

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

Agentové simulace v archeologii

Diplomová práce

Autor: Ondřej Doležal

Studijní obor: Informační management (im5)

Vedoucí práce: Ing. Richard Cimler

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.

V Hradci Králové dne 20.8.2015

Ondřej Doležal

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval panu Ing. Richardu Cimlerovi za vedení mé diplomové práce a za značné množství času, který věnoval společným konzultacím. Jeho entuziazmus mě motivoval k práci na projektu, o němž jsem do té doby neměl mnoho informací. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Haně Tomáškové, Ph.D., doc. RNDr. Kamile Olševičové, Ph.D. a Mgr. Alžbětě Danielisové, Ph.D. za odborné konzultace a spolupráci při řešení konkrétních problémů. V neposlední řadě děkuji RNDr. Jitce Kühnové, Ph.D. za spolupráci na statistické analýze dat a za tvorbu regresních modelů.

Anotace

Cílem práce je vytvořit agentový model keltské osady Staré Hradisko, která existovala na území Moravy v době laténské. Tento model by měl nadále sloužit archeologům a historikům jako užitečný nástroj při jejich výzkumu. Projekt, ze kterého tato práce vychází, vzešel ze spolupráce Univerzity v Hradci Králové a Archeologického ústavu Akademie věd České republiky v Praze. Samotný model by pak měl reprodukovat a nadále rozšířit již existující model vytvořený v prostředí NetLogo. V první části je představeno téma agentového modelování (ABM) a jeho využití při archeologickém výzkumu, protokol ODD jako standart pro dokumentaci agentových systémů a AnyLogic, jako nástroj využitý k realizaci praktické části. V druhé části je podrobněji popsána funkčnost modelu a experimenty, které by měly nastínit jeho potenciální využití.

Annotation

Title: Agent-based models for archaeological research

The aim of this diploma thesis is to create a model of a Celtic settlement Staré Hradisko that existed in Moravia at the time of La Tene. This model should serve archaeologists and historians as a useful tool in their research. The project, on which this work is based, emerged from the cooperation of UHK and the Archaeological Institute of the Czech Academy of Sciences. The model itself should reproduce and continue to expand the existing model created in the NetLogo modeling tool. In the first part is introduced topic of agent based modeling (ABM) and its application in archaeological research, ODD protocol as a standard for documentation of agents based systems and AnyLogic as a tool used to implement the practical part of thesis. The second part contains a more detailed description of the model and experiments that should introduce its potential use.

Obsah

1	Úvod	1
2	Agentové modely.....	2
2.1	Komplexní systém	2
2.2	Emergence	3
2.3	Model.....	4
2.4	Simulace.....	7
2.5	Agent.....	7
2.5.1	Vlastnosti agentů	9
2.5.2	Typy agentů	9
2.6	Prostředí.....	11
2.6.1	Vlastnosti prostředí.....	11
2.6.2	Příklady prostředí	12
2.7	ODD.....	12
3	ABM v archeologii	15
3.1	Artificial Anasazi	16
3.2	MayaSim.....	17
3.3	Solving the shepherding problem	18
3.4	Modelling Population Dynamics for Archaeological Simulations	19
4	AnyLogic.....	21
4.1	Subway Entrance Hall	23
4.2	Flocks of Boids - Ecosystem Dynamics	24
4.3	New product diffusion	24
5	Oppidum Staré Hradisko	26
6	Popis modelu	29
6.1	ODD – populace	29
6.1.1	Účel.....	29

6.1.2	Entity, stavové proměnné a míry	29
6.1.3	Přehled procesů a plánování	31
6.1.4	Koncept konstrukce	31
6.1.5	Inicializace.....	32
6.1.6	Vstupní data.....	32
6.2	ODD – zvířata	32
6.2.1	Účel.....	32
6.2.2	Entity, stavové proměnné a míry	33
6.2.3	Přehled procesů a plánování	34
6.2.4	Koncept konstrukce	35
6.2.5	Inicializace.....	38
6.2.6	Vstupní data.....	38
6.3	Prostředí	38
6.3.1	Účel.....	38
6.3.2	Entity, stavové proměnné a míry	39
6.3.3	Přehled procesů a plánování	40
6.3.4	Koncept konstrukce	40
6.3.5	Inicializace.....	50
6.3.6	Vstupní data.....	51
6.4	Celkový model.....	51
7	Experimenty	56
7.1	Experiment 1	56
7.2	Experiment 2.....	58
7.3	Experiment 3.....	62
8	Diskuse	70
8.1	Rozšíření	70
8.2	Nedostatky	71

9	Závěr.....	72
	Seznam použité literatury	73
	Seznam obrázků.....	78
	Seznam tabulek.....	80
	Seznam grafů	81
	Příloha č. 1	82

1 Úvod

Tato diplomová práce se věnuje tématu modelování a zejména agentovému modelování jako podpůrnému nástroji v archeologickém výzkumu.

V první, teoretické, části bude představena problematika modelování s využitím informačních technologií. Blíže jsou popsány agentové modely, jejich potenciál, způsob použití, struktura a jejich úspěšné využití pro archeologický výzkum. Krátce také bude představen modelovací nástroj AnyLogic, který byl vybrán pro realizaci praktické části této práce.

Cílem praktické části je návrh a následná realizace modelu keltského oppida Staré Hradisko ležícího na Moravě. Model následně může sloužit jako pomůcka pro archeology a historiky zabývající se tímto tématem. Pomocí modelu budou schopni testovat jejich hypotézy, ověřovat data získaná výzkumem nebo hledat skryté vztahy a skutečnosti. Nicméně model nemůže poskytnout jednoznačnou odpověď na stanovené otázky, je pouze jedním z mnoha nástrojů, které mohou být užitečné při hledání těchto odpovědí. Pro popis modelu byl využit protokol ODD, který představuje standard při dokumentaci implementace agentových modelů. Pro vytvoření představy o tom, k jakým účelům by se dal model využít, byly popsány tři experimenty. Pro relevantnost jejich výsledků bylo spuštěno a vyhodnoceno značné množství simulací. Model byl vytvořen v reakci na požadavek pro reprodukci a částečnou obměnu existujícího modelu (Olševičová, Cimler, 2013) vytvořeného v modelovacím nástroji NetLogo.

Práce je zakončena diskusí o známých nedostatcích modelu a o návrzích na další možná rozšíření modelu do budoucna, díky kterým by se zvýšila přesnost modelu a tím i jeho vypovídající hodnota.

2 Agentové modely

Agentové modelování představuje jednu z výpočetních metod využívaných pro tvorbu simulací. Podstatou agentových modelů jsou akce a interakce autonomních entit zvaných agenti a zkoumání jejich efektu na systém jako celek. Ve světě je pro agentové modely využívána zkratka ABM (agent-based model), která bude hojně užívána jak v teoretické, tak i v praktické části diplomové práce. V českém jazyce by tato zkratka znamenala agentově orientované modelování. V současné době se lze setkat i s obdobným pojmem multiagentové modelování. Oba pojmy v sobě skrývají tentýž obsah, rozdíl je patrný pouze v názvu, kdy je v případě multiagentového modelování kladen větší důraz na fakt, že se v modelu vyskytuje více agentů (Kubík, 2004), (Gilbert, 2005).

V ABM jsou zahrnuty prvky z několika dalších vědních oborů jako například teorie her, komplexní systémy, výpočetní sociologie nebo evoluční algoritmy. V praktické části této práce bude agentový model vytvořen pro účely archeologického výzkumu. V současné době ale existuje i množství dalších vědních oborů, ve kterých je aplikace ABM vhodnou formou výzkumu. Podle Husákové (2014) mezi ně spadají například obory jako epidemiologie, finanční trhy, sociologie, chování ve zvířecích komunitách a chování zákazníka. Neexistuje striktní omezení využitelnosti tohoto přístupu. Ve chvíli, kdy můžeme identifikovat entity v systému a jejich chování, je tento systém možné vytvořit pomocí ABM.

2.1 Komplexní systém

Komplexním systémem se rozumí systém složený z mnoha různých částí. Vzájemnou interakcí těchto částí vzniká nové a nepředvídatelné chování systému i přes to, že tyto jednotlivé komponenty systému jsou deterministické. Chování takového systému je takzvaně na hraně chaosu. Nelze tedy říci, že je systém deterministický ale ani čistě chaotický či náhodný. Komplexní systém není přesně definován a neexistuje ani přesné vymezení toho, zda je systém komplexní či nikoliv. K identifikaci slouží spíše výčet vlastností systému, které jsou popsány v následující části (Kowarik, 2012).

Sociální systém, jako například trh, je ve své podstatě také komplexním systémem. Výzvou není takový systém ovládat, ale efektivně se do něj zapojit a orientovat se v něm. Neexistuje centrální bod trhu a nikdo ho ve své podstatě neřídí, ale i přesto mají někteří jedinci na trh mnohem větší vliv než ostatní. Také celkový výstup systému není jednoduchou lineární funkcí chování jeho jednotlivých částí. Hnací silou systému je adaptivní chování jednotlivců

a efekt zpětné vazby mezi nimi. Akteři reagují na akce jiných aktérů, kteří reagují na akce dalších a tak to jde neustále dál v nekonečné smyčce. Mezi další možné příklady můžeme zařadit ekosystémy, podnebí, města, mraveniště nebo imunitní systém. Naopak komplexním systémem není židle, tenisový míč nebo motor (Klir, Wierman, 1998).

Jedním z možných způsobů, jak přistupovat k výzkumu komplexních systémů, je prostřednictvím počítačových simulací, a to včetně agentových modelů (ABM), které se stávají stále více populárními a užívanými v přírodních a společenských vědách. ABM představuje revoluci ve způsobu stavby modelů pro replikaci, analýzu, testování a predikci chování komplexního systému. Predikce by nebyla možná v tom případě, pokud bychom systém dekomponovali na jeho jednotlivé součásti a následně zkoumali jejich interakce. Na základě interakcí částí systému není totiž možné odhadnout dopad na samotný systém. ABM simuluje složité systémy od zdola nahoru. Přístupem zdola nahoru rozumíme akce a interakce jednotlivých agentů v umělém společenství. U přístupu zdola nahoru dochází ke snaze formalizovat chování částí od nejnižší úrovně systému až po úroveň nejvyšší, tedy systém jako celek. Při takovém přístupu se očekává emergentní chování, které je popsáno v další podkapitole této práce (Kowarik, 2012), (Klir, Wierman, 1998), (Kowarik, 2012).

Komplexní systém by tedy měl splňovat následující charakteristiky:

- dynamika,
- nelineárnost,
- adaptabilita,
- samoregulační činnost,
- existence zpětných vazeb,
- neoddělitelnost komponent.

2.2 Emergence

Naše schopnost popisu komponent komplexního systému klesá s tím, jak roste složitost a škálovatelnost systému. Po překročení určité hranice složitosti už nadále nejsme schopni exaktně vysvětlit vznik jevů na úrovni celého systému a predikovat jeho chování. Tomuto fenoménu říkáme emergence (Holland, 1998). Podle Kubíka (2004) je popsána takto: *„Emergence je vznik chování systému na makro úrovni, které je důsledkem vlastností jeho komponent na mikro úrovni a jejich vzájemných interakcí“*. S cílem hlubšího pochopení budou uvedeny příklady emergentních jevů ve všeobecně známých systémech.

Jedním z příkladů mohou být písečné duny, které vznikají spojením dvou faktorů. Prvním faktorem je proudění vzduchu, které pohybuje zrnky písku. Druhým faktorem je vliv překážek. Tyto překážky způsobují změnu směru proudění větru. V tom případě, pokud by byl povrch zcela hladký, písek by byl na všech místech rozprostřen rovnoměrně. Jakákoliv překážka (kámen, kus dřeva, mraveniště) naruší přirozené proudění vzduchu a tím pádem se změní i původní místo dopadu zrnků písku. Písek bude tedy rozprostřen v závislosti na daných překážkách a změně proudění vzduchu. Takto nahromaděný písek sám získává vlastnosti větrné bariéry, která stejně jako například již zmíněný kámen nebo kus dřeva mění proudění vzduchu a písečná bariéra nadále roste a také způsobuje vznik nových písečných bariér. Takto vytvořeným písečným bariérám se říká duny. I přes to, že víme, jakým směrem je zrno písku unášeno a známe polohu a velikost všech bariér, po překročení jisté velikosti tohoto systému už nebudeme nadále schopni určit přesné místo dopadu zrnka písku (Burdeck, 2004).

Další příklad emergence lze také prezentovat na deskové hře šachy. Jen s několika málo přesně stanovenými pravidly jsou šachy neuvěřitelně komplexní hrou a člověk i po několika stovkách let stále nachází nové kombinace a možnosti této hry (Corning, 2002).

Jedním z příkladů by mohlo být také zlato. Jednotlivé atomy zlata nemají typickou zlatou barvu a ani se nelesknou. Tyto vlastnosti získává až zlatý valut, který je z těchto atomů složen.

2.3 Model

Pojem „model“ se dá použít v několika různých kontextech, ale v obecné rovině by se dalo říci, že model je zjednodušení reality, systému nebo nějaké jiné struktury – menší, méně detailní, méně komplexní. Model může mít mnoho forem: např. softwarový model, ústní popis, grafická reprezentace, sada rovnic atd. (Kowarik, 2012).

Modely bývají často klasifikovány podle přístupu, který byl použit pro jejich vytvoření. Mezi tyto přístupy spadá například „*model diferenciálních rovnic*“, „*maticový model*“, „*agentový model*“ atd. Každý z těchto přístupů je vhodný pro trochu odlišný druh modelu, ale není výjimkou, že jeden systém je popsán několika modelovacími způsoby a výsledky z nich jsou dále porovnávány. Jeden přístup je také schopný odhalit vztahy, které se v jiném přístupu neprojeví. Další možností je kombinace několika přístupů použitých v jednom modelu, což je případ u praktické části, kde byly použity různé přístupy pro vyřešení

konkrétních částí celkového modelu (Gilbert, Troitzsch, 2005), (Law, Averill, 2014), (Kowarik, 2012).

Pro konkrétnější popis bylo vybráno několik známých a používaných přístupů:

- Systémová dynamika – Jde o rozšířený způsob grafické reprezentace spojitých systémů. Je zkoumáno chování a vývoj systému v čase. Hlavními komponentami pro modelování jsou storages (sklady, vany), flows (toky) a variables (proměnné). Storages reprezentují místo, kde jsou pozorované veličiny uschovány a flows zajišťují přesun veličin mezi nimi. Pomocí variables jsou upravovány vlastnosti flows.
- Diferenční a diferenciální rovnice – Možné využití je například při vytváření ekonomických modelů a systémů, kde jsou veličiny v diskrétních časových jednotkách. Model je popsán sadou rovnic.
- ABM – Agentovému modelování je věnován velký kus teoretické i praktické části této práce.
- Maticové modely – Modely založené na maticové algebře se často používají při modelování populační dynamiky, přičemž se využívá členění populace podle různých demografických parametrů.
- Modelování diskrétních událostí – V tomto způsobu modelování je systém dekomponován na sadu diskrétních událostí s tím, že každá událost se objevuje v určitém čase a při splnění daných podmínek. Takto vyvolaná událost má pak jasně stanovený dopad na systém. Mezi jednotlivými událostmi se stav systému nemění, a proto je možné se při simulaci přímo přesouvat mezi různými událostmi bez možnosti vzniku problémů, které nastávají u spojitých systémů.

Známé tvrzení: „*Všechny modely jsou špatné, některé jsou užitečné.*” od George E. P. Boxe (1987) je možné vysvětlit tak, že v současné době nejsme schopni vytvořit přesnou kopii systému (podle definice by toto ani nebyl model) jednoduše proto, že identifikovat všechny vlivy a proměnné systému je nesmírně složitý proces. Proto je zásadní před začátkem sestavování modelu určit míru abstrakce, která sice ochudí model o jisté skutečnosti, které existují v modelovaném systému, za to nám ale dovolí udržet model ve srozumitelných

mezích. Správná míra abstrakce nám umožní zaměřit se pouze na skutečnosti, které jsou pro náš výzkum relevantní.

Uvažujme například o modelu nouzové evakuace budovy. Bodem zájmu může být nalezení nejefektivnějšího umístění únikových východů. V tomto případě agenti v daném modelu simulují lidi jako obyvatele budovy. Jejich atributy bude rychlost pohybu a pozice uvnitř budovy. Jejich chování pak demonstruje strategii, kterou volí pro pohyb v budově a výběr únikového východu. Cílem agentů je opuštění budovy v co možná nejkratším čase. Systém je tedy složen z agentů, prostředí a jejich vztahů. Systém je jasně vymezený a má definované vstupy a výstupy. I přes relativně jasnou formulaci se v modelu objevuje abstrakce jak na straně prostředí (evakuovaná budova), tak na straně agentů (evakuovaní lidé). Došlo k opomenutí značného množství vztahů (rychlost reakce na evakuační hlášení, faktor paniky atd.) a parametrů (barva očí lidí, teplota okolí, typ obuvi atd.), které ale pro potřeby tohoto výzkumu nebyly nijak kritické a jejich změna by se neprojevila na výsledném stavu systému. Čím více se tedy těchto relevantních skutečností identifikuje, tím bude model přesnější a pro nás užitečnější. Proces identifikace je nutné v jistém bodě přerušit s tím, že tato přesnost je pro potřeby experimentu dostačující. V opačném případě by tento proces mohl pokračovat nekonečně dlouho a s přesností modelu by také rostla jeho složitost.

Modelování je proces, během kterého je vytvořen modelující systém podle dané předlohy (modelovaný systém). Dětský model auta (napodobenina reálného automobilu), obraz (dvourozměrné ztvárnění předlohy), počítačový letecký simulátor (uměle vytvořená realita pro výukové účely).

Agentové modely pak představují modely formalizované do počítačového kódu, reprezentující kolekci rekurzivních pravidel reagujících na jasně definované vstupy. Multiagentový systém je skvělým nástrojem v případě, pokud chceme vytvořit model inspirovaný komplexním systémem, který se vyznačuje těmito vlastnostmi (Kubík, 2004):

- autonomie prvků,
- decentralizace řízení v systému,
- robustnost,
- adaptabilita na změny v prostředí.

2.4 Simulace

Pojem simulace po mnoho století vždy souviselo s imitací. Například když člověk simuloval, tak imitoval jistý vzorec chování. Mohlo se jednat o herce v dramatu, o člověka předstírajícího nemoc atd. Tento význam se změnil po druhé světové válce, kdy byl dosavadní popis v anglickém slovníku nahrazen následujícím popisem: „*Technika imitace chování procesu nebo situace*“. A konečně v dnešní době je tímto pojmem myšlena reprezentace komplexní dynamiky ve vědě a technologii, stejně jako nástroj pro vytváření nových a lepších technických konstruktů. Simulace je v současnosti vhodnou cestou pro zkoumání komplexního vesmíru (Humphreys, 1990).

Simulace je nejtypičtějším způsobem zkoumání chování systému. Díky simulacím můžeme sledovat vývoj systému při různých nastaveních počátečních parametrů a vytvářet tak neomezené množství hypotetických nebo reálných scénářů. V případě, že se v našem modelu objevuje prvek náhody, je skoro vždy nutné provést simulaci opakovaně se stejným nastavením parametrů, aby se vliv náhodnosti na výsledná data minimalizoval. Na rozdíl od analytických modelů, které se skládají především z diferencních a diferenciálních rovnic, jsme u agentového modelu schopni díky simulacím sledovat vývoj systému v čase, což je důležitá vlastnost uvážíme-li, že model má být odrazem reálného světa.

2.5 Agent

V současné době neexistuje žádná univerzální a obecně užívaná definice pojmu agent. Ale i přes nedostatek oficiálního ukotvení tohoto výrazu, se většina odborníků zabývajících se ABM, shoduje na jednotném popisu agenta.

Obecnou definici pojmu agent uvádí např. Doran (1999): „*Agent je entita, která v určitém smyslu vnímání (nebo je na ni alespoň nahlíženo s tím, že vnímá) své okolí a rozhoduje se a jedná na základě tohoto vnímání.*“

Oproti tomu Kubík (2004) definuje pojem agent následovně: „*Agent je entita zkonstruována za účelem kontinuálně a do jisté míry autonomně plnit své cíle v adekvátním prostředí na základě vnímání prostřednictvím sensorů a prováděním akcí prostřednictvím aktuátorů. Agent přitom ovlivňuje podmínky v prostředí tak, aby se přibližoval k plnění cílů.*“

V Doranově definici spatřuji výhodu v její jednoznačnosti a jednoduchosti. Kubíkovo pojetí je ale o poznání novější a především konkrétnější.

V samotné podstatě se ale všichni shodují na stejných podmínkách existence agenta a to, že agent je nezávislá komponenta existující v nějakém systému a může jít například o firmu, domácnost, člověka jako jedince nebo například vlka ve smečce. Taková komponenta se může projevovat zdánlivě primitivně jako buňka reagující na světlo, nebo naopak velice komplexně a inteligentně. Mellouli (et al. 2003) pak přidává další podmínku a tou je schopnost adaptace.

Agent je autonomní, rozhoduje sám za sebe a je nezávislý na ostatních agentech. Agent má jasně stanovené vztahy mezi ním, ostatními agenty a svým prostředím. Každý agent je díky svým atributům odlišitelný od ostatních. Tyto atributy utvářejí stav agenta. Jeho chování může být reprezentováno několika if-then-else pravidly, neurální sítí, genetickými algoritmy, strojovým učením, nebo dokonce dalším submodelem. Každý agent se svými rozhodnutími snaží přiblížit k danému cíli (Shoham, 1990).

Objekt, který je tou nejpropracovanější abstrakcí reality a komponentou modelovaného systému v objektově orientovaném inženýrství je oproti agentu méně abstraktní a agent má oproti objektu několik zásadních vlastností navíc:

- je autonomní (dokáže existovat nezávisle na ostatních agentech);
- existuje v prostředí a je s ním neodmyslitelně spjatý;
- má senzorické a aktuální propojení s prostředím.

V následující tabulce je názorně uvedeno srovnání vlastností agentů a objektů (Kubík, 2004).

Objekt	Agent
<ul style="list-style-type: none"> • zapouzdřuje proměnné a metody • nutná synchronizace vláken • uspořádání objektů prostřednictvím dědičnosti • komunikuje voláním metod (posíláním zpráv) • prostředí (kromě kompilačního) nehraje žádnou roli 	<ul style="list-style-type: none"> • zapouzdřuje chování • agenty jsou navzájem nezávislé • uspořádání agentů v organizacích • komunikuje prostřednictvím vyšších komunikačních jazyků • významnou roli sehrává prostředí

Tabulka 1: Srovnání abstrakce agentů a objektů

2.5.1 Vlastnosti agentů

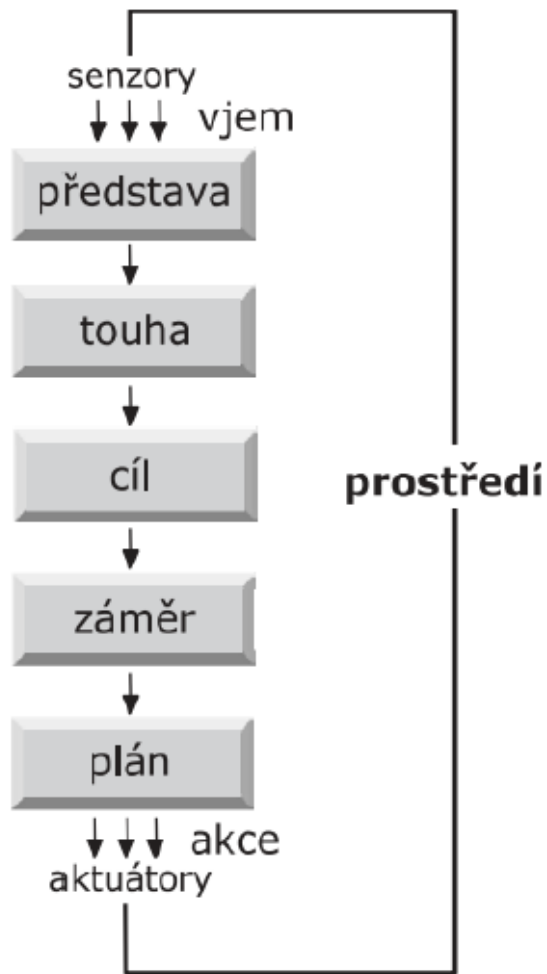
Jak již bylo řečeno, neexistuje žádná obecně platná definice pojmu agent. Definice se od sebe poněkud liší a to v závislosti na autorovi, který ji uvádí. Všichni se shodují na společných vlastnostech, které se musí u agenta objevovat. Jako první přišel s komplexním výčtem těchto vlastností Stuart Russell a Peter Norvig (1995).

- Autonomie – agent dokáže jednat nezávisle na existenci jiných agentů a zásahů z vnějšího prostředí.
- Reaktivita – agent adekvátně a pohotově reaguje na podněty z prostředí.
- Proaktivita – iniciativně ovlivňuje své prostředí za účelem dosažení stanovených cílů.
- Sociální schopnosti – agent je schopen prostřednictvím komunikace s ostatními agenty kooperovat.

2.5.2 Typy agentů

Podle složitosti chování a vnitřní architektury dělíme agenty na tyto základní typy (Kubík, 2004):

- Reaktivní
Jedná se o formu agenta s nejjednodušší vnitřní architekturou. Agent ve své paměti neuchovává žádné informace pro reprezentaci okolního světa. Jeho úkolem je podle nastavených pravidel reagovat na podněty přicházející z okolí nebo z jeho vnitřního stavu. Tento typ agenta není schopný plánovat z důvodu absence vnitřní reprezentace okolního světa.
- Deliberativní
Tento typ si ve své paměti uchovává symbolickou reprezentaci světa a vnitřních stavů. Na základě těchto informací a svých cílů je pak schopný vytvořit plán k jejich nejefektivnějšímu dosažení. Agent tedy dostane podnět z okolí pomocí senzorů, vytvoří plán, který mu pomůže přiblížit se k cíli a ten pak pomocí aktuátorů provede. Tento proces se neustále opakuje.



