

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**INTEGRACE A PRAKTICKÉ VYUŽITÍ
PROSTOROVÝCH AGENTNĚ ZALOŽENÝCH
MODELŮ**

Diplomová práce

Bc. Tomáš TUHÁČEK

Vedoucí práce: RNDr. Jan BRUS, Ph.D.

Olomouc 2019

Geoinformatika

ANOTACE

Práce se zabývá prostorovými agentně založenými modely, s důrazem na jejich praktické využití a možnosti integrace prostorových dat. Teoretická část se věnuje jednotlivým složkám agentních modelů. Zmíněn je nejdříve agent a jeho vlastnosti. Prostorový agentně založený model se dále skládá z chování agentů definovaného pravidly a prostoru, ve kterém probíhá pohyb a interakce. Z hlediska integrace dat je důležitý prostor typu grid a geograficky definovaný prostor tvořený vektorovými daty. Práce se dále zaměřuje na strukturu, inicializaci, podporované formáty dat a způsob pohybu agentů v daném prostoru. Před implementací vlastního modelu bylo nutné získat přehled o možných vývojových nástrojích pro agentní systémy. Vyzkoušeny byly nástroje NetLogo, Repast, MASON, GAMA Platform, AnyLogic a MATSim. V práci je vždy vysvětlen nejdříve postup sestavení základního modelu, následuje popis způsobu nahrání prostorových dat a jejich použití pro pohyb a interakci s ohledem na vlastnosti prostoru v modelu. V nástroji AnyLogic byla provedena simulace kapacity autobusové dopravy. Po provedených úpravách byla ověřena možnost použití agentně založeného modelu pro řešení problémů přetíženosti spojů na příkladu návratu studentů v odpolední špičce. Hlavním výstupem práce je model pohybu včel v prostředí vytvořený v nástroji GAMA Platform. Primárním účelem modelu je ověřit vliv místních podmínek, například výškových poměrů, na pohyb včel při hledání zdrojů potravy a šíření moru včeliho plodu. Model byl použit ve dvou případových studiích s rozdílným charakterem modelovaného prostředí. Výsledek modelu prokázal, že výškové poměry mohou zamezit rozšíření nákazy z ohniska do úlů oddělených hřebenem vrchů. Výstupem modelu je, po úpravě v geografickém informačním systému, prozkoumaná oblast včetně intenzity návštěv uživatelem specifikovaných sektorů rozdělujících modelované území. V druhé případové studii se model choval dle očekávání. Území prozkoumané včelami odpovídalo výškovým poměrům a krajinnému pokryvu v dané lokalitě.

KLÍČOVÁ SLOVA

Agentně založený model; Prostorová data; Simulace; GIS; GAMA Platform

Počet stran práce: 84

Počet příloh: 2

ANOTATION

The thesis is focusing on spatial agent-based models, with special attention given to their practical use and possibilities of integration of spatial data. In theoretical part individual components of agent models are described. Presented is the term agent with its attributes. Spatial agent-based model also consists of behaviour of agents defined by rules and space, in which movement and interaction take place. Regarding data integration only Grid and geographically defined vector based types of space have the necessary capabilities. Next structure, initialization, supported data formats, and the way of movement of agents in the space are defined. Before the implementation of model could happen, an overview of toolkits for agent based modelling had to be created. Tested were the following toolkits: NetLogo, Repast, MASON, GAMA Platform, AnyLogic a MATSim. First process of implementation of basic model is presented followed by loading of spatial data into the model to specify the movement of agents based on the modelled environment. In the AnyLogic toolkit a simulation of bus transport capacity was performed. After necessary adjustments were made, the model was used to solve the problem of overcrowding of buses during afternoon rush hour. The main output of the thesis is the model of movement of bees in the environment. The primary goal of the model is to verify, whether local conditions e.g. altitude ratios influence the way bees explore the surroundings when looking for food sources and the spread of American foulbrood. The model was used in two case studies with different characteristics of modelled environment. The results stated that altitude ratios can prevent the spread of infection from the source to the hives divided by ridge of hills. Outputs of the model also include, after necessary adjustment are done in Geographic Information system, the explored area with intensity of bee visits of user defined sectors, which are distributed through the whole modelling environment. The behaviour of the model in the second case study was satisfactory. Area explored by bees corresponded with altitude ratios and land cover in the location.

KEYWORDS

Agent-based model; Spatial data; Simulation; GIS; GAMA Platform

Number of pages: 84

Number of appendixes: 2

Prohlašuji, že

- diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb.

- autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

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

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

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

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

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

V Olomouci dne

Bc. Tomáš Tuháček

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Janu Brusovi, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce. Dále děkuji konzultantům Mgr. Jiřímu Danihlíkovi, Ph.D. a Ing. Jiřímu Luhanovi za odbornou pomoc s vypracováním a ověřením výsledků modelu pohybu včel v prostředí. Za poskytnutá data a přípravu úloh pro simulaci kapacity autobusové dopravy děkuji Koordinátorovi Integrovaného dopravního systému Olomouckého kraje, konkrétně Mgr. Barboře Langrové.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš TUHÁČEK**

Osobní číslo: **R170119**

Studijní program: **N1301 Geografie**

Studijní obor: **Geoinformatika**

Název tématu: **Integrace a praktické využití prostorových agentně založených modelů**

Zadávací katedra: **Katedra geoinformatiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je otestovat možné způsoby integrace a práce s prostorovými agentně založenými modely s důrazem na práci s prostorovou složkou dat. V praktické části student provede návrh, implementaci a ověření vhodnosti použití agentně založeného modelu na příkladu pohybu agentů prostředím. Na praktických úlohách ověří možnosti aplikovatelnosti s využitím dat dostupných v České republice. Výstupy práce budou především vytvořený model, analýza vývojových nástrojů pro agentní systémy a rozbor problematiky, kterou se agentní modelování zabývá s ohledem na práci s prostorem.

Student vyplní údaje o všech datových sadách, které vytvořil nebo získal v rámci práce, do Metainformačního systému katedry geoinformatiky a současně vytvoří zálohu údajů ve formě validovaného XML souboru. Celá práce (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, XML soubor) se odevzdá v digitální podobě na CD (DVD) a text práce s vybranými přílohami bude odevzdán ve dvou svázaných výtiscích na sekretariát katedry. O diplomové práci student vytvoří webovou stránku v souladu s pravidly dostupnými na stránkách katedry. Práce bude zpracována podle zásad dle Voženílek (2002) a závazné šablony pro diplomové práce na KGI. Povinnou přílohou práce bude poster formátu A2.

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah pracovní zprávy: max. 50 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- FILATOVA, T., P. H. VERBURG, D. C. PARKER AND C. A. STANNARD
Spatial agent-based models for socio-ecological systems: challenges and prospects. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 45, 1-7.
- HEPPENSTALL, A., N. MALLESON AND A. CROOKS "Space, the Final Frontier": How Good are Agent-Based Models at Simulating Individuals and Space in Cities? *Systems*, 2016, 4(1), 9.
- MACAL, C. AND M. NORTH. Introductory tutorial: Agent-based modeling and simulation. In *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. IEEE Press, 2014, p. 6-20.
- SUN, Z., I. LORSCHIED, J. D. MILLINGTON, S. LAUF, et al. Simple or complicated agent-based models? A complicated issue. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 86, 56-67.
- WILENSKY, U. AND W. RAND An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo. Edition ed.: MIT Press, 2015. ISBN 0262731894.
- VOŽENÍLEK, V. Diplomové práce z geoinformatiky. Edition ed. Olomouc: Vydavatelství Univerzity Palackého, 2002.

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Jan Brus, Ph.D.
Katedra geoinformatiky

Datum zadání diplomové práce: 16. června 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 5. května 2019

doc. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan

L.S.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA GEONFORMATIKY
17. listopadu 50, 771 46 Olomouc
-1-

prof. RNDr. Vít Voženílek, CSc.
vedoucí katedry

V Olomouci dne 2. února 2018

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 CÍLE PRÁCE	11
2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ	12
2.1 Použité metody.....	12
2.2 Použitá data	12
2.3 Použité programy	13
2.4 Postup zpracování	13
3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	15
3.1 Spojení agentně založených modelů s GIS a příklady využití v praxi.....	17
3.1.1 Zahraniční vědecké články a studie	18
3.1.2 České vědecké články a studie.....	20
3.2 Modelování pohybu opylovatelů a šíření nemoci.....	22
3.3 Prostorové agentně založené modely	26
3.3.1 Agent	26
3.3.2 Prostředí	27
3.3.3 Chování a pravidla	28
3.3.4 Evaluace modelu	32
3.3.5 Overview, Design concepts, and Details (ODD) protokol.....	33
3.4 práce s prostorem v agentně založených modelech.....	35
3.4.1 Grid (diskrétní prostor).....	35
3.4.2 Spojitý prostor a síťový model.....	37
3.4.3 Geografický informační systém (GIS)	39
4 PRAKTICKÉ POUŽITÍ VÝVOJOVÝCH NÁSTROJŮ	42
4.1 NetLogo.....	43
4.2 Repast.....	45
4.3 MASON	48
4.4 GAMA Platform	50
4.5 AnyLogic	54
4.6 MATSim	56
5 SIMULACE KAPACITY AUTOBUSOVÉ DOPRAVY	58
5.1 Úpravy modelu dle konkrétní aplikace.....	58
5.2 Návrat studentů v odpolední špičce	59
6 MODEL POHYBU VČEL V PROSTŘEDÍ.....	62
6.1 Motivace pro vznik modelu	62
6.2 Implementace modelu	62
6.2.1 Vstupní data prostředí	63
6.2.2 Úvodní část global a sekce init.....	66
6.2.3 Agenty, jejich chování a interakce.....	67
6.2.4 Průběh a hodnocení simulace.....	69

6.2.5	Ukládání a vizualizace výsledků modelu pomocí GIS	70
6.2.6	Verifikace, Validace a ODD protokol	71
6.3	Případová studie – Katastrální území Zubří v okrese Vsetín	72
6.3.1	Výsledky pohybu včel dle výškopisných dat	73
6.3.2	Výsledky pohybu včel dle krajinného pokryvu.....	74
6.3.3	Výsledky pohybu včel dle kombinovaného odporu prostředí.....	75
6.4	Případová studie – Mikroregion Březnicko v okrese Příbram.....	76
6.4.1	Výsledky pohybu včel dle výškopisných dat	77
6.4.2	Výsledky pohybu včel dle krajinného pokryvu.....	78
6.4.3	Výsledky pohybu včel dle kombinovaného odporu prostředí.....	79
7	VÝSTUPY A CELKOVÉ VÝSLEDKY.....	80
8	DISKUZE	82
9	ZÁVĚR.....	84
POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE		
PŘÍLOHY		

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
ABM	agent-based model (agentně založený model)
AFB+	American foulbrood positive
AI	umělá inteligence
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BDI	Beliefs, desires, and intentions
CA	Celulární automaty
COLOSS	Prevention of honey bee COlony LOSSes
CSV	Comma-separated values
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
ESRI	Environmental System Research Institute
GAML	GAMA Modeling Language
GIS	geografický informační systém
GIT	geoinformační technologie
k.ú.	katastrální území
LPIS	land parcel identification system
MVP	mor včelího plodu
ODD	Overview, Design concepts, and Details protocol
OSM	Open Street Map
PBF	Protocolbuffer Binary Format
PLE	Personal Learning Edition
PNG	Portable Network Graphics
SEIR	Susceptible-Exposed-Infected-Recovered
SHP	Shapefile

ÚVOD

Modelování je přístupem umožňujícím vyzkoušet různé scénáře při výrazné úspoře času a nákladů. Značná část modelovaných situací se odehrává v prostorovém kontextu a důležitou roli mají lokální vlastnosti prostředí. V současné době lze také pozorovat nárůst používání metod umělé inteligence (AI) k řešení problémů napříč obory. Příkladem aplikace AI v běžném životě jsou například inteligentní regulátory topení či různé autonomní přístroje od vysavačů až po vozidla. Společným znakem je užití senzorů k zjištění stavu okolí a následné provedení odpovídající akce, například úprava rychlosti, snížení výkonu či volba směru. Spojením uvedených principů jsou prostorové agentní modely, umožňující pomocí jednoduchých pravidel simulovat chování, pohyb, komunikaci a interakci autonomních entit s ohledem na prostor, ve kterém se nacházejí. Přičemž prostředí v agentním modelu může být vytvořeno za pomoci prostorových dat poskytujících odpovídající kontext.

Vývojových nástrojů pro agentní systémy je celá řada. Liší se podporovanou funkcionalitou a náročností na implementaci modelů. Přehled poskytující základní informace o možnostech práce s prostorem v těchto nástrojích, především s ohledem na využití dat dostupných v České republice, dosud chyběl. Cílem práce tedy je na vybraných nástrojích otestovat možnosti praktického využití prostorových agentně založených modelů pro řešení situací a popis jevů na území České republiky.

Mor včelího plodu je celosvětově rozšířeným problémem. K šíření dochází mimo jiné při loupení v ohniskách z důvodu nedostatku zdrojů potravy. Rolí výškových poměrů, tedy zda mohou vytvářet bariéry při průzkumu okolí daného úlu a zamezit tak přenosu nákazy, se zabývá vytvořený model pohybu včel v prostředí. Agenty v modelu určují směr dalšího pohybu dle hodnot odporu prostoru vytvořeného pomocí digitálního modelu reliéfu a dat o krajinném pokryvu. Kromě šíření moru včelího plodu lze model použít i pro popis, jakým včely prozkoumávají prostředí při hledání potravy, včetně pravděpodobnosti, že na daný zdroj narazí.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce je otestovat možné způsoby integrace a práce s prostorovými agentně založenými modely s důrazem na práci s prostorovou složkou dat. V praktické části bude proveden návrh, implementace a ověření vhodnosti použití agentně založeného modelu na příkladu pohybu agentů prostředím. Na praktických úlohách budou ověřeny možnosti aplikovatelnosti s využitím dat dostupných v České republice. Výstupy práce budou především vytvořený model, analýza vývojových nástrojů pro agentní systémy a rozbor problematiky, kterou se agentní modelování zabývá s ohledem na práci s prostorem.

Výstupy práce poskytují základní přehled o problematice agentně založeného modelování s využitím prostorových dat, které lze uplatnit pro řešení řady praktických úloh. Vytvořený model pohybu včel v prostředí lze využít k popisu způsobu prozkoumávání okolí úlu včelami při hledání potravy nebo k ověření rizik přenosu moru včelího plodu v dané lokalitě.

2 METODY A POSTUPY ZPRACOVÁNÍ

Diplomová práce se zabývá prostorovými agentně založenými modely (ABM), jejich integrací a praktickým využitím. Důležitou roli v této problematice mají prostorová data. Způsob, jakým jsou integrována, je do značné míry ovlivněn implementací modelu v jednotlivých aplikacích pro agentní modelování. V následujících podkapitolách jsou shrnuty použité metody, datové sady a programy a popsán je postup práce.

2.1 Použité metody

Jednalo se především o metody související s implementací agentně založeného modelu. Pomocí příslušného kódu byl nejdříve vytvořen prostor. Případně byla nahrána související data, pomocí kterých lze prostředí v prostorových ABM vytvořit. Vstupní data byla upravena v geografickém informačním systému (GIS). Dále byly zavedeny agenty včetně podmínek a pravidel jejich pohyb a chování. Nakonec bylo do modelů přidáno ovládání parametrů a vizualizace průběhu simulace. Implementace zmíněných metod se lišila dle daného nástroje a použitého jazyka. Výpočty probíhaly a byly zobrazeny v simulační perspektivě příslušné aplikace. Pro vizualizaci výsledků vytvořeného modelu byl použit GIS.

2.2 Použitá data

Součástí instalačních balíčků agentních nástrojů zmíněných v textu práce byly ukázkové modely a k nim potřebná data. Zahrnovaly například vektorové vrstvy silniční sítě a budov (GAMA Platform, MATSim, Repast Symphony a AnyLogic). Pro seznámení se s funkcionalitou byly využity i modely od uživatelů ABM aplikací. Data společně s modelem Repast City vytvořeným Nickem Mallesonem lze stáhnout včetně návodu na GitHub (<https://github.com/nickmalleson/repastcity>). V případě softwaru AnyLogic je komunikační síť stažena z OSM (Open Street Map) serveru dle modelované oblasti.

Z dat dostupných v České republice byly použity následující datové sady. Plochy s rozdílným způsobem využití poskytnuté Magistrátem města Olomouce, vstupovaly do modelu na obrázku 4.3. Podrobná síť pozemních komunikací StreetNet ve formátu shapefile od společnosti CEDA (<http://www.ceda.cz/cs/produkty/vektorove-mapy/streetnet/>) a geodatabáze stavebních objektů od Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK) pro území města Olomouce, byly použity pro vytvoření modelu (obr. 4.12). Autorem práce byla vytvořena rastrová data a body zájmu pro příklady využití ABM v kapitole 4. Pro simulaci kapacity autobusové dopravy byla využita data od Koordinátora Integrovaného dopravního systému Olomouckého kraje v podobě souřadnic označníků zastávek ve formátu xls.

Pro model pohybu včel v prostředí a šíření moru včelího plodu (MVP) bylo nejdříve nutné najít parcely s včelnicemi. Po konzultaci s doktorem Jiřím Danihlíkem byla lokalizována ohniska. Za pomoci exportu dat na stránkách veřejného registru půdy LPIS (<http://eagri.cz/public/app/lpisext/lpis/verejny2/plpis/>) byla získána čísla parcel se stanovišti včelstev, která byla následně propojena s geodatabází od ČÚZK pro katastrální území (k.ú.) Zubří, Veřovice a Vidče. Výšková data pro model byla získána použitím digitálního modelu reliéfu České republiky 5. Generace. Databáze krajinného pokryvu CORINE Land Cover 2012 pro území České republiky (součást služeb projektu

Copernicus pro monitorování území) od společnosti CENIA, byla využita pro určení kvality prostředí z hlediska hledání potravy včelami. Data jsou dostupná zdarma pod základní INSPIRE licenci pro registrované uživatele na geoportálu (<https://geoportal.gov.cz/web/guest/eshop/gallery>). Vrstva obsahuje klasifikaci pokryvu zemského povrchu. Velikost nejmenší mapovací jednotky je 25 ha. Pro kategorie vodních toků a silniční sítě a zobrazení katastrálních území bylo využito digitální vektorové geografické databáze České republiky ArcČR® 500. Datová sada je distribuována zdarma společností ARCDATA PRAHA, s.r.o. Současná verze 3.3 je k dispozici na stránkách (<https://www.arcdata.cz/produkty/geograficka-data/arccr-500>).

2.3 Použité programy

Příprava dat a vizualizace výsledků modelů probíhala v aplikaci ArcMap verze 10.2 a 10.4 od společnosti esri (Environmental System Research Institute). Microsoft Office Excel byl použit pro vytvoření vstupních dat ve formátu xls pro nástroj AnyLogic.

Jedním z cílů práce je analýza vývojových nástrojů pro agentní systémy. Jednotlivé aplikace jsou podrobně popsány v kapitole 4 diplomové práce. V tabulce 1. jsou shrnuty základní informace o použitých verzích, obsažen je i odkaz na příslušné webové stránky, na kterých lze mimo jiné nalézt dokumentaci potřebnou pro implementaci modelů. Většina uvedených nástrojů je k dispozici zdarma. AnyLogic je bezplatně dostupný po časově neomezenou dobu pouze ve verzi Personal Learning Edition (PLE). Použití zobrazovacího software Via, je licenci limitováno na šest měsíců.

Tabulka 1. Seznam použitých nástrojů pro agentní modelování

Název nástroje	Použité verze	Webové stránky
NetLogo	5.3.1, 6.0.2	https://ccl.northwestern.edu/netlogo/
Repast a Eclipse	2.5, 2.8	https://repast.github.io/ , https://www.eclipse.org/
MASON	19	https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/
GeoMASON	1.5	https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/extensions/geomason/
GAMA Platform	1.6, 1.7, 1.8 RC2	https://gama-platform.github.io/
AnyLogic	8 PLE	https://www.anylogic.com/
MATSim a Via	0.9.0 a 1.8.1	https://www.matsim.org/ , https://www.simunto.com/via/

2.4 Postup zpracování

Nejprve byla provedena rešerše literatury s ohledem na prostorové agentní modely. Hlavním obsahem byl popis jednotlivých složek agentních modelů, zmíněny ale byly i příklady využití, včetně použitých nástrojů. Jednotlivé softwary byly staženy a nainstalovány. Pro seznámení se s principem agentního modelování bylo za použití návodů sestaveno v každé aplikaci několik modelů se zahrnutím datových sad dostupných v České republice. Dle získaných poznatků byl sepsán rozbor problematiky práce s prostorem v agentně založených modelech. Na základě podporované funkcionality (například možnosti importu dat) a náročnosti na implementaci byl vybrán nástroj AnyLogic a model vytvořený Davidem Sprogisem pro simulaci kapacity

autobusové dopravy na území České republiky. Nástroj GAMA Platform byl poté využit pro sestavení vlastního modelu. Po konzultaci s odborníky z oboru včelařství byly vytyčeny základní požadavky na funkcionalitu. Jednalo se o mimo jiné využití výškopisných dat pro ověření hypotézy, zda hřeben Veřovických vrchů může sloužit jako zábrana pro šíření včeliho moru. Diskutována byla aktuální situace výskytu včeliho moru v lokalitě s ohledem na potencionální zdroje nákazy pro modelovanou včelnicu a také základní parametry pro pohyb a chování včel při hledání potravy. Pro ověření vlivu krajinného pokryvu na zmíněnou problematiku byl vytvořen druhý povrch využitím volně dostupné sady CORINE Land Cover 2012. Pro zjištění celkového odporu prostředí byl implementován povrch vzniklý kombinací zdrojů zmíněných v podkapitole 2.2. S ohledem na výpočetní možnosti softwaru byla všechna vstupní rastrová data o velikosti 200 x 200 buněk převzorkována na rozlišení 70 metrů. Stejně parametry byly použity i pro vektorovou mřížku v aplikaci ArcMap. Funkcionalita byla do modelu přidávána postupně a každá fáze byla otestována za účelem zjištění výskytu případných chyb, a zda dochází k postupnému naplňování vytyčeného cíle. Po skončení vývoje bylo spuštěno 25 iterací každé varianty modelu a výstupy byly nahrány do aplikace ArcMap, kde byla provedena jejich vizualizace a interpretace. Celý postup byl zopakován ještě pro druhou lokalitu s odlišnými výškovými a krajinnými poměry.

3 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

V souvislosti s rostoucím výkonem výpočetní techniky a požadavkem na popis složitějších systémů skládajících se z velkého počtu jednotek došlo v 70. letech 20. století k vývoji v oboru modelování a simulace. Jednoduché modely opírající se především o matematické principy neumožňovaly popsat složité vazby a procesy probíhající uvnitř komplexních systémů. Hlavním důvodem byla potřeba prvotní agregace daného jevu do homogenních jednotek. Řešením podporujícím modelování odspodu byly nejdříve celulární automaty (CA), využívající buněk a jednoduchých pravidel pro simulaci dynamiky jevu. Příkladem CA je například Game of Life od Johna Conwaye z roku 1970. Nedostatkem byla stále značná homogenita chování u tohoto přístupu. Především absence autonomie a možnosti pohybu u celulárních automatů vedla ke vzniku agentně založených modelů **Heppenstall a Crooks (2016)**.

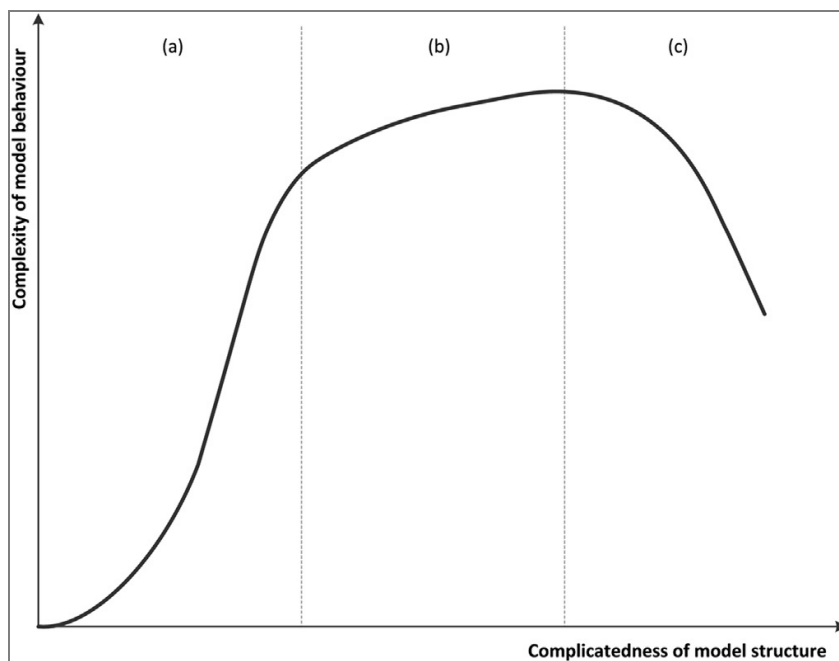
Hlavní přednosti těchto modelů jsou dle **Filatova a kol. (2013)** následující. Jedná se především o schopnost reprezentovat (lidské) chování s důrazem na interakci mezi heterogenními agenty přičemž vše může probíhat v různorodém prostředí. Na příkladech z 12 studií autoři také zmiňují problémy, které se u ABM vyskytují a jejich možné řešení. Komplexnost modelovaných systémů klade velké nároky na implementaci chování agentů a jejich interakci s prostředím. Řešením je například využít teoretických poznatků ze sociálních věd a psychologie nebo provést empirické pozorování. Dalším problémem je citlivost modelů na změny parametrů a přítomnost stochastických prvků. Provedením kalibrace, verifikace a validace, lze některým problémům předejít.

Bonabeau (2002) uvádí, že hlavní výhoda agentně založených modelů, oproti jiným technikám, je jejich schopnost zachytit emergentní chování. Autor na příkladech studií zmiňuje oblasti, ve kterých lze emergence využít. ABM poskytují mnohem přirozenější popis systému, než jakého může být dosaženo použitím matematických rovnic. Důležitým faktorem pro využití agentně založených modelů je flexibilita. Lze poměrně jednoduše přidávat a ubírat agenty ze simulace a měnit parametry chování a interakce. ABM také umožňují implementovat rámce a architektury podporující schopnost agentů učit a vyvíjet se.

Důvody, kdy je vhodnější použít agentně založené modely oproti jiným metodám, lze dle **Bonabeau (2002)**, **Macal a North (2007)** shrnout do následujících bodů:

- přítomnost nelineárního chování vyjádřitelného pomocí pravidel,
- nelze-li použít průměrů a agregace z důvodu heterogenity systému,
- když mají agenty schopnosti paměti, vývoje a učení se,
- jsou-li přítomny stochastické prvky,
- když je požadováno sociologické chování (utváření vztahů, organizace),
- je-li přítomný prostorový kontext ovlivňující chování a interakci,
- když je vyžadováno modelování odspodu a změny jsou výsledkem procesů probíhajících uvnitř modelu.

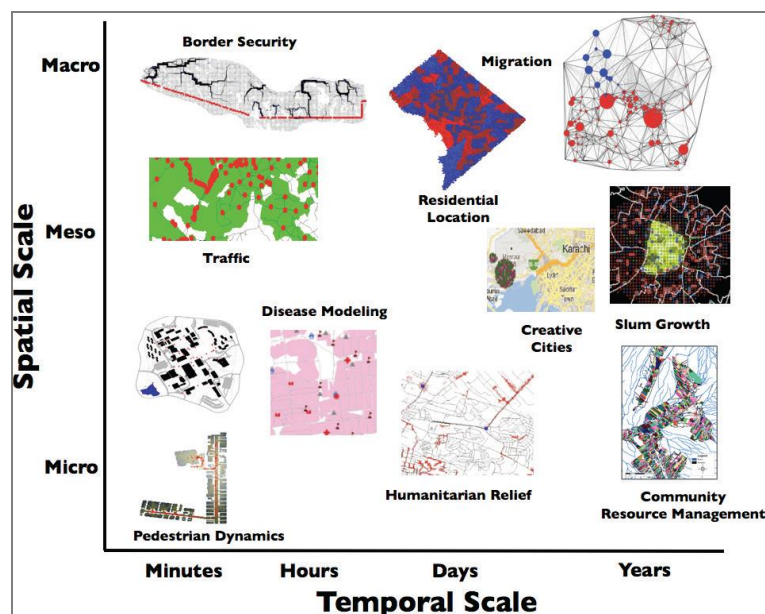
Vzhledem ke komplexnosti modelovaných systému vyvstává otázka, jak moc komplikovaný může být model, aby nebyl složitější než samotný systém. V souvislosti s touto tematikou autoři zmiňují akronym KISS (Keep it simple, stupid), poprvé použit v kontextu s agentním modelováním **Axelrodem (1997)**. Tento akronym znamená, že model by měl být co nejjednodušší, protože jednoduché systémy fungují lépe než ty složité. Autor by se při tvorbě modelu měl, je-li to možné, vyhnout zbytečné komplikovanosti. Dle **O'Sullivan a kol. (2015)** by model měl být „tak jednoduchý jak je to jen možné, ale ne jednodušší“. Přístup k modelování ABM dle předchozích doporučení lze shrnout českým „V jednoduchosti je síla“. Komplexitě a komplikovanosti agentně založených modelů se podrobně věnovali **Sun a kol. (2016)**. Autoři v první řadě upozorňují na rozdíl ve významu výše zmíněných termínů. Komplexitou modelu je myšleno nepředpověditelné nelineární chování a vzájemné lokální interakce velkého množství komponent. Zatímco komplikovanost modelu se zabývá jeho strukturou s ohledem na počty proměnných, typů agentů a jejich atributů a zahrnutých procesů. Příčinou komplikovanosti ABM je často přílišná detailnost a množství pravidel pro chování a interakci. Komplexita vychází z chování modelu při simulaci. Komplikovanost je zavedena autorem při tvorbě modelu a je ovlivněna účelem, zkušenostmi autora, vývojový prostředím, dostupností dat a cílovou skupinou. Důležitý je vztah mezi komplikovaností a komplexností modelu (obr. 3.1). Komplexita nejdříve roste exponenciálně (a), od určité složitosti dochází k zmírnění růstu (b), až nakonec může nastat i pokles (c).



Obr. 3.1 Vztah komplexnosti a komplikovanosti modelu (zdroj: Sun a kol. 2016).

Důležitým faktorem ovlivňujícím podobu modelu je časové a prostorové měřítko **Heppenstall a Crooks (2016)**. Většina komplexních systémů obsahuje jistou hierarchii. Příkladem mohou být města skládající se z městských částí a čtvrtí, které jsou tvořeny menšími celky a v poslední řadě samotnými ulicemi. Hierarchii systémů odpovídají

prostorová měřítko od mikro po makro a časová od minut po roky (obr. 3.2). Zatímco například pohyb nevidomých osob po ulici probíhá v řádu sekund až minut, výstavba obchodního centra se může projevit v návycích a chování obyvatel města v řádu týdnů až měsíců.



Obr. 3.2 Prostorová a časová měřítko (zdroj: Crooks 2015).

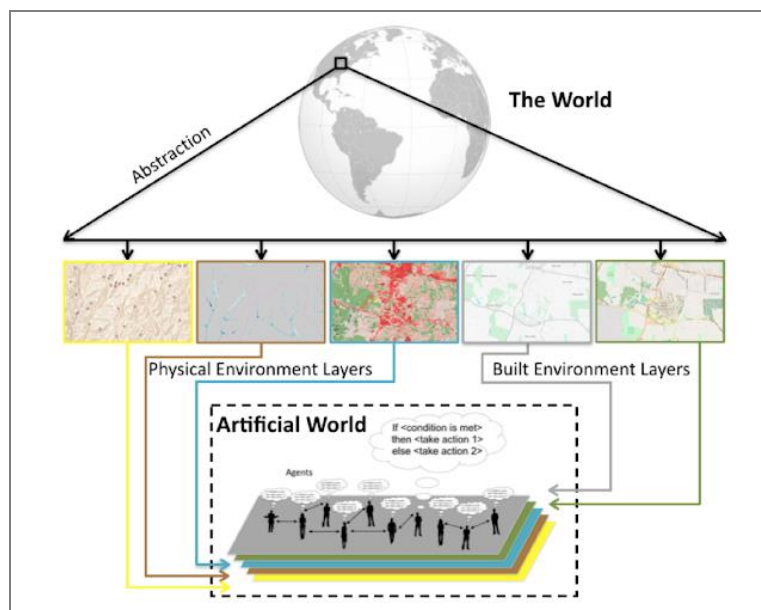
V české literatuře se problematice agentně založených modelů věnoval například **Šalamon (2011)**. Publikace obsahuje úvod do multiagentních systémů a podrobně se věnuje jednotlivým složkám ABM. Zmíněny jsou metodologie a vývojová prostředí.

Tvorbou aplikačního software na bázi multiagentních systému se zabýval **Kubík (2004)**. V kontextu softwarového inženýrství a informatiky autor odpovídá na otázky architektury, adaptability na změny a vzpamatování se z chyb.

3.1 Spojení agentně založených modelů s GIS a příklady využití v praxi

Většina jevů se je ovlivněna prostředím. Spojením geografických informačních systémů (GIS) a agentně založených modelů (ABM) je možné modelovat s ohledem na prostorovou informaci (obr. 3.3) Agenty pohybující se v „reálném“ prostředí jsou přirozenější a získané výsledky lze snáze využít například v územním plánování, pro organizaci hromadné dopravy nebo v řízení přírodních zdrojů. V současnosti neexistuje plnohodnotný software obsahující funkcionalitu GIS a ABM současně. Řešením je jejich propojení. Geografický informační systém slouží pro sběr, správu, analýzu a vizualizaci prostorových dat. Získané rastrové a vektorové vrstvy jsou v agentně založených modelech využity k vytvoření reálného prostředí pro interakci a pohyb agentů **Gimblett (2002)**. Problematice agentně založených modelů s ohledem na integraci s GIS se podrobně věnoval **Crooks (2018)**. V České republice se metodami umělé inteligence v geoinformatice zabývali **Voženílek a Dvorský (2011)**. Publikace mimo jiných přináší poznatky z oblasti multiagentních systémů s ohledem na možnosti práce s prostorovou informací. Propojení ABM a GIS se zaměřením na využití k modelování prostorových procesů se věnoval **Rapant (2007)**. Autor popisuje mimo jiné základní složky multiagentních systémů včetně možných reprezentací prostoru. Součástí publikace je

i porovnání reprezentace inteligentní dopravní infrastruktury v ABM a GIS. V následujících podkapitolách jsou uvedeny některé studie a vědecké články využívající výše uvedených principů s důrazem na pohyb agentů v prostoru.



Obr. 3.3 Spojení GIS a ABM (zdroj: Heppenstall a Crooks 2017).

3.1.1 Zahraníční vědecké články a studie

Pohybem chodců v prostředí (budovy, ulice) se zabývali například **Gimblett (2002)**, **Torrens (2012)** a **Turner (2016)**. Zahrnutím principů vnímání prostoru, paměti, učení a plánování cesty bylo nalezeno chování, které je přirozené a podobné reálnému systému. Agentně založený model vzorů pohybu a sociální interakce návštěvníků raftových výletů v národním parku Grand Canyon je zmíněn **Gimblett (2002)**. Prostředí modelu se mimo jiné skládá z kempů, zakázaných míst, přestupních bodů a atrakcí. Výstupem modelu je mimo jiné distribuce návštěvníků v oblasti.

Vlivu rychlých pruhů pro autobusy na výběr dopravního prostředku se věnoval **McDonnel (2011)**. I když se nejedná o prostorový model, zjištěné poznatky mohou posloužit v dalším výzkumu v oblasti hromadné dopravy. Kapacitě veřejné dopravy a reakci na nečekané události se zabýval **Cats (2015)**. Agentně založený model BusMezzo je tvořený linkami hromadné dopravy města Stockholm a chováním pasažérů. Na příkladu změn vytíženosti linek při mimořádné události (obr 3.4) autor demonstruje potřebu přítomnosti rezervní kapacity v systému dopravy.



Obr. 3.4 Změny vytíženosti linek dopravy (zdroj: Cats 2015).

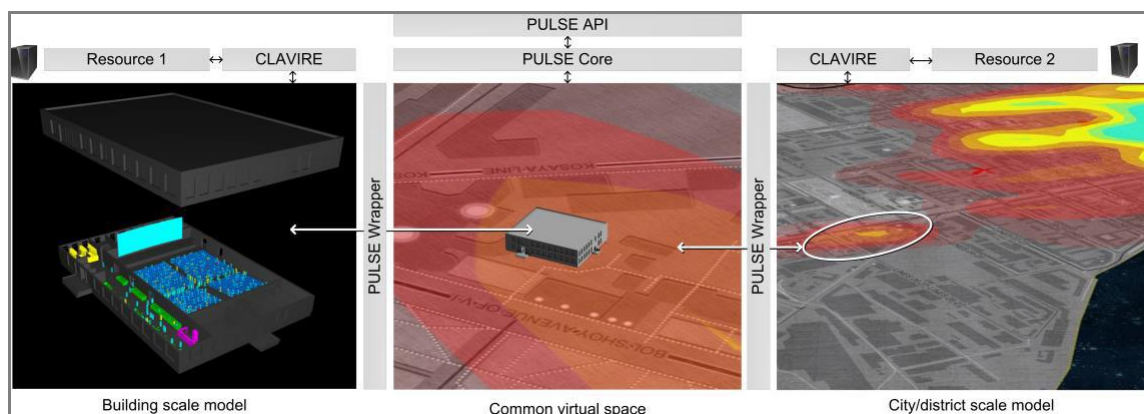
Agentně založený model pro studium výskytu kriminality ve městě vytvořili **Malleson, Heppenstall a Crooks (2018)**. Model vychází ze základních kriminalistických teorií. Aby se zločin stal, musí být splněna některá z následujících podmínek. K přepadení často dochází při setkání útočníka a oběti za absence doprovázející osoby. Výběr místa je ovlivněn rutinními aktivitami oběti. Je-li přidán prostorový kontext je ABM díky možnosti modelovat chování jednotlivých osob nejlepším řešením.

Případová studie **Karbovskii a kol (2015)** se zabývá implementací více měřítkového agentně založeného modelu evakuace objektu ve městě. Model objektu se skládá z plánu budovy, tvořeného několika patry, cestami pro agenty, zájmovými body. Dále obsahuje agenty jejich atributy a pravidla pro chování a interakci. Model města mimo jiné zahrnuje infrastrukturu, tvořenou budovami, silniční sítí a body zájmu. Agenty v modelu města mají dle svých rolí přiřazeny aktivity, které vykonávají (obr. 3.5).



