

Sociální simulace při zkoumání společnosti, ekonomiky a využívání krajiny v době železné: metoda a příklady

Social Simulations for Exploring Society, Economy and Land Use in the Iron Age: Method and Examples

Alžběta Danielisová — Kamila Štekerová

Předloženo redakci v prosinci 2014, upravená verze v červenci 2015

Cílem příspěvku je prezentovat metodu sociálních simulací a agentového modelování v archeologii, metodického přístupu v českém badatelském prostředí zatím málo používaného. Vysvětlujeme zde aplikovatelnost počítačově konstruovaných sociálních simulací na archeologická data a teoretické otázky současného výzkumu (např. šíření osídlení, interakce, ekonomické a subsistenční otázky, demografický vývoj apod.). V první části je sumarizována související teorie sociálních simulací a agentového modelování a ty jsou představeny jako metoda aplikovatelná v archeologickém výzkumu. Dále je zde vysvětlován proces tvorby a použití modelu krok za krokem včetně upozornění na aktuálně diskutované metodické otázky. V druhé části příspěvku představujeme několik případových studií, které se vztahují k aktuálně řešenému projektu zaměřenému na mladší dobu železnou ve střední Evropě. Tyto ilustrační ukázky byly zvoleny tak, aby co nejvíce vynikly podstatné aspekty použití těchto metodických postupů na specifická archeologická data a doménové poznatky a zároveň aby mohly být diskutovány objektivní výhody i nevýhody archeologické interpretace spojené s touto metodou.

sociální simulace, agentové modelování, archeologická teorie, doba železná, demografie, ekonomika produkce, disperze osídlení

The aim of the article is to present the method of social simulation and agent-based modelling in archaeology, a methodological approach not extensively employed thus far in Czech research. The authors explain the applicability of computer-constructed social simulation on archaeological data and theoretical questions of current research (e.g. the expansion of settlement, interaction, economic and subsistence issues, demographic development, etc.). The first part of the work summarises the related theories of social simulation and agent-based modelling, which are presented as methods applicable in archaeological research. The process of the creation and use of the model is then explained step by step, including information on currently discussed methodological questions. The second part of the article presents several case studies related to the current project focussed on the Late Iron Age in central Europe. These illustrative issues are chosen to highlight significant aspects of the use of these methodological approaches on specific archaeological data and domain knowledge, and to foster discussion on the objective advantages and disadvantages of archaeological interpretations linked to this method.

social simulation – agent-based modelling – archaeological theory – Iron Age – demography – economic production – settlement dispersion

1. Úvod

Téměř každou výzkumnou činnost lze v jistém smyslu nazvat „modelováním“; například v archeologii běžně vytváříme konceptuální modely (hypotézy, typologie), prostorové modely (GIS), virtuální modely (3D rekonstrukce) nebo statistické modely. Většina z nich však zkoumá buď izolované prvky systému (keramiku, pohřební ritus, architekturu atd.) nebo strukturu z těchto prvků vytvořenou (kulturní podobnosti, rozšíření osídlení, rozvoj měst atd.) a pouze teoretizuje o možných procesech, vyplývajících ze souhrnných aktivit jednotlivých aktérů na úrovni celých populací. Sociální simu-

lace, oproti tomu, nám umožňují zkoumat a rekonstruovat tyto procesy formálním způsobem, a tím poodhalovat části celých kulturních komplexů. Tak můžeme vytvářet „virtuální laboratoře“, ve kterých můžeme testovat a porovnávat různé hypotézy, nacházet nesrovnalosti v datech nebo identifikovat nové faktory a vztahy, u kterých bychom původně nepředpokládali, že mají významný dopad na celý systém. Stručně řečeno, technologie a počítačové modely užívané ve zkoumání komplexních společností mají velký potenciál pro nejrůznější aplikace v archeologii.

1.1. Sociální simulace v archeologické teorii

Hledání zákonitostí, vysvětlování jevů či odpovídání na otázky typu „co se stalo a proč“ zkoumáním modelových situací není samozřejmě v archeologické teorii věcí neznámou. Tendence se objevovaly už v 70. letech 20. století, kdy interpretativní metody začaly používat postupy, nazývané *model-based*, příp. „sémantické“. Teoretický koncept budování archeologických modelů jako metodologický nástroj představil D. Clarke /ed./ (1972). Modely mohou být charakterizovány mnoha parametry: mentální, verbální, fyzické (krajiny, stavby), matematické a simulační, a jsou obecně chápány jako užitečné heuristické nástroje, které nejen že mohou pomoci porozumět archeologickým jevům, ale mohou mít také explorativní povahu v tom smyslu, že ukazují nové směry teoretických úvah, zpochybňují zastaralá paradigmatata a objevují nové archeologické otázky či směry bádání (Wright 2007, 231; Wainwright 2008).

Kritický aspekt tzv. *model-based archaeology* je ten, že modely nemohou být ve své podstatě a předpokladech pravdivé nebo nepravdivé, nicméně musí být jasně vymezené a konzistentní. Dobrý model nemá znamenat univerzální pravdu, ale dokáže přiměřeně a v určitých aspektech vystihovat část reálného světa. Cílem modelů je izolace relevantních parametrů, definování kauzálních vztahů a jejich zasazení do reálných skutečností (založených na empirických datech), které potom mohou být testovány např. pomocí dat nových nebo v modelu nepoužitých. Hlavním rysem těchto modelů je určitý stupeň svobody v jejich budování. Vytvářením a porovnáváním různých scénářů se dá kromě obměňování vstupních hodnot a proměnných nebo *proxy* dat dobře uplatnit i časový aspekt, čímž se dají např. vysvětlit procesy probíhající na různých prostorových a časových úrovních a tím je možné rozpoznat nejpravděpodobnější modelový scénář. Úroveň takové shody je určována většinou evaluačními postupy (statistickým ověřením, analýzou citlivosti, kontrolními nebo novými daty atd.). Nevyhovující model ale může být ještě s úspěchem použit na jiný typ problematiky. Což znamená, že modely jsou metodologicky „flexibilní“, nicméně jedná se o postup, který se vyznačuje větší disciplínou, vedením a teoretickým pozadím, než jednoduché explorativní analýzy dat.

Modelem se obecně rozumí zjednodušená, abstraktní, idealizovaná reprezentace zkoumaného reálného systému. K zaznamenání modelu je možné použít přirozený jazyk, matematický zápis či počítačový kód. Pomocí tohoto metodologického rámce lze zkoumat socio-ekologické interakce přes širokou škálu společenských, prostorových a časových měřítek, což umožňuje řešit simultánně celé spektrum archeologických problémů a tím nezávisle testovat původní hypotézy. Hlavním nástrojem pro to se v nedávné době staly sociální simulace, které jsou flexibilní, rozšiřitelné a vysoce expresivní.

Teorie sociálních simulací jsou metodologicky zakotvené v paradigmatech systémové teorie (von Bertalanffy 1968) využívané procesuální archeologii. Postupy systémové teorie prozkoumávají principy systémů (struktura, pravidla, provázanost, zpětné vazby) a vytváří modely na jejich popsání; systémová teorie by tak měla pomáhat předvídat lidské chování v sociálních systémech

a pomáhat hledat porozumění jejich vztahům a interakcím. Základní publikací pro sociální simulace je esej J. Dorana (Doran 1970), publikovaná v jednom z prvních čísel časopisu *World Archaeology: Systems Theory, Computer Simulations and Archaeology*. Symbolizovala tzv. „první vlnu“ archeologických simulací, opuštěnou pod vlivem jak post-procesuální archeologie, tak vnitřní metodologické stagnace v 80. letech 20. století (Costopoulos — Lake — Gupta 2010, 2; Lake 2014, 262–265, 277).

Technologický pokrok v oblasti správy a manipulace počítačových dat 90. let 20. století, kdy mimo jiné došlo k vývoji tzv. objektově orientovaných programovacích jazyků (např. Java), přivedly badatelský zájem zpět k počítačovým simulacím. Daly se naprogramovat a zkoumat i složitější struktury (např. „aliance“, „institute“, „komunita“). Modely 90. let 20. století tak představovaly tzv. „druhou vlnu“ archeologických simulací, dnes však vnímanou spíše jako metodologicky se nikam neposouvající, nemající za cíl rozvíjet použitelnost svých nástrojů na větší šíři archeologických otázek. Chyba byla, podle obecného mínění, v tom, že modely se pokoušely studovat komplexní systémy před dostatečným povědomím o něčem takovém, jako je teorie komplexity, vlnkové lodi teorie archeologických modelů dnes (Costopoulos — Lake — Gupta 2010, 4, Lake 2014, 265–271).

V (současné) době, kdy se bádání zaměřilo více na zkoumání „procesů“ jako jsou změny ve společnosti, šíření technologií, nebo dlouhodobé trendy vývoje sociálních struktur (mimo jiné tzv. „fusion/fission“ procesy), se stala aktuálním trendem teorie komplexity¹ přejatá ze sociálních věd (např. Crema 2014). Výchoziskem je představa, že na dřívější civilizace můžeme pohlížet jako na složité adaptivní systémy (tzv. *complex adaptive systems*). Komplexita vyplývá z velkého počtu jedinců, charakterizovaných mnoha parametry a vlastnostmi. Jedinci fungují v prostředí, jež je rovněž popsáno mnoha parametry. Adaptivnost se vztahuje ke schopnosti jedinců měnit a uzpůsobovat své chování, zpravidla ve snaze fungovat racionálně, maximalizovat užitek, účelně alokovat zdroje, využívat příležitosti, reagovat na nově se objevující podněty, problémy apod. Metodologie sociální komplexity je chápána jako diferenciacce sociálních, politických a ekonomických struktur kombinovaná s organizací, která propojuje všechny části (Chapman 2003; Crumley 2007), jinými slovy jako definování principů interakce (vztahů, jednání) mezi jednotlivými součástmi systému a zkoumání jejich výsledků.

Zkoumání komplexních adaptivních systémů je svou povahou multidisciplinární. Běžná je analýza systémů prostřednictvím modelů, které v rámci zvolené míry abstrakce reprodukuji chování skutečného systému, a na kterých lze provádět experimenty. Typicky se v modelu pracuje s jednotkami, které jsou malé a jednoduché v porovnání s celkem a jejichž interakce jsou nelineární a obtížně predikovatelné (Niazi 2013).

¹ Český překlad „complexity“ jako „složitost“, není úplně přesný. Vyvolává spíše dojem komplikovanosti, zatímco konotace anglického termínu je přesně „systém vzájemně propojených součástí, jehož interakce mohou vést k nepředvídatelným výsledkům“.

Na rozdíl o leckdy příliš detailních a přitom nedosta- tečně testovaných modelů druhé vlny, které selhávaly především v interpretativním aspektu, nové – současné – modely, které reprezentují tzv. „třetí vlnu“ archeolo- gických simulací (Costopoulos — Lake — Gupta 2010, 5; Premo 2010; Lake 2014, 271–277), ukazovaly, že jed- noduché systémy s menším objemem vazeb a objektů mohly generovat tzv. komplexní systém, který se dal dále zkoumat. Sledují se aktivity, a chování agentů (in- dividuálně a simultánně), schopných vlastního rozho- dování (tzv. *decision making*), kteří obývají prostorově a časově definovaný svět a provádějí interakce mezi sebou a svým prostředím. Na základě jejich pozorování se potom budují interpretace a teorie, které nakonec přinášejí užitečné předpoklady pro archeologické po- znání (Cioffi-Revilla 2010). Mezi ně patří například i po- znatek, že mimořádné společenské změny nemusí být vždy způsobeny mimořádnými příčinami (např. Wilkin- son — Gibson — Widell /eds./ 2013; Kohler — Varien /eds./ 2012).

Velkou výzvou byl ve své době i prostorový aspekt si- mulací, které se měly odehrávat na reálné mapě. Ta byla do jisté míry vyřešena aplikací geografických infor- mačních systémů (GIS). Navázání na simulace na druhé straně obohatilo GIS, do té doby statický a „mapový“ ná- stroj, o dynamický (vývojový) aspekt.

Nejčastěji se konstruují modely agentové (*agent- based models*), jimž je věnován tento příspěvek, a složité síťové modely (*complex network models*).

1.2. Agentové modelování

Agentové modelování reprezentuje proces vytváření vý- početního modelu, zpravidla replikujícího reálný svět, a provádění experimentů za účelem porozumění jeho chování. Základním konceptem agentového modelová- ní je „agent“ – autonomní (samostatná) a interaktivní entita, která může reprezentovat např. částice, živý or- ganismus, celou komunitu nebo i krajinu. Agentové modelování umožňuje definovat situace, v nichž auto- nomně fungující entity (*agenti*) interagují jednak spolu navzájem, jednak s prostředím, jež je obklopuje. Pro- středím se nejčastěji rozumí explicitní geografický pro- stor, avšak může jím být i abstraktní prostor přípust- ných chování a projevů agentů. Zjednodušenou for- mální reprezentací prostoru je dvou- či třírozměrná mřížka, případně síť ve smyslu matematické teorie grafů. Běžným principem, uplatňovaným v agentových modelech nejen v archeologii, je kombinování prostředí založeného na reálných GIS datech s uměle definova- nými agenty, kteří nemají své protějšky ve skutečném světě. V modelu tak lze propojit např. plán města nebo mapu krajiny s agenty, představujícími fiktivní jednot- livé obyvatele, rodiny, společenské či ekonomické celky.

Prováděním pokusů na agentovém výpočetním mo- delu může badatel zpřesňovat úsudky o studovaných jevech nebo testovat tzv. *what-if* scénáře (hypotetické „co kdyby“ situace). Předmětem experimentování je pa- ralelní činnost a projevy početných populací agentů ve vztahu k prostředí, zvláště již zmíněné nelineární kolektivní projevy, které nelze odhadnout nebo předpovědět na základě znalosti chování jednotlivců. Zvolená úroveň

abstrakce pak předurčuje možnosti interpretace vý- stupů experimentů. Zpravidla komplexní témata vyža- dují integrování rozmanitých zdrojů dat s poznatky z mnoha vědních disciplín. Tvorbu agentového modelu proto můžeme chápat jako tvorbu modelu znalostního (*knowledge model*) a můžeme přitom uplatnit postupy a prostředky znalostního inženýrství (*knowledge engi- neering*).

Před průnikem do archeologie byly agentové modely hojně využívány v sociálních, biologických nebo ekono- mických vědách, kde se uplatňovaly například k pre- dikci vývoje na burze, testování vojenských strategií, simulování klimatických změn nebo měnicích se po- stupů např. ve využívání zemědělské půdy (Premo 2008; Wainwright 2008).

V souvislosti s archeologickým výzkumem předsta- vují agentové modely užitečný nástroj pro testování hy- potéz a budování teorií na základě srovnávání archeolo- gických dat s výsledky simulací. Aplikace agentového modelování přispěly významně ke zkoumání a interpre- taci klíčových archeologických otázek: např. subsis- tenční strategie populací lovců a sběračů (Lake 2000; Del Castillo — Barceló 2013), šíření neolitického země- dělství do Evropy (Conolly — Colledge — Shennan 2008; Shennan 2007; van der Vaart et al. 2006), nebo lidské působení na krajinu a přírodní prostředí (Axtell et al. 2002; Wainwright 2008; MEDLAND project: Barton — Ullah — Mitasova 2010) a socio-ekonomické faktory při- spívající k rozvoji a/nebo kolapsu komplexních společ- ností. Ikonickým a několikrát (úspěšně) replikovaným projektem agentového přístupu při zkoumání kultur- ního kolapsu je „Artificial Anasazi“ – model zániku kul- tury Anasazi na americkém jihozápadě (Dean et al. 2000; Axtell et al. 2002; Janssen 2009; Stonedahl — Wi- lenski 2010; Dekker 2014). Další projekty byly např. za- měřeny na zkoumání politických a sociálních struktur v Mezopotámii (MASS projekt, Altaweel 2007; 2008; EN- KIMDU projekt Wilkinson et al. 2007; Wilkinson — Gib- son — Widell /eds./ 2013), kdy byly aplikovány různé „stresové scénáře“ (např. sucho, ekonomická krize, de- mografický úbytek apod.) za účelem testování odolnosti a udržitelnosti společnosti na dané úrovni společen- ského vývoje (komplexity). Tyto modely názorně ilu- strují, jak výsledky dosažené sociální simulací a agen- tovým modelováním mohou zpochybnit tradiční teorie o ekonomické produkci, lidské práci a udržitelnosti předindustriálních společností a poukázat na nové směry, kam by se archeologické otázky mohly ubírat. Mezi těmito projekty je nutné také zmínit projekt MESA VERDE zaměřený na vývoj osídlení na americkém stře- dozápadě (Kohler et al. 2007; Kohler — Varien /eds./ 2012). Příkladem aplikace na konkrétní archeologický problém je potom například simulace logistiky vojen- ského tažení byzantské armády v Anatólii před bitvou u Mantzikertu v roce 1071 (Craenen et al. 2010; Mur- gatroyd et al. 2012). Modelovat pomocí agentů se dá i samotný archeologický výzkum, např. v souvislosti s odkryvem historických bojišť. Empirická data a data z původní simulované bitvy jsou v modelu statisticky srovnávána (Rubio-Campillo — Cela — Hernandez 2012).

Aplikace agentových modelů se bohužel zatím příliš nerozšířila za hranice anglosaské archeologické komu-

nity. Výjimkou je agentová simulace těžebních postupů v solných dolech v Hallstattu (Kowarik — Reschreiter — Wurzer 2009; 2012) nebo publikace navázané na projekt SIMULPAST (cf. Madella et al. 2014).

Zájem o propojení výpočetních a simulačních metod s archeologií však v posledních letech roste takřka geometrickou řadou. Lze to doložit stoupajícím počtem jednotlivých příspěvků na oborových konferencích (Computer Applications in Archaeology v letech 2006–2014, Archéométrie – Colloque du GMPCA 2015) i tematických workshopů a sekcí, přidružených ke konferencím informatickým (ESSA – SPUHH 2014, MODSIM 2015, Simultech 2015, AAMAS 2015 a další), stejně jako celých projektů zaměřených na sociální simulace (např. SIMULPAST, Computational Modelling and Human Use of Space – UCL London).

Rozhodnutí zda a jak využít agentové modelování v daném kontextu, se odvíjí od archeologických otázek a od charakteru hypotéz, které prověřujeme, i od charakteru dat a dalších podkladů, které máme k dispozici. Do počítačové realizace agentových modelů lze zakomponovat metody z oblasti výpočetní inteligence (např. genetické algoritmy, fuzzy množiny, neuronové sítě), což dovoluje koncepčně pracovat s náhodou a nejistotou, které obě jsou přirozenou součástí reálného světa. Výhody tohoto postupu jsou, že modely samy o sobě se budují poměrně snadno a umožňují vytváření mnoha různých scénářů pouhým obměňováním, adaptací nebo kombinací vstupních dat. Obtížnějším úkolem je však definice relevantních archeologických otázek, formulace vstupních parametrů a poté adaptace, evaluace a testování vzniklých modelů. Současně je třeba mít na paměti, že předmětem modelování není minulost samotná, ale představa o ní tak, jak ji zprostředkovávají experti (v tomto případě archeologové).

1.3. Účel modelů: emulace vs. explorační

Simulační modely byly z hlediska teoretického zaměření klasifikovány do několika skupin (Lake 2010, 12–14; Madella et al. 2014, 252):

- (1) pro testování hypotéz (na základě empirických dat), k budování nových scénářů,
- (2) ke zkoumání dynamiky studovaných systémů, porozumění procesům,
- (3) pro vyvíjení nových kvantitativních metod,
- (4) pro vytváření teorie – formulaci nových hypotéz

V archeologické praxi jsou modely vyvíjeny zpravidla ke dvěma účelům: vysvětlujícím (testujícím hypotézy, zkoumajícím procesy) a prediktivním (budujícím teorii): Vysvětlující, neboli emulativní zahrnují realistické, často komplexní modely s mnoha proměnnými, ve kterých je hlavním cílem testování předem stanovených hypotéz (typu „populace A v oblasti B během období C zanikla/se koncentrovala/změnila strukturu kvůli změnám klimatu/vyčerpání zdrojů/technologickým inovací“), (např. Lake 2000; Wilkinson — Gibson — Widell /eds./ 2013; Kohler 2005; Kohler — Varien /eds./ 2012; Briz I Godino et al. 2014; ad.), tedy „explorační vyššího řádu“ (Premo 2010, 29–30). Skrze model se snažíme uchopit emergenci, rozpoznat trendy, nalézt vztah mezi pozorova-

váními a jejich možnými vysvětleními. Výsledky simulace se porovnávají s empirickými daty, a pokud se v požadované míře shodují, model potvrdí předem stanovenou hypotézu. Často je cílem těchto modelů vytvořit detailní strukturu *in silico* („vytvořené počítačově“). Při jejich tvorbě je zapotřebí věrohodně reprezentovat účastníky (agenty) a poté systematicky testovat způsoby, jak ze zvolených chování na mikroúrovni mohou být získány požadované projevy na makroúrovni.

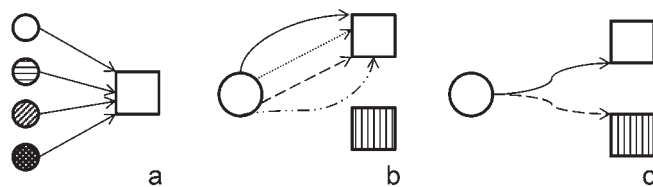
Prediktivní, neboli explorativní zahrnují především heuristické modely budované za cílem vytvářet teorie jako metodologický nástroj.

Tyto modely bývají většinou velmi jednoduché, zaměřené na generování konkrétního jevu (např. pravidla rozšiřování osídlení, pravidla tzv. *decision making* apod.), který slouží také jako testování určité hypotézy, ovšem na mnohem nižší úrovni, než nabízejí modely emulativní (např. Bentley — Lake — Shennan 2005; Powel — Shennan — Thomas 2009; Barton 2014; Del Castillo — Barceló 2013; Lake — Crema 2012; Crema 2014; Angourakis et al. 2014; Salgado — Noquera — Miguel 2014; ad.). Tyto modely si nekladou za cíl zkoumat komplexní jevy (např. budovat virtuální město), ale odhalují procesy, jevy a jejich komponenty na tzv. nižších úrovních. Slouží k extrapolaci trendů, vyhodnocování scénářů, odhadování dalšího vývoje, zkoumání efektů, k nimž dojde při změně vstupních podmínek. Klíčové je rozpoznání případné závislosti výsledků na sledech kroků v simulaci.

Zpravidla se provádí obojí, tj. zkonstruuje se vysvětlující model (případně se vytvoří statický konceptuální model), který poslouží k získání vhledu do systému, a je-li tento model shledán uspokojivým, následně se použije k predikování.

Badatelé zaměřeni na agentové modelování v současné době upřednostňují především co nejjednodušší heuristické modely (tj. explorativní) zaměřené na generování nových teorií, oproti „realistickým“ emulativním modelům (Lake 2010; 2014; Premo 2010). V archeologické teorii se nejedná v podstatě o nic nového: v GIS modelování byl svého času také považován za „metodologicky cennější“ deduktivní („behaviorální“) přístup, který nejprve definoval hypotézy a posléze na základě nich vytvářel modely, jež ověřoval daty, než přístup induktivní, vycházející z empirických dat, která generalizoval a přetvářel v proměnné nového modelu (Dalla Bona 2003). Nevýhody induktivního přístupu měly spočívat především v automatizaci (= nepochopení) procesů, které by mohly napomoci interpretovat vztahy mezi lokalitami a jejich umístěním v krajině (Ebert 2000). Oproti tomu při deduktivním přístupu se zohledňovala (ve své statické, konceptuální podobě) pravidla *decision making* (např. efektivita pohybu, ovlivnění vytvořenou sídelní sítí, centrální lokalitou apod.).

Podobně v sociálních simulacích explorativní modely metodicky pracují s abstrakcí – tedy s ideou minulosti spíše než s minulostí samotnou a generují data, na základě kterých se teprve budují hypotézy. Tím mohou sloužit jako „behaviorální laboratoře pro experimentální etnoarcheologii“ (Premo 2010, 35). Abstrakcí se rozumí vytváření proměnných, které nemají reálný ekvivalent (např. „energie“ nebo „atraktivita“ místa nebo sídliště, „potenciál“ krajiny, uměle nastavené stupně interakcí



Obr. 1. „Equifinalita“ a „stochasticita“ při budování modelů: **a)** více – kvalitativně odlišných – modelů (kroužky) vedoucích ke stejnému výsledku (čtverec); **b)** stejný výsledek (čtverec) může být dosažen více možnými způsoby (šipky) buď stochasticitou nebo různými nastavením experimentů; **c)** jeden model (kroužek) se stejnými výchozími předpoklady může vést ke kvalitativně různým výsledkům (čtverce), (podle Premo 2010, Fig. 5.2–5.4). — **Fig. 1.** Equifinality and stochasticity in building models: **a)** more – qualitatively different – models (circles) leading to the same result (square); **b)** same result (square) can be achieved in various ways (arrows), either by stochasticity or by different experiment settings; **c)** one model (circle) with the same initial parameters can lead to qualitatively different results (squares), (after Premo 2010, Fig. 5.2–5.4).

mezi agenty ...) a nejsou tak založené na empirických datech. Problém u nich zpravidla může nastat, když nejsou k dispozici dostatečná data na testování nebo ověření vybudované hypotézy (Lake 2010, 15) a jejich hodnota tedy spočívá především v jejich nelineární povaze (tj. není předmět jasný výsledek) a explorativní teoretické rovině.

Hlavním argumentem proti „realistickým“ emulativním modelům je nutná simplifikace naší projekce minulosti nehledě na fragmentárnost archeologických dat, složitost konstruování takového modelu a v neposlední řadě tzv. „equifinalitu“ (tj. stejný nebo podobný výsledek může být dosažen různými způsoby nebo procesy, cf. obr. 1), což představuje metodický problém (Premo 2010, 30–33; Lake 2010, 13; Madella et al. 2014, 252).²

Přes metodologickou spornost, by však „realistické“ modely měly nadále tvořit součást agentových simulací, zejména v momentě, kdy hledají odpověď na konkrétní archeologickou otázku. V tomto případě mohou dodat vítaný dynamický aspekt konceptuálním modelům, sloužícím pouze ke statickým výpočtům (typu „jak velkou plochu potřebujeme k uživení konkrétního počtu lidí?“). Explanativní modely, kromě simultánního vyhodnocování většího množství parametrů, přinášejí také důležitý časoprostorový aspekt (ve kterém se mohou měnit vstupní parametry – jako např. rostoucí populace) a odrážet tak reakce okolí a adaptační mechanismy zkoumaných společností. Takové postupy ovšem kladou velké nároky na vytvoření modelu, výběr parametrů a proměnných, míru měřítka (detailu, který bývá část přeceňován) a často mohou pro svou náročnost skončit „na půl cesty“. Kritizovaným aspektem také bývá případně jejich netransparentnost – při nesprávném postupu není jasné, jak bylo dosaženo výsledku. Dalším problémem může být „stochasticita“³ – každé spuštění

² Někdy to však nemusí odrážet nic jiného než prostou variabilitu historické reality: za všechny případy např. ke vzniku zemědělství došlo na různých místech světa z různých příčin a skrze různé procesy.

³ Stochastický systém/model je systém, jehož budoucí stav nelze s jistotou odvodit, ale pouze s určitou pravděpodobností předpovědět, protože v něm figurují jevy, které pokládáme za náhodné. Ve strukturovaných protokolech, sloužících k popsání modelu (viz kapitola 2.2), je nutné stochastické chování modelu co nejpřesněji popsat.

modelu, nebo rozdílné nastavení experimentu, může vést k jinému výsledku (obr. 1), který nelze uspokojivě vysvětlit; jinými slovy nelze dostatečně popsat chování modelu a tak nelze uspokojivě argumentovat ve prospěch nebo neprospěch vstupní hypotézy.

2. Postup tvorby simulačního modelu

Konstruování modelu spočívá v budování reprezentace struktury a fungování (chování) zkoumaného systému. Model musí odrážet studovaný systém dostatečně věrně, tj. musí postihovat všechny jeho hlavní znaky. Současně se požaduje, aby model byl v jistém smyslu jednodušší než reálný systém, a především aby byl srozumitelný. Užitečný model tak má být kompromisem mezi realismem a minimalismem (Madella et al. 2014, 252).

Problematika navrhování metodik a standardů v oblasti diskretních simulačních modelů komplexních adaptivních systémů, a zejména modelů agentových, je nyní živě diskutována napříč aplikačními oblastmi, archeologii nevyjímaje (za všechny: Costopoulos — Lake /eds./ 2010; tematické číslo Journal of Archaeological Method and Theory 21, 2014). Konečným cílem diskuzí je specifikování takových pracovních postupů a metod, které by podporovaly dobrou praxi (*best practices*) při tvorbě validních, verifikovatelných modelů a které by pomohly ukotvit sociální simulace jakožto obecně akceptovanou vědeckou metodu.

Obecný postup tvorby diskretního simulačního modelu sestává ze šesti hlavních kroků, jimiž jsou (1) formulace výzkumných otázek a hypotéz, (2) konceptuální návrh, (3) implementace, (4) validace, (5) experimenty a jejich vyhodnocení, (6) publikování výsledků. I když v následujících kapitolách vykládáme postup tvorby především agentového modelu, většina uvedených doporučení a postupů platí i pro jiné druhy výpočetních modelů.

2.1. Formulace hypotéz

V první fázi je třeba stanovit vědecké (archeologické) otázky a očekávání spojená s modelem, neboli musíme se rozhodnout, čeho chceme modelováním dosáhnout. Je možné zkoumat určitý archeologický jev (např. migraci, rozšiřování osídlení, kolonizaci, diseminaci kultur) nebo řešit konkrétní problém (např. studovat ekonomické využívání krajiny, popisovat společenské interakce a šíření informací, simulovat přírodní jevy jako je eroze či vyčerpávání půdy).