Obrázek 1: Rozhodovací proces deliberativního agenta

- Sociální
Za sociálního agenta se dá teoreticky považovat i reaktivní agent, který reaguje na podnět vytvořený jiným agentem a tím navozuje zdání komunikace. Nicméně za sociální agenty jsou považováni pouze ti, kteří využívají k dorozumívání vyšších komunikačních jazyků.
- Hybridní
Poslední typ je kombinací některých nebo všech výše zmíněných typů agentů.

2.6 Prostředí

Gilbert (2008) mluví o prostředí jako o světě, ve kterém spolu agenti vzájemně interagují. Podle modelovaného systému může mít prostředí buď roli velmi významnou, kdy je chování nebo samotná existence agenta přímo závislá na vlivu prostředí (auto reagující na semaforey, organismus citlivý na teplotu, motýl ve větru) dále roli méně významnou, kdy ovlivňuje agenta jen staticky (myš v bludišti), nebo také vůbec žádnou, kdy agent reaguje pouze na podněty od ostatních agentů (například burza). Často ale prostředí reprezentuje geografické místo.

2.6.1 Vlastnosti prostředí

S výčtem vlastností, které definují prostředí, přišel Stuart Russell a Peter Norvig (Russell, Norvig, 1995).

- Plně pozorovatelné x Částečně pozorovatelné – Buď získává agent pomocí senzorů úplný obraz o prostředí, nebo pouze jeho část. Informace o prostředí jsou kritickou složkou rozhodování agenta. Při plně pozorovatelném prostředí má agent veškeré dostupné informace pro výběr toho nejlepšího možného řešení úkolu. Častější však bývá, že agent obdrží pouze ty informace, které jsou dostupné v jeho aktuální pozici.
- Spojité x Nespojité (diskrétní) – Rozlišení dle stavu prostředí, měření času, schopností senzorů a aktuátorů.
- Deterministické x Stochastické – Záleží na tom, zda je následující stav prostředí ovlivněn pouze předchozím stavem a akcemi, které agent provedl, nebo do následujícího stavu zasahují i další faktory (činnost dalších agentů).
- Episodické x Sekvenční – Stav prostředí se dají rozdělit do epizod s tím, že stav prostředí v této epizodě nijak neovlivní stav prostředí v další epizodě.
- Statické x Dynamické – Statické prostředí zůstává nezměněno, dokud agent neprovede nějakou akci, která by ho pozměnila. Dynamické prostředí se mění bez ohledu na to, zda agent provedl nějakou akci nebo ne.

- Jednoagentové x Multiagentové – Buď je v systému pouze jeden agent, nebo jich je tam více. U multiagentového prostředí je ještě nutné rozlišit kompetitivní (agenti spolu soupeří) a kooperativní (agenti vzájemně spolupracují) prostředí.

2.6.2 Příklady prostředí

Prostředí	Křížovka	Šachy	Auto v provozu
Pozorovatelnost	úplná	úplná	částečná
Spojitosť	diskrétní	diskrétní	spojité
Determinismus	deterministické	stochastické	stochastické
Sekvenčnost	sekvenční	sekvenční	sekvenční
Dynamika	statické	statické	dynamické
Multiagentový	ne	ano	ano

Tabulka 2: Příklady prostředí

2.7 ODD

Navzdory současné popularitě a rozšíření ABM, ještě před několika lety neexistovala jednotná struktura pro popis vytvořených modelů a každý popisoval model tak, jak mu to přišlo vhodné. Tento fakt způsoboval obtíže v porozumění modelu a případnou replikaci to dokonce téměř znemožňovalo. Kvůli tomu byl ABM přístup často kritizován (Grimm, 2006). Stávalo se, že autor modelu do dokumentace neuváděl kritické informace a naopak uváděl ty nepodstatné. Některá důležitá fakta byla také popsána pouze ve vědecké publikaci, ale v samotné dokumentaci už obsažena nebyla, což byl problém pro člověka, který měl k dispozici buď pouze publikaci, nebo pouze dokumentaci. Autor také často strukturoval dokumentaci bez ohledu na to, že čtenář se o modelu dozvídá poprvé, a proto by měla být zachována jistá posloupnost kroků při představování modelu s tím, že se začíná obecnějším popisem a pokračuje se dále do hloubky. Tato skutečnost pro autora nebyla podstatná, protože on přesně věděl, jak model funguje, bez ohledu na to, v jakém pořadí byla fakta prezentována. Opět to ale znesnadňovalo porozumění popisu. Orientace v takto strukturovaných materiálech byla pomalá a neefektivní. Proto v roce 2006 přišel Volker Grimm s návrhem standardizace popisu agentových modelů. Protokol ODD se zaměřuje na tři hlavní části, které mají být o modelu zaznamenány. Zkratka ODD je složena z anglických slov Overview (přehled), Design concepts (koncepty konstrukce) a Details (detaily). Z názvu je tedy patrné do jakých tří částí by měl být protokol rozdělen. I přes vřelé přijetí tohoto standardu komunitou, zde bylo stále několik problémů souvisejících se strukturou tohoto

protokolu (redundance ODD, přehnaná složitost pro jednoduché modely atd.), proto (Grimm, 2010) přišel s upravenou strukturou, která se využívá dodnes. V následující části budou popsány jednotlivé součásti ODD protokolu podle jeho aktualizované verze. V praktické části pak bude tento postup využit při popisu modelu keltského oppida Staré Hradisko.

1. Purpose (účel) – Každý model musí začínat stanovením jasné otázky, problému nebo hypotézy. Tato část není určena k popisu toho, jakým způsobem model funguje, nýbrž pro nastínění toho, pro jaké účely byl vytvořen. Mělo by se zde nacházet srozumitelné a krátké představení modelu.
2. Entities, state variables, and scales (entity, stavové proměnné a měření) – Jaké entity jsou v modelu použity a jaké atributy je charakterizují? V praktické části jsou využity dva druhy entit. Agenti jako hlavní aktéři v systému a buňky, které slouží k reprezentaci prostředí. V této části by měly být popsány všechny atributy entit, které jsou nutné pro zastavení simulace a uložení současného stavu tak, aby byla po znovuspuštění navrácena přesně do téhož stavu, ve kterém byla přerušena.
3. Process overview and scheduling (přehled procesů a plánování) – V tomto úseku by mělo být krátce popsáno v jakém pořadí a co jaká entita dělá. Dále je důležitý popis času v modelu. Zda je spojitý nebo diskrétní, v jakých jednotkách jsou jednotlivé časové kroky nebo jak dlouho bude simulace spuštěna. Pseudokód zde může být využit pro lepší pochopení funkčnosti některých procesů.
4. Design concepts (konstrukční koncepty) – Na tomto místě má autor možnost popsat teorie, hypotézy a postupy, které využil při vytváření modelu.
5. Initialization (inicializace) – Pro správnou interpretaci modelu je nutné znát jeho počáteční nastavení. Zda čas začíná $t = 0$ nebo $t = 1$, kolik bude vytvořeno entit a jaké budou hodnoty jejich atributů a zda je počáteční stav při každém spuštění stejný.
6. Input data (vstupní data) – Zde by měly být popsány všechny externí zdroje využitě v modelu. Hlavně se jedná o datové soubory, ale může jít také o úplně jiný model.

7. Submodels (submodely) – V tomto segmentu ODD by mělo dojít k detailnímu popisu submodelů představených v „proces overview and scheduling“. V praktické části budou, pro větší přehlednost, jednotlivé submodely rozděleny do samostatných ODD, a proto lze tento bod vynechat.

3 ABM v archeologii

Využití modelů v archeologii je obecně chápáno jako užitečný heuristický nástroj, který může napomoci porozumění některým archeologickým jevům, umožňuje nalezení nových teoretických směrů úvah, zpochybňuje dříve stanovené standardy a otevírá dveře pro nové otázky a směry výzkumu (Wright, 2007), (Kowarik, 2012).

Nejobecnější rozdělení oblastí v archeologii, pro které je vhodné využití ABM, je dle Kowarika (2012) následující:

- sociálně ekologická dynamika;
- prostorové procesy;
- kulturní změny (z dlouhodobé perspektivy);
- sociální interakce
 - rozhodovací procesy,
 - sociální vývoj,
 - vznik sociální komplexnosti.

Tyto oblasti mohou být pak rozděleny následovně:

- identifikace příčin historických změn;
- sociální komplexnost;
- vznik centralizovaného přístupu k rozhodování;
- populační agregace a opuštění (zánik civilizací);
- počátky specializací;
- sobectví vs. altruismus (například dělení se o stravu);
- odezva na změnu sociálních a environmentálních podmínek;
- dopad ekologické zátěže;
- dopad populační agregace;
- pružnost systému;
- adaptační mechanismy;
- vznik teritorií;
- dynamika osídlení;
- výběr lokality;
- rozdělení zdrojů;

- využití půdy;
- kulturní kontakt;
- udržování etnických hranic;
- počátky vzniku politických entit.

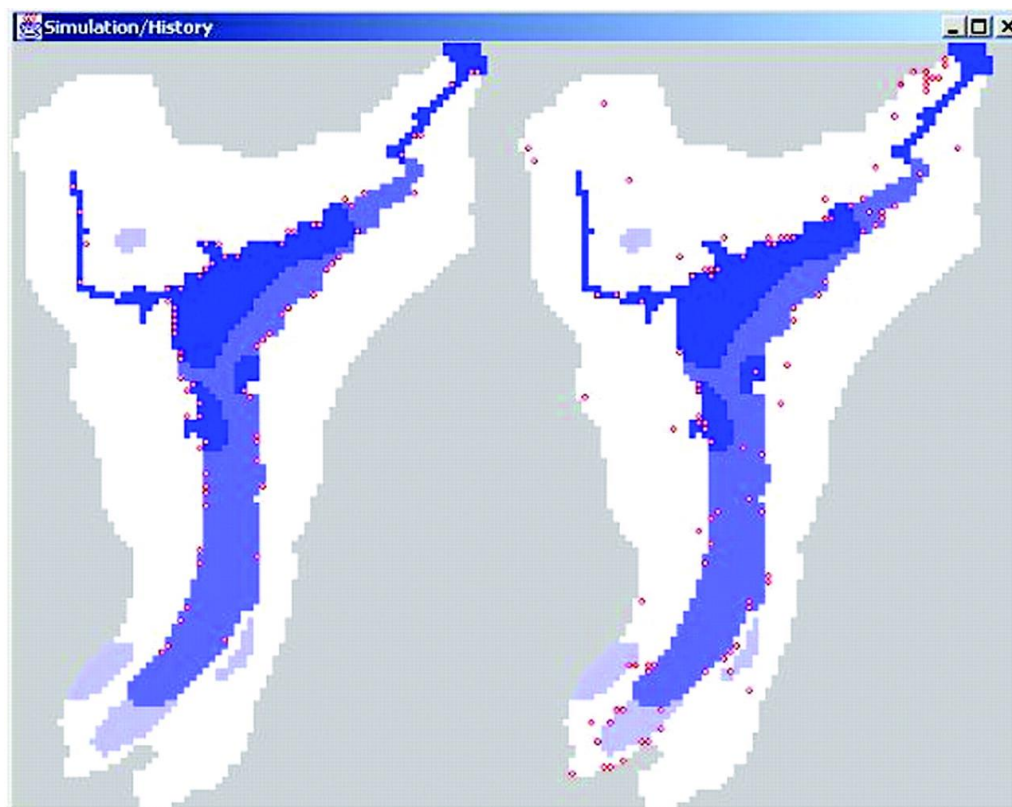
Na několika následujících případech bude popsána úspěšnost aplikace metod ABM v archeologickém výzkumu. Některé principy z těchto modelů byly využity při tvorbě praktické části této práce. Ne vždy bylo však možné využít postupů a dat z již existujících projektů. Jedním z důvodů je například ten fakt, že daná problematika byla zkoumána z trochu jiného pohledu, než by bylo vhodné pro účely této práce. *Shepherding ABM*, který je popsán níže, se zaměřuje spíše na dynamiku pohybu stáda a interakci s ovčáckým psem, kdežto v praktické části této práce je spíše než pohyb stáda zkoumána pastva samotná. Populační model použitý v příkladu má velice podobnou logiku tomu, který byl vytvořen pro potřeby praktické části. Oba modely vychází z podobných předpokladů, avšak například vlastnost příslušnosti k rodině je evidována pouze v ukázkovém modelu. *Artificial Anasazi* a *MayaSim*, stejně jako model keltského oppida, využívají buněčný automat pro formulaci prostředí a GIS data jako zdroj pro toto prostředí. Nicméně cíle modelů jsou dále orientovány jiným směrem. Také se objevily vedlejší překážky, které nepřímo souvisejí s výzkumem (výpočetní náročnost, finanční zátěž atp.).

3.1 Artificial Anasazi

Model *Artificial Anasazi* je skvělou ukázkou funkčního agentového modelu, který je známý v celé komunitě agentového modelování. Cílem bylo nasimulovat vývoj populace v Long House Valley v Arizoně mezi roky 800 and 1350 (Janssen, 2009).

Agent v tomto modelu reprezentuje domácnost o pěti členech. Prostor je uspořádáno do mřížky, ve kterém má každé políčko své atributy související se zemědělskou produktivitou tohoto políčka. Agent se pak za pomoci předem stanovené logiky rozhoduje, na jakém políčku založí farmu s ohledem na jeho úrodnost. Tento postup se opakuje v tom případě, pokud úrodnost políčka už dále nedostačuje potřebám rodiny (agenta). Po vytvoření relativně jednoduché logiky výběru místa pro založení nových farem a osad, byl model schopný reprodukovat výsledky, ke kterým se došlo archeologickým výzkumem.

Analýza výsledků ukázala, že náhlé opuštění údolí okolo roku 1300 se nedá vysvětlit pouze faktory týkající se prostředí (Janssen, 2009).



Obrázek 2: Model Artificial Anasazi

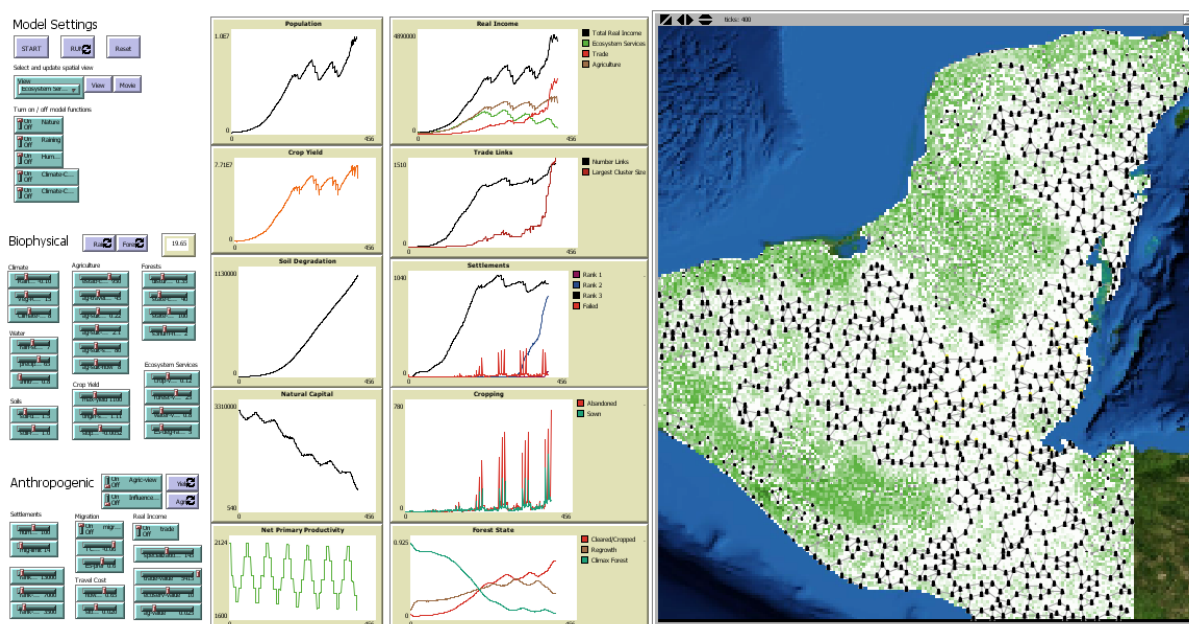
3.2 MayaSim

Model MayaSim je geograficky zasazen do Střední Ameriky za účelem nasimulovat vývoj mayské kultury, která obývala toto území. Jde o kombinaci agentového přístupu s celulárním automatem a síťovým modelem, který byl vytvořen v nám známém prostředí NetLoga.

Cílem modelu je lepší pochopení dynamiky sociálně - ekologických systémů a testování kvantitativních ukazatelů pro predikci udržitelnosti či úpadku systému. Model zkoumá vztah mezi populačním růstem, zemědělskou výrobou, změnami klimatu, tlakem na ekosystém a mezi zdroji, které nabízí, lesní sukcesí, hodnotou obchodu a stabilitou obchodních sítí. S ohledem na tyto vlastnosti prostředí, jsou agenti zastupující osady schopni rozvíjet se a rozšiřovat se na území, které se přetváří podle klimatických změn a zároveň reaguje na antropogenní vlivy (Heckbert, 2013).

Simulacemi mělo být zodpovězeno několik otázek. Jaká populační dynamika vedla k vytvoření tak hustě osídleného a propojeného území ve starověké mayské civilizaci? Je možné pomocí výpočetních společenských věd nasimulovat vývoj mayské civilizace v období od 1 000 let před naším letopočtem až do roku 1 500 našeho letopočtu? Jak se bude vytvořený sociálně ekologický systém chovat po změně parametrů?

Po několikátém opakování simulace bylo zjištěno, že požadovaný nárůst populace a vývoj obchodní sítě je možný jen při několika málo kombinacích nastavení vstupních parametrů. Tyto parametry tak splnily podmínky stanovené archeologickým výzkumem a cílem následujících experimentů se stala kalibrace těchto nalezených parametrů.



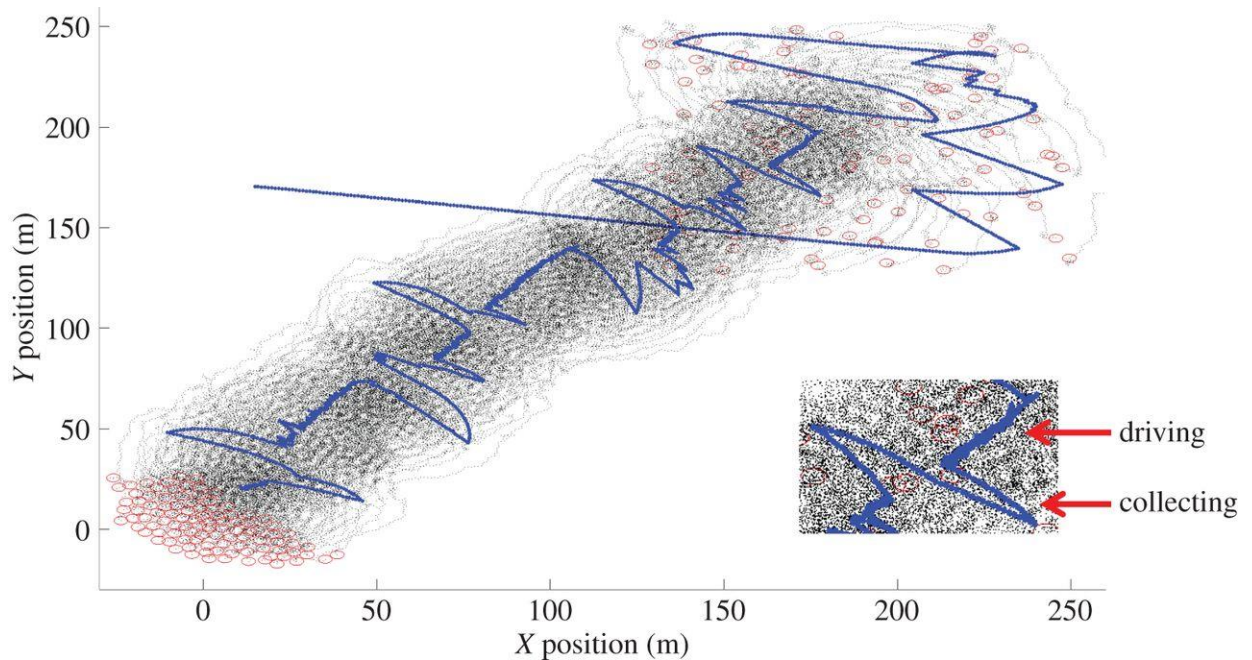
Obrázek 3: Model MayaSim

3.3 Solving the shepherding problem

Hnaní stáda s pomocí ovčáckého psa je jednou z nejstarších, člověkem využívaných metod ovládní dobytka při pastvě. Z pohledu agentového modelování je tento problém zajímavý tím, že jedna entita (v našem případě ovčácký pes) dokáže nepřímo kontrolovat pohyb větší skupiny jedinců (ovcí, koz atd.) a to tak, aby bylo dosaženo požadovaného cíle. I když se tento způsob pastvy využívá každý den, stále nebyl odhalen algoritmus, podle kterého by se ovčácký pes řídil nebo zdali takový algoritmus vůbec existuje (Strombom, 2014).

V tomto modelu je algoritmus založen na přepínání mezi naháněním stáda na jedno místo, pokud je příliš roztroušeno a vedením stáda do předem stanovené cílové oblasti. Dodržováním těchto dvou relativně jednoduchých pravidel a dynamického přepínání mezi nimi je snížena pravděpodobnost, že se stádo rozdělí na menší části a také je zaručen konzistentní pohyb stáda směrem k jeho cíli. Záměrem modelu bylo z empirických dat interakce psa a ovce navrhnout algoritmus a později robota, který by dokázal ovlivnit nejen agenty v simulaci, ale také reálné stádo.

Získaná data byla porovnáována s údaji z GPS lokátorů použitých pro přesné zachycení dynamiky stáda a ovčáckého psa. Ukázalo se, že agent reprezentující psa dokáže pohybem ze strany na stranu za stádem efektivně ovládat pohyb přibližně 40 jedinců. Pro početnější skupinu je potřeba více agentů kontrolujících stádo. Nicméně v reálném prostředí dokáže jediný pes kontrolovat až 80 kusů dobytka. Stále tak nebyl vytvořen model, který by dokázal věrně napodobit efektivitu reálného ovčáckého psa.



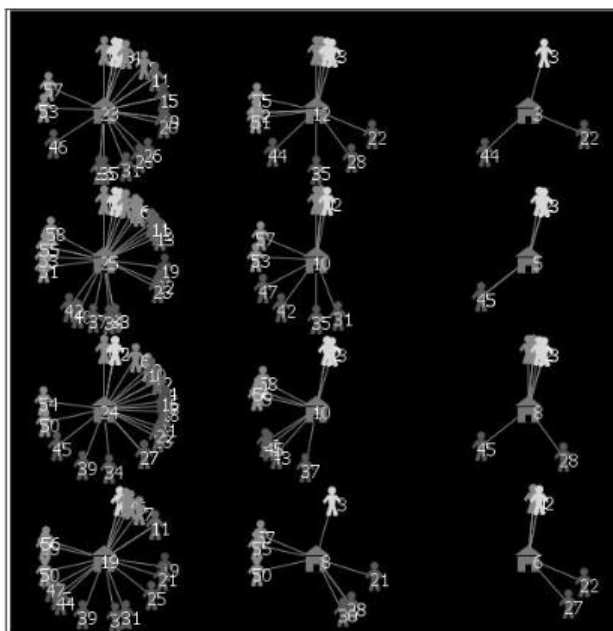
Obrázek 4: Model Shepherding

3.4 Modelling Population Dynamics for Archaeological Simulations

Tento model byl vytvořen pro účely simulace reálného demografického vývoje keltské populace žijící v osadě Staré Hradisko na Moravě a nalezení teoretické maximální kapacity, kterou je toto místo schopno „uživit“ (Machálek, 2012). Vývoj je charakterizován úmrtím, přírůstkem, imigrací a emigrací. Pro potřeby archeologického výzkumu je evidováno věkové rozdělení populace, množství potravy nutné pro nasycení populace a množství pracovní síly, která je k dispozici.

Pro implementaci byl zvolen nástroj NetLogo. V modelu se vyskytují dva typy agentů. První z nich je inhabitant-agent. Už jeho název vypovídá o tom, že představuje člověka jako jednotlivce. Pro účely simulace vývoje populace je důležité u každého jedince evidovat jeho věk a pohlaví. Každý agent má určité množství pracovní síly a potřebný přísun energie (potravin) vzhledem k těmto dvěma vlastnostem. Jako třetí informace je evidována příslušnost k domácnosti, a to je také druhý typ agentů v modelu. Domácností je myšlena

skupina agentů „jednotlivců“, kteří žijí pohromadě. Tento typ agentů se liší velikostí, která je dána počtem lidí žijících v jedné domácnosti. Simulace probíhá v rozmezí 100 – 120 let. V modelu je možné jednoduše modifikovat všechny vstupní parametry, jako life – expectancy - table, počty rodin, pravděpodobnosti úmrtí a narození, imigrace, délka simulace. Model tak není omezen pouze na příklad Starého Hradiska, ale s aktuálními hodnotami je aplikovatelný na mnoho dalších situací.



Obrázek 5: Model Population Dynamics for Archaeological Simulations

4 AnyLogic

Následující kapitola byla vytvořena za pomoci (Grigoryev 2015), (Borshchev 2013).

Už byly popsány různé přístupy k tvorbě modelů a modelovací způsoby, ale je také důležité nastínit, jakým způsobem takový model prakticky vytvořit. Když se zaměříme pouze na modelování pomocí počítačů, tak nic nebrání využití klasických programovacích jazyků jako nástroje pro tvorbu, nicméně na trhu existuje řada nástrojů, které se specializují výhradně na tvorbu modelů. Okolo sta nástrojů je možné nalézt pouze pro ABM, a proto budou nadále zmíněny jen ty, které při rozhodování o realizaci praktické části připadaly v úvahu. NetLogo je programovatelné prostředí podporující ABM. Je vhodné pro výukové účely díky množství ukázkových projektů, kvalitní dokumentaci a jasnému principu modelování. Je ale také vyhledávaným řešením pro výzkumnou činnost, díky jeho spolehlivosti a stabilitě. I přes značné výhody je NetLogo výhradně zaměřeno na ABM a nepodporuje žádné další přístupy. Stella je opět špičkovým nástrojem pro vytváření modelů pomocí Systémové dynamiky, ale stejně tak jako NetLogo nepodporuje další přístupy. Z těchto důvodů byl pro realizaci zvolen nástroj AnyLogic, který bude následně přiblížen detailněji.