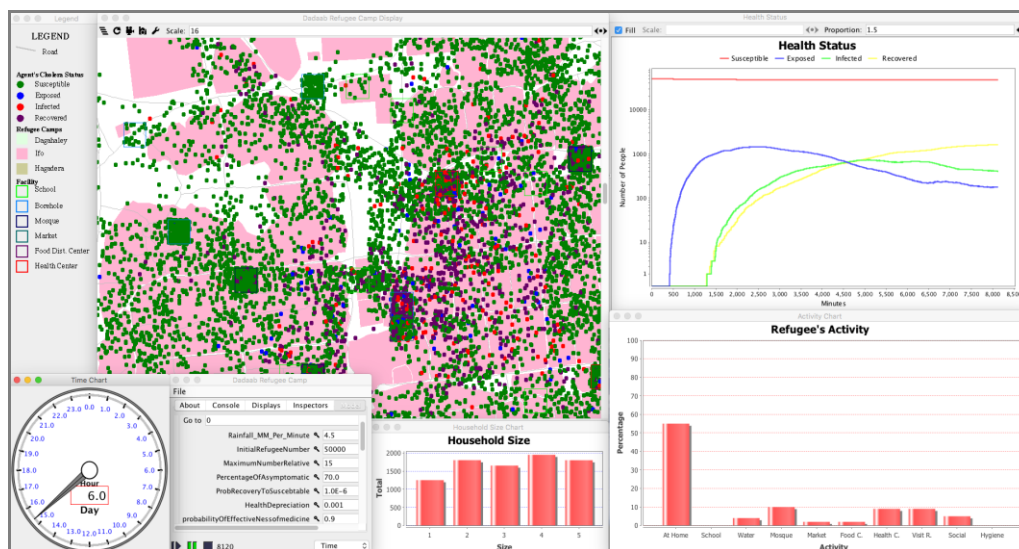
Obr. 3.5 Model města (zdroj: Karbovskii a kol 2015).

Na počátku simulace se agenty věnují svým aktivitám. V určitý čas se část z nich vydá do kina. Agenty jsou přesunuty do budovy a usadí se na svá místa a sledují film. Po vydání povelu pro evakuaci, se agenty vydají nejkratší cestou k východu a jsou opět přesunuti do modelu města (obr. 3.6).



Obr. 3.6 Průběh simulace více měřítkového modelu (zdroj: Karbovskii a kol 2015).

Model šíření cholery na příkladu uprchlického tábora kombinující Susceptible-Exposed-Infected-Recovered (SEIR) a agentně založené modely je popsán v **Crooks a Hailegiorgis (2014)**. Model SEIR se skládá mimo jiné ze zdravých a infikovaných osob a je používán v epidemiologii pro modelování vývoje počtu nemocných v populaci. V průběhu simulace se agenti věnují svým aktivitám a tím ovlivňují šíření cholery (obr. 3.7).



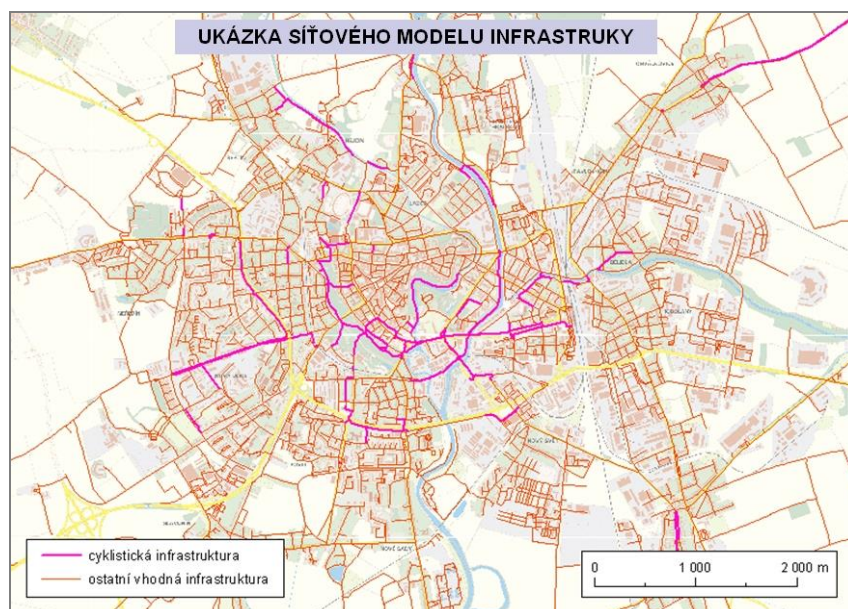
Obr. 3.7 Kombinace SEIR a prostorových ABM

(zdroj: <https://github.com/abmgis/abmgis/tree/master/AppendixA/Cholera>).

Topping a kol. (2003) za pomoci agentně založeného modelu The animal, landscape and man simulation system (ALMaSS) odpovídali na otázky týkající se změn v prostředí s ohledem na populaci hospodářských zvířat. Model se skládá ze zvířat, počasí, růstu vegetace a správy farmy. Průběh simulace do značné míry ovlivněn prostorovou a časovou heterogenitou prostředí. Výsledkem jsou dopady na populaci vycházející z interakce agentů s měnícím se prostředím.

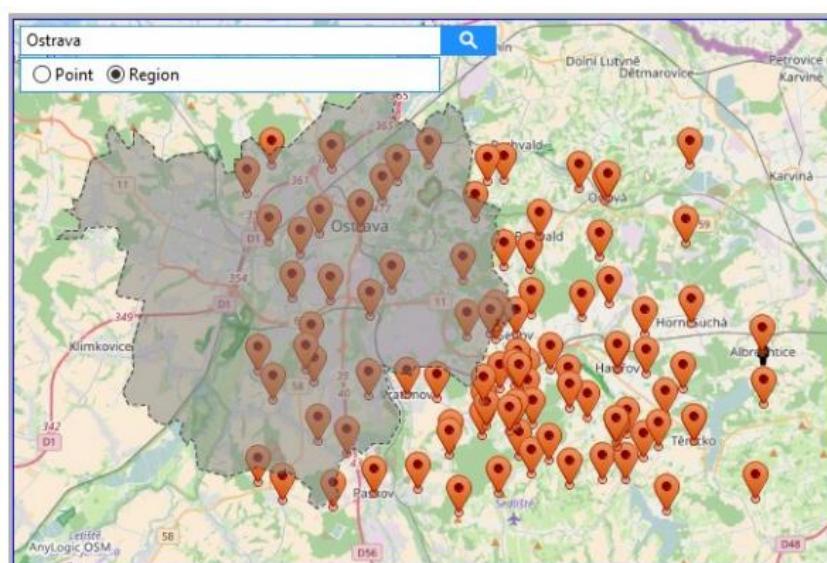
3.1.2 České vědecké články a studie

Prostorovým aspektům pohybu osob ve městě se mimo jiných věnovali **Jarcovják (2013)** a **Burian a kol. (2016)**. Výsledky obsahující informace o aktivitách, zájmových bodech a preferovaných cestách obyvatel byly získány analýzou dat z dotazníkového šetření a aplikace Foursquare. Data byla využita **Horák (2016)** pro prostorové simulační modelování dostupnosti. Provedená stochastická simulace, spočívající v generování náhodných cest v souladu s modely očekávaného chování, přispěla k zlepšení popisu území dle geografických a dopravních faktorů dostupnosti. Za pomoci síťových analýz modeloval cyklo dopravu ve městě **Tázlar (2012)**. Výsledkem práce byl model pro cyklisty vhodné infrastruktury (obr. 3.8).



Obr. 3.8 Model pro cyklisty vhodné infrastruktury
(zdroj: <http://geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/tazlar12/vysledky.html>).

Porovnáním matematické metody a multiagentní simulace pro modelování dynamiky dopravního proudu se zabývali **Jelínek a Vysoká (2013)**. Agentně založený model vykazoval detailnější výsledky, ale byl náročnější na výpočetní kapacitu. Agentně založenému modelování dopravního systému města za pomoci nástroje AnyLogic se ve svých pracích věnovali **Matoušek (2013)** a **Siwek (2018)**. Matoušek sledoval změnu dopravního toku na síti komunikací a výsledkem byly grafy zatíženost jednotlivých úseků. Siwek vytvořil model města skládající se z agentů, kteří pro přesun mezi činnostmi (body na mapě) využívají hromadnou nebo individuální dopravu (obr. 3.9).



Obr. 3.9 Model města s body zájmu pro agenty (zdroj: Siwek 2018).

Nástroj AnyLogic využil i **Cimr (2016)** pro agentovou simulaci efektivního rozmístění aktivních prvků protivzdušné obrany. Užitím multiagentních systému pro modelování biologických fenoménů se zabírala **Husáková (2013)**.

3.2 Modelování pohybu opylovatelů a šíření nemoci

V souvislosti s úbytkem opylovatelů v posledních letech lze vypočítávat zvyšující se počet studií zabývajících se rolí změn prostředí ve vztahu k této problematice. Struktura a diverzita prostředí do značné míry ovlivňuje pohyb opylovatelů a dostupnost potravy. Různé typy prostředí mají různou průchodnost a jejich tvar, rozmístění a velikost může vytvářet koridory a bariéry a má vliv na přežití celé řady druhů. Nicméně další výzkum, především s ohledem na vztah mezi vlastnostmi krajiny a kritickým bodem vedoucím ke kolapsu systému opylování, je nutný **Viana a kol (2012)**. Další důležitou problematikou především v oboru včelařství je šíření nemocí. Vzhledem k vysokým ztrátám (likvidace celých včelstev) a infekčnosti je studiu šíření a možnostem využití modelování věnována značná pozornost. Příkladem je celosvětově rozšířený mor včelího plodu (MVP) u včely medonosné (*Apis mellifera*). V anglické literatuře je pro tuto nákazu používán název American Foulbrood (AFB) a původcem je sporující mikrob *Paenibacillus larvae*. Zamezení šíření je podmíněno včasnou identifikací přítomnosti nákazy a likvidací všech kontaminovaných materiálů včetně nemocných včelstev **Výzkumný ústav včelařský (2005)**. Samotnému AFB a mikrobi *Paenibacillus larvae* se podrobně věnuje **Genersch (2010)**. Infekce se šíří záměnou plástů, zalétávám včel a také loupežením mezi včelstvy s výskytem nákazy. K přenosu mezi včelstvy může docházet vertikálně (při reprodukčním rojení), ale především horizontálně při takzvaném vykrádání nakažených a oslabených kolonií.

V následujících odstavcích jsou zmíněny studie zabývající se výše uvedenou tematikou s ohledem na možnost využití pro (agentní) modelování pohybu, interakce a přenosu nemocí u opylovatelů.

K pochopení systému opylování v krajině je nutné znát způsob, jakým se opylovatelé pohybují v prostředí. Vzhledem k jejich velikosti není možné využít telemetrických přístrojů k přímému sledování pohybu. Nicméně v souvislosti s vývojem v oblasti radarových a radiových technologií, lze očekávat značný posun v následujících letech **Viana a kol (2012)**. Nejčastěji používanou metodou zůstává využívání entomologických sítí k vyhodnocení počtu a druhů návštěvníků v zájmových oblastech (Boscolo a kol. 2017; Tscheulin a kol. 2011), lze ale pozorovat i nárůst využívání geografických informačních systémů (Boscolo a kol 2017; Donersley 2014; Kuchling a kol 2018; Samuelson a Leadbeater 2018). Vliv krajiny na hojnost a různorodost druhů včel v středomořských olivových hájích studoval **Tscheulin a kol. (2011)**. Porovnáním předpokladů s výsledky z výzkumných oblastí byl zjištěn pozitivní vliv olivových hájů. Oproti tomu oblasti s převahou jehličnatých lesů vykazovaly dle očekávání nižší počty jedinců. Dále byl zjištěn vztah mezi zkoumaným měřítkem a velikostí včely. Větší druhy včel byly nalezeny na vzdálenějších místech a lze tedy předpokládat, že využívají vzdálenější zdroje snůšky jako zdroj potravy. Dle studie **Boscolo a kol (2017)** jsou hojnost a pohyb včel do značné míry pozitivně ovlivněny vyšší heterogenitou a kvalitou prostředí. Oproti očekávání propojenost krajiny vykazovala nejvyšší hojnost včel pouze v případě středních hodnot. Více propojená krajina, ale nespíše nemá negativní dopad, pouze způsobuje větší rozprostření jedinců ve sledované oblasti. K porovnání výsledků z entomologických sítí byly vytvořeny mapy krajinného pokryvu a následně vypočten Shannon Landscape Diversity Index (SHDI) v softwaru Qgis. Pro vyhodnocení propojenosti prostředí byly nejdříve jednotlivé typy prostředí rozčleněny do kategorií dle kvality a odporu pohybu pro včely. Poté byl využit nástroj Landscape Corridors (LSCorridors, https://github.com/LEEClab/LS_CORRIDORS/wiki), který simuluje

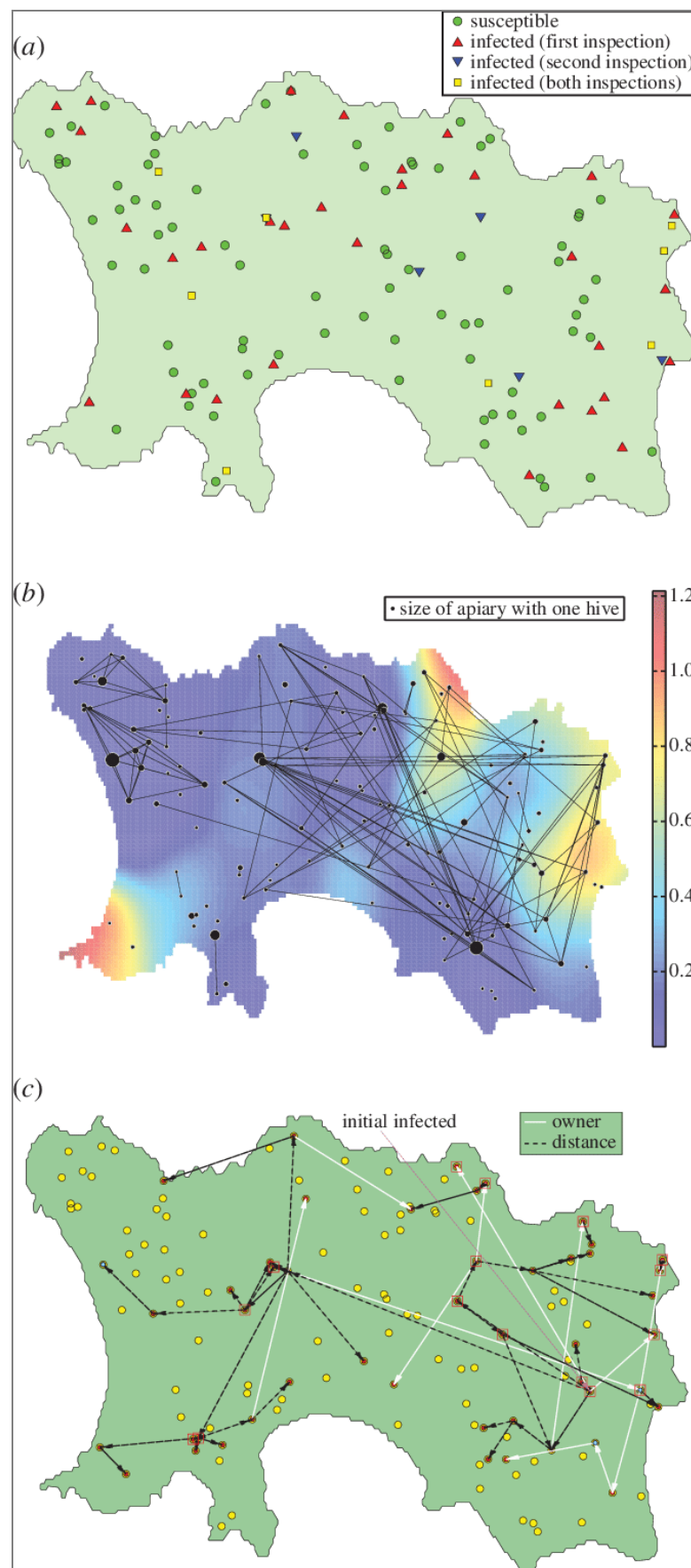
ekologické koridory a vypočten příslušný index. Protokol klasifikace krajiny pro potřeby výzkumu opylovatelů z hlediska ekologie je popsán v **Samuelson a Leadbeater (2018)**. Vstupními daty jsou mapy půdního krytu vytvořené v GIS. Následuje definice land use kategorií dle kvality pro opylovatele, analýza hlavních komponent, shlukování a vypočet optimálního měřítka. Získané kategorie land use mohou být analyzovány pomocí standardních statistických metod nebo použity v modelech. Výzkum se zaměřením na vztah mezi výživou včel a strukturou krajiny je popsán v **Donkersley a kol. (2014)**. Zdroje potravy se liší v obsahu cukrů a tuků i proteinů a ovlivňují kondici a obranyschopnost včelstev. Porovnáním výsledků chemického rozboru s mapami půdního krytu byl zjištěn pozitivní dopad listnatých lesů, travních porostů a zahrad. Negativně pak působil zvýšený výskyt zemědělských ploch a jehličnatých lesů. V souvislosti s kondicí včelstev je nutné zmínit mezinárodní asociaci COLOSS (Prevention of honey bee COlony LOSSes). V posledních letech lze sledovat zvýšený počet úhynu včelstev. Důvodem může být celá řada faktorů, například včelí choroby, změny v krajině a používání pesticidů. Nejeefektivnější metodou sběru informací je v tomto případě tzv. Citizen Science. Prostřednictvím anonymních dotazníků, vyplňovaných samotnými včelaři, je prováděn monitoring úspěšnosti zimování včelstev. Vyplňování probíhá v jarních měsících a otázky se mimo jiné týkají počtu ztrát včelstev, snůškových podmínek a používání léčiv. Cílem je hledání souvislostí mezi jednotlivými faktory a výsledky jsou zpracovávány na národní i mezinárodní úrovni. Monitoring probíhá na území Evropy od roku 2007. Česká republika je součástí projektu od jara 2014 **coloss.org (2019)**, **coloss.cz.webnode.cz (2019)**. Poznatky z COLOSS využili například **Kuchling a kol. (2018)** pro analýzu role struktury krajiny na zimní ztráty včelstev. Výsledky, získané pomocí shlukování, vykazovaly nejnížší ztráty v územích s převahou částečně přirozených ploch.

Modelováním systému opylování v zemědělském území se zabývali **Lonsdorf a kol. (2009)**. Matematický model využívá data krajinného pokryvu pro nalezení vhodných míst pro hnízdění a zdrojů potravy. Výsledkem modelu jsou mapy predikce hojnosti včel na jednotlivých zemědělských plochách. Agentně založený model BEEHAVE (<http://beehave-model.net/>) umožňuje simulovat působení stresujících faktorů a jejich vliv na vývoj a chování včelstva v závislosti na prostředí. Hlavní výhodou modelu je možnost zahrnout působení nemocí a patogenů, používané praktiky ve včelařství, nedostatek potravy nebo použití pesticidů v prostředí. Dle výsledků lze zjistit, jakým způsobem včelstva reagují na jednotlivé negativní faktory či jejich kombinaci **Becher (2013)**. Pro zjištění jakým způsobem včely medonosné prozkoumávají krajinu při hledání potravy lze využít nástroj BEESCOUT **Becher a kol. (2016)**. Použitím agentního modelování, s možností nahrát vlastní mapu prostředí s umístěním úlu a zájmovými oblastmi, lze simulovat proces shánění potravy včetně pravděpodobnosti nalezení konkrétního zdroje. Pro určení parametrů pohybu včel bylo využito radarové technologie k sledování vzorů létání. Způsob prohledávání krajiny lze dále ovlivnit výběrem jedním z několika režimů hledání a způsobů komunikace mezi včelami. Výsledky lze použít jako vstup do modelu BEEHAVE nebo pro vyhodnocení vlivu dostupnosti zdrojů potravy a struktury krajiny na konkrétní včelstvo. **Betti a kol. (2017)** vytvořili agentně založený simulátor včelnice Bee++. Model popisuje dynamický vývoj včelnice mimo jiné s ohledem na kvalitu zdrojů potravy. Důraz je kladen na modelování potencionálních negativních dopadů používání pesticidů.

Horizontálním přenosem moru včelího plodu (MVP) mezi včelstvy prostřednictvím loupení se zabýval **Lindström a kol. (2008)**. K loupežím dochází, když je v prostředí nedostatek zdrojů potravy v podobě nektaru. Převážně na podzim, ale i na jaře, včely

zaútočí na oslabené kolonie za účelem krádeže zásob. Pokud byl zdroj kontaminován, existuje poměrně vysoká pravděpodobnost, že dojde k přenosu patogenů buď při zpracování ukradených zásob medu v úlu, nebo externí kontaminací včel při samotné loupeži. Případně může dojít k záměně materiálu infikovaného spory bakterie *P. larvae* samotným včelařem. Z výsledků studie vyplývá, že nejvíce ohrožené MVP jsou včelstva do vzdálenosti jednoho kilometru, ale lze tedy předpokládat, že se zvyšující hodnotou zavčelení roste i riziko přenosu nákazy. Tato hypotéza byla potvrzena i ve studii **Büren a kol. (2019)**. Využitím dat z veřejných databází obsahující informace o včelínech byly za použití GIS vypočteny indexy hustoty na úrovni kantonů a obcí. Byla nalezena vysoká korelace mezi hustotou zavčelení a hustotou obyvatel spolu s množstvím zemědělských ploch. Na úrovni obcí analýza výsledků prokázala vztah mezi hustotou zavčelení a množstvím výskytu včelnic pozitivních na MVP. Metod prostorové statistiky k identifikaci míst dle různého stupně ohrožení MVP využili ve své práci **Mill a kol. (2014)**. Autoři prokázali, že lze pozorovat prostorové a časové shlukování z hlediska epidemiologických procesů. Dále popsali shluky dle velikosti a frekvence onemocnění včetně míst kde se, díky zavedeným opatřením, podařilo MVP teoreticky vymýtit. I když otázka eradikace nemoci vzhledem k prodlevě projevení symptomů je značně problematická a provádění kontrol je tedy nezbytné. Nejvíce shluků bylo o velikostech 10 až 20 km, z čehož lze usuzovat, že šíření bylo zaviněno mimo jiné i praktikami samotných chovatelů.

Vývoj včelstva, které bylo infikováno MVP, zkoumali za pomoci matematického modelu **Jatulan a kol. (2015)**. Dle zjištěných poznatků, počáteční nákaza vede ke kolapsu, pokud není včas zajištěna léčba. Nejúčinnější metodou zůstává prevence, aby se spory do úlu nedostaly. **Datta a kol. (2013)** využili prostorového stochastického SIR (Susceptible, Infected, Removed) modelu a třídy algoritmů Monte Carlo pomocí Makrokovy řetězce k simulaci epidemie MVP, založené na vzdálenosti mezi koloniemi, přenosu zaviněném včelaři a při použití různých kontrolních mechanismů. Data obsahovala, dva prostorové snímky infekčního stádia, informace o poloze úlů, síť včelařů (Obr 3.10 b) a poznatky z inspekci (Obr 3.10 a). Dle výsledků byla více než polovina šíření infekce zaviněná včelaři (3.10 c). Zvolený postup umožnil najít pravděpodobné místo, kde epidemie začala (3.10 b). Důkazy naznačují, že příčinou vypuknutí byl dovoz včel nebo kontaminovaného materiálu. Z hlediska kontrolních strategií se nejvýhodněji jeví provádění včasných a opakovaných inspekci v okolí tří kilometrů od ohniska. Autoři zmiňují, že pro robustnější analýzu šíření MVP, je nutné zahrnout i informace o pohybu včel mezi včelínami.



Obr. 3.10 Výsledky modelování šíření AFB (zdroj: Datta a kol. 2013).

3.3 Prostorové agentně založené modely

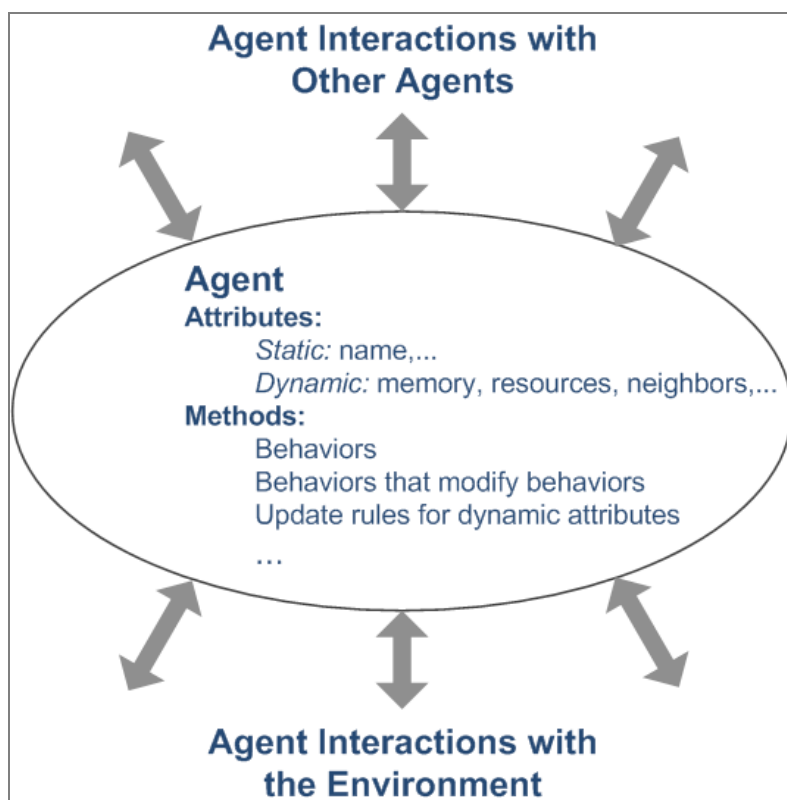
Diplomová práce se zabývá integrací a praktickým využitím prostorových agentně založených modelů. Model se obvykle skládá z agentů a prostředí, ve kterém se agenti pohybují. Důležitou roli hraje chování, definované pravidly a vzájemná interakce agentů mezi sebou a s prostředím **Bonabeau (2002)**, **Macal a North (2014)**. Zmíněná problematika je rozvedena v následujících podkapitolách

3.3.1 Agent

Dle **Russell a Norvig (1995)** lze za agenta považovat cokoli, co je schopno vnímat prostředí pomocí senzorů a následně dle zjištěné informace provést odpovídající akci. Racionálním agentem je pak agent, který provádí akce takovým způsobem, aby byl zaručen maximální možný úspěch.

Huhns a Singh (1998) pohlíží na agenta jako na aktivní softwarovou komponentu, která vnímá, přemýšlí, provádí akce a komunikuje. Dalšími vlastnostmi může být autonomnost nebo směřování za určitým cílem. Autoři dále zmiňují, že některé definice vnímají agenta pouze jako automat, který provádí přesně to, co má uvedeno v instrukcích. Oproti tomu, **Wooldridge a Jennings (1995)** uvádějí, že dle některých teorií může mít agent kromě již zmíněných vlastností také pocity a emoce, lze jej tedy, považovat za vědomou vnímající entitu.

Macal a North (2014) uvádějí jako základní složku agenta jeho atributy. Ty mohou být statické například jméno a pohlaví. Mezi dynamické atributy lze zařadit paměť, sousedy a aktuální zdroje. Agent se dále skládá z metod, kam patří chování a pravidla pro dynamické atributy (obr. 3.11).



Obr. 3.11 Typický agent (zdroj: Macal a North 2014).

Pro potřeby modelování jsou nejčastěji uváděny následující vlastnosti agenta **Macal a North (2014)**.

Autonomnost

Agent funguje samostatně a nezávisle na ostatních agentech a na prostředí, ve kterém se vyskytuje. Agent provádí akce a rozhodnutí dle informací, které získá prostřednictvím interakce s okolím.

Modularita

Agent je diskrétní entita se sadou charakteristik, atributů, chování a schopností rozhodovat se. Modularita u agenta znamená, že lze rozlišit co je součástí agenta a co není, případně zdali se jedná o charakteristiku sdílenou mezi agenty.

Sociálnost

Sociální schopnosti agenta se vztahují především k interakci s ostatními agenty. Nejčastějšími formami jsou mimo jiné schopnost vyhnout se kolizi, vnímání okolí, sdílení informací a komunikace, někdy se může jednat i ovlivňování chování ostatních agentů.

Podmíněnost

Stav agenta se mění s časem a je podmíněn kolekcí stavových proměnných a definovaných konkrétní situací. Stav agentně založeného modelu je složen z kolekce všech stavů agentů v něm společně se stavem prostředí. Chování agenta je také podmíněno jeho stavem. Čím více stavů může agent v modelu mít, tím bohatší je jeho chování.

3.3.2 Prostředí

Prostředí poskytuje agentům prostorový kontext. Vyskytuje se ve všech prostorových multiagentních systémech a plní podobnou funkci jako grid u celulárních automat. Každý agent má svou lokaci určenou prostředím. Použitím „senzoru“ agent zjišťuje informace stavu nejbližšího okolí, následně agent provede akci. Může se jednat o pouhou změnu polohy, často je ale prostředí používáno i pro komunikaci, tedy pro posílání zpráv mezi agenty. Jedná se o situace, kdy jeden agent ovlivňuje prostředí, a druhý agent nebo jejich skupina následně získá upravenou informaci při dotazu na stav prostředí **Gilbert a Troitzsch (2005)**.

Stav prostředí je z velké míry ovlivněn jeho vlastnostmi. **Huhns a Singh (1998)** zmiňují mimo jiných následující vlastnosti prostředí. Poznatelnost a předvídatelnost, které určují rozsah pozorovatelnosti či schopnost predikce prostředí agentem. Řiditelnost neboli jak moc může agent prostředí ovlivnit a epizodičnost udává, zda budoucí stavy závisí na všech předchozích nebo pouze současném stavu. Dle **Russell a Norvig (1995)** lze prostředí dále dělit na statická a dynamická v závislosti na změnách prostředí. Dále zda se prostředí mění pouze v důsledku akcí působených agentem nebo i bez jeho přičinění. Může být implementováno deterministické prostředí, u kterého je následující stav kompletně závislý na předchozím a na akci provedené agentem. Oproti tomu v nedeterministických prostředích může jedna akce způsobit různé změny. V neposlední řadě pokud je počet možných akcí konečný jedná se o diskrétní prostředí,

je-li agentovi k dispozici nekonečný počet akcí, například volba směru, je prostředí naopak spojitě.

Jak vyplývá z předchozích odstavců, prostředí slouží jako nástroj pro interakci mezi agenty. Hlavním problémem u agentně založených modelů je nastavení pravidel pro komunikaci. Tedy kdo může komunikovat s kým, za jakých podmínek a jakým způsobem bude interakce probíhat. Agent obvykle komunikuje pouze s určitým počtem agentů z populace. Zmíněná problematika je do značné míry ovlivněna topologií modelu **Macal a North (2014)**. Autoři uvádějí následující stručný přehled druhů prostředí.

Soup (polévka)

Jedná se o neprostorový model. Agent nemá prostorový atribut. Komunikace probíhá přímo dle změn stavů agentů.

Grid nebo lattice

Prostor podobný celulárním automatům. Index buňky představuje umístění agenta. Interakce probíhá pouze se sousedními buňkami dle definovaného okolí.

Euklidovský spojitý prostor

Agenty se pohybují v 2D nebo 3D prostoru. Umístění agenta je definováno buď relativními nebo geoprostorovými souřadnicemi.

Network (síťový model)

Mohou být statické tedy s předdefinovanými vazbami nebo dynamické, vazby se vytváří dle pravidel v průběhu simulace. Umístění agenta je svázáno s uzlem v síti.

Geografický informační systém (GIS)

Interakce a pohyb agentů probíhá v geoprostoru vytvořeném z nejčastěji vektorových dat. Agentova poloha je dána buď přímo geografickou jednotkou, na které se vyskytuje, například číslo popisné nebo číslo silnice, případně se jedná o geografické souřadnice.

Jednotlivá prostředí jsou podrobně popsána v podkapitole 3.4 Práce s prostorem v agentně založených modelech, způsob implementace je zmíněn u jednotlivých nástrojů v kapitole 4 Praktické použití vývojových nástrojů.

3.3.3 Chování a pravidla

Jednou z hlavní předností agentně založených modelů je jejich schopnost zachytit lidské chování. Zároveň jsou ABM pro nedostatky v této oblasti často kritizovány **Heppenstall a Crooks (2016)**. Chování každého jedince je definováno zkušenostmi, nabytými znalostmi, aktuálními tužbami a pocity. Z důvodu přílišné komplexnosti není možné modelovat všechny aspekty chování a vlivy současně. Z tohoto důvodu bývají v ABM implementovány pouze aspekty s nejdůležitějším významem pro modelovanou situaci. **Heppenstall a Crooks (2017)**.

K modelování chování lze použít jednoduchý matematický přístup nebo složitější kognitivní rámce či architektury. Jednotlivé metody jsou popsány dle **Kennedy (2012)**, **Heppenstall a Crooks (2017)**.

Matematický přístup

Využívá buď náhodných generátorů pro výběr z předdefinovaných akcí, nebo častěji používanou metodu pravidel s limitními hodnotami. Jedná se o klasickou vazbu, při splnění podmínky na jedné straně, je provedena akce následující za „potom“ na straně druhé. Příkladem mohou být následující pravidla.

IF <energy> is below <Threshold1> THEN die

IF <energy> is above <Threshold2> THEN move_randomly

IF <energy> is between <Threshold1> and <Threshold2> THEN search_for_food

Rozhodování v matematickém přístupu je značně zjednodušené oproti modelovanému systému především s ohledem na množství potencionálních působících faktorů. Je tedy vhodné v situacích, kdy je modelována pouze detailně specifikovaná a úzká část chování.

Kognitivní rámce

Využívají více abstraktních konceptů a jejich hlavním účelem je modelovat způsob jakým se lidé rozhodují. Používají se především tehdy, když je potřeba zachytit větší komplexitu chování. Mezi nejpopulárnější se řadí **beliefs, desires, and intentions (BDI)** vytvořeno Bratmanem 1988, Raoem a Georgeffem 1991, a architektura **PECS (physical conditions, emotional states, cognitive capabilities and social status)** navržená Schmidtem a Urbanem.

a) Beliefs, desires, and intentions (BDI)

Reprezentace chování prostřednictvím BDI, vychází z předpokladu, že lze modelovat domněnky, touhy a záměry jednotlivce. Domněnky označují agentovy znalosti světa, neboli jak se agent domnívá, že prostředí vypadá. Od znalostí se liší tím, že v důsledku nesprávné percepce, nebo neúplnosti informace, nemusí být domněnky pravdivé.

Touhy představují motivaci jednotlivce, jedná se tedy o cíle, které by agent rád splnil. Záměry jsou pak touhy, které se agent rozhodl naplnit.

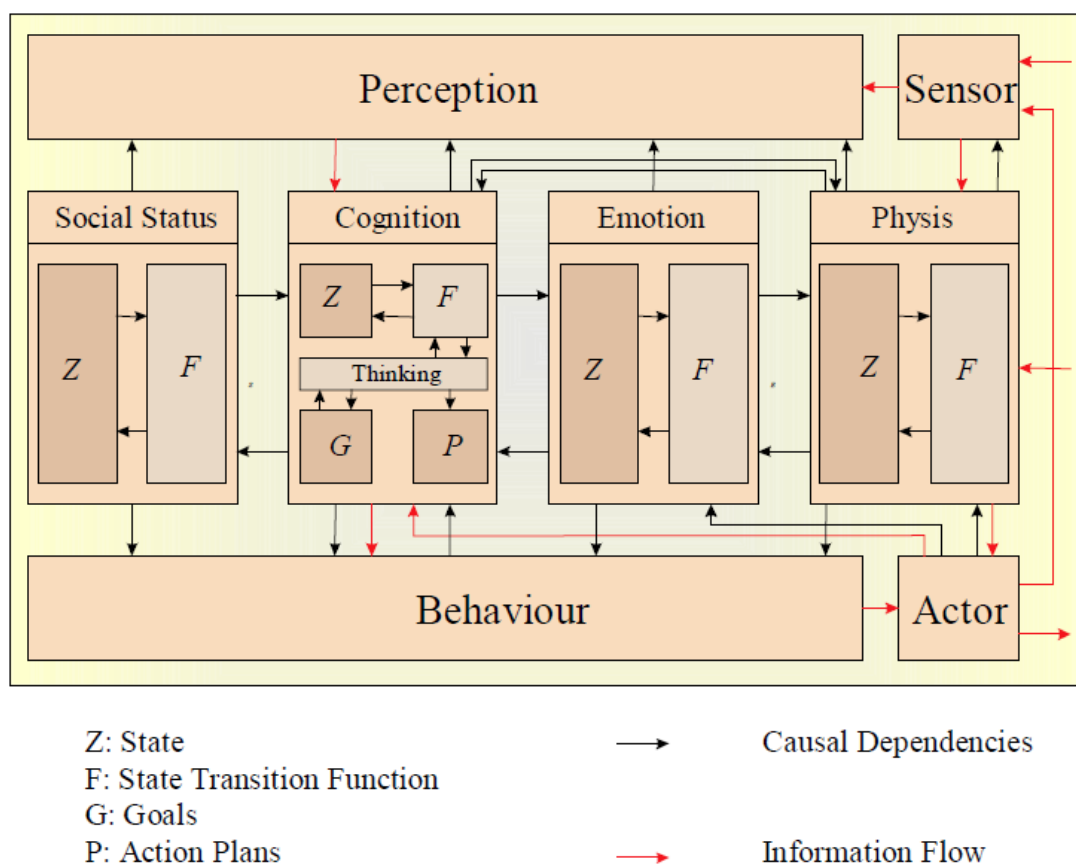
BDI princip může využívat strukturu podobnou rozhodovacímu stromu. Agent má na počátku určitý generalizovaný pojem o prostředí a rozhodovacím procesem se snaží dojít k specifickému cíli.