Současně je třeba se seznámit se s dostupnými datovými a dalšími podklady a zhodnotit účelnost použití daného modelovacího přístupu. Při posuzování smysluplnosti agentového modelování v daném kontextu je vhodné klást si následující otázky:

- Je zkoumaný systém složen z malých, nezávislých jednotek, tj. je agent přirozenou metaforou?
- Lze chování a rozhodování agentů modelovat jako diskretní, tj. existuje časový krok, související s projevem systému?
- Proměňuje se chování agentů v čase, dochází k jejich adaptaci na měnící se vnější podmínky?

- Existují mezi agenty vztahy, mohou tyto vztahy průběžně vznikat a zanikat?
- Tvoří agenti hierarchie či organizace, dochází i na úrovni organizací k učení a adaptaci, dochází v systému k emergenci, tj. je systém tak složitý a obsahuje takové skryté závislosti, že z minulého chování nelze jednoznačně usuzovat na chování budoucí?

V rámci archeologického výzkumu zpravidla lze na všechny právě uvedené otázky odpovědět kladně. Zkoumanou jednotkou (agentem) typicky může být jedinec, nukleární nebo širší rodina, menší nebo větší územní celek či organizační struktura. Agentu obklopuje přírodní a/nebo socio-ekonomické prostředí. Diskrétní časovou jednotkou je minuta, den, rok, staletí podle toho, jaký proces je předmětem zkoumání.

V neposlední řadě je nutné mít na mysli, že přestože se diskrétní simulační modely, zvláště agentové, dnes těší velké oblibě, zdaleka nepředstavují univerzální nástroj, uplatnitelný ke zkoumání libovolné historické kultury. Námi předložené modely (viz kapitola 3) jsou navrženy tak, aby pokrývaly podstatné aspekty fungování jedné konkrétní lokality. Snažili jsme se využít maximum dostupných podkladů, limitující je však zejména fragmentárnost archeologických dat.

2.2. Konceptuální návrh

Konceptuálním návrhem se rozumí podrobná specifikace zamýšleného simulačního modelu. Dokumentace návrhu modelu může mít podobu:

- popisů v přirozeném jazyce, formulovaných buď volně, nebo v souladu se speciálně navrženým formalismem (např. protokol ODD),

- zápisu ve formálním jazyce – použit lze ontologické jazyky (např. OWL), zdrojové kódy programovacích jazyků, pseudokódy a matematické formalismy,
- grafického zápisu více či méně formalizovaného (např. UML diagramy, pojmové mapy, rozhodovací stromy, vývojové diagramy).

Volba prostředku závisí na tom, zda míníme konceptuální návrh sdílet s odbornou komunitou, používat k výukovým účelům, postupovat podle něj při implementaci či replikaci modelu apod.

Nejužívanějším formalismem je protokol ODD (Grimm *et al.* 2006; Polhill *et al.* 2008; Polhill 2010; Müller *et al.* 2014), resp. jeho rozšířená varianta ODD+D, v níž je kladen zvýšený důraz na podrobnou specifikaci rozhodovacích procesů agentů (Müller *et al.* 2013). Publikování agentových modelů je často podmíněno zpřístupněním dokumentace právě ve formě ODD protokolu.

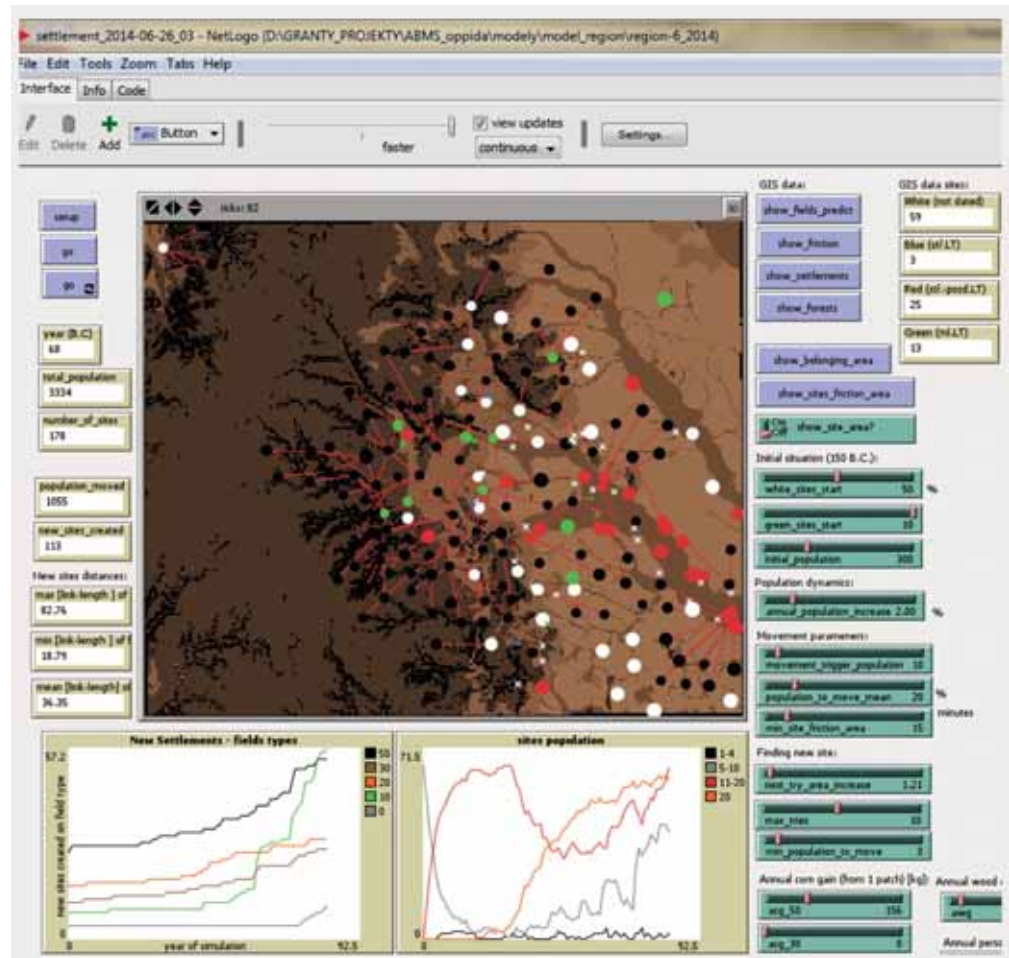
Protokol ODD sestává ze tří hlavních částí (tab. 1), v plné verzi má charakter komentovaného formuláře, po jehož vyplnění bychom měli mít jistotu, že jsme nepomněli promyslet žádný z důležitých aspektů modelu. Podle charakteru modelu je možné některé rubriky vynechat (např. pokud agenti jsou homogenní nebo postrádají schopnost učení).

Ve fázi konceptuálního návrhu se musíme především rozhodnout, s jakou jednotkou (tedy s jakým měřítkem) budeme pracovat; v případě agentového modelu jde o rozhodnutí, co bude agentem (viz kapitola 1.2). Agentu musíme poté popsat sadou parametrů a soupisem možných chování. Problémy typicky nastávají při pokusech o převod kvalitativních dat do kvantitativních hodnot (zejména kategorické proměnné, textové popisy jako „kvalitnější než“, „méně adaptabilní“ apod.).

Oddíl	Rubrika	Komentář
Přehled	Účel	Vysvětlení smyslu modelu, vymezení cílové uživatelské skupiny.
	Entity, stavové proměnné, měřítka	Specifikace agentů a prostředí, časového a prostorového měřítka, hranic modelu a míry abstrakce.
	Harmonogram procesů	Specifikace chování agentů a procesů probíhajících v prostředí včetně časových návazností.
Koncepty návrhu	Přehled procesů, empirické podklady	Vymezení teoretických východisek a hypotéz, výčet pramenů, paradigmat, principů a rozhodovacích modelů, objasnění původu dat.
	Rozhodování	Analýza rozhodování agentů, objasnění způsobu modelování racionality (cíl agenta, metrika pro vyhodnocení úspěšnosti agenta, úroveň a časový horizont rozhodování, zohlednění vlivu prostředí, sociálních a kulturních norem, práce s nejistotou a neurčitostí).
	Učení	Specifikace učících a adaptačních mechanismů agentů i kolektivů.
	Vnímání	Specifikace způsobů, jimiž agenti získávají vstupy z prostředí, zda a jak je jejich vnímání zatíženo chybami, jak je vnímání vztaženo k prostoru a času, jaká je energetická náročnost získávání dodatečných vstupů.
	Predikce	Specifikace způsobů, jimiž agenti predikují budoucí stav prostředí, jaké přitom používají interní rozhodovací modely a zda se při predikci mohou mýlit.
	Interakce	Specifikace možných interakcí mezi agenty a okolností, na nich průběh interakcí závisí, fungování vzájemné komunikace mezi agenty, koordinační mechanismy agentů.
	Společenství	Specifikace mechanismů sdružování či seskupování agentů do kolektivů (organizací), popis fungování kolektivů.
	Heterogenita	Specifikace rozdílů mezi třídami agentů včetně uvedení rozdílů v rozhodovacích procesech.
	Stochastičita	Specifikace způsobů zacházení s náhodností a neurčitostí.
Pozorování	Specifikace výstupních dat, která jsou při simulaci shromažďována.	
Detailní návrh	Implementace	Popis provedení programu, dostupnost zdrojový souborů, kontakty na autory modelu.
	Inicializace	Vysvětlení výchozího nastavení modelu před realizací simulace.
	Vstupní data	Specifikace externích zdrojů dat, nutných ke spuštění simulace.
	Podmodely	Podrobný rozbor dílčích částí modelu, jejich konstrukce a parametrů s odkazy na související prameny.

Tab. 1. Struktura protokolu ODD. — Tab. 1. Structure of the ODD protocol.

Obr. 2. Příklad rozhraní modelu v NetLogu – vpravo ovládací prvky (posuvníky, tlačítka), vlevo vykreslovací plocha, použitá k vizualizaci průběhu simulace nad GIS daty, dole výstupní prvky (displeje zobrazující aktuální hodnoty sledovaných proměnných, graf). — **Fig. 2.** Example of the model interface in NetLogo – on the right are controls (sliders, buttons), on the left is the rendering area for visualisation during the simulation of GIS data; on the bottom are output elements (display showing the current values of the variables, graphs, etc.).



Agent může představovat:

- buď umělý abstraktní konstrukt navržený tak, aby svými vlastnostmi a chováním vyhovoval zamýšlenému testování hypotéz (např. abstraktně pojatá představa obyvatele sídliště, společenské skupiny, komunity, ale také třeba součásti krajiny nebo různé produkční strategie),
- nebo virtuální protějšek reálného jedince (např. konkrétní historická osobnost či sídliště), v tom případně je třeba model kalibrovat empirickými daty.

Také prostředí obklopující agenty může být buď uměle vymezeno, nebo vybudováno na reálných prostorových datech. V prezentovaných modelech (viz kapitola 3) jsou využívány reálné mapové podklady (mapy terénu, topografické, pedologické, hydrologické mapy a jejich sekundární deriváty připravované pomocí GIS), a také dodefinované mapy z reálných map vycházející (např. prediktivní mapy pro umístění sídlišť, zemědělských jednotek). Nad těmito mapami je operováno s uměle definovanými agenty, reprezentujícími fiktivní obyvatelstvo, domácnosti, zvířata apod.

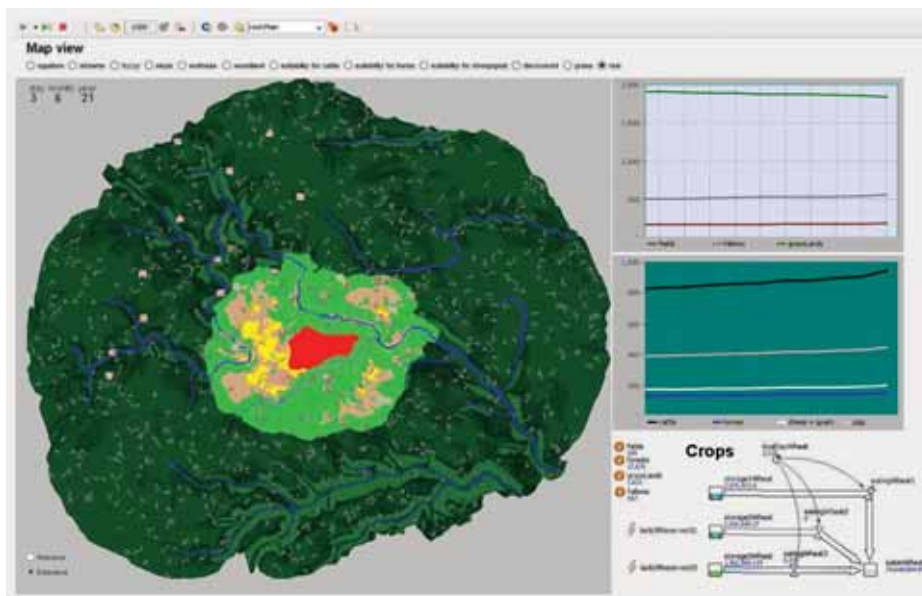
2.3. Implementace

Implementace spočívá v převodu konceptuálního modelu do podoby spustitelného počítavého programu. K tomu se používá buď programovací jazyk (Java, C),

knihovna předdefinovaných procedur, nebo speciální simulační platforma (NetLogo, Repast, AnyLogic). V archeologické komunitě se nyní těší oblibě zejména volně dostupné NetLogo (Wilensky 2014), nabízející jednak širokou škálu nástrojů, funkcí a rozšiřujících balíčků, jednak knihovnu již hotových modelů, které lze pouze upravovat (obr. 2).

Základní modelovací paradigma, které NetLogo podporuje, je modelování agentové, avšak k dispozici je i nástroj pro implementaci modelů tzv. **systémové dynamiky** (*system dynamics*), jež lze s agentovým přístupem kombinovat. Modelování systémové dynamiky spočívá v sestavování diagramů toků a diagramů pozitivních a negativních zpětnovazebných smyček. Ústředním pojmem je hladina (zásoba, *stock*), jejíž stav se mění v čase, změny mohou být zadány diferenciálními rovnicemi (cf. obr. 3). Rozdíl mezi agentovým modelem a modelem systémové dynamiky lze dobře ukázat na modelech populačních (viz kapitola 3.1). Je-li důležité v modelu rozlišovat konkrétní jedince a jejich individuální životy (příslušnost k rodině, počet potomků, majetek, stěhování), použijeme agentový model. Jestliže se zajímáme jen o celkové změny počtu obyvatel, vystačíme se systémovou dynamikou, kde velikost populace bude představovat hladinu, jejíž změny se budou odvozovat z úrovní porodnosti, úmrtnosti a migrace.

Na modely systémové dynamiky lze pohlížet též jako na aplikaci rovnicového přístupu, který může v mode-



Obr. 3. Příklad rozhraní modelu v AnyLogic – vlevo vykreslovací plocha, vpravo nahoře výstupy (grafy) a vpravo dole vizualizace části návrhu modelu (zásoby, stocks). — **Fig. 3.** Example of the model interface in AnyLogic – on the left is the rendering area for visualisation; in the upper right are outputs (graphs); on the bottom right is the visualisation of the part of the model design (stocks).

lech fungovat i samostatně. **Rovnicový model** (*equation based*) je definován sadou algebraických rovnic, obvyklejších diferenciálních rovnic nebo parciálních diferenciálních rovnic. Spuštění modelu spočívá v realizaci rovnicových výpočtů. V rovnicovém modelu se neoperuje ani s agenty, ani s hladinami, ale se systémem propojených proměnných vyjádřených v různých jednotkách (např. počty osob, územní nároky v ha, podíly pracovních kapacit v procentech atd., viz kapitola 3.4).

Pro prostorovou reprezentaci prostředí NetLogo nabízí čtvercovou mřížku, tedy rastr využitelný k vytvoření tzv. **buněčného automatu** (*cellular automata*), což je další užitečný technický prostředek. Buňka automatu může mít řadu vlastních parametrů. Stav buňky typicky závisí na stavu buněk v jejím okolí, přičemž velikost sledovaného okolí je volitelná. Obměny stavu jsou dány přechodovými pravidly, která se aplikují na všechny buňky paralelně, a to buď synchronně, nebo asynchronně. Buněčný automat tedy můžeme ideálně použít k reprezentaci krajiny (viz kapitola 3.2, 3.3).

V případě, že potřebujeme pracovat s jinou, než pravidelnou prostorovou strukturou, NetLogo nabízí konstrukty pro specifikaci sítí agentů, tj. můžeme definovat spoje mezi agenty a zaznamenat tak např. síť sídlišť (viz kapitola 3.5).

Ve spojení s NetLogem lze používat řadu rozšiřujících balíčků (*extensions*), vyvíjených a sdílených zainteresovanými uživateli (např. „fuzzy plugin“ pro implementaci fuzzy-logiky, cf. Machálek et al. 2013). Jedná se např. o knihovny pro práci se složitějšími datovými strukturami (pole, tabulky), GIS daty, audio a video soubory, sady funkcí pro statistickou analýzu sítí, shlukovou analýzu a další.

Alternativou k volně dostupným softwarovým nástrojům jsou komerční platformy. Příkladem je AnyLogic (AnyLogic 2015), který obdobně jako NetLogo podporuje několik modelovacích paradigmat: agentové modelování, modelování systémové dynamiky a modelování diskrétních procesů. K návrhu modelu slouží integrované vývojové prostředí, v němž uživatel sestavuje diagramy

z předdefinovaných prvků a schémat. Kromě předpřipravených konstruktů lze do modelu začlenit i kód psaný v Javě. Knihovny AnyLogicu všemožně ulehčují tvorbu komerčních modelů (logistika, doprava, řízení výroby, marketing, vojenství), mezi něž archeologické simulace bohužel nepatří. V porovnání s NetLogem poskytuje AnyLogic širší škálu vizualizačních nástrojů, statistických distribučních funkcí i optimalizačních nástrojů.

2.4. Validace

Veškerá praktická použitelnost modelu se odvíjí od způsobu, jímž byl model validován, tj. jak bylo ověřeno, zda model skutečně odpovídá na výchozí otázky a hypotézy a jak jsou odpovědi spolehlivé.

I když model považujeme za dobře postavený a provedený, bez možnosti nahlédnout do jeho kompletní dokumentace a především bez možnosti replikovat experimenty je zpravidla nelehké (nebo dokonce nemožné) model validovat. Může vzniknout podezření, že výsledek simulace byl dosažen náhodou, původně nezamyšleným chováním prvků modelu, nebo dokonce chybou. Mnoho badatelů zabývajících se archeologickými simulacemi opatrně přiznává, že nejistota ohledně příčin chování modelu je Achillovou patou archeologických simulací (Costopoulos — Lake — Gupta 2010, 2). Proto jsou také za metodologicky bezpečnější považovány modely explorativní (prediktivní), které nejsou primárně zaměřeny na testování hypotéz pomocí reálných dat, ale naopak na generování hypotéz nových, které jsou pouze v teorii ověřitelné empirickými daty a oproti emulativním (vysvětlujícím) modelům mají daleko jednodušší strukturu (Premo 2010, 35).

Existují různé přístupy k validaci modelů:

- **Teoretická validace** je zaměřena na přezkoumání, zda principy a mechanismy, zahrnuté v modelu, spočívají na solidních teoretických základech.
- **Empirická validace** je založena na srovnávání výstupů modelu s reálnými daty s cílem identifikovat

takové kombinace nastavení parametrů modelu, které nejlépe vystihují chování reálného systému. Reálnými daty se v tomto případě rozumí například datové řady zachycující skutečné hektarové výnosy za určité historické období, tedy známé číselné hodnoty, jimž by se výstupy ze správně provedeného experimentu měly v požadované míře podobat.

- **Interaktivní validace** má podobu dialogu s expertem (archeologem), který zformuluje vlastní představu o průběhu simulace a tato představa je pak porovnána s výstupem modelu. Pokladem pro takový dialog může být např. mapa výchozího rozmístění sídlišť, expert sdělí, jakým způsobem se sídliště pravděpodobně rozrůstala a dělila. Toto sdělení může být konfrontováno s agentovým modelem rozrůstání a dělení sídel, přičemž očekáváme, že výsledek simulace bude s názorem experta konzistentní.

2.5. Experimenty a jejich vyhodnocení

Vlastní simulace spočívá v opakovaném spouštění modelu při různých nastaveních hodnot parametrů, ukládání výstupních dat a jejich následném zpracovávání s cílem zjistit, zda mezi výstupy existují statisticky a/nebo věcně významné rozdíly a jak se tyto rozdíly vztahují k výchozím hypotézám. Zdrojem rozdílů jsou, kromě obměňovaných parametrů, také statistická rozdělní, zakomponovaná do modelu. Náhodnost je na jedné straně žádoucí, protože je zdrojem variability výchozích nastavení modelu i chování agentů, na druhé straně ale nesmí zkreslit závěry.

Součástí NetLoga je nástroj *BehaviorSpace*, určený k zadávání a spouštění experimentů. Jedná se o formulář, v němž uživatel volí obměňované parametry modelu, sledované výstupní proměnné a počet opakování simulace pro každou kombinaci. Slouží především ke statistickému vyhodnocení výstupů. Práce s *BehaviorSpace* předpokládá určitou míru intuice autora experimentů, neboť ten se musí předem rozhodnout, které z mnohdy desítek parametrů a jaké jejich hodnoty má smysl dávat do souvislosti. U rozsáhlých modelů může jít o dosti pracnou a časově náročnou záležitost.

Alternativně lze při experimentování použít optimalizační nástroje, v případě NetLoga např. *BehaviorSearch* (Stonedahl 2011). V tom případě volíme hodnotící funkci (metriku), a optimalizační metodu (např. genetický algoritmus⁴, simulované žihání⁵), pomocí které se pak automaticky dohledává kombinace co nejvíce optimálních hodnot parametrů modelu (jako příklad lze uvést replikaci „Artificial Anasazi“ modelu, cf. Stonedahl — Wilenski 2010).

⁴ Genetické algoritmy (*genetic algorithms*) spadají do oblasti tzv. evolučních výpočetních technik, inspirovaných poznatkami z evoluční biologie. Východiskem pro výpočet je sada různých řešení zadané úlohy, tzv. populace. Kvalita každého řešení je objektivně ohodnocena tzv. fitness funkcí. Poté se opakovaně aplikují operátory selekce, mutace a křížení, pomocí nichž jsou ze stávajících řešení tvořena řešení nová.

⁵ Simulované žihání (*simulated annealing*) je stochastická optimalizační metoda, inspirovaná procesem žhání oceli. V procesu prohledávání prostoru možných řešení úlohy figuruje teplota, od jejíž hodnoty se odvozuje pravděpodobnost přijetí nebo nepřijetí horšího či lepšího řešení.

2.6. Publikování výsledků

Sdílet lze jednak model, jednak výsledky experimentů. Sdílení modelů je možné skrze veřejně dostupné online knihovny (například <http://www.openabm.org/models>). Zařazení modelu do knihovny je podmíněno splněním několika formálních požadavků, mezi které patří:

- přehledně formátovaný, komentovaný kód modelu, srozumitelný uživatelům,
- kompletní dokumentace dle ODD (nebo jiného ekvivalentního protokolu) taková, aby bylo možné model replikovat i bez využití komentovaného kódu,
- podrobné informace o spuštění simulace včetně objasnění způsobu práce s externími zdroji.

Obdobně i redakce tematických časopisů (např. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* – *JASSS*, *Complex Adaptive Systems Modeling* – *CAS*, *PloSOne*) vyžadují doplnění rukopisu článku odkazem na model. Výhodou je používání volně dostupných nástrojů (NetLogo, Repast), protože čtenář se pak může s modelem podrobně seznámit.

Vedle již zavedených formalismů pro popis modelů (ODD, ODD+D) se aktuálně objevují pokusy o standardizaci způsobu prezentace a vizualizace výstupů simulací (Polhill 2014, workshop na konferenci ESSA 2014, projekt diggingintodata.org). Přehledné uspořádání výstupů nabývá významu zvláště u rozsáhlých (*large-scale*) modelů, v nichž figurují desítky parametrů a až statisíce agentů.

3. Příklady modelů – případové studie z doby latéské

V této kapitole bude prezentována výzkumná metoda na příkladu konkrétních modelů. Tyto modely, které byly realizovány v rámci projektu „Sociální modelování jako nástroj k porozumění struktury keltské společnosti a kulturní změně na konci doby latéské“, byly vytvořeny tak, aby pokrývaly základní aspekty fungování pozdně latéské společnosti reprezentované oppidem Staré Hradisko a jeho okolím (pro další informace viz: Danielisová 2014; Danielisová et al. 2015; Danielisová — Hajnalová 2014; Cimler et al. 2012; Machálek — Olševičová — Cimler 2012; Machálek — Cimler — Olševičová — Danielisová 2013; Olševičová — Cimler 2012; Olševičová — Cimler — Machálek 2012; Olševičová et al. 2014; Olševičová — Danielisová 2014a; 2014b), zejména: předpokládaný demografický vývoj populace, možnosti realizace potravinové produkce, s tím související odhady časové náročnosti zemědělských prací a odhady pravděpodobných změn v krajině. Pro doplnění celkového obrazu použitelnosti agentového modelování jako metody připojujeme i model dobývacích taktik.

Každý zde prezentovaný model si klade za cíl řešit na dílčí otázku nebo hypotézu. Jsou navrženy tak, aby optimálně využity všechny dostupné zdroje dat a další podklady. Zároveň je naším cílem co nejnázorněji demonstrovat principy tvorby sociálních simulací. Vzhledem k omezenému prostoru budou modely prezentovány ve zkrácené podobě, na rozdíl od přehledu v kapitole 2. Ten by měl být závazný při publikaci jed-

notlivých modelů. Popisy všech modelů jsou strukturovány stejně:

- Nejprve je uveden smysl modelu (cíl, hypotéza, otázka).
- Následuje shrnutí teoretických východisek s výčtem zásadních konceptů, které musí model zahrnovat.
- Poté je vysvětlen návrh modelu a jeho technická realizace.
- Dále jsou uvedeny typy experimentů, které lze s modelem provádět. Experimenty jsou určeny pro studování chování modelů. Je vysvětlen účel každého experimentu a možnosti interpretace výstupů (výsledků).
- Nakonec jsou naznačeny možnosti dalšího rozšiřování a doplňování modelu.

Výstupy z prezentovaných experimentů je nutné chápat ilustrativně, než závazně ve smyslu konečného potvrzení nebo vyvrácení hypotéz nastíněných v projektu. Na tomto místě si neklademe ambice s konečnou platností objasnit všechny příčiny vývoje společnosti doby laténské na našem území (na to je chystaná samostatná publikace), nýbrž vysvětlujeme výzkumnou metodu. Je nutné také brát v potaz, že jednotlivé modely jsou do značné míry závislé na empirických datech a expertních znalostech, které ne vždy mohou poskytnout jen archeologové. Kompletování modelů by v ideálním případě mělo probíhat na multidisciplinární úrovni za konzultací se specialisty z oblasti zemědělské vědy, paleo-klimatologie, etnografie atd.

3.1. Model demografického vývoje

Cíl

Agentový model slouží ke generování datových řad, popisujících syntetickou populaci, tj. počty obyvatel v jednotlivých věkových kategoriích a odvozené údaje (celkové energetické nároky populace, disponibilní pracovní síla), včetně generování dat, odpovídajících různým depopulačním scénářům, které vyplývají z archeologických pramenů (např. Danielisová — Miličtík 2014, 61–62).

Teoretická východiska

Předpokládá se, že počet obyvatel oppida Staré Hradisko v období jeho vzniku (po roce 150 př. n. l.) pozvolna rostl, aby následně okolo roku 70 př. n. l. začal opět klesat.

Výchozí velikost populace mohla činit cca 600–800 obyvatel (vyplývá ze struktury osídlení). I když přesné údaje o struktuře a velikosti rodin nejsou známy, rámcově lze předpokládat existenci typických nukleárních rodin – „domácností“ o 4–6 členech a, vzhledem k velikosti sídelní jednotky na oppidu, patrně širších skupin o 20–22 členech (předpokládaný počet obyvatel jednoho dvorce, na základě jeho velikosti a struktury). Na tato čísla mohou navazovat úvahy o celkové energetické spotřebě populace a o dostupné pracovní kapacitě. Následně z odhadů spotřeby a pracovní kapacity můžeme usuzovat na velikost hospodářského zázemí. Populační data jsou tedy stěžejním východiskem všech pokusů o modelování zacházení s přírodními zdroji, dopadů činnosti člověka na krajinu, ekonomických procesů atd.

Předpokladem je, že, pokud nepůsobí jiné faktory, populace roste nebo klesá exponenciálně nebo logaritmicky. Za rapidní roční demografický přírůstek se při vhodných podmínkách považuje 1–2 % (Turchin 2009, 12). Pokud je v modelu nastaven počáteční počet obyvatel mezi 600 a 800, maximální dosažená populace po 100–120 letech je mezi 2000–5000. Nejjednodušší Malthusiánský model růstu populace předpokládá exponenciální růst:

$$P(t) = P_0 e^{rt} \quad (1)$$

(P_0 – počáteční populace, r – rychlost přírůstku, t – čas)

Pokud je cílem modelu vytvořit syntetickou populaci s rozdělením pohlaví a věkových tříd, je vhodnější využít historická demografická data. Prehistorickým populačním jsou nejbližší statistické úmrtnostní tabulky (konkrétně Model Life-Tables Level 3 a 6 West) vytvořené Coalem a Demenym pro původní římskou populaci (Salter 1994). Pro ženy mezi 15 a 49 roky věku musí být také v modelu zohledněna procedura porodnosti (z historických dat vyplývá průměrně 5,1 porodů na jednu ženu), která operuje s pravděpodobností Q .

Vygenerovaná syntetická populace musí vykazovat stabilní poměr mužů a žen i podíly zastoupení jednotlivých věkových kategorií. Těch je v modelu uvažováno sedm: kojenci, batolata, menší děti, větší děti, mladí dospělí, dospělí, staří jedinci. Na základě těchto kategorií může být pak v modelu odvozen pracovní potenciál populace dvojího druhu (dělený podle fyzických kapacit): tzv. „silný“ („*strongforce*“) – dospělí a mladí muži, a tzv. „slabý“ („*weakforce*“) – starší děti, mladí dospělí – ženy, dospělé ženy, starší jedinci. Toto rozdělení zároveň umožňuje vypočítat energetické nároky obyvatelstva podle kalorických tabulek pro jednotlivé věkové kategorie (detailně viz Danielisová et al. 2015, 106–111).