AnyLogic je nástroj pro tvorbu simulačních modelů několika nejpoužívanějšími metodami. AnyLogic je v současné době jediným nástrojem, který v sobě nativně podporuje takové množství různých přístupů. Mezi ty nejznámější patří:

- systémová dynamika,
- agentový přístup,
- modelování diskrétních událostí.

Dále nabízí hotové knihovny pro rozšíření možností těchto přístupů:

- trh a konkurenční boj,
- medicína,
- výroba,
- dodavatelský řetězec,
- logistika,
- maloobchod,
- business procesy,

- sociální dynamika a dynamika ekosystému,
- antropogenní modely,
- project management a aktiva,
- IT infrastruktura,
- pedestrian dynamika.

Díky tomu je možné v jednom prostředí vytvořit buďto jeden model systému, na který je nahlíženo z několika pohledů, nebo tyto přístupy spojit a využít tak výhod, které nabízí. I když praktická část této práce je zaměřena hlavně na agentový přístup, tak se v ní našlo i místo, kde bylo vhodnější použít systémovou dynamiku. V případě volby jiného nástroje pro realizaci praktické části by bylo nutné tyto dva přístupy realizovat odděleně a nadále přenášet data mezi modely ručně, což s sebou nese nebezpečí nekonzistentnosti.

Poprvé byl AnyLogic představen na Winter Simulation Conference v roce 2000 stejnojmennou firmou, která je původem z Ruska, ale v současné době má sídlo v USA a pobočky po celém světě. AnyLogic je k dispozici v několika licencích, které se liší jak množstvím komponent, které jsou k dispozici, tak třeba podporou práce v týmu. S poslední verzí (7.1.2) přišlo několik zajímavých změn, ale tou nejdůležitější je určitě přidání licence, která umožňuje zdarma používat AnyLogic pro nekomerční účely. Za zhruba 15 let existence tohoto nástroje se kolem něj vytvořila solidní komunita vědců a organizací, kteří ho využívají a spolupracují na jeho zdokonalování. Také oficiální placená podpora je na velmi vysoké úrovni.

AnyLogic je postaven na programovacím jazyce JAVA (Java 2 Standard Edition 8.0), díky čemuž tento nástroj není omezen jen na jednu platformu, a to je v dnešní době a zvláště u modelovacích nástrojů velice důležitá vlastnost. Velkou předností je možnost vygenerování webového Java appletu a umístění aplikace přímo na webové stránky. Kdokoliv, kdo by měl zájem o spuštění aplikace, nepotřebuje mít na svém desktopu nainstalovaný žádný specializovaný nástroj, ale stačí mu pouze webový prohlížeč a modul umožňující spouštění Java appletů.

Veškerá funkcionalita nástroje je popsána v rozsáhlé dokumentaci v anglickém jazyce. Dále vyšlo několik knih (Borshchev 2013), (Grigoryev 2015), které jsou zaměřeny na výuku a řešení konkrétních problémů. Součástí instalace je rozsáhlá knihovna ukázkových modelů, které jsou vhodné pro prvotní představení toho, co vše se dá s tímto nástrojem dokázat. Na

webových stránkách runthemodel.com pak může kdokoliv umístit svoji aplikaci a zpřístupnit ji široké veřejnosti.

V následující části budou představeny 3 modely z knihovny ukázkových projektů, z nichž má každý buď představit potenciál modelovacího nástroje v problematice, kterou se praktická část nezabývá, nebo ukázat jinou variantu použitých přístupů. Hned v prvním příkladu jsou použity nástroje uzpůsobené k modelování davu a jednotlivců, kteří se v něm pohybují. Tyto nástroje by tak byly velice užitečné při realizaci výše zmíněného příkladu evakuace.

4.1 Subway Entrance Hall

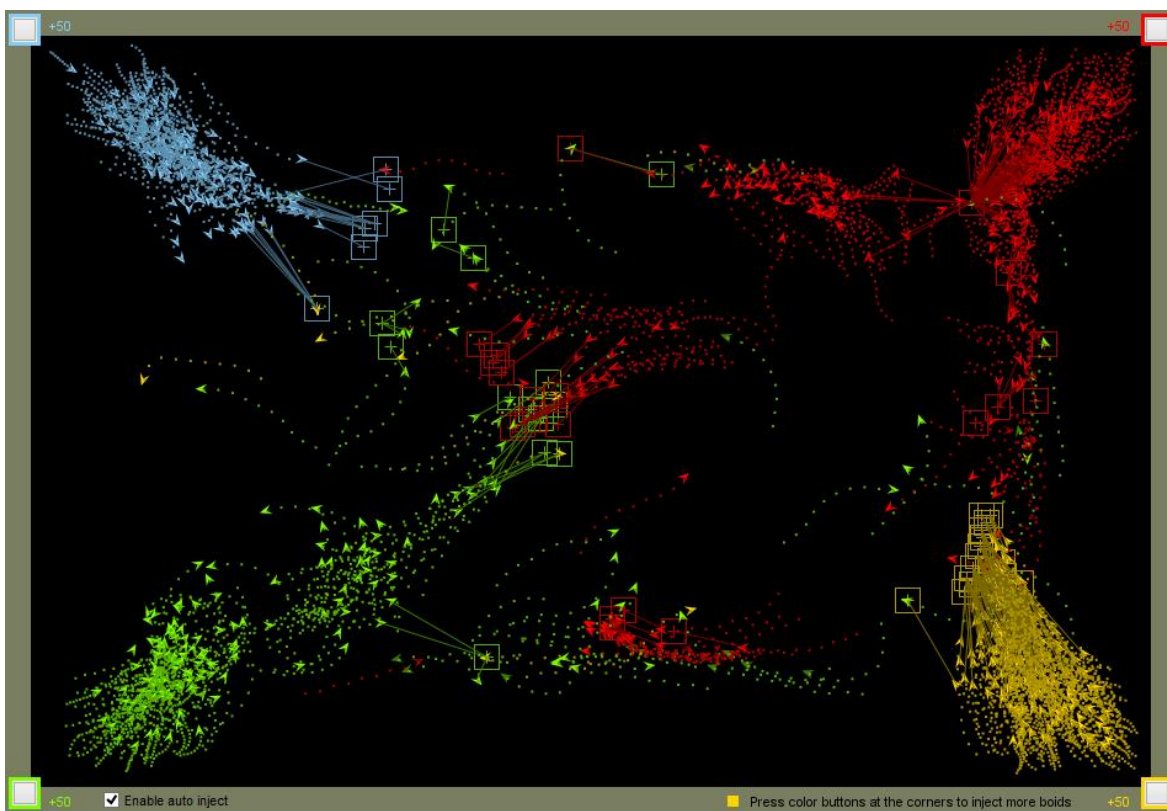
Jedná se o model pohybu cestujících v reálných prostorách metra. Cestující procházejí přes automatickou kontrolu lístků (turnikety). Dále jsou v modelu vytvořeny schody a eskalátory. Díky pedestrian knihovně AnyLogicku bylo možné nasimulovat chování člověka v davu a to se vším, co k němu patří: čekání ve frontách, vyhýbání se překážkám, změny rychlosti pohybu podle situace a udržování si volného prostoru kolem sebe. Z obrázku modelu je patrné, ve kterých místech je největší koncentrace lidí, a tudíž možnost vzniku problémů s tím spojených.



Obrázek 6: Model Subway Entrance Hall

4.2 Flocks of Boids - Ecosystem Dynamics

Simulace pohybu zvířete ve smečce nebo v hejnu je jedním z typických příkladů pro využití ABM. V tomto modelu jde o napodobení pohybu ptáků v hejnu podle algoritmu, který původně vytvořil (Reynolds, 1987). Každý agent má několik jednoduchých pravidel určujících jeho směr pohybu. Tento konkrétní model byl rozšířen o boj mezi čtyřmi skupinami agentů rozlišených podle barvy.



Obrázek 7: Model Flocks of Boids

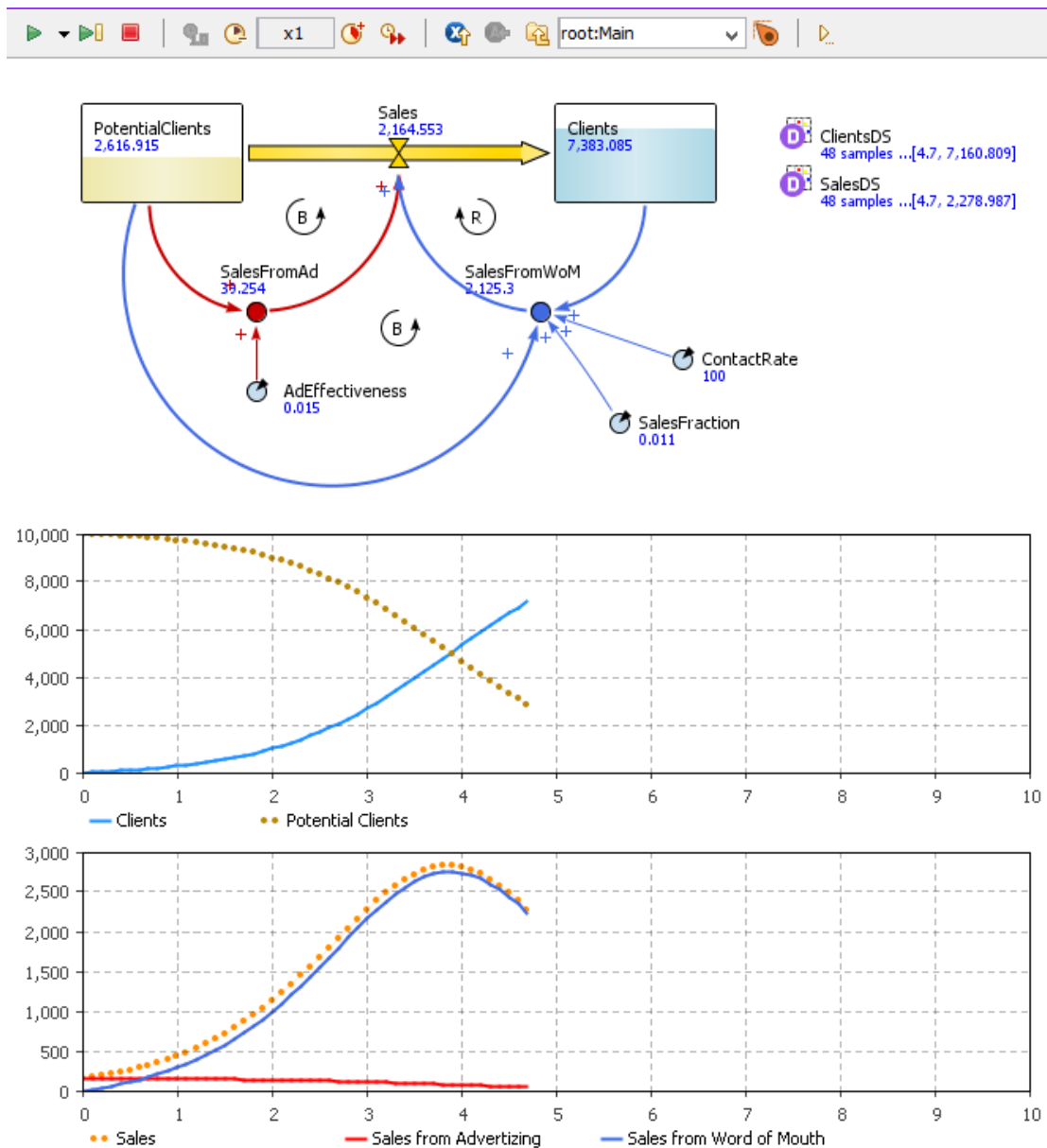
4.3 New product diffusion

V tomto klasickém modelu se systémovou dynamikou se společnost, která přichází na trh s novým produktem, snaží předpovědět vývoj jeho prodeje.

Předpoklady jsou tyto:

- velikost cílového trhu se nemění;
- spotřebitelé se rozhodují na základě reklamy a ústního doporučení;
- produkt nemá omezený životní cyklus;
- každý spotřebitel koupí pouze jeden produkt.

Čím více potencionálních zákazníků tedy bude v daném časovém období ovlivněno reklamou, tím větší bude v dalším období zákazníků, kteří byli ovlivněni ústním doporučením. Přibližně po čtyřech obdobích se stane to, že počet klientů se vyrovná počtu potencionálních zákazníků. Právě v tomto bodě dosahuje prodej svého maxima. Od tohoto bodu bude množství prodeje klesat. Důvodem poklesu prodeje je fakt, že na trhu již nejsou žádní potenciální zákazníci, kteří by měli o produkt zájem. Simulace končí ve chvíli, kdy na trhu není žádný potenciální zákazník.



Obrázek 8: Model New product diffusion

5 Oppidum Staré Hradisko

Tato kapitola byla zpracována s využitím (Archeolog.cz, 2015), (Čižmář, 2008), (Danielisová, 2008).

Oppidum Staré Hradisko patří mezi jednu z nejvýznamnějších památek keltského období na Moravě. Oppidum bylo též významným bodem obchodní stezky, vedoucí z pobřeží Baltského moře, tzv. Jantarové stezky. Oppidum Staré Hradisko bylo tedy významným obchodním a výrobním centrem, ale představovalo taktéž správní a kultovní centrum celé Moravy (Archeolog.cz, 2015).

Oppidum Staré Hradisko vzniklo v polovině 2. století př. n. l., tedy v mladší době laténské. Zaniklo přibližně po polovině 1. století př. n. l. Jeho vznik, fungování i zánik spadá do téhož období jako jiná česká oppida.

První písemná dochovaná zpráva o osadě je datována k roku 1519. Dříve se oppidu přezdívalo hora Kadidlnova a to díky bohatým nálezům jantaru v této oblasti. Oblast oppida a okolí se dostala i na známou mapu J. A. Komenského z roku 1627, kde je oblast nazývána jako „Hradisco, ubi myrha affoditur, tedy Hradisko, kde se nachází myrha (jantar).

Oppidum bylo přístupné pouze z východní strany, západní strana byla nepřístupná a to díky rozsáhlým strmým svahům. Oppidum se rozkládalo na ploše 37 ha. Celá tato oblast byla opevněna mohutnou hradbou, která i v současné době dosahuje výšky kolem 6 metrů. Oppidum bylo velmi hustě zastavěno tzv. dvorci (50x50 m). V každém dvorci bylo vybudováno několik staveb. Jednotlivé dvorce od sebe byly odděleny cestami, z nichž byly některé dokonce vydlážděné.

Jednou z hlavních funkcí osady, byla funkce výrobního s řemeslného centra. Jednou z nejdůležitějších činností obyvatel oppida byla pravděpodobně železářská výroba. Produkty z oppida byla zřejmě zásobována velká část Moravy.

Většina domácích zvířat měla jatečný význam, ale velká část z nich byla chována například i kvůli mléku, zvířata byla využívána též k práci (tažná síla – koně, skot). Domácí zvířata poskytovala obyvatelům kromě masa například i vejce, mléko, tuk. Druhotnými surovinami byla např. kůže, vlna, kosti nebo rohovina.

V oblasti okolo oppida Staré Hradisko se pravděpodobně pěstovaly následující plodiny: pšenice obecná, ječmen obecný, žito obecné, čočka jedlá, hrách setý.

Co se týče lovu, tak i ten v této oblasti probíhal, ale tvořil menší podíl celkové složky potravy. Zemědělství bylo v této době v rukou keltského obyvatelstva na vysoké úrovni, z toho důvodu měl lov a sběr pouze doplňující vyživovací funkci. Proto se našlo více kosterních pozůstatků domácích zvířat, než divokých. Kosterní pozůstatky ze Starého Hradiska potvrzují zanedbatelné zastoupení divoké zvěře, které se zpravidla pohybuje kolem 0, 2% - 0,5%.

Co se týče sběru divoce rostoucích plodin, nejsou o této skutečnosti dochovány žádné přímé doklady. Ale pravděpodobnost, že divoce rostoucí plodiny jako například ostružiny, tvořily zajímavou součást keltského jídelníčku, je velmi vysoká. Tyto plodiny byly také často využívány v léčitelství.

Chceme-li hovořit o hustotě osídlení této oblasti, je nutné se smířit pouze s přibližnými odhady, které jsou závislé na stavu poznání. Tyto odhady se mohou velmi lišit a také mohou zkreslovat představu o osídlení této lokality. Nicméně z výzkumu vyplývá to, že plocha oppida Staré Hradisko byla před jejím opevněním osídlena velice hustě. Nemohlo tedy docházet k většímu zemědělskému využití této plochy. První sídlištní objekty se někde nacházely 10 – 20 metrů od vnějšího příkopu. Velmi hustou sídlištní zástavbu potvrzuje výzkum z let 1990 a 1993.

Mezi jednu z hlavních složek potravy obyvatel Starého Hradiska patřily zcela jistě zemědělské produkty. Obyvatelé oppida v jeho areálu a blízkém okolí velmi pravděpodobně chovali domácí zvířata, pěstování kulturních plodin probíhalo však pouze v omezeném rozsahu. Jestliže v oppidu žilo 3 000 – 4 000 obyvatel, k jejich výživě by bylo nutné celkem 12 000 – 16 000 hektarů zemědělsky obdělávané půdy. Vzhledem k husté zástavbě před oppidem, kdy přesně tato plocha byla pro pěstování nejlepší, dále vzhledem ke konfiguraci okolního terénu, k poměrně vysoké nadmořské výšce, také vzhledem k nepříznivým půdním podmínkám je zřejmé, že bylo pěstování obilovin v okolí oppida omezeno spíše na minimum. Naprostá většina zemědělských surovin byla tedy dovážena z oblasti Hané, která byla velice úrodná. Plochu na pěstování obilovin v okolí oppida tvořilo přibližně 16 ha, nebo méně. Od tohoto čísla je ale nutné odečíst plochy podél vodních toků, lesy (jejich rozloha je neznámá) a obdělávané půdy, určené pro zásoby zásobování sídlišť. Pokud tedy oppidum potřebovalo alespoň 12 ha zemědělsky obdělávané půdy, nemohlo tedy toto vymezené zázemí pokrýt poptávku.

Oblast Starého Hradiska je převážně tvořena spodnokarbonskými drobami, břidlicemi a slepenci. V nížinných oblastech pak miocenními jíly. Z mapy půdních typů je patrné, že se na daném území výrazně objevuje černozem a to v části východní. Oproti tomu v západní části převažuje spíše méně úrodná hnědozem. Co se týče klimatických podmínek, jedná spíše o oblast suchou, většinou s mírnou zimou. Zalesněný povrch pak tvoří dubo - habrové háje a bukové háje. V záplavových oblastech vodních toků se objevovaly nejspíše luhy a olšiny.

Dle Danielsové byla převážně obdělávána pole ve vzdálenosti 4 – 5 km od nížinných sídlišť (1 hodina chůze). Terén byl v této oblasti však natolik hornatý, že nelze hovořit o efektivním zemědělství. V okruhu menším než 5 km nejsou zatím známy žádné důkazy o přítomnosti sídlišť. Výjimku tvoří pouze sídliště, které leželo na poli před oppidem. To bylo jeho integrální součástí. Díky hustému osídlení a nadmořské výšce (cca 500 m), nemohlo ale v žádném případě zajistit přísun zemědělských produktů pro Staré Hradisko. Zřejmě se tedy jednalo pouze o pokračování zástavby oppida extra muros (za hradbami).

6 Popis modelu

Celý model se skládá z několika hlavních částí: agentový model populace, agentový model zvířat, model potravy vytvořený s pomocí systémové dynamiky, celulární model prostředí a několik dalších podpůrných částí, které zajišťují fungování celku. V této části, budou detailněji popsány oba agentové modely pomocí protokolu ODD. Pro větší přehlednost bude každý z modelů popsán samostatně. Vztahy mezi jednotlivými částmi pak budou vysvětleny v další kapitole.

6.1 ODD – populace

Existuje několik způsobů jak modelovat populaci, ale agentový model se nejvíce přibližuje realitě díky tomu, že modelovanou entitou je přímo člověk. Lze tak například sledovat pouze vývoj jednotlivce v populaci, nebo se zaměřit na některou demografickou skupinu.

6.1.1 Účel

Cílem modelu je nasimulovat vývoj keltské populace v rozmezí 120 let. Jde o reálné napodobení vývoje lidské populace bez vnějších vlivů (vlivy omezující populaci jsou přidány až v celkovém modelu). Obecně platí, že pokud na vývoj nepůsobí žádné vnější vlivy (nedostatek místa, nedostatek potravy, války, nemoci, emigrace, atd.), tak růst populace je velmi podobný exponenciálnímu růstu. Lze však konstatovat, že v reálném světě téměř vždy nějaký omezující faktor existuje. Po přidání omezujících podmínek na růst populace se exponenciální průběh mění na průběh logaritmický (Smith, 1977). Kromě samotných informací o struktuře obyvatelstva je tento model důležitý ještě z hlediska výpočtu potenciálu pracovní síly obyvatelstva. Obyvatelstvo je rozděleno do skupin podle věku a pohlaví s tím, že každá skupina může nabídnout jiné množství pracovních hodin, má různé nároky na potravu a může vykonávat různě těžké práce. Model je vytvořen v modelovacím nástroji AnyLogic, díky kterému je možné efektivně pracovat jak s agentovou populací, tak s agentem jako jedincem. Tento fakt umožňuje zobrazení populace podle mnoha různých kritérií (věková struktura, průměrný věk, průměrný počet dětí na ženu atd.).

6.1.2 Entity, stavové proměnné a míry

Jedinou entitou tohoto submodelu je agent reprezentující člověka. Všechny atributy tak úzce souvisejí s existencí a vývojem jedince.

Global	Agents
Year	Gender
Strong force	Age
Weak force	Amount of offspring
	Year of birth
	Death probability
	Birth probability
	Strength
	Work hours
	Consumption

Tabulka 3: Entity populace

- Year – rok v simulaci (0-120)
 - Strong force – doba, kterou obyvatelé denně můžou strávit těžkou prací. (viz tab. 4)
 - Weak force – doba, kterou obyvatelé denně můžou strávit lehkou prací. (viz tab. 4)
 - Gender – pohlaví agenta (muž, žena)
 - Age – věk agenta (0-95)
 - Amount of offspring (pouze žena) – počet potomků ženy. Tato hodnota má čistě statistické využití, v modelu totiž není sledována rodinná příslušnost (0-?)
 - Year of birth – rok simulace, ve kterém byl agent vytvořen (narození člověka) (0-120)
 - Death probability – pravděpodobnost úmrtí bude popsána dále (0-1)
 - Birth probability – pravděpodobnost narození bude popsána dále (0-1)
 - Strength – práce, které museli vykonávat obyvatelé oppida, jsou rozděleny do dvou skupin podle obtížnosti (Olševičová, 2015):
 - Strong – těžké práce obvykle související s obděláváním půdy, které mohli vykonávat pouze muži (mlácení obilí, orba atd.);
 - Weak – všechny ostatní práce, které nebyly tak fyzicky náročné (domácí práce, dojení, pletí atd.).
- Agent tedy může vykonávat těžké nebo lehké práce v závislosti na svém pohlaví a věku.
- Consumption – denní potřeba přísunu potravy člověka. Tato hodnota se mění s rostoucím věkem. Pro jednodušší manipulaci s různými druhy potravy je tato hodnota vedena v kcal viz tabulka 4.
 - Work hours – množství hodin, které agent může přes den strávit prací. Tato hodnota se opět mění s postupujícím věkem agenta, viz tabulka 4.

6.1.3 Přehled procesů a plánování

Časové kroky jsou v submodelu populace diskrétní a nejmenší jednotkou je jeden rok. U každého agenta probíhá v každém kroku proces, který rozhoduje o tom, zda agent v daném kroku (roce) zemře či nikoliv. To samé platí pro narození nového dítěte (vytvoření nového agenta), dítě může mít pouze agent splňující podmínky, které budou popsány níže. Po dokončení procesů všech agentů jsou provedeny výpočty týkající se popisných statistik agentové populace.

Pomocí následujícího pseudokódu je popsán proces uvnitř každého agenta:

```
If(yearOfBirth != currentYear){
    If(randomNo < deathProbability){
        killAgent()
    }
    else{
        age++
        if(gender == female && age > 14 && age < 50 && randomNo < birthProbability)
        {
            AmountOfOffspring++
            createNewAgent()
        }
    }
}
```

Úvodní podmínka zajišťuje, aby agent vytvořený v čase t přežil nejméně do času $t+1$. Následně je agent podroben testu pro přežití do dalšího období. Pokud agent test nesplní je smazán a dále se s ním již nepracuje. Pokud však přežije, je mu inkrementován věk a je podroben testu pro narození nového agenta. Nutné předpoklady jsou ženské pohlaví a věk, ve kterém je žena plodná (Machálek, 2012).

6.1.4 Koncept konstrukce

Každý rok je tedy u všech agentů spuštěn proces, který vyhodnotí, zda agent tento rok zemře nebo se mu narodí potomek. Agenti navzájem nekomunikují, jde čistě o zkoumání věkové struktury obyvatelstva. Jiné skutečnosti v tomto modelu nejsou simulovány. Pravděpodobnost úmrtí agenta je dána úmrtnostní tabulkou, která vzešla z archeologického výzkumu z té doby (Machálek, 2012). Naopak noví agenti vznikají tak, že agent, který je ženského pohlaví a je v plodném věku má jistou pravděpodobnost k početí nového dítěte.

6.1.5 Inicializace

Pro inicializaci je zapotřebí vědět předpokládanou počáteční strukturu obyvatelstva. Při vytváření počáteční populace agentů je každému z nich přidělen náhodný věk, tak aby počty lidí ve skupinách odpovídaly zadání a věkové rozložení ve skupině bylo rovnoměrné. Při každém spuštění simulace je tedy věková struktura mírně odlišná. Simulace začíná v roce 1 a bez ukončovací podmínky by mohla být spuštěna neomezeně dlouho. Nicméně v celkovém modelu je sledováno období 120 let.

V následující tabulce je rozdělení agentů do věkových skupin a hodnoty atributů souvisejících s tímto rozdělením (Machálek, 2012).