Problém může nastat v případech, kdy se agent musí rozhodnout mezi několika cíli s různou váhou. Z tohoto důvodu lze implementovat koncept plánování. Jedná se o proces, kdy se postupuje zpětně od cílového stavu, po jednotlivých rozhodnutích a akcích, které je potřeba vykonat až do současné situace agenta **Gilbert and Troitzsch (2005)**.

b) PECS (physical conditions, emotional states, cognitive capabilities and social status)

Architektura obsahuje reprezentaci percepce, chování, psychologie, emocí kognice a sociálního statusu. Umožňuje uchovávat předchozí chování, plánovat a provádět reflexi. Lze tedy modelovat jednak jednoduché chování typu podnět a odpověď, tak i komplexnější chování, jako například odhodlání splnit potřeby a touhy a jejich následnou transformaci v motivy. Motivy jsou v PECS považovány za stavové proměnné, které udávají chování jedince.

Jak je možné vyčíst z obrázku 3.12, architektura vychází ze základní systémové teorie. Obsahuje vstup (percepce a senzor), vnitřní stavové proměnné (status, kognice, emoce a psychika) a výstup, který se skládá z chování (souhrn pravidel ze kterých vznikne příkaz) a komponenty odpovědné za provedení akce **Schmidt (2002)**.



Obr. 3.12 Diagram architektury PECS (zdroj: Schmidt 2002).

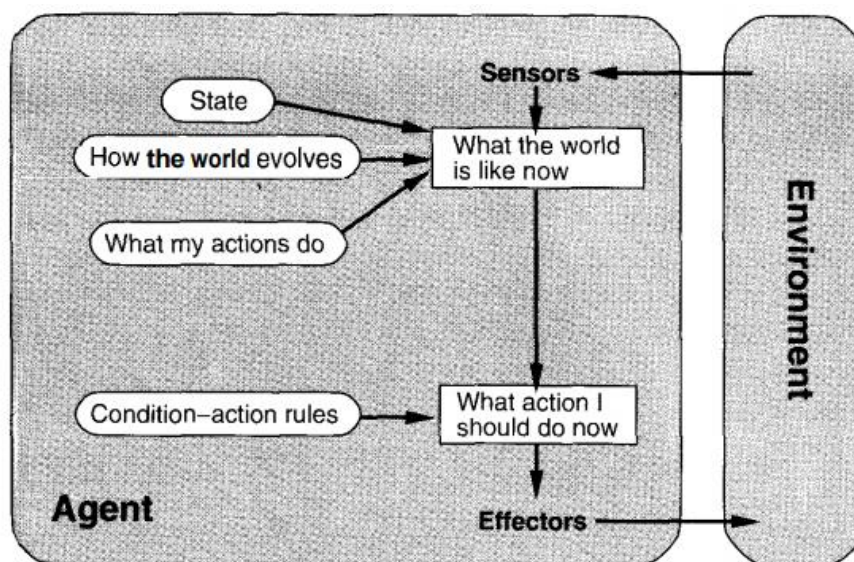
Dle **Russell and Norvig (1995)** lze agenty rozdělit dle chování do čtyř následujících typů.

Jednoduchý reflexní agent

Implementací se jedná o totéž, jako u matematického přístupu. Výběr akce probíhá za pomoci podmínkových pravidel.

Agent s vnitřním stavem

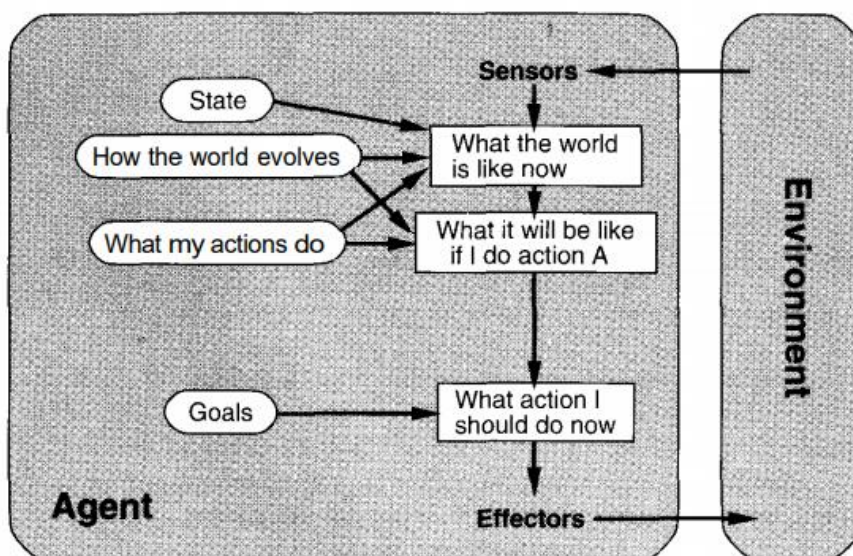
V některých situacích agentovi nemusí ke správně volbě akce stačit pouze informace o současném stavu prostředí zjistitelném senzorem. Do rozhodnutí vstupují i vývoj prostředí nezávislý na agentovi a zároveň potenciální změny vyvolané agentovo akcí.



Obr. 3.13 Diagram agenta s vnitřním stavem (zdroj: Russell and Norvig 1995).

Agent s určitým cílem

Rozhodovací proces nezávisí pouze na současném stavu prostředí, důležitý je i cíl, který chce agent naplnit. Jedná-li se o jednodušší situaci, lze využít předchozích konceptů pro porovnání s cílem, ve složitějších případech je nutné zavést plánování. Rozdíl oproti předchozím typům je v implementaci jisté formy myšlení. Před provedením rozhodnutí agent nejdříve vyhodnotí, zda je akce výhodná či nikoliv vzhledem k cíli.

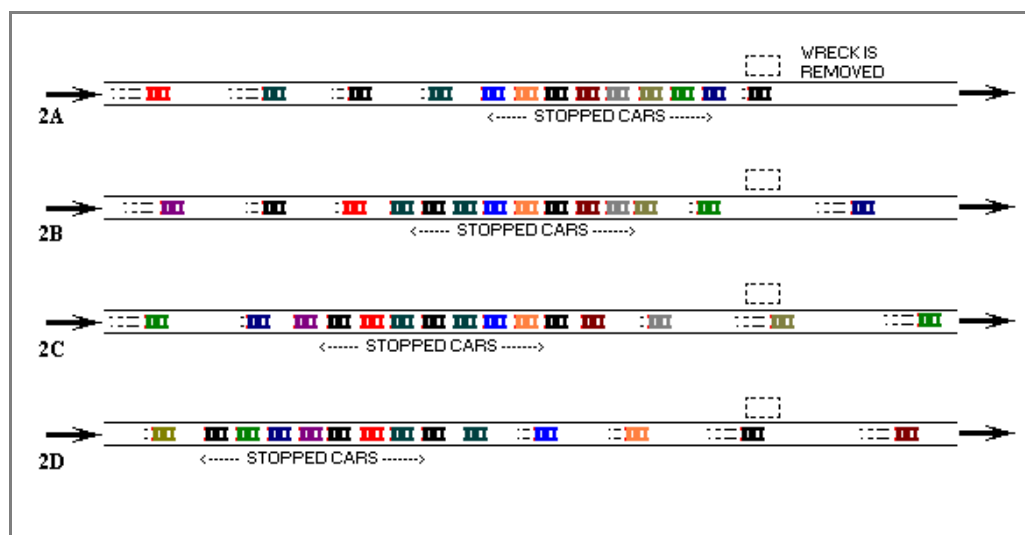


Obr. 3.14 Diagram agenta s určitým cílem (zdroj: Russell and Norvig 1995).

Agent se zaměřením na užitečnost

Užitečnost udává kvantitu výhodnosti akce. Jedná se o funkci popisující v rozmezí reálných čísel užitečnost stavu nebo sekvence stavů plynoucích z rozhodnutí. Výsledkem je i ohodnocení úspěšnosti splnění cílů dle jejich důležitosti.

Vznik jevu je výsledkem interakcí individuálních agentů. Na úrovni celku lze pozorovat jiné chování než při pohledu na jednotlivce. Celek je víc než jen pouhým součtem jeho částí. Emergentní chování je jednou ze základních složek agentně založených modelů. Interakce a chování agentů při běhu simulace vede ke vzniku jevu odspodu nahoru. Klasickým překladem je vznik kolony, jakož to výsledku interakcí jednotlivých vozidel. Pohyb kolony je protisměrný vůči vozidlům, které ji způsobily (obr. 3.15). Jednoduchými pravidly získáme komplexní chování a i malé změny mají velký dopad na průběh simulace. Vznik jevu ale může být obtížně předpověditelný a náročný na pochopení **Bonabeau (2002)**.



Obr. 3.15 vznik kolony a její šíření (zdroj: <http://trafficwaves.org/>).

3.3.4 Evaluace modelu

Implementací kroků zmíněných v předchozích podkapitolách (vytvoření agenta a prostředí, specifikace pravidel pro chování) proces tvorby modelu nekončí. Obvykle se postupuje od jednoduchého modelu k složitějšímu. Vhodné je každou verzi modelu otestovat, aby se našly případné chyby. U složitějších modelů může už v počátečních fázích docházet k nečekanému chování. Neexistuje formální metodologie, jak provádět evaluaci agentně založených modelů. Nejčastěji používaný proces se skládá z verifikace, kalibrace a validace **Heppenstall a Crooks (2017)**.

Verifikace

Verifikace spočívá v ověření vytvořeného modelu vůči jeho designu. K verifikaci modelu lze použít techniky vyvinuté programátory. Jedná se například o metody testovacích scénářů a testování jednotek, při kterých jsou testovány jednotlivé části kódu. Jiným přístupem může být vytvoření druhého modelu v jiném prostředí a jazyce a tyto dva modely následně porovnat.

Kalibrace

Tato část procesu evaluace modelu se zabývá pravidly pro chování agentů. I když je jejich implementace správná, jejich parametry jsou v důsledku nedostatku informací nepřesné. Kalibrace tedy znamená úpravu parametrů modelu tak, aby chování agentů více odpovídalo modelovanému systému. Využívá se kvalitativních a kvantitativních metod. U kvalitativních metod lze využít například map pro porovnání výsledků. Jedná

se spíše o zamyšlení se, zda výsledek odpovídá reálné situaci či nikoliv. Použijeme-li výpočet k zjištění rozdílů mezi výsledky modelu a reálnými daty, jedná se o kvalitativní metodu.

Validace

Jedná se o poslední krok a přichází po kalibraci z důvodu možného tzv. overfitting. Může se stát, že vytvořený model je příliš navázaný na konkrétní případ a při použití jiné datové sady nebude podávat správně výsledky. Pro validaci lze použít stejných metod jako u kalibrace ale s novou datovou sadou na vstupu.

Značně problematická je otázka dostupnosti dostatečně podrobných datových sad pro kalibraci a validaci. V poslední době se objevuje řešení v možnosti využití big data **Heppenstall a Crooks (2016)**. Jinou možností je obrátit se na odborníky na danou zkoumanou problematiku.

3.3.5 Overview, Design concepts, and Details (ODD) protokol

S rostoucí popularitou ABM se objevilo několik problémů. Absence standardizace popisů modelu způsobovala problémy v pochopení jejich fungování a prakticky znemožňovala možnost replikace výsledků. Chyběla jednotná struktura a běžný jazyk, který se používal k popisu modelu, byl příliš rozsáhlý a těžký na porozumění. Z těchto důvodů přišli Grimm a Railsback v roce 2004 s protokolem, který kombinuje dvě základní složky. Obecnou strukturu popisu ABM a použití matematického jazyka **Grimm a kol. (2006)**. Základní struktura protokolu je zobrazena v tabulce 2. Později došlo k revizi a úpravě některých částí **Grimm a kol. (2010)**. Pro podrobnější popis lidského rozhodování byla ještě přidána část, zabývající se rozhodovacím procesem, adaptací a schopností učit se **Müller a kol. (2013)**. Rozšíření verze protokolu o Decision se nazývá ODD + D.

Tabulka 2. Protokol ODD (zdroj: Grimm a kol. 2006).

Overview	Purpose
	State variables and scales
	Process overview and scheduling
Design concepts	Design concepts
Details	Initialization
	Input
	Submodels

První část nazvaná Overview (přehled) se skládá účelu modelu, stavových proměnných a měřítek, a přehledu procesů s jejich pořadím. Slouží především k získání základních informací. Po jeho přečtení je při použití objektově orientovaného jazyka možné sestavit kostru modelu, která zahrnuje deklarace všech objektů, popis entit a prostředí a pořadí procesů.

Část koncepty designu popisuje užití obecných konceptů z komplexních systémů. Zahrnuje například otázky emergentního chování, typy interakcí a náhodné prvky.

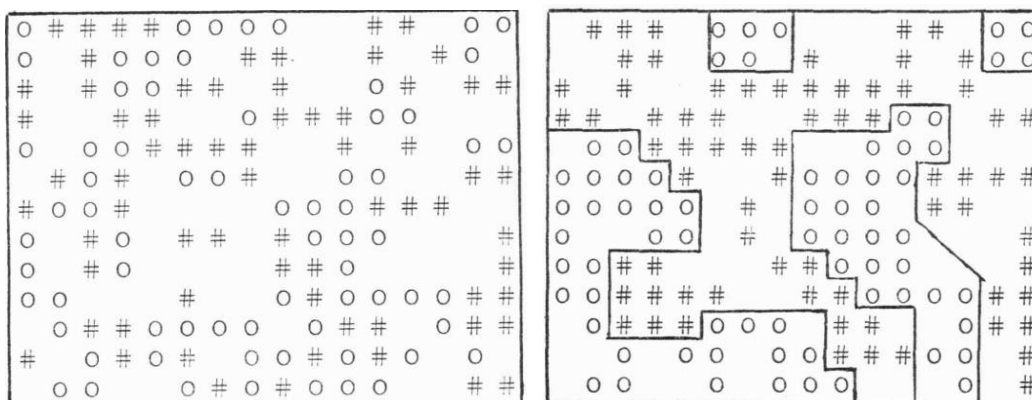
Poslední část nazvaná details obsahuje veškeré informace, které nejsou přítomny v přehledu a jsou potřebné pro kompletní re-implementaci modelu **Grimm a kol. (2006)**. Kompletní protokol dle přepracované verze užitý na konkrétním příkladu je v českém a anglickém jazyce spolu s manuálem k vytvořenému modelu pohybu včel v prostředí dostupný na přiloženém CD, a také na webových stránkách diplomové práce s odkazem na GitHub (<https://github.com/TomasTuhacek/Bee-movement-in-the-environment-model.git>).

3.4 práce s prostorem v agentně založených modelech

Prostorová komponenta ABM je tvořena prostředím, ve kterém se agenti pohybují, může také sloužit pro interakci a komunikaci agentů viz podkapitola 3.3.2. Výběr typu prostoru, který bude v modelu implementován, je jedním z prvních kroků a nezřídka se od něj odvíjí způsob, jakým je celý model sestaven. V následujících podkapitolách jsou představeny jednotlivé typy prostoru, jejichž implementace pomocí vývojových nástrojů je popsána na praktických úlohách v 4. kapitole.

3.4.1 Grid (diskrétní prostor)

Grid byl poprvé použit v poměrně známém segregačním modelu vytvořeným Thomasem Schellingem v roce 1971. Na počátku simulace jsou agenti, reprezentující dvě rasy, distribuovány náhodně (obr. 3.16). Užitím několika jednoduchých pravidel pro sousedství (například maximální podíl sousedů jiné rasy), postupně dochází ke shlukování, až nakonec vznikne několik rasově stejným sousedství (obr. 3.17) **Schelling (1971)**. Dle modelů sestavených v nástrojích Netlogo a GAMA Platform byly zjištěny následující informace o prostoru.



Obr. 3.16 a 3.17 Segregační model (zdroj: Schelling 1971).

Struktura

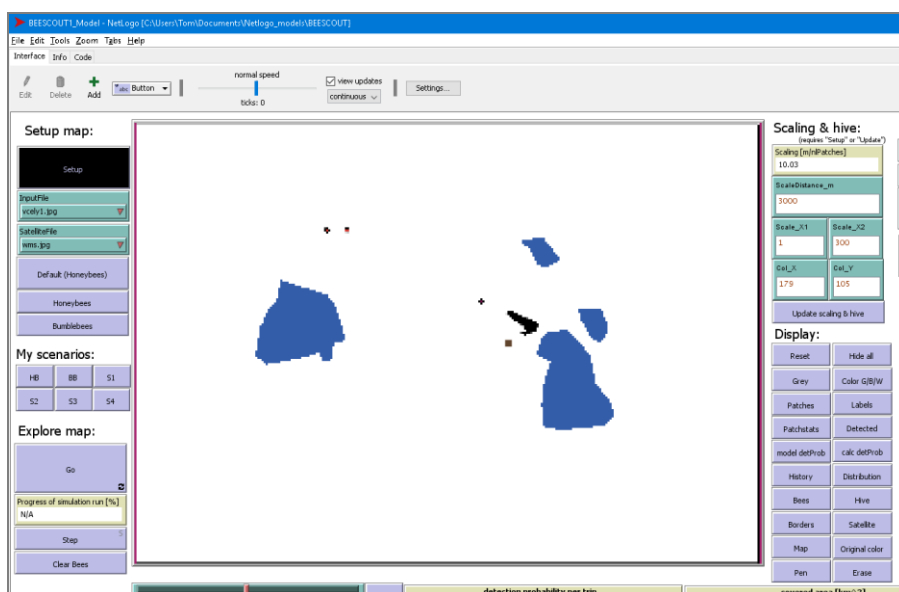
Prostor je tvořen maticí o různém počtu sloupců a řádek. Jednotlivé buňky nazývané patch (NetLogo) nebo cell (GAMA Platform, AnyLogic a jiné) nesou informaci o daném jevu a zároveň slouží pro umístění agenta do prostoru. Obvykle může jedna buňka udávat lokaci pouze jednoho agenta. Dle manuálu k nástroji MASON (Luke, 2015), lze implementovat i tzv. SparseGrid2D umožňující více agentům sdílet stejnou buňku.

Prostředí může být ohraničeno neprostupnou bariérou, nebo může být použit princip obalu (wrapping). V takovém případě je u prostředí nastaven torus a dostane-li se agent na okraj prostředí, objeví se na druhé straně. U prostředí typu torus je zachován stejný počet sousedů všech buněk.

Inicializace a data

Grid lze obvykle vytvořit specifikací počtu sloupců a řádků. Získaná mřížka obsahuje buňky s nulovou hodnotou. Specifikací barvy lze prostředí přidat kvalitativní nebo kvantitativní vlastnosti. Použitím různých barev je možné specifikovat druhy

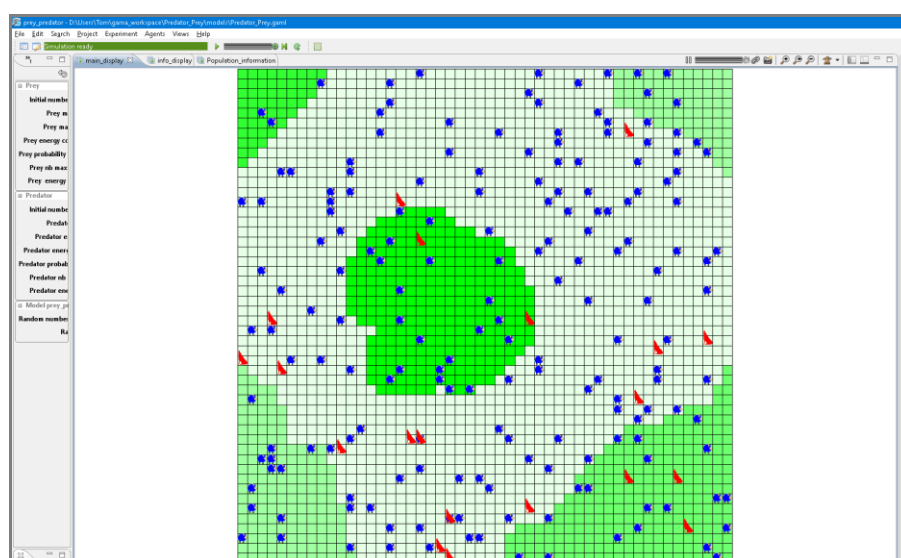
prostředí, například černé buňky reprezentují nepřístupná místa a modré zájmové oblasti (obr. 3.18). Přechod agentů mezi různě barvenými buňkami, může a nemusí být povolen.



Obr. 3.18 Kvalitativní vlastnosti prostředí v rastru.

Užitím odstínů obvykle jedné barvy získává prostředí kvantitativní vlastnosti, například množství travního porostu (obr. 3.19), teplotu či výšku. Barvu buňky udanou v kódu RGB je u kvantitativních hodnot nutné převést na číselnou hodnotu typ float užitím například následujícího vzorce (GAMA-platform.github.io/wiki).

$$\text{food} <- 1 - (((\text{color as list})[0]) / 255) ; \quad (1)$$



Obr. 3.19 Kvantitativní vlastnosti prostředí v rastru.

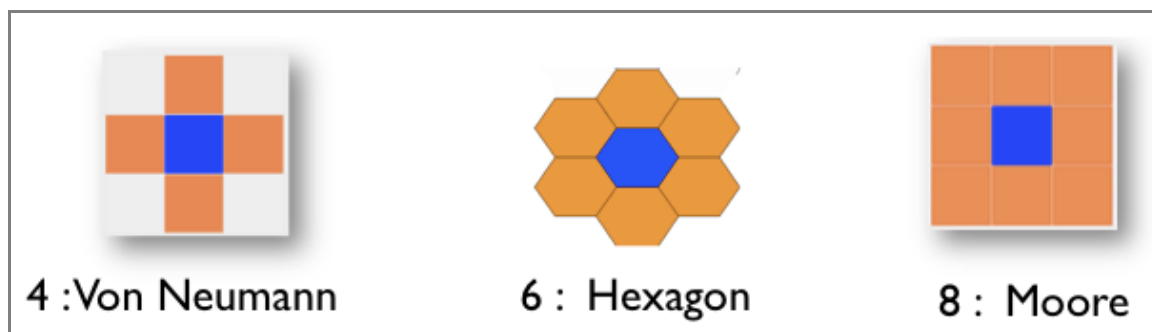
Barvu lze buňkám přiřadit náhodně nebo dotazem na konkrétní buňku. Hlavní výhodou použití prostředí typu grid je možnost importu dat.

U kvalitativních dat je podporována většina rastrových formátů. Limit spočívá v počtu užitých barev, jelikož se zvyšujícím se počtem narůstá složitost modelu, jsou obvykle v modelech implementovány pouze základní barvy.

Pro kvantitativní data lze použít formát asc (textový soubor ASCII – American Standard Code for Information Interchange) nebo CSV (Comma-separated values). Některé nástroje pro ABM umožňují i importovat výstupy z geografického informačního systému nebo grafických programů nejčastěji ve formátu PNG (Portable Network Graphics). Aby agent mohl zjistit hodnotu jevu, je nutné použít výše uvedený vzorec. I u kvantitativních dat platí důraz na jednoduchost modelu. Barevná stupnice by měla být jednotónová, aby reprezentovala intenzitu jevu.

Pohyb agentů v prostoru

Buňka v gridu určuje umístění agenta v prostoru. Sousední buňky slouží pro interakci a pro volbu směru. Sousedství existuje několik typů. V nástroji GAMA Platform lze implementovat kromě klasického Von Neumannova (4 buňky) a Mooreova (8 buněk) i hexagonální (6 buněk) viz obr. 3.20.



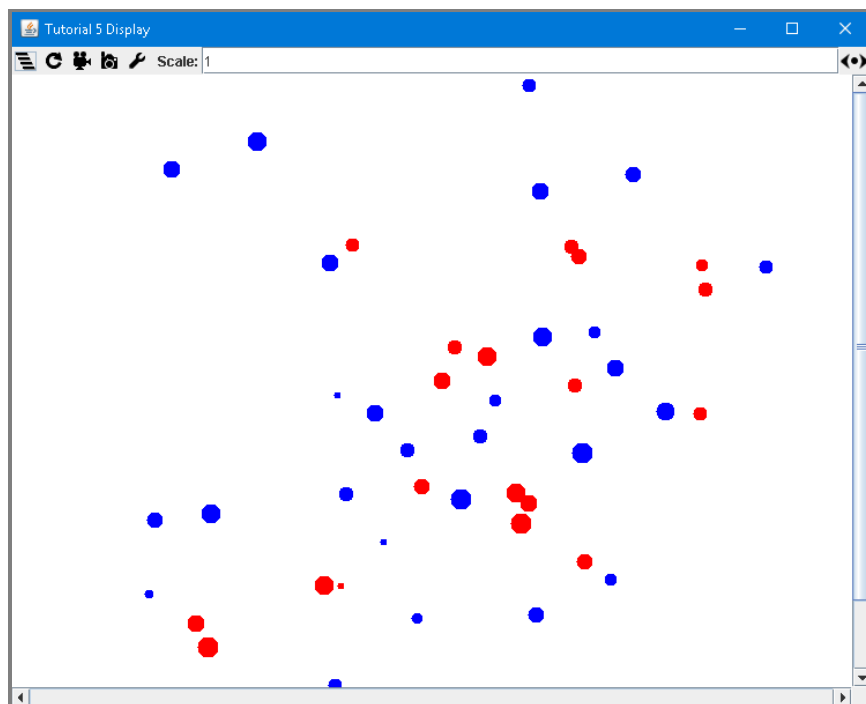
Obr. 3.20 Typy sousedství (Zdroj: <https://gama-platform.github.io/wiki/GridSpecies>).

Směr pohybu agenta může být určen několika způsoby. Kromě náhodného směru je první možností přikázat agentovi, aby si pro další pohyb vybral buňku vlevo, vpravo vpředu nebo vzadu. Jiný způsob využívá azimutu. Agent zvolí směr dle udaných stupňů a použitého typu sousedství. Další možností je pohyb s ohledem na vlastnosti prostředí (kvalitativní a kvantitativní). Pokud je do pohybu zapojena interakce s prostředím, je pohyb ovlivněn podmínkami, nastavenými pro chování agenta. Specifickou variantou je příkaz pro zvolení určité cílové buňky v gridu. V takovém případě směřuje agent nejkratší cestou k určené buňce, není-li uvedeno v podmínkách chování jinak.

3.4.2 Spojitý prostor a síťový model

Agenty ve spojitém prostoru mají svou polohu udanou pomocí souřadnic x a y (číselné hodnoty s plovoucí desetinnou čárkou). Pro zjednodušení vyhledávání a interakci agentů se používá diskretizace, pomocí implementace prostor typu grid. S ním sdílí i celou řadu vlastností. Síťový model rozšiřuje spojitý prostor o vazby mezi agenty. Používá se například pro zpětné zjištění, který agent interagoval s kterým nebo pro

nastavení možnosti komunikace. K následujícímu popisu prostoru bylo využito modelů implementovaných v nástrojích MASON a Repast Symphony.

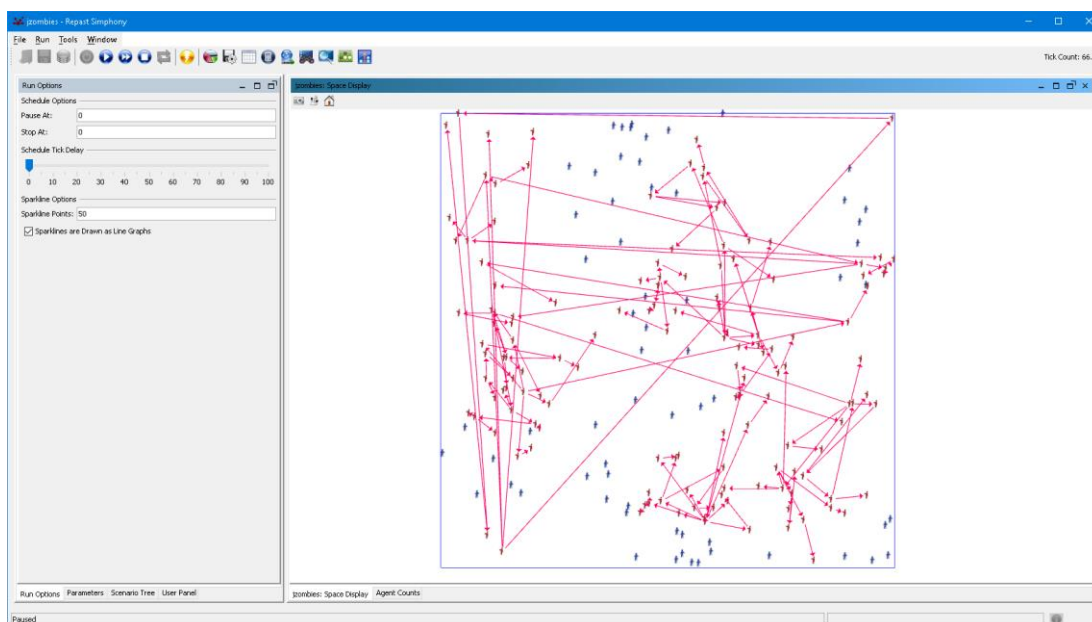


Obr. 3.21 Spojitý prostor.

Struktura

Spojitý prostor je tvořen jednotlivými souřadnicemi. Většinou se využívá torus a není ohraničen. Rozměry prostoru lze definovat například pro potřeby zobrazení, na chod modelu nemají vliv.

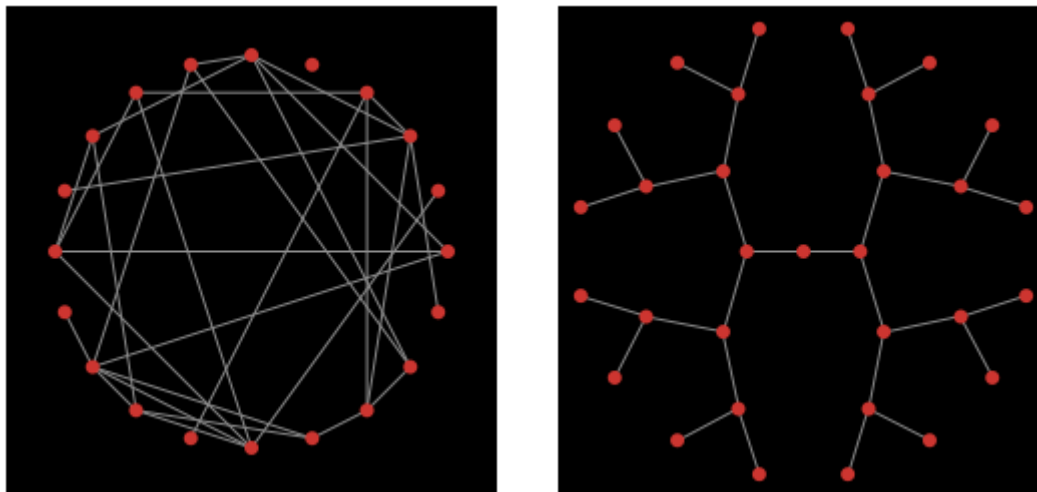
Síťový model je tvořen agenty, kteří reprezentují uzly grafu. Hrany tvoří vazby mezi agenty. Užitím orientovaných hran lze definovat vztahy rodič a potomek (obr. 3.22), což umožní odpovídající dotazy.



Obr. 3.22 Dynamicky vytvořený síťový model.

Inicializace a data

Prostor se zavede užitím odpovídající třídy v kódu. Další parametry se nedefinují. Při implementaci gridu je nutné zadat rozměry buňky odpovídající požadované vzdálenosti pro vyhledávací oblast agenta. Síť je vytvářena postupně dle specifikovaných pravidel v průběhu simulace. Některé nástroje nabízejí již předpřipravené sítě.



Obr. 3.23 Síťová struktura

(zdroj: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/programming.html>)

Pohyb agentů v prostoru

Agenty jsou umístěny do prostoru náhodně. Proces pohybu probíhá následujícím způsobem. Agent si zvolí cílové souřadnice v prostoru, vypočítá azimut a sestaví vektor. Pokud není v pravidlech pro interakci s ostatními agenty definováno jinak, směřuje přímo k cíli. Pohyb ovlivněný interakcí je určen velikostí prohledávací oblasti a pravidly. Agent zjišťuje výhodnost pohybu daným směrem. Pro zjednodušení se využívá gridu. Nejčastěji se jedná o dotazy na přítomnost či počet dalších agentů v okolích buňkách.

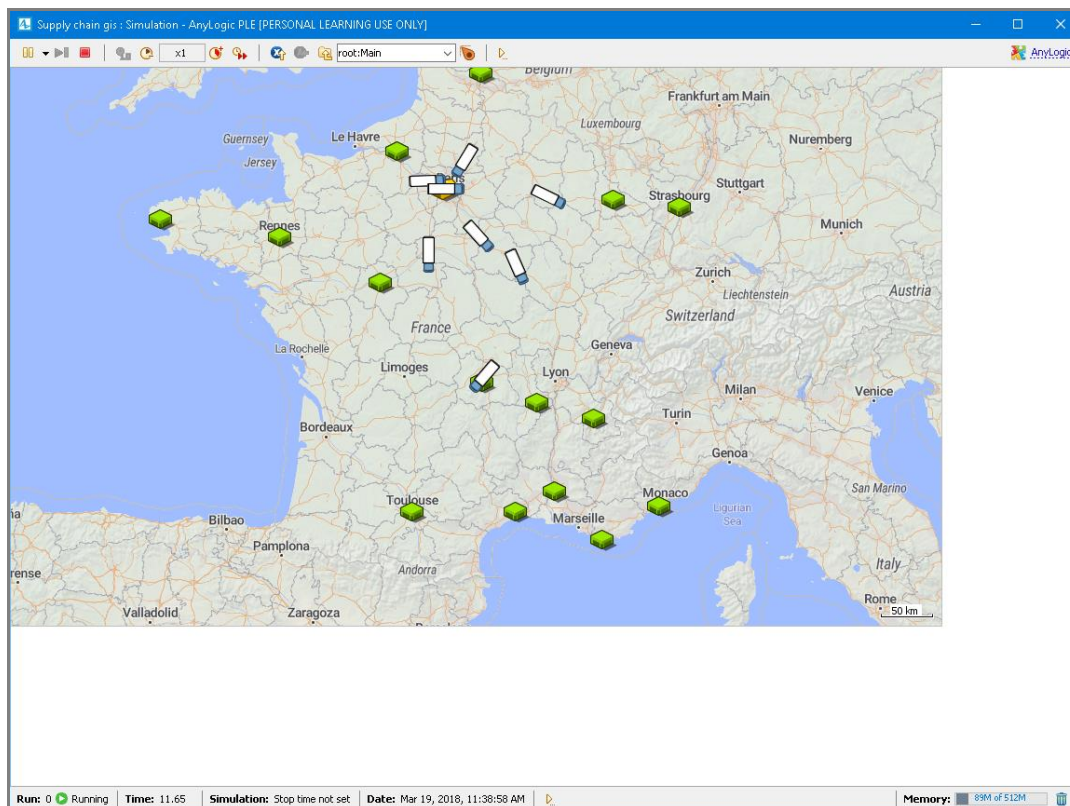
Uzly sítě se pohybují stejným způsobem jako agenty, kterými jsou tvořeny. S průběhem simulace se mohou měnit vlastnosti hran. S rostoucí či klesající vzdáleností mezi uzly se mění síla vazby.

3.4.3 Geografický informační systém (GIS)

V agentně založených modelech je takto označován geograficky definovaný prostor, který je tvořen vektorovými daty a umožňující jejich následné použití v modelu. Nejčastěji používanými formáty jsou shapefile (shp) a soubory Open Street Map (OSM). Užitím Java knihoven lze rozšířit možnosti importu o další vektorové formáty. Kromě geometrie lze nahrát i atributy k určení vlastností prostředí. Použitím geograficky definovaného prostoru využívajícím GIS funkcionalitu lze agenty umístit do „reálného“ světa a vytvářet modely v měřítku čtvrtí, měst, krajů nebo dokonce států. Následující popis prostoru vychází z modelů implementovaných v nástrojích GAMA Platform, AnyLogic a GeoMASON.

Struktura

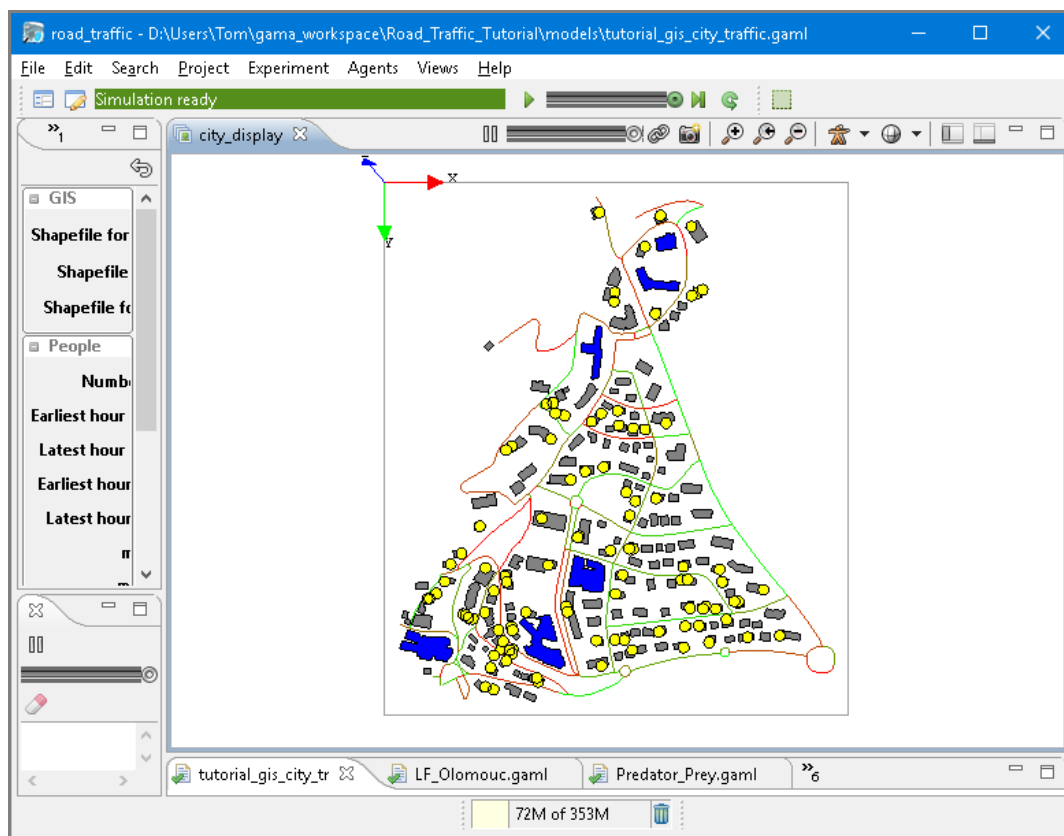
Prostor se skládá z jednotlivých vektorových vrstev. Nejčastěji se jedná o linie tvořící silniční síť pro pohyb agentů a plochy (polygony), reprezentující budovy, větší celky, nebo objekty zájmu. Hranice prostoru jsou určeny obálkou kolem vrstvy s největším rozsahem. V případě softwaru AnyLogic je hranice tvořena okrajem vybrané oblasti v GIS Map (obr. 3.24) K specifikování vlastností prostředí lze použít atributy nahráných vrstev.