Model generuje populační data, odpovídající předem formulovaným alternativním scénářům:

- 1) Za základní (nulovou) hypotézu (tzv. „*Baseline*“) lze pokládat rovnoměrný exponenciální roční přírůstek. Dále se v modelu uvažují dva základní depopulační scénáře, korespondující s možnými hypotézami o úpadku osídlení oppida:
 - 2) *Náhlý či pozvolný úbytek části obyvatel* – zasahuje rovnoměrně všechny věkové kategorie (uvažuje se odchod celých rodin), má současně vliv na zmenšující se velikosti stád (odcházející obyvatelstvo si s sebou pravděpodobně odvedlo část majetku), a to se promítá do možností obhospodařovat pole i do velikosti hospodářského zázemí.
 - 3) *Epidemie* – projevuje se nerovnoměrným úbytkem v některých věkových kategoriích (děti, staří lidé) a se zpožděním (cca o dekádu) se projeví i propadem dostupné pracovní kapacity,

Návrh modelu

Model je koncipován jako agentový, kde agentem je jednotlivý obyvatel oppida. Agent je popsán dvěma základními parametry (věk, pohlaví), další parametry jsou

odvozené (zařazení do věkové skupiny, energetická potřeba). Jeden krok simulace odpovídá jednomu roku. V každém kroku dojde k obnovení stavu populace, tedy k navýšení věku agentů (až do doby dožití, dané úmrtnostními tabulkami), a přidání nových agentů (přírůstek populace, procedura definující porodnost Q se aplikuje na agenty-ženy). V případě, že je uplatněn depopulační scénář, dochází od 70. kroku simulace (odpovídajícímu 70. roku existence oppida) k odebrání agentů.

Model má následující vstupní parametry:

- počáteční velikost populace mezi 500 a 800 jedinci (alternativně lze nastavit i jinou hodnotu),
- počáteční věková struktura populace,
- interpolované úmrtnostní tabulky (Model Life-Tables Level 3 nebo 6 West),
- pravděpodobnost Q pro ženy mít dítě v konkrétním roce.

Pro určení pravděpodobnosti Q , byl použit nástroj *BehaviorSearch* s využitím genetických algoritmů. Na to musely být definovány objektivní funkce vyjadřující dosažení definované velikosti populace a zároveň udržení její originální struktury, definované na počátku simulace. Funkce (F_1) vyjadřuje procentuální změny ve finální populaci x vzhledem k počáteční populaci A .

$$F_1 = \frac{|x - A|}{A} \quad (2)$$

Funkce (F_2) reprezentuje průměrnou procentuální změnu v nastavených dvou pohlavních (muži, ženy) a sedmi věkových kategoriích (kojenci, batolata, menší děti, větší děti, mladí dospělí, dospělí, staří):

$$F_2 = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \frac{|x_i - x'_i|}{x'_i} \quad (3)$$

Výstupem modelu jsou datové řady o počtu obyvatel v jednotlivých věkových skupinách a jejich energetická spotřeba, a to za období 120 let. Tento výstup je využitelný v dalších modelech, například v modelu využití krajiny nebo v modelu alokace pracovních kapacit (*kapitoly 3.2, 3.4*), kde již nepotřebujeme sledovat počty jedinců s jednoráznými věkovými rozestupy, ale vystačíme s agregovanou hodnotou (např. počet dospělých mužů).

Použití modelu

V případě tohoto modelu se nejedná o experimenty ve smyslu zkoumání vztahů mezi proměnnými, nýbrž jen o generování výstupů, tj. datových řad pro alternativní demografické scénáře. Typové výstupy pro výchozí populaci 800 osob jsou uvedeny na *obr. 4*.

Možnosti rozšíření

V této základní verzi je agent chápán jako nezávislá jednotka. Rozšíření modelu může spočívat v zavedení re-

lace potomek-rodíči, což by umožnilo definovat rodinné, případně i vlastnické struktury (např. alokace půdy) v eventuelně složitějším modelu zahrnujícím i společenské aspekty.

Model v současné době nezohledňuje také detailnější aspekty života domácností jako např. výběr partnera a vytváření různé početných rodin (např. nukleární versus rozšířená), protože tyto parametry by musely být nastaveny arbitrárně bez opory v datech. Model by se tak posunul více do explorační roviny.

3.2. Model zemědělské krajiny a jejího využití

Cíl

Model slouží jako virtuální laboratoř pro testování kauzálních rolí demografických, ekonomických a environmentálních faktorů při formování široké škály strategií využití krajiny. Prostorově je ukotven v krajině kolem oppida Staré Hradisko a data k rostlinné a živočišné produkci čerpá z archeologických pramenů. Demografické údaje jsou čerpány z populačního modelu (viz *kapitola 3.1*). Pravidla pro rostlinnou a živočišnou produkci pocházejí z dostupných zdrojů (detaily viz *Danielisová et al. 2015; Danielisová — Hajnalová 2014*). Model je navržen jako emulativní (vychází z empirických dat), v rozšířeních může být však doplněn o prvky explorační povahy (např. sociální vztahy, interakce apod.).

Model byl vytvořen za účelem zkoumání vztahu mezi rostoucí populací a intenzitou využíváním krajiny – slouží ke zkoumání subsistenční kapacity oppida za stanoveného „modelového“ předpokladu, že obyvatelé museli být soběstační ve smyslu potravinové produkce, měli k dispozici určitou velikost zemědělských ploch, a praktikovali smíšené hospodaření kombinující rostlinnou a živočišnou produkci. Model zohledňuje i nutnou pracovní investici na pokrytí lidských a zvířecích energetických nároků včetně alokací pracovních kapacit nad rámec základní produkce (viz *kapitola 3.4*). Součástí jsou i faktory ovlivňující meziroční úrodu.

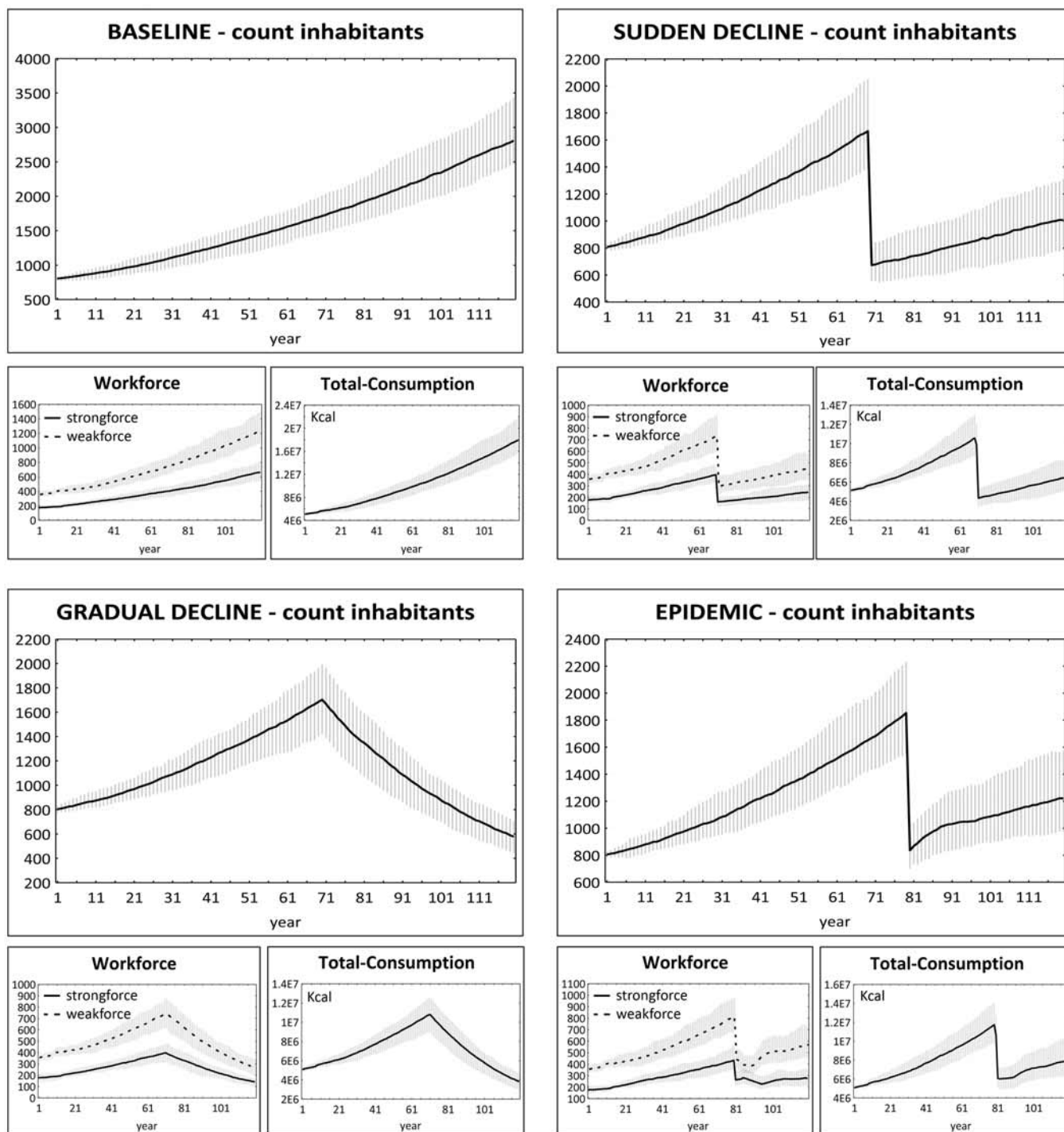
Teoretická východiska

Vztah mezi růstem populace a společenským vývojem závisí, mimo jiné, na dostupnosti základních zdrojů, schopnosti komunity tyto zdroje přetvářet v produkty a v neposlední řadě na stupni sociální organizace těchto procesů.

Při aproximaci hospodářských strategií sídliště je nutné vycházet ze dvou předpokladů:

- 1) populace (lidská a zvířecí) má energetické nároky a výdaje (pracovní kapacity),
- 2) strategie využívání krajiny jsou ovlivněny jejím charakterem (vhodností), dostupností a zvolenými postupy zacházení s přírodními zdroji.

Pravidla pro zabírání a využití prostoru v okolí sídliště vycházejí, kromě vlastní vhodnosti plochy, jednak (1) z pravidel efektivity pohybu, v archeologii známých jako *least effort models* (*Hagget — Clifff — Frey 1977*), jednak (2) z teorie ekosystémů (*Bayliss-Smith 1978; Ebersbach 2002; Schreg 2011*), která přímo zohledňuje



Obr. 4. Výstup modelu demografického vývoje – stabilně rostoucí populace („Baseline“), stabilně rostoucí populace s jednorázovým poklesem, odpovídajícím masivní emigraci („Sudden decline“), populace zpočátku rostoucí a následně klesající, v souladu s představou postupného odcházení obyvatel („Gradual decline“), stabilně rostoucí populace s jednorázovým poklesem nerovnoměrně postihujícím věkové skupiny („Epidemic“). Medián hodnot z celkem 100x spuštěné simulace pro každý rok. — **Fig. 4.** The model output of the demographic trends under different model scenarios – steadily increasing population (“Baseline”); steadily growing population with one-off decline, corresponding to massive emigration (“Sudden decline”); population initially growing and then declining in line with the concept of gradual abandonment of the site (“Gradual decline”); steadily growing population with one-off decline unevenly affecting individual age groups (“Epidemic”). The median values from a total of 100 simulations for each year.

demografii, subsistenci a organizaci pracovního nasazení ve vztahu k přírodnímu prostředí, a také (3) z daných limitů prostředí a populace (tj. limity produkce, při kterých se populace musí buď přizpůsobit svou velikostí, nebo inovovat své strategie, cf. Bayliss-Smith 1978; del Monte-Luna et al. 2004). Jako východiska je

nutné definovat úrovně základních zdrojů v ekosystému (tj. úživnost krajinných jednotek) a produkční potenciál populace tyto zdroje využívající (tj. organizace práce a pracovní síla). Struktura krajinných jednotek se mění v závislosti na velikosti populace (např. v rámci navržených demografických scénářů, viz kapitola 3.1, obr. 4).

V modelu jsou uvažovány dvě základní zemědělské strategie:

Intenzivní: obhospodařování zahrnující každoroční zorání, osetí, hnojení, manuální obhospodaření, rotaci plodin (obilniny, luštěniny). Jedná se o náročnou variantu z hlediska pracovních kapacit s vyšším výnosem na plochu (700–3000 kg/ha obilniny, 800–1400 kg/ha luštěniny, v nastavení modelu).

Extenzivní: pole zahrnovala také úhory (1 : 3 v nastavení modelu) obhospodařované s menší intenzitou bez manuální investice, hnojení úhorů pasoucími se zvířaty, rotace plodin nebo kontinuální produkce jedné plodiny. Jedná se o strategii s nižším výnosem na plochu (500–2000 kg/ha obilniny, v nastavení modelu) náročnou především na dostatečné prostorové kapacity a dostupnost.

Z obdělávaných ploch polí se odvozuje meziroční sklizeň ovlivněná náhodnými fluktuacemi v předem daném rozpětí, faktory ovlivňujícími úrodnost (zejm. hnojení) a konkrétními impakty (klimatické události, požáry, úbytek hospodářských zvířat apod.).

Základní principy modelu jsou:

- 1) Zajištění kontinuity produkce – každý rok musí být kromě pokrytí vlastní spotřeby část úrody rezervována pro nové osivo (zpravidla 200 kg/ha).
- 2) Udržení kontinuity soběstačné produkce – zajištění nutných rezerv pro roky se špatnou úrodou (zpravidla dvojnásobek roční energetické spotřeby obyvatel), případné doplnění rezerv externími zdroji.
- 3) Udržení kontinuity živočišné produkce – počet poražených (nebo jinak vyřazených) zvířat nesmí přesáhnout reprodukční schopnosti stáda konkrétního druhu (zpravidla 25 % zvířat).
- 4) Zajištění kontinuity udržitelného obhospodařování krajiny – hospodářsky využívané krajinné jednotky musí zůstat v dosažitelné vzdálenosti (vyjma lesa) a jejich potenciál nesmí být vyčerpán (např. klesající úrodnosti).

Návrh modelu

Model reprezentuje následující prvky socio-ekologického systému: populační dynamiku (lidé a zvířata), zemědělské strategie, primární produktivitu půdy, produktivitu půdy pod lidským vlivem, topografii (variabilitu terénu), variabilitu počasí, a vegetační sukcesí. V modelu se neuvazuje existence složitějších vlastnických a socio-ekonomických struktur, které by měly vliv na využívání půdy (např. vlastnické vztahy).

Časový rozsah simulace je 120 kroků – jeden krok odpovídá jednomu roku, kdy obnovení stavu buněk odpovídá procesům, probíhajícím během jednoho zemědělského roku. Zemědělský rok reprezentuje zimní a letní sezónu, dělenou na základě pracovní náplně.

Počítačový model využití krajiny je navržen na principu buněčného automatu (*celulární automata*). Každá buňka/políčko (*patch*) má několik biofyzikálních atributů, které vystihují její potenciál pro využití: topografii, původní pokryv a dostupnost z centra. Tyto atributy byly vyjádřeny pomocí kombinace sady rastrových map

(GIS) vrstev o rozlišení 20 x 20 m (400 m²) pro celkovou rozlohu 70 km². V modelu jsou použity jak primární, tak sekundární (odvozené) vrstvy:

- **Primární** – reliéf (topografie), hydrologie, geologie a půdy (kvalita půd), potenciální vegetace.
- a) Svažitost – výchozí proměnná pro výběr ploch pro pole a pastviny, rozdělena do čtyř kategorií (3 kategorie vhodnosti a nevhodné).
- b) Hydrologie – zahrnuje (1) vzdálenosti od vodních toků, modelovaných pomocí spádových území z topografie a fluvialních sedimentů z geologických map použitých pro kontrolu, (2) tzv. topografický *wetness index*, který vyjadřuje tendenci políčka být saturováno vlhkostí vzhledem ke spádové oblasti pro odtok povrchové vody. Obě vrstvy jsou zásadní pro predikci polí a pastvin.
- c) Původní kategorie pokryvu jsou půdy a vegetace: podle prediktivních map potenciální přirozené vegetace a analýzy uhlíků z oppida (*Neuhäuslová et al. 2001; Přichystal — Opravil 1992*) se v modelu počítá s lesy s různým druhovým složením (dub, habr, lípa, javor, jasan, buk, jedle), využitelným jako stavební a palivové dřevo. Množství dřeva (suroviny) na jednotku plochy (buňku) se generuje v modelu náhodně podle rozpětí se stejnou střední hodnotou.
- **Sekundární** – dosažitelnost ze sídliště (náročnost průchodu terénem – tzv. frikce), prediktivní mapy vhodnosti polí, pastvin.
- a) Dostupnost ze sídliště – je modelována jako vzdálenost na základě jednotek frikce (náročnosti průchodu terénem). Jako základ byla zvolena dochozí vzdálenost jedné hodiny, modelované pomocí rovnice (*Gorenflo — Gale 1990, 244*):

$$V = 6 * e^{-3.5(S+0.05)} \quad (4)$$

(V = dostupnost, S = svažitost v %)

Čím dále od sídliště, tím mohou být políčka méně preferovaná pro určitý typ aktivit a přesun na ně a zpět zabírá více času. Vzdálené plochy tak byly v modelu navíc penalizovány pro zakládání konkrétních aktivit (např. pole).

- b) Prediktivní vrstvy polí a pastvin – kombinace vrstev kategorií kvality plochy (půdní, vegetační pokryv, svažitost, *wetness index*) a dostupnosti ze sídliště, vyjadřující vhodnost políčka pro založení pole nebo pastviny. Nejdříve jsou v modelu vybírány nejkvalitnější plochy co nejbližší sídlišti. Čím dále od oppida, tím více se projevuje vliv vzdálenosti.

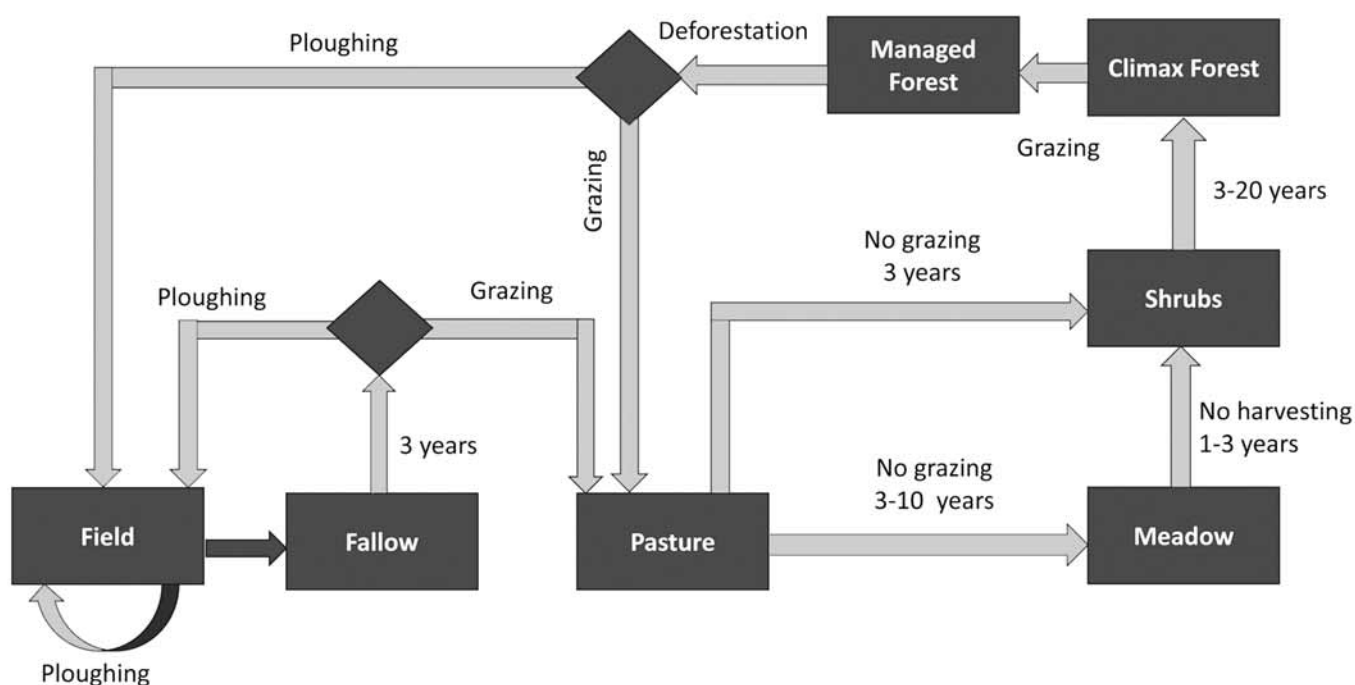
V modelu bylo definováno celkem 5 základních (9 specifických) kategorií využití krajiny (*tab. 2*): Konkrétní poznatky o transformaci krajiny vyplývají z mapových podkladů a obecných předpokladů o fungování přírodního prostředí v době laténské.

Jednotlivé kategorie se mohou různým využitím změnit v jiné (*obr. 5*).

Simulace začíná načtením biofyzikálních atributů pro jednotlivé buňky. Každá buňka aktualizuje svůj stav na základě momentálního využití. Předpokladem modelu je, že krajina byla v počátcích osídlení zalesněna

Hlavní kategorie	Specifická kategorie	Stručný popis a atributy
Obhospodařované plochy	<i>pole (fields)</i>	produkční jednotka – obdělávané, každý rok orané, oseté (intenzivní strategie) nebo každé 4 roky (extenzivní strategie)
	<i>úhory (fallows)</i>	neproduktivní jednotka (neobdělávané) pole 3 roky. Může být využito k pastvě (pastva nebo úhor obohacuje plochu o živiny).
Travní plochy	<i>pastviny (pastures)</i>	pastevní plochy, mohou být zorány a změněny na pole, pokud neobhospodařovány, mění se na křoviny
	<i>louky (meadows)</i>	nepastevní plochy, slouží k získání sena (zimní krmivo), pokud neobhospodařovány, mění se na křoviny
Lesy	<i>křoviny (shrubs)</i>	neobhospodařované plochy – 1–3 let po opuštění
	<i>využívaný les (managed forest)</i>	využívaný les, přirozený vegetační kryt nebo 3–20 let sukcese z křovin, využíván na těžbu dřeva, letninu (zimní krmivo), lesní pastvu, sběr palivového dřeva, může být odlesněn a využit na pole, pastviny
	<i>klimaxový les (climax forest)</i>	přirozený nevyužívaný lesní porost nebo dlouhodobě neobhospodařované plochy, 3–20 let sukcese z křovin, po 20 letech se stávají klimaxovým lesem, může být odlesněn a využit na pole, pastviny
Sídliště	<i>oppidum</i>	sídliště – neproduktivní kategorie, má centrální pozici – dostupnost se počítá odsud
Vodní zdroje	<i>vodní toky nebo buňky (water streams)</i>	vodní zdroje pro obyvatele sídliště a zvířata

Tab. 2. Definované kategorie využití krajiny. — Tab. 2. Defined categories of land-use.



Obr. 5. Krajinové kategorie a modelový proces jejich změny způsobené různým využitím (termíny viz Tab. 2). — Fig. 5. Landscape categories and model process of their change due to their different land-use (for terminology, see Tab. 2).

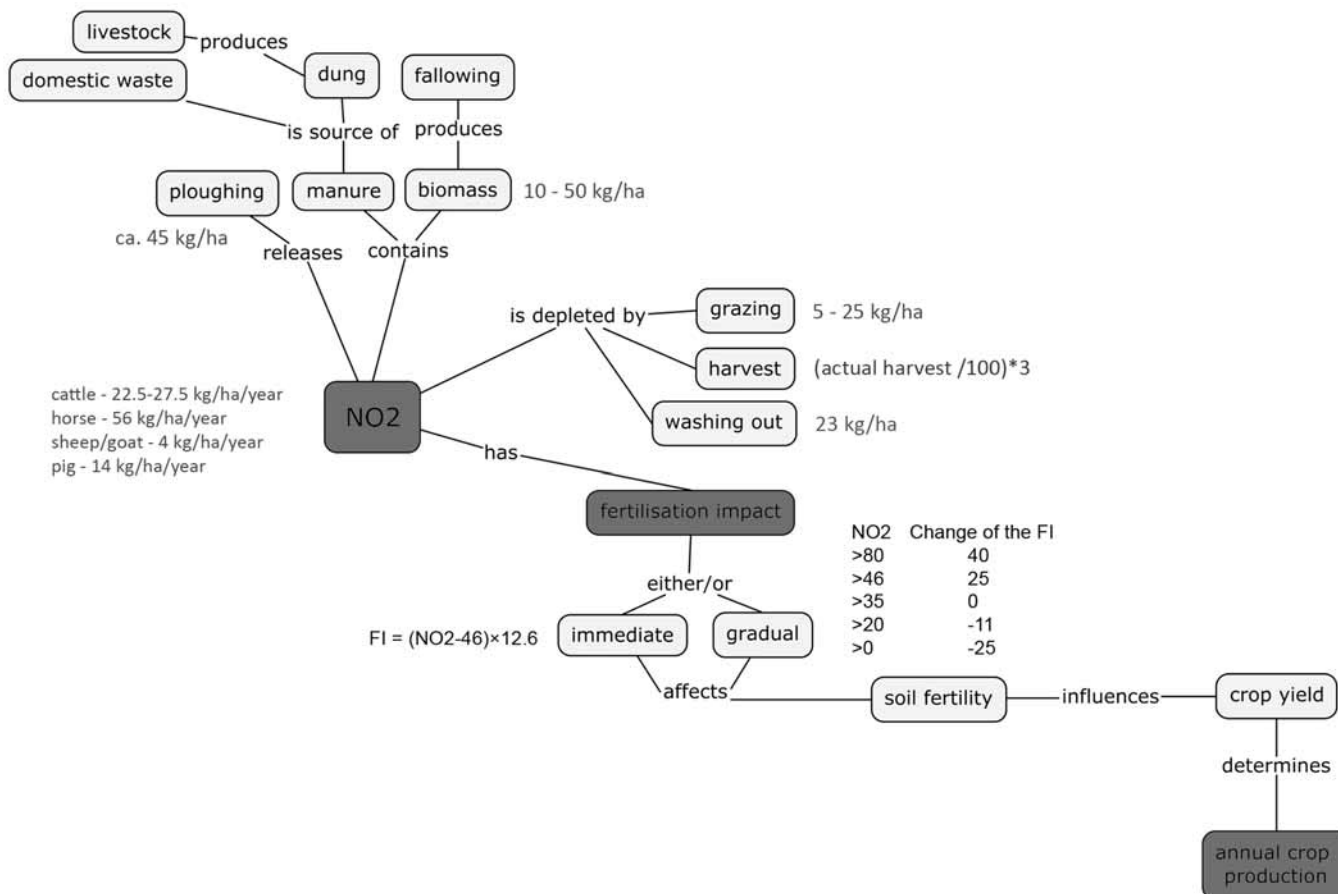
a postupně docházelo k její deforestaci. V době, kdy začíná simulace, je krajina již částečně kultivována výchozí populací (je zde určitý počet zvířat a v okolí lokality jsou pole v různém stadiu kultivace). Každý krok (= rok) simulace je potom započat aktualizací počtu obyvatel, počtu zvířat a jejich energetických nároků a pracovních kapacit. Postupně zvětšující se obhospodařované plochy zmenšují plochu lesa.

Pole a rostlinná produkce. Předpokládá se, že většinu energetické spotřeby populace pokrývaly obiloviny (pšenice a ječmen), zbytek luštěniny, proteiny (maso a mléko) a ostatní. Na základě definování parametrů produkce (vlastní spotřeba, nadprodukce, osivo, ztráty) a obecných zemědělských principů (meziróční fluktuace výnosů, čistý zisk) lze odvodit potřebné velikosti země-

dělských ploch. Simulovat lze proměny těchto ploch v čase (tj. v jednotlivých letech), a to jak změny velikosti (s rostoucí populací se plochy zvětšují), tak změny kvalitativní (výnos je ovlivněn úrodností půdy, ovlivnitelnou hnojením, úhorováním nebo rotací plodin).

Výpočet potřebné plochy každoročně osetých polí je uvažován tak, aby se dalo předpokládat, že příští rok, pokud nenastanou žádné neočekávané události, bude sklizeň dostatečná pro pokrytí aktuální spotřeby obyvatelstva a zajištění i určité rezervy (tzv. *safety margin*, Müller-Herold — Siefertle 1997). Plocha polí F se tak každý rok aktualizuje podle výpočtu⁶:

⁶ Další možností, jak stanovit plochu obhospodařovaných polí, je pomocí fuzzy logiky (viz kapitola 3.3).



Obr. 6. Schéma implementace koloběhu dusíku (NO₂) v půdě do modelu. — Fig. 6. Implementation scheme of the nitrogen (NO₂) cycle in the soil.

$$F = \left(\frac{TC \times pCD}{exY \times 3440} \right) \times (1 + r) + \left(\frac{IA \times SR}{exY} \right) \quad (5)$$

(TC – celková konzumace, exY – očekávaný výnos z ha /kcal/, pCD – % rostlinné složky v konzumaci, r – rezervy, IA – poslední aktuální rozloha polí /intenzivní nebo extenzivní strategie/, SR – osivo)

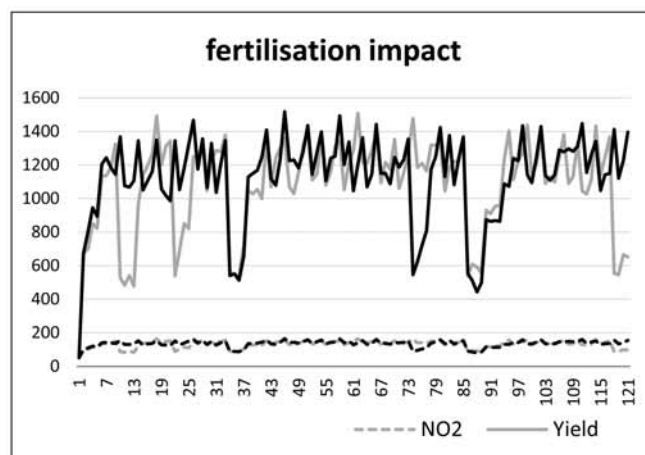
V případě extenzivní strategie se navíc započítává plocha, která aktuálně leží ladem, ale která se může po tuto dobu spásat. Na rozlohu polí (ale i pastvin) má také vliv produktivita (= úrodnost) buněk v modelu, která ovlivňuje produkci biomasy a vychází z koloběhu dusíku (NO₂) v půdě (obr. 6, 7).