	Age	Strength	Kcal/day	work hours/day
Suckling	Age <= 1	None	-	0
Toddler	1 < Age <=3	None	1360	0
Child	3 < Age <=9	None	2000	0
Male Older child	9 < Age <=14	Weak	2500	3
Female Older child	9 < Age <=14	Weak	2300	3
Male young adult	14 < Age <=19	Strong	3000	10
Female young adult	14 < Age <=19	Weak	2500	10
Male adult	19 < Age <=49	Strong	3000	8
Female adult	19 < Age <=49	Weak	2600	8
Elder	49 < Age	Weak	2000	4

Tabulka 4: Věkové skupiny

6.1.6 Vstupní data

Z externích souborů jsou zpracovány úmrtnostní tabulky a hodnoty související s rozením, dále jsou zapotřebí počty lidí ve všech věkových skupinách.

6.2 ODD – zvířata

Zvířata jsou po lidech druhým typem agentů v celkovém modelu. Z popisu archeologického výzkumu vyplývá, (viz kapitola 5) že zvířata byla chována hlavně pro maso, mléko a tažnou práci. Pro co možná nejuvěrnější simulaci vlivu zemědělské činnosti na okolí osady byla do modelu implementována pastva zvířat.

6.2.1 Účel

Submodel zvířat simuluje existenci čtyř druhů hospodářských zvířat konkrétně krav, koňů, ovčí/koz a prasat, které byly obyvatelům k dispozici. Spojení ovčí a koz se může zdát podivné, ale pro potřeby výzkumu jsou rozdíly ve vlastnostech těchto dvou zvířat

zanedbatelné, a proto byl v modelu použit tento „pseudo“ druh. Model by mohl být rozšířen například o drůbež nebo domácí zvířata, ale jejich vliv na model by byl opět minimální, a proto nejsou brána v potaz.

Model se zaměřuje na život zvířat ze tří různých pohledů. Prvním je růst populace zvířat, který funguje na stejném principu jako předchozí model populace, ale s několika rozdíly, které budou popsány dále. Druhý je pohled na pastvu a krmení, konkrétně se jedná o snahu napodobit chování stáda při pastvě a přesun mezi pastvinami. V období, kdy není možná pastva, je pak simulována činnost dokrmování zvířat. Třetím pohledem je využití zvířat jako zdroje potravy (mléko a maso) pro obyvatelstvo osady. Důsledkem všech těchto procesů je to, že prostředí okolo oppida musí být přizpůsobováno nárokům na pastvu stejně tak jako na obdělávání půdy. Využití prostoru pro tyto činnosti je kritické pro možnost udržitelnosti fungování celé osady.

Tento submodel se tedy snaží odpovědět na otázku, jaké množství zvířat je nutné pro fungování systému a jaké nároky klade toto množství na okolní prostředí

6.2.2 Entity, stavové proměnné a míry

Agent v tomto modelu reprezentuje jedno hospodářské zvíře, které je nejdůležitější entitou tohoto submodelu. Samotný submodel je úzce spjatý s modelem prostředí, který je popsán v kapitole 6.3. Tyto dva modely by bylo možné spojit do jednoho ODD protokolu, ale z důvodu přehlednosti jsou popsány samostatně.

Global	Agents
Year	Id
Month	Animal species
Day	Gender
Herd size	Age
Herd area	Location
Adulthood	Grass eaten
Birth probability	Herd
Death probability	Shepherd
Younglings death probability	Graze type
Energy from meat	Hunger ratio
Max age	Hunger counter
Min birth	
Max birth	
Grass needed	
NO ₂	

Tabulka 5: Entity zvířata

- Year, Month, Day – datum simulace
 - Herd size – velikost jednoho stáda (kolik kusů dobytka je v jednom stádu)
 - Herd area – plocha, na které se stádo pase
 - Adulthood – věk, ve kterém agent dospívá
 - Birth probability – pravděpodobnost narození nového zvířete
 - Death probability – pravděpodobnost úmrtí zvířete
 - Younglings death probability – pravděpodobnost úmrtí nově narozeného mláděte
 - Energy from meat – množství kcal, které obsahuje jeden kilogram masa
 - Max age – maximální věk zvířete
 - Min birth – minimální počet potomků při březosti
 - Max birth – maximální počet potomků při březosti
 - Grass needed – množství trávy, kterou by zvíře mělo denně spást
 - NO₂ – množství NO₂, které zvíře produkuje
-
- Id – jedinečný identifikátor agenta
 - Animal species – rozdělení agentů podle druhů zvířete
 - Gender – pohlaví agenta
 - Age – věk agenta
 - Location – současná poloha agenta na mapě (souřadnice X a Y)
 - Grass eaten – množství trávy, které bylo agentem spaseno v aktuální den
 - Herd – agentova příslušnost ke stádu
 - Shepherd – udává, který agent ve stádu byl vybrán jako „pasáček“ vedoucí stádo
 - Graze type – výčet možných prostředí pro pastvu
 - Hunger ratio (pouze shepherd) – poměr mezi aktuálním množstvím trávy, která byla stádem spasena a teoretickým ideálním množstvím, které by stádo mělo spást v případě, že by neexistovala omezení
 - Huger counter (pouze shepherd) – udává počet dní v řadě, kdy stádo hladovělo a muselo se tedy přemístit na vedlejší pastvinu

6.2.3 Přehled procesů a plánování

Na rozdíl od předchozího modelu populace má tento model o poznání spojitější časové kroky. Jeden krok v simulaci je nyní roven jednomu dni. Jeden rok tak odpovídá reálným

365 dnům. Rok z pohledu zvířat je rozdělen na dvě stejně dlouhá období. V prvním období je zvířatům umožněna pastva na travnatých plochách za pomoci procesů blíže popsanych v kapitole 6.2.4. Ve druhém období pastva není možná a zvířata jsou dokrmována senem, které bylo shromážděno na začátku tohoto období. Obě období znázorňují reálný cyklus střídání ročních období, kdy v letní polovině pastvě nic nebrání, ale v zimní by pastva byla obtížná až nemožná (Forchtsam, 1960). Každý den je tedy zvíře buď vysláno se stádem na pastvu, nebo je mu dodáno potřebné množství sena.

Model je připraven na dvě varianty vývoje populace. První variantou je udržovat zvířecí populaci v konstantním poměru vůči lidské populaci tak, že je na začátku simulace zvolen počet zvířat na jednoho člověka a tento poměr je udržován po celou dobu simulace. Tento statický způsob je předvídatelnější a lépe kontrolovatelný, ale jeho vypovídací hodnota je omezena z důvodů umělé korekce celé populace zvířat. Druhý způsob funguje na stejném principu jako u lidské populace. Jednou za rok u každého agenta proběhne proces, který rozhodne o tom, jestli agent přežije do dalšího roku, zda bude mít tento rok mladé a případně kolik jich bude.

Posledním procesem je využití zvířat pro maso a mléko. Tento proces je externí, neřeší se na úrovni agentů, ale celého modelu a probíhá vždy jednou za rok. Detailněji je tento proces popsán v následující kapitole 6.2.4.

6.2.4 Koncept konstrukce

Na začátku období pastvy jsou všechna zvířata rozdělena do stád dle zadané velikosti, která je jedním ze vstupních parametrů modelu. První zvíře ve stádu je vždy zvoleno za „pasáčka“ stáda. Pasáček má napodobovat rozhodování člověka, který každý den vybírá místo pro pastvu. Také by bylo možné vytvořit další druh agenta a chování pasáčka přesunout tam. Toto řešení by ale nepřineslo žádné benefity, a proto byl zvolen první způsob. Stáda jsou složena ze stejných druhů zvířat, nezávisle na věku a pohlaví. Jedinou výjimkou jsou krávy a telata, které mají stáda oddělena od volů/býků.

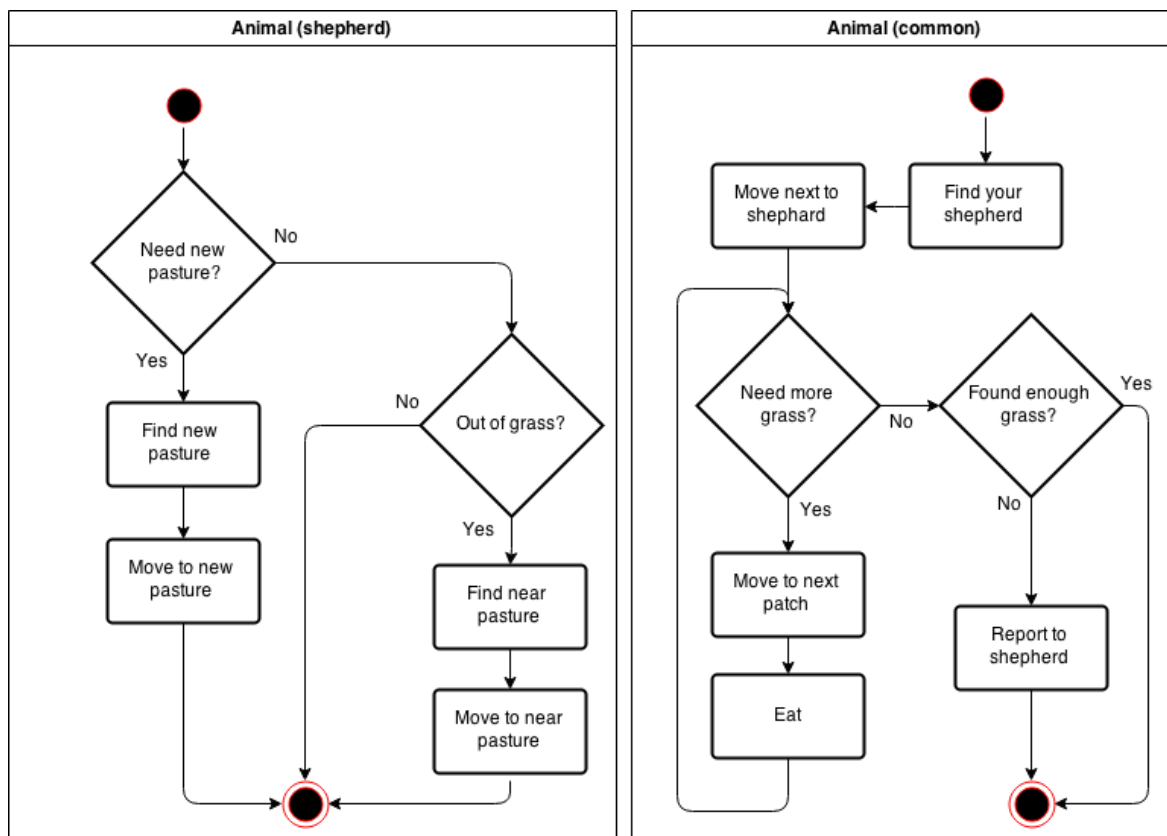
Samotná pastva zvířat probíhá následujícím způsobem. Na začátku každého dne, kdy je možná pastva (v modelu je to polovina roku, ale tento poměr může být upraven podle potřeb experimentu), pasáček nejprve zkontroluje, zda jeho stádo v několika předešlých, po sobě jdoucích dnech nehladovělo více, než je povolená mez (viz Obrázek 9). V případě, že stádo hladovělo více dní než je zvolená hodnota, tak tato skutečnost indikuje to, že v blízkém okolí stáda může být nedostatek trávy k pastvě a je nutné se přesunout na jinou část mapy. Pasáček

tedy zkontroluje několik potenciálních lokací po celé mapě a přesune se tam, kde nalezne největší množství trávy. V případě, že stádo předešlé dny nehladovělo, zůstává na současné pozici a pokračuje v rozhodovacím procesu. Dalším krokem je kontrola, zda stádo předešlý den hladovělo více, než je povolená mez. Jestliže ano, znamenalo by to, že na současné pastvině dochází tráva a je nutné přesunout stádo na jednu ze sousedících pastvin. Pasáček tedy zkontroluje potenciální pastviny, které sousedí s jeho současnou a přesune se na tu, kde nalezne největší množství trávy. Jestliže předešlý den nebyla mez hladovění překročena, znamená to, že na pastvině je dostatek trávy pro další den. V tuto chvíli končí rozhodování pasáčka a tento upravený agent přejde k chování běžného agenta.

Každý agent ze stáda má definované stejné chování. Na začátku zjišťuje, kde se aktuálně nachází jeho pasáček. Je totiž možné, že byl nucen změnit pastvinu. Po jeho nalezení se agent přesouvá do náhodné pozice v okolí svého vedoucího agenta tak, že je vedoucí agent vždy ve středu stáda a ostatní agenti jsou rovnoměrně rozmístěni na plochu čtverce, jehož strana je daná parametrem pro rozlohu stáda. Po přemístění na cílovou pozici se agent začíná pást.

Nejprve každý agent zkontroluje buňku, na které se aktuálně nachází. Pokud se na ní nalézá dostatečné množství trávy, které by pokrylo agentovu denní potřebu, pak zůstává na aktuální pozici a z buňky je odstraněno příslušné množství trávy. V případě, že na buňce není dostatek trávy, agent spotřebovává celý její objem a přesouvá se na další buňku. Přesun funguje tak, že agent postupně zkontroluje všechny buňky v přímém okolí své aktuální pozice a postupuje tak dlouho, dokud neuspokojí svou denní potřebu, nebo nepřekročí daný limit posunů. Jestliže na konci pastvy agent stále nenalezl dostatečné množství potravy, je tento zbývající objem nahlášen jeho pasáčkovi a ten ho uchová pro výpočty související s přesunem stáda, které jsou popsány výše. V opačném případě agent našel dostatek potravy a den pro něj končí.

V následujícím diagramu je zachyceno chování obou typu zvířecích agentů.



Obrázek 9. Schéma rozhodování agenta

Další důležitou součástí modelu, která ovlivňuje zvířecí populaci je využívání zvířat na maso. Potrava pro obyvatele oppida je nedílnou součástí celého modelu. V tomto submodelu bude popsána pouze část týkající se masa a mléka, které produkují. Když kráva nebo ovce/koza porodí mládě, začíná ji takzvané laktační období, během kterého je schopna produkovat mléko. Část této produkce je využita pro spotřebu obyvatel oppida a zbytek je přirozeně potravou pro mládě nebo mlád'ata (Forchsam, 1960). Po dobu laktace tedy všechna zvířata dodávají každý den konstantní množství mléka, které pokryje malou část potřeb obyvatelstva. Jednu ročně jsou zvířata porážena na maso. Množství zvířat, která budou porážena, je určeno podle toho, kolik kusů zvířat konkrétního druhu je k dispozici a jak jsou užitečná (kráva, která může produkovat mléko nebo zplodit býka, který bude využit pro orbu je cennější než prase). Na začátku simulace je nastaven počet kusů zvířat na jednoho člověka a tato hodnota je pak brána jako hraniční množství, pod které by počet zvířat neměl klesnout. Důvodem je udržení rovnováhy mezi lidmi a zvířaty.

6.2.5 Inicializace

Na startu simulace je vytvořena počáteční populace všech zvířat tak, aby poměr vůči lidem odpovídal nastaveným hodnotám. Věk zvířat pak odpovídá rovnoměrnému rozdělení. Před první pastvou jsou zvířata rozdělena do stád (tento proces se opakuje každý rok). Tato simulace, stejně tak jako ta předchozí, začíná v čase jedna.

6.2.6 Vstupní data

Jako vstupní data pro tento model jsou nutné poměry počtu jednotlivých druhů zvířat k celkovému počtu obyvatel. Dále jsou důležité informace o jednotlivých druzích zvířat jako například energie z masa, velikost stáda, plocha stáda, počet mláďat, délka laktačního období atd. Výchet všech potřebných parametrů je k dispozici v části 6.2.2.

6.3 Prostředí

Jak bylo vysvětleno v teoretické části, agent potřebuje ke své činnosti prostředí, ve kterém bude existovat, reagovat na změny jeho stavů a měnit ho. V tomto popisovaném systému prostředí představuje mapu místa, kde dříve stávalo keltské oppidum, které je předmětem archeologického výzkumu. Prostředí přináší osadě zdroje, které jsou nutné pro její existenci. Nejkonkrétněji je simulována pastva, při které dochází ke konfrontaci agentů (zvířata) s jejich prostředím (pastviny).

6.3.1 Účel

Prostředí celého modelu je tvořeno dvourozměrnou mřížkou reprezentující reálnou mapu okolí keltského oppida Staré Hradisko v době jeho existence (Danielisová, 2015). Celková mapa je vytvořena za pomoci jednotlivých vrstev, které jsou na sobě nezávislé. Každá vrstva obsahuje informace o jiné vlastnosti prostředí (Danielisová, 2008). V celkovém modelu je tento submodel využíván v interakci se zvířaty a je pozorován vliv lidské činnosti na toto prostředí (obdělávání půdy, odlesňování). Prostředí hraje klíčovou roli v otázce životaschopnosti celé osady. Prostředí má konstantní velikost a tak i zdroje, které nabízí, jsou omezeny. S rostoucím počtem obyvatel oppida rostou i jejich nároky na tyto omezené zdroje. Model prostředí tedy zprostředkovává informace o konkrétním využití prostoru až do doby, kdy už není možné pokrýt požadavky osady.

6.3.2 Entity, stavové proměnné a míry

Primární entitou v tomto modelu již není agent, ale buňka, která je součástí dvojrozměrné mřížky představující mapu. Každá buňka reprezentuje určitou plochu, jejíž geografické vlastnosti mohou být numericky vyjádřeny a uloženy v paměti této buňky. Každá buňka je tak jednoznačně identifikovatelná podle svých atributů a žádné dvě buňky nejsou tedy totožné. Část atributů je statická, což platí hlavně pro geografické informace jako například svažitost terénu nebo vzdálenost od vodních toků. Tyto atributy zůstávají stejné po celou dobu simulace. Druhá část atributů je dynamická a mění se v průběhu simulace. Důvody změny těchto vlastností jsou hlavně obdělávání půdy a pastva.

Global	Cells
Year	X
Month	Y
Day	Distance oppidum
Width	Distance streams
Height	Cultivation Suitability
	Slope
	Wetness
	Woodland
	Discovered
	Type
	Amount NO ₂
	Amount grass
	Suitable cattle
	Suitable horse
	Suitable sheepGoat
	Since grazing
	Grass type

Tabulka 6: Entity prostředí

- Year, Month, Day – datum simulace
- Width – šířka mapy
- Height – výška mapy

- X, Y – souřadnice buňky
- Distance oppidum – vzdálenost buňky od oppida
- Distance streams – vzdálenost buňky od vodních toků
- Cultivation suitability – vhodnost buňky pro pěstování zemědělských plodin

- Slope – svažitosť buňky
- Wetness – vlhkosť buňky
- Woodland – typ lesného porostu prevládajúceho na buňce
- Discovered – informuje o tom, zda byla v simulaci tato buňka využita člověkem
- Type – označuje prostředí buňky
- Amount NO₂ – množství NO₂ obsažené v buňce
- Amount grass – množství trávy v buňce
- Suitable cattle/horse/sheepGoat – vhodnost buňky pro pastvu zemědělských zvířat
- Since grazing – doba od poslední pastvy probíhající na této buňce
- Grass type – typ travnaté plochy

6.3.3 Přehled procesů a plánování

O změnu atributů jednotlivých buněk se stará několik na sobě nezávislých procesů. Tyto procesy upravují vstupní buňku tak, aby výstupní buňka splňovala požadavky modelu. Příkladem je proces zajišťující odlesňování. Tento proces by také mohl být nahrazen činností agentů a tím by se přiblížil reálnému systému. Účelem této práce není ale simulovat reálné chování člověka, ačkoliv je to jedna z možností pro budoucí rozšíření modelu. Při procesu odlesňování je tedy nutné, zjistit kolik osada potřebuje palivového a stavebního dřeva. Toto množství vychází pouze z celkového počtu obyvatel osady. Odlesnění je také nutné v případě, pokud současná velikost pastvin už nestačí potřebám zemědělských zvířat na nich se pasoucích. Funkce starající se o odlesnění tedy vybere část lesa, která je nejbližší oppidu a přemění ji na požadovaný typ (louka, pole atd.). Další procesy se starají například o změnu buňky typu louky na buňku typu pole a naopak.

Vzhledem k tomu, že tento submodel slouží jako prostředí předchozímu modelu zvířat, je také zachována velikost kroků simulace. To se projeví hlavně v dalším procesu, kterým je dorůstání trávy.

6.3.4 Koncept konstrukce

V simulaci je možné zvolit jeden ze tří způsobů dorůstání trávy. Samotná potřeba travnatých ploch vychází až ze spojení všech submodelů do výsledného modelu, kde je tráva nezbytnou složkou potravy zemědělských zvířat. Způsoby dorůstání trávy se od sebe liší pouze tím, v jakém intervalu má tráva přibývat. Nejlogičtější možností je denní interval, což odpovídá intervalu pastvy, která je také prováděna denně. Každý den je tedy množství trávy v buňce zvýšeno o hodnotu, která vychází z velikosti buňky typu travnaté plochy a ročního období.

I když je denní interval tou nejvhodnější možností, je velice náročný na výpočetní výkon. Z toho důvodu je v simulaci také možnost měsíčního a ročního intervalu. Tyto způsoby se liší pouze v tom, jak často a jaké množství trávy je do buňky přidáno. Ačkoliv je tedy za stejné období do buňky přidáno celkově stejné množství trávy, fakt že u měsíčního a ročního intervalu je toto množství přidáno najednou, může negativně ovlivnit dynamiku zvířecí pastvy.

Každá buňka nabývá jednoho z následujících stavů. Tento stav pak jednoznačně vymezí účel této buňky a její zobrazení na mapě. V průběhu simulace se typ konkrétní buňky může několikrát dle potřeby změnit.

- Wheat – pole, na kterém je pěstováno obilí.
- Pulses – pole, na kterém jsou pěstovány luštěniny.
- Fallow – po každé sklizni se z pole stávají pole ležící ladem, při aplikaci intenzivní strategie zemědělství je toto pole příští rok opět oseto obilím nebo luštěninami. V případě, že je provozována extenzivní strategie, je toto pole využito znovu až za 3 roky. Po tuto dobu pole leží ladem, aby mělo dostatek času obnovit zásoby živin v půdě. Pole ležící ladem může být využito na pastvu. Rozdíly mezi extenzivní a intenzivní strategií zemědělství budou popsány dále.
- GrassLand – travnatá plocha.
- Forest – les se využívá jako zdroj dřeva a možná pastvina pro skot a prasata.
- Water – na buňkách typu water se neprovádí žádná akce.
- Oppidum – samotná keltská osada není využita pro zemědělské ani jiné účely.
- Wasteland – místa na mapě, která se nedají použít pro jakoukoliv činnost.

Především pro potřeby modelu zvířat bylo nutné od sebe oddělit jednotlivé druhy travnatých ploch. Ty jsou rozděleny podle možností využití těchto ploch pro různé potřeby. Až na jednu výjimku se toto rozdělení týká buněk typu GrassLand. Tou výjimkou je buňka typu Fallow.

- Pastvina – plocha, na které se mohou pást zvířata.
- Louka – plocha, která se využívá jako zdroj trávy na seno, kterým jsou pak dokrmovávána zvířata přes zimu. Tato plocha se nevyužívá pro pastvu.
- Pole ležící ladem – jak již bylo zmíněno výše, i pole ležící ladem může být využito jako pastvina.

- Nedosažitelné – Travnaté plochy, na kterých neprobíhá pastva a ani se nedají využít pro sběr sena. Obě tyto činnosti totiž nejsou proveditelné v terénu, který má sklon větší než 30% (Danielisová, 2015).

V modelu jsou implementovány dvě hlavní strategie obdělávání půdy, „intenzivní“ a „extenzivní“. Za předpokladu, že by se od obou strategií očekával stejný výnos plodin, bude pro každou z nich potřeba vynaložit rozdílné množství zdrojů, za které považujeme například lidskou práci, nebo množství obdělané půdy. V současné době je intenzivní strategie využívána v rozvinutějších zemích, kde je k dispozici moderní zemědělská technika. Naopak extenzivní strategie, při které není zapotřebí takové množství techniky ani lidí, je spíše využívána v rozvojovějších zemích (Encyclopaedia Britannica, 2015).

Extenzivní strategie je založena na tom, že z celkové plochy určené pro pěstování plodin je vždy oseta pouze jedna čtvrtina. Zbylé tři čtvrtiny pak leží ladem a další rok je oseta jiná část, která byla doposud nevyužita. Díky tomu mají živiny odčerpané z půdy dostatek času se do ní zpět vrátit přírodní cestou a není zapotřebí vynakládat takové úsilí pro znovu zúrodnění půdy. Nevýhodou této strategie je tedy relativně velká rozloha obdělávané půdy, která tak nemůže být využita pro jiné účely. Pole ležící ladem (nejsou v danou chvíli oseta), se dají využít jako pastviny pro zvířata za podmínky, že objem trávy je nižší než u klasických travnatých ploch. Také výnosy zemědělských plodin nejsou tak velké, jako tomu je u intenzivní strategie.

Při intenzivním stylu zemědělství je veškerá plocha polí využita pro pěstování plodin. Lidé se aktivně podílejí na zúrodnění půdy tím, že věnují čas pletí a hnojení. Ačkoliv je tato metoda náročnější na lidské a zvířecí zdroje, tak přináší přibližně 75% úsporu plochy, jinak ležící ladem.