Obr. 3.24 Vymezená oblast modelu v softwaru AnyLogic.

Inicializace a data

Prostor se vytvoří nahráním jednotlivých vektorových vrstev. Vrstvy jsou načteny pomocí odpovídajícího příkazu se specifikací adresáře, ve kterém se data nacházejí. Adresář by měl být ve stejné složce jako model a všechny vrstvy v něm by měly mít stejný souřadnicový systém. Nejčastěji je podporovaný pouze WGS 84 a není podporována projekce „on the fly“. Následně jsou data převedena na agenty, s možností definovat jejich vlastnosti. Ty jsou získány z hodnot atributů dat. Je nutné, aby názvy atributů i jejich hodnoty napsané v kódu odpovídaly jejich ekvivalentům v atributové tabulce nahrávaných dat. Atributy jsou nejčastěji typu text a určují kvalitativní vlastnosti prostředí. Jedná se například o typ budovy (obr. 3.25), různé objekty zájmu pro agenty nebo druh komunikace. Poslední zmíněnou vlastnost je možné kvantifikovat použitím podmínkové klauzule. Odpovídajícímu typu silnice se přiřadí rychlost určující pohyb agenta. U softwaru AnyLogic je možné pro nahrání dat použít Excel tabulku obsahující polohu určenou pomocí souřadnic, nebo názvu města, ve kterém se objekt nachází. Silniční síť je pro vybranou oblast stažena z OSM serveru nebo lze použít vlastní PBF (Protocolbuffer Binary Format) soubor.



Obr. 3.25 Importovaná data s typy budov.

Pohyb agenta v prostoru

Při inicializaci je agent obvykle umístěn do jednoho z objektů polygonové vrstvy (obr. 3.25). Pro pohyb je využíváno nahrané silniční síť. Silniční síť je potřeba převést na síťový graf. Z jednotlivých úseků vzniknou hrany grafu. Doba průchodu hranou je primárně dána délkou. Impedanci lze ovlivnit pomocí atributů při importu dat. Další možnosti ovlivnění vlastností sítě jsou možné v průběhu simulace. Jedná se například o interakce agentů s povrchem, počet agentů v jednom úseku nebo pomocí akce vykonané v každém kroku simulace. Pro výpočet nejkratší trasy po síti je nutné u některých nástrojů implementovat algoritmus. GAMA Platform a AnyLogic mají algoritmus výpočtu již zaveden. Druhý zmíněný nástroj využívá silniční data z OSM serveru, odpadají tedy i kroky nahrání a převodu na graf. Pro kontrolu vlastností sítě lze u AnyLogic vybrat jednu z nabízených možností.

Pohyb agenta se zahájí specifikací cíle a provedením odpovídající akce definované v kódu. Cílovou destinací agenta může být bod, některý z objektů v polygonové vrstvě, nebo i jiný agent. Není-li specifikováno jinak, agent si vybírá nejkratší trasu. Rychlost pohybu agenta se definuje pomocí proměnné v kódu. Výběr trasy a rychlost pohybu lze ovlivnit vlastnostmi prostředí nebo pravidly pro interakci s ostatními agenty. Interakce může probíhat skrze prostředí, mezi agenty v určité vzdálenosti, ale v případě více měřítkového modelu i uvnitř objektů.

4 PRAKTICKÉ POUŽITÍ VÝVOJOVÝCH NÁSTROJŮ

Tvorba agentně založeného modelu, je vzhledem ke komplexnosti modelovaných systémů, poměrně náročný proces. Za dobu existence ABM vznikla celá řada nástrojů s integrovaným vývojovým prostředím (IDE), grafickým rozhraním (GUI), předinstalovanými knihovnami a simulačním prostředím s možnostmi pro ovládání běhu simulace či zobrazení grafů usnadňujícím implementaci modelu. Přehled 85 nástrojů (obr. 4.1) nabízí **Abar a kol. (2017)**. Hodnocení a porovnání vlastností jednotlivých softwarů pro ABM se mimo jiných věnovali například **Kravari a Bassilades (2015)** a **Allan (2010)**. Nejčastěji používanými programovacími jazyky pro tvorbu agentně založených modelů jsou Java a C++, řada nástrojů ale používá vlastní jazyk **Macal a North (2014)**, **Crooks a Heppenstall (2017)**.

↑ Computational Modelling Strength / Models' Scalability Level	Extreme-scale	Repast HPC MATSIM, PDES-MAS, Swarm	
	High / Large-scale	Altrev Adaptive Modeler, SeSAM	AnyLogic (2D/3D), AOR Simulation, CloudSim, CybelePro, FLAME, LSD (2D/3D), MASS, Pandora, UrbanSim
			Agent Cell (2D/3D), Brahms, BSim (2D/3D), D-OMAR, Echo, Ecolab, FLAME GPU (3D), GridABM, HLA_Agent, HLA_RePast, Repast-J or Repast-3, Repast Symphony (2D/3D)
		NetLogo (2D/3D)	Ascape, CRAFTY, GAMA (2D/3D), SimEvents (MATLAB®), Simio (2D/3D), Simul8 (2D/3D)
	Medium-scale	JAS, VSEdit	Agent Factory, Breve (3D), Cormas, Envision, GALATEA, IDEA, JAMSIM, Janus, JASA, JAS-mine, MACSimJX, Mathematica® (Wolfram), Mimosa, MIMOSE, Mobility Testbed, Modgen, OBEUS, SimAgent, SimBioSys, TerraME, Xholon (2D/3D)
			MASON (2D/3D)
Light-weight / Small-scale		AgentSheets, BehaviourComposer (2D/3D), FlexSim (2D/3D)	Eve, ExtendSim (2D/3D), GROWLab, Insight Maker, Mesa
		AgentScript, Framsticks (2D/3D), JAMEL, JCASim (1D/2D/3D), JES, MOBIDYC, PedSim, PS-I, Scratch (2D/3D), SimJr, SimSketch, SOARS, StarLogo, StarLogoTNG (3D), Sugarscape, VisualBots	SEAS (2D/3D)
		Simple/Easy	Moderate Complex/Hard
		Model Development Effort →	

Obr. 4.1 Přehled nástrojů pro ABM (zdroj: Abar a kol. 2017).

Výběr prostředí pro analýzu probíhal za pomoci publikací **Macal a North (2014)**, **Crooks a Heppenstall (2017)** a konkrétně se jedná o NetLogo, Repast, GAMA Platform, AnyLogic, MatSIM, a (Geo)MASON. Hlavním důvodem pro výběr byla přítomnost podpory integrace dat z geografického informačního systému. Jednotlivé nástroje byly nainstalovány, a za pomoci dokumentace a tutoriálů byly sestaveny modely, demonstrující jejich funkcionalitu. Pro rozšíření znalostí bylo využito i příkladů modelů z několika studií.

4.1 NetLogo

Nástroj byl vytvořen výzkumnou skupinou při Severozápadní univerzitě CCL (Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling) a jeho autorem je Uri Wilensky. Využívá jazyka NetLogo a umožňuje vytvářet agentně založené modely ekologických a sociologických systémů. Součástí instalace je i knihovna modelů pokrývajících témata z biologie, geografie, ekonomie, sociologie a dalších. Poskytnuté modely lze rozšiřovat a upravovat dle potřeb vlastního výzkumu The CCL (2019).

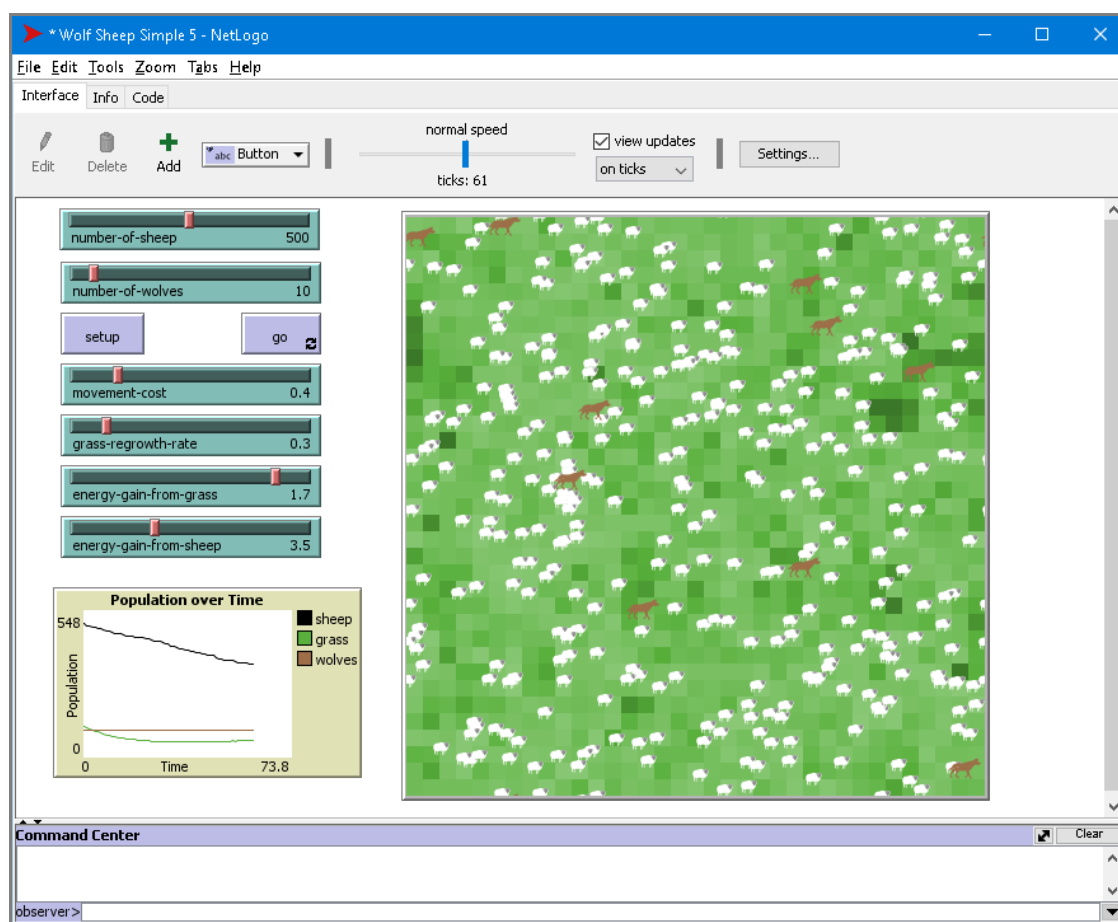
Aktuální verzi 6.0.4 i všechny předchozí lze stáhnout přímo na stránkách Netlogo (<https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>). Z důvodu chybových hlášek při konverzi je pro starší modely vhodné současně nainstalovat i verzi 5.3.1. Na stránkách lze dále nalézt návody (i v češtině), uživatelskou příručku, mailing list a odkazy na komunitní fóra. Po kliknutí odkaz Extensions je uživatel přesměrován na GitHub, kde se nachází veškeré extenze včetně popisu a možnosti stažení. Od verze 6.0.2. je celá řada rozšíření (například GIS, CSV a R) součástí instalace.

Tvorba modelu

NetLogo primárně podporuje pouze prostor typu grid. Agenty jsou nazývány turtles a buňky patches.

Vlastní model lze sestavit v záložce Code a jedná se o jeden soubor. Nejdříve se definují *breed*. Jedná se o agenty, kteří dědí proměnné patches a turtles. Následuje seznam agentů a buněk a jejich proměnných ve formátu *nazev-own*. Dále se implementuje *setup*. Jedná se o inicializaci turtles a patches s podrobným popisem vlastností (barva, tvar velikost) a proměnných. Po té se přidá část kódu *go* obsahující seznam příkazů pro chování v průběhu simulace. Nakonec se definují pravidla pro interakci a chování.

Zobrazení modelu a ovládání simulace se nachází na záložce Interface (obr. 4.2). Kromě ovládání rychlosti simulace je důležitá část *Settings*, ve které se nastavují parametry mřížky (souřadnice, velikost buňky). Praktické je zaškrtnout *view updates*, které umožňuje vypnout zobrazování změn a snížit tak nároky na výpočetní kapacitu. Grafy, ovládání parametrů, monitory a různé přepínače se nachází pod *Button*. Případné dotazy na aktuální stav konkrétní buňky nebo agenta se píší do *observer*.



Obr. 4.2 NetLogo rozhraní – Model lovec a kořist.

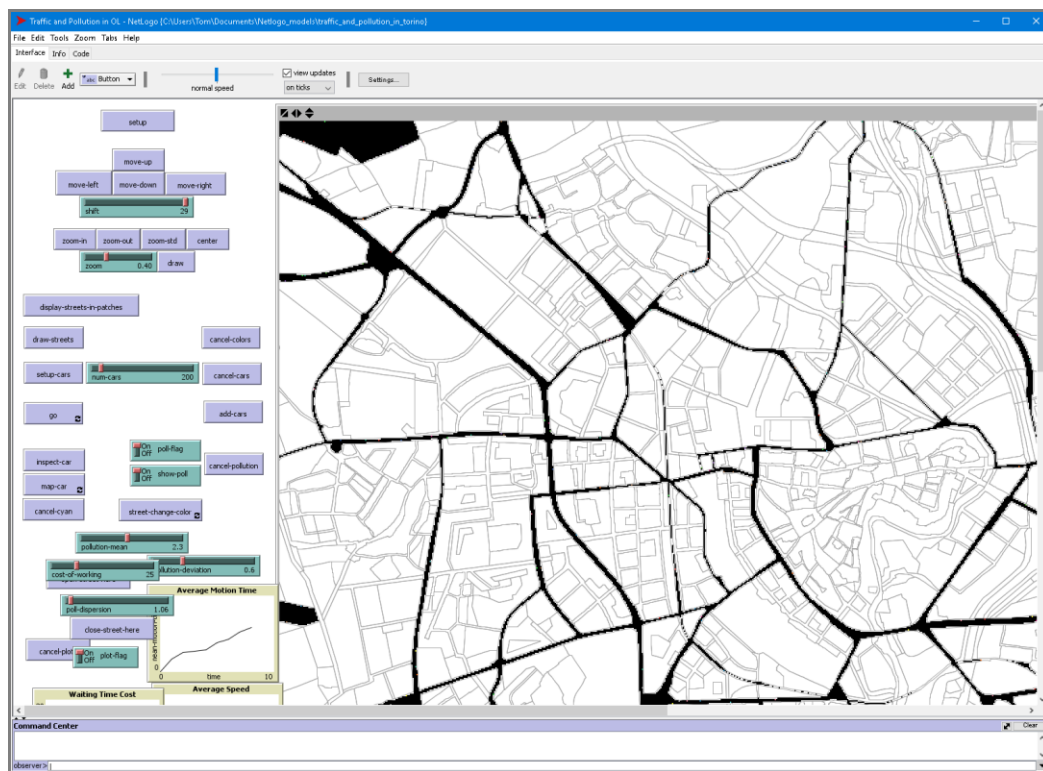
Model s integrací prostorových dat

NetLogo podporuje import rastrových formátů PNG a JPEG (Joint Picture Experts Group pro kvalitativní a kvantitativní vlastnosti prostředí. Pro nahrání je potřeba umístit daný soubor do stejné složky k modelu. Poté nastavit proceduru obsahující *import-pcolors* a daný soubor a pomocí *ask patches* určit, které barva v importovaném souboru bude odpovídat vlastnosti dané barvou v prostředí. Důležité je v části Interface nastavit správné rozměry dle importovaného obrázku, aby byla zachována dimenze prostoru, v opačném případě může dojít k změnám ve vzdálenostech mezi objekty.

Pomocí GIS Extension lze NetLogo rozšířit o podporu vektorového formátu shapefile (.shp) a rastrového formátu ASCII (.asc). Oproti původní tvorbě modelu se navíc v kódu nejdříve v části *extensions* zavede rozšíření (GIS). Následuje sekce *globals* obsahující proměnné pro data a nastavení prostředí. V *setup* je nutné přidat *set* název dat *gis:load-dataset* a soubor. V případě, že je prostředí tvořeno pouze vektorovými daty následuje *gis:set-world-envelope gis:envelope-of* a název datasetu pro vytvoření obálky prostoru. U rastrového formátu je nastavení rozměrů prostředí shodné s nahráním PNG nebo JPEG. Pro kvantitativní vlastnosti prostoru se hodnoty v uložené v ASCII souboru převedou na odpovídající barvu. Lze například využít barevných stupnic pro výšku.

I když NetLogo prostřednictvím rozšíření podporuje celou řadu funkcí pro práci s vektorovými daty (*gis:intersects?*; *gis:contains?*; *gis:centroid-of ?*), neumožňuje přímou interakci agentů s polygony, liniemi ani body. Po nahrání jsou data převedena na patches dle barev v kódu. Například využitím *gis:intersects?* lze změnit barvu všech buněk, které leží pod, nebo jsou protínány vektorovými daty na bílou barvu (budovy,

plochy s rozdílným využitím) a zbylá místa nechat černě (silnice) viz obr 4.3. Zmíněný způsob využil pro model znečištění automobilovou dopravou ve městě Turín **Alasio (2011)**. Pohyb agentů probíhá způsobem dotazu na vlastnosti buněk ležícím před ním. Pro pohyb je využíváno černých buněk, je-li vlastnost bílá, znamená to překážku a je provedeno nejdříve zastavení a pak volba nového směru.



Obr. 4.3 Vektorová data v NetLogo – Model znečištění dopravou ve městě Olomouc.

NetLogo umožňuje načíst atributy vrstvy, pokud je přítomný dbf soubor. Pomocí příkazu `gis:property-value` je přečtena hodnota, které je přiřazena barva určující následně vlastnosti buněk. Popsaný postup využil například **Zhou (2015)** u vektorové varianty Schellingova segregačního modelu.

4.2 Repast

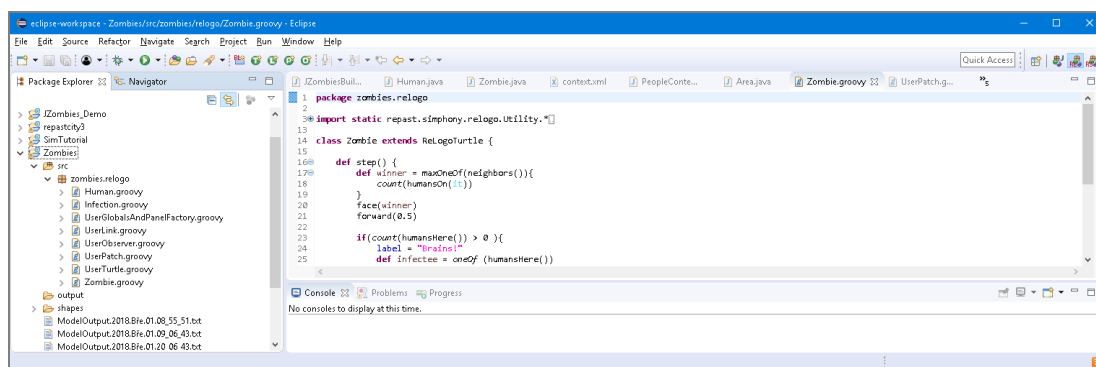
Zdarma dostupná rodina, open source agentně založených modelů a simulačních platform The Repast Suite (Recursive Porous Agent Simulation Toolkit) byla vytvořena týmem při univerzitě v Chicagu před více než 15 lety a je neustále vyvíjena. Pro vytváření modelů na desktop počítači v jazyce Java nebo ReLogo je k dispozici Repast Symphony (od 20. Listopadu 2018 ve verzi 2.6). Přítomna je i varianta pro superpočítače a velké počítačové clustery Repast for High Performance Computing 2.3.0 využívající C++.

Nástroj je možné stáhnout na stránkách (<https://repast.github.io/>). Repast využívá Eclipse IDE a pro jeho instalaci a chod je nutné mít nainstalovanou Javu verze 8 nebo vyšší. Základní dokumentace a návody jsou staženy spolu s instalačním souborem, ale jsou k dispozici i na stránkách Repast společně s podporou v podobě mailing listu a odkazu na Stack Overflow.

Tvorba modelu

Nový model lze vytvořit přes *New* a *Project*. Uživatel má na výběr z několika možností, pro modelování jsou důležité ReLogo a Repast Symphony. Použít lze Quick Access v pravém horním rohu uživatelského rozhraní výběrem ikony.

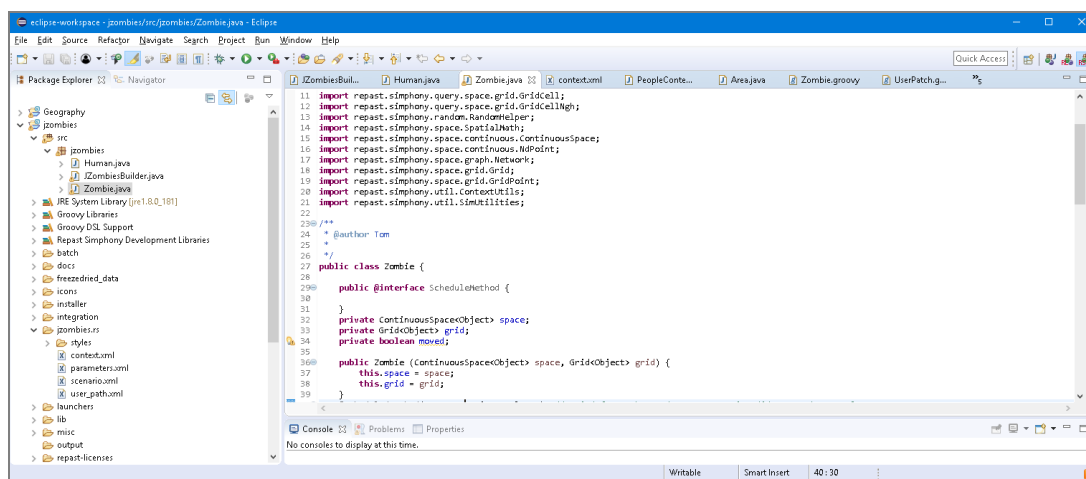
Po výběru **ReLogo** se objeví nové ikony zjednodušující práci. ReLogo, jak už název napovídá, sdílí řadu vlastností s NetLogo. Agent se vytvoří po kliknutí na ikonu T (*New turtle*). Po přiřazení jména vznikne agent, kterému lze přiřadit vlastnosti a pravidla pro chování a interakci. Inicializace a chod simulace se nastavuje v *observer* pomocí příkazů *Setup* a *Go*. Dynamicky vytvořenou síť vazeb mezi agenty lze vytvořit pomocí ikony L (*New link*). Grafické prvky, ovládání parametrů simulace a další se nastavují v *UserGlobalsAndPanelFactory.groovy*. Simulace se spustí pomocí ikony *Run*.



Obr. 4.4 Uživatelské rozhraní Repast ReLogo.

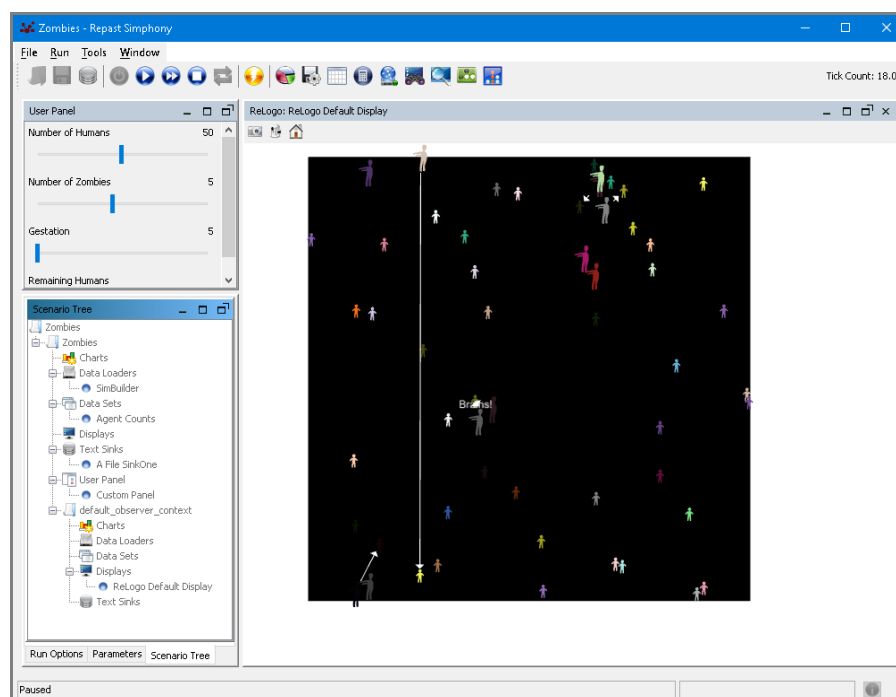
Pro vytvoření nového agenta v **Repast Symphony** se v *New* zvolí *Class*. Dalším krokem je umístění agenta do prostoru zavedením proměnných polí *ContinuousSpace* a *Grid*. Kromě příslušného kódu je nutné pohlídat si správný *import* (buď nabídnut automaticky při napsání, nebo po kliknutí pravým tlačítkem na proměnné pole a výběru *Source*). Následuje příslušný kód pro chování a interakci agentů.

Pro inicializaci simulace je u Repast Symphony nutné zavést třídu *ContextBuilder*. Zde se nastavují parametry prostředí (grid a spojitý prostor) a také umístění a počet agentů na začátku simulace. Nakonec je potřeba aktualizovat metadata v *context.xml* a zde přidat elementy projekce pro grid a spojitý prostor.



Obr. 4.5 Uživatelské rozhraní Repast Symphony.

Grafické rozhraní kromě zobrazovacího okna obsahuje ikony pro kontrolu simulace a rozšíření (obr. 4.6). Pod záložkou *Scenario Tree* se nachází možnosti pro nastavení exportu. Nejčastěji se jedná o textový soubor obsahující informace o počtu kroků a přítomných agentů, případně další sledované veličiny.



Obr. 4.6 Grafické rozhraní pro běh simulace v Repast Simphony – Model zombie apokalypsy.

Model s integrací prostorových dat

V Repast Simphony probíhá integrace s GIS prostřednictvím *Geography projection*, využívající pro import dat Geo tools a Java Topology Suite. Kromě formátu shapefile jsou podporovány i rastrové formáty GeoTIFF, ArcGrid a soubory World image. Agenty jsou ukládány dle typu geometrie (Repast Simphony Reference Manual, 2018).

Pro asociaci agenta s prostorem je nejdříve nutné zavést odpovídající kontext například dle následujícího kódu.

```
Context context = ContextUtils.getContext(this);
Geography<GisAgent> geography =
    (Geography)context.getProjection("Geography");
```

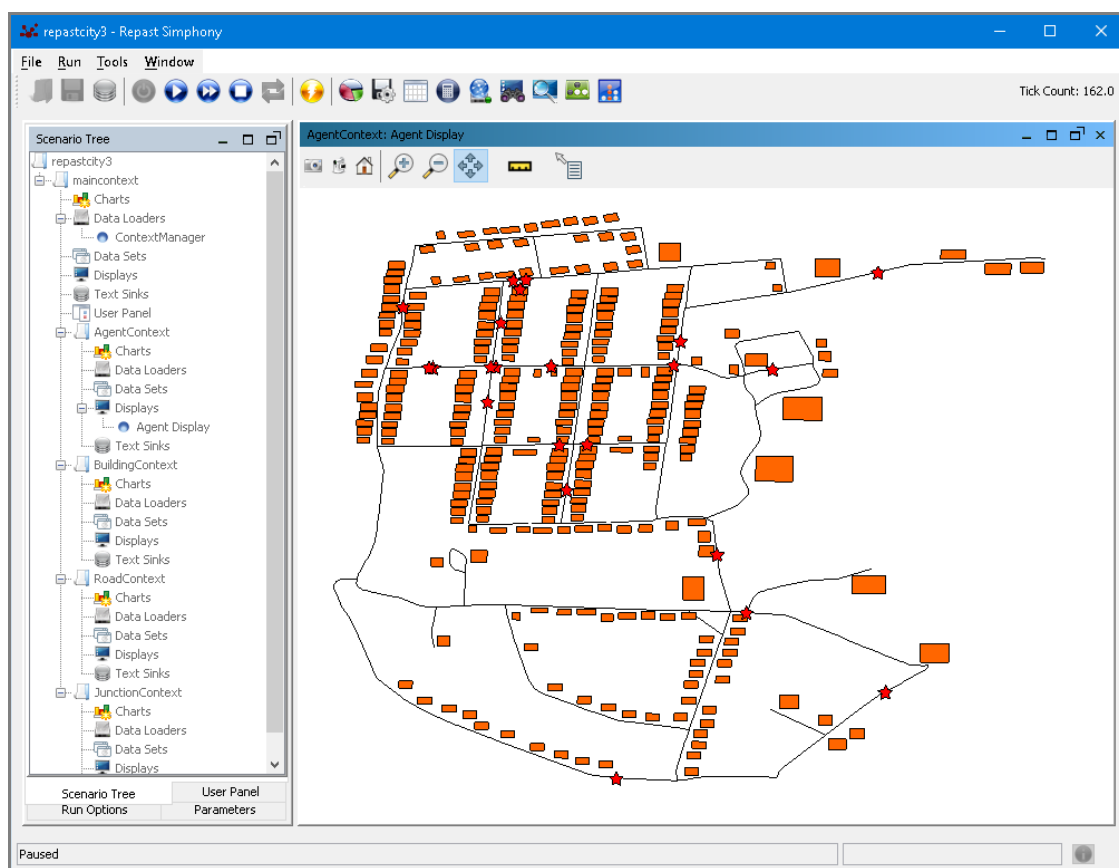
V třídě *ContextBuilder* se přidá níže uvedený kód.

```
GeographyParameters geoParams = new GeographyParameters();
Geography geography =
    GeographyFactoryFinder.createGeographyFactory(null).createGeography("Geo
    graphy", context, geoParams);
GeometryFactory fac = new GeometryFactory();
```


Nakonec se přidá `<projection id="Geography" type="geography" />` do `context.xml`. Ve všech třídách se nesmí zapomenout na odpovídající import. Většinou se nabídne při psaní kódu. Může se ale stát, že má uživatel na výběr z několika variant s rozdílnou funkcionalitou. Pro seznam nejdůležitějších autor doporučuje využít *Import Repast Examples*, vybrat projekt Geography a prozkoumat třídu *ContextCreator.java*.

K načtení dat ve formátu Shapefile je využíváno Geo tools API. Kód lze nalézt například v Repast Symphony Reference Manual. Umožněn je i export prostřednictvím extenze v okně simulace se po kliknutí na odpovídající ikonu uloží aktuální souřadnice agentů.

Pro podrobnější seznámení s možnostmi práce s daty z geografického informačního systému v Repast Symphony autor odkazuje na již zmíněný projekt Geography. Příkladem využití funkcionality GIS je Repast City skládající se z budov, silniční sítě a pohybujících se agentů (obr. 4.7), vytvořený Nickem Mallesonem. Model lze stáhnout z GitHub (<https://github.com/nickmalleson/repastcity>).



Obr. 4.7 GIS funkcionalita v Repast Symphony – Model Repast City.

4.3 MASON

Jedná se o open source multiagentní a simulační knihovnu postavenou na jazyku Java. MASON znamená „Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods... or Networks... or something...” a byl vytvořen Evolutionary Computation Laboratory (ECLab) a Center for Social Complexity George Masonovy univerzity (GMU). Aktuální verzi i všechny předchozí lze stáhnout přímo na stránkách MASON (<https://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason/>). Dodatečně musí být staženy knihovny pro podporu grafů, tvorbu videí a generování pdf. Základní rozšíření (například

GeoMason) se nacházejí v Extensions. Pod záložkou help je k dispozici manuál od S. Luka, odkaz na základní dokumentaci a mailing list. Úvodní návod je k dispozici online a slouží pro seznámení s prostředím. Příklady modelů s popisem jak je sestavit lze najít po stažení instalačního souboru v podsložce \sim\app.

Tvorba modelu

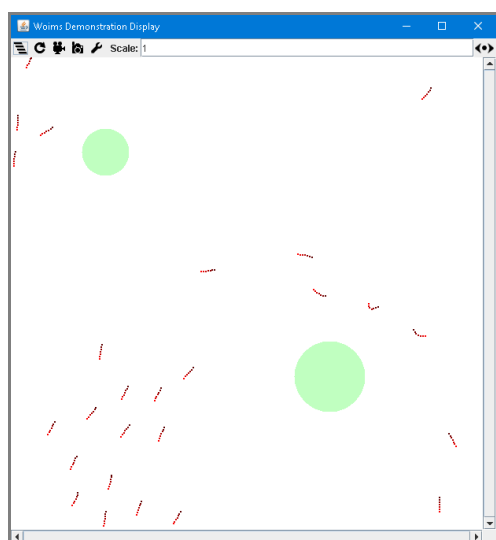
Model lze vytvořit v kterémkoliv textovém editoru (například PSPad). Nejdříve se v `sim/app/název` složky vytvoří soubor **NázevModelu.Java** a v něm se pomocí kódu zavede `sim.engine.SimState`, což je základní třída obsahující veškeré informace o modelu. Dále se specifikuje typ prostředí a jeho rozměry (`IntGrid2D grid;`). Obojí vyžaduje odpovídající import (`sim.engine`, `sim.field.grid`). Nakonec se přidá metoda `start()`, do které se uvedou všechny složky modelu pro inicializaci.

Pro nastavení agenta se vytvoří druhý soubor **NázevAgentu.Java**, který obsahuje kromě vlastností a chování a počátečních souřadnic také odkaz na zmíněný grid. Každý další agent vyžaduje svůj vlastní soubor se všemi náležitostmi.

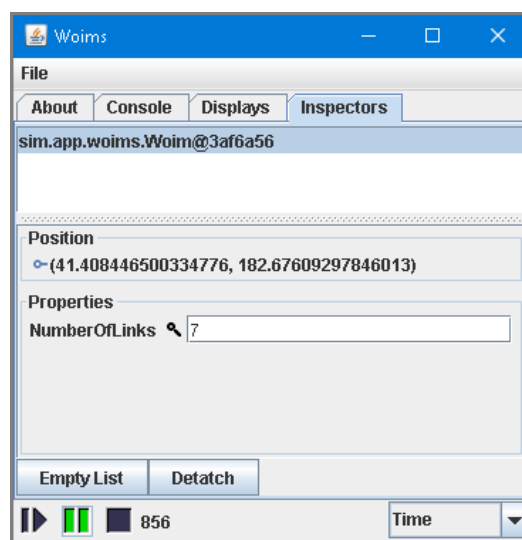
Pro vykreslování objektů MASON využívá `sim.portrayal.Portrayal`. Prostřednictvím tohoto objektu lze prostředí a agentům přiřadit barvu. Pro běh simulace je důležitý `sim.display.Controller`, v něm se mimo jiné nastavují rozměry zobrazovacího okna. Specifikace rozhraní může být součástí `NázevModelu.Java`, ale z důvodu přehlednosti je lepší vytvořit soubor **NázevModeluUI.Java**.

Poskytnuté modely jsou již zkompileované a grafické rozhraní s ovládáním simulace se zapne po napsání odpovídajícího jména třídy do řádku okna New Simulation, které se zobrazí po spuštění `mason.bat`. Vlastní modely je ale nutné před spuštěním simulace nejdříve zkompileovat.

Simulace se skládá ze dvou oken. Jedno slouží pro vykreslování (obr. 4.8) a obsahuje i možnost pořídit video nebo snapshot, druhé obsahuje popis modelu, ovládání simulace, ovládání zobrazení a inspektora (obr. 4.9), ve kterém lze zobrazit informace o agentech a grafy.



Obr. 4.8 vykreslovací okno pro simulaci.



Obr. 4.9 ovládání a inspektor pro simulaci.

Model s integrací prostorových dat

Podporu pro vektorová a rastrová data lze přidat použitím rozšíření **GeoMason**, na jehož stránky se lze dostat přes odkaz v extenzích. Nativně je podporován import a export formátu shapefile pomocí tříd *ShapefileImporter* a *ShapefileExporter*. Pro práci s geometrií je využíváno Java Topology Suite. Zavedením knihoven GeoTools a GDAL/OGR lze použitím tříd *GeoToolsImporter*, *GDALImporter* a *OGRImporter* rozšířit podporu o celou řadu rastrových a vektorových formátů (PosGIS, GML, KML, GeoTIFF...). Na stránkách se nachází i odkaz na GeoMason Cookbook **Coletti (2013)** obsahující návody pro práci s GeoMason, které byly použity v následujícím textu.

Shapefile lze do nástroje GeoMason nahrát pomocí následujícího kódu bez potřeby instalace dalších rozšíření

```
private final int WIDTH = 250;
private final int HEIGHT = 250;

GeomVectorField vectorField = new GeomVectorField(WIDTH, HEIGHT); try {
ShapefileImporter.read("file:name.shp", vectorField);
...
}
```

Nejdříve se nastaví rozměry pro zobrazení pro simulaci. Následuje vlastní načtení souboru. Pro použití více vrstev se stejným souřadnicovým systémem stačí rozkopírovat výše zmíněné řádky kódu a změnit příslušné názvy. Pro načtení atributů se používá *Bag()*, který se po specifikaci přidá do *ShapefileImporter.read*. Ke geometrii se atributy připojí prostřednictvím *get*Attribute()*. Pro načtení rastrových dat formátu ASCII je nutné vytvořit *GeomGridField* a *InputStream* a použít *ArcInfoASCGridImporter()*. Při kombinaci vektorových a rastrových vrstev je využíváno obálek minimum bounding rectangle (MBR). Export vrstev probíhá pomocí *ShapefileExporter.write("name", vectorField)*; pro vektorová data a *ArcInfoASCGridExporter.write(gridField, writer)*; pro rastr. Pro nastavení chování, interakce, pohyb agentů a další GIS funkce dle potřeb konkrétní situace autor odkazuje na kódy ukázkových modelů (geomason demos), které lze stáhnout ze stránek GeoMason.