Sledují se aktuální průměrné hodnoty dusíku, na základě kterých se pak pro každé políčko mapy vypočítává úrodnost. Z úrodnosti je potom odvozen tzv. „fertilisation impact“, který mezi jinými parametry má vliv na velikost meziroční produkce (obr. 7). Je počítán podle rovnice:

$$* FY = normal(exY, dev) + FI \quad (6)$$

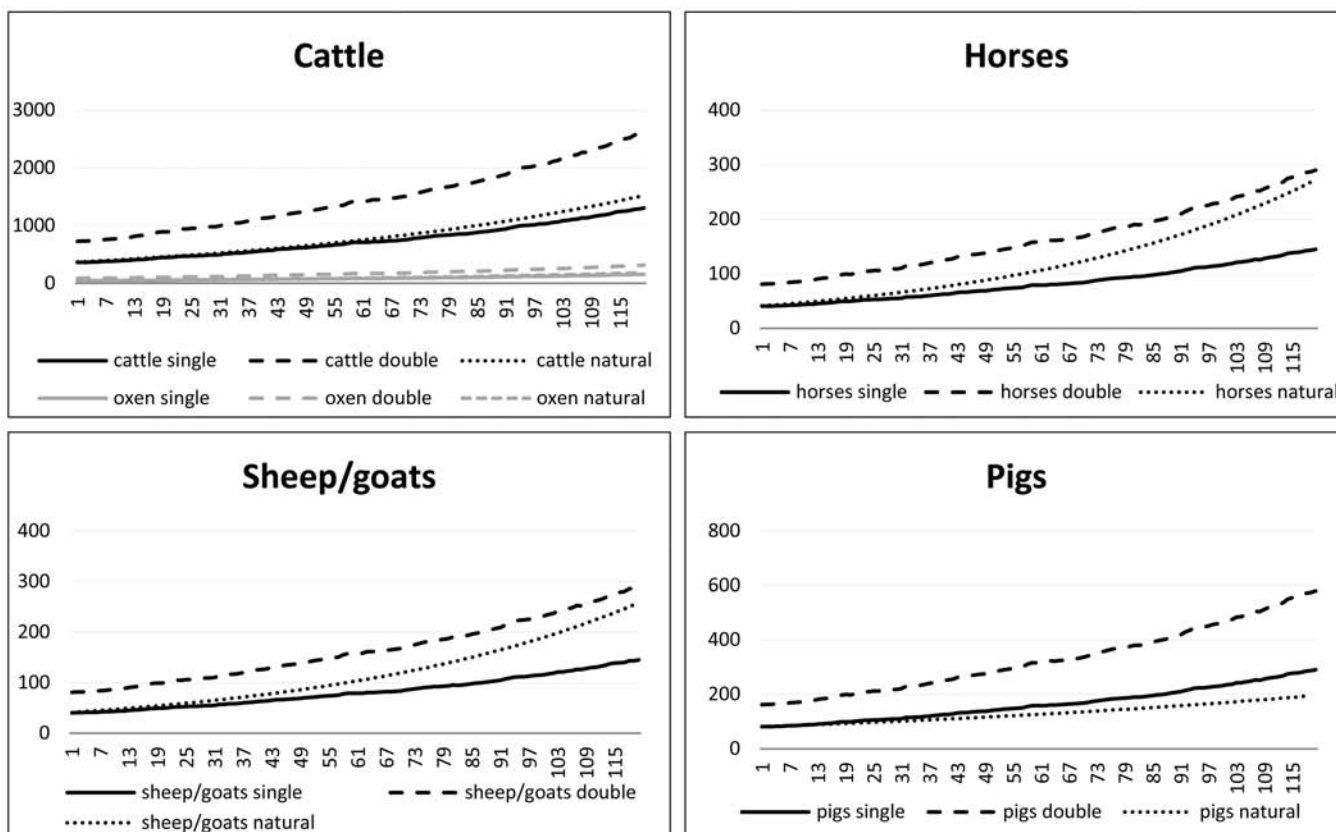
(exY – očekávaný výnos z ha (kcal), dev – meziroční fluktuace výnosů, FI – fertilisation impact)

Každý rok se sleduje velikost sklizně. Ve výsledku je obsažen jednak dlouhodobý trend v úrodnosti polí a jednak aktuální vliv externích faktorů zahrnutých do mo-



Obr. 7. Vliv dusíku na aktuální úrodu (výsledky dvou simulací). — Fig. 7. Effect of nitrogen on the current harvest size (results of two simulations).

delu (události jako počasí, nebo ztráty). Sklizeň je následně přepočítána na energetickou hodnotu (kcal). Objem sklizně je určen na spotřebu obyvatel, na výsev na další rok, a nespotebovaná část, pokud je, se po započtení ztrát přesune do zásob. Zásoby obilí z konkrétního roku se skladují maximálně 3 roky. Z porovnání stavu zásob a potřebných potravin na příští rok jde odhadnout vývoj simulace. Množství potravin (resp. její



Obr. 8. Počet jednotlivých zvířat v simulaci (základní demografický scénář - Baseline) dle jednotlivých nastavení (single = základní počet, double = dvojnásobný počet, oboje odvozeno od velikosti lidské populace, natural = počet odvozený od porodnosti/úmrtnosti). — **Fig. 8.** Numbers of livestock in the simulation (Baseline demographic scenario) according to individual model settings (single = basic number, double = double number, both derived from the size of the human population; natural = number derived from natural animal natality/mortality).

rostlinná složka) zahrnující aktuální sklizeň a zásoby je každoročně sledováno a z těchto hodnot se měří úspěšnost produkce (surplus vs. deficit), resp. soběstačnost komunity a situace, za kterých dochází k potenciální disponibilní nadprodukci. Ta je v souladu s historickými prameny (cf. *Erdkamp 2005*, 143, 155) počítána jako objem nad trojnásobným množstvím aktuálních energetických nároků populace.

Pastviny a živočišná produkce. Počet hospodářských zvířat je buď odvozen z aktuálního počtu obyvatel (je možné také počítat s dvojnásobkem základní hodnoty), nebo se řídí vlastními parametry porodnosti a úmrtnosti jednotlivých stád, které jsou také ovlivnitelné každoroční porážkou (*obr. 8*).

$$PA = \frac{(H \times 2 + S \times 0.1 + C \times 1.5) + (P \times 0.5 + (C - (PAS - H \times 2 + S \times 0.1)) \times 4)}{2 \pm 0.3} \quad (7)$$

(H – počet koní, S – počet ovcí, C – počet dobytka, P – počet prasat, PAS – celková plocha pastvin)

Proporce jednotlivých druhů v oppidálním stádu jsou určeny podle osteologických dat. Nejpočetnější skupinu zvířat tvoří dobytek, který je zásadní pro hospodářskou produkci sídliště. Je zdrojem nejen masa a mléka (tj. proteinů), ale také dusíku, na kterém je závislá velikost úrody. Tažná síla dobytka se využívá

při orbě. Koně jsou pouze zdrojem dusíku a v menším množství i zdrojem masa. Ovce/kozy a prasata jsou zdrojem masa (resp. mléka) a dusíku. Pro každý druh je předem nastavena délka laktací periody, výtěžnost z masa, mléka, hnoje a udržitelnost stáda v případě porážky.

Každé zvíře má také jiné preference ohledně pastvin; základem je, které druhy se mohou pást v lese (krávy, prasata) a které ne (ovce/kozy, koně). Podle těchto preferencí se v modelu odvozuje celkově odlesněná plocha. Proto se plocha pastvin PA (lesních a travních zahrnujících pastviny a úhory) se v každém kroku aktualizuje podle vzorce:

Pro stáda je také nutné zajistit krmivo, neboť model zohledňuje letní a zimní sezónu. Jako krmivo slouží seno, letnina, a přebytky z obilné produkce (zejména pro pracující zvířata v době orby). Plocha sečených luk MA se počítá:

$$MA = \frac{(C \times 5 + H \times 6 + S) \times 150 \pm 30}{3000 \pm 500} \quad (8)$$

(H – počet koní, S – počet ovcí, C – počet dobytka)

Lesy. Les se kácí kvůli nárokům na dřevo a také k získání místa pro zvětšující se populaci. Na sběr palivového dřeva je určena obnovitelná část lesní dřevní produkce. Plocha lesa *LFA* potřebná ke sběru letniny se počítá:

$$LFA = \frac{(C \times 6.5 + H \times 7.5 + S \times 1.5) \times 150 \pm 30}{2400} \quad (9)$$

(H – počet koní, S – počet ovcí, C – počet dobytka)

Každý rok se pro všechny buňky mapy vyřeší změny, které mohly nastat v průběhu roku, tj. potenciální přechod z jedné krajinné kategorie do druhé (např. zoraní úhory nebo pastviny, u úhorů se sníží o rok doba, za kterou leží ladem), obnovení biomasy na travních porostech, obnovení listnatých porostů, obnovení dřeva v lese a obnovení základní hodnoty dusíku v půdě. K přepočtu dusíku v zemi dojde také při sklizni a při pastvě. Sklizeň značně ovlivňuje množství dusíku (čím větší sklizeň, tím větší úbytek NO_2); při intenzivní strategii je potřeba jej doplňovat pomocí hnojení, při extenzivní strategii je doplňován úhorováním a přepásáním.

Každý rok se z aktuálního stavu populace odvodí její energetické nároky na daný rok, z toho vyplývá nutná velikost osetých polí a počet poražených zvířat. K sledování energetických výdajů slouží tzv. banka pracovních hodin zohledňující aktuální pracovní dispozice komunity (v relaci „*strongforce*“ a „*weakforce*“), ze které se odečítá čas potřebný na jednotlivé činnosti. Statistika z každého roku umožňuje určit, zdali byla komunita pracovní soběstačná (např. při sledování různých demografických scénářů viz kapitola 3.1), nebo její pracovní kapacity nestačily na pokrytí základních produkčních potřeb.

Experimenty

Následující experimenty ukazují, jakým způsobem lze zkoumat využití plochy *zázemí* lokality a strukturu jejích hlavních krajinných jednotek při různých strategiích, různě velké populaci a s jednoznačným cílem udržitelnosti produkce.

1) Využití krajiny při jednotlivých strategiích

V tomto experimentu se porovnává intenzivní a extenzivní strategie na počátku simulace a na jejím konci, za předpokladu, že populace oppida kontinuálně rostla od počátku osídlení až do konce – jako vstup tedy bude sloužit „*Baseline*“ scénář z populačního modelu (viz kapitola 3.1). Cílem je zjistit, jaká maximální populace lidí a zvířat je udržitelná v predikované ploše *zázemí* a zdali k překročení kapacity přírodních zdrojů dojde během doby simulace, která odráží dobu osídlení oppida.

V nastavení modelu mohou při intenzivní strategii nastat dvě možnosti: (1) buď se provozuje lesní pastva a travnaté pastevní porosty mají minimální rozlohu učenou pro zvířata, která se nemohou pást v lese,

nebo (2) je prostor odlesněn a všechna zvířata se pasou na travních porostech (stupeň zalesnění by zpřesnila např. pylová analýza). Kromě toho se v modelu počítají kosené louky, a plochy lesa určené ke sběru dřeva a letniny. Při extenzivní strategii se kromě pastvin a luk počítá s pasenými úhory.

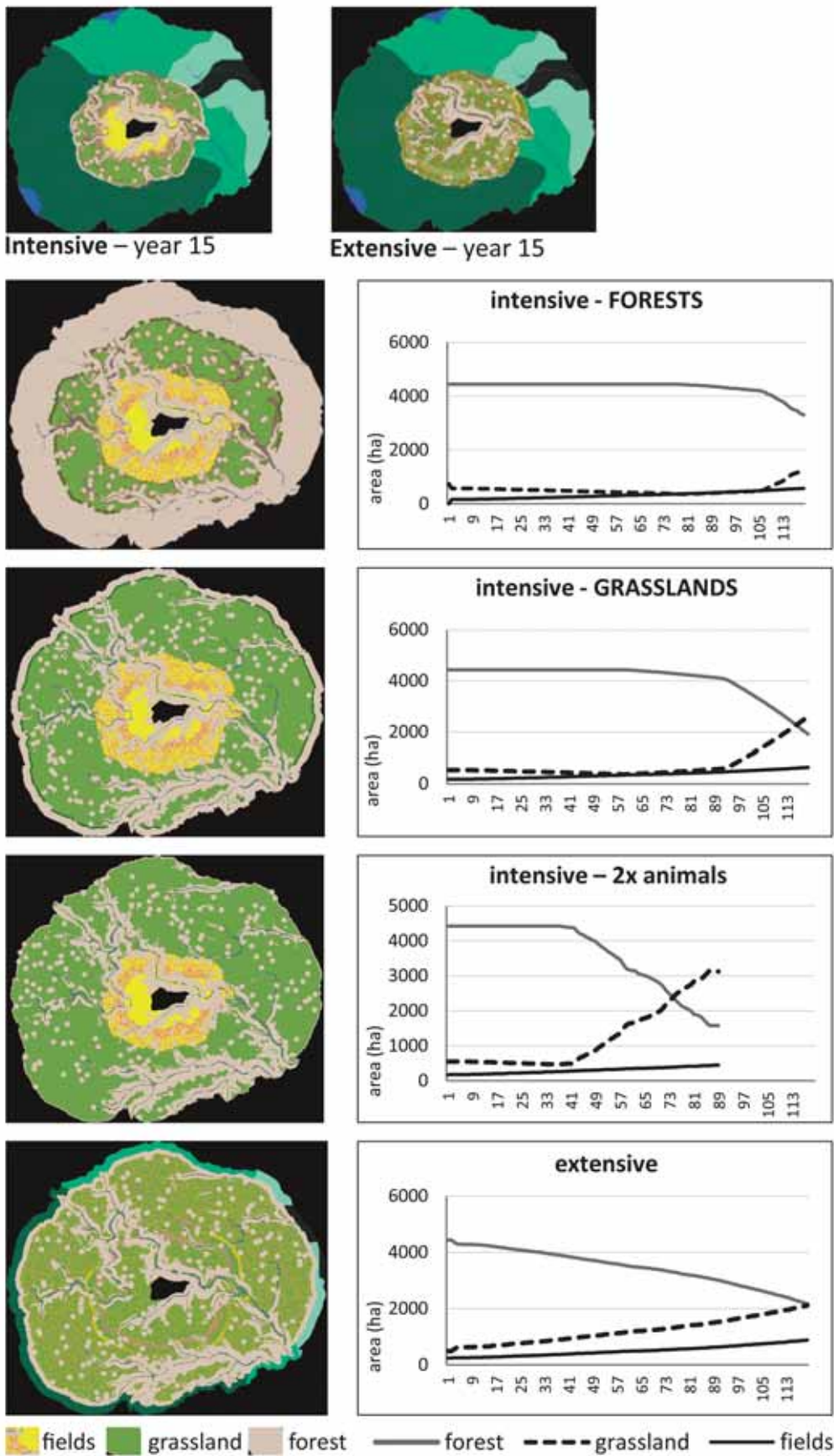
Výsledky ukazují obr. 9. Při nastavení mediánů výnosu při intenzivní strategii 1500 kg/ha, 3000 kg/ha travního porostu, 2400 kg/ha letniny a základního počtu zvířat je plocha *zázemí* využita, ale nevyčerpána, a maximum populace dosahuje modelové hodnoty v „*Baseline*“ scénáři (tj. nad 3000 lidí). Pokud počítáme s dvojnásobným počtem zvířat, vychází, že maximální velikost populace by se musela – při lpění na stávajících hospodářských strategiích – zastavit na hodnotě kolem 1500.

2) Úspěšnost a udržitelnost zemědělské produkce

V tomto experimentu se sleduje dlouhodobý trend sklizně, zásoby a úspěšnost produkce vzhledem k surplusu nebo deficitu (tj. nadbytku nebo nedostatku). Jako příklad je v experimentu uvedena intenzivní strategie. Úrodnost je podporována hnojením; vzhledem k tomu, že letní (pastevní) sezóna v modelu trvá většinu roku, počítá se s cca třetinovým množstvím hnojiva k dispozici pro hnojení oproti celkové produkci všech zvířat. Každoroční fluktuaci sklizně způsobuje mimo jiné i vliv počasí, v modelu implementovaný jako tzv. „*eventy*“ – klimatické jevy (bouřky, deště, kroupy, sucha, mrazy apod.) s větším či menším impaktem, jejichž frekvence byla modelována na základě historických záznamů ze stejného regionu (např. Brázdil et al. 2006). Pro zajištění dostatečné produkce na pokrytí energetické spotřeby obyvatel oppida včetně pojistek proti případné neúrodě (tzv. *safety margin*, cf. Müller-Herold – Sieferle 1997, 209–210), místní populace vytváří rezervy – obdělává větší rozlohu polí a přebytky z úrody skladuje.

V experimentu se sleduje, za jak velkých „rezerv“ se produkce stává stabilní, zdali se při žádných nebo malých rezervách objevuje „deficit“ (tj. nedostatečné zásoby na pokrytí základních energetických nároků populace) a od kdy se pravidelně objevuje „surplus“ (tj. množství potravin nad základními energetickými nároky populace a nad zásobami, které tvoří trojnásobný objem základních nároků). Se surplusem je poté možno volně disponovat – obchodovat, zkrmit zvířata nebo spotřebovat při jiných sociálních aktivitách (např. oslavy).

Nastavení experimentu zahrnuje: (1) základní populační scénář („*Baseline*“), 30 % množství dusíku z hnoje domácích zvířat a vliv počasí. Rezervy nad základní produkci činí 10 %, 50 % a 100 %. Výsledky (obr. 10 – „*Baseline – production*“) ukazují, že při pouze 10% nadprodukcí pravidelně především vlivem počasí dochází k situacím, kdy se populace potýká s nedostatkem (nízká úroda a vyčerpané zásoby). Při 50% nadprodukcí je populace soběstačná a při 100% nadprodukcí se pravidelně objevuje disponibilní surplus. (2) Do experimentu byla v 75. roce existence oppida začleněna událost, při které došlo ke snížení počtu domácích zvířat o polovinu (obr. 10 – „*Baseline – animal event*“). Výsledky ukazují, že zemědělská produkce se nedostala do deficitu, pouze pokud byla dvojnásobná, než základní spo-



Obř. 9. Experiment 1 – pŕıklad hospodařeni s krajinou a dynamika odlesňovani pŕi řůzných strategiech. V pŕiřpadě intenzivni strategie a dvojnásobného počtu zvířat simulace konči v roce 88, kdy je dosaženo maxima. — **Fig. 9.** Experiment 1 – example of land-use and deforestation dynamics under different economic strategies. In the case of an intensive strategy and double number of animals, the simulation ends in the year 88, when the maximum capacity is reached.

třeba. (3) Zákładni demografický scēnář byl pro situaci náhlého úbytku hospodářských zvířat srovnáván s modelem, kdy od 70. let dochází k postupnému úbytku po-

pulace. Je vidět (obr. 10 – „Gradual decline – animal event“), že pŕi menší populaci dochází po nějaké době k vyrovnání produkční úrovně, zejména vlivem opěťov-

ného dostatku dusíku v přepočtu na plochu polí vzhledem k nižší velikosti populace.

To se ukazuje také na stavu dusíku a jeho působení (obr. 11).

Výsledek experimentu mimo jiné potvrzuje výše uvedený předpoklad, že úspěšná produkce znamená cílené vytváření dvojnásobných rezerv (cf. *Erdkamp 2005*, 143, 155).

3) Pracovní kapacity populace v jednotlivých demografických scénářích

Cílem experimentu je zjistit, zdali je pracovní síla populace sídliště (v relaci „*strongforce*“ a „*weakforce*“) dostatečující k naplnění vytyčených produkčních cílů a jestli zbývá volná kapacita i na jiné aktivity (např. specializovaná výroba, volný čas, neproduktivní část populace – např. elita). Počítán je celoroční průměr ze všech aktivit. Trend přibývání nebo úbytku volného času také ukazuje vliv velikosti populace a zvolené produkční strategie (obr. 12). Porovnávány jsou jednotlivé demografické scénáře vytvořené v rámci populačního modelu (viz kapitola 3.1).

Z výsledků vyplývá, že větší populace je efektivní v naplňování produkčních cílů, menší komunity (patrně je to zejména na scénáři „*gradual decline*“) disponují proporcionálně méně volným časem. Významně se do pracovní síly promítl také vliv epidemie (scénář „*epidemic*“), kdy je patrný úbytek mladé generace v období po epidemii. V obecné rovině by se dalo říci, že méně volného času na jiné aktivity, než na ty spojené s produkcí potravin, znamená také snižování komplexity společnosti.

Možnosti rozšíření

Stávající buněčný model krajiny (*celulární automata*) může být doplněn o agentový model rodin obhospodářujících vlastní pole, případně i pastviny, protože již ve stávajícím modelu je počet zvířat přepočten na nukleární rodinu (domácnost – „*household*“), nikoliv na jednotlivce.

Simulace by tak mohla být obohacena o prvky explorativní povahy, a to sociální vlastnictví půdy a určitého počtu zvířat a o případné nerovné sociální postavení jednotlivých domácností vyplývající z jejich kapitálu.

Další možností je zkoumat pastevní využití krajiny pohybujícími se jednotlivými agenty reprezentujícími „*oppidální stádo*“ (tento model je momentálně testován v kombinaci systémové dynamiky a agentů v Anylogicu).

3.3. Model zemědělské produkce s použitím fuzzy-logiky

Cíl

Tento model reprezentuje alternativní přístup k modelování zemědělské krajiny. Předpokladem je, že lidé rozšiřovali obhospodářované území v okolí sídlišť v souvislosti s rostoucí spotřebou zvětšující se populace a že toto rozšiřování probíhalo účelně, tj. se záměrem hospodařit efektivně a docílovat maximálních výnosů za vy-

naložení minimální námahy (viz zmiňovaný *least effort* princip). Cílem v tomto případě explorativního modelu je zkoumání relevantních rozhodovacích procesů zemědělců ohledně vytváření prostorové struktury polí v krajině. Jako metodologický nástroj je zde prezentována predikce krajinných jednotek (konkrétně polí) pomocí fuzzy-logiky (model detailně publikován v Machálek et al. 2013).

Teoretická východiska

Předpokládá se, že hlavní část energetické spotřeby byla pokryta obilovinami. Ze znalosti spotřebních a dalších požadavků (nutnost tvořit zásoby a nachystat budoucí osivo, riziko ztrát a motivace vyrábět nadprodukt) a obecných zemědělských principů (medián výnosu z hektaru, plevnatost plodin, vliv počasí) je možné odvodit minimální požadovanou velikost obdělávaných ploch.

Při pokusu o kategorické vyjádření procesu vyhodnocování kvality obdělávatelných ploch minulými zemědělci je možné použít systém fuzzy-proměnných a fuzzy-logiky, které umožňují kódování specifických znalostí a chování systému v souvislosti s těmito znalostmi. Pravidla mají obecnou formu: *IF – THEN* (předpoklad – následek). Fuzzy-tvrzení jsou pak výroky jako „*x* je velké“, kde „*velké*“ je lingvistická proměnná definovaná fuzzy množinou (*Babuška 2001*; vysvětlení také viz *Danielisová et al. 2015*, 117–118). Ty umožňují zohlednění zejména subjektivních a aproximativních kritérií, jako je „blízko“, „daleko“, „dobrý“, „špatný“, „lepší“, „horší“ apod. (*Ross 2010*), tj. kritéria, které je obtížné vyjádřit číselně, ale je možné je vystihnout verbálně. V praxi tak přednost dostanou „blízká“ pole před „vzdálenými“, „úrodná“ půda před „méně výnosnými“ půdami a „rovné“ plochy před „svahy“.

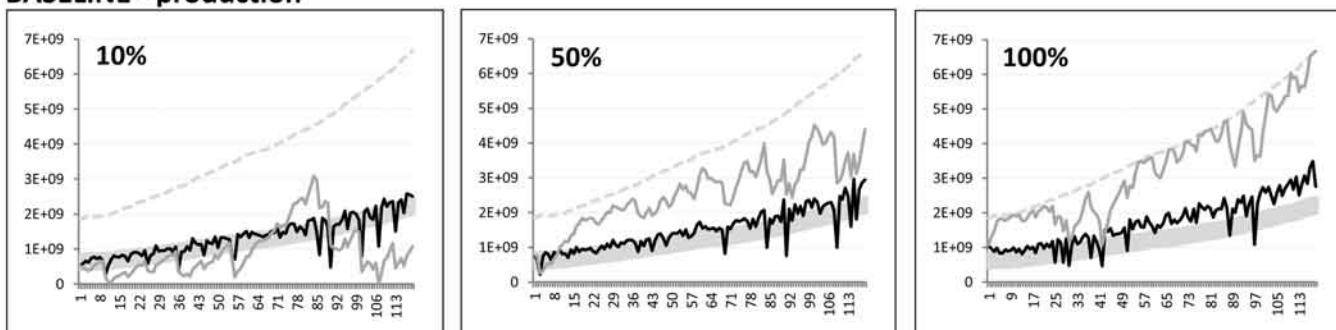
Vedle těchto prakticky neměnných (nebo variabilních v delším časovém úseku) charakteristik hrají roli i proměnlivé hodnoty, např. velikost výnosu v předchozím roce může indikovat mj. postupné vyčerpávání živin, volbu špatných ploch či zvolenou zemědělskou strategii, což se následně zohledňuje při rozhodování o obdělávaných plochách na příští rok.

Návrh modelu

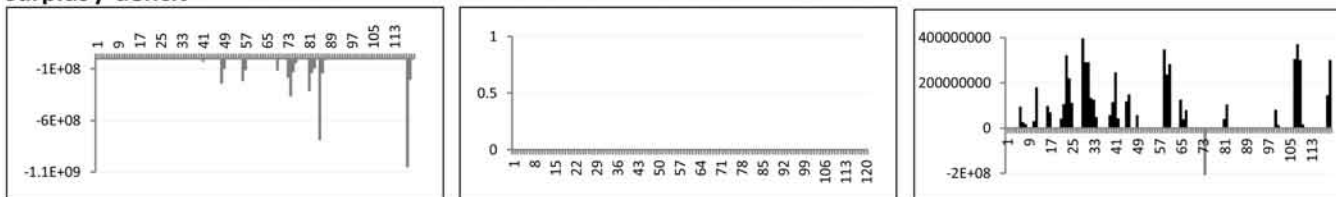
Model simuluje jednak proces rozhodování zemědělců o vhodnosti jednotlivých pozemků pro rostlinnou nebo živočišnou výrobu a jednak také rozlohu intenzivně obdělávaných zemědělských ploch na základě rozdílu mezi aktuální meziroční sklízni a roční spotřebou komunity. Vhodnost ploch a volba zemědělské strategie se řeší ve dvou úrovních:

- První vyhodnocuje krajinu z topografického hlediska (jako je dostupnost, svažitost, atd., z hlediska fuzzy-logiky cf. *Jarostaw — Hildebrandt-Radke 2009*; *Reshmidevi — Eldho — Jana 2009*).
- Druhá úroveň zavádí dynamický faktor (např. sklizeň z předchozího období). Komunita čerpá zkušenosti z minulých sezón ohledně vhodnosti využití konkrétních ploch k různým účelům.