V následujícím textu jsou popsány rozměry mapy využitě pro tento model.

reálná velikost 9080 x 7780 m

šířka x výška: 908 x 778 buněk

1 buňka = plocha o rozloze 10 x 10 metrů

100 buněk = 1 ha

celková velikost mapy = 706 424 buněk \approx 7 064 ha

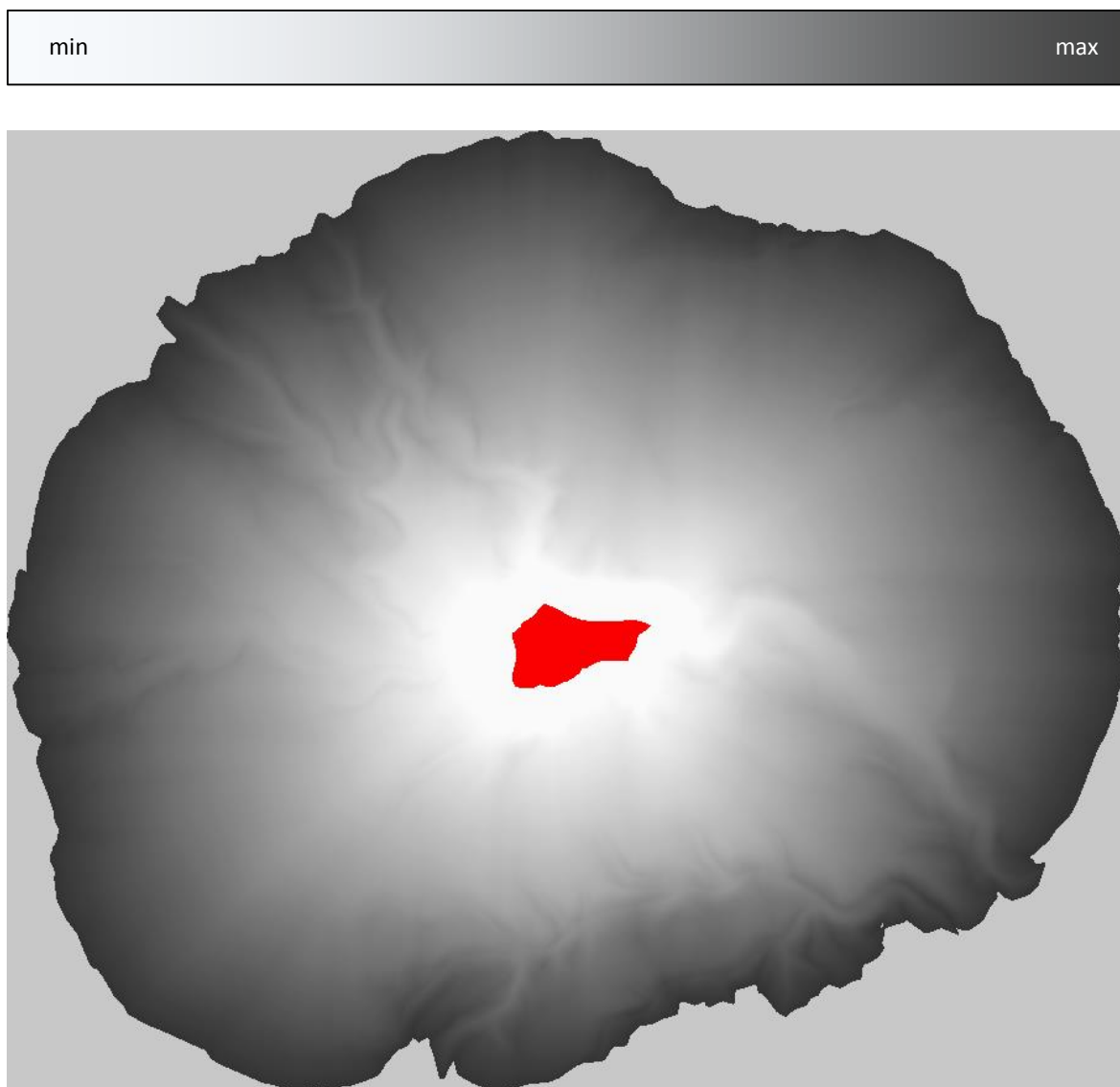
velikost využitelného místa = 526 969 buněk \approx 5299 ha

velikost oppida = 4 250 buněk \approx 42 ha

V následující části budou představeny všechny vrstvy mapy, ze kterých se prostředí skládá. Tam kde je to vhodné, bude k dispozici také jejich grafická ukázka.

- Distance from oppidum

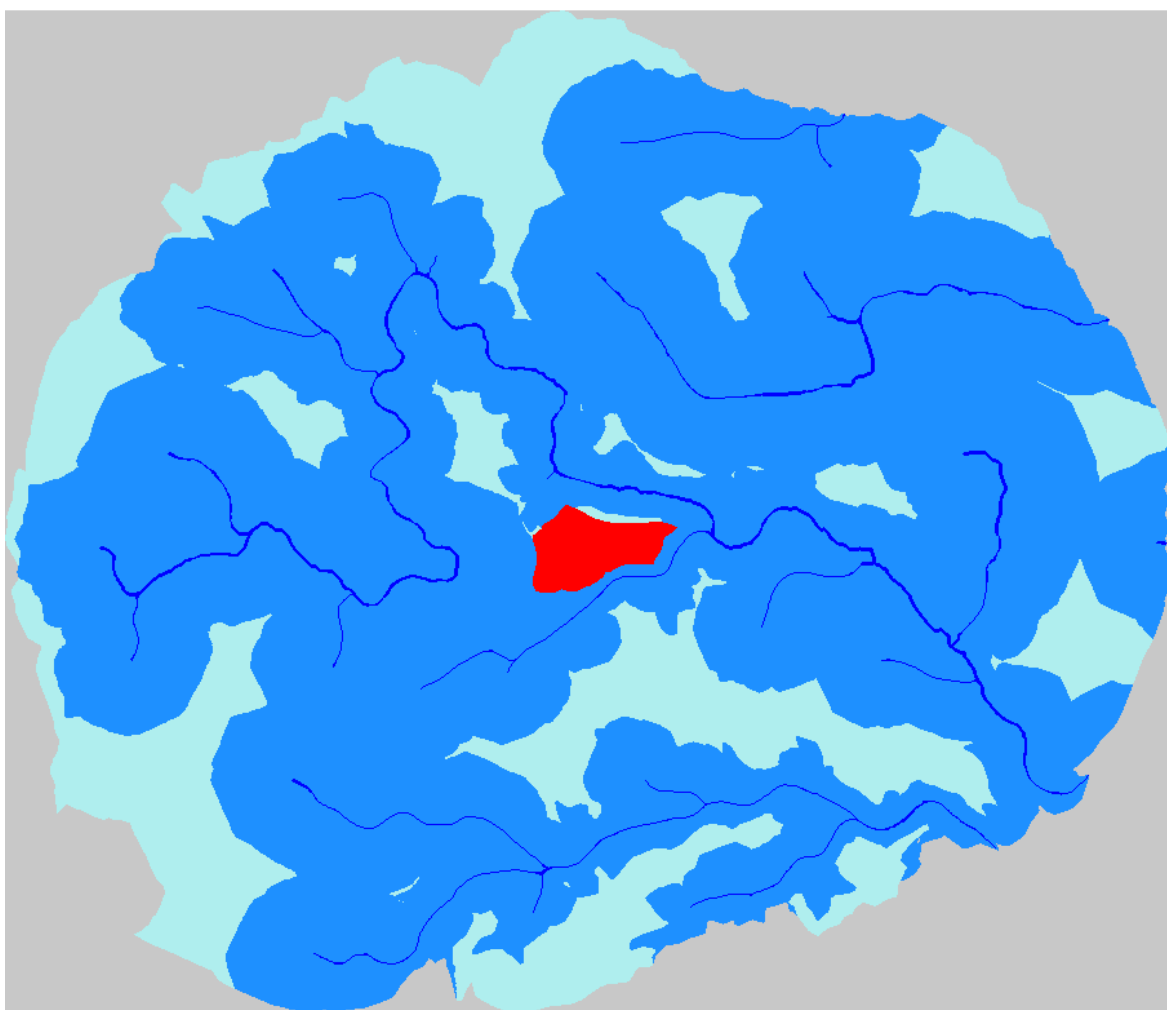
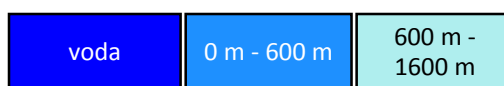
Vrstva vzdálenosti od oppida udává každému políčku jeho vzdálenost od středu mapy, oppida. Kromě absolutní vzdálenosti je brána v potaz i členitost terénu. Proto v případě, že by se zvýraznily všechny buňky s konkrétní hodnotou vzdálenosti od oppida, tvar, který tím vznikne, nebude mít přesný kruhový tvar.



Obrázek 10:Vrstva mapy Distance from oppidum

- Distance from streams

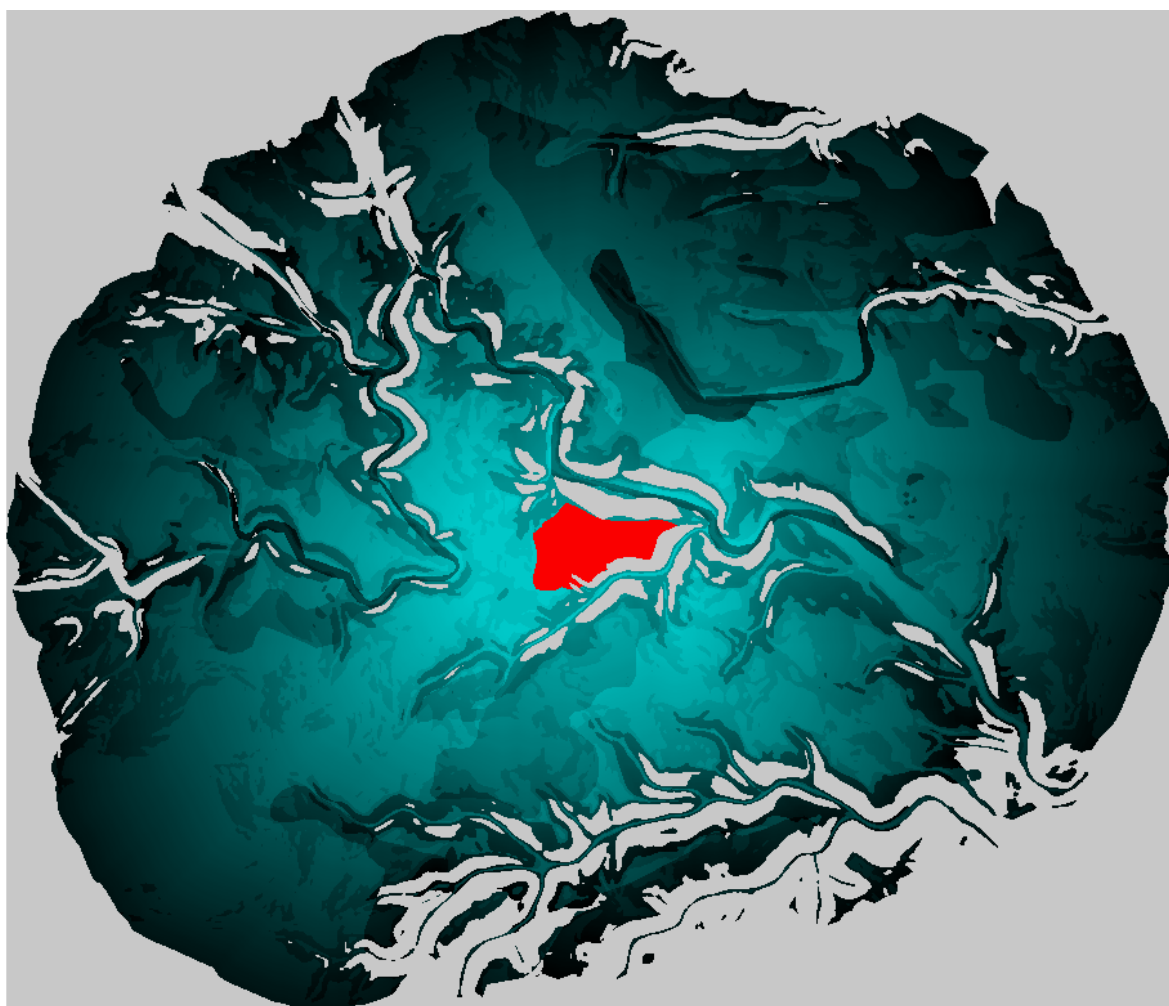
Tato vrstva, podobně jako předchozí, představuje vzdálenost od vodních toků. Informace o vzdálenosti od vody je důležitá pro pastvu s tím, že plochy, které jsou příliš vzdálené od vody, pro ni nejsou vhodné. Vzdálenost od vody také ovlivňuje další vrstvu, kterou je vlhkost půdy.



Obrázek 11: Vrstva mapy Distance from streams

- Cultivation suitability

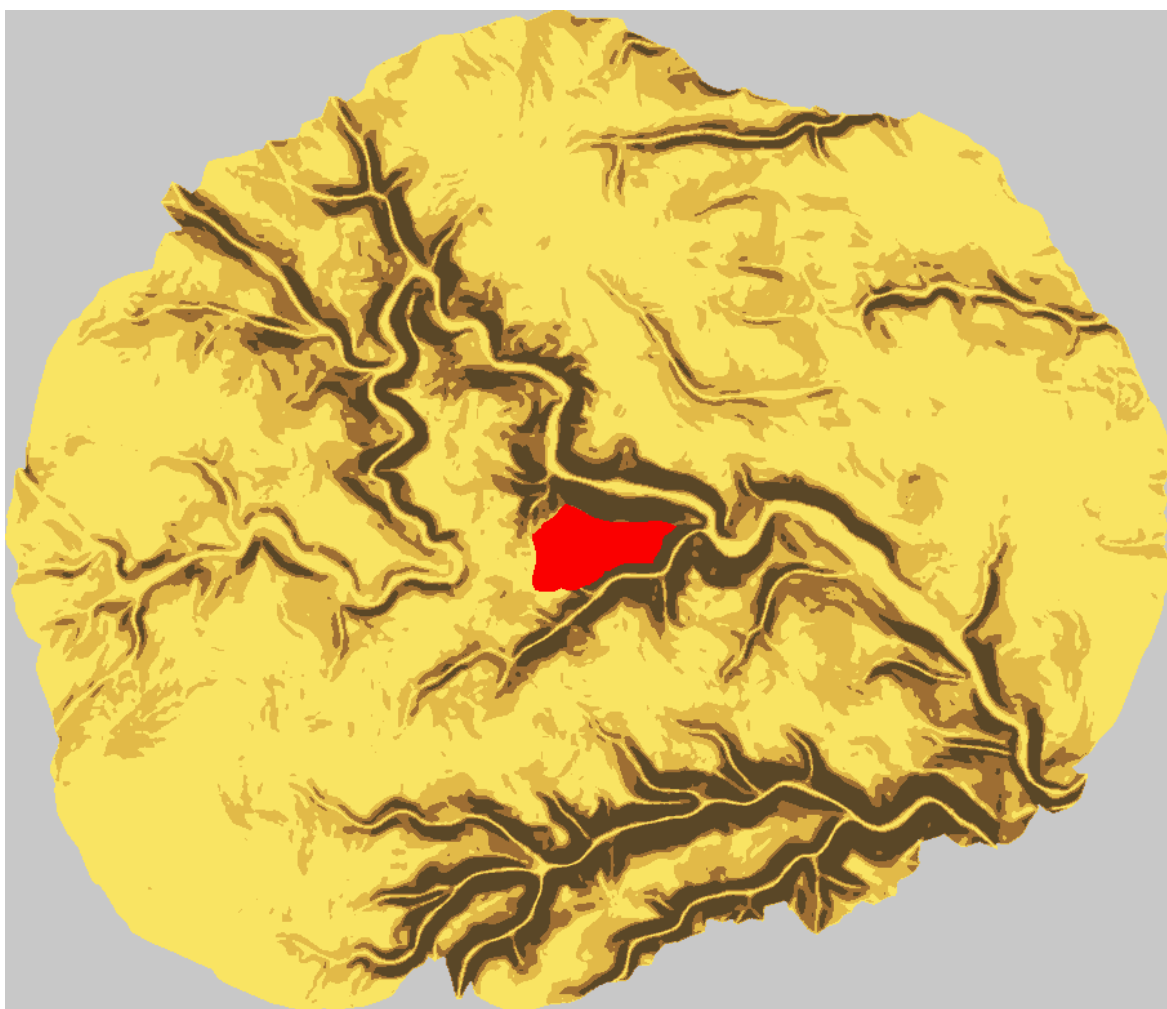
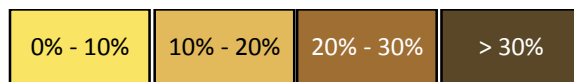
Vrstva byla vytvořena za účelem ohodnocení polí jakožto adepta na pěstování zemědělských plodin (obilí, luštěniny). V úvahu bereme několik parametrů. Je zřejmé, že existují limity svažitosti terénu pro zemědělskou činnost s tím, že je upřednostňován menší úhel před větším. Dále není možné pěstovat plodiny moc blízko vodním tokům z důvodu většího obsahu vody v půdě, možným záplavám, erozi a příliš měkkému podloží. Poslední parametrem je vzdálenost od oppida, umístění polí v blízkém okolí osady přináší výhody hlavně v úspoře času, který obyvatelé nemusí vynakládat na náročné cestování a následný transport surovin.



Obrázek 12: Vrstva mapy Cultivation suitability

- Slope

Svažitost nám rozděluje mapu podle sklonu jednotlivých buněk. Při přílišném sklonu není možné na buňce pást zvířata a sekat trávu na seno nebo pěstovat zemědělské plodiny.



Obrázek 13: Vrstva mapy Slope

- Wetness

Znázorňuje tendenci ploch zadržovat vodu (být vlhké). Tato vlastnost je důležitá hlavně pro pastvu a pěstování plodin. Dobytek na rozdíl od koní nesnese vlhké pastviny, proto má každé zvíře trochu odlišnou preferenci vlastností buněk. Tato preference je znázorněna ve vrstvě suitability.



- Woodland

Tato čistě informativní vrstva rozděluje mapu podle typů lesů. Jednotlivé typy se od sebe liší složením konkrétních druhů stromů a jejich zastoupením v konkrétním lese. Využití této vrstvy přichází až s komplexnějším modelem, ve kterém bude simulováno využití různého druhu dřeva pro různé účely (stavba, topení, nářadí atd.).



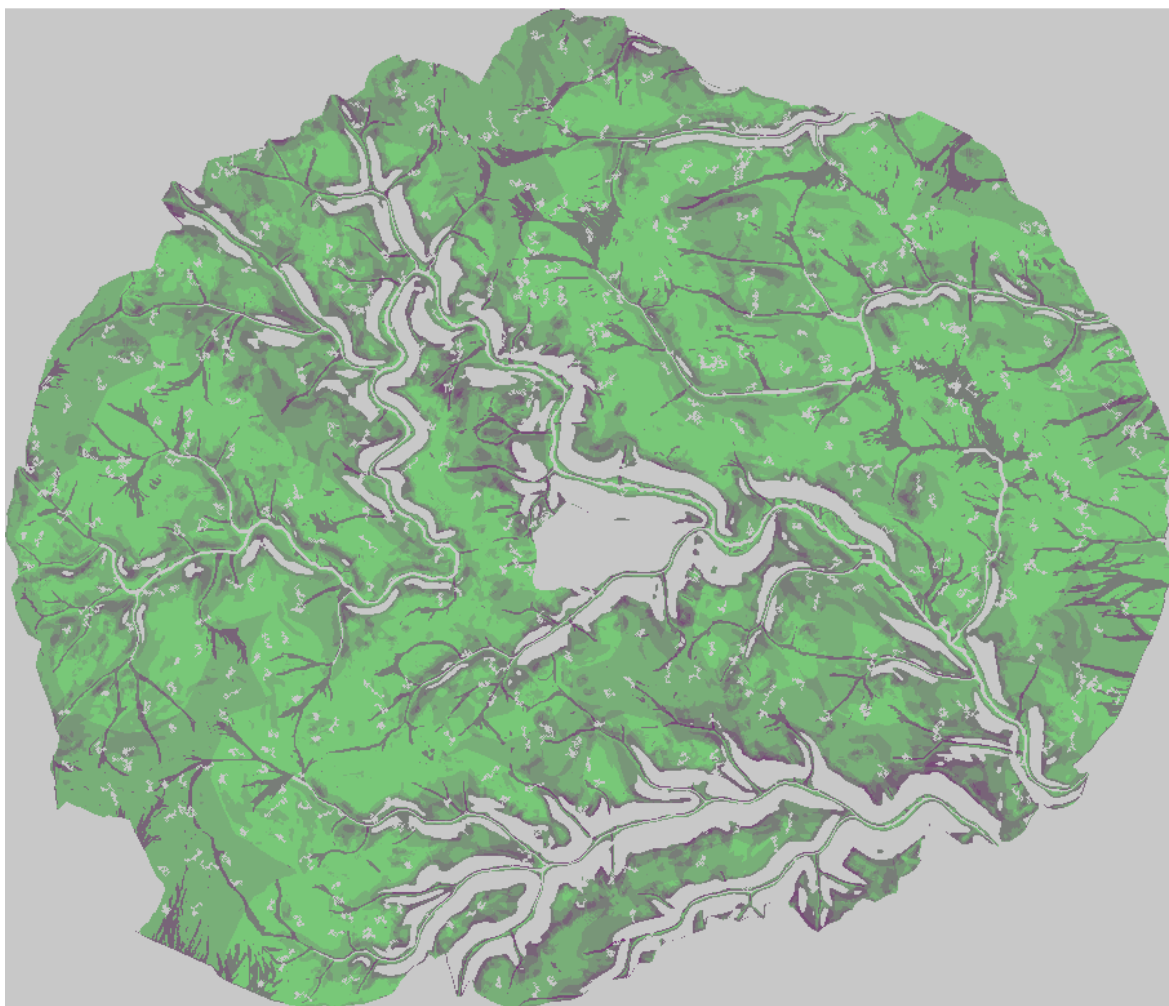
- Discovered

Vrstva discovered informuje o tom, zda již byla buňka při simulaci využita v některém z procesů. Využitím se myslí pastva nebo změna typu buňky. Na této vrstvě je tak znázorněno množství půdy, které je aktivně využíváno obyvateli osady.



- Pasture suitability

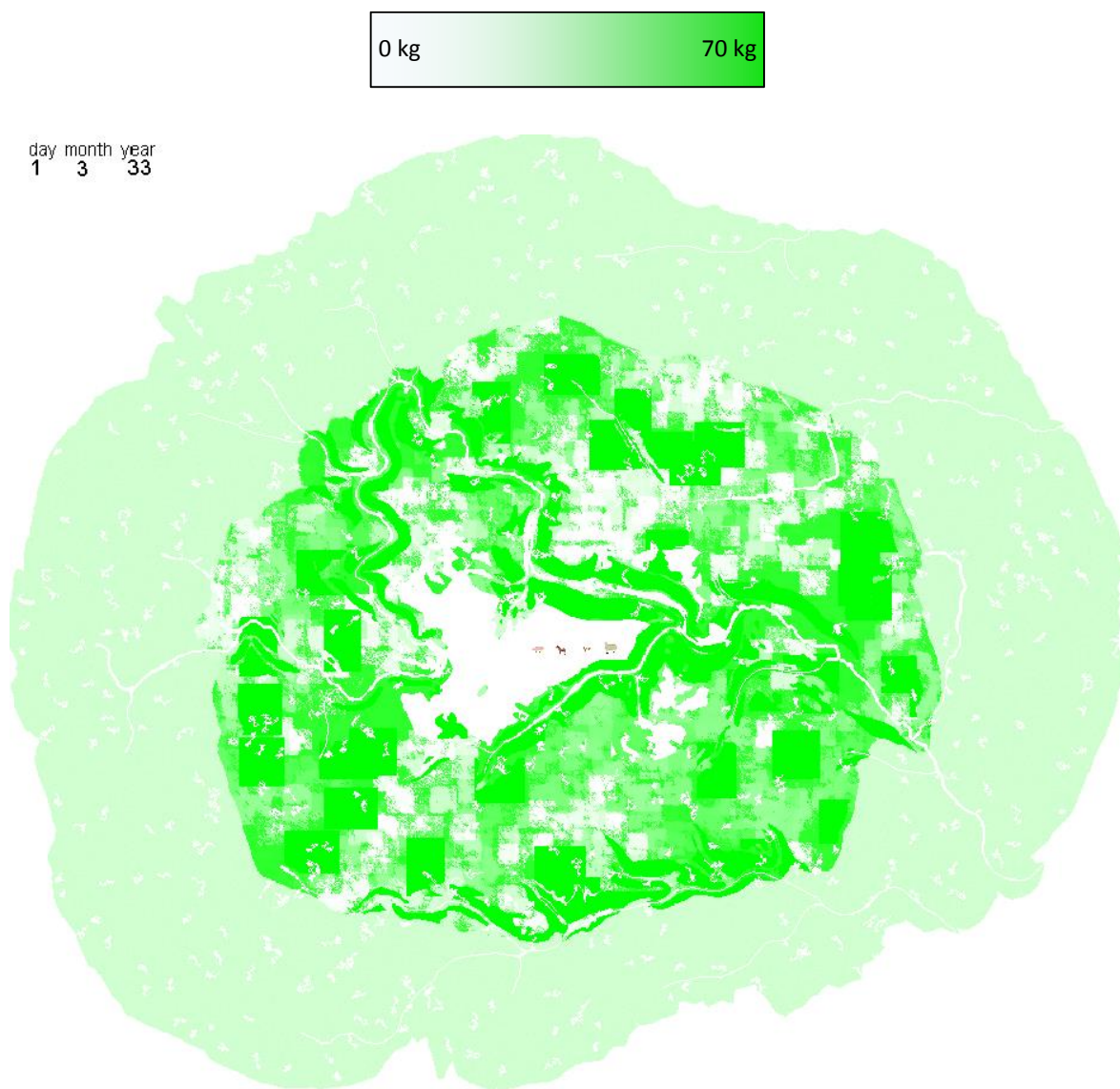
Vrstvy „pasture suitability” znázorňují vhodnost prostředí pro pastvu jednotlivých zvířat. Ač jsou si v mnohém podobné, tak každému zvířeti vyhovují lehce odlišné parametry polí. Samozřejmě je na mapě dostatek míst, která jsou vyhovující pro všechny druhy, ale najdou se také místa, kde se například mohou pást pouze koně z důvodů přílišné vlhkosti terénu. Všechny druhy preferují menší svažitost terénu před větší. Podstatná je také vzdálenost od vodních toků, kde je preferováno okolí řek před místy vzdálenými od vody.