4.4 GAMA Platform

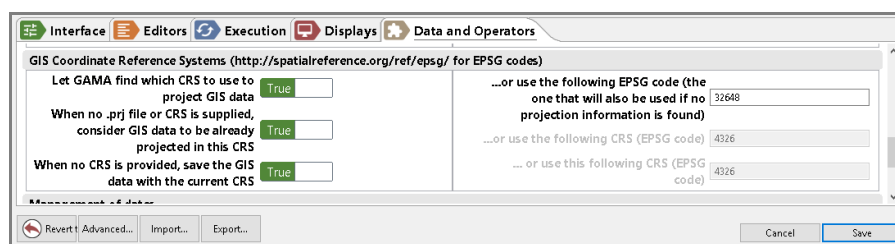
Jedná se o open source vývojářské prostředí, které bylo speciálně vytvořené pro prostorové agentně založené modely a simulace. Nástroj GAMA Platform byl vyvinut mezinárodním týmem UMMISCO (Unit for Mathematical and Computer Modeling of Complex Systems). Pro implementaci modelů využívá vlastní jazyk **GAML** (GAMA Modeling Language), vycházející z jazyka Java, ale uzpůsobený pro implelencaci ABM. I s ohledem na význam zkratky GAMA (**GIS Agent-based Modeling Architecture**), je samozřejmostí nativní podpora řady vektorových a rastrových formátů včetně dat z Open street map. Prostřednictvím rozšíření lze přidat podporu R nebo propojení s databází (SQLite, MySQL Server, PostgresSQL Server, SQL Server...). Software lze zdarma stáhnout na stránkách (<https://GAMA-platform.github.io/>) pod záložkou Download. Dostupná dokumentace obsahuje základní návody pro práci s GAMA a recepty pro zavedení extenzí a pokročilou funkcionalitu. Pro vývoj modelů je důležitý návod Learn GAML step by step obsahující vysvětlení a příklady využití veškeré funkcionality jazyka GAML. V tutoriálech se uživatel seznámí s mimo jiné implementací

gridu, načtením rastrových a vektorových dat, integrací s GIS pro pohyb agentů v prostředí, 3D modelováním a dokonce způsobem jak sestavit více měřítkový model a implementovat Belief-Desire-Intention chování.

Model s integrací prostorových dat

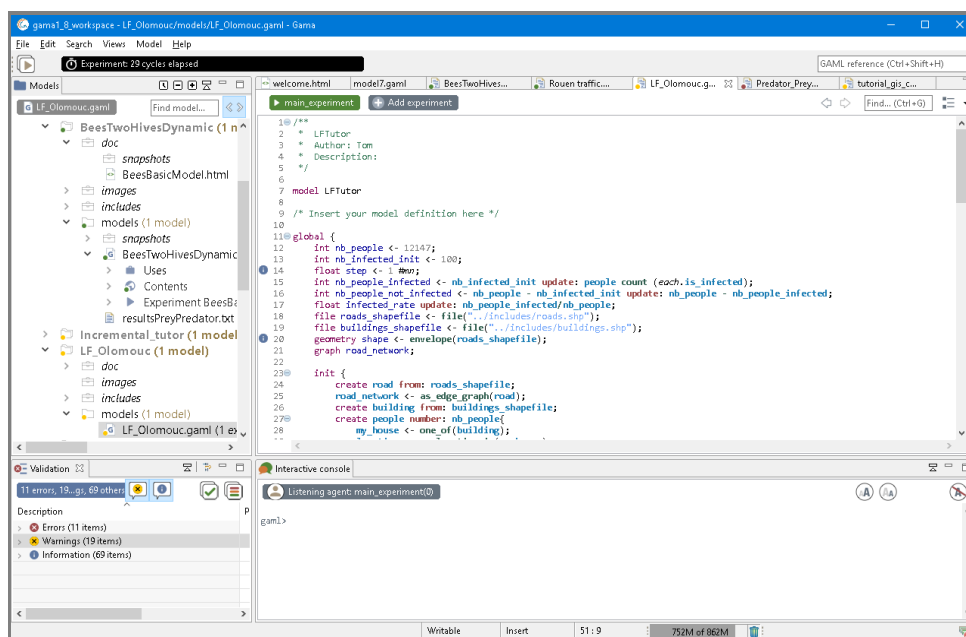
Při spuštění softwaru je uživateli nabídnuta volba, kde má být vytvořena složka *gama_workspace* nebo zda má být využita již existující. V této složce jsou ukládány všechny GAMA projekty. Nový projekt se založí buď přes File nebo kliknutím pravým tlačítkem do okna *models*, pak se zvolí *New* a *GAMA Project*. Vytvořen je model, dále složka pro rastrová data *images*, složka pro vektorová data *includes*, *doc* pro popis modelu a složka *models* obsahující vlastní model, snaphshoty a případné výstupy.

Následující postup pro verzi 1.8, využívající tutoriály na stránkách GAMA Platform, popisuje způsob implementace a práce s rastrovými nebo vektorovými daty dostupnými v České republice. Souřadnicový systém lze nastavit v *preferences* v části *Data and Operators* nacházející se pod *help*. Jak lze vidět na obrázku 4.10, nástroj GAMA použije zde specifikovaný souřadnicový systém, není-li přítomný soubor *prj*.



Obr. 4.10 Nastavení souřadnicového systému v GAMA.

Model se skládá z jednoho souboru *NazevModelu.gaml* a sestavuje je v modeling perspective (obr. 4.11). Neobsahuje-li model chyby, lze ho spustit v horní části okna pomocí ikony pro run jméno *_experimentu*.



Obr. 4.11 Modeling perspective GAMA.

V úvodní části kódu nazvané *global* se založí agenty, proměnné, chování a akce pro celý model. Pro nahrání dat se používá příkaz *file* a následuje cesta k datům včetně

jejich názvu. U vektorových dat se rozměry prostředí nastaví pomocí *geometry*, které se přiřadí *envelope* vrstvy s největší rozlohou. Pro pohyb agentů se specifikuje ohodnocený graf vycházející z importovaných vektorových dat. Software si bez větších problémů poradí i s poměrně podrobnou silniční sítí a objekty budov většího města.

Rastr

```
file map_init <- image_file("../images/beeElevData27.PNG");
```

Vektor

```
file roads_Shapefile <- file("../includes/roads.shp");
file buildings_Shapefile <- file("../includes/buildings.shp");
geometry shape <- envelope(roads_Shapefile);
graph road_network;
```

V podsekcí *global* nazvané *init* se specifikuje počet a pomocí *one_of* umístění agentů do prostoru. U rastru se uvedou rozměry a vzorec pro převod barev na kvantitativní vlastnosti prostředí. Rozměry by měly co možná nejvíce odpovídat rozměrům importovaného souboru. S rostoucí velikostí značně narůstají nároky na výpočetní výkon. Pro vektorová data se při vytváření objektů s vlastnostmi z shp přidá *with* následuje typ a název atributu a jeho hodnota. Následně je vytvořen seznam objektů rozčleněný dle daného typu. Z Shapefile silnic je vytvořen ohodnocený graf.

Rastr

```
matrix init_data <- map_init as_matrix {202,202};
ask elevation_cell {
  color <- rgb (init_data[grid_x,grid_y]) ;
  elev <- 1 - (((color as list)[0])/255); }
```

Vektor

```
create building from: shape_file_buildings with:
[type::string(read("BuildingType"))];

list<building> residential_buildings <- building where
(each.type="Residential");
list<building> industrial_buildings <- building where
(each.type="Industrial");

create people number: nb_people{
  living_place <- one_of(residential_buildings);
  location <- any_location_in (living_place);

create road from: roads_Shapefile;
road_network <- as_edge_graph(road);
```

Následuje definice jednotlivých agentů jejich vlastností, pravidel pro chování a interakci. Pro pohyb agentů v prostředí je nutné znovu specifikovat rozměry, nastavit typ sousedství, přiřadit hodnotu jevu vypočtenou z barvy jednotlivým buňkám a vytvořit seznam sousedů. Dále se agentovi přiřadí umístění a akce pro pohyb. U vektoru stačí u chování agenta specifikovat cíl a způsob přesunu pomocí ohodnocené sítě získané ze souboru formátu shapefile obsahujícím silniční síť.

Rastr

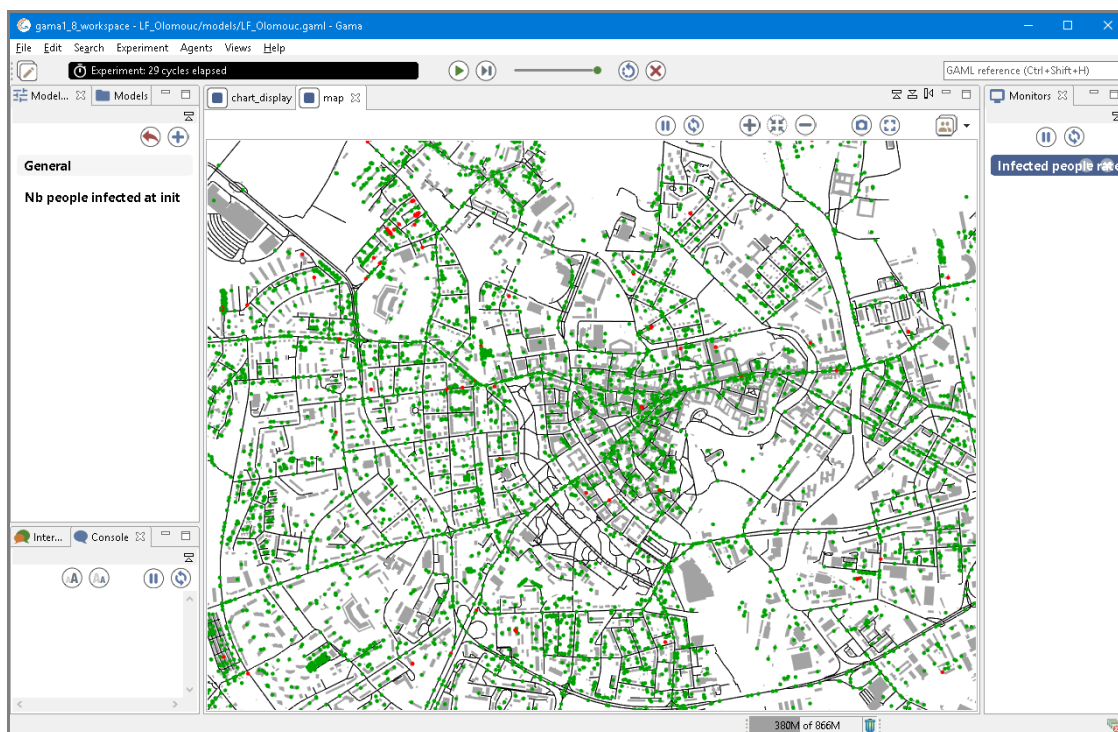
```
grid elevation_cell width: 202 height: 202 neighbors:8 {  
float elev <- 1 - (((color as list)[0])/255);  
list<elevation_cell> neighbours <- self neighbors_at 1;  
  
elevation_cell myCell <- one_of (elevation_cell);  
  
myCell <- choose_cell();  
location <- myCell.location;
```

Vektor

```
do goto target:target on: road_network;
```

Poslední část se nazývá *experiment* a obsahuje možnost přidat parametry, grafy, monitory a podobně. V podsekcí *display* se nastaví, co se má vykreslovat při simulaci.

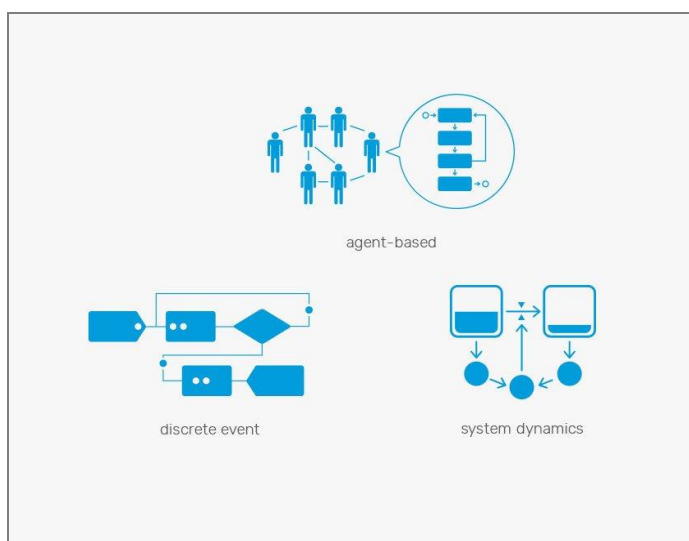
Pro běh modelu je využívána *simulation perspective* (obr. 4.12). Obsahuje základní ovládání simulace i zobrazovacího okna. Zoom a pan je možný i pomocí myši. Dotazy na aktuální stav agenta s dalšími možnostmi se provedou kliknutím pravým tlačítkem myši na příslušného agenta. Průběh simulace se zobrazuje v záložce *map*. Pokud byly nadefinovány grafy a monitory jsou přítomny ještě záložky *Display charts* a *Monitors*.



Obr. 4.12 Simulation perspective GAMA Platform – Model šíření epidemie ve městě Olomouc.

4.5 AnyLogic

Software byl vytvořen AnyLogic Company primárně pro využití v obchodním prostředí a umožňuje kombinovat více simulačních metod (obr. 4.13). Jednou z nich je agentní modelování. Dále obsahuje řadu předinstalovaných knihoven specifického zaměření, podporuje spouštění a sdílení simulací prostřednictvím cloud. Kromě vlastní databáze lze nástroj AnyLogic díky data interoperabilitě propojit s většinou databázových systémů. Jedná se sice o placený software. Pro studenty a začátečníky je však k dispozici zdarma ve verzi Personal Learning Edition (PLE). Nástroj je dostupný na následující adrese (<https://www.AnyLogic.com/purchase/>). Po vyplnění formuláře může uživatel využívat PLE po neomezeně dlouhou časovou dobu. Nepřístupné jsou některé knihovny, nelze používat externí databáze a omezený je přístup do cloudového prostředí. Nicméně autor práce shledává verzi zdarma postačující pro vytváření a používání agentně založených modelů. Na stránkách lze pod Resources najít dokumentaci a podporu, v podobě odkazů na komunitní fóra. Dokumentace obsahuje kompletní přehled všech funkcí včetně jejich popisu a návody pro jednotlivé simulační metody a knihovny.

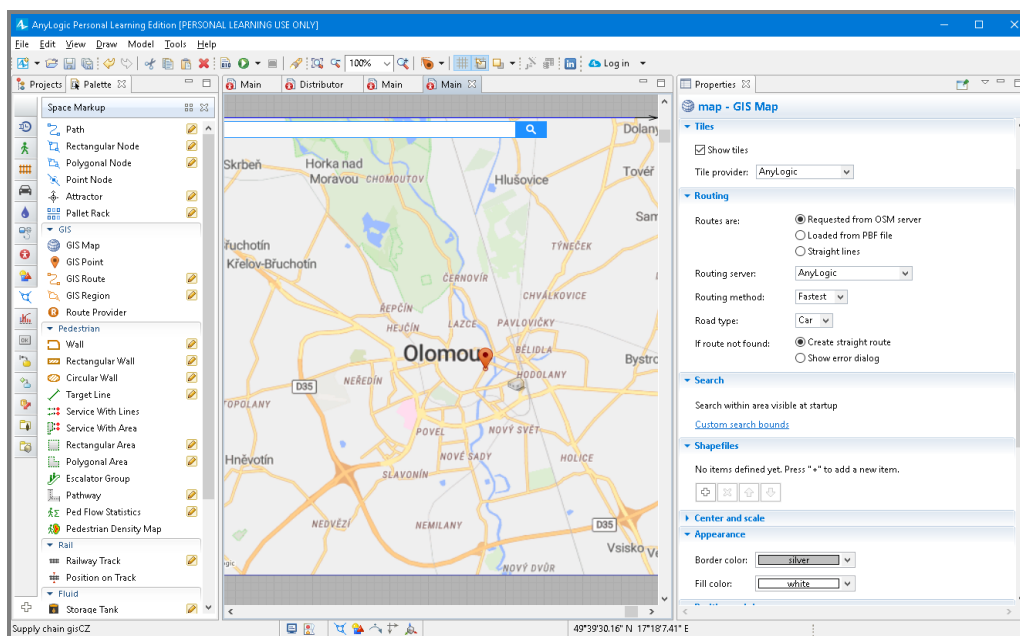


Obr. 4.13 Metody pro modelování v AnyLogic (Zdroj: <https://www.anylogic.com/>).

Model s integrací prostorových dat

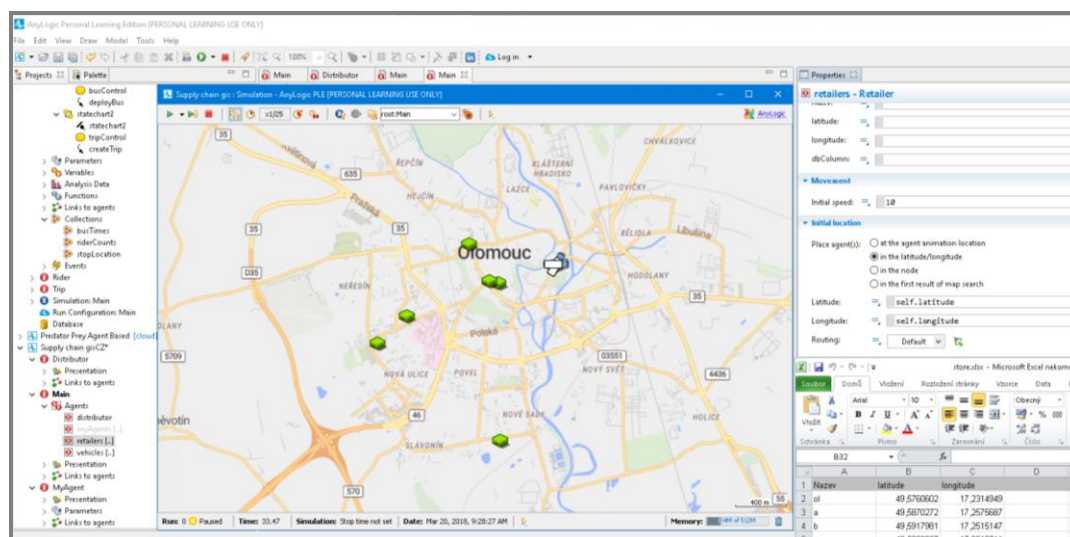
Po spuštění je uživateli v úvodní obrazovce nabídnuto *Create model*, kde se specifikuje název, adresář a Java package, i poslední zmíněný musí být unikátní, jinak může dojít k přepsání jiného modelu. Pro Implementaci modelů je využíváno jazyku Java a stavových diagramů a „drag and drop“ elementů z *Palette view*.

Pro vytvoření prostředí je nejprve nutné přidat *GIS Map* (obr. 4.14), která se nachází v *Palette view* v sekci *SpaceMarkup*. Ve vytvořeném obdélníku se vybere prostor, který bude sloužit pro model. U *GIS Map* se dále nastavuje poskytovatel dlaždic, odkud bude načtena silniční síť (OSM Server nebo vlastní PBF soubor) a dále algoritmus výpočtu trasy (AnyLogic nebo vlastní a zda má být vypočtena nejkratší nebo nejrychlejší trasa). Zde je možné i nahrát vlastní soubor ve formátu shapefile, sloužící hlavně pro liniová data pro převod na silniční síť nebo železnici, přidat lze ale i polygony. Tímto způsobem je přenesena pouze geometrie bez atributů.



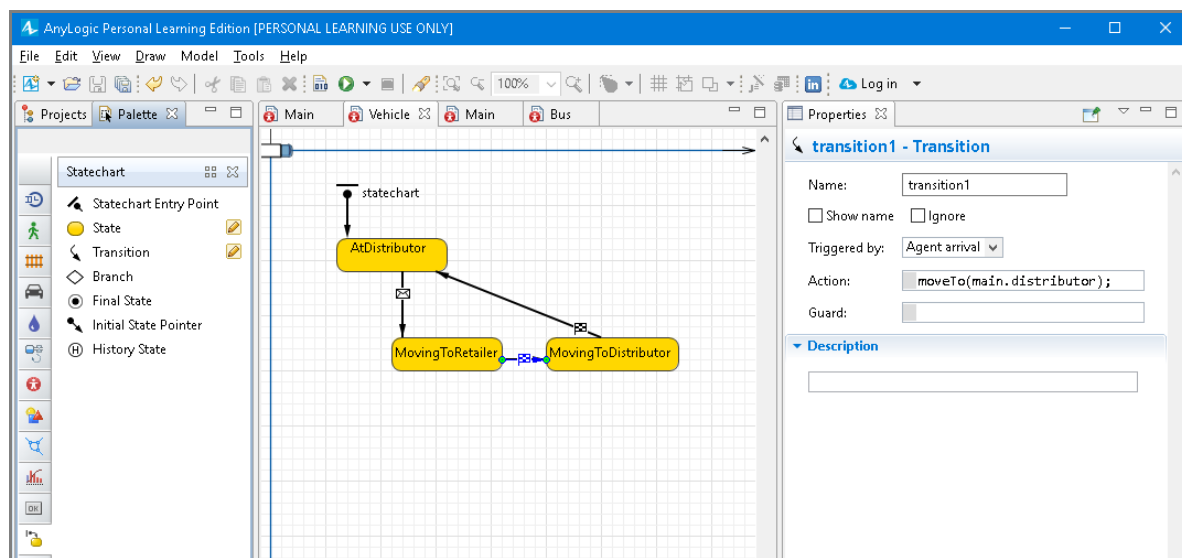
Obr. 6.14 Nastavení prostředí v AnyLogic pomocí GIS Map.

Pro vytvoření agenta se opět v *Palette view*, tentokrát v sekci Agent vybere Agent a přetáhne se do okna. V další kroku je nabídnuta volba zda se jedná o populaci agentů (pohybující se agenti, body zájmu...), jednoho agenta (například cílový nebo výchozí bod pro všechny agenty), nebo pouze typ agenta. Po výběru populace je v třetím kroku pro možnost importovat vlastní data nutné zvolit *Use database table*. Následuje výběr souboru, který má být nahrán. Kromě atributů vlastností budoucího agenta se pomocí excel tabulky určuje i inicializační poloha, buď ve formě souřadnic (sloupceky latitude a longitude s číselnými hodnotami s desetinnou čárkou) nebo jako adresa. Aby se nevyskytla chyba oznamující, že soubor nebyl nalezen, musí být AnyLogic spuštěn s právy administrátora. V *Projects* u *Properties* vytvořeného agenta se v části *Initial location* zaškrtně *Place agent(s): in the latitude/longitude* a u *Latitude* a *Longitude* se napíše *self.latitude* a *self.longitude*. Získané lokace včetně nastavení je možno vidět na obrázku 4.15.



Obr. 4.15 Inicializace a umístění agentů ze souboru – Model distribuční sítě v Olomouci.

Pohyb a chování agentů se v AnyLogic sestavuje pomocí stavových diagramů (obr. 4.16) u příslušného agenta. V *Palette view* v sekci *Statechart* se nejdříve umístí *Statechart Entry Point* a na něj se napojí počáteční stav *State*. Pomocí *Transition*, přechází agent z jednoho stavu do druhého. V části přechodové funkce nazvané *Action* se udávají pravidla pro chování mezi jednotlivými stavy. Pro pohyb se používá *moveTo(main.agentname)*; Stavový diagram musí být uzavřen, což znamená, že z posledního stavu vede spojnice do úvodního, pokud není použit *Final State*.



Obr. 4.16 Nastavení chování agenta v AnyLogic.

4.6 MATSim

Jedná se o Java open source framework k vytváření agentně založených simulací velkého měřítka v oboru dopravy. MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) je zdarma ke stažení na stránkách (<https://www.matsim.org/downloads/>). Pro seznámení se softwarem jsou k dispozici ukázkové modely a návod jak je spustit. Podrobnější informace lze nalézt v publikaci **Horní a kol. (2016)**. Jako uživatelská příručka pro nové uživatele slouží výběr kapitol ze zmíněné publikace a lze ji najít na stránkách MATSim v části dokumentace. Samotný software slouží pouze pro výpočet a vytvoření simulace ze souborů xml. Pro zobrazení je nutné stáhnout a nainstalovat software Via od společnosti Simunto (<https://www.simunto.com/via/>). K dispozici je licence zdarma omezená na šest měsíců, ale především umožňující pouze 500 agentů v jedné simulaci, což prakticky znemožňuje využití softwaru MATSim pro simulaci dopravy velkých měřítek. Licence s neomezeným počtem agentů pro univerzity a komerční využití jsou placené. Pro akademickou sféru stojí 12 měsíční 1000 euro a pro komerční využití se platí 4000 euro za první licenci, za obnovu 2500 euro, nepočítají-li se pluginy.

Model s integrací prostorových dat

Model se skládá ze tří xml dokumentů. Network.xml (obr. 4.17) obsahuje uzly a hrany sítě a jejich vlastnosti. Druhý soubor (obr. 4.17) se skládá z agentů a jejich plánů v podobě začátku a konce pohybu a typu přepravy. V dokumentu Config.xml se specifikují parametry simulace a slouží pro propojení agentů a silniční sítě.

```

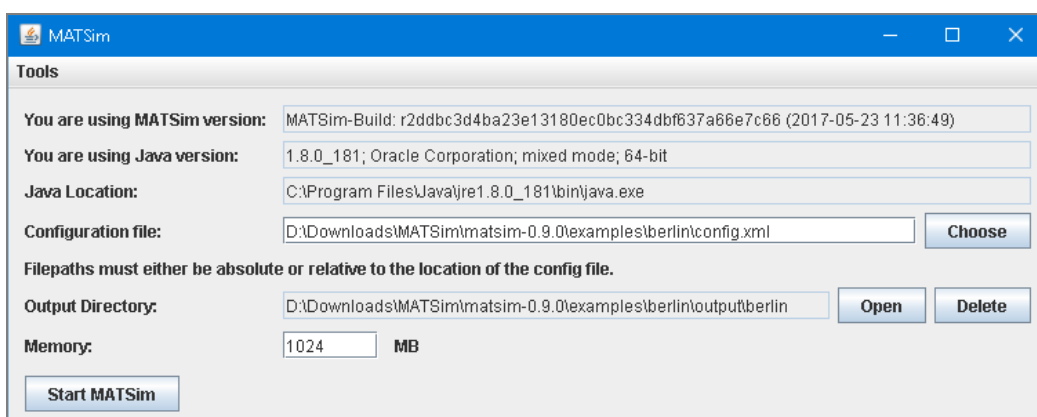
<network name="example network">
  <nodes>
    <node id="1" x="0.0" y="0.0"/>
    <node id="2" x="1000.0" y="0.0"/>
    <node id="3" x="1000.0" y="1000.0"/>
  </nodes>
  <links>
    <link id="1" from="1" to="2" length="3000.00" capacity="3600"
      freespeed="27.78" permlanes="2" modes="car" />
    <link id="2" from="2" to="3" length="4000.00" capacity="1800"
      freespeed="27.78" permlanes="1" modes="car" />
    <link id="3" from="3" to="2" length="4000.00" capacity="1800"
      freespeed="27.78" permlanes="1" modes="car" />
    <link id="4" from="3" to="1" length="6000.00" capacity="3600"
      freespeed="27.78" permlanes="2" modes="car" />
  </links>
</network>

<population>
  <person id="1">
    <plan selected="yes" score="93.2987721">
      <act type="home" link="1" end_time="07:16:23" />
      <leg mode="car">
        <route type="links">1 2 3</route>
      </leg>
      <act type="work" link="3" end_time="17:38:34" />
      <leg mode="car">
        <route type="links">3 1</route>
      </leg>
      <act type="home" link="1" />
    </plan>
  </person>
  <person id="2">
    <plan selected="yes" score="144.39002">
      ...
    </plan>
  </person>
</population>

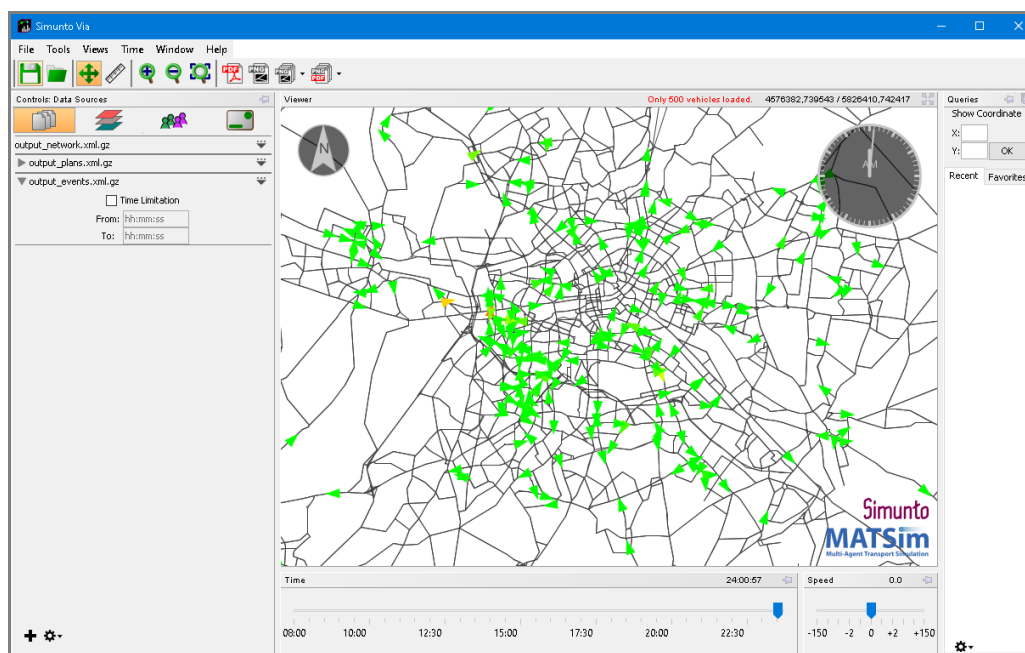
```

Obr. 4.17 Soubory obsahující prostředí a agenty pro MATSim (zdroj: Horni a kol. 2016).

Pro vytvoření sítě xml z celé řady vektorových formátů lze použít software NETCONVERT dostupný na (<http://sumo.dlr.de/wiki/NETCONVERT>). Vlastní simulace pomocí souboru Config.xml probíhá v nástroji MATSIM (obr. 4.18). Vizualizace v softwaru Via (obr. 4.19) využívá výstupů z výpočtu konkrétně soubory network.xml a events.xml.gz.



Obr. 4.18 Prostředí MATSim.



Obr. 4.19 Vizualizace v softwaru Via – Model dopravy města Berlín.

5 SIMULACE KAPACITY AUTOBUSOVÉ DOPRAVY

Problematikou vytíženosti autobusových spojů v dopravní špičce se zabýval **Sprogis (2016)**. Pomocí agentně založeného modelu implementovaného využitím nástroje AnyLogic autor demonstruje problémy související s jízdním řádem. Po určité době dochází v systému k tzv. „Bus Bunching“ neboli vytváření shluků autobusů. Důvodem je vysoký počet cestujících směřujících do nebo z přestupních uzlů v určitém časovém úseku. Výsledkem je, že první autobus, který jede danou linku, se zpožďuje a je přeplněný. Následující spoj jede skoro prázdný a v některých případech může „dohnat“ předchozí autobus. Model je k dispozici na GitHub (<https://github.com/dsprogis/Bus-Simulation>).

Na základě spolupráce s Koordinátorem Integrovaného dopravního systému Olomouckého kraje (KIDSOK) byla připravena modelová úloha popsaná v následujících podkapitolách. Příklad slouží pro ověření aplikovatelnosti ABM pro simulace kapacity autobusové dopravy v České republice a zároveň může posloužit jako návod pro případné uživatele.

5.1 Úpravy modelu dle konkrétní aplikace

Pro spuštění modelu je nutné mít nainstalovaný software AnyLogic, způsob práce s tímto nástrojem je popsán v podkapitole 4.5. Po přidání projektu „Test15“ je vhodné před provedením úprav udělat kopii. V nabídce Save Model as se nesmí opomenout změnit i Java package jinak může dojít k přepsání vstupních dat a parametrů. Následně se do GIS Map přidají souřadnice zastávek, buď pomocí shp nebo xls tabulky. Model využívá pro stanovení trasy GIS Points, které je nutné ve správném pořadí zanést do mapy na místo nahraných bodů. Následně se zvolí Main -> Agents -> buses a u Initial location se položce Node přiřadí výchozí GIS Point pro inicializaci autobusů. Stejný postup se zopakuje u Main -> Agents -> trips. Poté je potřeba v části Main -> Collections -> stopLocation smazat původní Initial contents a přidat ve správném pořadí zastávky tvořící linku.

Z parametrů ovlivňujících simulaci, lze počet autobusů určit v Main -> Agents -> buses v části Initial number of agents. Jejich kapacita se stanovuje v Main u proměnné maxBusCapacity. Počáteční intervaly mezi autobusy se nastavují v Main -> Statecharts a statechart2 tripControl, kde u createTrip – Transition nastaví Timeout s požadovanou hodnotou.

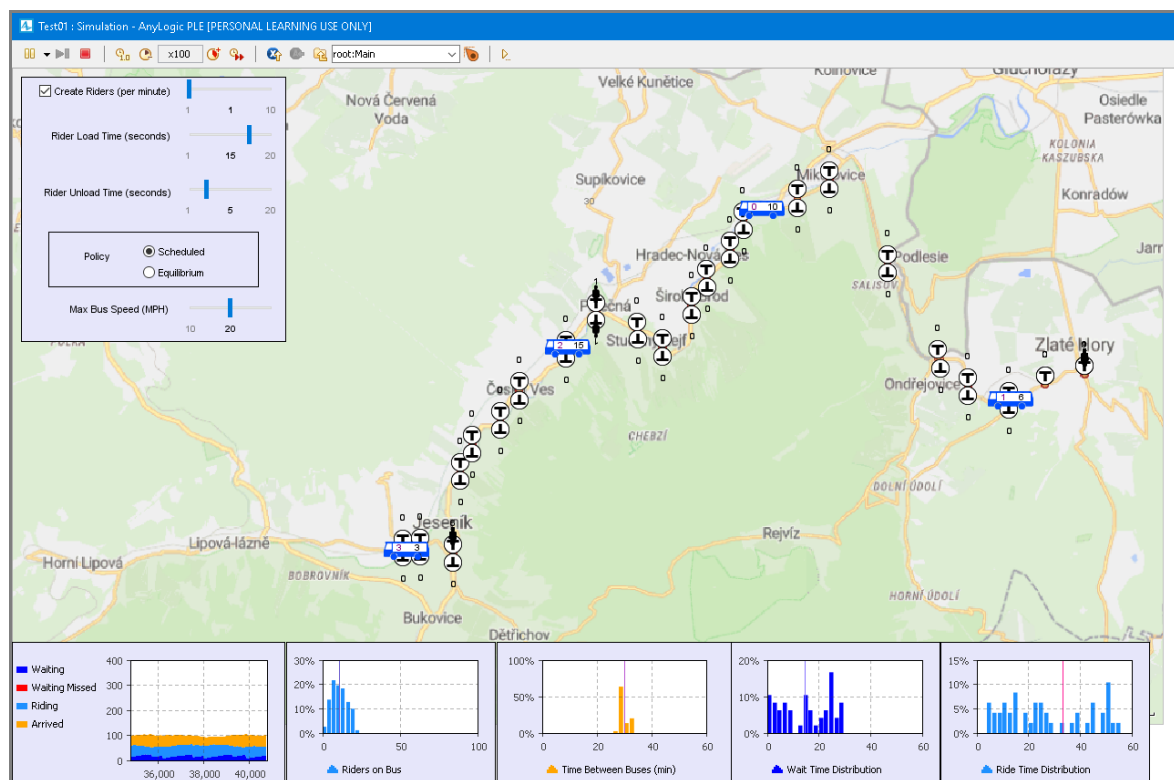
Nejdůležitější část simulace, tedy ovlivňování počtu cestujících na zastávkách, se specifikuje v Main -> Statecharts a statechart riderControl. Rozložení cestujících na trase včetně jejich cílových destinací lze nastavit dle kódu v Action u createRider – Transition. Dle hodnoty uvedené u randNum je určen procentuální podíl z celkového počtu cestujících, kteří započnou svoji cestu v dané zastávce, určené v rdr.origin. Výběr zastávky se v kódu specifikuje pomocí hodnoty celkového počtu zastávek, od které je odečten počet zastávek zbývajících na trase. Stejným způsobem je definována i cílová destinace. Pro zbývajících podíl agentů jsou počáteční a koncové zastávky určeny náhodně.

Při spuštění simulace je pro ověření správné funkcionality nutné počkat než dojde ke stabilizaci. Jedná se o graf v levém dolním rohu obrázku 5.1 a proměnnou Arrived, která by měla nabývat poměrně stejných hodnot.

5.2 Návrat studentů v odpolední špičce

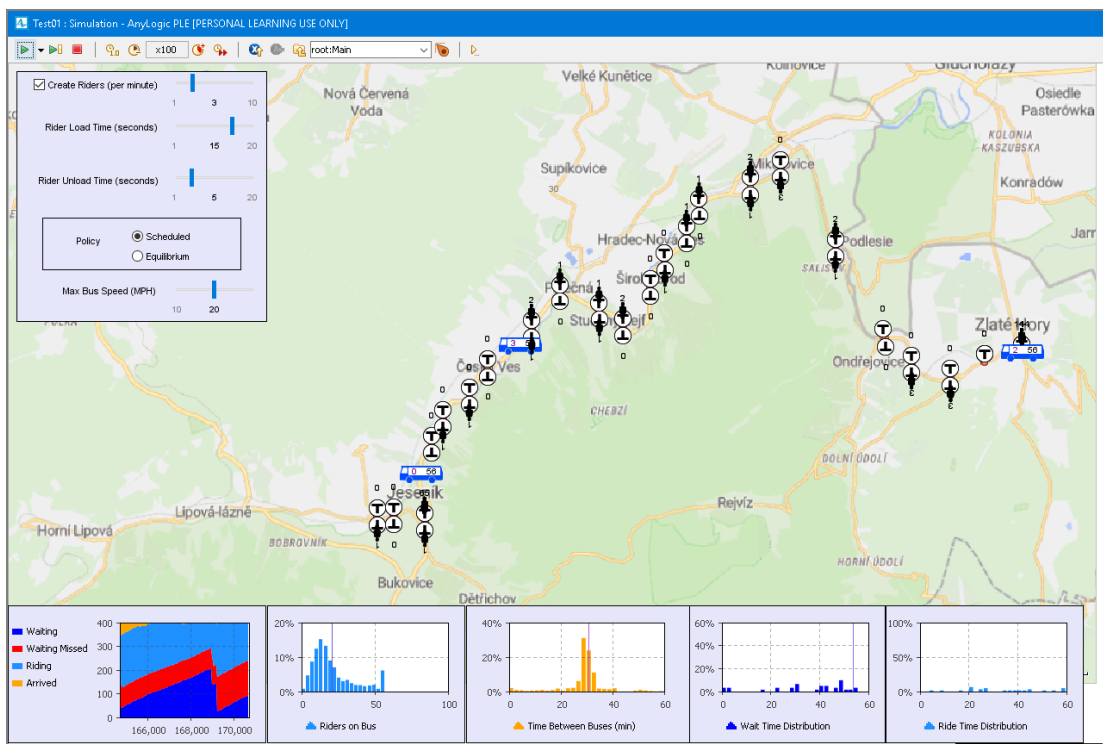
K problémům s kapacitou dopravních prostředků dochází na zastávkách v blízkosti školských zařízení. Na začátku linky je autobus na hranici kapacity, postupně se počet cestujících snižuje a do konečné zastávky dojíždí téměř prázdný.