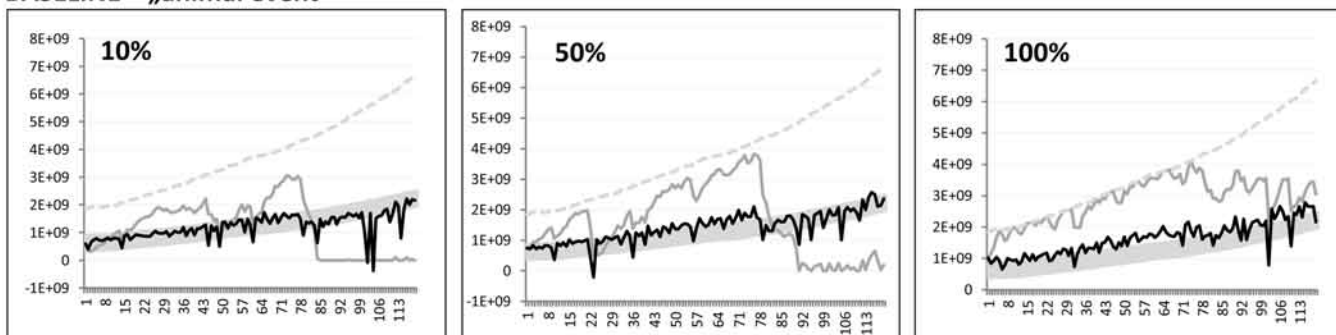
BASELINE - production



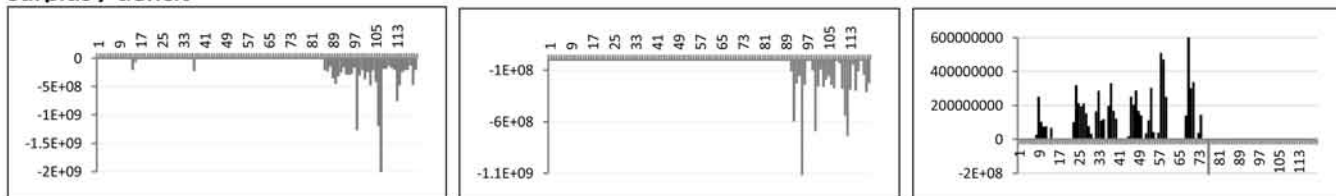
surplus / deficit



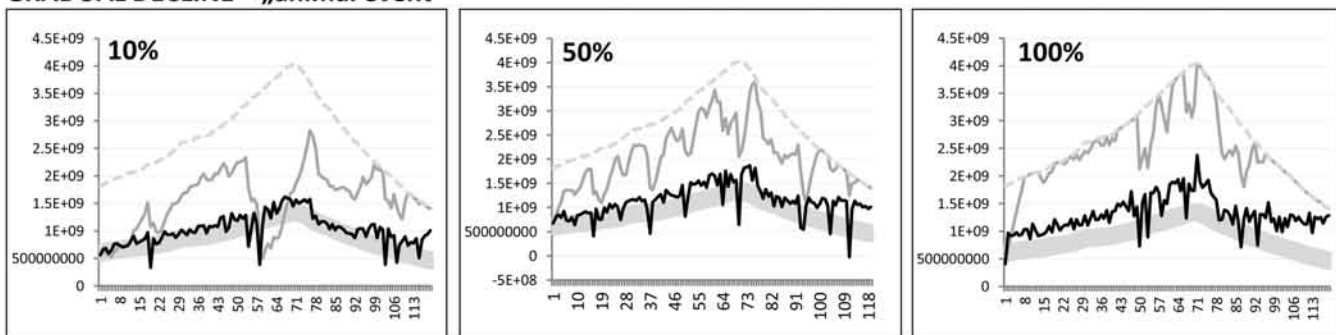
BASELINE – „animal event“



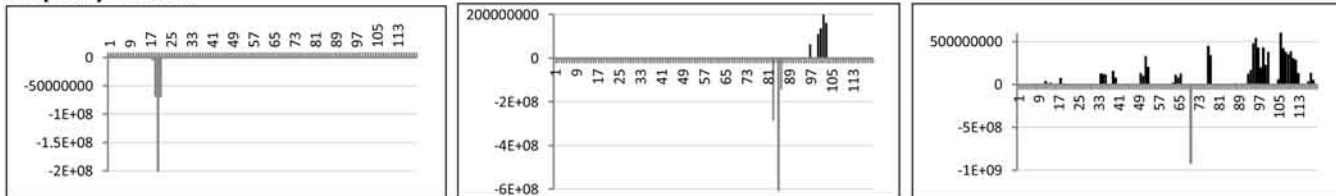
surplus / deficit



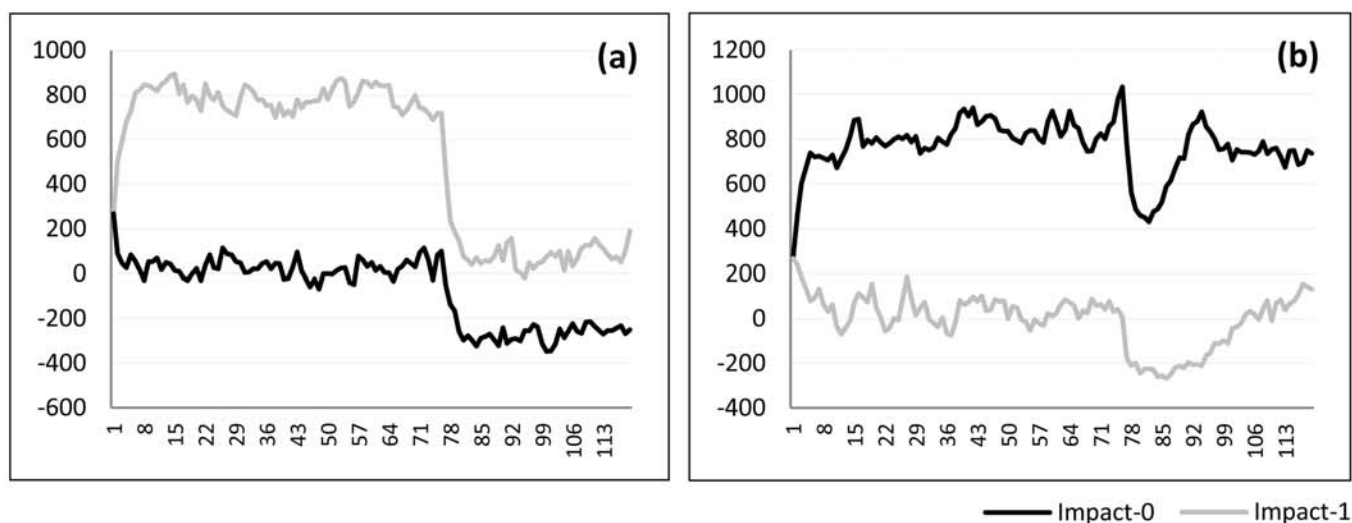
GRADUAL DECLINE – „animal event“



surplus / deficit

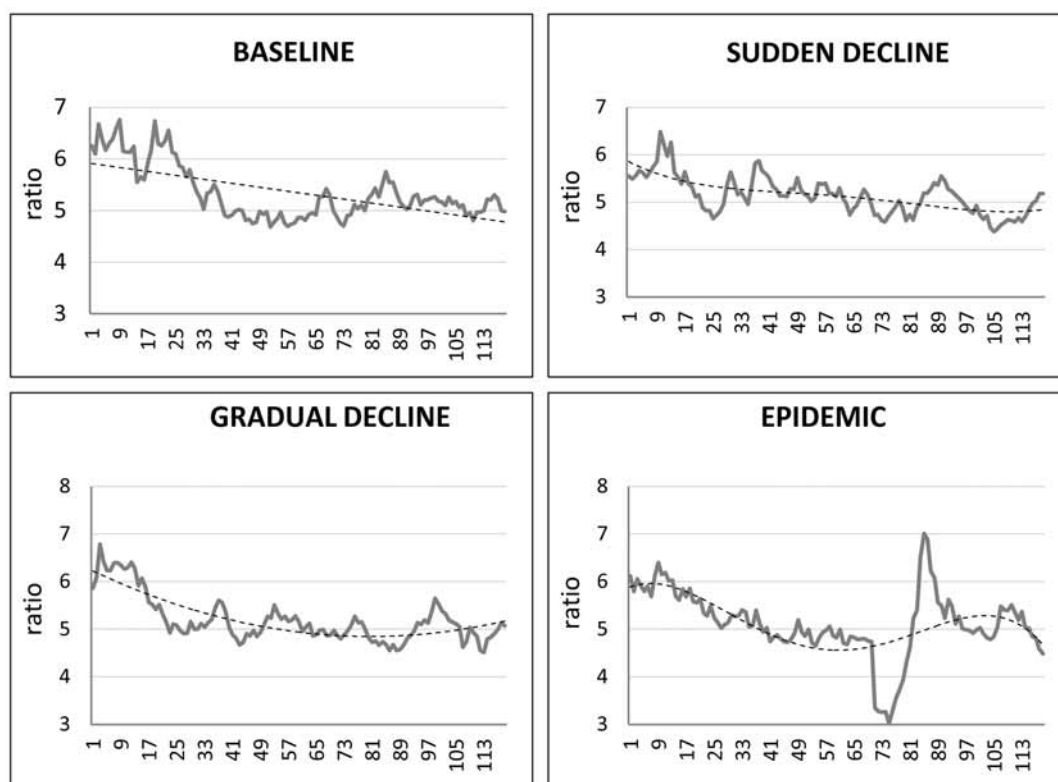


— current consumption — harvest - - - storage treshold — current storage ■ surplus ■ deficit

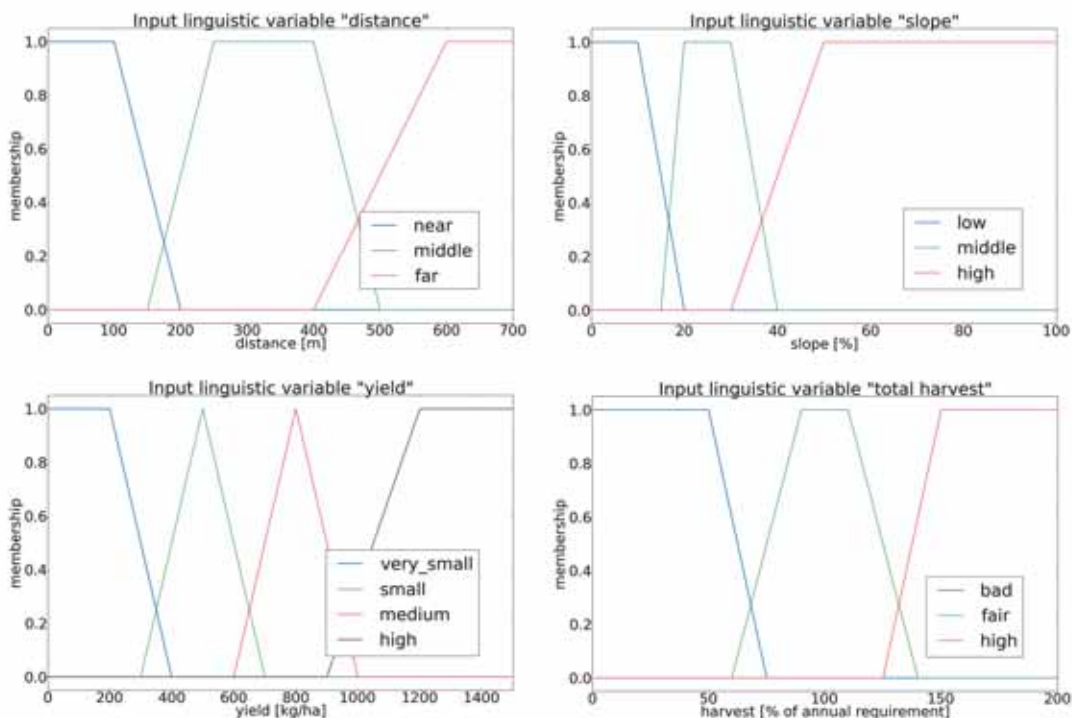


Obr. 11. Experiment 2 – tzv. fertilisation impact při náhlém úbytku domácích zvířat v 75. roce (Impact-0 = 10%, Impact-1 = 100% nadprodukce – hodnoty jsou nižší vzhledem k dvojnásobné ploše polí na stejný počet zvířat) v demografických scénářích Baseline (a) a Gradual decline (b). — **Fig. 11.** Experiment 2 – fertilisation impact upon a sudden decline of livestock in the 75th year (Impact-0 = 10%, Impact-1 = 100% overproduction – values are lower due to the doubled area of fields with the same number of animals) in the Baseline (a) and Gradual decline (b) demographic scenarios.

Obr. 12. Experiment 3 – trend proporce volného a využitého času na pracovní aktivity dle jednotlivých demografických scénářů (čím vyšší hodnota tím méně volného času). — **Fig. 12.** Experiment 3 – proportion trend of free time to work activities in individual demographic scenarios (the higher the value, the less free time).



Obr. 10. Experiment 2 – vliv velikosti rezerv nad základní produkci na dlouhodobý trend úspěšnosti rostlinné produkce. Výsledky ukazují, že od 50% nadprodukce je populace soběstačná a od 100% nadprodukce se pravidelně objevuje nadbytek (trojnásobné množství aktuálních energetických nároků populace). Podobně vliv náhlého úbytku domácích zvířat jako zdroje hnojiva nemá fatální vliv na zásoby od dvojnásobné produkce. V případě postupného úbytku populace se negativní vliv úbytku dusíku neprojevuje ani při nejmenších rezervách. — **Fig. 10.** Experiment 2 – impact of the reserves above basic production in the long-term trend of sustainability of crop production. The results show that at 50% overproduction the population is self-sufficient, and at 100% overproduction the surplus regularly appears (three-times the amount of the energetic requirements of the current population). Similarly, the impact of the sudden decrease of livestock as a source of fertiliser does not have a fatal effect on supplies from doubled production. In the case of gradual depopulation, the negative impact of nitrogen loss does not appear even at the smallest overproduction rate.



Obr. 13. Vstupní fuzzy vlastnosti, které charakterizují buňky v mapě. — **Fig. 13.** Input fuzzy properties that characterise the map cells.

Jako model krajiny bylo zvoleno jedno zemědělské sídliště na rozhraní několika typů zemědělských půd⁷. Jeden krok simulace odpovídá jednomu zemědělskému roku. Agent reprezentuje sídliště, obklopené ornou půdou. Mapa je podobně jako v kapitole 3.2 rastrem buněk, které jsou charakterizovány následujícími fuzzy vlastnostmi (obr. 13):

- *distance* – vzdálenost od sídliště,
- *slope* – svažitost,
- *suitability* – typ půdy (tři kvalitativní kategorie půdy, vodní plochy/toky, vlastní sídliště),
- *yield* – výnos z plochy. Stochastická povaha výnosů z jednotky plochy je dosažena použitím normálního náhodného rozdělení.
- *total harvest* – celková velikost sklizně, vyjádřená jako procento z roční spotřeby celé komunity. Odhad výnosu při intenzivní a extenzivní strategii odpovídá modelu v kapitole 3.2.

Pro proces fuzzifikace byly definovány dvě lingvistické proměnné:

1. *suitability* – kvantifikuje vhodnost buňky k rostlinné výrobě. Proměnná nabývá hodnot od 1 do 100, hodnoty blízké 100 odpovídají nejvhodnějším místům (blízkost obydlí, rovný terén, kvalitní půda), hodnoty blízké 0 odpovídají nevhodným místům (velká vzdálenost, svažitý terén, neúrodná půda).
2. *intensity* – kromě toho, že je v modelu zahrnut parametr specifikující rozlohu orné půdy obhospodařované intenzivní strategií, je možné také provádět autokorekci této hodnoty podle rozdílů mezi požadovanou a skutečnou sklizní. Proměnná *intensity* nabývá hodnoty 1 tehdy, když celková sklizeň odpovídá požadavkům.

⁷ Jedná se sice o konkrétní sídliště v regionu kolem Starého Hradiska, ale pro zkoumání chování modelu je možné použít i fiktivní krajinu.

Výnos buňky (y_p) se počítá dle vzorce:

$$y_p = \frac{25 \cdot h \cdot y}{10000} \cdot T \cdot r \quad (10)$$

($\frac{25}{10000}$ – přepočet výnosu na jednotku plochy v modelu, h – výnos z hektaru, $h \cdot y$ vyjadřuje variabilitu výnosů, T – koeficient vlivu zvolené strategie /1 – intenzivní, 0,3 extenzivní – s ohledem na úhory/, r – volitelný koeficient zohledňující dlouhodobé trendy, např. vliv klimatu)

Fuzzy-odvozování je poté definováno sadou 13 pravidel (tab. 3).

Použití modelu

Výstupem modelu je rozmístění intenzivně a extenzivně obdělávaných ploch a pastvin v okolí sídliště, které může poskytnout požadovaný celkový výnos při zvolené kombinaci zemědělských strategií (obr. 14).

Možnosti rozšíření

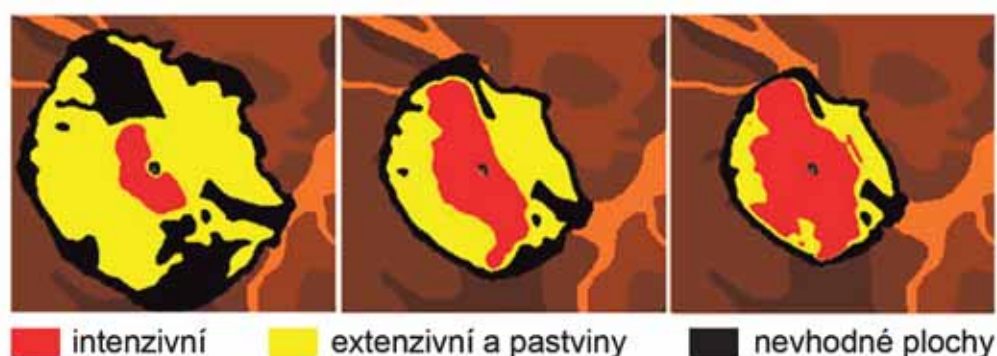
Jak fuzzy-proměnné popisující jednotlivé buňky v modelu využití krajiny, tak vlastní systém fuzzy-pravidel lze doplňovat a postupně tak zahrnout do modelu kromě produkce obilovin i další požadované prvky zemědělské produkce. Mechanismus rozšiřování ploch polí okolo sídliště ale je obecně použitelný, tj. je možné pomocí něj zkoumat i krajinu s více sídlišti. Namísto aplikace fuzzy-pravidel lze také uvažovat o analogickém systému, spočívajícím na jiných rozhodovacích mechanismech, např. na multikriteriálním rozhodování (vysvětlení metody pro GIS např. viz Eastman 2006, 126–134).

Tab. 3. Pravidla fuzzy odvození pro predikci polí. —

Tab. 3. Fuzzy inference rules for the prediction of fields.

RULE 1: IF yield IS very_small THEN suitability IS low;
RULE 2: IF slope IS high THEN suitability IS low;
RULE 3: IF distance IS near AND (slope IS low OR slope IS middle) AND (yield IS high OR yield IS medium) THEN suitability IS high;
RULE 4: IF distance IS near AND (slope IS high) AND (yield IS high) THEN suitability IS middle;
RULE 5: IF distance IS middle AND slope IS low AND (yield IS NOT very_small) THEN suitability IS high;
RULE 6: IF distance IS middle AND slope IS middle AND yield IS high THEN suitability IS high;
RULE 7: IF distance IS far AND (slope IS low) AND (yield IS medium OR yield IS high) THEN suitability IS middle;
RULE 8: IF distance IS far AND (slope IS middle) AND (yield IS NOT very_small) THEN suitability IS low;
RULE 9: IF distance IS near AND slope IS low AND yield IS NOT very_small THEN suitability IS high;
RULE 10: IF distance IS middle AND slope IS low AND (yield IS small OR yield IS very_small) THEN suitability IS low;
RULE 11: IF harvest IS fair THEN intensity IS normal;
RULE 12: IF harvest IS bad THEN intensity IS high;
RULE 13: IF harvest IS high THEN intensity IS low;

Obr. 14. Fuzzy model zemědělské produkce – příklad grafického výstupu při požadovaném celkovém výnosu 9000 kg a uplatnění intenzivní strategie na 10 %, 50 % a 90 % z celkové plochy. Světlá barva odpovídá extenzivním plochám a pastvinám, černě vyznačené plochy byly vyhodnoceny jako nevhodné. — **Fig. 14.** Fuzzy model of crop production – example of graphic output at the required total yield of 9,000 kg and the application of an intensive agricultural strategy at 10 %, 50 % and 90 % of the area. The light colour corresponds to extensively managed plots and pastures, while black areas are regarded as unsuitable.



3.4. Model alokace pracovních kapacit

Cíl

Model ukazuje možnosti rozdělení pracovních kapacit mezi paralelně probíhající zemědělské činnosti v klíčové části zemědělského roku, tzv. *bottlenecku*, tj. v období letní sklizně. Model se Starého Hradiska týká pouze volně, je aplikovatelný obecně na jakoukoli lokalitu nebo historické období, a to v mezích níže uvedených východisek.

Teoretická východiska

Produktivně soběstačná populace musí alokovat pracovní kapacity v průběhu roku tak, aby byla pokryta její celoroční spotřeba potravin (rostlinných a živočišných produktů).

Z hlediska hospodaření s pracovními kapacitami jsou klíčová dvě období: (1) orba a setí (jarní a podzimní) a především (2) období sklizně, kdy je nutné v relativně krátké době (2–6 týdnů) sklídit (Halstead 2014, 67–126), zpracovat a uskladnit jednak obilniny a luštěniny (s postupnou dobou dozrávání, závislou na lokalitě a počasí), jednak na loukách získat seno (zimní krmivo pro domácí zvířata) a nakonec se také věnovat dalším každodenním aktivitám (paušálně vedeným jako domácí práce, péče o zvířata atd.).

Dostupná pracovní kapacita se odvozuje od populačního modelu (v relacích „*strongforce*“ – těžší práce typu

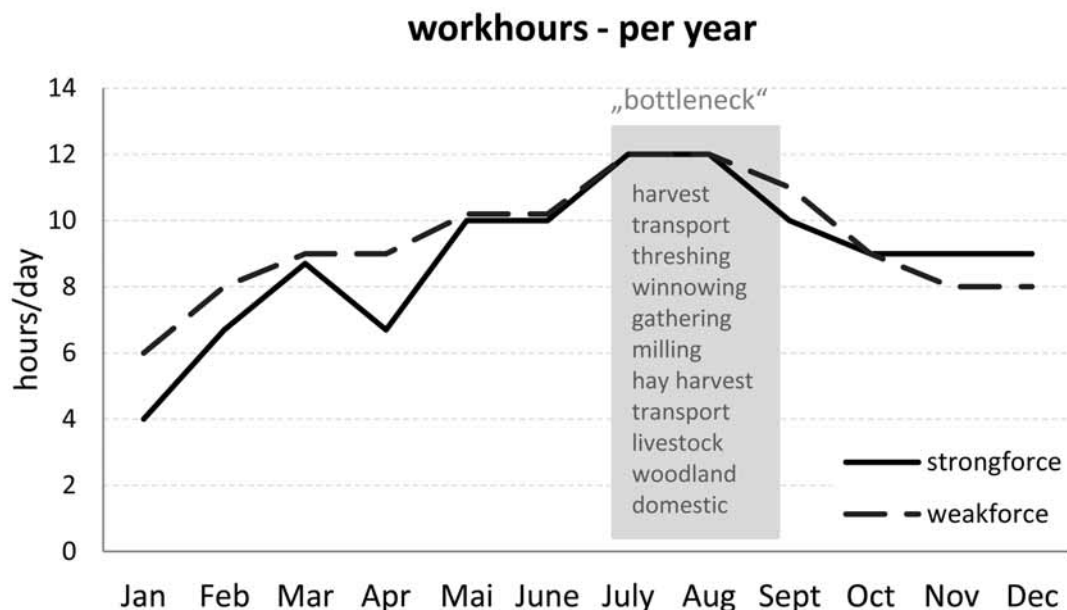
orba, kosení, a „*weakforce*“ – ostatní aktivity viz kapitola 3.1). Dále je třeba rozlišovat pracovní kapacitu celkovou (všichni dospělí muži) a reálně využívanou, která pravděpodobně byla nižší (předpokládá se existence nepracující společenské skupiny – pravděpodobně elity či kapacit trvale vyčleněných na jiné, než zemědělské práce).

Pracovní kapacita je v období sklizně využívána k vykonávání (cf. obr. 15):

- standardních, celoročně se opakujících činností (domácí práce, pasení stád, dojení a další péče o dobytek, příprava palivového dřeva apod.),
- sezónních činností, které tvoří logickou sekvenci (sklizeň a přeprava obilnin, mlácení, prosívání, shromažďování) a souběžně probíhající sklizeň trávy, sušení, přeprava a uskladňování sena.

Konkrétní počty člověkohodin, nutných ke sklizení určitého počtu hektarů a určitého množství obilnin jsou uvedeny v tab. 4.

Proces sklizně je ovlivněn počasím, které se promítá jednak do rychlosti dozrávání obilnin a do délky období, po které si obilí stojící na polích udržuje potřebnou kvalitu, jednak do vlastního procesu sklizně (po dešti nelze sklízet obilí ani trávu, takže počet deštivých dnů prodlužuje celý proces). Modelujeme-li jednotlivý rok, není třeba uvažovat meziroční fluktuace úrody ani zohledňovat existenci zásob z předchozích let. Lokální události, například bouřky, zničení divokými zvířaty, požár, krádež atd. mohou část úrody zdevastovat.



Obr. 15. Přehled prací v období „bottlenecku“ zahrnutých do modelu alokace pracovních kapacit. — **Fig. 15.** Overview of the workload during the “bottleneck” included in the Labour allocation model.

Činnost	strongforce	weakforce
Skližeň (<i>harvest</i>)	90 hodin / 1 ha	225 hodin / 1 ha
Přeprava (<i>transport</i>)	20 hodin / 1500 kg	40 hodin / 1500 kg
Mláčení (<i>threshing</i>)	40 hodin / 1500 kg	–
Provívání (<i>winnowing</i>)	33 hodin / 1500 kg	–
Sbírání, uskladnění (<i>gathering, storage</i>)	–	11 hodin / 1500 kg

Tab. 4. Požadavky na pracovní kapacitu v období sklizně. — **Tab. 4.** Workforce requirements during harvest.

Návrh modelu

Model je koncipovaný jako rovnicový (*equation based*). Jeden krok simulace reprezentuje jeden den. Simulováno je maximálně 90 kroků, které odpovídají tříměsíční letní sezóně, kdy probíhá sklizeň. Zajímáme se zejména o ta nastavení modelu, při nichž simulace trvá do 21 dnů (= 3 týdnů).

Model má čtyři vstupní parametry, na základě jejichž hodnot probíhají veškeré navazující výpočty:

- 1) velikost populace,
- 2) denní hodinové nasazení „silné“ a „slabé“ pracovní kapacity a případný podíl nepracující „silné“ kapacity,
- 3) průměrný výnos z hektaru,
- 4) pravděpodobnost výskytu špatného počasí.

Od celkového počtu obyvatel se, podobně jako v modelu využití krajiny, odvíjí i velikosti stád domácích zvířat. Od velikosti populace se také odvozují její energetické nároky. Vypočtená celková spotřeba obilnin (včetně osiva na další rok, zimního krmiva a očekávaných ztrát) a předpokládaný výnos dovolují vypočítat plochu polí, která musí být obhospodařována, tj. musí se na jejich sklizeň vynaložit konkrétní pracovní kapacita.

Jsou vypočteny celkové časové banky „silných“ a „slabých“ člověkohodin. Odečítá se čas, který „slabá“ kapacita věnuje dalším činnostem (živočišná výroba vč. pastvy, domácí práce, práce v lese). Zbývající člověkohodiny jsou

postupně vynaloženy na sklizeň a zpracování úrody, paralelně s tím probíhá sklizeň a přeprava sena. Výstupem modelu je zjištěná celková délka zemědělských činností.

Experimenty

Následující tři experimenty ukazují, jakým způsobem lze systematicky pracovat s parametry modelu a rámcově odhadnout hranice produktivity.

1) Vliv počasí na délku sklizně

Paušální předpoklad zahrnuje populaci 1000 osob, dvanáctihodinový pracovní den, 10 % nevyužitou pracovní kapacitu a průměrný výnos 1500 kg/ha. Při takto definované výchozí situaci je cílem modelu sledovat vliv počasí na prodloužení doby sklizně.

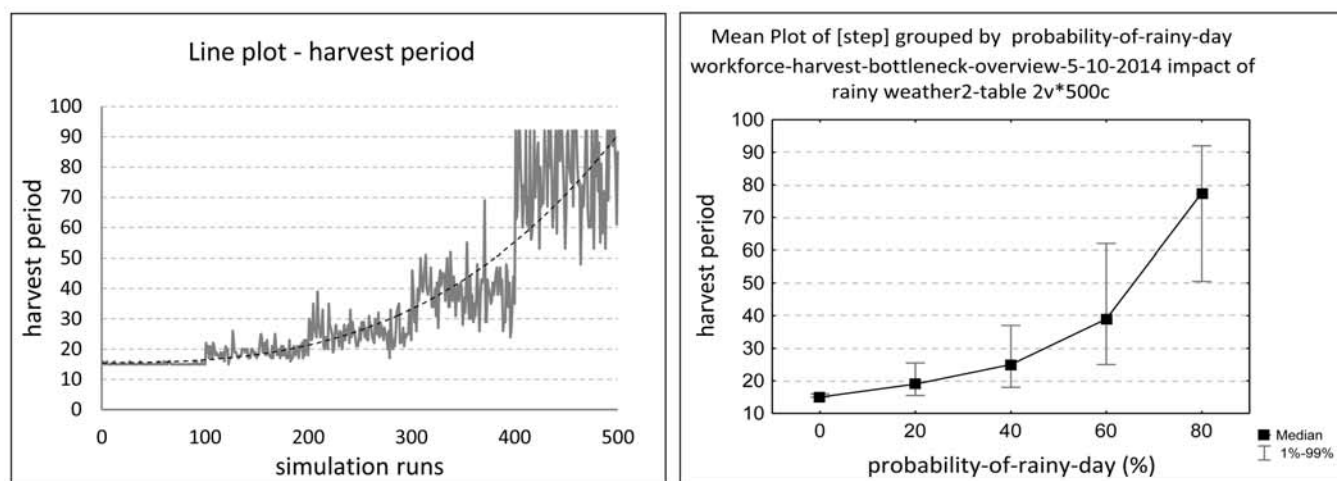
Z výsledku (*obr. 16*) vyplývá, že takto vytížená pracovní kapacita mohla za relativně příznivého počasí dokončit sklizeň za méně než 3 týdny.

2) Podíl nepracující části populace

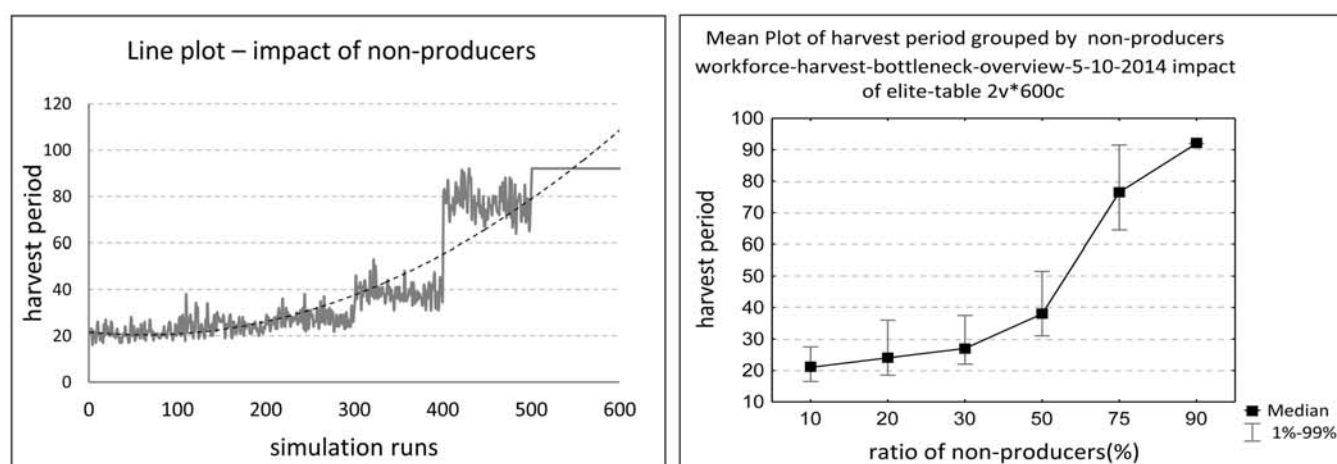
Víme-li, že tři týdny jsou při 30% pravděpodobnosti nepříznivého počasí splnitelným termínem pro ukončení sklizně, můžeme se zaměřit na další parametr, a sice na podíl populace, která se nepodílela na zemědělských pracích (např. elita). Můžeme tak zjistit, že sklizeň je v daném limitu realizovatelná tehdy, když podíl nepracující populace nepřekročí maximálně 20 % (*obr. 17*).

