% in the case of *LCM* and 11% according to *Dyna-CLUE*). The category of construction sites was absent in both outputs because it was changed to either commercial areas or agricultural land. The requirement to change some construction sites back to original arable land was accepted by the both tools. Based on the results, we can conclude that both software tools are able to predict future land use on a detailed spatial scale of several cadastres within a suburban area based on defined requirements. The only requirement not fully accepted pertained to the placement of the development of commercial areas. These areas were also predicted in some non-preferred localities, especially in the case of *LCM*.

As for the comparison of the both modelling tools, it is evident that the results are influenced by different methods and algorithms used in the software. The first significant difference rests in the main data input requirements. While *LCM* requires data (historical land use rasters) from two time horizons (in our case from 1994 a 2007), *Dyna-CLUE* works with just one time horizon (2007).

The other significant difference consists in the construction of probability maps and maps of potential construction. While *Dyna-CLUE* produces these maps based on results of logistic regression, *LCM* uses the *MLP* neural net method.

The difference is also in the definition of change pixels quantity. *LCM* estimates this parameter based on the time series data but *Dyna-CLUE* requires user input of this parameter. The Iteration process runs until *Dyna-CLUE* reaches minimal allowed difference of the number of pixels defined by user.

This is a reason why *LCM* simulated more extensive commercial area than *Dyna-CLUE*. During the modelling process, several factors that complicated or facilitated work in the both software tools were identified. Positive findings include mainly the intuitive work in *LCM* and the clear definition of all requirements in *Dyna-CLUE*. On the other hand, the work was complicated by significant instability of *LCM* and by the necessity to use external software for some modelling steps in *Dyna-CLUE*. Also, a possibility to visualize the results in *Dyna-CLUE* environment would make the whole modelling process more effective.

Fig. 1 – Modelling process in *LCM*, steps 1, 2, 3, 4 and 5.

Fig. 2 – Non-spatial and spatial analysis. In figure: change driving forces, land use demand, allocation driving forces, land use allocation. Source: Verbung 2010.

Fig. 3 – Area of interest. In legend: cadastral borders, borders of the City of Prague, study area.

Fig. 4 – Land use in the study area in 1994 and 2007. In legend: residential development, commercial development, construction sites, roads, agricultural land, forests, water area.

Fig. 5 – Sub-models used in *LCM*. In figure: agricultural land, construction site, residential development, construction site, agricultural land, agricultural land, construction site, commercial development.

Fig. 6 – Result of modelling – land use prediction 2020. Left: *Dyna-CLUE*, Right: *LCM*. In legend: residential development commercial development, roads, agricultural land, forests, water area.

Pracoviště autorek: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra kartografie a geoinformatiky, Albertov 6, 128 43 Praha 2; e-mail: lucie.kupkova@gmail.com, magdalena.indrova@natur.cuni.cz.

Do redakce došlo 25. 3. 2014; do tisku bylo přijato 1. 7. 2015.

Citační vzor:
INDROVÁ, M., KUPKOVÁ, L. (2015): Změny využití krajiny v suburbánní zóně Prahy v různých přístupech predikčního modelování. Geografie, 120, č. 3, s. 422–443.