Pro agentní model byla vybrána Linka 950116 a úsek Zlaté Hory-Jeseník (obr. 5.1) V odpolední špičce cca po 12:30 se vyskytuje vysoká frekvence cestujících (okolo 80 %) na zastávkách Zlaté Hory autobusové nádraží a Jeseník autobusové nádraží. Interval mezi autobusy je 30 minut. V modelu bylo počítáno se čtyřmi autobusy obsluhujícími daný spoj.



Obr. 5.1 Model linky 950116 a úsek Zlaté Hory-Jeseník.

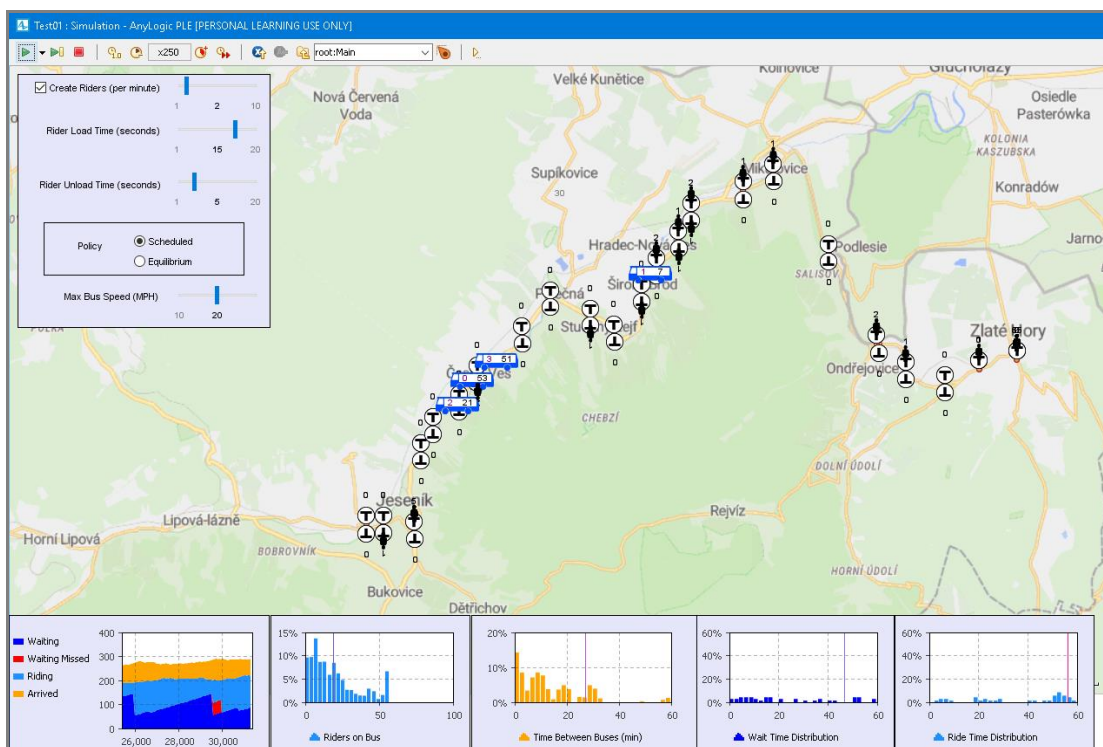
Při nastavení parametru pro vytváření cestujících na jednoho za minutu (obr. 5.1) simulace fungovala dle očekávání. Rozestupy mezi autobusy se pohybovaly okolo původních 30 minut, k problémům s kapacitou nedocházelo a čas, který cestující strávili čekáním, se pohyboval v rozumné míře. Celkově lze tedy hodnotit transformaci modelu a provedené úpravy parametrů v souladu s modelovaným systémem mimo špičku. Při změně parametru pro vytváření cestujících na hodnotu rovnou dvěma byla simulovaná kapacita linky stále dostačující. Při dalším zvýšení zmíněného parametru začalo docházet k prodlužování a zkracování intervalů mezi autobusy, někteří cestující museli čekat 40 a více minut na zastávce, případně nemohli z důvodu překročení kapacity nastoupit (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Problémy s kapacitou při větším počtu cestujících.

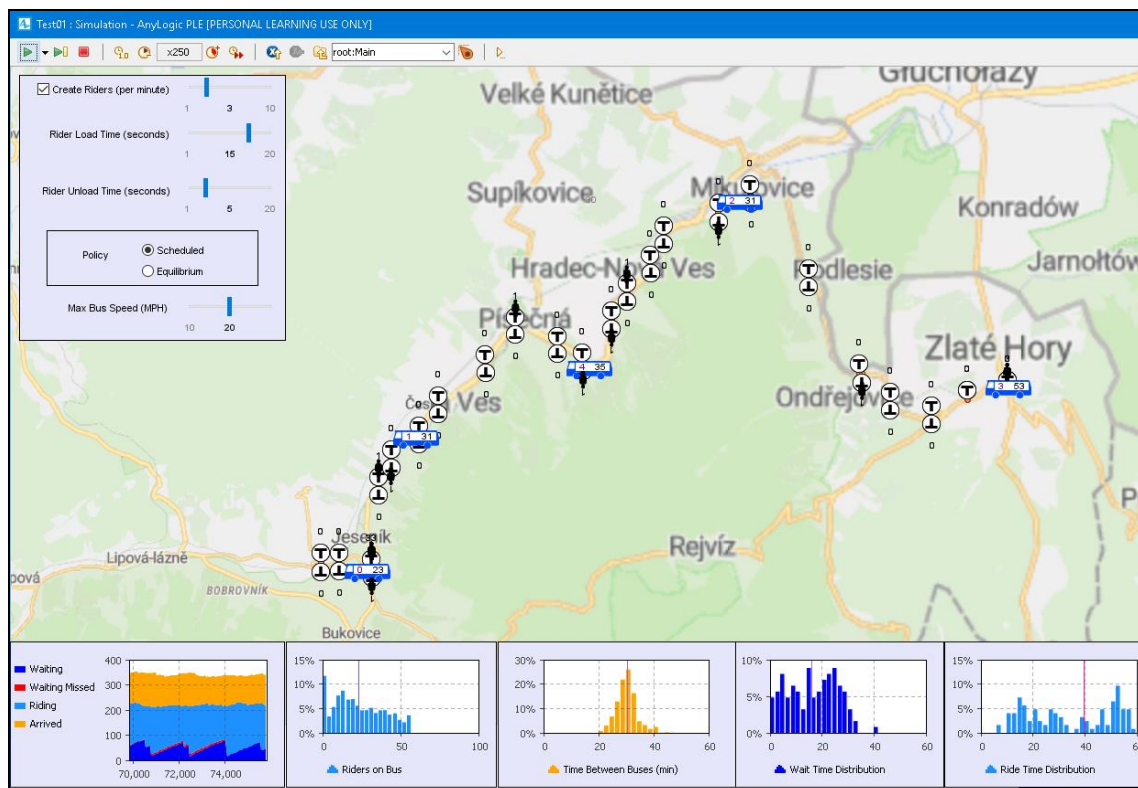
Možná řešení výše popsaného problému spočívají v snížení intervalu mezi autobusy, případně zvýšení počtu dopravních prostředků. Obě varianty byly vyzkoušeny.

Snížení intervalu mezi autobusy na 20 minut vedlo k problémům s kapacitou již při nastavení parametru dvou cestujících za minutu. Čekací doba se prodloužila i na 60 minut a dokonce došlo k vytváření shluků autobusů (obr. 5.2)



Obr. 5.2 Varianta se zmenšením intervalu mezi autobusy.

Přidání pátého (posilového) autobusu do simulace, který vyjíždí pouze v případě odpolední špičky, vedlo k následujícím výsledkům. Problémy vyskytující se v původních variantách při nastavení parametru pro vytváření cestujících na hodnotu tři byly z větší části odstraněny. Pouze v několika případech byla čekací doba okolo 40 minut a autobus odjížděl ze zastávky úplně plný. Posilový autobus s ponecháním původních intervalů je tedy možným řešením. Nevýhoda spočívá v pořizovacích nákladech a především v prostoji autobusu.



Obr. 5.3 Varianta s přidáním posilového autobusu.

Agentně založený model, lze po úpravě parametrů použít s daty v podobě souřadnic zastávek či označků bez větších problémů pro konkrétní úlohu na území České republiky, jelikož silniční síť pro dané území je stažena z OSM serveru samotným nástrojem.

6 MODEL POHYBU VČEL V PROSTŘEDÍ

Cílem práce je vytvořit prostorový agentně založený model. Důležitou složkou tohoto modelu je pohyb a interakce agentů s prostředím. Využitím poznatků popsaných v předchozích kapitolách byl navržen a implementován model pohybu včel v závislosti na prostředí. V následující části práce je popsána nejdříve motivace pro vznik modelu, poté jsou specifikovány jednotlivé prvky a způsob jejich implementace, nakonec jsou uvedeny případové studie a interpretace jejich výsledků.

6.1 Motivace pro vznik modelu

Mor včelího plodu (MVP), zůstává velkým problémem pro včelaře po celém světě. Je tedy vykládáno nemalé úsilí k zamezení jeho šíření a vymýcení. Nejúčinnější metodou je prevence a kontroly vedoucí k včasnému odhalení ohnisek nákazy. Spolupráce včelařů s příslušnými orgány je tedy nezbytná. V České republice šíření nákazy kontroluje Státní veterinární správa a její krajské pobočky. Při klinické nález moru včelího plodu na včelnici a jeho laboratorním potvrzení jsou zavedena následující opatření. Za prvé je provedena likvidace ohniska dle rozsahu zamoření, případně na základě rozhodnutí veterinárního inspektora. Druhé opatření je důležité i pro ostatní včelaře, protože spočívá v zřízení ochranného pásma v rozsahu až pěti kilometrů kolem ohniska, ve kterém je zakázáno přemísťování matek, včelstev a oddělků (vyhláška 18/2018 Sb. § 11). Navíc pokud i pouze částečně ochranné pásmo zasahuje do nějakého katastrálního území (k.ú.), může být dle nařízení Krajské veterinární správy, celé toto území zahrnuto jako součást ochranného pásma. Zmíněná opatření však vzhledem k volnému pohybu včel nemohou zcela zabránit dalšímu šíření MVP **vcelar.info (2011), vcelarstvi.cz (2019)**. Řešením výše uvedeného problému, nebo alespoň k predikci potencionálního vývoje epidemie na daném území, by mohlo být využito modelování. V práci zmíněný postup publikovaný v **Datta a kol. (2013)**, ale s pohybem včel nepočítá. Nejčastěji k přenosu moru včelího plodu dochází při nedostatku potravy v okolí, což vede k vykrádání oslabených (nakažených) včelstev **Genersch (2009)**. Z agentních modelů je sice hledání potravy včelami řešeno v BEESCOUT **Becher a kol. (2016)**. V potaz ale není brán vliv prostředí na pohyb včel (kromě vodních ploch) a lze simulovat pouze jeden úl. Případná vzájemná interakce mezi včelstvy tedy není možná. Nově vytvořený model, který přímo využívá data o typu prostředí pro určení chování agentů a v případě potřeby umožňuje simulaci více včelstev naráz, by mohl posloužit chovatelům k zjištění, zda jsou jejich včely ohroženy MVP prostřednictvím loupení v místech ohniska či nikoliv. K ověření hypotézy, zda může hřeben vrchů fungovat jako terénní zábrana a znemožnit tak šíření nákazy „přes kopec“, obsahuje model i výškopisná data. Změnu nadmořské výšky používají agenti při rozhodování o směru letu.

6.2 Implementace modelu

K sestavení modelu bylo využito softwaru GAMA Platform verze 1.8 Release Candidate 2 (<https://gama-platform.github.io/>). Vstupní data pro prostředí byla upravena v programu ArcMap Desktop verze 10.4. Jedná se o model využívající prostor typu grid. Obecný způsob implementace je popsán v podkapitolách 3.4.1 a 4.4. V následujícím textu jsou zmíněny jednotlivé části modelu včetně parametrů, proměnných a příslušného kódu. Celý model včetně dat použitých v případových studiích, manuálu v anglickém jazyce a ODD protokolu je k dispozici na příloženém CD a také na webových stránkách diplomové práce s odkazem na GitHub (<https://github.com/TomasTuhacek/Bee-movement-in-the-environment-model.git>).

6.2.1 Vstupní data prostředí

Agenty pro určení směru pohybu využívají informaci o kvalitě prostředí. Pro krajinný pokryv byla použita volně dostupná datová sada CORINE Landcover ve vektorovém formátu z roku 2012, která byla zkombinována s vodními toky a silnicemi z vektorové geografické databáze České republiky ArcČR® 500 (<https://www.arcdata.cz>). K ohodnocení odporu jednotlivých kategorií (obr. 6.1) bylo primárně využito Boscolo a kol. (2017).

Class	Description	Justification	Resistance
Mature Forest	Forest with presence of some emergent trees in the canopy.	Availability of resources for nesting and foraging for species with different capacities of movement and social organization ¹ .	1
Initial forest	Forest with more open canopy, lower tree density and with pioneer trees.	Availability of resources for nesting and foraging. The microclimate is drier and warmer than mature forests due to the more open canopy, which favors the flowering of herbaceous plants ² .	5
Water	Artificial lakes.	Regulate the microclimate (higher humidity and temperature), and is an important resource for bees.	10
Pasture with shrubs	Non-managed pasture, with shrubs.	High abundance of shrubs that provide floral resources for bees that leave the forest. Also, some bees can nest in the ground, grass and trees ^{3,4} .	25
Perennial agriculture	Shrub agriculture (e.g. coffee, citrus).	Provide floral resources ⁵ , but the eventual use of pesticides has a negative influence on bees ⁶ .	35
Forestry (Eucalyptus)	Eucalyptus between 1 and 25 m in height.	Provide floral resources ^{7,8} . In many cases, some herbaceous species grow in the understory. Also, tree structure is similar with the natural forest.	40
Annual agriculture	Rotational crops (e.g. corn, beans).	Some crops offer flowers, but most do not. The soil is highly managed and pesticides are common practice.	50
Rural village	Rural buildings and infrastructure.	Bricks or roofing are commonly used by bees to nest, and the gardens provides floral resources. On the other hand, many nests can be destroyed by the resident people ⁹ .	60
Small Eucalyptus	Eucalyptus with size up to 1 m.	It does not provide floral resources. Commonly in this stage, there is an intensive application of pesticides ¹⁰ .	65
Urban area	High density of houses and buildings.	It does not provide floral resources. Some species nest in the bricks or roofing, however many nests are destroyed by the resident people ^{9,11} .	75
Bare soil	Bare ground with no vegetation.	It does not provide floral resources. The microclimate is dry and hot. In some cases there are some nests, however, in most situations the soil is highly managed for agriculture or construction.	80
Industry	Industrial buildings.	Usually there is high noise and no places for nesting or with floral resources.	80
Pasture	Managed pasture without shrubs.	It does not provide nest or floral resources because the soil is frequently managed. The microclimate is dry and hot.	85
Road	Paved highway.	There is high noise and wind, with large flux of vehicles. Generally, it does not provide floral resources.	100

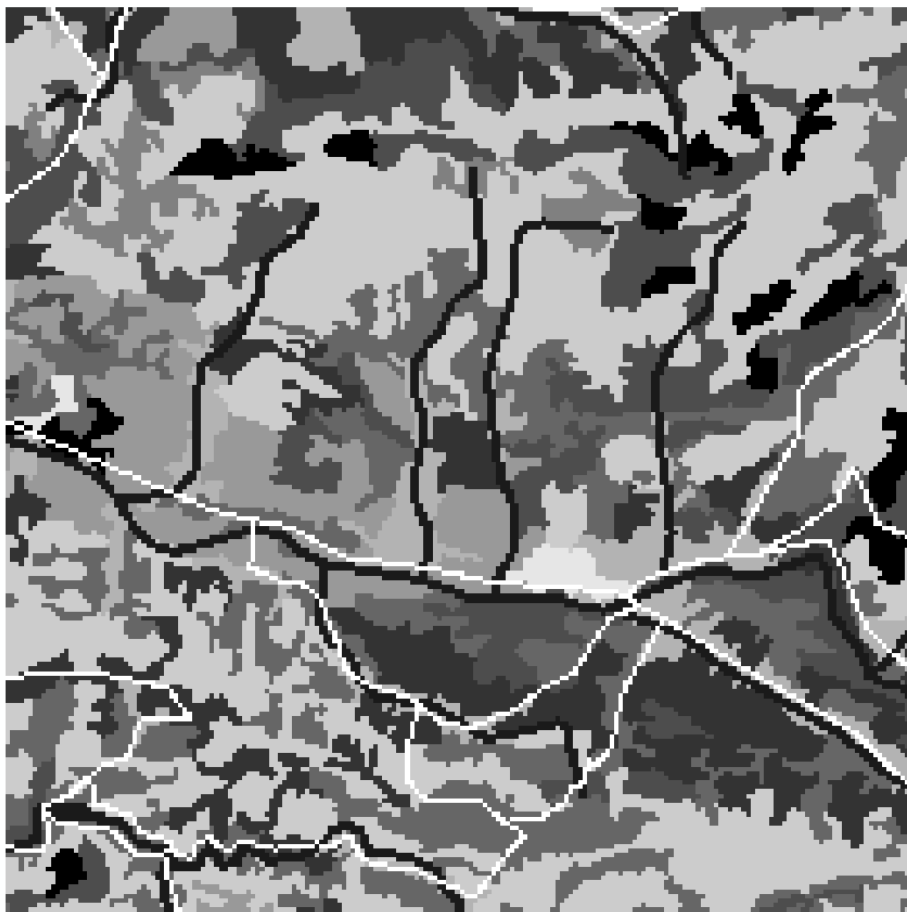
Obr. 6.1 Kategorie a jejich odpor pro včely (Zdroj: Boscolo a kol. 2017).

Jelikož zmíněná studie hodnotí prostředí i pomocí kategorií, které se v podmínkách mírného pásu nevyskytují a chybí v ní například vztah včel k jehličnatému lesu, muselo dojít k určitým úpravám. Hodnoty odporu nově přidaných typů prostředí byly určeny dle poznatků ze studií uvedených v kapitole 3.2. Zajímavý může být maximální odpor u komunikací. Výzkumem, zda silnice tvoří bariéry pro pohyb, se zabývali například **Bhattacharya a kol. (2003)**. Provedený experiment potvrdil, že komunikace tvoří bariéru při hledání potravy včelami. Důležitým faktorem je ale také intenzita provozu na dané komunikaci.

Tab. 3 Kategorie a jejich odpor pro včely

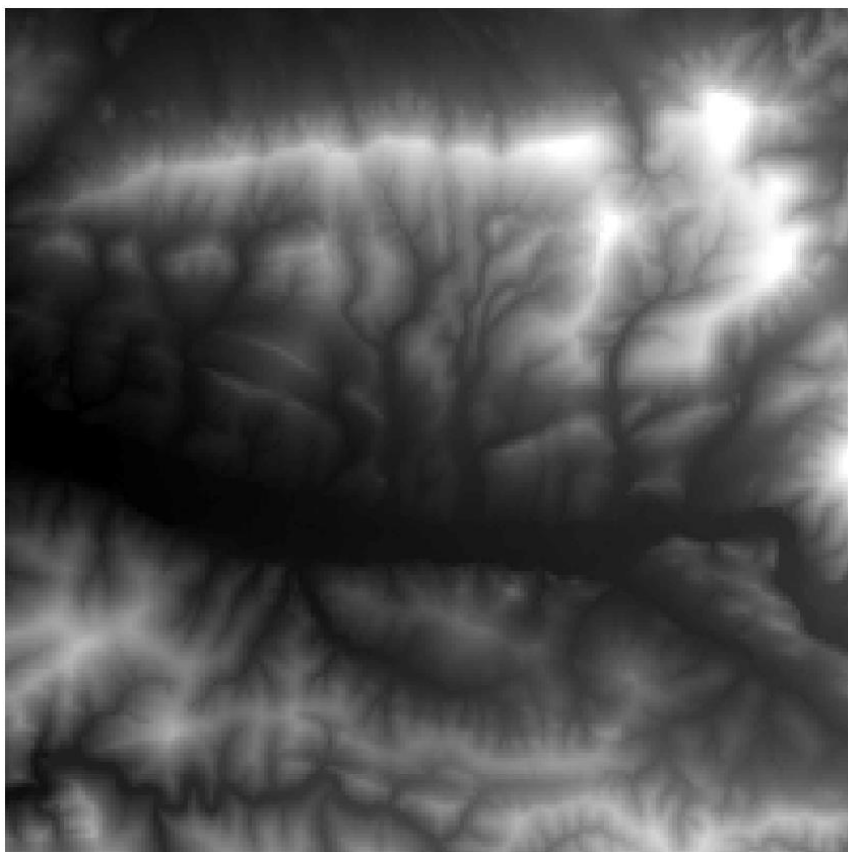
Kategorie	Kód CORINE	Odpor
Listnaté lesy	311	1
Vodní plochy, řeky + (okolí 70 m)	ArcČR 500	10
Louky	231	25
Smíšené lesy	313	30
Zemědělská území s příměsí přirozené vegetace	243	35
Přechodová stadia lesa a křoviny	324	40
Orná půda a zemědělské plochy	211, 242	50
Městská nesouvislá zástavba a plochy městské zeleně	112, 141	60
Jehličnaté lesy	312	65
Průmyslové obchodní zóny, těžební průmysl	121, 131	80
Silnice I. třídy + (okolí 35 m) Dálnice + (okolí 70 m)	ArcČR 500	100

Aby povrch mohl být použit v GAMA Platform musela být vektorová vrstva nejdříve převedena na rastr. Hodnota buňky byla definována pomocí přidaného sloupce *cost* v atributové tabulce původní datové sady CORINE Landcover. Pro určení kvantitativních vlastností prostředí je v ABM využíváno odstínu barvy. Byla tedy použita barevná stupnice s černou barvou pro nejnižší a s bílou pro nejvyšší odpor (obr. 6.2). Získaný rastr byl uložen jako soubor typu PNG.

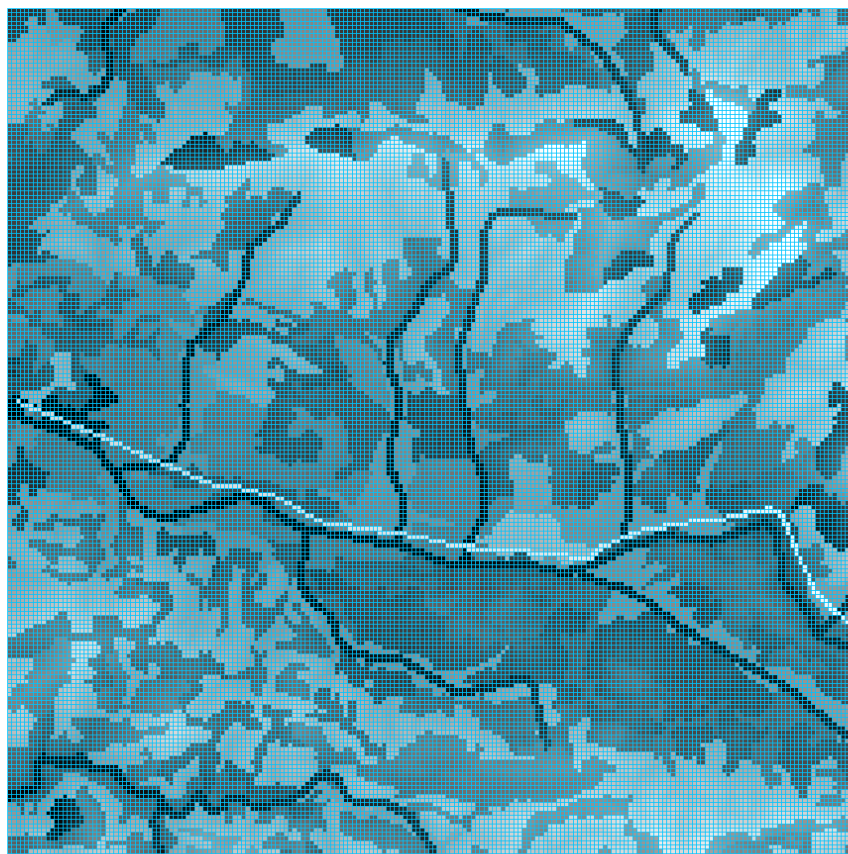


Obr. 6.2 Vstupní data odporu prostředí dle typu krajinného pokryvu.

Pro výškopisná data bylo využito DMR 5G od ČÚZK. Rastrová data lze po výběru potřebné oblasti, převzorkování a exportu ve formátu PNG přímo použít v GAMA Platform (obr. 6.3). Po sečtení uvedených rastrů byl získán prostor skládající se z odporu specifikovaným typem prostředí a výškou (obr. 6.4). Nadmořské výšce byla pro snížení jejího vlivu přiřazena váha s hodnotou 0,1. Tuto váhu lze dle konkrétního případu nastavit různě. V použitých experimentech je vliv nadmořské výšky a prostředí na pohyb přibližně stejný. Pro interpretaci a uložení výsledků modelu a k usnadnění zjišťování vzdáleností, kterou agenti urazí, byla přidána pravidelná vektorová mřížka s rozměry 200 x 200 sektorů o velikosti hrany 70 metrů (obr. 6.4), tedy se stejnými parametry jako u použitých vstupních rastrových dat.



Obr. 6.3 Vstupní data odporu prostředí dle výšky.



Obr. 6.4 Vstupní data kombinující výšku a krajinný pokryv.

6.2.2 Úvodní část global a sekce init

Počet agentů (včel) při inicializaci je nastaven na 49 pro tři úly. Vzhledem k povaze prostředí, grid umožňující pouze umístění jednoho agenta v buňce, je v prvním kroku simulace vytvořeno maximálně devět agentů na úl a zbylé včely jsou do prostředí umístěny v kroku následujícím. Pro současnou inicializaci vyššího počtu agentů by bylo nutné zahrnout větší počet buněk do seznamu sousedů (obr. 6.6). Provedená změna by ale měla dopad na následnou interakci agentů s prostředím a také by došlo ke zvýšení výpočetní náročnosti celého modelu. Dále jsou nahrána data včetně souboru ve formátu shapefile v podobě mřížky o velikosti buňky 70 metrů pro potřeby následné vizualizace výsledků v GIS. Sekce init obsahuje mimo jiné inicializační parametry pro prostředí a umístění agenta hive, jehož primární funkcí je označení místa, odkud včely vylétávají. Souřadnice lze nalézt po spuštění modelu a inspekci buňky, kde se má nacházet úl. Nakonec jsou zavedeny tři reflexy. První uloží po 100 krocích prozkoumanou oblast včelami jako soubor ve formátu shapefile. Jméno souboru je nutné při spuštění vždy změnit, aby nedošlo k přepsání. Druhý pozastaví simulaci v případě, že je překročen stanovený počet agentů. Funkce slouží pro případ, kdy agent dorazil na infikované místo (obr. 6.11). V takovém případě je vytvořen nový agent, simulace se zastaví a je možné udělat snapshot aktuální situace. Infikovaná včela posléze umírá a simulace může pokračovat. Je nutné znovu kliknout na tlačítko run. Poslední reflex v této sekci obsahuje podmínku pozastavení po 100 krocích. Velikost buňky v použitém prostředí dle nastavených parametrů je okolo 70 metrů. **Donkersley a kol. (2014)** uvádí, že přibližně 50 % včel uletí za potravou více než šest kilometrů a existují i případy, kdy překonaná vzdálenost činila 10 kilometrů. Včela tedy po dohodě s doktorem Jiřím Danihlíkem v simulaci urazí při hledání potravy maximálně sedm kilometrů.

```
11 global {
12   int nb_bees_init <- 17;
13   int nb_bees_init1 <- 15;
14   int nb_bees_init2 <- 17;
15   int nb_bee -> {length (bee)};
16
17   file map_init <- image_file("../images/ElevData70200x200.png");
18   file shape_file_grid1 <- file("../includes/grid70l.shp");
19   geometry shape <- envelope(shape_file_grid1);
20
21 init{
22   create bee number: nb_bees_init/* with:(location:{50,50})*/;
23   create bee1 number: nb_bees_init1/* with:(location:{50,50})*/;
24   create bee2 number: nb_bees_init2;
25   create species:hive number:1 with:(location:{8295.000000001033,5425.000000001443});
26   create species:hive1 number:1 with:(location:{8365.000000001042,5425.000000001443});
27   create species:hive2 number:1 with:(location:{8435.000000001051,5425.000000001443});
28   matrix init_data <- map_init as_matrix {200,200};
29   create grid1 from: shape_file_grid1 {
30
31   }
32   ask elevation_cell {
33     color <- rgb (init_data[grid_x,grid_y]) ;
34     elev <- 1 - (((color as list)[0])/255);
35
36   }
37 }
38
39 reflex save_color_value when: cycle = 100{
40   save elevation_cell to:"../results/ElevZubr5.shp" type:"shp" with:[color_value::"Visited"];
41 }
42
43 reflex pause_simulation when: (nb_bee > 17) {
44   do pause;
45 }
46
47 reflex stop_simulation when: (cycle = 100) {
48   do pause;
49 }
```

Obr. 6.5 Úvodní část modelu

6.2.3 Agenty, jejich chování a interakce

Model obsahuje tři druhy agentů. V GAMA Platform označovány jako species. První dva jsou agent grid1 a libovolný počet hive agentů sloužící pro interpretaci výsledků a označení úlu, mají pouze vykreslovací atributy a chod modelu nijak neovlivňují. Hlavní je species bee (včela), který je v modelu zastoupen třemi variantami. Jednotlivé druhy včel jsou implementovány pro umožnění více počátečních lokací a liší se pouze v barvě. V případě potřeby lze ale individuálně měnit jejich parametry a chování a zvýšit tak komplexitu modelu, například pomocí nastavení různých režimů prozkoumávání okolí nebo zavedením vzájemné interakce.

Po vytvoření agentů je nutné specifikovat parametry prostředí, které slouží pro interakci a pohyb. Vytvořený seznam sousedů počítá s okolními osmi přilehlými buňkami s hodnotami odporu určených barvou vstupních dat (obr. 6.6).

```
416 grid elevation_cell width: 200 height: 200 neighbors:8 {  
417 float elev <- 1 - (((color as list)[0])/255);  
418 list<elevation_cell> neighbours <- setf neighbors_at 1 ;
```

Obr. 6.6 Parametry prostředí pro pohyb a interakci

Inicializační poloha včely je určena pomocí kódu na (obr. 6.7). Agent je umístěn buď přímo do specifikované buňky, nebo do jednoho z jejich definovaných sousedů ze seznamu. Následuje reflex pro pohyb s akcí výběru buňky.

```
133 elevation_cell myCell<- elevation_cell grid_at {51,50} ;  
134  
135 init{  
136  
137 location <- myCell.location;  
138 }  
139  
140 reflex basic_move {  
141 myCell <- choose_cell();  
142 location<- myCell.location ;
```

Obr. 6.7 Umístění včely do prostoru a akce pro pohyb

Akce choose_cell (obr. 6.8) spočívá ve výběru buňky pro další pohyb. Nejdříve je specifikována 20% pravděpodobnost, že včela v dalším kroku poletí do méně kvalitního prostředí. Následuje samotná akce popisující výběr jedné ze sousedních buněk s vyšším odporem. Vzhledem k použitému vzorci pro převod barvy na hodnoty odporu v modelu ($\text{elev} \leftarrow 1 - (((\text{color as list})[0])/255)$) a povaze vstupních dat využívajících pro vizualizaci výšky principu „čím výše tím světleji“, je nutné pro buňku s větším nebo stejným odporem vytvořit seznam sousedů s nižší hodnotou proměnné elev. Dále nesmí být hodnota proměnné color_value rovna dvěma, jelikož se jedná o již prozkoumané území. Pro ošetření případů, kdy je včela obklopena již navštívenými sousedy nebo pouze s vyšší hodnotou elev, je zavedena funkce náhodného výběru. Pro volbu směru do příznivějšího nebo stejného prostředí s 80% pravděpodobností je oproti předchozímu případu pouze změna spočívající ve výběru jednoho ze sousedů s vyšší hodnotou elev.


```

186@ elevation_cell choose_cell {
187@   if flip (0.20) {
188     list<elevation_cell> Cell_up <- (myCell.neighbours) where (each.elev <= myCell.elev and each.color_value != 2 );
189@   if not (empty (Cell_up)){
190     return one_of (Cell_up);
191   }
192@   else{
193     return one_of (myCell.neighbours);
194     /*return (myCell.neighbours) with_max_of (each.elev); */
195   }
196@ }else {
197   list<elevation_cell> Cell_down <- (myCell.neighbours) where (each.elev >= myCell.elev and each.color_value != 2 );
198@   if not (empty (Cell_down)){
199     return one_of (Cell_down);
200   }
201@   else{
202     return one_of (myCell.neighbours);
203     /*return (myCell.neighbours) with_min_of (each.elev);*/
204   }

```

Obr. 6.8 Výběr buňky pro další pohyb dle odporu prostředí

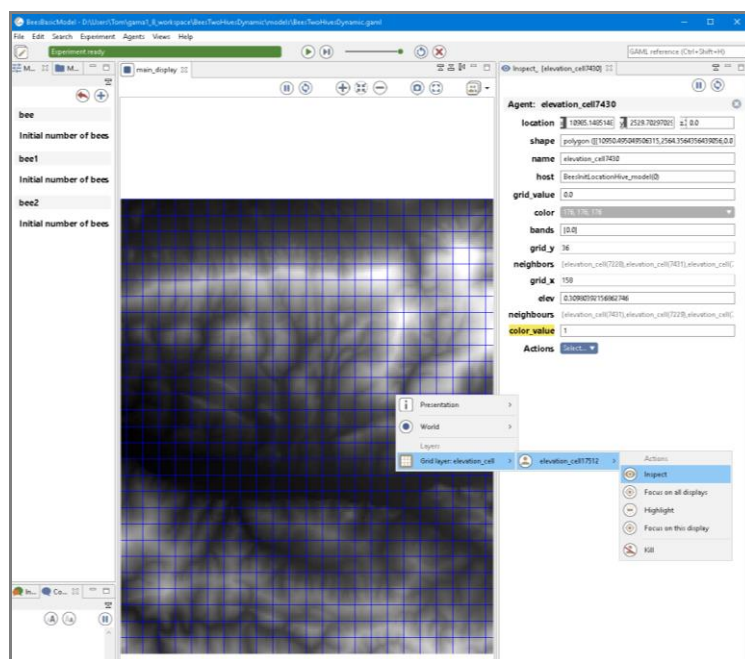
K sledování již prozkoumaného území, a aby se včela v dalším kroku nevracela na již navštívenou sousední buňku, obsahuje prostor v modelu proměnnou `color_value` a akci `update_color` (obr. 6.9). Je-li hodnota proměnné po změně rovna dvěma, pak se jedná o území, ve kterém se nachází včela, a je buňce přiřazena zelená barva. Červená barva s příslušnou hodnotou rovnou jedné označuje přítomnost ohniska MVP. Po inicializaci modelu před spuštěním běhu simulace (lze ale provést i v průběhu) je pro vytvoření MVP pozitivního úlu nutné pravým tlačítkem vybrat příslušnou buňku a kliknout na akci `Inspect`. Následně změnit hodnotu `color_value` na jedna (obr. 6.10).

```

386 list<elevation_cell> neighbours <- self neighbors_at 1 ;
387
388 /*update color after to track visited cells by agents*/
389 int color_value <- 0;
390@ action update_color {
391@   if (color_value = 2) {
392     color <- #green;
393   }
394@   else if (color_value = 1) {
395     color <- #red;
396   }

```

Obr. 6.9 Změna vlastností prostředí pro označení navštívených buněk a ohnisek



Obr. 6.10 Způsob přidání ohniska do prostoru

Agent typu včela mění vlastnosti prostředí pomocí reflexu update a dotazu na náležitost k buňce, ve které se nachází (obr. 6.11). Při splnění podmínky uvedeného vztahu je provedena akce update_color.

```

169  reflex update {
170    ask bee {
171      ask elevation_cell
172      {
173        if(self overlaps myself)
174        {
175          self.color_value <- 2;
176        }
177      }
178    }
179    ask elevation_cell {
180      do update_color;
181    }
182  }

```

Obr. 8.11 Označení navštívené buňky agentem.

Pro případy, kdy jsou známy polohy ohnisek a účelem experimentu je pouze zjistit, zda včela doletí na daná místa a nakazí se, je zaveden reflex infect (obr. 6.12). Je vytvořena nová včela a běh simulace je pozastaven. Infikovaná včela v dalším kroku umírá a simulace po kliknutí na tlačítko pro běh může pokračovat.

```

145  /*infect bee when its location is in infected zone and create bee to pause the simulation according to condition in p
146  reflex infect when: myCell.color_value = 1 {
147    create species:bee number:1 {
148    }
149    infected <- infected + 1;
150  }
151
152  reflex infection when: infected >= 1{
153    infected <- infected + 1;
154  }
155
156  reflex die when: infected >=3 {
157    do die;
158  }

```

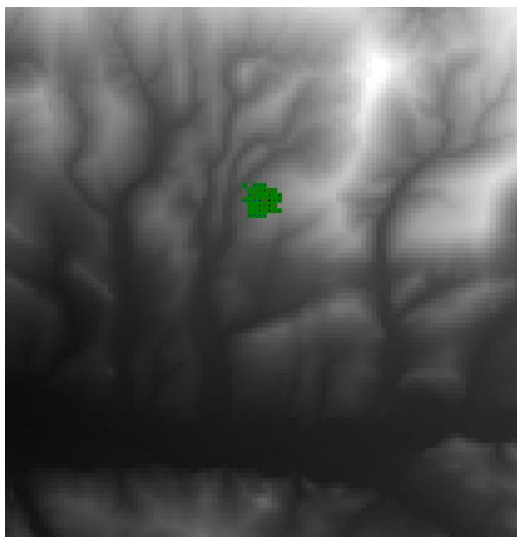
Obr. 6.12 Pozastavení simulace v případě infekce včely v ohnisku.