3) Vztah mezi velikostí sklizně a počasím

Za předpokladu, že potraviny primárně neprodukcující část tvoří 20 % obyvatelstva a pravděpodobnost deštivého počasí se pohybuje mezi 10 % a 30 %, můžeme zkoumat, do jaké míry mohla populace vedle pokrytí vlastní spotřeby produkovat i surplus, určený k volnému disponování např. na trhu, jako „společenský kapitál“, a to při různých hektarových výnosech.



Obr. 16. Experiment 1 – vliv špatného počasí na délku procesu sklizně (první graf – výsledky průběhu simulace, druhý graf – výsledné hodnoty; medián hodnot pro 100 opakování pro každou kombinaci parametrů). S rostoucí pravděpodobností výskytu deště se délka sklizně prodlužuje. Sklizení ploch za méně než 3 týdny je možné pokud pravděpodobnost výskytu deštivého počasí nepřesahuje 30 %. — **Fig. 16.** Experiment 1 – impact of bad weather on the length of the harvest period (first graph – the result of the simulation process; second graph – the resulting values; median values for 100 simulations of each combination of parameters). With the increasing probability of rain the length of the harvest is extended. The harvesting of all the fields in less than 3 weeks is possible if the probability of occurrence of rainy weather does not exceed 30 %.



Obr. 17. Experiment 2 – vztah mezi podílem nepracujících mužů („strongforce“) a délkou procesu sklizně (první graf – výsledky průběhu simulace, druhý graf – výsledné hodnoty; medián hodnot pro 100 opakování pro každou kombinaci parametrů). S rostoucím podílem nepracujících kapacit se délka sklizně prodlužuje. Sklizení ploch za méně než 3 týdny je možné pokud podíl nepřesahuje cca 20 %. — **Fig. 17.** Experiment 2 – relationship between the proportion of non-producing men („strong-force“) and the length of the harvest period (first graph - the result of the simulation process; second graph – the resulting values; median values for 100 simulations of each combination of parameters). With the increasing proportion of the non-productive working capacities, the length of the harvest period is extended. The harvesting of all the fields in less than three weeks is possible only if the proportion does not exceed 20 %.

V případě příznivého počasí postačoval k pokrytí vlastní spotřeby 1000 osob i malý hektarový výnos (800 kg/ha), zatímco dvojnásobná produkce je za horšího počasí realizovatelná jen při čtyřnásobném hektarovém výnosu (3200 kg/ha) (obr. 18).

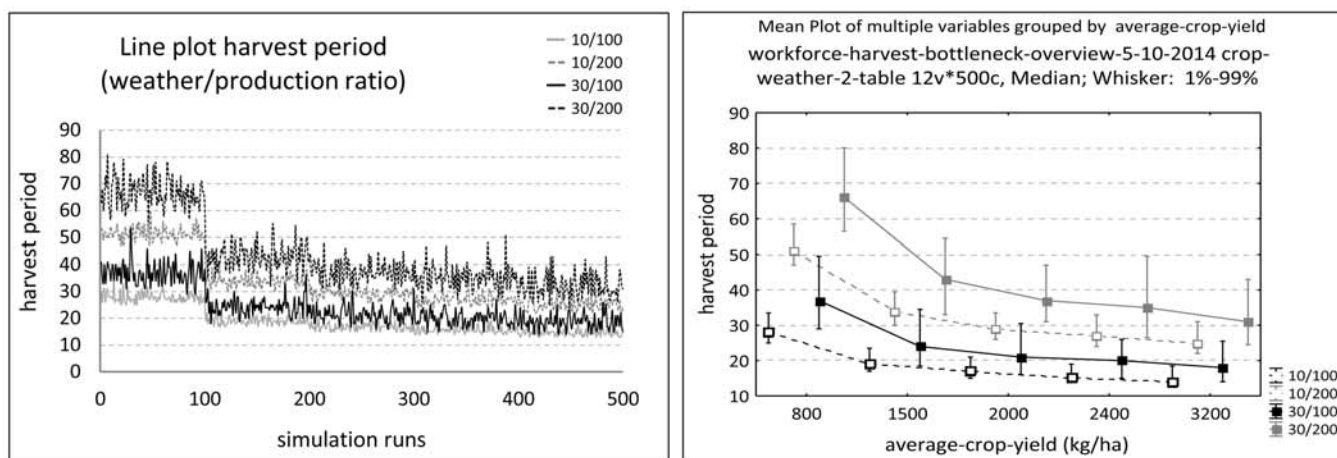
Možnosti rozšíření

Výnos a kvalita obilnin nejsou v reálu konstantní. Proces dozrávání a následná degradace jsou ovlivněny stavem půdy a počasím, bližší znalost těchto procesů pomůže model zpřesnit. Novým parametrem mohou být i proměnlivé podíly jednotlivých plodin (cf. Halstead 2014, 71–76). Od jejich druhových vlastností (rozdílná

období dozrávání, různé časové nároky na sklizeň) by se pak odvíjely nároky na člověkohodiny.

Zjednodušený předpoklad o vlivu počtu deštivých dnů na prodloužení sklizně může být nahrazen sofistikovanější prací s daty o počasí. Lze pracovat s datovými řadami vývoje srážek a teplot, odpovídajícími typovým scénářům (např. „teplé léto“, „deštivé léto“, „lokální bouřky“).

Vedle období sklizně se lze zaměřit na celkovou podobu hospodářského roku se všemi návaznými činnostmi včetně uvažování alternativních zemědělských strategií, kladoucími různé nároky na pracovní kapacitu (jarní a/nebo podzimní orba, intenzivní nebo extenzivní hospodaření).



Obr. 18. Experiment 3 – vztah mezi výnosem z hektaru a délkou procesu sklizně při různém počasí a požadavcích na velikost sklizně (první graf – výsledky průběhu simulace, druhý graf – výsledné hodnoty; medián hodnot pro 100 opakování pro každou kombinaci parametrů: 10–30% pravděpodobnost deště, 100–200% velikost produkce). Splnění tří- až čtyřtýdenního limitu je možné buď při příznivém počasí, nebo při kombinaci vysokého hektarového výnosu a středně dobrého počasí. — **Fig. 18.** Experiment 3 – relationship between the yield per hectare and the length of the harvest period under different weather conditions and requirements for the harvest size (first graph – the result of the simulation process second graph – resulting values; median values for 100 simulations of each combination of parameters: 10–30% chance of rain, 100–200% the size of production). Reaching a three- to four-week limit can be fulfilled either under favourable weather or with a combination of high yield per hectare and moderate weather conditions.

V případě, že by byly k dispozici údaje o jednotlivých rodinách (resp. o alokaci půdy konkrétními domácnostmi či širšími rodinami), bylo by možné do modelu zavést i sociální koncept vlastnictví a rozšiřování půdy, případně i externí pracovní sílu.

3.5. Model osídlení regionu

Cíl

Prostřednictvím tohoto agentového modelu lze zkoumat proces vytváření struktury osídlení v širším regionu kolem oppida. Východiskem je archeologickými nálezy podložený předpoklad, že v okolí existoval systém zemědělských sídlišť, jejichž obyvatelé potenciálně byli v socio-ekonomickém vztahu s oppidem.

Model je v základu koncipován jako emulativní, neboť vychází z empirických dat ohledně pravidel pro lokalizaci sídlišť. Pravidla pro organizaci prostoru při vytváření sídelní struktury jsou však pojata explorativně, stejně jako hypotetický vztah k centrální lokalitě. Kromě jednotlivých sídlišť (resp. jejich populace a hospodářského zázemí) je předmětem zkoumání i struktura sítě sídlišť, tj. návaznost nově vznikajících sídel na sídla starší. Model je navržen tak, aby bylo možné experimentovat s výchozím počtem a parametry sídlišť a několika mechanismy jejich postupného rozrůstání, rozdělování a slučování.

Teoretická východiska

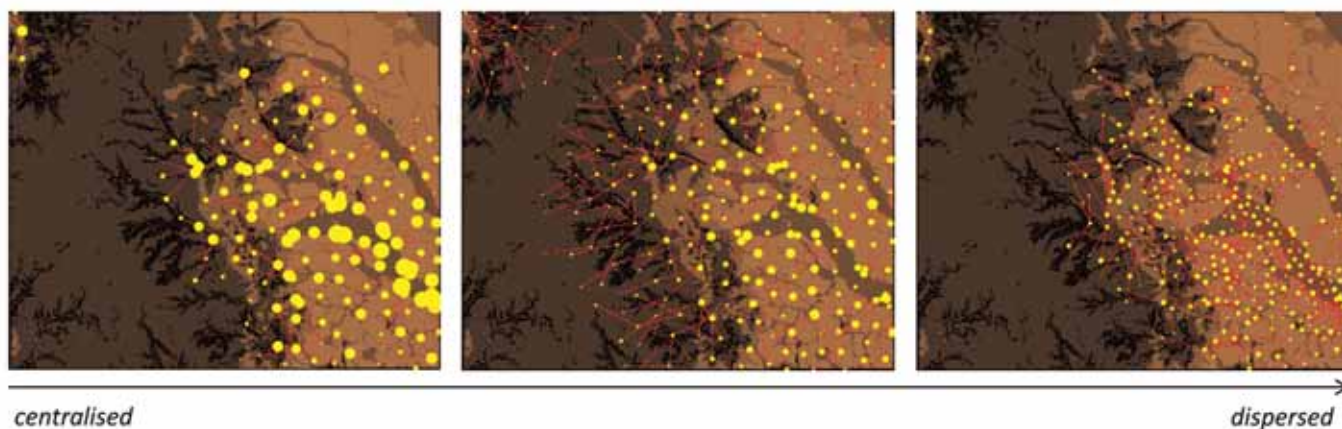
Základní jednotkou modelu je prostorové vyjádření „domácnosti“, tj. sídliště. Pravidla pro postupně rostoucí populaci v prostoru jsou dána jednak její energetickou spotřebou, ekonomickými strategiemi, resp. nároky na okolní zdroje a nakonec stupněm společenské organizace. Proces disperze sídlišť může být

motivován jednak společnými cíli (např. vyhledávání nových zdrojů), ale také snahou předejít interpersonálnímu konfliktu, pokud populační hustota vzroste nad únosnou mez, tzv. „scalar stress“ (Johnson 1982; Bandy 2004). Tento práh ovlivňují vazací mechanismy společnosti a přítomnost společenských autorit (vyšší stupeň organizace se společnými cíli a společenskými autoritami snese větší komunity než nižší stupeň). Podle stupně nastavení tohoto prahu může vývoj osídlení směřovat buď k centralizovanému, nebo rozptýlenému (obr. 19).

Disperze typicky spočívá v odchodu části populace ze stávajícího, která si založí sídliště nové. Odchází-li menší počet jedinců (do několika domácností), nové sídliště pravděpodobně vznikne v blízkosti starého, nebo se může připojit k již existujícímu, ke kterému má společenské vazby – záleží na stavu již vytvořené sídelní sítě a znalosti okolí (např. prostřednictvím vazeb k okolním sídlištím). Odchod větší skupiny (více širších rodin) může zahrnovat i přemístění do vzdálenější lokality. Spojování sídlišť do komplexnějších struktur souvisí i s ekonomickou specializací, která s sebou nese rozvoj interakcí; větší centra plní více společensko-ekonomických funkcí jsou pro imigranty atraktivnější, než sídla menší.

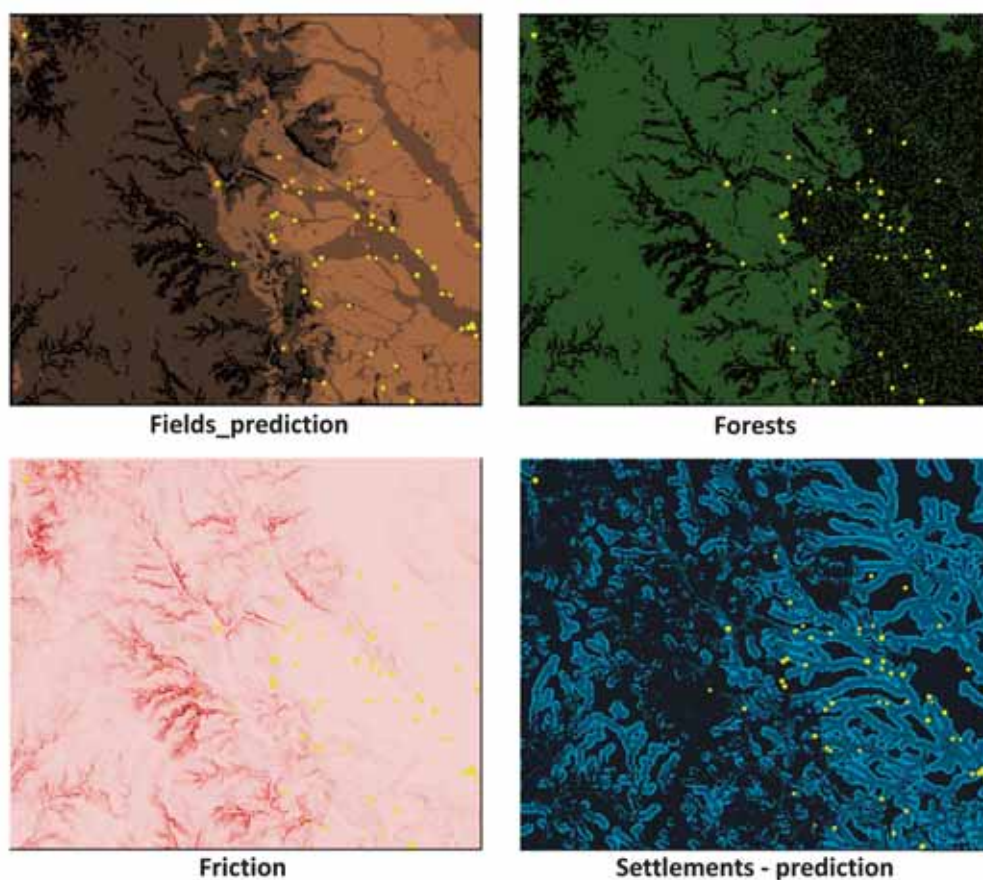
Lze předpokládat, že populace se při stěhování rozhodovala racionálně, tedy při volbě nového zemědělského sídliště byla preferována vhodná půda s potenciálem polí, pastvin i lesa, s možností rozvoje sídliště a zároveň ne příliš velké izolaci od sídel již existujících. V případě větších sídlišť hrála kromě vlastního vhodného prostředí také rozhodující roli návaznost na vytvořenou síť komunikací.

V modelu lze využít stávající poznatky o latenském osídlení regionu kolem Starého Hradiska, např. co se týče preferencí lokalizace sídlišť. Tato data mohou být použita jednak jako výchozí stav (*sensu* emulativní model) nebo jako empirická kontrola simulované sídelní



Obr. 19. Příklad simulace větších centralizovaných osad vs. rozptýleného osídlení. — **Fig. 19.** Example of simulation of centralised vs. dispersed settlement structure.

Obr. 20. Základní vrstvy modelu. — **Fig. 20.** Basic model layers.



sítě (*sensu* explorativní model). V obou případech musíme mít na paměti, že archeologické prameny nezachycují všechna sídliště z dané doby, o jejich přesné dataci nemluvě.

Návrh modelu

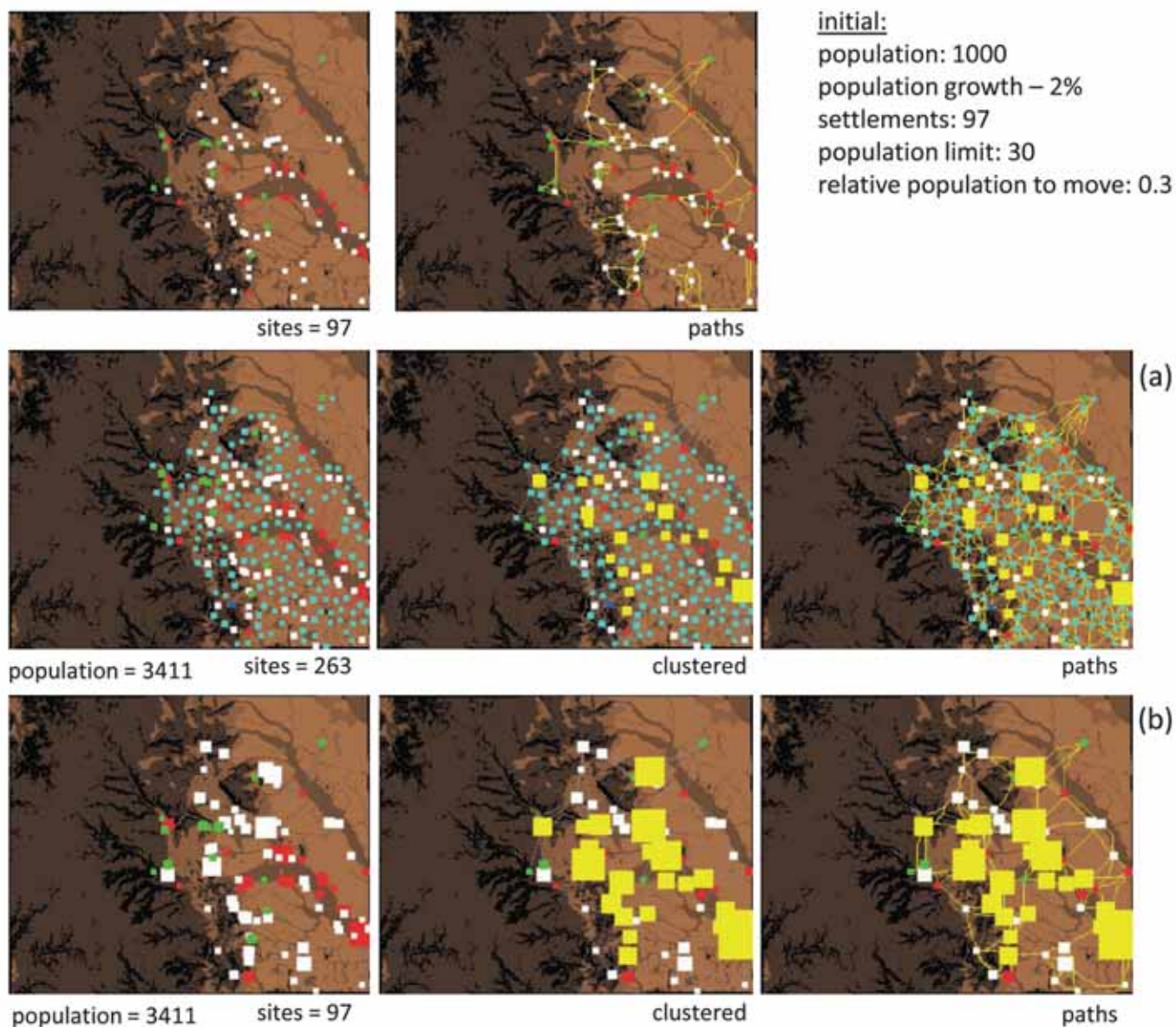
Jeden krok simulace reprezentuje jeden rok. Simulováno je 120 kroků. Jednotlivé sídliště je v modelu reprezentováno agentem. Chování agenta závisí na jeho hlavním parametru, což je počet obyvatel, od něž se odvíjí hodnoty dalších parametrů, zejména obhospodařo-

vané území, resp. spotřeba a s ní spojené nároky na pracovní kapacitu. Dalším důležitým parametrem agenta je identifikátor jeho předka, tj. odkaz na rodičovské sídliště, z něž se nové sídliště odštěpilo. Pomocí těchto odkazů je v modelu zachycena síť sídlišť.

Vstupem modelu je výchozí velikost populace (počet obyvatel), která je rovnoměrně rozdělena mezi výchozí počet sídlišť.

Jeden krok simulace sestává z:

- přepočtu velikosti populace sídliště (uvažuje se roční populační přírůstek 2 %),



Obr. 21. Příklad disperze sídlišť podle nastavených parametrů v experimentu. Podle možnosti využívat stávající strukturu osídlení vzniká nová síť sídlišť (a, b). — **Fig. 21.** Example of the settlement dispersion according to parameters in the experiment. According to the possibility of using the existing settlement structure, a new network of settlements appears (a, b).

- přepočtu energetických nároků populace – vychází z množství sklizeného obilí a spotřeby dřeva a srovnání těchto nároků s odhadem produkce v následujícím roce (velikost sklizně závisí na ploše polí a kvalitě půdy, produkce dřeva závisí na ploše lesa),
- zkontrolování limitu pro velikost populace v jednom sídlišti.

Prostředí je opět popsáno rastrem, tentokrát o rozlišení 100 x 100 m². Atributy buněk vyjadřují potenciál pro vznik sídliště. Potenciál je odvozován z GIS vrstev načtených při inicializaci modelu (obr. 20):

- *gis_sites* – místa archeologicky doložených lokalit,
- *fields_prediction* – prediktivní mapa nejvhodnějších ploch pro pole,
- *settlements* – vhodnosti jednotlivých buněk pro existenci sídla,

- *friction* – náročnost průchodu terénem,
- *forests* – simulovaná hustota zalesnění vzhledem ke stávajícímu osídlení a potenciálu zemědělské produkce.

Potenciál buňky se vztahuje k akčnímu rádiu, odvozenému z frikční vzdálenosti.

Proces migrace může být aktivován, když:

- počet obyvatel překročí určenou hranici (populační limit – vyjadřující nastavený „*scalar stress*“),
- jsou dosaženy limity prostředí, ve kterém se sídliště nachází.

Výběr místa, na němž bude založeno nové sídlo, se řídí prediktivní mapou vhodnosti, v níž jsou kombinována GIS data pro lokalizaci sídlišť a polí v závislosti na vzdálenosti (resp. dostupnosti) nové lokality na základě frikčního povrchu.

Experiment

Pomocí modelu lze zkoumat různě definované mechanismy migrace a jejich vliv na prostorové uspořádání sítě sídlišť.

Příkladem je proces disperze osídlení nastartovaný definovanou hodnotou populačního limitu (obr. 21).

Počáteční populace v regionu činí 1000 obyvatel, rozmístěná celkem do 97 sídlišť generovaných z mapy archeologických pramenů. Předpokládá se taková minimální frikční vzdálenost mezi sídlišti, která by umožňovala založení nového sídla společně s jeho hospodářským zázemím. Jestliže počet obyvatel jednotlivého sídliště přesáhne limit (nastavený na 30 osob), odchází 30 % (tj. dvě domácnosti) z nich jinam. Nové sídliště je vybudováno na nejbližším vhodném místě. Stěhující se skupiny obyvatel mohou založit nové sídliště, ale mohou se také připojit do již existujícího sídla, jehož populace se tím zvětšuje, co jí dovolí kapacita prostředí (přepočtená na pole a dřevo).

Výsledek simulace může způsobit, že některá sídliště vzniknou v bezprostřední blízkosti jiných. V takovém případě je možné použít proceduru „cluster“, která takto vzniklá sídla spojí do větších celků.

Na takto vzniklé mapě osídlení lze testovat předpoklady pro vytvoření síťové struktury – sídliště mohou být propojena určitým počtem spojů, které mohou být následně modelovány na základě frikce.

Možnosti rozšíření

Rozhodujícím pro modelovanou strukturu osídlení bude vztah k centrální lokalitě – oppidu. Na něm závisí míra roční produkce sídlišť (momentálně v modelu uvažované ale bez reálného odbytu) a do jisté míry i jejich prostorová struktura včetně hierarchie sídelní sítě.

Na takto vytvořenou strukturu osídlení může být aplikována síťová analýza (např. Knapett /ed./ 2013), která slouží ke zkoumání vztahů a interakcí mezi jednotlivými sídlišti, stupeň hierarchizace sídelní sítě a proces jejího vzniku a v neposlední řadě také roli oppida v této síti a vztahy na mikro a makro regionální úrovni.

Na osídlení regionu by mohly být aplikovány podobné demografické scénáře jako na osídlení oppida, které by kromě narůstání populace zohledňovaly také její potenciální úbytek vlivem migrace mimo region, epidemie apod.

3.6. Model vojenského obléhání oppida

Cíl

Agentový model slouží testování vojenských vlastností oppidálních fortifikací reprezentovaných oppidem Staré Hradisko. Hlavními body, které měl model za cíl zkoumat, byly (1) obranyschopnost hradebních linií (tj. vliv umělých překážek) v různých stavebních fázích a jejich srovnání, (2) počet útočnicků a obránců a (3) efektivita útoku vedená na různá místa v opevnění. Model je podrobně popsán v (Kakrda 2014).

Teoretická východiska

Fortifikace Starého Hradiskabyla dle archeologických pramenů zbudována v celkem třech fázích (obr. 22).

Základními třemi způsoby dobývání jsou (1) přímý útok na opevnění, (2) útok na bránu a (3) destrukce zdi opevnění. Přímý útok je časově a koordinačně nejjednodušší, hradby se zdolávají pomocí žebříku, v případě úspěchu se útočníci mohou utkat s obránci v boji zblízka. Běžící útočníci jsou vystaveni palbě obránců. Druhou možností je koncentrace na nejslabší místo v opevnění, jímž je brána. Úprava do ulicového vstupu (tzv. klešovitě brány), je kvůli snadnější a delší palbě na útočníky. Třetí typ útoku se týká narušení a následného stržení kamenné plenty za pomoci ženijních nástrojů. Útočníci přitom tvoří formaci podobnou římské želvě (*testudo*).

Útočníci se přemísťují jednotlivě, nebo ve skupinách. Kromě koeficientu rychlosti má na rychlost přesunu a úspěšnost útoku vliv:

- průchodnost terénem (frikce),
- rozmístění umělých překážek (příkopy, valy), znesnadňují a zpomalují postup nepřátel a poskytují obráncům čas na přesnou střelbu,
- počet obránců a účinnost jejich palby.

Palba může být dvojího druhu – přímá na vybraný cíl (bojovníka) a nepřímá do určité oblasti. Při nepřímé palbě lze využít větší dostřel dané zbraně, přímá palba je účinná jen do určité vzdálenosti (desítky metrů), (Gabriel 2007; Gabriel — Metz 1991). Velký vliv na úspěšný zásah má počet a rozmístění bojovníků v dané oblasti. Při přímé palbě má vzdálenost cíle rozhodující vliv (Marsden 1969). Pravděpodobnost zásahu roste s přibližujícím se cílem nelineárně. Výpočet pravděpodobnosti zásahu P se počítá na základě rovnice (Marcks 2012):

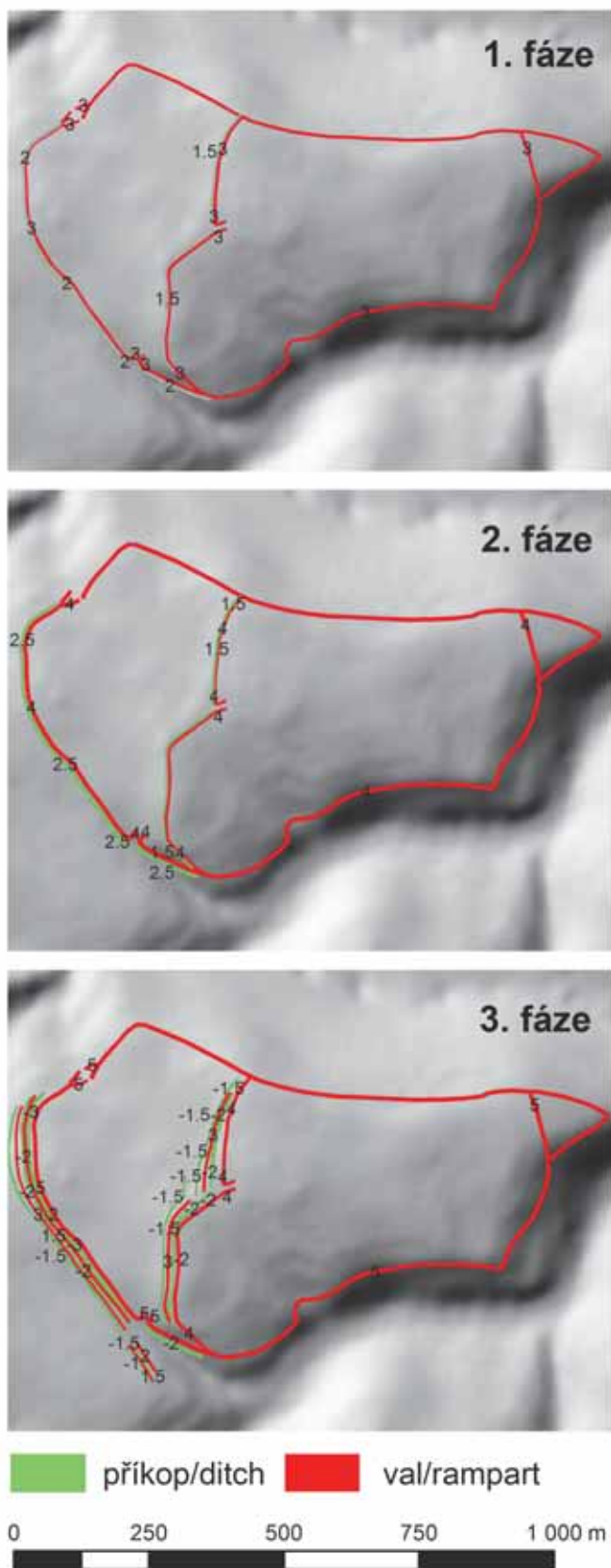
$$P = 2 * \frac{\left(\frac{1}{v} * \sqrt{k}\right)}{\sqrt{\pi}} - \frac{2}{3} * \frac{\left(\frac{1}{v} * \sqrt{k}\right)^3}{\sqrt{\pi}} + \frac{1}{5} * \frac{\left(\frac{1}{v} * \sqrt{k}\right)^5}{\sqrt{\pi}} \quad (11)$$

(v – vzdálenost cíle od střelce /metry/,
k – koeficient přesnosti)

Návrh modelu

Zatímco model alokace pracovních kapacit poskytoval číselné výstupy (přehledy vynaložených člověkohodin), a model vytváření struktury regionu časové řezy osídlení, výstupy modelu obléhání mají charakter animace, zobrazující průběh procesu potenciálního útoku na oppidum. Jeden časový krok v modelu je 0,2 sekundy reálného času, což je doba, za kterou běžící bojovník urazí po rovině vzdálenost 1 m. Agenti reprezentují bojovníky, kteří se účastní dobývání:

- *Defenders* – obránci oppida se zbraněmi na dálku, jejichž společným cílem je vyřadit z boje co nejvíce útočnicků.
- *Firing-attackers* – útočící střelci se zbraněmi na dálku, jejichž společným cílem je vyřadit z boje co nejvíce obránců,



Obr. 22. Tři archeologicky doložené fáze opevnění: 1. fáze („1-single“) zahrnuje val s kamennou čelní plentou a příkop (hl. 2 m), ve 2. fázi („2-single“) dochází k přestavbě, během které byl příkop prohlouben (hl. 2,5 m) a zvětšila se výška valů, 3. fáze („3-multiple“) kompletně přestavěla opevnění do vícenásobné soustavy hlinitých násypů s příkopy různé hloubky respektive výšky. Podoba bran v jednotlivých fázích není jasná, proto se uvažují ve všech fázích stejně (podle: Čížmář 2005, Danielisová nepubl. data). — **Fig. 22.** Three – archaeologically recorded – fortification phases: Phase 1 (“1-single“) includes a rampart with a front stone wall and a ditch (2 metres deep); Phase 2 (“2-single“) – the ramparts were rebuilt (increased height) and the ditch was deepened (2.5 metres deep); during Phase 3 (“3-multiple“) the fortification was rebuilt completely to the multiple sequence of earthen ramparts of different depths or heights. The form of gates in the individual phases is not clear, therefore, they are considered the same in all phases.