Obrázek 14: Vrstva mapy Pasture suitability

- Grass

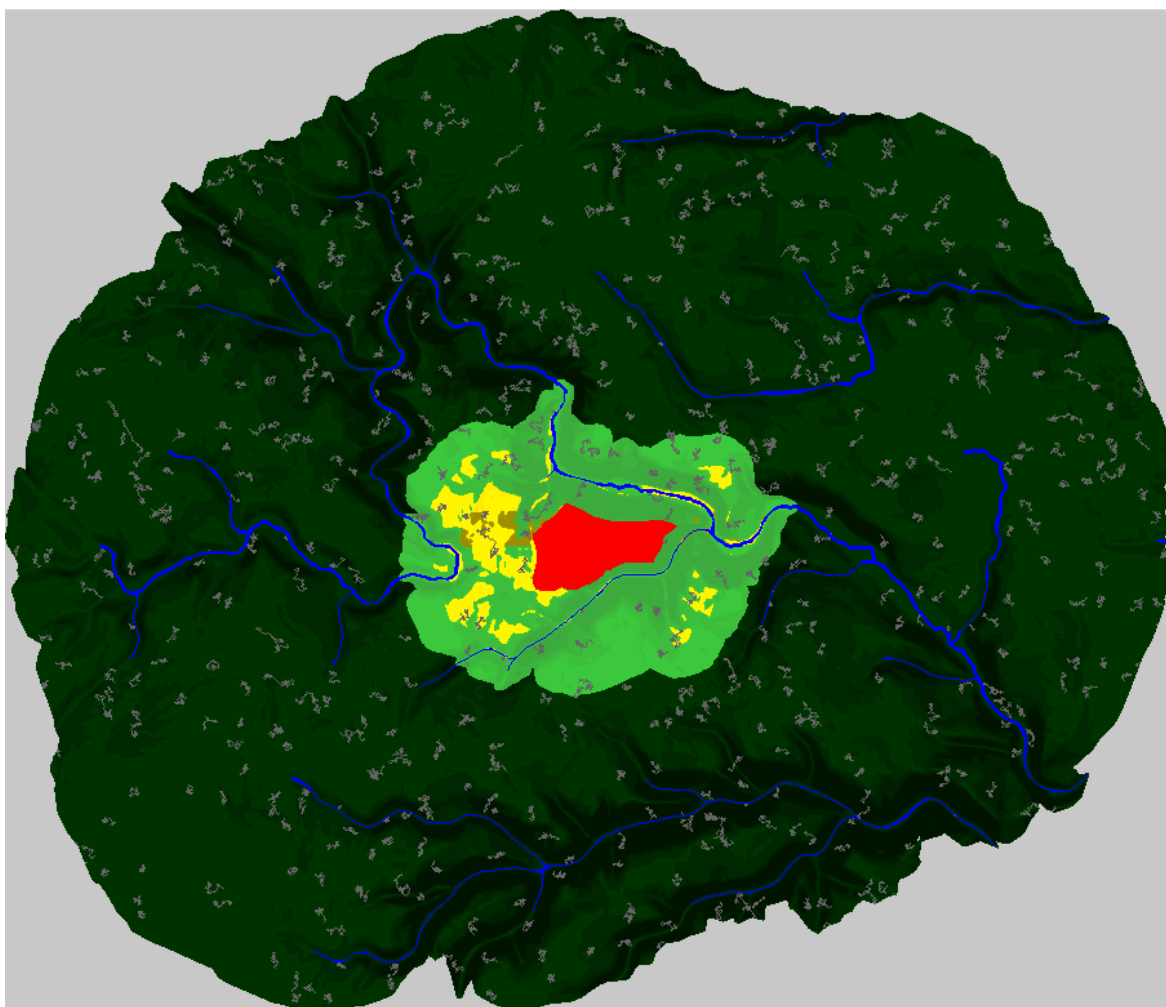
Vrstva grass slouží k zobrazení množství trávy v jednotlivých buňkách. V období pastvy se množství trávy mění každý den a díky této vrstvě je možné například sledovat, kolik úrodných pastvin má konkrétní stádo ve svém okolí.



Obrázek 15: Vrstva mapy Grass

- Overview

Díky vrstvě overview je k dispozici ucelený pohled na celé okolí oppida. Jedná se o sloučení všech předešlých vrstev do jedné. Záměrem bylo využít dostupné informace tak, aby mapa připomínala satelitní snímek nebo pohled z ptačí perspektivy.



Obrázek 16: Vrstva mapy Overview

6.3.5 Inicializace

Po vytvoření prostředí za pomoci dat ze souborů je nutné nastavit počáteční hodnoty všech atributů, pro které nejsou GIS podklady. Počáteční množství trávy závisí na konkrétním experimentu, který se provádí na podkladových datech. Typ buňky je na začátku zvolen podle počtu obyvatel a zvířat. Je vytvořeno tolik polí, aby úroda z nich pokryla potřebu

obyvatelstva a stejně tak luk, které musí vystačit jak na pastvu, tak pro seno na období, kdy pastva není možná.

6.3.6 Vstupní data

Podklady pro vytvoření prostředí modelu byly vygenerovány do několika souborů. Každý soubor představuje jednu vrstvu mapy. Nástroj AnyLogic obsahuje modul pro práci s mapovými podklady GIS. Geologický informační systém je standardizovaný systém pro získávání, ukládání a analýzu geografických dat o naší planetě (Huisman, 2012). Geodata se skládají z jednotlivých geoobjektů. Geoobjekt obvykle nese dva druhy informací. Prostorové informace, v našem případě souřadnice nebo svažitost a neprostorové informace, které představují všechny ostatní atributy v něm obsažené. Geoobjekt v terminologii GIS je tedy buňka v našem modelu. AnyLogic ale bohužel nepodporuje konkrétní formát použitých GIS souborů. Bylo tedy zapotřebí vytvořit funkci, která ručně načte data ze souborů a připraví je do takové podoby, aby z nich bylo možné vygenerovat obraz v simulaci. Pro implementaci bylo zvoleno dvojrozměrné pole, protože logika identifikace buněk podle souřadnic na ose X a Y je jak u mřížky, tak u dvojrozměrného pole stejná.

6.4 Celkový model

Tři hlavní submodely byly představeny a nyní bude popsáno několik dílčích procesů, které mají vliv na celkový model. Jelikož popisované procesy už nejsou agentové modely, popis tedy nebude odpovídat protokolu ODD. Jak už bylo zmíněno v úvodu práce, tento model vychází z již hotového modelu vytvořeného v prostředí NetLogo a částečně v modelovacím nástroji pro systémovou dynamiku Stella (Olševičová, 2013), (Olševičová, 2015), (Machálek, 2012), (Danielisová, 2013), (Danielisová, 2015). Zadání obou modelů vychází ze stejného archeologického výzkumu, proto je mnoho procesů podobných. Díky využití modernějších komponent, které nabízí nástroj AnyLogic (Borshchev, 2013), má tento model některé procesy věrněji a detailněji zpracované. V následující tabulce bude stručné porovnání obou modelů.

	AnyLogic model	NetLogo model
časové jednotky	dny	roky
dynamická pastva	ano	ne
dorůstání trávy	denně/měsíčně/ročně	ročně
model populace lidí (statický)	ano	ano
model populace lidí (agentový)	ano	ne
model populace zvířat (statický)	ano	ano
model populace zvířat (agentový)	ano	ne

vrstvy mapy	ano	ano
události	ano	ano
pěstování zemědělských plodin	ano	ano
nákup obilí	ano	ano
prodej obilí	ne	ano
práce	ne	ano
vliv NO₂ na úrodu	ne	ano
přibližné trvání simulace	40 minut	3 minuty

Tabulka 7: Porovnání modelů

Čas

Primární časovou jednotkou v simulaci je jeden den. Pro účely našeho modelu je to rozumný kompromis mezi abstrakcí od reálného času a přesností, která je od modelu vyžadována. V případě volby menších jednotek jako jsou hodiny nebo minuty, bychom se nevyhnutelně museli potýkat s velkou náročností na výpočetní výkon, a to především v té části, kdy si každý agent hledá vhodné políčko pro pastvu. V našich podmínkách by nebylo možné dosáhnout relevantních výsledků v uspokojivém čase. Naopak při volbě měsíců nebo roků, bychom narazili na problém, kdy by nebylo možné pozorovat změny v prostředí, které jsou z velké většiny způsobovány právě každodenní aktivitou agentů. Den je proto dostatečně dlouhý časový úsek pro zachycení pastvy hospodářských zvířat a vlivu na prostředí, přičemž jsme schopni v relativně přijatelném čase simulaci dokončit.

Potrava

Jednou z pozorovaných vlastností v simulaci je schopnost osady vypěstovat dostatek obilí a chovem dobytka získat dostatečné množství masa a mléka pro potřeby všech obyvatel. Ideální rozložení stravy obyvatel oppida je následující: 75% obilí, 10% luštěniny, 5% maso, 5% mléko a posledních 5% (houby, lesní plody, ovoce atd.) není v modelu zahrnuto. Sklizeň obilí probíhá pravidelně jednou ročně. Po sklizni je obilí uschováno v sýpkách, kde se skladuje až 3 roky. Část předem definované úrody je zapotřebí vyčlenit pro opětovné osetí polí a jiná, taktéž předem definovaná část obilí, je každoročně znehodnocena (plíseň, hlodavci atd.).

Pro aktuální spotřebu se využívá nejstarší, tedy tříleté obilí. V případě nedostatečných zásob je samozřejmě nutností uchýlit se k využití obilí mladšího. Semena pro novou setbu jsou brána z nejmladší (letošní) úrody. Vždy je tedy nutné vypěstovat více obilí, než kolik by bylo potřeba k pokrytí potřeby obyvatel oppida. Je také nutné zohlednit fakt, že po několika

letech skladování bude množství lidí mírně odlišné, než v roce, kdy bylo obilí sklizeno. Proto je v modelu možnost nastavení rezerv, které jsou zohledněny při výpočtu množství polí. Nicméně příliš mnoho obilí by znamenalo, že pole zabírají zbytečně velkou plochu a také práce související se zemědělstvím by byla vynakládána neefektivně. Stejná pravidla v modelu platí pro pěstování luštěnin. Plocha polí pro osetí F je tedy každoročně aktualizována podle následujícího vzorce (Danielisová, 2014):

$$F = \frac{TC \times pCD}{exY \times 3440} \times (1 + r) + \left(\frac{lA \times SR}{exY} \right)$$

(TC – celková potřeba obyvatelstva (kcal), exY – očekávaný výnos z ha (kcal), pCD – poměr rostlinné složky ve stravě, r – rezervy, lA – poslední aktuální rozloha polí (intenzivní nebo extenzivní strategie), SR – osivo)

Při extenzivní strategii zemědělství je nutné připočítat pole ležící ladem. Cyklus střídání polí ležících ladem trvá 4 roky. Tato strategie tak využívá čtyřikrát větší prostor než intenzivní strategie.

Jak již bylo řečeno, dalším důležitým zdrojem je živočišná potrava. Proces porážky zvířat probíhá jednou ročně. Aby mohlo být zvíře konkrétního druhu poraženo, je nutné dosáhnout daného minimálního počtu zvířat konkrétního druhu. Důvodem této podmínky je udržení rovnováhy mezi stavem zvířat a lidskou populací. Přesný počet poražených zvířat jednoho druhu S je vypočítán podle následujícího vzorce:

$$S = (rZ - (P \times tZ)) \times 0,9$$

(rZ – celkový počet zvířat konkrétního druhu, P – počet obyvatel osady, tZ – zvolený počet zvířat na jednoho obyvatele)

Mléko je posledním druhem potravy, který je v modelu zohledněn. Mléko získáváme pouze od krav a ovcí/koz. Proces dojení probíhá každý den a mléko je tak jedinou surovinou, která není doplňována ročně. U konkrétních zvířat je sledována doba laktace, po jejímž uplynutí dojení u zvířete již neprobíhá. Jelikož je vývoj zvířat zajišťován agentovým modelem, není možné přímo ovlivňovat množství získaného mléka.

Při simulaci může nastat situace, že v daný rok nebude dostatek určité potravy (obilí, luštěniny, maso, mléko). V reálném světě by byl tento nedostatek nahrazen zdroji, které jsou aktuálně k dispozici. Přesně tak to funguje i tomto modelu. Příkladem může být nedostatečné množství jateční zvířat. V tuto chvíli je tedy jasné, že nebude dostatek masa pro potřeby celé

populace. Pokud tedy tato situace nastane, je tzv. energetická mezera zaplněna zvýšeným přísunem obilí. Tento nedostatek samozřejmě nemusí vzniknout jen v případě masa. Obilí v tomto modelu slouží jako kritická potravina, která slouží i jako náhrada za všechny ostatní. V případě, že dojdou všechny zásoby obilí, může simulace postupovat podle dvou scénářů. V prvním případě je simulace ukončena, protože osada by v takové situaci nemohla z očividných důvodů dále existovat. V druhém případě je simulován obchodní styk s jinou osadou nebo osadami a je „dokoupena“ taková zásoba obilí, aby pokryla potřebu obyvatel až do další sklizně.

Odlesňování

V modelu mohou nastat dvě situace, při kterých je nutné přeměnit jistou část lesa na dále využitelnou půdu. Prvním je potřeba dřeva, které se v osadě využívalo pro různé účely. Těmi hlavními jsou stavební materiál a topivo. Druhým důvodem je rozšiřování pastvin (ve vzácných případech polí) pro časem rostoucí zvířecí populaci. Podmínky pro rozšíření pastvin jsou takové, že pokud klesne množství celkové trávy na všech pastvinách pod zadanou mez (ideální způsob je procentuální minimum) znamená to, že další období by mohla zvířata mít problém s nedostatkem potravy na pastvinách. Velikost nových pastvin je zvolena tak, aby celková plocha vystačila všem zvířatům, která v následujícím období půjdou na pastvu. Analogicky k tomu se rozšiřují i louky určené pro seno.

Události

Události jsou specifickým procesem, díky kterému může autor experimentu přímo ovlivnit některé veličiny v simulaci. Příkladem možných scénářů může být například válka, při které muselo náhle určité množství mužů opustit osadu. Dále pak požár, který zničil veškeré zásoby luštěnin, epidemie, která zahubila všechny staré lidi a novorozeňata, útok smečky divokých psů, při kterém bylo zabito několik zvířat. Autor při vytváření události zvolí rok, ve kterém bude událost spuštěna a dále už jen dopad na vybrané hodnoty. Autor může ovlivnit následující entity: všechny věkové skupiny lidí; zvířata podle druhu; zásoby potravin (obilí, luštěniny, maso, mléko). Autor vkládá procentuální množství úbytku vybrané veličiny. V každém roce může být zkombinováno libovolné množství entit. Události jsou užitečné v případě, že archeologický výzkum potvrdí existenci nějakého vnějšího zásahu do chodu osady a alespoň přibližně identifikuje dopady, které s sebou přinesl.

Parametry

V následující tabulce je k dispozici seznam hlavních parametrů modelu a jejich možnosti nastavení. Sekundární vstupní hodnoty jako GIS podklady, úmrtnostní tabulky nebo hodnoty související se zvířaty jsou uvedeny přímo v modelu.

Parameters	default value	min value	max value
Cows per person	0,4	0	X
Oxen per person	0,15	0	X
Calves per person	0,4	0	X
Horses per person	0,15	0	X
Pigs per person	0,45	0	X
Sheep/goats per person	0,2	0	X
Forest Pasture	0%	0%	100%
Agriculture strategy	int	int	ext
Market	off	on	off
Grain reserves	10%	0%	100%
Population type	dynamic	static	dynamic
Livestock type	dynamic	static	dynamic
Grass regrow period	day	day	year

Tabulka 8: Parametry modelu

7 Experimenty

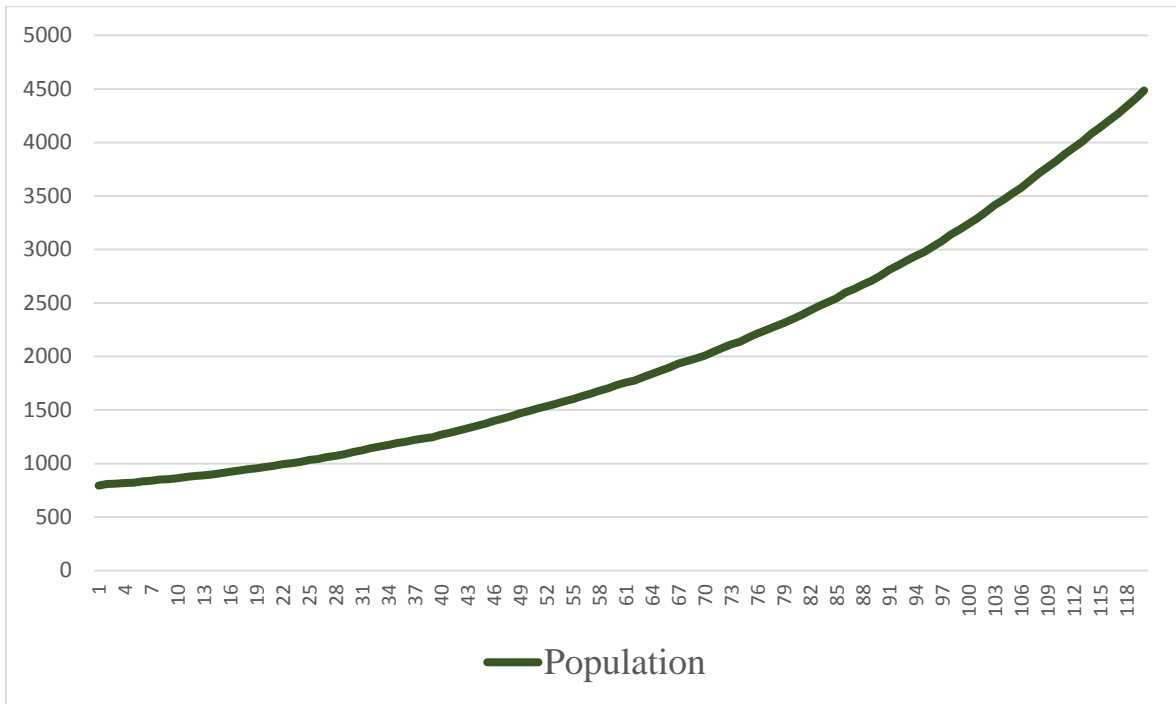
Následující experimenty představují několik z mnoha možností využití modelu v archeologickém výzkumu. Mnohé nastavení a hodnoty použité v simulaci vycházejí z předešlých výzkumů prováděných v souvislosti s keltským oppidem Steré Hradisko v době laténské (Čižmář, 2008). Nicméně síla modelu spočívá v nezávislosti na těchto vstupních datech. V případě důkladné výměny všech vstupních dat (GIS podklady, atributy zvířata, hodnoty související s vývojem lidské populace atd.) by bylo možné tento model využít pro potřeby jiného archeologického výzkumu. Samozřejmě by musela být dodržena základní myšlenka modelu, ale i tak by bylo snadné použít mapové podklady např. z jiné keltské osady z přibližně stejného období a pomocí experimentů sledovat rozdíl v možném vývoji těchto dvou osad.

7.1 Experiment 1

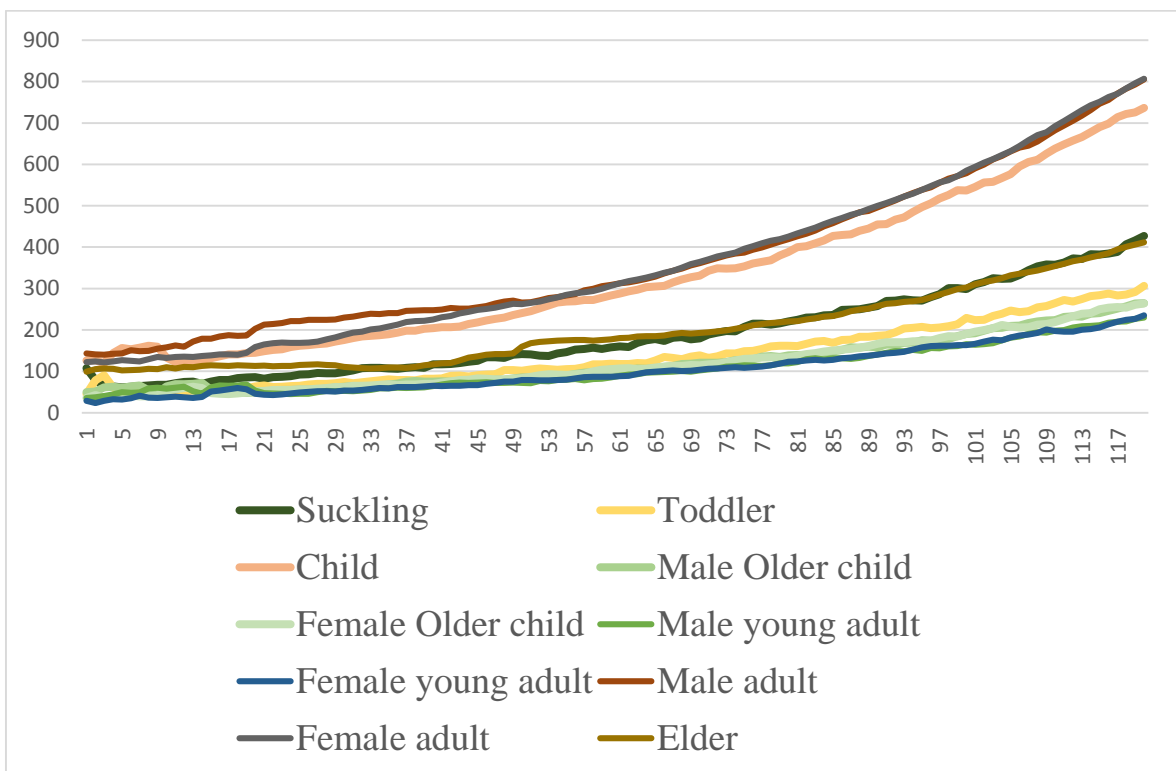
Tento experiment je zaměřen na simulaci populace. Bylo provedeno více než 40 simulací proto, aby byl minimalizován vliv náhodnosti. Při analýze dat byl pak z naměřených hodnot vypočítán aritmetický průměr a ten byl následně využit při sestavování grafů.

V prvním grafu je vidět průběh celkové populace po dobu 120 let. Při simulaci delší než je stanovených 120 let se předpokládá, že by průběh velikosti populace odpovídal průběhu exponenciální funkce (viz 6.1.1).

V druhém grafu je pak ta samá populace rozdělena do věkových kohort popsaných v ODD populace. Z grafu je zřejmé, že stejné věkové skupiny, ač opačného pohlaví, mají velmi podobný průběh. To je dáno tím, že pro obě pohlaví je použita stejná úmrtnostní tabulka. Při větším počtu opakování simulace by se tedy rozdíl mezi těmito průběhy měl neustále zmenšovat.



Graf 1: Průběh vývoje populace



Graf 2: Struktura populace

Je důležité podotknout, že toto je průběh populace při ideálních podmínkách, kterých v reálném životě není možné dosáhnout. Rozšiřující verzí tohoto experimentu by bylo využití událostí (viz 6.4), s jejichž pomocí by bylo možné simulovat vliv války, nebo nemoci na vývoj populace. Stejný průběh vývoje populace je nadále využit i v ostatních experimentech.

7.2 Experiment 2

Účelem druhého experimentu je nalezení nejefektivnější kombinace nastavení parametrů souvisejících s pastvou. Experiment je specifický tím, že pro jeho účely byl celkový model oproštěn od veškerých náhodných vlivů, které výhradně nesouvisí s pastvou a mohly by nechtěně ovlivnit výsledky experimentů. Prostředí tedy bylo upraveno s tím, že je k dispozici přesný počet buněk, které jsou při inicializaci totožné. Nedochozí tedy k zohlednění žádných vlastností původní mapy (svažitost, vlhkost, vzdálenost od oppida atd.). Tento experiment je spíše testovacího charakteru, proto je z modelu vypuštěno mnoho faktorů, které by jinak pastvu ovlivnily. Je tím také zajištěno, že každý agent bude mít naprosto stejné podmínky pro pastvu. V případě, že by byla použita reálná mapa, je pravděpodobné, že některá stáda by mohla být na výhodnějších místech než jiná. Dalo by se říci, že byla vytvořena aréna pro výhradní testování vlivu nastavení parametrů pastvy na výsledné hodnoty. Následné regresní modely byly vypracovány za účelem zkoumání vztahů vstupních parametrů jako nezávislých proměnných a výsledných veličin, jakožto závislých proměnných. Cílem experimentu není pouze nalezení nejefektivnější kombinace vstupních parametrů, ale také zjištění skutečnosti, které parametry mají vliv na funkci algoritmu pro pastvu a které naopak nejsou podstatné.

Pozadí tohoto experimentu není ryze archeologické. Takto upravený model by byl vhodný spíše na výzkum samotné pastvy nezávisle na historickém období. Důvodem jeho vytvoření byla potřeba nalezení vhodných parametrů pro zvýšení výkonu algoritmu pro pastvu.

Efektivnost nastavení je posuzována podle výsledných hodnot těchto proměnných:

- Time – doba trvání průběhu jedné simulace v milisekundách. Tato hodnota s pastvou přímo nesouvisí. Příliš dlouhá doba běhu simulace může naznačovat neefektivnost algoritmu při jistých podmínkách.
- Starving – rozdíl mezi množstvím trávy, které bylo za simulaci spaseno a množstvím, které by bylo spaseno v ideálním případě. Čím větší je tento rozdíl, tím menší byla efektivita pastvy.

- Grass left – množství trávy na mapě, které na konci simulace zůstalo nespaseno. Tato hodnota nepřímo souvisí s hladováním, takže velké množství nespasené trávy značí, že i přes to, že agenti měli k dispozici dostatek potravy, algoritmus pasení v kombinaci s konkrétními parametry zabraňoval využití dostupných zdrojů.
- Near shift – celkové množství přesunů všech stád na přilehlé pastviny.
- Far shift – celkové množství přesunů všech stád na jiné části mapy.

Množství počátečních parametrů, které jsou v tomto upraveném modelu použity, je výrazně menší, než u celkového modelu. Je to dáno tím, že ostatní parametry nesouvisely výhradně s pastvou, ale s nějakým jiným procesem (zemědělství, populace, odlesňování atd.). Kombinace následujících parametrů jsou tedy využity jako vstupní hodnoty simulací.

- Pasture size – počet buněk, které budou k dispozici pro pastvu.
- Hunger ration – maximální povolený poměr mezi tím množstvím trávy, které bylo skutečně spaseno stádem za jeden den a množstvím trávy, které by mělo být spaseno v ideálních podmínkách.
- Hunger counter – maximální počet po sobě jdoucích dní, kdy stádo nenalezne dostatek potravy před tím, než je nutné se přesunout na jinou část mapy.
- Area size (cells) – plocha, na které se pase stádo. Hodnota označuje velikost strany čtverce, ve kterém je dovolen pohyb agentů.
- Herd size (agents) – maximální počet zvířat v jednom stádu.