Zmíněná funkcionality může posloužit například pro vyhodnocení vzdálenosti, kterou včela urazila, než našla infikovaný zdroj potravy.

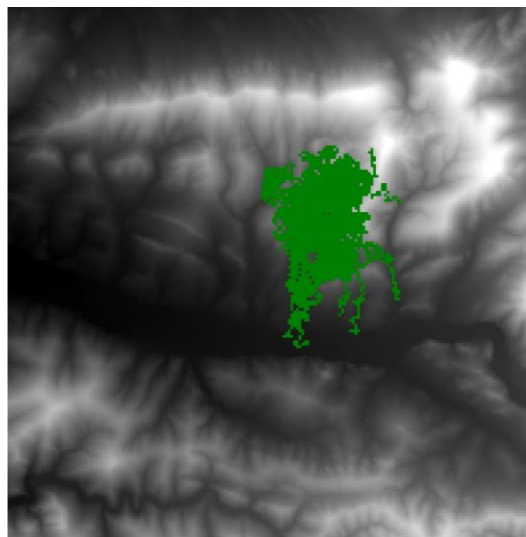
Při vytváření modelu bylo využito návodů a dokumentace dostupné na gama-platform.github.io (2019).

6.2.4 Průběh a hodnocení simulace

V prvním kroku simulace je možné vidět umístění úlů a první včely, vydávající se na průzkum (obr. 6.13). Objevné území se postupně zvětšuje, podle toho, jak se agenti rozhodují při volbě směru a s ohledem na již navštívené buňky. Po dosažení maximální vzdálenosti je simulace pozastavena a získán celkový výsledek chování všech agentů v podobě prozkoumané oblasti (obr. 6.14).



Obr. 6.13 Počáteční fáze simulace.



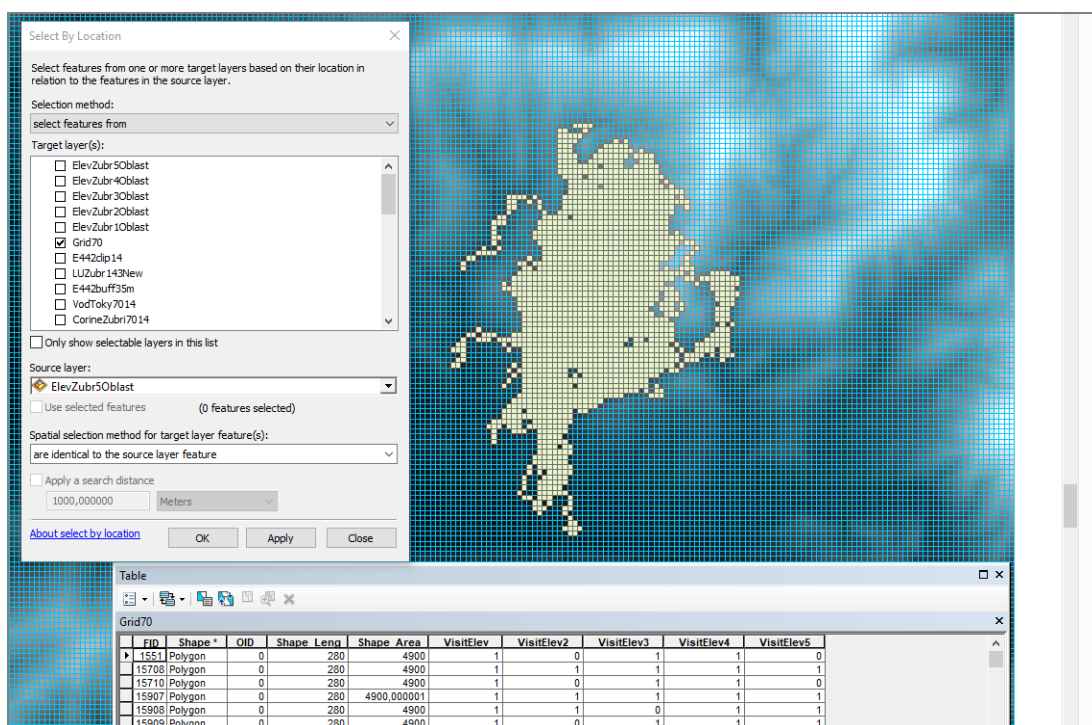
Obr. 6.14 Konečná fáze simulace.

Pro celkové hodnocení území, které včely z daného místa prozkoumají a s ohledem na nepředvídatelnost chování agentně založených modelů, je nutné spustit simulaci opakovaně a pro vizualizaci a interpretaci výstupů lze použít postup popsáný v následující podkapitole.

6.2.5 Ukládání a vizualizace výsledků modelu pomocí GIS

V diplomové práci popsané vývojové nástroje pro agentně založené modely umožňují vizualizaci aktuálního stavu pomocí grafů. V těchto grafech je nejčastěji zaznamenán krok simulace, počet agentů daného typu a případně hodnota sledované proměnné. Jednotlivé hodnoty lze také exportovat nejčastěji do textových souborů. U některých nástrojů je možnost pořídit snapshot aktuálního stavu a prostřednictvím extenzí uložit soubor shp se specifikovanými atributy. Funkcionalita pro analýzu a vizualizaci výsledků většího počtu iterací není implementována. Důvodem může být i přílišná komplikovanost, která je v modelování nežádoucí. Možným řešením je použít ABM pouze pro výpočet a využít geografických informačních systému nejenom pro přípravu vstupních dat, ale i pro vizualizaci a analýzu získaných výsledků.

GAMA Platform podporuje kombinaci vektorových a rastrových dat v jednom modelu, a také ukládání výsledků ve formátu shapefile včetně atributů. V aplikaci ArcMap je vytvořena vektorová mřížka parametrů totožných s prostorem v modelu (200 x 200 sektorů o velikosti 70 m). Následně je zavedena do modelu při inicializaci pro určení souřadnic výsledného souboru ve formátu shapefile (obr. 6.5). Po skončení simulace je výstup modelu nahrán do GIS a vybrány jsou sektory navštívené včelami (hodnota atributu visited rovna dvěma). Dle vztahu založeného na shodnosti dojde k porovnání s původní vektorovou mřížkou. Při splnění podmínky je u příslušných čtverců daného experimentu v atributové tabulce zaznamenána informace o výskytu včely v sektoru. Po proběhnutí všech iterací experimentu je získána mapa zobrazující způsob, jakým včely z daného úlu prozkoumávají přilehlé území při hledání potravy s ohledem na prostředí. Vizualizaci je možné porovnat s aktuální mapou ohnisek a zjistit pravděpodobnost, že včela daný úl vyloupí. Objeví-li se nové ohnisko, uživatel ho pouze přidá do mapy v GIS a není nutné znovu spouštět celý model. Zároveň je možné určit vzdálenost, která chyběla nebo chybí k dosažení cíle.



Obr. 6.15 Výběr a editace atributů sektoru v aplikaci ArcMap.

6.2.6 Verifikace, Validace a ODD protokol

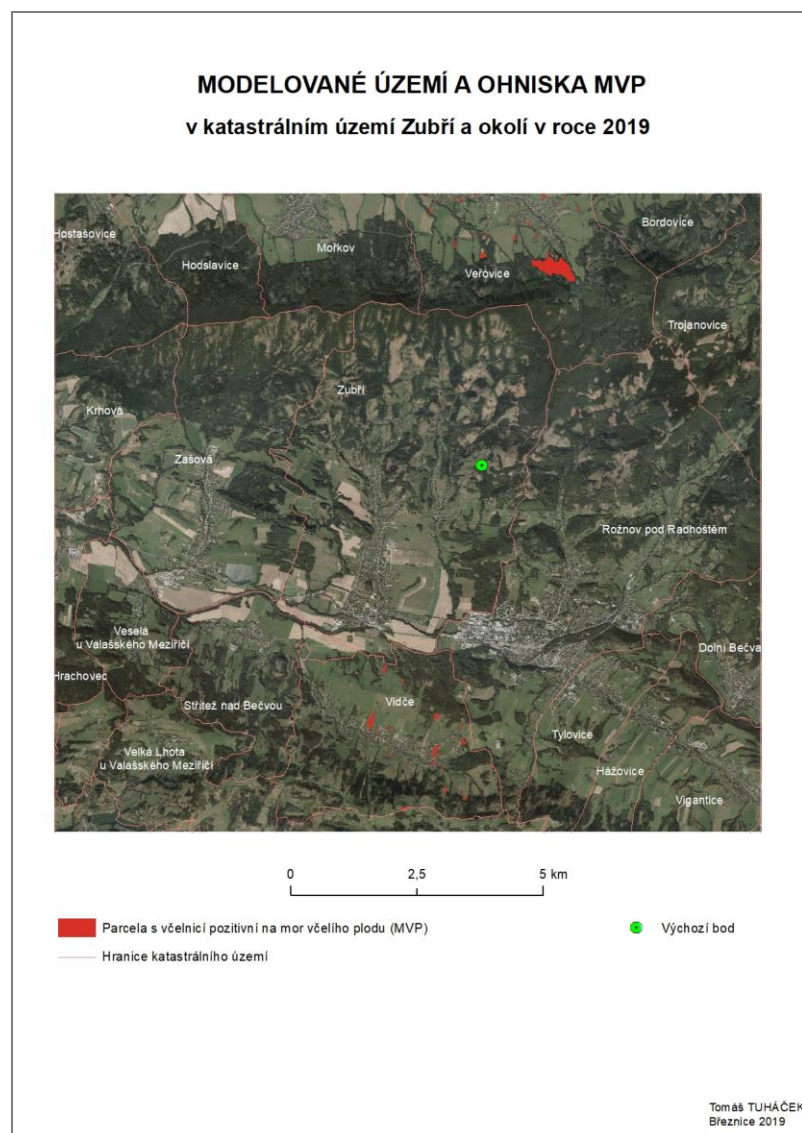
Model byl vyvíjen iteračním přístupem. K základnímu modelu byla postupně přidávána funkcionální a každá fáze byla několikrát spuštěna pro porovnání vůči původnímu designu. Komplexita modelu byla zvyšována v souladu s poznatky, které autor nabyt při studiu příslušné literatury. Jednalo se především o vztah včel k prostředí a informace o šíření moru včelího plodu. Odlišnost oproti skutečnosti lze najít v případě nakažení včely. V reálné situaci by se včela měla vrátit do úlu. V modelu je zmíněný postup zjednodušen. Nakažená včela zemře a je nahrazena novou. Celkové chování agentů, dle názoru autora, odpovídá originálnímu konceptu.

Model byl použit ve dvou případových studiích s rozdílnými vlastnostmi prostředí. Výsledky byly konzultovány s odborníky z oboru včelařství, kteří znají vybrané lokality a mohou tedy posoudit, jak moc se model přibližuje reálnému systému.

Pro standardizaci agentně založených modelů je používán Overview, Design concepts, and Details (ODD) protokol. Vzhledem k jeho příslušnosti k modelu je v anglickém a českém jazyce spolu s návodem dostupný na CD a webových stránkách s odkazem na GitHub (<https://github.com/TomasTuhacek/Bee-movement-in-the-environment-model.git>).

6.3 Případová studie – Katastrální území Zubří v okrese Vsetín

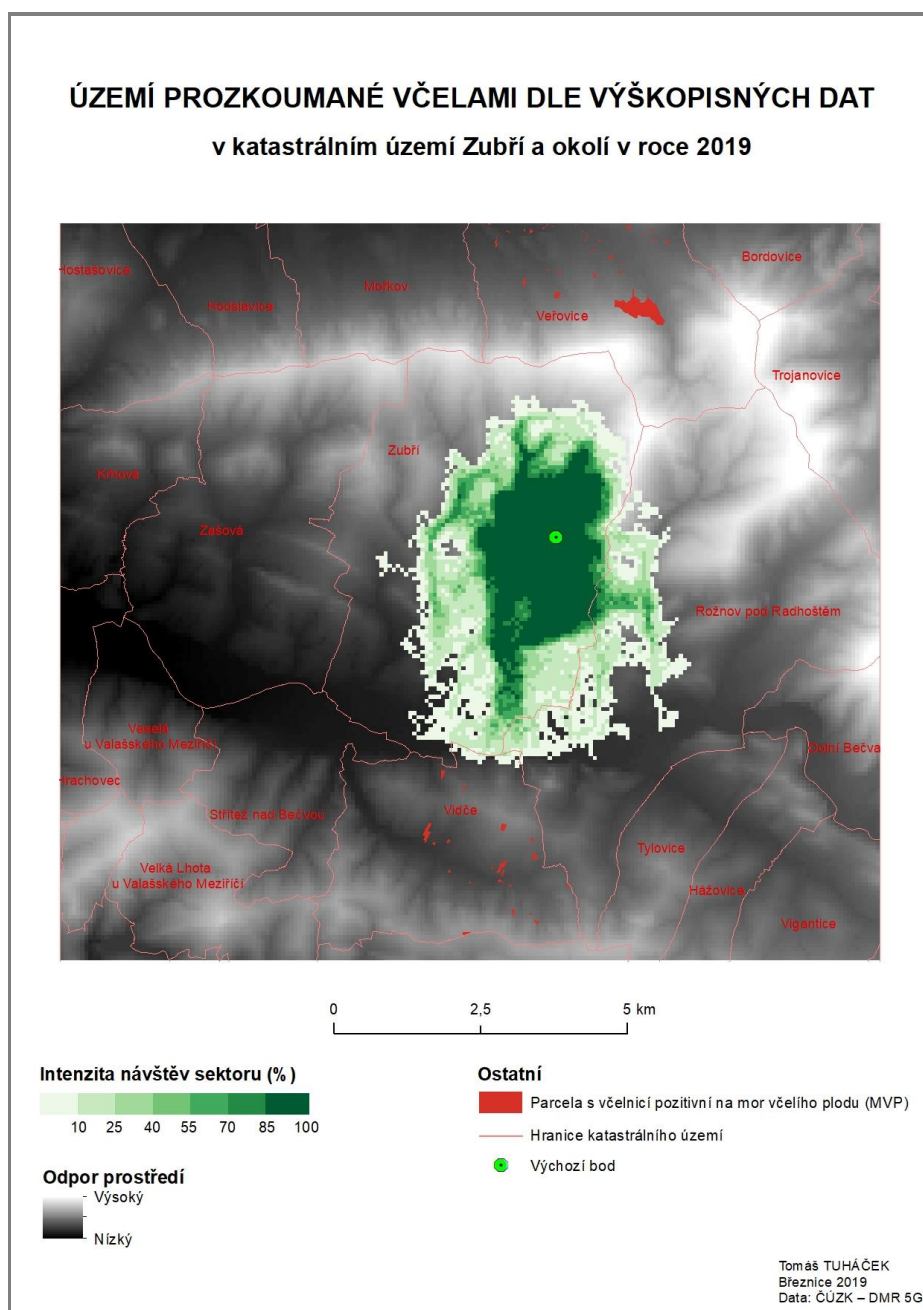
V první případové studii je zkoumána lokalita Zubří (obr. 6.16). V území se vyskytují dvě ohniska. Včelnice pozitivní na včeli mor (AFB+) se nacházejí v k.ú. Vidče a Veřovice, ve vzdálenosti 4,5 kilometrů přímoou čarou od výchozího bodu. Účelem experimentu je zjistit, zda včely z úlu (na mapě označeno zeleným bodem) doletí na některou s parcel s AFB+ včelnicí. Maximální vzdálenost, kterou včela při průzkumu urazí je v modelu nastavena na sedm kilometrů. Důležitým faktorem je vliv typu prostředí a výškové poměry území. Obec Veřovice je oddělena hřebenem Veřovických vrchů a jehličnatými lesy. V okolí včelnice se navíc nachází poměrně pestrá skladba potencionální zdrojů potravy v podobě luk, zemědělských ploch a zahrad nesouvislé městské zástavby. Ohnisko Vidče se nachází za mezinárodní silnicí první třídy E442 a zastoupen je v menší míře i jehličnatý les. V případě, že ani při jedné iteraci nedojde k nákaze, může získaná mapa posloužit k vyhodnocení způsobu prozkoumávání území včelami při hledání potravy v dané lokalitě, nebo pro porovnání při výskytu nového ohniska lokalizovaného v modelovaném okolí úlu.



Obr. 6.16 Modelované území s ohnisky MVP.

6.3.1 Výsledky pohybu včel dle výškopisných dat

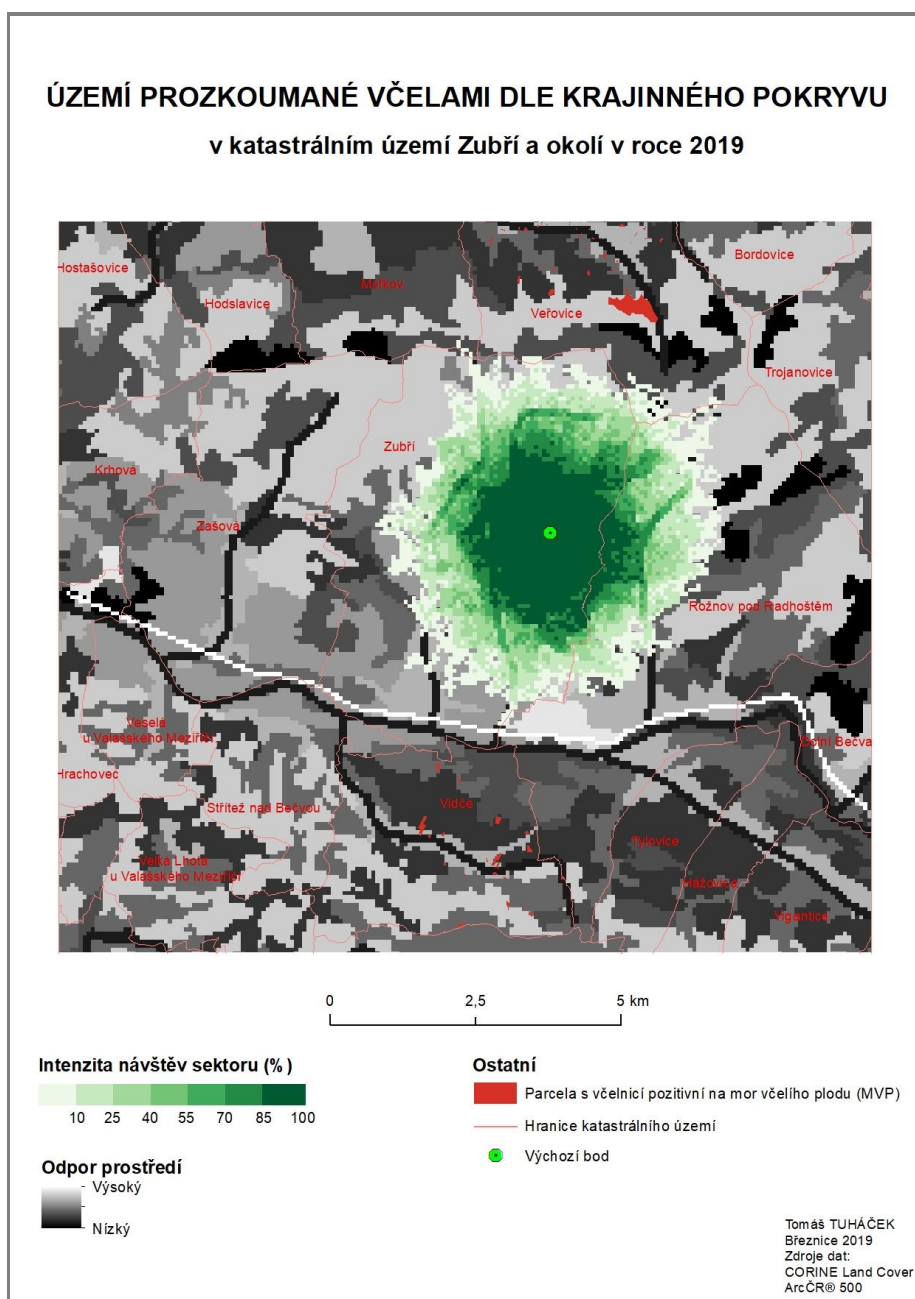
Zahrnutím údajů o nadmořské výšce do modelu lze vypočítat v dané lokalitě po 25 iteracích převahu návštěv jihozápadních sektorů vzhledem k výchozímu bodu (obr. 6.17). Včely soustředí průzkum především na území Zubří, s nižší intenzitou i v Rožnově pod Radhoštěm. Dle očekávání hřeben Veřovických vrchů funguje jako bariéra a znemožňuje včelám se dostat do k.ú. Veřovice. Pokud by však výchozí bod byl umístěn severněji ve vyšších polohách, lze předpokládat, že by mohlo, i s ohledem na nižší vzdálenost, k loupení v tomto ohnisku dojít. Z výsledku je dále patrné, že včely dokáží doletět až na území Vidče, i když s nižší intenzitou. Agentům chybí pouze okolo 400 m k prvním včelnicím v tomto katastrálním území. Nelze tedy vyloučit nakažení v případě, že by byly pozitivní. Nejvyšší pravděpodobnost je při výskytu ohniska přímo v Zubří ve vzdálenosti do dvou kilometrů od výchozího bodu.



Obr. 6.17 Prozkoumané území dle výškopisných dat.

6.3.2 Výsledky pohybu včel dle krajinného pokryvu

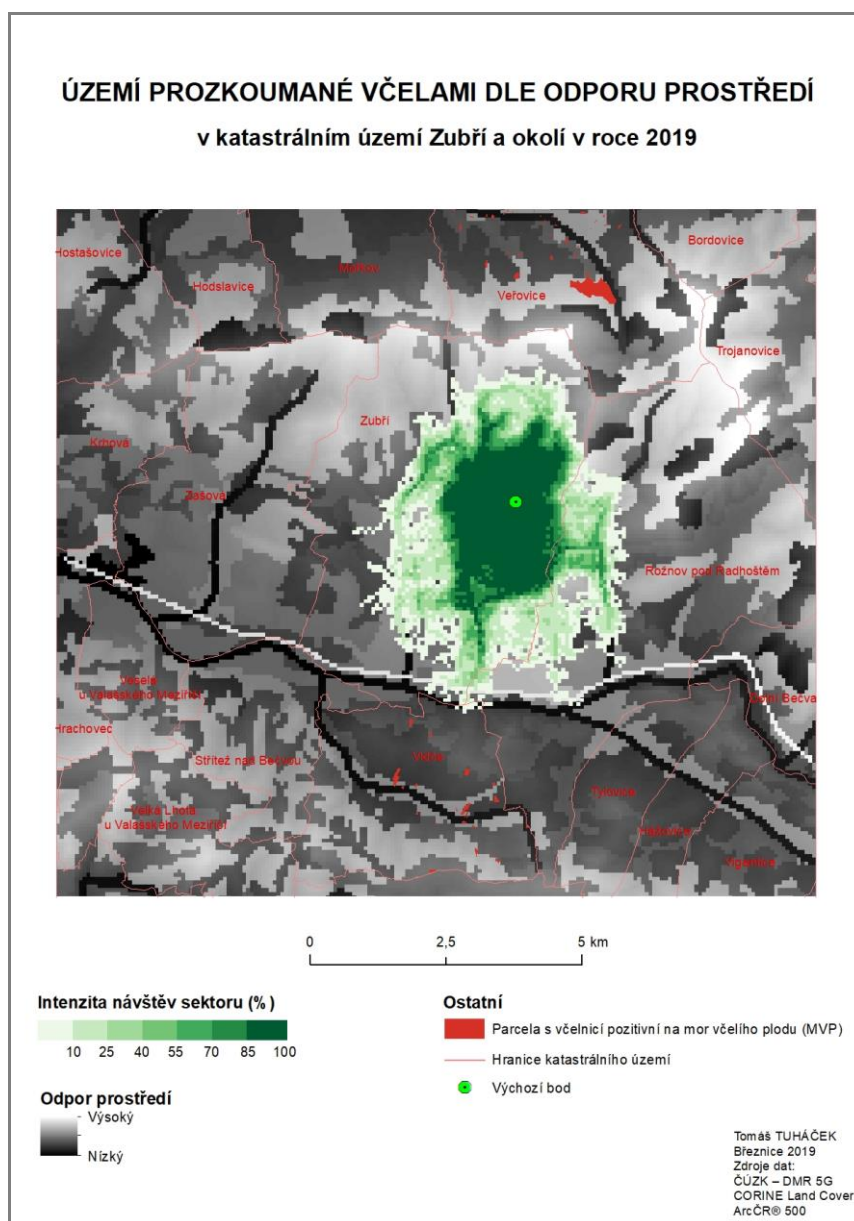
Využitím datové sady CORINE Land Cover pro určení odporu prostředí a po provedení 25 iterací bylo získáno prozkoumané území na obrázku 6.18. Nejvyšší intenzita návštěv sektorů je do vzdálenosti 1,5 kilometrů od výchozího bodu a nelze pozorovat žádný výrazný vliv prostředí. Celkově se intenzita směrem od středu snižuje. Pouze v severní části je radiální tvar oblasti narušen výskytem ploch s nižším odporem než u jehličnatého lesa. Dále jsou viditelné koridory vyšší intenzity podél vodních toků a okolní vegetace. Při pohledu na ohniska MVP lze konstatovat, že v případě dat krajinného pokryvu se včely dostaly na území Veřovic. K nejbližším včelnicím chybí ale více než jeden kilometr přímou čarou a pravděpodobnost, že by včely tuto vzdálenost překonaly je poměrně nízká. Nejvíce navštívených sektorů se nachází v Zubří a poměrně hojně je zastoupen i Rožnov pod Radhoštěm.



Obr. 6.18 Prozkoumané území dle krajinného pokryvu.

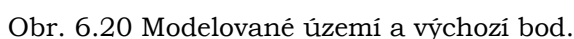
6.3.3 Výsledky pohybu včel dle kombinovaného odporu prostředí

Prozkoumané území (obr. 6.19) bylo získáno po provedení 25 iterací modelu využívajícího pro určení odporu prostředí kombinaci výškopisných dat a krajinného pokryvu. Rozložení sektorů s nejvyšší intenzitou návštěv je podobné výsledkům založených na výškopisných datech, což potvrzuje nízký vliv typu prostředí v blízkém okolí včelnice. Bariéry způsobené výskytem ploch s vyššími hodnotami odporu lze pozorovat v nižších intenzitách, například v severní části prozkoumané oblasti, kde se nachází průmyslová a obchodní zóna Rožnova pod Radhoštěm. Včely doletěly až na území Vidče a k prvním včelnicím chybělo přes 500 metrů. Oproti tomu riziko přenosu nákazy z ohniska Veřovice je minimální s ohledem na vzdálenost a podmínky oddělující prozkoumané území od včelnic. Nejvyšší pravděpodobnost přenosu je i pro povrch získaný kombinací odporů při výskytu MVP přímo v Zubří jihozápadně od výchozího bodu.



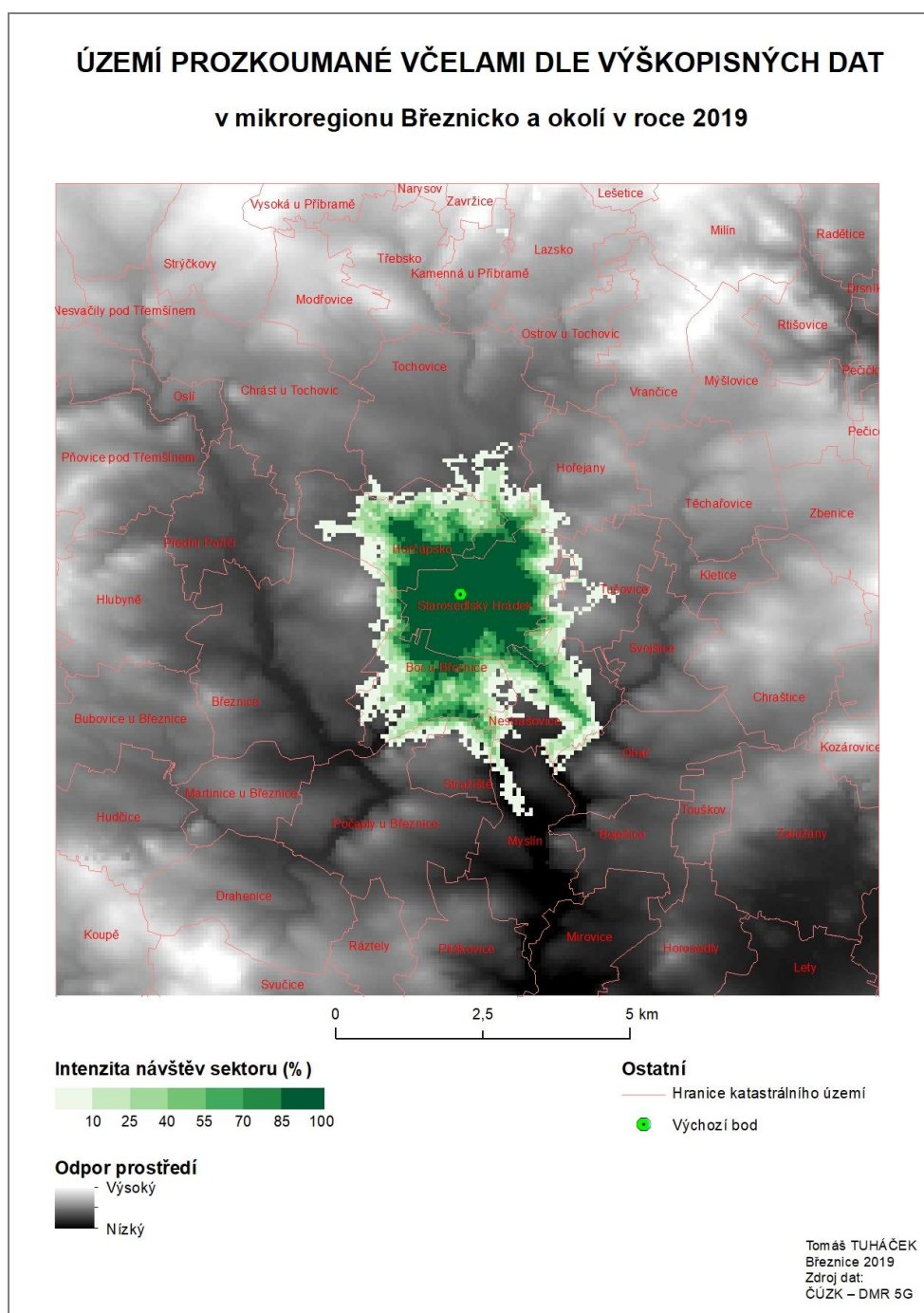
Obr. 6.19 Prozkoumané území dle odporu prostředí.

Pro ověření správné funkčnosti modelu byl proveden druhý experiment s jiným územím. Hlavní odlišnost oproti prvnímu experimentu spočívá ve struktuře krajiny. Zatímco v katastrální území Zubří jsou do značné míry zastoupeny jehličnaté lesy, louky a zemědělská území s příměsí přirozené vegetace, zde převládá orná půda (obr. 6.20). Výchozí bod se nachází v katastrálním území Starosedlský Hrádek. V jeho okolí se kromě již zmíněné orné půdy vyskytuje i několik menších ploch tvořených jehličnatými lesy a průmyslová zóna v obci Březnice. Výškové rozdíly jsou oproti předchozímu experimentu zanedbatelné. V lokalitě se nenachází žádné ohnisko MVP a model tedy slouží pro popis způsobu, jakým včely prozkoumávají krajinu při hledání potravy. Pro získání výsledného prozkoumaného území bylo vždy provedeno 25 iterací.



6.4.1 Výsledky pohybu včel dle výškopisných dat

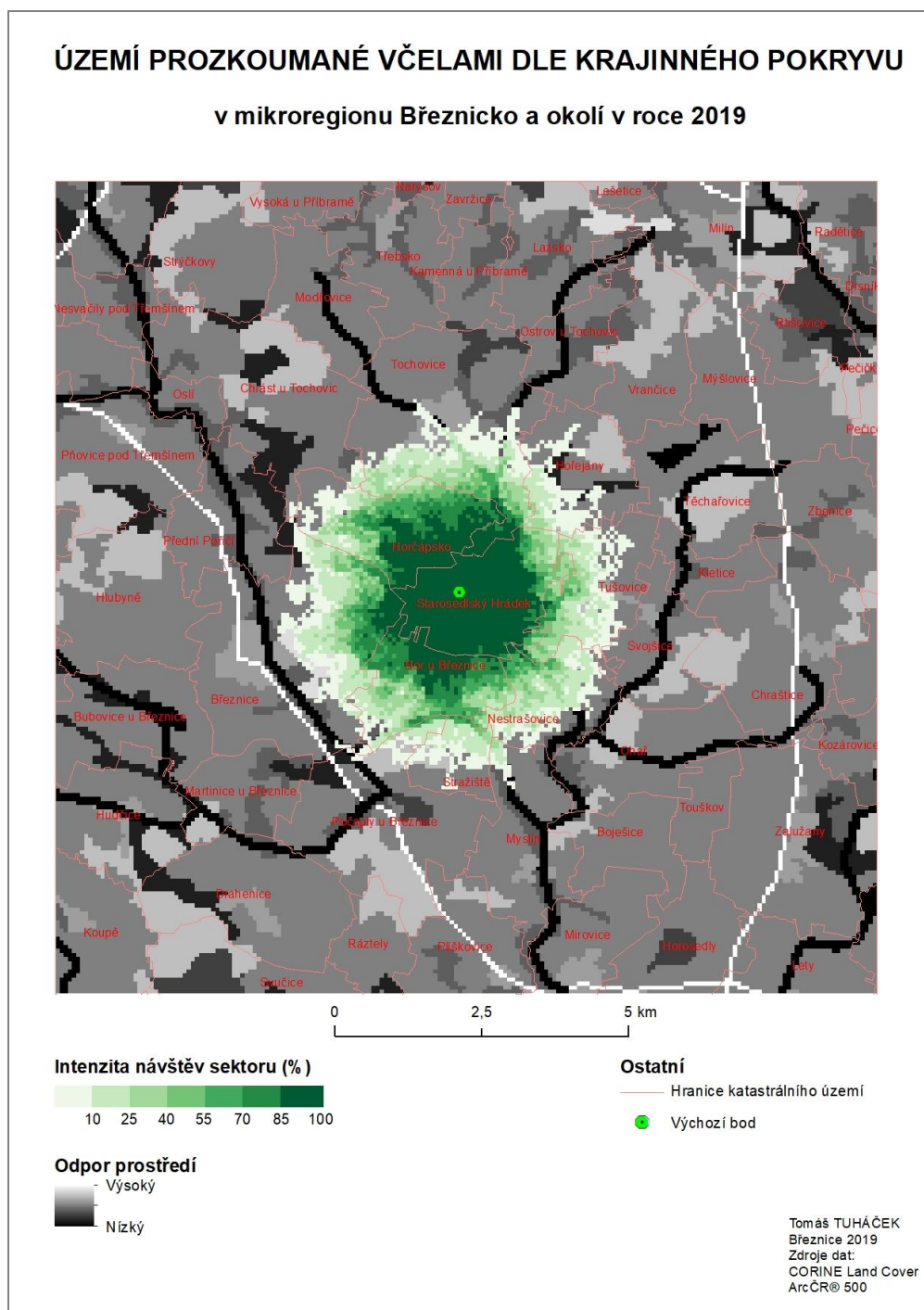
Sektory s nejvyšší intenzitou návštěvnosti se nacházejí především na území Starosedlského Hrádku a částečně i v Horčápsku a Boru u Březnice ve vzdálenosti 1,5 kilometru od výchozího bodu (obr. 6.21). Tvar prozkoumané oblasti je poměrně pravidelný, pouze v severovýchodní části lze pozorovat vliv údolí v Nestrašovicích. S nižší intenzitou jsou zčásti zastoupeny katastrální území Tochovice a Myslín. Navzdory očekávání se poměrně málo navštívených sektorů vyskytuje v katastrálním území Březnice. Důvodem může být pozvolný nárůst výšky směrem k této obci. Včely v omezené míře překonaly Kotovu horu v Tušovicích a vrchům severně od výchozího bodu se převážně vyhnuly.



Obr. 6.21 Prozkoumané území dle výškopisných dat.