Mapa lokality (obr. 22), importovaná z GIS, je pomyslně rozdělena na 5 částí, které odpovídají možným směrům útoku na opevnění z různých světových stran (north, east, south, north-west, south-west). Je rozdělena na buňky o rozlišení 1 m². Každá buňka nese čtyři datové hodnoty popisující terén:

- Digitální výškový model (*Elevation*) je základní model terénu, udává se v metrech nad mořem.
- Frikce (*friction*) vyjadřuje obtížnost průchodu terénem, hodnoty od 1 do 6 odpovídají rostoucí náročnosti chůze od roviny po prudký svah.
- *Aspect* udává směr nejprudšího stoupání svahu, hodnoty jsou udány úhlem z intervalu 0–360°, kde nula odpovídá severu.
- *Slope*, udává sklon (svažitost) svahu ve stupních, hodnoty se pohybují v rozmezí 0–36°.
- Dále se načítá aktuální fáze opevnění (*1-single*, *2-single* nebo *3-multiple*), kde jsou obsaženy parametry překážek (rozměry opevnění).

Pro zvolenou mapu a způsob útoku je třeba vygenerovat výchozí rozmístění útočníků a obránců. Útočníci mohou být sdruženi do skupin. Obránci jsou umístěni na opevnění nebo bráně blízko cílů (bodů) útoku. Algoritmus pro výchozí rozmisťování agentů zahrnuje několik pravidel, která mají počáteční situaci učinit dostatečně věrohodnou, např. útočníci se zpočátku nacházejí mimo dostřel obránců; útočníkům jsou cílová místa útoků přidělena náhodně a následně jsou obránci umístěni na takto stanovená ohrožená místa tak, aby byla maximalizována doba, po kterou jsou útočníci vystaveni palbě obránců.

Experimenty

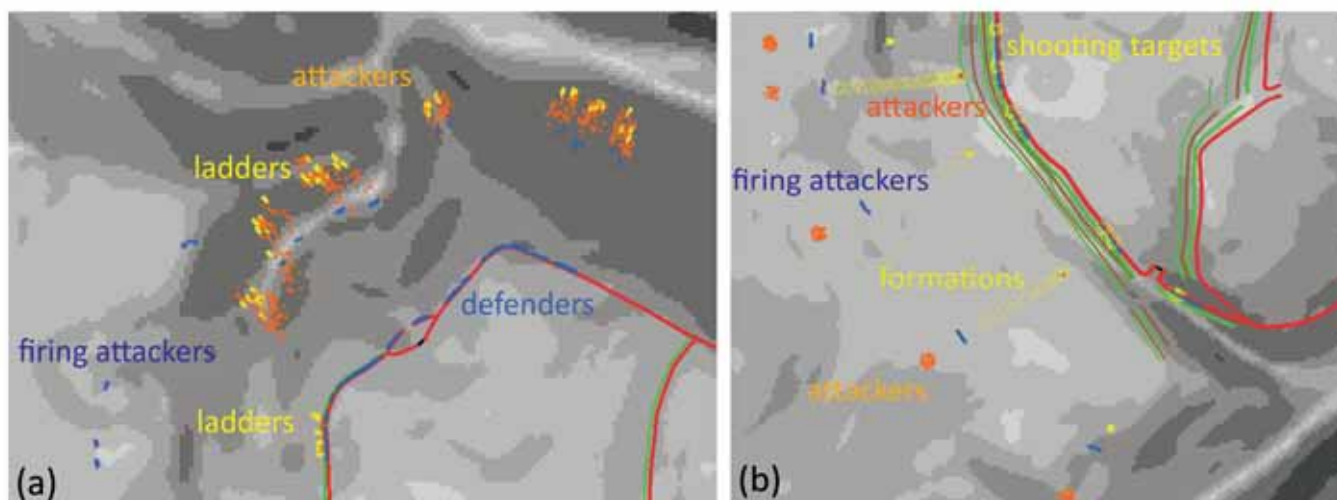
Z počátečních experimentů vyplynulo, že obránci většinou spolehlivě odrazí i pětinasobnou převahu útočníků. Naopak jestliže převaha útočníků je více než sedminásobná, jsou naopak vždy úspěšní útočníci. V dalších experimentech byly porovnávány obranné schopnosti opevnění.

1) Vliv terénu a překážek na úspěšnost útoku

Byly navzájem porovnány jednotlivé fáze opevnění a jednotlivé směry útoku (z různých stran). Vybrán byl útok, kde lze nejlépe sledovat vliv svahu a překážek (útočníci

- *Melee-attackers* – útočníci bez zbraně na dálku, jejichž cíle závisí na zvoleném typu útoku.

Simulace jednotlivých typů útoků lze popsat podrobnými scénáři, které definují pravidla chování jednotlivých účastníků i skupin.



Obr. 23. Příklad simulace – útok s pomocí žebříků (a) a útok proti zdem opevnění (b). — **Fig. 23.** Example of the simulation – attack using ladders (a) and attack on the fortification walls (b).

Část opevnění	Fáze opevnění	Poměr ztrát útočníků a obránců
south-west	3-multiple	3.45
south-west	2-single	2.47
south-west	1-single	2.02
north-west	1-single	1.38
north-west	1-single	1.35
east	1-single	1.1
south	1-single	1

Tab. 5. Porovnání jednotlivých fází opevnění při úspěšnosti útoku z různých směrů. — **Tab. 5.** Comparison of the different fortification phases in a successful attack from different directions.

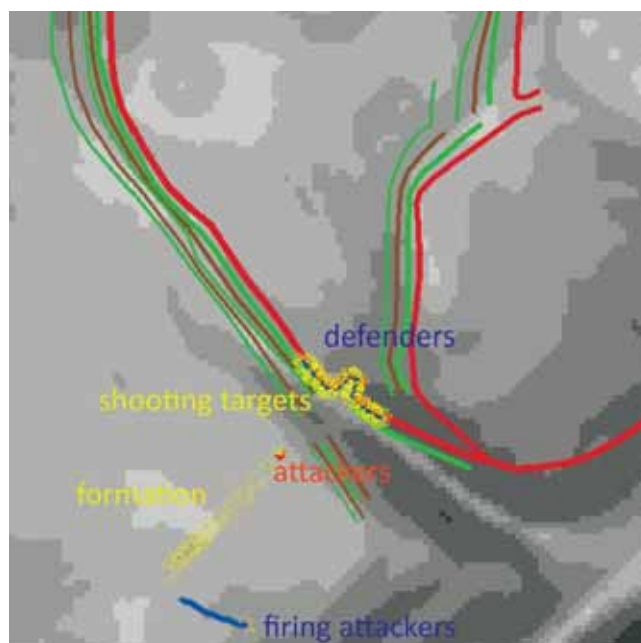
Porovnání fáze opevnění		Zvýšení ztrát
3-multiple	1-single	+ 70 %
3-multiple	2-single	+ 40 %
2-single	1-single	+ 22 %

Tab. 6. Porovnání fází opevnění (50 obránců). Například interpretace prvního řádku je taková, že ztráty útočníků při fázi „3-multiple“ vzrostly oproti fázi „1-single“ průměrně o 70 %. — **Tab. 6.** Comparison of the fortification phases (with fifty defenders). For example, the interpretation of the first line is that the loss of attackers in fortification phase „3-multiple“ increased against the phase „1-single“ by 70 % on average.

běží a jsou rozptýleni na velké ploše, obr. 23). Počet útočníků byl nastaven na 500 mužů (20 skupin), počet obránců na 50 (poměr 1 : 10 – úspěch útočníků) nebo 100 (poměr 1 : 5 – úspěch obránců). Míra obranyschopnosti oblasti se určí v závislosti na počtu ztrát, které obránci stačí způsobit útočníkům (nakolik bude útok v dané oblasti pro útočníky nevyhodný).

Výsledky experimentu při poměru 1 : 5 (50 obránců) jsou zobrazeny v tab. 5. Nejmenší ztráty útočníků byly zaznamenány v oblasti „south“, tento počet byl proto zvolen jako základní jednotka pro poměr ztrát. Poměr ztrát udává, o jaký násobek vzrostly ztráty útočníků v příslušné oblasti oproti ztrátám v oblasti „south“.

V tab. 6 je zobrazeno porovnání jednotlivých fází opevnění. Průměrné zvýšení ztrát se vztahuje k fázi



Obr. 24. Běžící simulace – útok na bránu. — **Fig. 24.** Running simulation – attack on the gate.

opevnění, která je uvedena v prvním sloupci, oproti fázi ve druhém sloupci. Odražení útoku představuje procento simulací, které skončily neúspěchem útočníků.

Pokud přijmeme výsledky experimentu za relevantní, nabízí se otázka, jak obránci posílili obranu například na jižní straně oppida. Dalším závěrem experimentu je potvrzení skutečnosti, že pozdější (a mohutnější) fáze opevnění zvyšují obranyschopnost oppida o více jak 20 % (2. fáze) a dokonce o 40 % (3. fáze) oproti fázi první.

2) Vliv umístění bran

Další experiment je zaměřen na zkoumání vlivu umístění bran na úspěšnost útoku při použití formace (obr. 24). Porovnávají se všechny tři oblasti oppida, ve kterých se vyskytuje brána („north-west“, „south-west“

Počet obránců	50			100		
	north-west	south-west	east	north-west	south-west	east
50	1	94	3	86	100	100
100	0	27	0	3	98	10
150	0	1	0	0	60	1
200	0	0	0	0	19	0
Průměr	< 1 %	31 %	< 1 %	22 %	69 %	28 %

Tab. 7. Odražené útoky – úspěšnost obrany – při 50 a 100 obráncích. –
Tab. 7. Repulsed attacks – the success rate of defence – with fifty and with one-hundred defenders.

Oblast	Odražení útoku na bránu		Potřebný poměr	Poměr ztrát
	50 obránců	100 obránců		
south-west	31 %	69 %	3 : 1	2,67
east	< 1 %	28 %	1 : 1	2,08
north-west	< 1 %	22 %	1 : 1	2,65

Tab. 8. Souhrn výsledků pro všechny oblasti. Potřebný poměr znamená, jaký nejmenší poměr střelců a obránců je nutný k vyřazení všech obránců (krycí palba). Poměr ztrát reprezentuje celkové ztráty obránců vůči útočnickům (střelci i muži ve formaci). –
Tab. 8. Summary of the results for all areas. The required ratio indicates the minimum proportion of archers to defenders necessary to eliminate all defenders (covering fire). The ratio of losses represents the total losses of attackers to defenders (archers and men in formation).

a „east“). Testuje se vzájemný poměr obránců a útočících střelců. Určujícím faktorem bude procento odražených útoků na bránu (vyřazení všech útočníků ve formaci) a potřebný poměr střelců vůči obráncům, který útočnickům zaručí alespoň 90% úspěšnost útoku.

Výsledky jsou zobrazeny v tab. 7 a 8.

Z výsledků vyplývá, že z hlediska obrany je nejlépe umístěna brána v oblasti „south-west“ (tj. hlavní klešovitá brána). 50 obránců bylo schopno ve více jak 30 % simulací vyřadit všechny útočnické ve formaci, 100 obránců v téměř 70 %. Potřebný poměr je 3 : 1, střelců musí být přibližně třikrát více než obránců, aby byla útočnickům zaručena vysoká pravděpodobnost úspěchu. Zbylé brány mají horší výsledky. U obou bran 50 obránců stačilo na vyřazení útočnicků ve formaci pouze v méně než 1 % simulací. 100 obránců odrazilo útok v 28 % („east“), respektive 22 % („north-west“) případů. Poměr je shodně pro obě brány pouze 1 : 1. Tento výsledek lze vysvětlit tím, že v případě jihozápadní brány se skupina útočnicků díky mírnému terénu dostane rychleji k bráně, kde je však snáze zničena přímou palbou obránců. Poměr ztrát je doplňující informace, která odhaluje, že při útoku na bránu utrpí obránci v průměru více jak dvojnásobné ztráty oproti útočnickům. Vzhledem k obvyklé početní převaze útočnicků vede tento poznatek k tomu, že při dobře zkoordinovaném útoku na bránu (krycí palba, skupina bojovníků zachovávaná formaci, atd.) mají útočníci větší naději na úspěšný útok než například při útoku s pomocí žebříků.

Možnosti rozšíření

Model je navržen tak, aby byl po výměně mapových podkladů použitelný i pro experimentování s dobýváním jiných opevněných lokalit. Při skutečném obléhání a do-

bývání působí faktory, které lze do modelu zakomponovat jen obtížně (např. vliv povětrnostních podmínek na dráhu střely), výzvu představuje i věrohodné modelování samostatných projevů agentů (např. individuální morálka bojovníka apod.).

4. Diskuze – konceptuální, kvantitativní modely a sociální simulace

Všechny modely, zabývající se lidským chováním v prostoru jsou založeny na povaze lidského rozhodování v konkrétním životním prostředí. V tomto přístupu je zásadní předpoklad minimalizace vynaložené pohybové energie (tzv. *least-effort models*) a jako takový je základním měřítkem v prostorovém a časovém vymezování základní lidské ekonomiky. Poprvé tento koncept použil r. 1826 německý ekonom J. H. von Thünen. Ve svém známém díle „*Das Isolierte Stadt*“ navrhl zemědělský model, ve kterém vzdálenost od sídliště je hlavním faktorem při plánování efektivního využití prostoru; více pracovně náročné aktivity (jako intenzivně obdělávaná pole, nebo stáda dojeného dobytka) se mají nacházet co nejblíže k sídlišti a s klesající intenzitou potřebné energie se ostatní aktivity odehrávají dále od sídliště – umístěné v koncentrických zónách. Vzdálenost je zde počítána jako „ekonomická“, tedy energie vynaložená pohybem a vykonáváním dané aktivity. Tento koncept sloužil jako základ pro formulování tzv. *Site Catchment Analysis*, archeologické teorie formulované na počátku 70. let 20. století (*Higgs — Vita-Finzi 1972*), kde základem zkoumání lidské ekonomiky byl vztah technologie (zejména úroveň základního hospodaření) a různých přírodních zdrojů ležících v „ekonomické vzdálenosti“ od sídliště (ve spádové oblasti, tzv. sídelním areálu) a byla zdůrazňována aktivní interakce člověka s prostředím. Později byla tato teorie (v éře postprocesualismu nevyhnutelně kritizovaná) využita jako výchozí bod pro modely, kde „ekonomická vzdálenost“ nebyla vztažena pouze ke zdrojům a základnímu hospodaření, ale také k ekonomické roli sídlišť v rámci celkového sociálního a politického systému dané doby (*Gent — Dean 1986, 27*). V návaznosti na sídelní areály byl pro archeologii adaptován koncept „ekosystémů“ (*Ebersbach 2002, 169; Schreg 2011, 304; del Monte-Luna et al. 2004*), založený na vztahu základního hospodaření v kontextu sociálního systému konkrétní společnosti (viz kapitola 3.2); subsistence komunity je odvozována od demografie, společenské organizace pracovního nasazení (tj. technologie, majetkové vztahy, strategie hospodaření, sociální a politická struktura atd.) a vztahu k přírodním zdrojům (pole, pastviny, les, rezervy, suroviny atd.). Charakter základní ekonomiky se poté odvozuje od a) poměru základní obživy a nadprodukce v zemědělské výrobě, b) poměru a vztahu zemědělské a nezemědělské produkce (možnosti obživy mimo zemědělství), c) sociální struktury společnosti a demografie, d) sídelních forem (struktury osídlení) a e) existence a charakteru centrálních míst. Všechny tyto aspekty tvoří prostorovou strukturu konkrétního ekosystému. Tento přístup je více dynamický a také více komplexní než původní teorie. Velkého rozmachu tyto postupy doznaly v éře nástupu a rozšíření prostorových nástrojů, zejména geografických informačních systémů.

Stávající ekonomické modely se zpravidla zaměřují na velikost populace v daném prostředí, v daném čase, a na základě empirických dat modelují udržitelnost ekonomické produkce, případně i některé další faktory, jako interakci s jinými sídlišti. Ačkoliv to z publikovaných prací nezřídka není patrné, na začátku tradičního přístupu ke studiu socio-ekonomických vztahů minulých společností stojí tzv. **konceptuální model** – zaměřuje se na klíčové proměnné a jejich vztahy uvnitř modelu. V této fázi se kladou otázky a formulují vstupní hypotézy, které mají být následně doplněny tzv. **kvantitativním modelem**. Zde se jednotlivým proměnným konceptuálního modelu přiřazují hodnoty, většinou založené na empirických datech (archeologických, paleoekologických, geomorfologických a jiných), a model dostává podobu vytvořenou na míru konkrétnímu prostředí (cf. např. *van Dinter et al. 2014*). Konceptuální model může prakticky pracovat s několika východisky:

- 1) Na začátku stojí demografický odhad velikosti (a struktury) populace a jejích energetických nároků (plus potenciální nadprodukce). Následně se hledají přirození zdroje v předem definovaném zázemí. Po dosažení úživné hodnoty je možné stanovit hranice areálu nebo uvažovat o specifikách lokálního hospodaření (např. zemědělská nadprodukce). Pokud okolní zdroje nedosahují úrovně potřebné pro uživení modelové komunity, vyplývají z toho závěry o povaze hospodářství (nesoběstačné, externě podporované, specializované) nebo o velikosti populace.
- 2) Je možné také vycházet z potenciálu zázemí o daném rádiu kolem sídliště (empiricky zvoleném nebo předem známém). Pro toto území je následně odvozen potenciál produkce a typy primárních zdrojů; na základě toho se modeluje způsob využití půdy a potenciálně velikost maximální populace.
- 3) Lokalizace zdrojů v zázemí je známá a modeluje se lokalizace a velikost sídliště. Na základě pravidel minimalizace energie a povahy zdrojů (zejména velikost, resp. bohatost) se modeluje velikost zázemí a odvozuje velikost populace.

Některé modely zůstanou jen v konceptuální podobě – tedy končí formulováním hypotézy, bez její kvantitativní fáze. Komplexní ekonomické modely, které zahrnují i výpočty vztažené k velikosti populace a plochy hospodářského zázemí bývají poměrně vzácné (*Mařík 2009; Olsson 1991; Groenman-van Waateringe — Wijngaarden-Bakker /eds./ 1987; Gregg 1988; Hladík 2014; ad.*), pro dobu železnou existuje pouze rozsáhlá studiezaložená na datech z moderních environmentálních výzkumů kolem mladohalštatských „knížecích“ hradišť v Německu (*Fischer et al. 2010*). Všechny tyto modely mohou sloužit jako inspirace především vzhledem k hodnotám, které používají, a které tak mohou být přejaty a použity dále.

Rizikem všech modelů je samozřejmě jejich nevyhnutelná subjektivita, např. produkční potenciál zázemí může být snadno zaměněn se skutečným využíváním zdrojů. Demografický odhad (nebo lépe demografický údaj) a co nejdůležitější znalosti o povaze lokální ekonomiky jsou proto pro úspěch modelu klíčové, avšak málokdy plně uspokojivé. Experimenty v rámci sociálních simulací pak mohou nabídnout řešení. Modely

s využitím sociálních simulací mají podobná východiska jako kvantitativní modely; na jejich počátku také stojí „design“ – tedy konceptuální model, a případně mohou mít i přípravnou fázi, kterou tvoří kvantitativní model – je možné tak zjistit, zdali jsou kladené otázky a proměnné pro model realistické. Simulace tak vlastně tvoří další – vyšší – stupeň tradičních modelů.

Základním aspektem sociálních simulací je, aby model odrážel studovaný systém dostatečně věrně, tj. i přes simplifikaci postihoval jeho hlavní znaky. Zároveň je kladen důraz na srozumitelnost modelu, jeho transparentnost a replikovatelnost. *Užitečný model* tak má být kompromisem mezi realismem a minimalismem (*Madella et al. 2014, 252*). V poslední době se objevují snahy bilancovat dosavadní vývoj archeologických simulací (např. *Kohler — van der Leeuw /eds./ 2007; Premo 2010; Lake 2010; 2014; Costopoulos — Lake — Gupta 2010; Madella et al. 2014; ad.*). Kriticky se zhodnocují dosavadní aplikace a formulují se směry, kudy by se bádání v této oblasti mělo dále ubírat. V tomto ohledu často zaznívá, ačkoliv jsou modely vytvářené během „třetí vlny“, tj. po roce 2000, více vyzrálé, zejména co se formulování počátečních teoretických otázek týče, často se soustředí na biologické nebo v zásadě fyziologické procesy (jako lidská evoluce, základní produkce, subsistenční ekonomika apod.), zatímco reálný sociologický aspekt a jeho správné pojetí v modelech stále zůstávají pro archeology výzvou (*Lake 2014, 258, 271–277*). Proto stále častěji zaznívá, že simulace mají být používány zejména jako metodologický nástroj především k budování archeologické teorie. K tomu je ideální nelineární povaha explorativních modelů, které zpravidla nepracují s empirickými daty, nicméně mohou odhalit vazby zkoumaného systému, na které by se běžnými postupy nepřišlo. V kontextu subsistenčně ekonomických modelů v konstantních i dynamických prostředích již na toto téma byla publikována řada úspěšných modelů (např. *Lee — Tuljapurkar 2008; Puleston — Tuljapurkar 2008; Lee — Puleston — Tuljapurkar 2009; Cockburn et al. 2013; Schreinemachers — Berger 2011; Maglioca — Brown — Ellis 2013; Angourakis et al. 2014; atd.*).

Realistické (emulativní) modely jsou v poslední době kritizovány zejména co se týče povahy vstupních dat (fragmentárnost), equifinalitě (různé procesy mohou vést ke stejným výsledkům) a také stochasticitě (jeden model nebo jeho část mohou vydat různé výsledky, cf. *Premo 2010, 30–33; Lake 2010, 13; Madella et al. 2014, 252*). V této situaci pak dle některých názorů nelze uspokojivě argumentovat ve prospěch nebo neprospěch vstupní hypotézy. Explorativní modely na druhou stranu naráží na problém s validací pomocí empirických dat, která v mnoha případech ani neexistují. Přes metodologické problémy, provázející oba hlavní účely simulací, by měly oba přístupy nadále tvořit součást archeologické teorie.

Jako většina výpočetních metod i sociální simulace, podobně jako modely konceptuální a kvantitativní, závisí na vstupních datech. Zejména archeologická data jsou typická svojí fragmentárností. Modely oproti tomu vyžadují většinou přesné hodnoty. Pokud nejsou k dispozici, je možné experimentovat s rozptýlenými hodnotami (např. výchozí populace, velikost zázemí) a zkoumat výsledky pro

jednotlivá nastavení. V tom případě emulativní modely v podstatě nabývají i explorativní hodnotu, tím, že zjišťují předem neznámé parametry. Zejména v případech, kdy hledáme odpověď na konkrétní archeologickou otázku, jsou emulativní modely vítaným metodologickým nástrojem, které stávající konceptuální modely mohou obohatit o dynamický aspekt kombinace času a prostoru, ve kterých může docházet ke změnám vstupních parametrů (např. populace, která se mění v čase). Tím mohou objasnit mechanismy interakce lidské společnosti s prostředím a jejich adaptační mechanismy v průběhu času. Díky zpravidla nelineární povaze výsledku se snižuje předem riziko manipulace modelu ve prospěch konkrétní vstupní hypotézy. Takové modely jsou však často náročné na vytvoření, a pokud jsou netransparentní (není u nich jasné, jak bylo dosaženo výsledku), mohou být považovány i za chybné. Přesto se zpravidla nezpochybňuje přínos i „chybných“ simulací: *whether the surprises are due to our faulty understanding of the reality we are modeling or to our faulty modeling of the reality we are seeking to understand, they can force us to reexamine our assumptions and to push beyond the intuitive models of the past for which we often settle too easily ...* (Costopoulos — Lake — Gupta 2010, 2).

Závěr

Výpočetní modely a sociální simulace se typicky uplatňují při studiu sociální complexity, hierarchií a sítí sociálních, kulturních a obchodních kontaktů nebo utváření a udržování hranic. Využívají se při zkoumání vztahu mezi růstem a přesuny populací a životním prostředím, využíváním a vyčerpáváním zdrojů atd. V dnešní archeologické teorii jsou modely a simulace akceptovány jako užitečný nástroj. Rozvíjí se především dva hlavní směry: agentové modelování, částečně vycházející z poznatků umělé inteligence a znalostního inženýrství, a síťové modelování, opírající se o teorii grafů, pravděpodobnost a statistiku. Náš příspěvek je věnován prvnímu z těchto směrů.

V praktických aplikacích jsou všechny systémy, včetně těch sociálních, v otevřené interakci s přírodním prostředím a jsou definovány několika znaky: obsahují určitý počet navzájem se ovlivňujících *agentů* (což jsou jednatelé, nositelé informací), kteří mají svůj vývoj, organizované kolektivní chování a mohou vzájemně interagovat. Na tomto principu vybudované modely mají přispívat daleko lépe k porozumění dlouhodobému biologickému a sociálnímu vývoji lidstva a také k porozumění tomu, jak tato evoluce zasáhla přírodní prostředí a donutila jej reagovat na interakci s lidskou společností. Modely postihují ve stejné míře kontinuitu i změnu, tradice i inovace a jejich vztahy.

Metodické a technické prostředky i zdroje dat a obrovských znalostí, které dnes máme k dispozici, jsou natolik variabilní, že zkoumání dílčích hypotéz můžeme podpořit celými soubory provázaných modelů, v různé míře abstraktních a spojených s konkrétním kontextem (dobou a lokalitou). Ve spojitosti s interpretací a publikováním výsledků experimentů s modely je třeba zvážit multidisciplinární povahu simulací a zvláště to, že správné pochopení výstupů vyžaduje nejen hluboké po-

rozumění problémové doméne (tj. archeologii), ale i přiměřený vhled do technických aspektů (formalizace návrhu modelu, programování, statistické zpracování dat). Jedná se tedy o neoddělitelné strany téže mince a není možné při zveřejňování modelů a simulací jeden nebo druhý aspekt redukovat.

Z ukázek modelů, které jsme uvedli v kapitole 3, si lze udělat představu o možnostech a mezích metody. Cílem bylo co nejnázorněji demonstrovat principy tvorby sociálních simulací. Každý zde prezentovaný model si kladl za cíl řešit na dílčí otázku nebo hypotézu. Byly navrženy tak, aby optimálně využily všechny dostupné zdroje dat a další podklady. Prezentované modely se liší mírou abstrakce a použitým měřítkem, tedy definice agenta je různá, stejně jako délka časového kroku (např. v demografickém a zemědělském modelu byly sledovány roční změny, zatímco v modelu dobývání opevnění jeden krok odpovídá jedné minutě reálného času). Rozdílný je i účel modelů (viz kapitola 1.3). Model demografického vývoje, model alokace pracovních kapacit či model dobývání jsou ukázkami emulativního přístupu, zatímco např. fuzzy-model obilné produkce je spíše explorativní. Model vývoje osídlení regionu ukazuje propojení obou postupů. Výstupy z prezentovaných experimentů jsou zde podávány ilustrativně, aby na nich byla pokud možno jasně a srozumitelně vysvětlena výzkumná metoda.

Poděkování

Tento příspěvek vznikl v rámci řešení projektu „Sociální modelování jako nástroj k porozumění struktuře keltské společnosti a kulturním změnám na konci doby železné (Social modelling as a tool for understanding Celtic society and cultural changes at the end of the Iron Age) podporovaného GA ČR (reg. č. P405/12/0926). Děkujeme T. Machálkovi za implementaci fuzzy-rozšíření pro Net-Logo, a dále P. Kakrdovi a R. Cimlerovi za realizaci modelů využití krajiny a dobývání oppida.