V tabulce 8 je vidět nastavení vstupních parametrů simulace. Celkově je k dispozici 108 kombinací těchto parametrů a pro každou kombinaci bylo spuštěno 5 opakování simulace. Simulované časové období bylo 40 let. Jako testovací typ zvířete byla zvolena kráva, u které denní potřeba trávy činí 14 kg. Předpokládáme, že rozdíly u zbylých druhů zvířat budou pro účely celkového modelu nepodstatné. Vývoj populace krav byl nastaven na statický scénář, při kterém je počet krav v přesném poměru k aktuální velikosti lidské populace.

Díky změně parametru „pasture size“ jsme schopni simulovat dvě rozdílné situace, kde je v prvním případě dán agentům k dispozici menší prostor, než jaký by pro ně byl ideální a je tak testována účinnost algoritmu v podmínkách nedostatku potravy. V druhém případě je poskytnut dostatečný prostor pro všechny agenty a je tak testována účinnost algoritmu v případě dostatečného množství potravy.

Parameter	From	To	Step
Pasture size	20000	40000	20000
Hunger ratio	0,1	0,5	0,2
Hunger counter	3	4	1
Area size	10	50	20
Herd size	10	50	20

Tabulka 9: Nastavení parametrů, experiment 2

V následujících dvou tabulkách jsou k dispozici maximální a minimální hodnoty sledovaných proměnných a konkrétní nastavení vstupních parametrů, vedoucích k této hodnotě. Z důvodu neprůkaznosti těchto výsledků byl vytvořen lineární regresní model pro nalezení vztahů závislých proměnných. Regresní model je definován následujícím vztahem:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon,$$

Kde X_i jsou nezávislé proměnné, β_i jsou neznámé parametry, $i = 0, \dots, n$, a ε značí náhodnou chybu. Cílem modelu je nalézt statisticky významný vztah mezi nezávislými proměnnými, kterými jsou vstupní parametry modelu (area size, herd size etc.) a závislou proměnnou Y (starving, time a grass left).

Result	Value	Hunger ration	Hunger counter	Area size	Herd size
Minimal run time	444326	0,5	3	30	30
Maximal run time	751397	0,1	3	50	30
Minimal starving	7234611	0,5	4	50	10
Maximal starving	10012189	0,5	4	10	50
Minimal grass left	12067	0,1	4	50	10
Maximal grass left	387466	0,5	4	10	50

Tabulka 10: Výsledky pro 20000 buněk

Result	Value	Hunger ration	Hunger counter	Area size	Herd size
Minimal run time	323459	0,5	4	10	50
Maximal run time	699359	0,1	4	30	50
Minimal starving	1255654	0,1	3	50	10
Maximal starving	6699633	0,5	4	10	50
Minimal grass left	1779795	0,1	4	10	30
Maximal grass left	2052225	0,5	4	50	10

Tabulka 11: Výsledky pro 40000 buněk

Významnost parametru pro určení hodnoty závislé proměnné je znázorněna hvězdičkou (více hvězdiček znamená větší vliv). R^2 značí koeficient determinace, který udává podíl

rozptylu u hodnot závislé proměnné, které lze vysvětlit regresí. Zbylá část je dána chybou. Čím více se tedy tento koeficient blíží hodnotě 1, tím je model kvalitnější. P-value je testovací hodnota F-testu v lineárním regresním modelu. Hladina významnosti byla stanovena na 0,05. Model je považován za významný, pokud je p-value menší než hladina významnosti.

Z následující tabulky se dá vyčíst, že každý ze tří modelů prošel F-testem. Kvalita modelů starving a grass left je velice dobrá, vzhledem k tomu, že za úspěšný model se dá považovat ten, který přesáhl hodnotu 0,75-0,8 u koeficientu determinace. Naopak kvalita modelu time je velice slabá, rozptyl závislé proměnné je tedy z 85% dán chybou a jen z 15% vstupními parametry.

	Starving	Time	Grass left
Intercept	1,454E+07 ***	8,160E+05 ***	-1,778E+06 ***
Pasture size	-3,190E+02 ***	-2,899E+00 ***	9,027E+01 ***
Hunger ratio	2,165E+06 ***	-2,583E+05 ***	1,666E+05 ***
Hunger counter	2,455E+03	-1,556E+04	5,347E+02
Area size	-2,766E+04 ***	1,815E+01	-1,982E+02
Herd size	3,153E+04 ***	-8,416E+02 *	9,761E+01
R²	0,9557	0,1508	0,9936
p-value	< 2,2E-16	< 2,2E-16	< 2,2E-16

Tabulka 12: Lineární regresní model

Pro minimalizaci výstupní hodnoty Starving je nutné maximalizovat vstupní parametry Pasture size a Area a naopak minimalizovat Herd size, což je logický předpoklad, pro který by nebylo nutné vytvářet regresní model. Dále se dá vyčíst, že pro minimalizaci je také potřeba snížit parametr Hunger counter. Pro minimalizace hodnoty Grass left je analogicky nutné zmenšit celkový prostor pro pastvu Pasture size, nicméně tento parametr se v komplexním modelu vůbec nevyskytuje a pastviny jsou vytvářeny dynamicky podle potřeby zvířat.

Model Time nebyl shledán dostatečně kvalitním pro určení vztahů parametrů a závislé proměnné. Tato skutečnost naznačuje, že čas běhu simulace není ovlivněný variací vstupních parametrů. Informace o době běhu simulace byla získána pomocí reálného času běhu simulace. Tato hodnota tak může být ovlivněna dalšími procesy na úrovni operačního systému, které přistupují ke stejným zdrojům, které využívá AnyLogic pro své běhové prostředí.

7.3 Experiment 3

Třetí experiment bude prováděn na komplexnějším modelu osady. Účelem tohoto experimentu bude zkoumání udržitelnosti oppida při různých nastaveních vstupních parametrů. Pro začátek je tedy důležité si stanovit podmínky, za kterých není možné zaručit fungování osady a tedy ani není důvod pokračovat v simulaci. V následujícím seznamu budou tyto podmínky představeny společně se situací, při které mohou nastat.

- **Nedostatek prostoru** – Jak už bylo řečeno u popisu prostředí, mapa, která je pro model k dispozici, je prostorově omezená. Člověk poháněn svými potřebami tento prostor pomalu přetváří tím, jak využívá zdroje, které prostředí nabízí. Na úplném začátku simulace je celé okolí oppida pokryto pouze lesy, jejichž část v blízkosti oppida je při inicializaci transformována na louky, pastviny nebo pole. Jak postupuje čas, tak obyvatelé potřebují stále větší plochu ať už kvůli větší potřebě pěstování obilí a luštěnin, nebo kvůli chovu zvířat. Je ale zřejmé, že zásoby dřeva, které je jedním z nejdůležitějších surovin (palivo, stavební materiál, nářadí atd.) se tenčí z důvodu přeměny lesů na jiné plochy. První ukončovací podmínkou je tedy bod, ve kterém je vykácena poslední buňka, která představovala les.
- **Nedostatek potravy** – V modelu jsou simulovány tyto typy potravin: obilí, luštěniny, maso a mléko. Podle Danielisové (2015) má v potravě největší zastoupení složka obilnin a to 75% z celkového příjmu. Obilí je tedy nejdůležitější potravinou, která by v případě nedostatku nemohla být pravděpodobně nahrazena jinou potravinou. Model při zjištění, že došla jakákoliv jiná potravina než obilí, okamžitě zvýší spotřebu obilí tak, aby tento nedostatek byl plně nahrazen. Tento stav přetrvá až do doby, kdy jsou zásoby chybějící potraviny opět doplněny. V případě, že dojde obilí, se model řídí podle možnosti dokoupení této suroviny. Je-li povolena možnost obchodu, simulace bude pokračovat nadále se zásobou obilí, která vydrží do další sklizně. Není-li povolena, simulace bude ukončena kvůli nedostatku potravy pro obyvatele osady.
- **Nedostatek lesů pro lesní pastvu** – Tato situace může nastat jen v případě, že byla povolena lesní pastva skotu. V tomto případě se zvolené množství krav a telat pase

v lese namísto klasických travnatých pastvin. V lese jsou ale mnohem menší zásoby potravy, a proto je nutný větší prostor, než by byl potřebný na pastvinách. Lesní plochy s postupem simulace ubývá a krav naopak přibývá. Může tedy nastat okamžik, kdy krávy na lesní pastvě spotřebují veškeré zásoby potravy, a proto již nadále nebude lesní pastva možná. Tím opět končí simulace, jelikož není za současných podmínek možné pokračovat.

- Korektní dokončení – Model je nastaven tak, aby se ukončil při nasimulovaných 120 letech, což je délka sledovaného období v experimentu (Danielisová, 2015).

Pro využití takového experimentu ve skutečném výzkumu by bylo nutné provést rozsáhlou kalibraci všech dat, která slouží k nastavení modelu. Dále by bylo nutné stanovení hypotéz vzešlých z archeologických výzkumů a nadále zkoumat zda, a v jakých případech experiment tyto hypotézy potvrdí a v jakých je vyvrátí. Jelikož nebyla pro tento experiment stanovena žádná hypotéza, nebudou závěry z analýzy dat konfrontovány s daty získanými výzkumem.

V následující tabulce je vidět kombinace vstupních parametrů použitých v tomto experimentu. Dohromady je tedy 36 kombinací těchto parametrů s tím, že každá kombinace byla pro eliminaci náhodných extrémů provedena desetkrát. V ideálním případě by počet opakování byl mnohem vyšší, nicméně výpočetní náročnost (viz 8.2) toto znemožňuje. Tento experiment, ve kterém tedy proběhlo 360 simulací, trval několik dní na virtuálním PC s velmi vysokým výpočetním výkonem. Na klasickém PC by trval několikanásobně déle.

Parameter	From	To	Step
Agriculture strategy	intensive	extensive	
Forest pasture	0%	100%	50%
Grain reserves	15%	45%	15%
Market	on	off	

Tabulka 13: Nastavení parametrů, experiment 3

- Agriculture strategy – volba zemědělské strategie je detailněji popsána v kapitole 6.3.4. Pro intenzivní strategii byl zvolen výnos 2400 kg/ha, pro extenzivní pak 2100 kg/ha.
- Forest pasture – vyjadřuje procentuální množství krav, které se místo na pastvinách, budou pást v lesích.

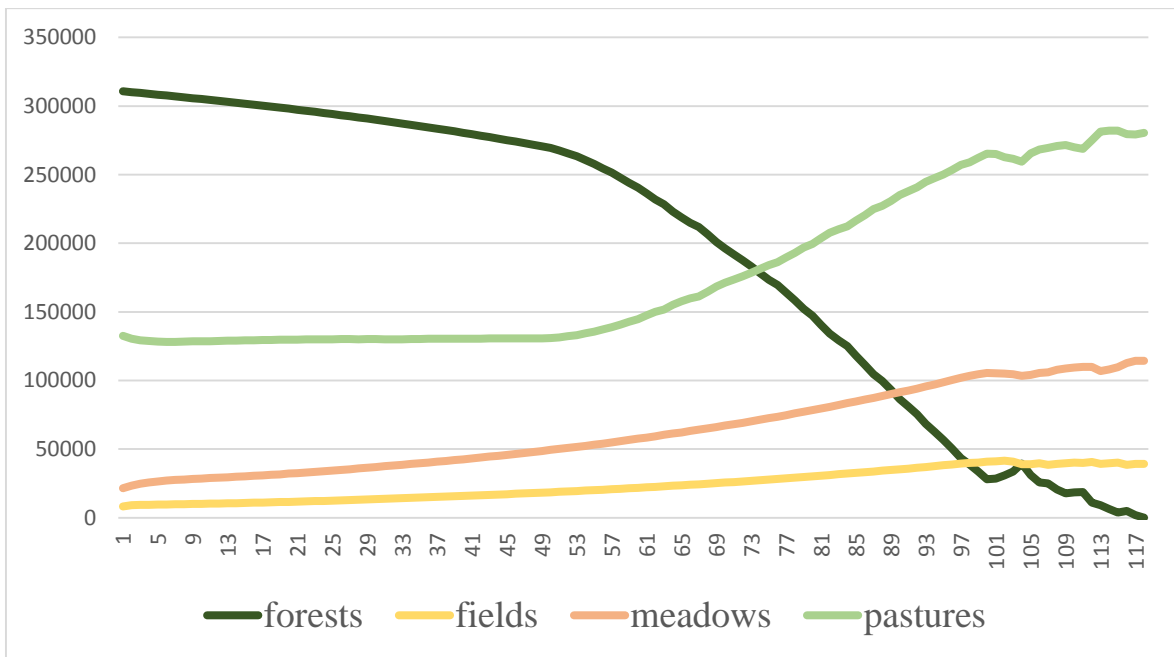
- Grain reserves – procentuální množství rezerv, které jsou připočítány k ideálnímu množství zemědělských plodin při výpočtu rozlohy nově osetých ploch.
- Market – možnost dokoupení obilí při jeho nedostatku.

Tabulka 14 obsahuje dílčí parametry pro každý druh zvířete (Neustupný, Dvořák, 1983). Změnou těchto parametrů lze snadno přidat nový druh zvířete do modelu.

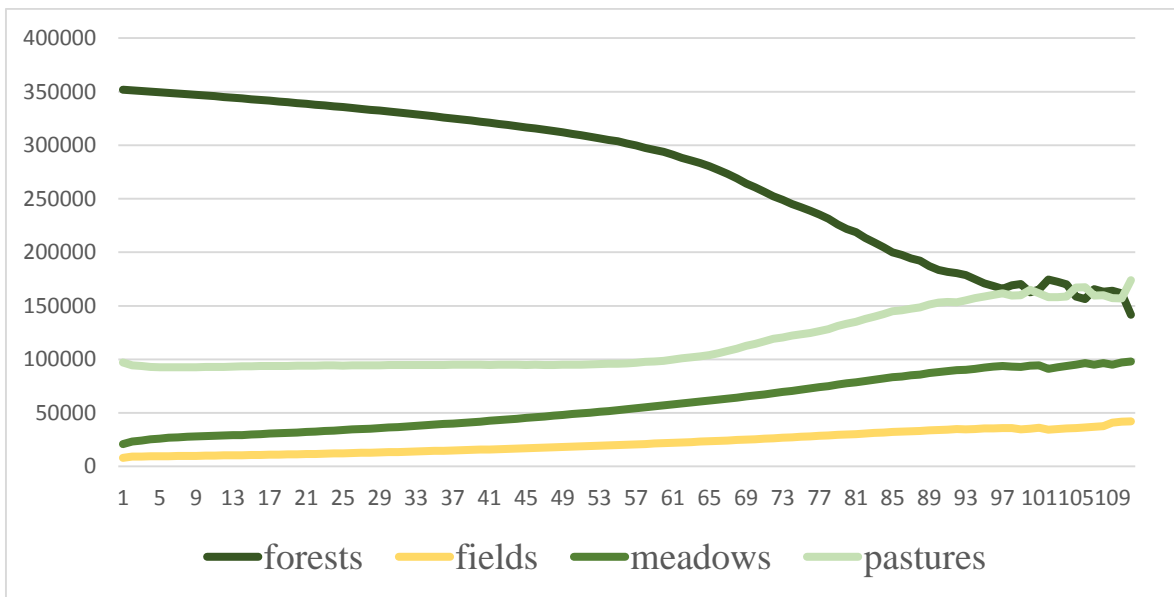
	Skot	Kůň	Prase	Ovce/Koza
Čerstvá tráva [kg/den]	14	35	X	2
Seno [kg/den]	1,2 - 8,25	6	X	1
Laktační období [dny]	200	X	X	150
Množství mléka [l/den]	1,8	X	X	0,26
Jatečné hmotnost [kg]	105 - 115	108 - 129	45 - 60	11 - 13
Energie z masa [kcal/kg]	1620	1457	2540	2000

Tabulka 14: Parametry zvířat

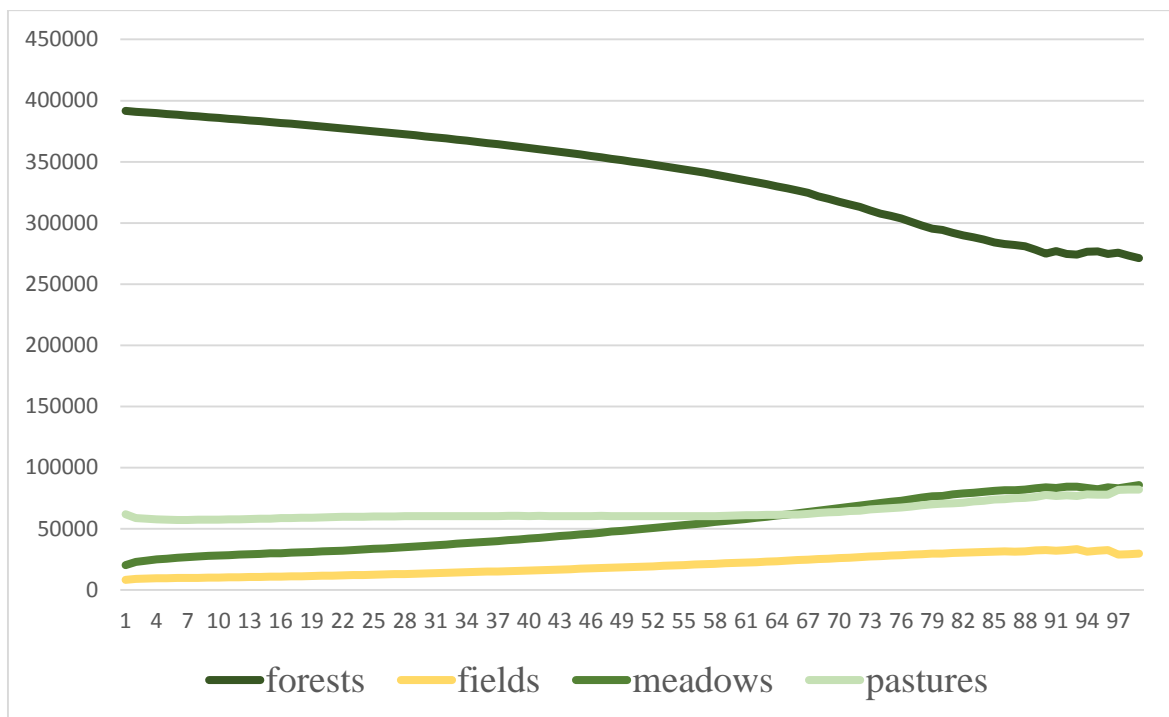
V následujících třech grafech bude znázorněno rozložení využití krajiny při třech možnostech lesní pastvy. Na ose Y je znázorněno množství buněk konkrétního typu využití půdy a na ose X pak roky v simulaci. Tyto grafy znázorňují data ze simulací, kde byla zvolena intenzivní zemědělská strategie, a proto nejsou znázorněna žádná pole ležící ladem. Na první pohled je vidět množství lesů, které je zachováno s tím, jak přibývá lesní pastvy. To je způsobeno tím, že část skotu se pase v lese namísto pastvin a tím pádem není nutné pastviny tak často rozšiřovat. Počet polí ve všech modelech zůstává stejný, jelikož parametry ovlivňující submodel populace zůstaly nezměněny, tím pádem se nezměnila ani potřeba zemědělských plodin. Nejpodstatnější informací, kterou lze z grafů vyčíst, je průměrná délka simulace. S každým zvýšením lesní pastvy byla průměrná doba trvání simulace snížena přibližně o 8 let. Z tohoto faktu by se dalo usuzovat, že při použitém nastavení modelu se lesní pastva projevuje negativně na celkové udržitelnosti osady. Ale ani u varianty bez lesní pastvy simulace ani v jednom případě nedosáhly na cílených 120 let.



Graf 3: Vývoj využití půdy (intenzivní, 0%)



Graf 4: Vývoj využití půdy (intenzivní, 50%)



Graf 5: Vývoj využití půdy (intenzivní, 100%)

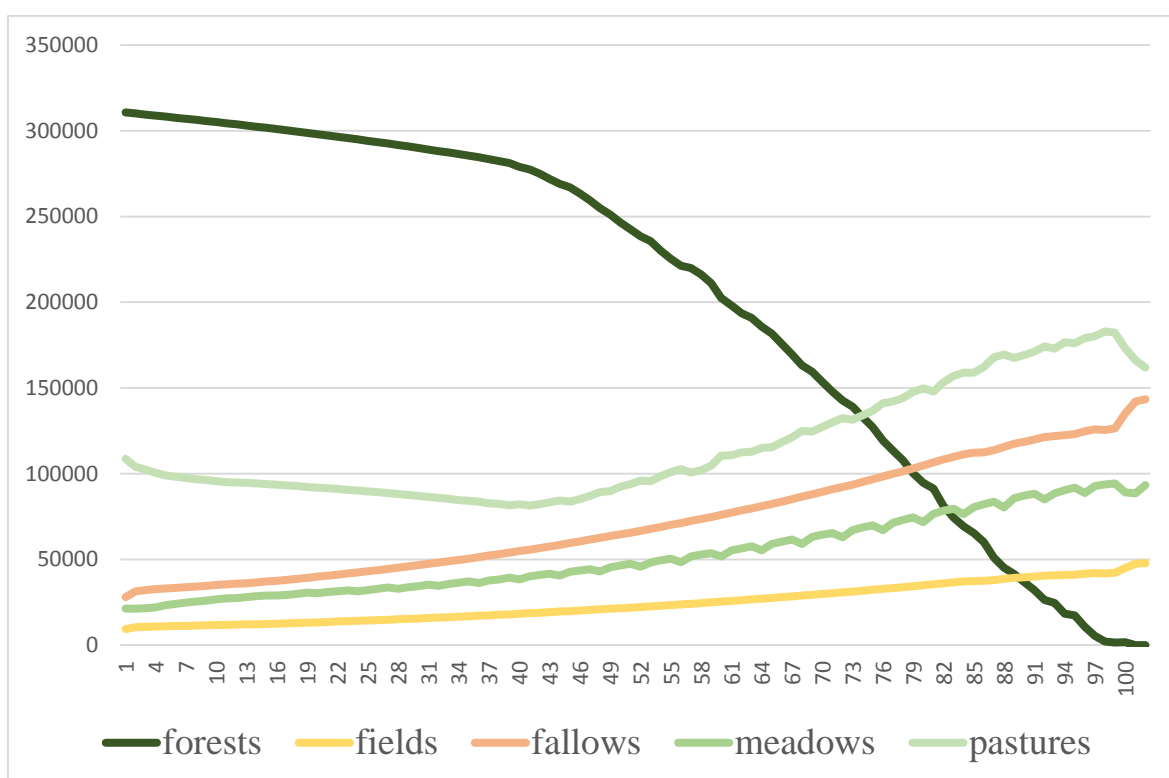
V následující tabulce je k dispozici přehled důvodů ukončení simulací. Zajímavým poznatkem je to, že lidé ani v jednom ze 180 případů netrpěli kritickým nedostatkem potravy. Dokonce i při povolení nákupu chybějícího obilí, nebyla tato možnost využita ani v jednom z případů. Dalo by se tedy říci, že rezervy zemědělských potravin o velikost 10% jsou naprosto dostačující. Toto samozřejmě platí v případě, kdy do systému nezasáhne nějaký neočekávaný vliv (viz 6.4). Už méně příjemným zjištěním je fakt, že ani v jednom případě simulace nedoběhla v pořádku do konce. Ve dvou třetinách případů tedy byla simulace ukončena z důvodů nedostatečného prostoru pro lesní pastvu a v jedné třetině případů to bylo kvůli využití celého prostoru mapy.

důvod ukončení	počet
Nedostatek lesů pro lesní pastvu	120
Nedostatek prostoru	60
Nedostatek potravy	0
Korektní dokončení	0

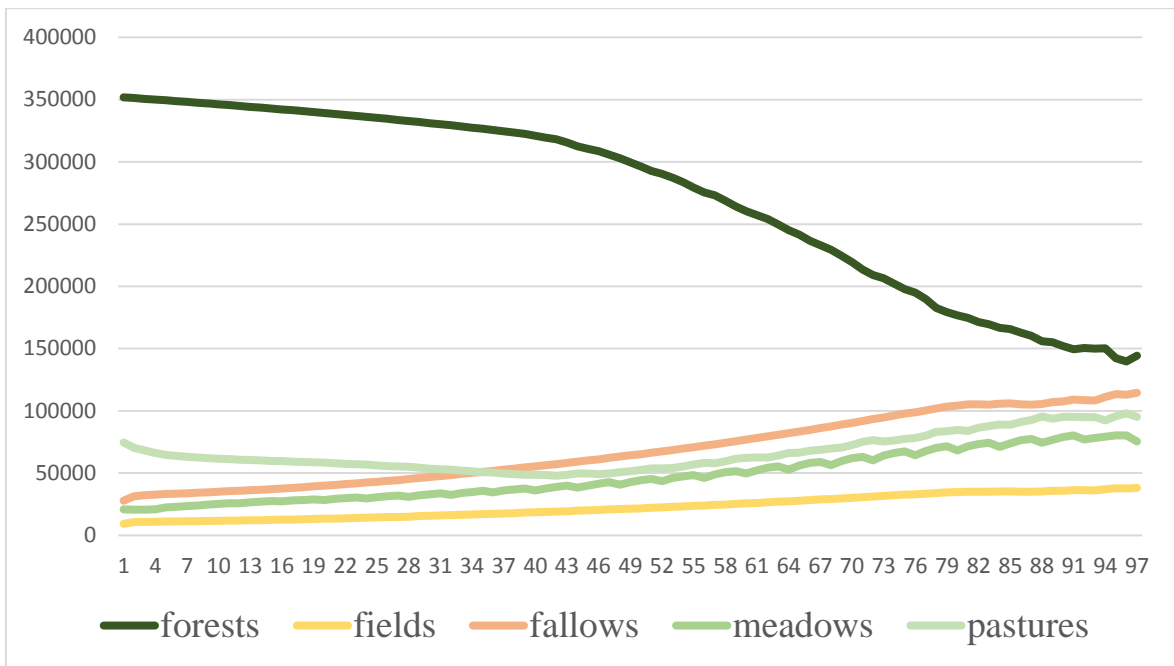
Tabulka 15: Důvody ukončení (intenzivní)

V druhé části jsou použity stejné postupy při vyhodnocování dat. Rozdíl v této polovině je ten, že byla zvolena extenzivní strategie zemědělství. Předpoklad je takový, že na místech, kde dříve mohly být pastviny, jsou nyní pole ležící ladem. I přes možnost pastvy na těchto

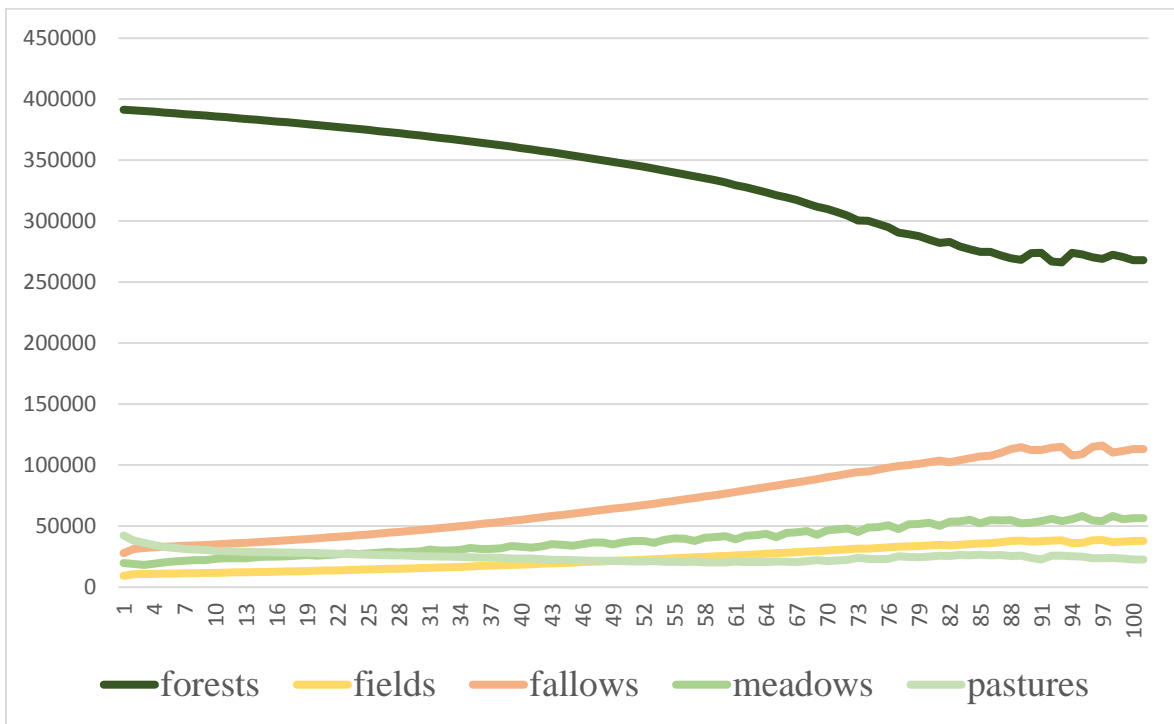
polích nepředstavují ani zdaleka tak bohatý zdroj potravy jako tomu je u pastvin. Tím pádem bude nutné častější odlesňování kvůli vytvoření nových prostor pro pastvu dobytka. Do grafu tak přibyla jedna proměnná a tou jsou právě pole ležící ladem, kterých by měl být vždy trojnásobek oproti osetým polím. V prvních dvou grafech je vidět zřejmý rozdíl v délce simulace. Oproti verzím s intenzivní strategií byly tyto kratší až o 17 let. Zajímavý výsledek byl zaznamenán v posledním z grafů. Díky tomu, že se všichni skot pásli v lesích, pole ležící ladem byla dostatečná pro zbytek zvířat, a proto nebylo nutné rozšiřovat pastviny v takové míře, jako tomu bylo při intenzivní strategii. V průměru tak bylo možné udržet chod osady o 3 roky déle.