6.4.2 Výsledky pohybu včel dle krajinného pokryvu

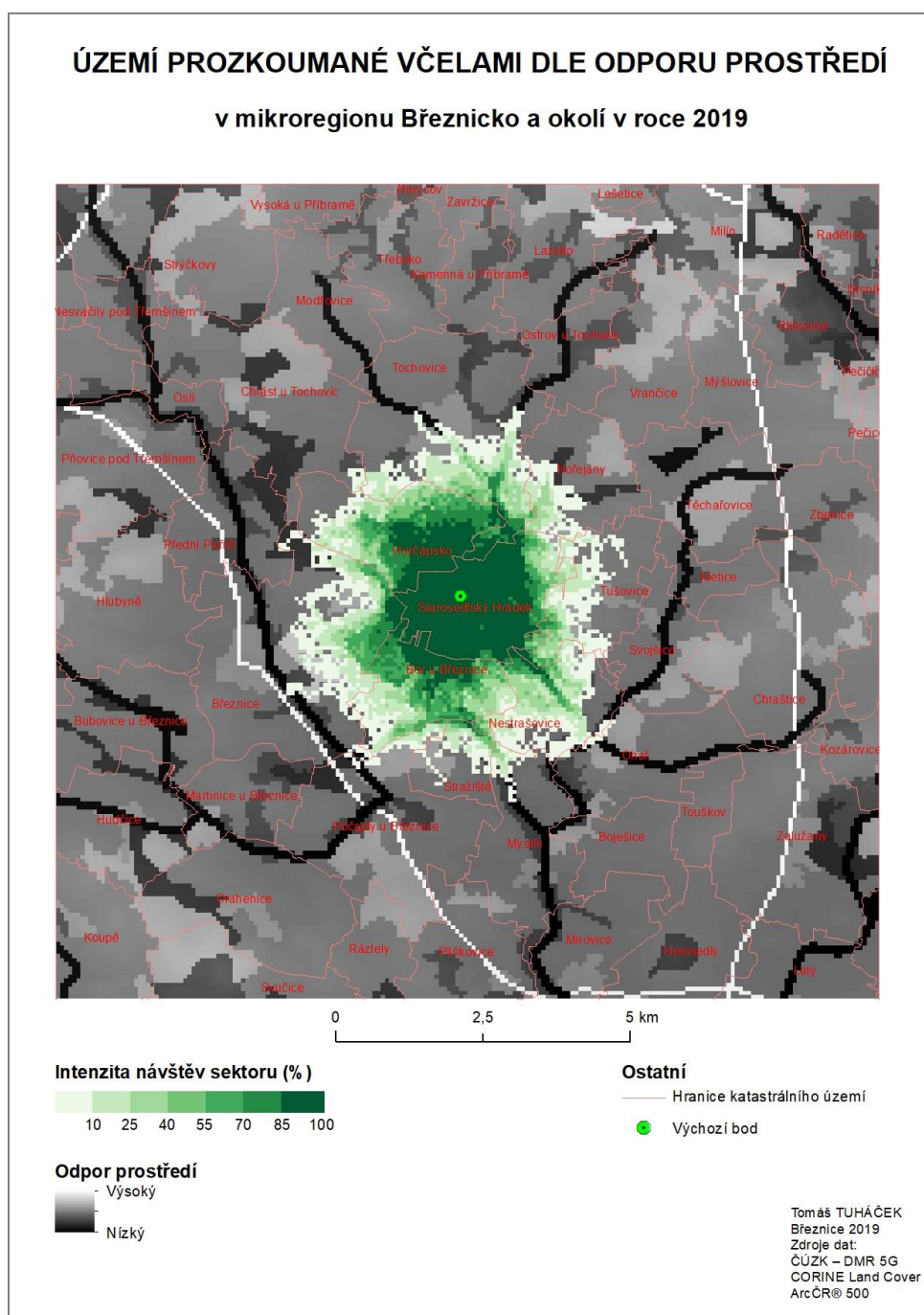
Oblast nejvyšší intenzity návštěvnosti se rozkládá na katastrálních územích Starosedlský Hrádek, Horčápsko a Bor u Březnice. Intenzita se se zvyšující se vzdáleností od výchozího bodu snižuje poměrně pravidelně. U přechodu do méně často prozkoumávaných oblastí je patrný vliv výskytu ploch jehličnatých lesů. V jihozápadní části jsou změny intenzity v souladu s výskytem průmyslové zóny v Březnici, a oproti použití výškopisných dat lze pozorovat značný nárůst počtu sektorů na území této obce. Celkově je prozkoumané území větší než v předchozích případech, což může být způsobeno převahou zemědělských ploch v modelované lokalitě.



Obr. 6.22 Prozkoumané území dle krajinného pokryvu.

6.4.3 Výsledky pohybu včel dle kombinovaného odporu prostředí

Prozkoumané území (obr. 6.23) bylo získáno kombinací výškopisných dat a datové sady CORINE Land Cover. Nejvíce včelami prozkoumané k.ú. jsou Starosedlský Hrádek, Horčápsko a Bor u Březnice. Celkově prozkoumané území poměrně odpovídá reálným podmínkám v lokalitě. Sektory s nižší intenzitou návštěvnosti se nacházejí v oblastech s výskytem jehličnatých lesů a průmyslové zóny a intenzita také postupně klesá na území Březnice v souvislosti s nárůstem výšky. Dále jsou patrná území, která včely obletěly, jedná se o vrchy Vinice a Šance a v k.ú. Březnice a Bor u Březnice. Překonána byla Kotova hora v Tušovicích, i když pouze v nízkém počtu z provedených iterací.



Obr. 6.23 Prozkoumané území dle odporu prostředí.

7 VÝSTUPY A CELKOVÉ VÝSLEDKY

První část výsledků spočívá v přehledu základních částí prostorového agentně založeného modelu. Jednotlivé složky jsou popsány včetně jejich vlastností a možných přístupů. Za nejdůležitější aspekt, lze považovat chování a pravidla určující pohyb a interakci. Možnost specifikovat chování agentů pomocí jednoduchých pravidel za zisku komplexního systému a emergence je hlavní výhodou agentně založených modelů. Kromě v práci použitého nejjednoduššího matematického přístupu, jsou popsány i složitější metody. Jedná se o tzv. kognitivní rámce či architektury Beliefs, desires, and intentions (BDI) a PECS (physical conditions, emotional states, cognitive capabilities and social status).

Prvním výstupem práce je **rozběr problematiky práce s prostorem v agentně založených modelech**. Integraci dat umožňují prostor typu grid a geograficky definovaný prostor tvořený vektorovými daty. Rastrová data lze rozdělit dle vlastností na kvalitativní a kvantitativní. Při nahrání souboru jsou jednotlivé buňky v rastru převedeny na agenty typu patch nebo cell a tón barvy určí hodnoty jejich proměnných. Odstínem lze pak určit intenzitu jevu. Vstupní data jsou nejčastěji ve formátu PNG a je nutné dbát na rozlišení a rozměry modelované oblasti. Dle parametrů nastavených v modelu lze data v některých případech transformovat při inicializaci. Dochází ale k deformacím a nepřesnostem ve vzdálenostech. Od určitých rozměrů, například pro GAMA Platform se jednalo o soubory s rozměry většími než 200 x 200 pixelů, nelze model pro nedostatek výpočetních kapacit nástroje používat. Pro inicializaci prostoru lze použít i soubory typu ASCII (asc) nebo CSV, kterým je v kódu dle hodnot přiřazena opět barva. Geografický informační systém využívá data ve formátu shp. Pro pohyb agentů jsou vektorová data převedena do podoby ohodnocené sítě. Pro umístění agentů a určení zájmových bodů lze použít libovolné bodové a polygonové vrstvy, včetně vlastností specifikovaných atributy v atributové tabulce. Při testování nástrojů umožňujících import vektorových dat nebylo nalezeno žádné omezení co do velikosti a podrobnosti dat. V případě nástroje AnyLogic je podporován i import ve formátu xls a silniční síť je stažena z OSM serveru dle specifikované oblasti. Kromě zmíněných bodů je v práci popsána i struktura a způsob jakým se agenty v prostoru pohybují.

Dalším výstupem je **praktické použití vývojových nástrojů** pro tvorbu agentních systémů. Jednotlivé nástroje jsou popsány, včetně základních informací potřebných k spuštění softwaru. Součástí je vždy i návod na sestavení základního modelu a představen je způsob integrace s GIS v dané aplikaci. Jedná se především o využití prostorových dat pro inicializaci prostředí a následné určení parametrů pro chování, pohyb a interakci agentů. Nástroje ale na rozdíl od GIS software neumožňují analýzu a vizualizaci výsledků získaných z většího počtu iterací. Nejčastější výstupy jsou v podobě textového souboru obsahujícího základní hodnoty sledovaných proměnných, případně jsou výsledky zobrazeny formou grafu. Nejvhodnějším řešením je použít ABM pouze pro výpočet a následnou analýzu provést v GIS umožňuje-li daný nástroj export dat ve formátu shp. Z hlediska podporované funkcionality, s ohledem na práci s prostorovými daty a náročnosti na implementaci vychází dle autora práce z testovaných nástrojů nejlépe Gama Platform nebo AnyLogic.

Pro **simulaci kapacity autobusové dopravy v nástroji AnyLogic** byl využit model vytvořený původně pro území města Boston a okolí Davidem Sprogisem. Po úpravě parametrů a nahrání vlastních dat pro území České republiky, se model v praktické úloze choval dle očekávání a byl využit pro testování dvou možných variant řešení problému s nedostatečnou kapacitou dopravy v odpolední špičce.

Stěžejním výstupem práce je **vytvořený model pohybu včel v prostředí v nástroji GAMA Platform**. Motivace pro vznik modelu spočívala v šíření včeliho moru a roli výškových poměrů v lokalitě. Model používá na vstupu výšková data, například DMR 5G a datovou sadu CORINE Landcover, obě v rastrovém formátu PNG s jevem vizualizovaným pomocí stupnice od černé po bílou a také vektorovou mřížku stejných rozměrů pro určení souřadnic výstupu a následnou vizualizaci výsledků. Dle pravidel specifikovaných v chování včely prozkoumávají své okolí za pomoci výběru některého ze sousedů s nižším nebo stejným odporem pro pohyb. Součástí modelu je i funkcionality pro situace, kdy je účelem simulace pouze zjistit, zda může dojít k nákaze. Výsledkem modelu po 100 krocích je území prozkoumané včelami. Výstupy modelu jsou ve dvou formátech. Prvním je snapshot konečného stavu ve formátu PNG. Druhým výstupem je prozkoumaná oblast uložena ve formátu shapefile. Pro vizualizaci a analýzu je nutné výstup nahrát například do aplikace ArcMap, vybrat sektory u kterých je hodnota atributu „Visited“ rovna dvěma. Velkou roli v ABM hraje vliv náhodnosti a nepředvídatelnosti chování. Z tohoto důvodu je nutné spustit simulaci vícekrát. V provedených experimentech se jednalo celkem o 25 iterací pro každou variantu modelu. Výsledky byly v aplikaci ArcMap uloženy do vstupní vektorové mřížky modelu a vypočtena intenzita návštěvnosti sektorů.

V první případové studii bylo modelováno katastrální území Zubří a okolí. V lokalitě se vyskytovala dvě ohniska, Veřovice oddělené hřebenem Veřovických vrchů a Vidče nacházející se jižně od východního bodu. Včely ani v jednom z provedených variant a iterací nedokázaly na území Veřovic doletět a lze konstatovat, že výškové poměry mohou za určitých okolností vytvářet zábrany pro šíření včeliho moru.

Druhá případová studie sloužila především pro ověření chování modelu s jinými daty. V modelované lokalitě převažovala orná půda a několik oblastí s vyšším odporem v podobě lesů, průmyslové zóny a vrchů. Tvar prozkoumané oblasti byl radiální a intenzita návštěvnosti se snižovala od středu k okrajům s přihlédnutím k vlastnostem prostředí. Celkově bylo prozkoumané území větší než v předchozí případové studii, což může být způsobeno nižší heterogenitou krajiny modelované oblasti.

8 DISKUZE

Značně problematický byl jeden z prvních kroků celé práce, konkrétně výběr vývojových nástrojů pro agentní systémy. Na základě zkušeností získaných při implementaci modelů a z příslušné dokumentace, vychází autorovy poznatky o práci s prostorem v ABM. Podporovaná funkcionalita daných nástrojů do značné míry ovlivnila vytvořený model pohybu včel v prostředí. Hlavním kritériem výběru byla podpora importu prostorových dat. Snahou autora bylo co nejpodrobněji vyzkoušet všechny nástroje zmíněné v přečtené literatuře a sestavit v nich alespoň jeden praktický model s daty dostupnými v České republice. Vynechán byl pro vysokou náročnost implementace modelů software Swarm a z důvodu licenčních podmínek byl využit pouze ukázkový model v nástroji MATSim. Vzhledem k velkému množství dostupných knihoven, balíčků, rozšíření, nebyla detailně testována veškerá funkcionalita nástrojů Repast a (Geo)MASON.

Funkcionalita modelu kapacity autobusové dopravy vytvořeného Davidem Sprogisem nebyla nijak rozšiřována. Vhodné by bylo zahrnout vliv dopravy, uzavírek nebo výluk. Použití pro simulaci hromadných akcí a mimořádných událostí s výrazným zvýšením počtu cestujících není bez větších úprav modelu možné. Vyzkoušené případy zahrnovaly kulturní akci Loštický tvarůžek s frekvencí 800 cestujících za hodinu a problematiku zpožděných vlaků v Mohelnici. Obě zmíněné simulace vedly po změnách parametrů vždy ke kolapsu modelovaného systému.

Důležitými parametry prostorových agentně založených modelů, především u prostoru typu grid, jsou rozměry a rozlišení implementovaného prostředí. Velikost modelované oblasti byla v provedeném experimentu stanovena takovým způsobem, aby byla zahrnuta obě ohniska a aby vzdálenost od výchozího bodu k okrajům prostoru byla okolo sedmi kilometrů. V případě použití menších rozměrů by mohlo dojít k situaci, kdy agent narazí na přítomnou bariéru okraje prostoru. Rozlišení 70. metrů vychází za prvé z celkové vzdálenosti, kterou mohou včely při průzkumu urazit. Hlavním důvodem proč nebylo využito vyššího rozlišení výškopisných dat a v České republice dostupné Open Land Use map, byla výpočetní kapacita softwaru GAMA Platform.

Prostředí kombinovaného odporu vzniklo sečtením výškopisných dat DMR 5G a datové sady CORINE Land Cover. V použitém modelu je váha obou vstupních rastrů po provedených úpravách přibližně stejná. Dle konkrétní situace je možné zvýšit význam některé ze složek při vytváření povrchu v prostředí GIS.

Vektorová mřížka v modelu slouží pouze pro následné ukládání a vizualizaci výsledků v GIS a na výpočet nemá žádný vliv. Bez úprav příslušného kódu musí být ale s odpovídajícími parametry součástí nahrávaných souborů.

Důležitým faktorem ovlivňujícím způsob průzkumu prostředí včelami je směr a intenzita větru. Zahrnutí povětrnostních podmínek by mohlo do značné míry zpřesnit výsledky modelu.

Okolí odporu kategorií Silnice I. třídy a dálnic vychází z rozlišení modelu. Při použití obalové zóny o velikosti 35 metrů, je ve výsledném rastru vytvořena bariéra pro pohyb o velikosti jedné buňky, která sice omezuje pohyb, ale není neprostupná. Odpor u dálnic je zvýšen přítomností dvou sousedících buněk. Agent pro překonání uvedené bariéry musí provést rozhodnutí o výběru souseda s vyšším odporem dvakrát.

Počet včel v simulaci byl po testování stanoven na 49. Vyšší množství agentů nepřinášelo podrobnější výsledky, rozloha prozkoumané oblasti byla téměř beze změn a

doba výpočtu se při použití 100 a více včel téměř zdvojnásobila (z 20 – 30 minut na okolo 50 minut).

V modelu jsou implementovány celkem tři druhy včel, které se liší pouze barvou a počátečním umístěním. Parametry a chování je možné upravovat a zvýšit tak komplexitu modelu. Například jeden druh může být pod větším stresem nebo oslaben. Možností je umístit výchozí body dál od sebe a pozorovat po jaké době a kde dojde k interakci. Barvu a hodnoty buněk prozkoumané oblasti určené druhem včely lze nastavit úpravou reflexu update, akce update_color a hodnotou color_value a zavedením příslušné barvy.

Pravidlo pro chování včel v modelu stanovuje, že včela si pro další pohyb vybere některého ze sousedů s nižším odporem s 80% pravděpodobností. Tento parametr lze volitelně upravovat pomocí příslušné hodnoty u flip dle konkrétní aplikace. Možné je i obrácené chování oproti současně implementovanému. Lze tedy simulovat i včely, které například vlivem stresových situací vybírají méně výhodně varianty.

Některé včely mohou být po určitou dobu simulace zacyklené v již prozkoumané oblasti. Důvodem je ošetření chyby prázdného seznamu vhodných sousedů pro další pohyb pomocí náhodného výběru. Řešení v podobě výběru nejvýhodnějšího kandidáta nepřiměřeně ovlivňovalo výsledky modelu a způsobovalo výskyt chyby v situacích, kdy více agentů zvolilo stejnou nejvýhodnější buňku.

Vytvořený model pohybu agentů v prostředí využívá jednoduchého matematického přístupu pro určení pravidel chování agentů. S ohledem na modelovaný systém nebylo nutné implementovat komplexnější rámce a architektury. Nicméně zahrnutím některého z uvedených přístupů by byl více využit potenciál agentních systémů. Na stránkách GitHub nástroje GAMA Platform lze nalézt návod prezentující způsob, pomocí kterého lze agentům přidat mimo jiné koncept plánování, touhy, emoce a sociální chování.

Prostorové agentně založené modely lze využít v případech, kdy je vyžadována autonomnost chování a důležitou roli hraje interakce s prostředím a s ostatními agenty. Nespornou výhodou je možnost zahrnout prostorová data umožňující modelovat pohyb agentů v „reálném“ prostředí. Odborníci mohou prostřednictvím prostorových ABM vyzkoušet celou řadu scénářů a získat data, která by jiné metody sběru a analýzy poskytla za podstatně delší dobu a při vyšších nákladech. V práci představený model demonstruje na pohybu včel v prostředí jeden z možných přístupů s využitím rastrových dat. Po úpravě potřebných parametrů chování a vstupních dat by model mohl být použit pro simulaci pohybu jakýchkoliv živočichů s ohledem na vlastnosti prostředí, například pro popis šíření kůrovce v českých lesích.

9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověřit možnosti integrace prostorových dat a geografických informačních systémů v agentně založených modelech. Na základě získaných poznatků provést návrh a implementaci prostorového agentně založeného modelu využívajícího data dostupná v České republice a následně funkcionality otestovat na praktických úlohách.

Teoretická část práce se zabývala jednotlivými složkami agentně založeného modelu. Popsán byl agent a jeho vlastnosti, jednotlivé typy prostředí a zvláštní pozornost byla věnována chování a pravidlům pro pohyb a interakci. Zmíněna byla i evaluace modelu a standardizace popisu pomocí Overview, Design concepts ad Details (ODD) protokolu. S ohledem na účel vytvořeného modelu jsou součástí i poznatky o pohybu včel v prostředí a šíření nemoci, především moru včeliho plodu.

Praktickou část lze rozdělit na tři hlavní výstupy. Nejdříve bylo nutné se detailně seznámit s prostorovou složkou agentně založených modelů. Popsána byla vždy nejprve struktura. Následoval popis způsobu implementace. Pokud daný typ prostoru umožňuje import dat, jsou uvedeny příslušné formáty. Jedná se o prostor typu grid, který využívá rastrová data a vlastnosti prostředí v ABM jsou získány dle kódů barev ve vstupním souboru. Pohyb a interakce probíhá v definovaném sousedství. Geograficky definovaný prostor tvořený vektorovými daty je v ABM označován termínem geografický informační systém. Inicializuje se nahráním bodových liniových a polygonových vrstev ve formátu shapefile. Vlastnosti agentů mohou být určeny dle hodnot jejich atributů v atributové tabulce. Agenty se v prostředí pohybují po ohodnoceném síťovém grafu, který je vytvořen z nahrané komunikační sítě.

Před vytvořením modelu bylo nutné získat přehled o možných vývojových nástrojích pro agentní systémy. Vybrán byl následující software: NetLogo, Repast, (Geo)MASON, GAMA Platform, AnyLogic a MATSim. Jednotlivé aplikace byly popsány a uveden byl způsob implementace jednoduchého modelu. Důraz byl kladen na případnou GIS funkcionality a možnosti importu prostorových dat.

Na základě konzultací a získaných poznatků byl vytvořen návrh a posléze implementován model pohybu včel v prostředí v nástroji GAMA Platform. Prostor typu grid byl tvořen pomocí výškopisných dat a krajinného pokryvu. Následně byl model použit ve dvou případových studiích. Bylo potvrzeno, že výškové poměry mohou vytvářet bariéry pro pohyb včel a tedy šíření nemoci, například moru včeliho plodu. I při změně prostředí se model choval dle očekávání a získaná prozkoumaná oblast v druhém případové studii odpovídala podmínkám v dané lokalitě.

Zjištěné poznatky o práci s prostorem v ABM a praktickém použití vývojových nástrojů mohou poskytnout odborníkům základní informace o možnostech využití prostorových dat spolu s agentně založenými modely pro řešení celé řady praktických úloh. Vytvořený model umožňuje včelařům si ověřit, zda jejich včely při průzkumu doletí do ohnisek moru včeliho plodu či nikoliv. Případně je možné pomocí modelu určit, kde se může zdroj nákazy s určitou pravděpodobností přibližně nacházet. Výstupy modelu lze po úpravě v geografickém informačním systému také využít pro vizualizaci a popis jakým způsobem včely prozkoumávají okolí při hledání potravy.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

ABAR, Sameera, Georgios THEODOROPOULOS, Pierre LEMARINIER a Gregory O'HARE, 2017. Agent Based Modelling and Simulation tools. *Computer Science Review*. **24**, 13-33. DOI: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1574013716301198>

ALASIO, Luca, 2011. Traffic and pollution in Torino. *Traffic and pollution in Torino*. Torino: Scuola di Studi Superiori dell'Università di Torino. Dostupné také z: https://terna.to.it/tesine/traffic_and_pollution_in_torino.htm

ALLAN, Rob, 2010. *Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools*. Computational Science and Engineering Department, STFC Daresbury Laboratory, Daresbury, Warrington WA4 4AD.

AXELROD, Robert, 1997. *The complexity of cooperation*. 1. Princeton, N.J.: Princeton University Press.

BECHER, M., V. GRIMM, J. KNAPP, J. HORN, G. TWISTON-DAVIES a J. OSBORNE, 2016. BEESCOUT. *Ecological Modelling*. **340**, 126-133. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2016.09.013. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438001630415X>

BECHER, Matthias, 2013. *BEEHAVE | The Model*. Dostupné také z: <http://beehave-model.net/>

BETTI, Matthew, Josh LECLAIR, Lindi WAHL a Mair ZAMIR, 2017. Bee: An Object-Oriented, Agent-Based Simulator for Honey Bee Colonies. *Insects*. 8(1). DOI: 10.3390/insects8010031. ISSN 2075-4450. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2075-4450/8/1/31>

BHATTACHARYA, Madhumita, Richard PRIMACK a Joel GERWEIN, 2003. Are roads and railroads barriers to bumblebee movement in a temperate suburban conservation area?. *Biological Conservation*. **109**, 37-45. DOI: 10.1016/S0006-3207(02)00130-1. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0006320702001301>

BONABEAU, E., 2002-05-14. Agent-based modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **99**, 7280-7287. DOI: 10.1073/pnas.082080899. Dostupné také z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.082080899>

BOSCOLO, Danilo, Paola TOKUMOTO, Patrícia FERREIRA, John RIBEIRO a Juliana SANTOS, 2017. Positive responses of flower visiting bees to landscape heterogeneity depend on functional connectivity levels. *Perspectives in Ecology and Conservation*. **15**, 18-24. DOI: 10.1016/j.pecon.2017.03.002. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2530064417300329>

BÜREN, Raphael, Bernadette OEHEN, Nikolaus KUHN a Silvio ERLER, 2019. High-resolution maps of Swiss apiaries and their applicability to study spatial distribution of bacterial honey bee brood diseases. *PeerJ*. **7**. DOI: 10.7717/peerj.6393. Dostupné také z: <https://peerj.com/articles/6393>

BURIAN, Jaroslav, Lenka ZAJICKOVA, Stanislav POPELKA a Miroslav RYPKA, b.r. SPATIAL ASPECTS OF MOVEMENT OF OLOMOUC AND OSTRAVA CITIZENS. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016: Geoconference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing*. At, -. DOI: 10.5593/SGEM2016/B23/S11.056. Dostupné také z: <http://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article8588>

CATS, Oded a Erik JENELIUS, 2015. Planning for the unexpected. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. **81**, 47-61. DOI: 10.1016/j.tra.2015.02.013. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965856415000300>

The CCL, *The Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*. Dostupné také z: <https://ccl.northwestern.edu/>

CIMR, Dalibor, 2016. *Agentová simulace efektivního rozmístění aktivních prvků protivzdušné obrany*. Hradec Králové. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/3zu3or/STAG85985.pdf>. Diplomová práce.

COLETTI, Mark, 2013. *The GeoMason Cookbook*. George Mason University. Dostupné také z: <http://cs.gmu.edu/eclab/projects/mason/extensions/geomason/>

COLLIER, Nick a Michael NORTH, b.r. *REPAST JAVA GETTING STARTED*. Dostupné také z: <https://repast.github.io/docs/RepastJavaGettingStarted.pdf>

COLOSS, , b.r. *Honey bee research association*. Dostupné také z: <https://coloss.org/>

CROOKS, Andrew, 2015. Agent-based Models and Geographical Information Systems. *Geocomputation*. Thousand: SAGE Publications, s. 63-77.

CROOKS, Andrew, 2018. *Agent-based modelling and geographical information systems*. 1. Thousand: SAGE Publications.

CROOKS, Andrew a Atesmachew HAILEGIORGIS, 2014. An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera. *Environmental Modelling & Software*. **62**, 164-177. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.08.027. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815214002515>

ČESKÝ SVAZ VČELARŮ, 2019. *Vcelarstvi.cz*. Dostupné také z: <http://www.vcelarstvi.cz/mor-vceliho-plodu/>

DANIHLÍK, Jiří, b.r. *Monitoring úspěšnosti zimování včelstev v ČR*. Dostupné také z: <https://colosscz.webnode.cz/>

DATTA, Samik, James BULL, Giles BUDGE a Matt KEELING, 2013. *Modelling the spread of American foulbrood in honeybees*. **10**. DOI: 10.1098/rsif.2013.0650.

DONKERSLEY, Philip, Glenn RHODES, Roger PICKUP, Kevin JONES a Kenneth WILSON, 2014. Honeybee nutrition is linked to landscape composition. *Ecology and Evolution*. **4**, 4195-4206. DOI: 10.1002/ece3.1293. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/ece3.1293>

FILATOVA, Tatiana, Peter VERBURG, Dawn PARKER a Carol STANNARD, 2013. *Spatial agent-based models for socio-ecological systems*. **45**, 1-7. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.03.017. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815213000807>

GAMA PLATFORM, *GAMA Platform website*. Dostupné také z: <http://gama-platform.org>

GENERSCH, Elke, 2010. American Foulbrood in honeybees and its causative agent, *Paenibacillus larvae*. *Journal of Invertebrate Pathology*. **103**, 10-19. DOI: 10.1016/j.jip.2009.06.015. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022201109001864>

GILBERT, G. a Klaus TROITZSCH, 2005. *Simulation for the social scientist*. 2nd ed. New: Open University Press.

GIMBLETT, H., 2002. *Integrating geographic information systems and agent-based modeling techniques for simulating social and ecological processes*. 1. New York: Oxford University Press.

GRIMM, Volker, Uta BERGER, Finn BASTIANSEN et al., 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*. **198**, 12. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023.

GRIMM, Volker, Uta BERGER, Donald DEANGELIS, J. POLHILL, Jarl GISKE a Steven RAILSBACK, 2010. The ODD protocol. *Ecological Modelling*. **221**, 2760-2768. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438001000414X>

HEPPENSTALL, Alison, Nick MALLESON a Andrew CROOKS, 2016. "Space, the Final Frontier". *Systems*. **4**. DOI: 10.3390/systems4010009. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2079-8954/4/1/9>

HORÁK, Jiří, 2016. *PROSTOROVÉ SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ DOSTUPNOSTI*. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Dostupné také z: <http://www.pf.jcu.cz/structure/departments/kge/upload/files/Horak.pdf>

HORNI, Andreas, Kai NAGEL a Kay AXHAUSEN, 2016. The Multi-Agent Transport Simulation MATSim. *The Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. Ubiquity Press, 620. DOI: 10.5334/baw.

HUHNS, Michael a Munindar SINGH, 1998. *Readings in agents*. San Francisco, Calif.: Morgan Kaufmann.

HUSÁKOVÁ, Martina, 2013. Multi-agentové systémy pro modelování biologických fenoménů. In: *Kognice a umělý život*. Vysoké Tatry, Stará Lesná.

JARCOVJÁK, David, 2013. *Testování aplikace Foursquare pro sledování pohybu osob v Olomouci*. Olomouc. Dostupné také z: http://www.geoinformatics.upol.cz/dprace/bakalarske/jarcovjak13/download/jarcovjak_text.pdf. Bakalářská práce.

JATULAN, Eduardo, Jomar RABAJANTE, Charina BANAAY, Alejandro FAJARDO, Editha JOSE a Wulfila GRONENBERG, 2015. A Mathematical Model of Intra-Colony Spread of American Foulbrood in European Honeybees (*Apis mellifera* L.). *PLOS ONE*. **10**. DOI: 10.1371/journal.pone.0143805. Dostupné také z: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0143805>

JELÍNEK, Jiří a Jana VYSOKÁ, 2013. Modelování dynamiky dopravního proudu. *Silnice Železnice*. Dostupné také z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/modelovani-dynamiky-dopravního-proudu/>

KARBOVSKII, Vladislav, Daniil VOLOSHIN, Andrey KARSAKOV, Alexey BEZGODOV a Aleksandr ZAGARSKIKH, 2015. Multiscale Agent-based Simulation in Large City Areas. *Procedia Computer Science*. **51**, 2367-2376. DOI: 10.1016/j.procs.2015.05.407. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877050915012156>

KENNEDY, William, 2012. Modelling Human Behaviour in Agent-Based Models. *Agent-Based Models of Geographical Systems*. Dordrecht: Springer Netherlands, 167-180. DOI: 10.1007/978-90-481-8927-4.

KRAVARI, Kalliopi a Nick BASSILIADES, 2015. A Survey of Agent Platforms. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. **18**. DOI: 10.18564/jasss.2661. Dostupné také z: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/18/1/11.html>

KUBÍK, Aleš, 2004. *Intelligentní agenty*. 1. Brno: Computer Press.

KUCHLING, Sabrina, Ian KOPACKA, Elfriede KALCHER-SOMMERSGUTER, Michael SCHWARZ, Karl CRAILSHEIM a Robert BRODSCHNEIDER, 2018. Investigating the role of landscape composition on honey bee colony winter mortality: A long-term analysis. *Scientific Reports*. **8**, 12263. DOI: 10.1038/s41598-018-30891-y. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30891-y>

LINDSTRÖM, Anders, Seppo KORPELA a Ingemar FRIES, 2008. Horizontal transmission of *Paenibacillus* larvae spores between honey bee (*Apis mellifera*) colonies through robbing. *Apidologie*. **39**, 515-522. DOI: 10.1051/apido:2008032. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1051/apido:2008032>

LONSDORF, Eric, Claire KREMEN, Taylor RICKETTS, Rachael WINFREE, Neal WILLIAMS a Sarah GREENLEAF, 2009. Modelling pollination services across agricultural landscapes. *Annals of Botany*. **103**, 1589-1600. DOI: 10.1093/aob/mcp069. Dostupné také z: <https://academic.oup.com/aob/article-lookup/doi/10.1093/aob/mcp069>

LUKE, Sean, 2015. *Multiagent Simulation And the MASON Library*. George Mason University. Dostupné také z: <http://cs.gmu.edu/eclab/projects/mason/>

MACAL, Charles a Michael NORTH, 2014. Introductory tutorial. *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*. IEEE, 6-20. DOI: 10.1109/WSC.2014.7019874. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7019874/>

MACAL, Charles a Michael NORTH, 2007. Agent-based modeling and simulation. *2007 Winter Simulation Conference*. IEEE, 95-106. DOI: 10.1109/WSC.2007.4419592. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4419592/>

MALLESON, Nick, Alison HEPPESTALL a Andrew CROOKS, 2018-01-24. Place-Based Simulation Modeling. *Oxford Research Encyclopedia of Criminology and Criminal Justice*. Oxford University Press. DOI: 10.1093/acrefore/9780190264079.013.319. Dostupné také z: <http://oxfordre.com/criminology/view/10.1093/acrefore/9780190264079.001.0001/acrefore-9780190264079-e-319>

MATOUŠEK, Jan, 2013. *Modelování dopravního systému*. České Budějovice. Dostupné také z: https://theses.cz/id/dzrvma/BP_Matousek.pdf. Bakalářská práce.

MCDONNELL, Simon a Moira ZELLNER, 2011. Exploring the effectiveness of bus rapid transit a prototype agent-based model of commuting behavior. *Transport Policy*. **18**, 825-835. DOI: 10.1016/j.tranpol.2011.05.003. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0967070X11000783>

MILL, Aileen, Steven RUSHTON, Mark SHIRLEY, Graham SMITH, Phil MASON, Mike BROWN a Giles BUDGE, 2014. Clustering, persistence and control of a pollinator brood disease. *Environmental Microbiology*. **16**, 3753-3763. DOI: 10.1111/1462-2920.12292. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/1462-2920.12292>

MÜLLER, Birgit, Friedrich BOHN, Gunnar DREßLER et al., 2013. Describing human decisions in agent-based models – ODD D, an extension of the ODD protocol. *Environmental Modelling & Software*. **48**, 37-48. DOI: 10.1016/j.envsoft.2013.06.003. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815213001394>

O'SULLIVAN, David, Tom EVANS, Steven MANSON, Sara METCALF, Arika LIGMANN-ZIELINSKA a Chris BONE, 2015-10-13. Strategic directions for agent-based modeling. *Journal of Land Use Science*. **11**, 177-187. DOI: 10.1080/1747423X.2015.1030463. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1747423X.2015.1030463>

OZIK, Jonathan, 2017. *RELOGO GETTING STARTED GUIDE*. Dostupné také z: <https://repast.github.io/docs/ReLogoGettingStarted.pdf>

RAPANT, Petr.: *Prostor v multiagentových systémech modelujících prostorové procesy*. Acta Montanistica Slovaca, Košice, Ročník 12(2007), číslo 2, 84-97. Dostupné také z: <http://actamont.tuke.sk/pdf/2007/n2/2rapant.pdf>

Repast SIMPHONY, 2018. *Repast Symphony Reference Manual*. Dostupné také z: <https://repast.github.io/docs/RepastReference/RepastReference.html>

RUSSELL, Stuart a Peter NORVIG, 1995. *Artificial intelligence*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.

SAMUELSON, Ash a Ellouise LEADBEATER, 2018. A land classification protocol for pollinator ecology research. *Ecology and Evolution*. **8**, 5598-5610. DOI: 10.1002/ece3.4087. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1002/ece3.4087>

SCHELLING, Thomas, 1971. Dynamic models of segregation†. *The Journal of Mathematical Sociology*. **1**, 143-186. DOI: 10.1080/0022250X.1971.9989794. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0022250X.1971.9989794>

SCHMIDT, Bernd, 2002. Modelling of Human Behaviour The PECS Reference Model. *Proceedings 14th European Simulation Symposium*.

SIWEK, Roman, 2018. *Simulační modelování veřejné a individuální dopravy s podporou systému AnyLogic*. Ostrava. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10084/130033>. Diplomová práce.

SPROGIS, David, 2016. The Trouble with MBTA Bus Schedules. *Linkedin*. Dostupné také z: <https://www.linkedin.com/pulse/trouble-mbta-bus-schedules-david-sprogis>

SUN, Zhanli, Iris LORSCHIED, James MILLINGTON et al., 2016. Simple or complicated agent-based models? A complicated issue. *Environmental Modelling & Software*. **86**, 56-67. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.09.006. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815216306041>

ŠALAMON, Tomáš, 2011. *Design of agent-based models*. 1. Řepín-Živonín: Tomáš Bruckner.

TÁZLAR, Jakub, 2012. *Modelování cyklo dopravy ve městě Olomouci*. Olomouc. Dostupné také z: <http://geoinformatics.upol.cz/dprace/magisterske/tazlar12/index.html>. Diplomová práce.

TOPPING, Chris, Tine HANSEN, Thomas JENSEN, Jane JEPSEN, Frank NIKOLAJSEN a Peter ODDERSKÆR, 2003. ALMaSS, an agent-based model for animals in temperate European landscapes. *Ecological Modelling*. **167**, 65-82. DOI: 10.1016/S0304-3800(03)00173-X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438000300173X>

TORRENS, Paul, 2012. Moving Agent Pedestrians Through Space and Time. *Annals of the Association of American Geographers*. **102**, 35-66. DOI: 10.1080/00045608.2011.595658. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00045608.2011.595658>

TSICHEULIN, T., L. NEOKOSMIDIS, T. PETANIDOU a J. SETTELE, 2011. Influence of landscape context on the abundance and diversity of bees in Mediterranean olive groves. *Bulletin of Entomological Research*. **101**, 557-564. DOI: 10.1017/S0007485311000149. Dostupné také z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0007485311000149

TURNER, Alasdair a Alan PENN, 2016-11-30. Encoding Natural Movement as an Agent-Based System. *Environment and Planning B: Planning and Design*. **29**, 473-490. DOI: 10.1068/b12850. Dostupné také z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1068/b12850>

VCELAR.INFO, , 2011. *Mor včelího plodu*. Dostupné také z: <http://www.vcelar.info/?p=307>

VIANA, Blandina, Danilo BOSCOLO, Eduardo MARIANO-NETO, Luciano LOPES, Ariadna LOPES, Patrícia FERREIRA, Camila PIGOZZO a Luis PRIMO, 2012. *How well do we understand landscape effects on pollinators and pollination services?*. **7**.

VOŽENÍLEK, Vít, Jiří DVORSKÝ a Dušan HÚSEK, 2011. *Metody umělé inteligence v geoinformatice*. 1. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci.

Výzkumný ústav včelařský, 2005. *Výroční zpráva za rok 2005*. Dostupné také z: http://eagri.cz/public/web/file/3699/Zpravamel_PLL_2005_1_.pdf

WOOLDRIDGE, Michael a Nicholas JENNINGS, 1995. Intelligent agents. *The Knowledge Engineering Review*. **10**, 62. DOI: 10.1017/S0269888900008122. Dostupné také z: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0269888900008122

ZHOU, Yang, 2015. Tutorial on Using and Exporting GIS Vector Dataset in Netlogo. *Geospatial Computational Social Science*. Dostupné také z: <http://geospatialcss.blogspot.com/2015/10/tutorial-on-using-and-exporting-gis.html>

Vyhláška č. 18/2018 Sb., 2018. Ministerstvo zemědělství, 2018. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-18>

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Volné přílohy:

Příloha 1 Poster

Příloha 2 CD

Popis struktury CD

Adresáře:

Bee movement in the environment Model

Vytvořený model, včetně ukázkových dat, ODD protokolu a manuálu

Modely

Vytvořené a upravené modely včetně dat (kapitola 4):

Model šíření epidemie Olomouc, Zombie model, Model distribuce zboží na území Olomouce a Model znečištění automobilovou dopravou ve městě Olomouc

Případové studie

Model pohybu včel v prostředí (katastrální území Zubří, Mikroregion Březnicko):

Vstupní data, mapové výstupy, výstupy experimentů rozdělené dle formátu (snapshot PNG a formát shapefile), dle studie a druhu modelovaného prostředí

Simulace kapacity autobusové dopravy

Upravené modely včetně dat:

Model akce Loštický tvarůžek, Model přestupu z vlaku na autobus a opačně v Mohelnici, Model úseku Zlaté Hory – Jeseník v čase 12:30, vstupní data v podobě zastávek a označníků ve formátu xls

WEB

Poster

Text práce