Graf 6: Vývoj využití půdy (extenzivní, 0%)



Graf 7: Vývoj využití půdy (extenzivní, 50%)



Graf 8: Vývoj využití půdy (extenzivní, 100%)

Ani ve druhé polovině simulací se nepodařilo korektní ukončení. Výsledné hodnoty jsou stejné z toho důvodu, že v první třetině případů byla vypnuta možnost lesní pastvy, tudíž simulace nemohla skončit kvůli nedostatku prostoru pro lesní pastvu.

důvod ukončení	počet
Nedostatek lesů pro lesní pastvu	120
Nedostatek prostoru	60
Nedostatek potravy	0
Korektní dokončení	0

Tabulka 16: Důvody ukončení (extenzivní)

Na závěr jsou ve dvou tabulkách shrnuty průměrné stavy populací a průměrné počty roků při ukončení. Jako nejvhodnější se tedy ukázalo nastavení intenzivní zemědělské strategie a žádná lesní pastva. Při tomto scénáři bylo možné uživit přibližně 3 730 obyvatel osady. Naopak nejhůře v průměru dopadlo nastavení při plné lesní pastvě a extenzivní zemědělské strategii. Tento scénář dokázal uživit přibližně 2837 obyvatel.

Lesní pastva	Rok	Populace	Důvod
0%	101	3730	prostor
50%	94	3250	les
100%	85	2891	les
průměr	94	3297	

Tabulka 17: Populace při ukončení (intenzivní)

Lesní pastva	Rok	Populace	Důvod
0%	93	3256	prostor
50%	86	2925	les
100%	84	2839	les
průměr	88	3013	

Tabulka 18: Populace při ukončení (extenzivní)

8 Diskuse

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, při tvorbě každého modelu je nutné zvolit míru abstrakce, která rozhodne o přesnosti modelu vůči modelovanému systému. U archeologického výzkumu je abstrakce o to důležitější, že poznatky o modelovaném systému již nejsou k dispozici. Tento problém vychází z podstaty archeologie, která se snaží pospat systémy, které už stovky a někdy tisíce let neexistují. Skutečnosti je tedy zapotřebí získat archeologickým výzkumem, který se i přes nejlepší snahu nemůže rovnat možnosti prozkoumat systém tím, že ho budeme pozorovat. V této diskusi tedy bude poukázáno na nedostatky, které s sebou model nese a také na reálné možnosti jeho rozšíření do budoucna.

8.1 Rozšíření

Jedna z podstatných součástí projektu týkajícího se výzkumu oppida Staré Hradisko byla simulace prací nutných pro chod osady (Olševičová, 2015). Jedná se hlavně o práce související se zemědělstvím, domácí a hospodářské práce, odlesňování, sběr, lov atd. Každá z těchto prací je definována podle časové náročnosti, obtížnosti (těžké a lehké práce), dle období, kdy může být vykonávána a ostatních podmínek. Díky simulaci populace jsou k dispozici detailní informace o struktuře obyvatelstva, což je nutné při zjišťování nejdůležitějšího zdroje v tomto submodelu, kterým je lidská práce. Vytvoření tohoto submodelu prací by poskytovalo další informace o možnostech udržení životaschopnosti oppida.

Další subsystém, který úzce souvisí s problematikou prací, je počasí. I přes to, že získávání dat týkajících se počasí, je vzhledem k časovému odstupu složité, sebe jednodušší subsystém simulující počasí by mohl dodat reálnější pohled na plánování a provádění prací vzhledem k tomu, že práce často bývají na počasí přímo závislé (Olševičová, 2015).

NO₂ neboli oxid dusičitý je látka, která má významný vliv na zemědělskou činnost. Množství této látky v půdě kladně ovlivňuje výnosy u pěstování zemědělských plodin. Trus zemědělských zvířat byl využíván jako přírodní hnojivo a byl to tak jeden z důvodů, proč byla zvířatům umožněna pastva na polích ležících ladem, kam se tak bez dalšího přičinění dostalo toto hnojivo do půdy. V případě intenzivní strategie zemědělství bylo nutno provádět sběr trusu a hnojení polí ručně. Proto předpokládáme, že proces hnojení by měl významný vliv na model (Vanderpooten, 2012).

8.2 Nedostatky

Za jeden z nedostatků by se dal považovat algoritmus pastvy, který se sice snaží napodobit chování zvířat při pastvě, ale vytvoření přesného algoritmu by vyžadovalo specifický výzkum, který by dokázal toto chování zformalizovat. V dostupných zdrojích bylo nalezeno několik výzkumů (Strombom, 2014) zabývajících se podobnou problematikou, bohužel žádný z nich nebyl využitelný v podmínkách tohoto modelu z důvodů, které jsou popsány výše v kapitole 3.

Dalším nedostatkem je výpočetní náročnost celého modelu. Při experimentech na celkovém modelu trvala jedna simulace přibližně 30 – 50 minut podle nastavení parametrů. Konečné experimenty byly sice prováděny na extrémně výkonném PC, a sám AnyLogic podporuje více vláknové spuštění simulací, ale i tak musel být počet opakování redukován kvůli velké časové náročnosti (komplexnější experimenty trvají v řádech dnů). Toto chování je způsobeno hlavně velkým počtem buněk tvořících prostředí a nutností jejich častého procházení a změnami atributů. Další, výpočetně velmi náročnou, částí je algoritmus pastvy, který se provádí každý den u několika tisíc agentů.

K tomu, aby byl model k něčemu užitečný, je nutné provádět experimenty ve spolupráci s archeology, s tím, že to oni musí zvolit správné nastavení parametrů simulací, navrhnout úpravy a opravy modelu a v neposlední řadě interpretovat výsledky tak, jak to vyžaduje jejich výzkum. Je to zdlouhavý proces s nejistým výsledkem, protože se může stát, že některé, pro model kritické problémy, nebude možné z různých důvodů odstranit a vypovídací hodnota experimentů tak bude jen velmi malá.

9 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření agentového modelu keltského oppida Staré Hradisko. Model je zaměřen na testování udržitelnosti různých zemědělských strategií. Vytvořený model může dále sloužit jako pomůcka v archeologickém výzkumu této osady. Model není výhradně vázán pouze na tento jeden konkrétní výzkum. Při dodání potřebných dat je možné tento model aplikovat na různá místa v různých dobách, pokud budou dodrženy zákonitosti v logice modelu.

V první, teoretické, části práce byla krátce představena problematika modelování za pomoci informačních technologií se zaměřením na agentové modelování. Byly představeny oblasti, kde je ABM vhodným nástrojem pro podporu výzkumu. Jednou z nich byla archeologie, kde se tento přístup ukázal jako velmi vhodný. Toto tvrzení potvrzuje řada úspěšných výzkumů, které se zabývaly událostmi napříč celou historií (Heckbert, 2013), (Janssen, 2009), (Machálek, 2012). Krátce byl popsán také program AnyLogic, který byl vybrán jako modelovací nástroj pro vytvoření agentového modelu. Další část byla věnována důkladnému popisu modelu podle standardu ODD. Čtenář by po prostudování tohoto protokolu, měl být schopný chápat funkčnost jednotlivých modulů, ze kterých se celý model skládá. Poslední část práce se týkala experimentů, které byly zvoleny tak, aby pokryly co největší množství funkcionalit, které model nabízí.

Představené experimenty měly demonstrovat potenciální využití a schopnosti modelu v archeologickém výzkumu. Výsledky experimentů si nekladou za cíl odpovědět na konkrétní archeologické otázky, nýbrž demonstrovat možnosti modelu. V diskusi bylo nastíněno několik možných rozšíření modelu, které by zvýšily jeho vypovídací hodnotu. Cílů, stanovených pro tuto diplomovou práci, bylo úspěšně dosaženo. Model je v tuto chvíli možné použít pro dané archeologické účely.

Seznam použité literatury

1. Archeolog.cz. *Malé Hradisko, oppidum Staré Hradisko*. Archeolog.cz (on-line). 2015 (cit. 7.5.2015). Dostupné z:
URL:<http://www.archeolog.cz/lokalita/oppidum-stare-hradisko/39>
2. BORSHCHEV, A. *The big book of simulation modeling*. 2013. AnyLogic North America. ISBN 978-0-9895731-7-7
3. BOX, G. E. P., DRAPER, N. R. *Empirical Model Building and Response Surfaces*, New York: John Wiley & Sons, 1987, i. ISBN 978-0471810339
4. BURDECK, S. *Complexity and the Evolution of Computing Biological Principles for managing Evolving Systems*. Multicellular computing (on-line). 2004 (cit. 27.6.2015). Dostupné z:
URL:<http://www.evolutionofcomputing.org/Complexity%20and%20Evolution%20of%20Computing%20v2.pdf>
5. CORNING, PETER, A. *The re-emergence of „emergence“: A venerable concept in search of a theory*. Complexity (on-line). 2002 (cit. 27.6.2015). DOI: 10.1002/cplx.10043. Dostupné z:
URL:<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cplx.10043/pdf>
6. ČIŽMÁŘ, I. *Zázemí keltského oppida Staré Hradisko*. Brno, 2008. 142 s. Magisterská Diplomová práce. Masarykova univerzita. Bouzek, J.
7. DANIELISOVÁ, A. *Oppidum České Lhotice v kontextu svého sídelního zázemí*. Praha, 2008. Disertační práce. Univerzita Karlova, Filozofická fakulta.
8. DANIELISOVÁ, A., OLŠEVIČOVÁ, K. *Sociální simulace při zkoumání společnosti, ekonomiky a využívání krajiny v době želené: metody a příklady*. Památky archeologické, 2015.

9. DANIELISOVÁ, A., OLŠEVIČOVÁ, K., CIMLER, R., MACHÁLEK, T.
Understanding the Iron Age Economy: Sustainability of Agricultural Practices under Stable Population Growth. WURZER, G. Agent-based modeling and simulation in archaeology, 2013. ISBN 9783319000077

10. DORAN, J. E. *Prospects for agent-based modelling in archaeology*. University of Essex (on-line). 1999 (cit. 22.6.2015). Dostupné z:
[URL:http://soi.cnr.it/archcalc/indice/PDF10/10_03_Doran.pdf](http://soi.cnr.it/archcalc/indice/PDF10/10_03_Doran.pdf)

11. Encycopadedia Britannica Online. *Extensive agriculture* (On-line). 2015 (cit. 13.6.2015). Dostupné z:
[URL:http://www.britannica.com/topic/extensive-agriculture](http://www.britannica.com/topic/extensive-agriculture)

12. FORCHTSAM, V., PRCHAL, J. *Zemědělská výroba v kostce*. 1. vyd. Praha: SZN, 1960, 1127 s.

13. GILBERT, N., TROITZSCH, K. G. *Simulation for the social scientist*. Maidenhead: Open University Press, 2005, xi. ISBN 0335216005

14. GRIGORYEV, I. *AnyLogic 7 in three days: A Quick Course in Simulation Modeling*. 2015. ISBN 978-1507691366

15. GRIMM, V., BERGER, U. BASTIANSEN, F., ELIASSEN, S., GINOT, V., GISKE, J., GOSS-CUSTARD, J., GRAND, T., HEINZ, S. K., et al. *A standard protocol for describing individual-based and agent-based models*. Ecological Modelling (online). 2006 (cit. 9.6.2015). DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023.
Dostupné z: [URL:https://www.ufz.de/export/data/1/19520_ODD_Update.pdf](https://www.ufz.de/export/data/1/19520_ODD_Update.pdf)

16. GRIMM, V., BERGER, U., DEANGELIS, D. L., POLHILL, J. G., GISKE, J., RAILSBACK, S. F. *The ODD protocol: A review and first update*. Ecological Modelling (on-line). 2010 (cit. 8.6.2015). DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019.
Dostupné z: [URL:http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-77957301158&origin=inward&txGid=B004F4589A2855C9C6869983FE4F8F62.FZg2ODcJC9ArCe8WOZPvA%3a2](http://www.scopus.com/record/display.url?eid=2-s2.0-77957301158&origin=inward&txGid=B004F4589A2855C9C6869983FE4F8F62.FZg2ODcJC9ArCe8WOZPvA%3a2)

17. HECKBERT, S. *MayaSim: An agent-based model of the ancient Maya social-ecological system*. CoMSES Computational Model Library (on-line). 2013 (cit. 12.7.2015). Dostupné z: [URL:http://hdl.handle.net/2286.0/oabm:3063](http://hdl.handle.net/2286.0/oabm:3063)
18. HOLLAND, J. H. *Emergence: from chaos to order*. Oxford: Oxford University Press, 1998, xiii. ISBN 978-0-19-286211-2
19. HUISMAN, H., ROLF, A. *Principles of Geographic Information Systems*. The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (on-line). 2012 (cit. 25.7.2015). Dostupné z: [URL:http://www.itc.nl/library/papers_2009/general/PrinciplesGIS.pdf](http://www.itc.nl/library/papers_2009/general/PrinciplesGIS.pdf)
20. HUSÁKOVÁ, M. *Agentově orientované modelování a simulace*. Fakulta informatiky a managementu UHK (on-line). 2014 (cit. 6.6.2015). Dostupné z: [URL:http://lide.uhk.cz/fim/ucitel/fshusam2/lekarnicky/zt3/zt3_dokumenty/AgentModelSimul.pdf](http://lide.uhk.cz/fim/ucitel/fshusam2/lekarnicky/zt3/zt3_dokumenty/AgentModelSimul.pdf)
21. JANSSEN, M. A. *Understanding Artificial Anasazi*. Journal of Artificial Societies and Social Simulation (online). 2009 (cit. 2.6.2015). Dostupné z: [URL:http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/13.html](http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/13.html)
22. KLIR, J. G., WIERMAN, J. M. *Uncertainty-based information: elements of generalized information theory*. Heidelberg: Physica-Verlag, 1998, xvi. ISBN 3790810738
23. KOWARIK, K. *Agents in Archaeology - Agent Based Modelling (ABM) in Archaeological Research*. Naturhistorisches Museum Wien (on-line). 2012 (cit. 19.6.2015). Dostupné z: [URL:http://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/537514019.pdf](http://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/537514019.pdf)

24. KUBÍK, A. *Intelligentní agenty*. Brno: Computer Press, a. s., 2004. ISBN 80-251-0323-4
25. LAW, AVERILL M., *Simulation modeling and analysis*. McGraw-Hill Education, 2014, v. ISBN 978-0073401324
26. MACHÁLEK, T., OLŠEVIČOVÁ, K., CIMLER, R. *Modelling Population Dynamics for Archaeological Simulations*. Proc. of 30th International Conference on Mathematical Methods in Economics (on-line). 2012 (cit. 16.6.2015). Dostupné z: [URL:http://mme2012.opf.slu.cz/proceedings/pdf/092_Machalek.pdf](http://mme2012.opf.slu.cz/proceedings/pdf/092_Machalek.pdf)
27. NEUSTUPNÝ, E., DVOŘÁK, Z. *Výživa pravěkých zemědělců: model (Nutrition of prehistoric farmers: a model)*. Památky archeologické 74, 1983, 224-257
28. NORVIG, P., RUSSELL, S. J. *Artificial intelligence: a modern approach*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995, xxviii. ISBN 0131038052
29. OLŠEVIČOVÁ, K., CIMLER, R. *Agent-based model of carrying capacity of Celtic settlement agglomeration*. Global Journal on Technology (on-line). 2013 (cit. 12.5.2015). Dostupné z: [URL:http://www.world-education-center.org/index.php/P-ITCS/article/view/1862/1650](http://www.world-education-center.org/index.php/P-ITCS/article/view/1862/1650)
30. OLŠEVIČOVÁ, K., DANIELISOVÁ, A. *Workforce allocation in self-sufficient economy in late iron age*. Hradec Králové: Gaudeamus, 2015. ISBN 978-80-7435-550-9
31. OLŠEVIČOVÁ, K., PROCHÁZKA, J., DANIELISOVÁ, A. *Reconstruction of Prehistoric Settlement Network Using Agent-Based Model in NetLogo. Highlights of Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Sustainability - The PAAMS Collection*. Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-19033-4

32. REYNOLDS, C., FLOCKS, W. *Herds and schools: A distributed behavioral model*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics (on-line). 1987 (cit. 3.7.2015). Dostupné z: [URL: http://www.cs.toronto.edu/~dt/siggraph97-course/cwr87/](http://www.cs.toronto.edu/~dt/siggraph97-course/cwr87/)
33. SHOHAM, Y. *Agent-oriented programming*. Stanford, Calif. : Stanford University (on-line). 1990 (cit. 26.7.2015). Dostupné z: [URL:http://robotics.cs.tamu.edu/dshell/cs631/papers/shoham93agent.pdf](http://robotics.cs.tamu.edu/dshell/cs631/papers/shoham93agent.pdf)
34. SMITH, D. A. *Human Population Growth: Stability or Explosion?* Mathematics Magazine (on-line). 1977 (cit. 22.7.2015). DOI 10.2307/2690216. Dostupné z: [URL:http://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload_library/22/Allendoerfer/1978/0025570x.di021101.02p02186.pdf](http://www.maa.org/sites/default/files/pdf/upload_library/22/Allendoerfer/1978/0025570x.di021101.02p02186.pdf)
35. STROMBOM, D., MANN, R. P., WILSON, A. M., HAILES, S., MORTON, A. J., SUMPTER, D. J. T., KING, A. J. *Solving the shepherding problem: heuristics for herding autonomous, interacting agents*. Journal of The Royal Society Interface (on-line). 2014 (cit. 1.7.2015). DOI: 10.1098/rsif.2014.0719. Dostupné z: [URL:http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/11/100/20140719](http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/11/100/20140719)
36. VANDERPOOTEN, M. *3000 ans de révolution agricole: techniques et pratiques agricoles de l'Antiquité à la fin du XIXe siècle*. Editions L'Harmattan, 2012. ISBN 9782296964440
37. WRIGHT, H. T. *Progress in Cultural Modeling*. The Model-Based Archaeology of Socionatural Systems, Santa Fe, New Mexico, 2007, 229-232

Seznam obrázků

- Obrázek 1: Rozhodovací proces deliberativního agenta 10
(cit. 3.7 2015)
URL:<http://wenku.baidu.com/view/24e6bcd5c1c708a1284a4486.html>
- Obrázek 2: Model Artificial Anasazi..... 17
(cit. 18.7 2015)
URL:http://www.pnas.org/content/99/suppl_3/7275.figures-only
- Obrázek 3: Model MayaSim..... 18
(cit. 8.6 2015)
URL:<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/11.html>
- Obrázek 4: Model Shepherding 19
(cit. 12.7 2015)
URL:<http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/11/100/20140719>
- Obrázek 5: Model Population Dynamics for Archaeological Simulations 20
(cit. 3.7 2015)
URL:http://mme2012.opf.slu.cz/proceedings/pdf/092_Machalek.pdf
- Obrázek 6: Model Subway Entrance Hall 23
(cit. 8.7 2015)
URL:<http://www.anylogic.com/screenshots>
- Obrázek 7: Model Flocks of Boids..... 24
(cit. 8.7 2015)
URL:<https://www.runthemodel.com/models/204/>

Obrázek 8: Model New product diffusion.....	25
(cit. 4.7 2015)	
URL: http://www.runthemodel.com/models/	
Obrázek 9. Schéma rozhodování agenta.....	37
(vlastní práce)	
Obrázek 10:Vrstva mapy Distance from opidum	43
(vlastní práce)	
Obrázek 11: Vrstva mapy Distance from streams	44
(vlastní práce)	
Obrázek 12: Vrstva mapy Cultivation suitability	45
(vlastní práce)	
Obrázek 13: Vrstva mapy Slope.....	46
(vlastní práce)	
Obrázek 14: Vrstva mapy Pasture suitability	48
(vlastní práce)	
Obrázek 15: Vrstva mapy Grass	49
(vlastní práce)	
Obrázek 16: Vrstva mapy Overview	50
(vlastní práce)	

Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání abstrakce agentů a objektů.....	8
Tabulka 2: Příklady prostředí.....	12
Tabulka 3: Entity populace.....	30
Tabulka 4: Věkové skupiny.....	32
Tabulka 5: Entity zvířata.....	33
Tabulka 6: Entity prostředí.....	39
Tabulka 7: Porovnání modelů.....	52
Tabulka 8: Parametry modelu.....	55
Tabulka 9: Nastavení parametrů, experiment 2.....	60
Tabulka 10: Výsledky pro 20000 buněk.....	60
Tabulka 11: Výsledky pro 40000 buněk.....	60
Tabulka 12: Lineární regresní model.....	61
Tabulka 13: Nastavení parametrů, experiment 3.....	63
Tabulka 14: Parametry zvířat.....	64
Tabulka 15: Důvody ukončení (intenzivní).....	66
Tabulka 16: Důvody ukončení (extenzivní).....	69
Tabulka 17: Populace při ukončení (intenzivní).....	69
Tabulka 18: Populace při ukončení (extenzivní).....	69

Seznam grafů

Graf 1: Průběh vývoje populace	57
Graf 2: Struktura populace	57
Graf 3: Vývoj využití půdy (intenzivní, 0%).....	65
Graf 4: Vývoj využití půdy (intenzivní, 50%).....	65
Graf 5: Vývoj využití půdy (intenzivní, 100%).....	66
Graf 6: Vývoj využití půdy (extenzivní, 0%).....	67
Graf 7: Vývoj využití půdy (extenzivní, 50%).....	68
Graf 8: Vývoj využití půdy (extenzivní, 100%).....	68

Příloha č. 1

1 ks CD

Obsah přílohy:

- Vytvořený model keltského oppida společně se všemi potřebnými soubory.
- Výsledky provedených simulací a experimentů

Zadání k závěrečné práci

Jméno a příjmení studenta: Ondřej Doležal
Obor studia: Informační management (5)
Jméno a příjmení vedoucího práce: Richard Cimler

Název práce:
Agentové modely pro archeologické výzkumy

Název práce v AJ:
Agent-based models for archaeological research

Podtitul práce:

Podtitul práce v AJ:

Cíl práce: Cílem této diplomové práce je implementovat v prostředí AnyLogic agentový model udržitelných hospodářských strategií keltského opida.

Osnova práce:

1. Úvod, cíl, metodika
2. Přehled souvisejících agentových modelů
3. Možnosti prostředí AnyLogic
4. Návrh a implementace modelu hospodářských strategií
5. Návrh a provedení experimentů
6. Vyhodnocení dosažených výsledků
7. Závěr

Projednáno dne:

Podpis studenta

Podpis vedoucího práce