Summary

Computational models and social simulation are typically used in the study of social complexity, hierarchy and social networks, cultural and trade contacts, and the creation and maintenance of territories. They serve to examine relationships between growth and shifts in the population and the environment, the use and exhaustion of resources, etc.

Theories of social simulation are methodologically grounded in the paradigms of the system theory (von Bertalanffy 1968) used by processual archaeology. The methods of system theory investigate the principles of systems (structure, rules, consistency, feedback) and create models for their description; as such, system theory should help predict human behaviour in social systems and foster an understanding of their relationships and interactions. Research today has been focussed more on examining changes in society, the spread of technology and long-term trends in the development of social structures (including 'fusion/fission' processes), and the theory of complexity adopted from the social sciences has become a current trend (e.g. Crema 2014). The basic idea is that it is possible to look at earlier civilisations as at *complex adaptive systems*. This complexity arises from the large number of individuals with parameters and characteristics. Individuals function in an environment that is likewise described by parameters. Adaptability refers to the ability of individuals to change and modify their be-

behaviour, typically in an effort to function rationally, to maximise gains, efficiently allocate resources, take advantage of opportunities, react to new impulses and problems, etc. Two main modelling trends are developing in archaeology today: **agent-based modelling**, which is partially based on information from artificial intelligence and knowledge engineering, and **network modelling**, which is based on the theory of graphs, probability and statistics. This article focuses on the first of these two trends.

Agent-based modelling involves the creation of a computer model, typically replicating the real world or system, and performing experiments in order to gain an understanding of the behaviour of the world (system). The basic concept is the 'agent', i.e. an autonomous (independent) interactive entity. The subject of experiments is the parallel activity and manifestations of the populations of agents in relation to the environment, especially non-linear collective manifestations that cannot be estimated or anticipated on the basis of knowledge regarding the behaviour of individuals. The chosen level of abstraction dictates the possibilities for interpreting the results of experiments.

In connection with archaeological research, agent-based models are a useful tool for testing hypotheses and building theories based on the comparison of archaeological data with the results of simulations. Existing applications have made major contributions to the interpretation of key archaeological questions such as the subsistence strategies of hunter and gatherer populations (*Lake 2000; Del Castillo — Barceló 2013*), the spread of Neolithic agriculture to Europe (*Conolly — Colledge — Shennan 2008; Shennan 2007; van der Vaart et al. 2006*), human impact on the landscape and natural environment (*Axtell et al. 2002; Wainwright 2008; MEDLAND project: Barton — Ullah — Mitasova 2010*) or socioeconomic factors contributing to the development and/or collapse of complex societies. Computer intelligence methods (e.g. genetic algorithms, fuzzy sets, neural networks) can be incorporated into the computer implementation of agent-based models, making it possible to conceptually work with chance and uncertainty, both of which are a natural part of the real world.

Using explanatory (emulative) models we aim to attempt to capture emergence, identify trends and find the relationship between observations and possible explanations. Simulation results are compared with empirical data, and if they agree to the required extent, the model confirms the hypothesis. These models are often used to create detailed structures *in silico* (produced by means of computer modelling or computer simulation).

In contrast, predictive (explorative) models primarily include heuristic models built for the purpose of creating a theory as a methodological tool in order to enable the formulation of new theories. These models are typically very simple and aimed at generating a specific phenomenon (e.g. rules for expanding settlement, decision-making rules, etc.), which also serve to test certain hypotheses, albeit on a much lower level than emulative models offer (e.g. *Bentley — Lake — Shennan 2005; Powel — Shennan — Thomas 2009; Barton 2014; Del Castillo — Barceló 2013; Lake — Crema 2012; Crema 2014; Angourakis et al. 2014; Salgado — Noguerra — Miguel 2014; etc.*)

Social simulation and agent-based models can lend a welcome dynamic aspect to conceptual models serving only for statistical calculations. Explanatory models, with the exception of the simultaneous evaluation of a larger number of parameters, also provide important spatiotemporal aspects (in which input parameters such as a growing population can change) and thus reflect the reaction of the environment and the adaptive mechanisms of the studied society.

The basic approach in the creation of the agent-based model is comprised of the following six main steps:

- (1) formulation of research questions and hypotheses;
- (2) conceptual design;
- (3) implementation;
- (4) validation;
- (5) experiments;
- (6) publication of results and sharing models.

The '**Social Modelling as a Tool for Understanding the Structure of Celtic Society and Cultural Changes at the End of the La Tène Period**' project included the creation of a **set of models** covering the basic aspects of the functioning of Late La Tène society represented by the Staré Hradisko oppidum and its surrounding area, in particular: the assumed demographic development of the population, possibilities for food production and the related estimates of the labour intensity of agricultural work and estimates of probable changes in the landscape. Formed using the maximum amount of available data, the authors' models are designed to cover the essential aspects of the functioning of one specific site; however, the fragmented nature of archaeological data is a limiting factor.

It is assumed that the population size at the Staré Hradisko oppidum in the beginning of its occupation (after 150 BC) grew gradually until it began to decline around 70 BC. Based on a study of the settlement structure of the site, the starting population size is estimated at approximately 600–800 residents. The location is described by a combination of primary and secondary GIS layers of the Staré Hradisko territory with an overall area of 70 km². Maps describe geomorphological variables (slope, 'wetness index') and qualitative variables (distance from waterways, soil quality, original vegetation and the friction surface, i.e. difficulty of moving through the terrain).

Each presented model aims to address a specific question or hypothesis, and the models were designed to make the best use of all available sources of data and other materials. Another objective was to demonstrate the research method in the most graphic manner, i.e. the principles of creating social simulations and the possibilities of the chosen implementation tool (NetLogo).

Demographic development model

The agent-based model serves to generate data series on the synthetic population, i.e. the number of people in individual age categories and deduced data (the overall energy demands of the population, available workforce), including consideration of various demographic depopulation scenarios and the utilisation of historical data (mortality tables from *Saller 1994*). The generated synthetic population must have a stable ratio of men and women and shares of represented individual age categories, of which seven are used in the model: infants, toddlers, small children, large children, young adults, adults, and elderly. The types of work potential of a population can be deduced on the basis of these categories (divided by physical capacities), i.e. 'strong' (*strong-force*) – adults and young men, and 'weak' (*weak-force*) – older children, young adults – women, adult women, elderly individuals. This classification also makes it possible to calculate the energy requirements of the population using caloric tables for individual age categories (in greater detail in *Danielisová et al. 2015*, 106–111).

A growth rate of 1–2 % is regarded as rapid annual demographic growth under favourable conditions (*Turchin 2009*, 12). It is assumed that as long as no other factors are at work, the population grows or decreases exponentially or logarithmically (*baseline scenario*).

$$P(t) = P_0 e^{rt} \quad (1)$$

Simple Malthusian model of the population growth
(P_0 – initial population, r – growth rate, T – time).

The model also considers two depopulation scenarios, corresponding to possible hypotheses on the decline of settlement at the oppidum:

- *Sudden or gradual decline of part of the population* evenly affecting all age categories (the departure of whole families is considered), causing a decrease in the size of livestock herds (the departing families take along some of the property) and impacting the size of the economic base.
- *Epidemic* appears as an uneven decrease in certain age categories (children, elderly) and, with a delayed effect of about a decade, is manifested in a decrease in the available labour.

Individual residents are the agents. An agent is described by two basic parameters (age, gender), while other parameters are de-

duced (age group classification, energy consumption). One step in the simulation represents a single year. In each step there is a recalculation of the population in accordance with the given scenario. In the case that a depopulation scenario is applied, agents are reduced beginning in the 70th step of the simulation (corresponding to the 70th year of the oppidum's existence). The model has the following initial parameters:

$$F_1 = \frac{|x - A|}{A} \quad (2)$$

Proportional changes in the final population according to the initial population (A – initial population, x – final population).

$$F_2 = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \frac{|x_i - x'_i|}{x'_i} \quad (3)$$

Average proportional change between two sex and seven age groups in the final population.

- starting population size between 600 and 800 individuals;
- starting age structure of the population;
- interpolated mortality tables;
- probability Q for women to have a child in a specific year.

The *BehaviorSearch* software tool employing genetic algorithms was used to determine probability Q .

The model produces data series on the number of people in individual age groups and their energy consumption over a period of 120 years (Fig. 4). This output is used in related land-use models and models on the allocation of labour.

The agent is treated in the basic version as an independent unit. The model can be expanded by including the child-parent relationship, making it possible to define family and potentially other ownership structures (e.g. land allocation) in a more complicated model incorporating also social aspects. The model does not factor in more detailed aspects of domestic life, since the parameters would have to be set arbitrarily and without the sufficient support of data, moving the model more towards the exploratory level.

Model of the agricultural landscape and the land-use

The model aims to represent a virtual laboratory for testing the causal role of demographic, economic and environmental factors in the formation of land-use strategies. The model was created for the purpose of studying the relationship between the growing population and the intensity of land-use, especially for investigating the subsistence capacity of the oppidum under the 'model' assumption that the population must have been self-sufficient in its food production, that it had a certain available area of agricultural land and practised intensive or extensive farming combining plant and animal production. The model also takes into account the necessary labour investment to cover human and animal energy requirements, including the allocation of labour over and above basic production. Factors influencing year-on-year harvest yields are likewise included. Five basic categories of land-use (Tab. 2; Fig. 5) – information on the transformation of the landscape resulting from assumptions on natural conditions in the La Tène period – were considered.

The rules for occupying and using land in the area surrounding the settlement are based not only on the actual suitability of the land but also (1) on the rules for efficient movement, known in archaeology as *least effort models* (Hagget – Cliff – Frey 1977), (2) on the theory of ecosystems (Bayliss-Smith 1978; Ebersbach 2002; Schreg 2011), which directly takes into account demography, subsistence and the organisation of labour in connection with the environment, and also (3) on the given limits of the environment and population (i.e. the limits of production at which the population must either modify its size or change its strategy; cf. Bayliss-Smith 1978; del Monte-Luna et al. 2004). It is necessary at first to define the levels of basic resources in the ecosystem (i.e. the carrying capacity of landscape units) and the production potential of

the population using these resources (i.e. organisation of labour and workforce).

The basic principles of the model are:

- 1) Securing the continuity of production – in addition to covering actual consumption, part of the harvest must be reserved for seed (typically 200 kg/ha).
- 2) Maintaining the continuity of self-sufficient production – securing necessary reserves for years with poor harvests (typically double the annual energy consumption of population), or supplementing reserves from external sources.
- 3) Maintaining the continuity of animal production – the number of slaughtered (or eliminated for other reasons) animals must not exceed the reproductive capacity of the herd of the specific species (usually 25 % of animals).
- 4) Securing the continuity of sustainable landscape management – exploited landscape units must remain within a reachable distance (with the exception of forests) and their potential must not be exhausted (e.g. decreasing fertility).

The model represents the following elements of the social-ecological system: the population dynamic (human and animal community), agricultural strategy, primary land fertility, land fertility under human influence, topography (terrain variability), weather-variability and vegetation succession.

The timeframe of the simulation is 120 steps, with one step corresponding to one year, when the renewal of the state of cells corresponds to processes occurring during one agricultural year. An agricultural year represents a winter and summer season divided according to the workload.

This land-use model is designed on the principle of a cellular automaton. Each cell/field (*patch*) has several biophysical attributes that capture its potential for use: topography, original land cover and accessibility from the centre, the values of which are periodically updated. These attributes were expressed using a combination of primary (topography, hydrology, geology, soil quality, vegetation potential) and secondary layers (distance from settlement, difficulty of traversing the terrain, i.e. 'friction', Equation 4), and predictive maps (field and pasture suitability), all raster (GIS) maps.

$$V = 6 * e^{-3.5(S+0.05)} \quad (4)$$

Accessibility of land around settlement
(V – travelling velocity, S – slope in %).

A total of five basic (nine specific) land-use categories were defined in the model (Tab. 2). Concrete information on the transformation of the landscape was derived from maps and general assumptions on natural conditions in the La Tène period. The simulation begins with the display of biophysical attributes for individual cells. Each cell updates its status on the basis of its current use. The model assumes that the landscape was forested at the start of occupation and that deforestation occurred gradually. In the period in which the simulation begins, the landscape has already been partially cultivated by the preceding population (there is a certain number of animals present and the fields around the site are in various stages of cultivation). The current population size, the number of animals and their energy requirements and labour capacities are updated with each step (= year) of the simulation. The size of the forest gradually decreases as the cultivated area of land grows.

It is assumed that most of the energy consumption of the population was covered by cereals (wheat and barley), the rest by pulses, protein (meat and milk) and other food sources. Based on a definition of the parameters of production (actual consumption, surplus production, seed corn, losses) and general agricultural principles (year-on-year fluctuations in harvest yields, net gains), the necessary size of agricultural land can be deduced. It is possible to simulate the land changes in time (i.e. in individual years), both changes in size (the size of the area increases as the population grows) and qualitative changes (yields are influenced by soil fertility, which is affected by fertilisation, fallowing, and crop rota-

tion). The calculation of the necessary annual area of cultivated fields (Equation 5) is considered in order to assume that the following year, as long as no unexpected events occur, the harvest will be sufficient to cover the current consumption of the local population and to secure reserves (in terms of “the safety margin”; Müller-Herold — Siefertle 1997).

$$F = \left(\frac{TC \times pCD}{exY \times 3440} \right) \times (1 + r) + \left(\frac{LA \times SR}{exY} \right) \quad (5)$$

Annual update of the fields area “F”
 (TC – total consumption, exY – expected yield/ha /kcal/,
 pCD – % of cereal diet, r – reserves, LA – current field area
 /under intensive or extensive strategy/, SR – seed corn).

Moreover, in the case of an extensive strategy, the fallows are also counted, as they can be used during this period as pasture. Also influencing the size of fields (and pastures) is the productivity (fertility) of cells in the model, which impacts the production of biomass and is based on the cycle of nitrogen (NO₂) in the soil (Fig. 6). The current average values of nitrogen are measured and subsequently used to calculate fertility for each field of the map (Equation 6). Fertility is then used to derive the ‘fertilisation impact’ which, among other parameters, has an impact on the size of year-on-year production (Fig. 7).

$$* FY = normal(exY, dev) + FI \quad (6)$$

Calculation of fertilisation impact (exY – expected yield/ha /kcal/,
 dev – annual harvest fluctuation, FI – fertilisation impact).

The size of the harvest is tracked each year. The result reflects both the long-term trend in field fertility and the current influence of external factors included in the model (events such as weather, and losses). The harvest is then converted to its energy value (kcal). The harvest volume is intended for consumption by the population, for seed for the following season and the surplus, if any, is added to storage after losses are offset.

Livestock numbers are deduced either from the current population size (the basic value can also be doubled) or the actual parameters of natality and mortality for individual herds are followed (Fig. 8). The ratios of individual species in the oppidum herd are determined using archaeozoological data. The largest group of animals is cattle, used both for meat and milk (i.e. protein) as well as dung (= nitrogen), on which harvest yields also depend. Cattle (oxen) were also used as draught animals for ploughing. Horses, sheep/goats and pigs were only a source of meat, milk and nitrogen. The following are established in advance for each species: the length of the lactation period, the meat, milk and manure yield, and herd sustainability in the case of slaughter. Each animal has different grazing preferences; some species can be grazed in the forest (cows, pigs), while others (sheep/goats, horses) cannot. These preferences are used to deduce the overall deforested area (Equations 7, 8, 9). Forests were also cut to meet the demand for wood and to create room for the growing population.

The current population is used each year to calculate the energy demand for the given year, which in turn indicates the area that

must be sowed and the number of animals that must be tended. Energy outputs are followed using the so-called ‘bank of working hours’, which takes into consideration the current working disposition of the community (*sensu strong-force* and *weak-force*), from which the time necessary for individual activities is deduced. Statistics from each year make it possible to determine whether the community was self-sufficient with respect to labour (e.g. while monitoring various demographic scenarios), or whether the community’s work capacity was insufficient to cover basic production needs.

Experiments were used to show how it is possible to study the use of land surrounding the site and the structure of the main landscape units under various strategies, various population sizes and with the clear goal of sustainable production.

The aim of the first experiment (Fig. 9) was to determine the maximum sustainable population of people and animals in the anticipated surrounding area and whether the capacity of natural resources is exceeded during the period of simulation (i.e. the period of oppidum occupation). The results show that when median yield values are set under an intensive strategy of 1,500 kg/ha, 3,000 kg/ha of grassland, 2,400 kg/ha of leaf fodder (as winter fodder) and the basic (i.e. not doubled) number of animals, the surrounding area of the oppidum is used but not exhausted, and the maximum population reaches the maximum model values in the ‘baseline’ scenario (i.e. a population over 3,000). If the number of animals is doubled, the maximum size of the population under the existing economic strategies would have to stop at a value of around 1,500 (Fig. 9).

The **second experiment** studied the long-term harvest trend and the success of production (surplus or deficit). Fertility is supported by the application of manure. Among other factors, annual harvest fluctuations are caused by the weather, which is implemented in the model as climatic ‘events’ (storms, rain, hail, drought, frost, etc.), which have a range of effects and were modelled on the basis of historical records from the same region (e.g. Brázdil — Valášek — Chromá 2006). The local population creates reserves by cultivating a larger area and storing the surplus grain in order to ensure that the energy needs of population are covered in the event of a poor harvest (i.e. a *safety margin*, cf. Müller-Herold — Siefertle 1997, 209–210). The experiment settings include a basic population scenario (*baseline*), 30 % of the amount of nitrogen from the dung of domesticated animals and the impacts of weather. Reserves above basic production are 10 %, 50 % and 100 %. The results show that at 10% over-production, the population already regularly faces a deficit (low harvest and depleted storage), primarily due to the weather (Fig. 10). At 50% over-production the population is self-sufficient, and at 100% a surplus is regularly created.

A model scenario of a 50% decrease in domesticated animals was also added to the experiment in the 75th year of the oppidum’s existence. The results indicate that agricultural production did not fall into deficit only if it was double (100% greater) basic consumption (Fig. 10, 11). The basic demographic scenario for a situation involving a sudden decrease in livestock was compared with the model in which there is a gradual decline in the population begin-

$$PA = \frac{(H \times 2 + S \times 0.1 + C \times 1.5) + (P \times 0.5 + (C - (PAS - H \times 2 + S \times 0.1)) \times 4)}{2 \pm 0.3} \quad (7)$$

Pasture area “P” including grasslands, forest and fallows (H – number of horses, S – number of sheep,
 C – number of cattle, P – number of pigs, PAS – total pasture area).

$$MA = \frac{(C \times 5 + H \times 6 + S) \times 150 \pm 30}{3000 \pm 500} \quad (8)$$

Area of meadows “MA” necessary for production of hay
 (H – number of horses, S – number of sheep,
 C – number of cattle).

$$LFA = \frac{(C \times 6.5 + H \times 7.5 + S \times 1.5) \times 150 \pm 30}{2400} \quad (9)$$

Forest area “LFA” necessary for leaf fodder collecting
 (H – number of horses, S – number of sheep,
 C – number of cattle).

ning in the 70th year. It was found that with a smaller population the production level is balanced after a certain amount of time, especially under the influence of returning sufficient nitrogen levels for the fields as an impact of the lower population.

The aim of the **third experiment** was to determine whether the settlement's workforce (*strong-force* and *weak-force*) was adequate to meet the set production goals and whether there was still available capacity for other activities (e.g. specialised production, free time, the non-productive part of the population such as the elite). A rising or decreasing trend in free time also shows the influence of population size and the chosen production strategy (Fig. 12), and individual demographic scenarios created in the population model are compared. The results suggest that a larger population is effective in meeting production goals and that smaller communities have proportionally less free time. Also having a significant impact on the workforce were the effects of epidemics: a decline in the younger generation is evident in the period after an epidemic. It is possible to state that less free time for activities other than those connected with the production of food also means a reduction in the complexity of the society.

The existing cellular automata model of the landscape could also be supplemented with an agent-based model of families farming their own fields or pastures, since the number of animals is calculated in the existing model per nuclear family (*household*), not per individual. In this way, the simulation would be enriched by elements of an explorative nature – the social ownership of land and a certain number of animals, and the potential unequal social standing of individual households resulting from their (changing) capital.

Model of agricultural production, using fuzzy logic

This model (published in detail in Danielisová et al. 2015) represents an alternative approach to the modelling of the agricultural landscape. The model assumes that people expanded the cultivated area surrounding settlements in connection with the increase in consumption of the growing population and that this expansion occurred efficiently with the aim of effective management and to achieve maximum gains at a minimum level of effort. The objective of this explorative model is to study the relevant decision-making processes of farmers concerning the creation of spatial field structures in the landscape. The prediction of landscape units (i.e. fields) using fuzzy logic is presented here as a methodological tool (details in Machálek et al. 2013).

The model simulates the decision-making process of farmers on the suitability of individual plots for crop or animal production as well as on the size of intensively cultivated agricultural areas based on the difference between the current year-to-year harvest and the annual consumption of the community. The suitability of land and the choice of the agricultural strategy are addressed on two levels:

- The first evaluates the landscape from a topographical perspective (accessibility, slope, etc., from the perspective of fuzzy logic; cf. Jarostaw — Hildebrandt-Radke 2009; Reshmidevi — Eldho — Jana 2009).
- The second level introduces a dynamic factor (e.g. harvest from previous years). The community draws on experience from past seasons regarding the suitability of using specific plots for various purposes (Equation 10).

$$y_p = \frac{25 \cdot h \cdot y}{10000} \cdot T \cdot r \quad (10)$$

Calculation of yield from the map cell "yp"
 (25/10000 – conversion of yield to area unit in the model,
 h – yield/ha, h·y – harvest fluctuation, T – farming type
 coefficient /1 – intensive, 0.3 extensive – because of fallows/
 r – user defined coefficient representing long term trends
 in crop yield).

One step in the simulation represents a single farming year. The agent represents the settlement, surrounded by arable land. The map is a GIS based grid of cells with fuzzy qualities (Fig. 13):

The output of the model is a layout in the surrounding area of the settlement of intensively and extensively cultivated land and

pastures that can provide the required total yield under the chosen combination of agricultural strategies (Fig. 14).

Model of labour allocation

The model shows the possibilities for dividing labour between agricultural activities occurring simultaneously in a key part of the growing season, i.e. during the summer harvest, when it is necessary within a relatively short period of 2–6 weeks to reap (*Halstead 2014, 67–126*), process and store cereals and pulses (with a gradual period of maturation depending on the site and weather), cut hay in meadows as winter fodder and also to perform everyday activities such as domestic work and livestock maintenance (Fig. 15).

Available work capacity is derived from the population model (in *strong-force* – more difficult work such as ploughing and reaping, and *weak-force* – other activities). It is also necessary to distinguish overall work capacity (all male adults) and the actual employed work capacity, which was probably lower (with the assumed existence of elite and labour capacity permanently dedicated to other non-agricultural work).

The harvest process is influenced by weather, which impacts the speed of cereal maturation and the length of time that the cereal standing in the fields retains the necessary quality; the number of rainy days extends the entire process. Local events such as storms, damage caused by wild animals, fire, theft, etc., can reduce harvest size. Since an individual year is modelled, it isn't necessary to consider year-on-year harvest fluctuations or to factor in the existence of storage from previous years.

One step in the simulation represents one day. A maximum of 90 steps are simulated, which corresponds to the three-month summer season in which the harvest occurs. Of primary interest is a harvest model that results up to 21 days (3 weeks). The overall consumption of cereals (including seed for the following year, winter fodder and anticipated losses) and the projected yield make it possible to calculate the area of fields that must be cultivated, i.e. a specific work capacity must be devoted to the harvest. Available labour is inferred from the overall 'time banks' of the available work force (*strong-force* and *weak-force*).

The aim of the *first experiment* was to estimate the impact of weather on extending the harvest period. A population of 1,000, a twelve-hour working day, 10% unused work capacity and an average yield of 1,500 kg/ha are used. The results show that with this work capacity it would be possible under relatively favourable weather conditions (a probability of rainy weather not exceeding 30%) to complete the harvest in less than three weeks (Fig. 16).

The *second experiment* assumes a three-week-long harvest with a 30% chance of poor weather and investigates the maximum possible share of "elite" that did not contribute to food production. The experiment found that the harvest is possible to the given extent when the share of the non-working population does not exceed 20% of the total population (Fig. 17).

In the *third experiment*, assuming that 20% of the population was not involved in the primary production of food and that the probability of rainy weather was between 10% and 30%, it was possible to investigate, under a variety of hectare yields, the extent to which the population was capable of covering its own consumption while also producing a surplus that could be freely dealt with, for example, on the market, as social capital. In the case of favourable weather, even a low hectare yield (800 kg/ha) was sufficient to cover the consumption of 1,000 individuals, whereas under worse weather conditions it was possible to double production only with a hectare yield that was four times as high (3,200 kg/ha) (Fig. 18).

Yields and the quality of individual species of cereals are not constant over time. Greater knowledge of related processes could help make the model more precise. Moreover, in the meantime, the simplified assumption of the impact of rainy days on extending the harvest could be replaced by more sophisticated work with weather data corresponding to the type of scenario (e.g. 'warm summer', 'rainy summer', 'local storms'). Beside the harvest period, it is also possible to focus on the overall nature of the farming year with all connected activities, including the consideration of alternative agricultural strategies imposing various demands on labour (spring and/or autumn ploughing, intensive or extensive farming).

Model for the settlement development of the region

This agent-based model makes it possible to study the creation of the settlement structure in the broader region around the oppidum. The model is based on a premise supported by archaeological finds that the oppidum was surrounded by a system of agricultural settlements whose residents may have been in a socio-economic relationship with the oppidum. The model is essentially conceived as emulative, as it is based on empirical data concerning the rules for the localisation of settlements. However, the rules for the organisation of space in the creation of the settlement structure are conceived in an explorative manner, as is the hypothetical relationship to the central site. The model is designed to enable experiments with the starting number and parameters of settlements, and the mechanisms of gradual growth, dispersal, fission and fusion.

The basic unit of the model is the spatial expression of the 'household', i.e. the settlement. The rules for a gradually growing population in space are based on its energy consumption, economic strategies (i.e. demand for local resources) and the degree of social organisation. The process of settlement dispersion can be motivated by common objectives (e.g. the search for new resources) as well as by an attempt to avoid interpersonal conflict if the population density exceeds tolerable limits – otherwise known as *scalar stress* (Johnson 1982; Bandy 2004). Therefore, the settlement development can lead either to centralised or to dispersed structure (Fig. 19). It can be assumed that rational decisions were made in moving, i.e. that the selection of a new agricultural settlement involved a preference for suitable land with the potential for fields, pastures and forest, with the possibility for expansion and a location that was not overly isolated from already existing settlements. In addition to the actual suitable environment, also playing a decisive role in the case of larger settlements was a connection to an already existing network of routes or an emerging settlement structure. These data can be used as a baseline (in the sense of an emulative model) or as empirical control of a simulated settlement network (in the sense of an explorative model).

One step in the simulation represents one year, and a total of 120 steps were simulated. Individual settlements are represented in the model by an agent, the behaviour of which depends on its main parameter – the number of residents, from which the values of other parameters are derived, especially the size of the cultivated area or consumption and the related demands on work capacity. Another parameter of the agent is an indicator of its predecessor, i.e. a reference to the parent settlement. These references can be used to follow the development of the settlement network.

As in the case of the agricultural model, the environment is also described by a GIS grid. The cell attributes express the potential for the establishment of a settlement. The migration process can be activated when (1) the number of residents exceeds a determined population limit expressing the set scalar stress, or (2) limits of the environment in which the settlement is located are reached.

Various defined mechanisms of migration and their influence on the spatial layout of the settlement network were examined by means of experiments. The model worked with a minimal friction distance between settlements that would enable the founding of a new settlement along with the surrounding economic support area. If the population of an individual settlement reaches a certain limit, 30 % (i.e. two households) move somewhere else. The new settlement is built at the nearest suitable location. The moving group of residents can establish a new settlement or could also join an already existing settlement, the population of which thus grows to the maximum capacity of the environment as a result (Fig. 21).

The relationship to the central site – the oppidum – is decisive for the modelled settlement structure. The annual production of settlements depends on the oppidum, as does, to a certain extent, their spatial structure, including the hierarchy of the settlement network. A demographic scenario similar to the one used for the occupation of the oppidum could also be applied to the occupation of the region; in addition to the growth of the population; this scenario would also take into account a potential decline in the population as the result of migration beyond the region, epidemics, etc.

The article also briefly presents a **model of a military siege on the oppidum** in order to illustrate the variability of applied agent-based models and simulations in archaeological research.

The agent-based model serves to test the military qualities of the oppidum fortifications represented by the Staré Hradisko oppidum. The main points the model was to investigate were:

- (1) the defence capacity of the fortification lines (the impact of artificial obstacles) in various construction phases, and their comparison;
- (2) the number of attackers and defenders;
- (3) the effectiveness of an attack made against various places along the fortifications.

The model is described in detail in *Kakrda (2014)*. The experiments showed that, for the most part, the defenders were able to reliably withstand an attack even when outnumbered fivefold. On the other hand, when the defenders are outnumbered sevenfold, the attackers are always successful. Additional experiments compared the defensive capabilities of the fortifications.

Discussion

Existing economic models typically focus on the size of the population in a given environment and at a given time and, based on empirical data, model the sustainability of economic production and possibly other factors such as interaction with other settlements. The first step in the traditional approach to the study of the socioeconomic relationships of past societies is a 'conceptual model' in which key variables are focussed on relationships inside the model. This is followed by a 'quantitative model' in which values are assigned to individual variables typically based on empirical data (archaeological, palaeoecological, geomorphological and others), and the model takes on a form created to the scale of the specific environment (cf. *van Dinter et al. 2014*). Some models remain in conceptual form, i.e. they end with the formulation of a hypothesis and do not proceed to the quantitative phase. Comprehensive economic models that also include calculations related to the size of the population and the surrounding economic area are relatively rare (*Mařík 2009; Olsson 1991; Groenman-van Waateringe — Wijn-gaarden-Bakker /eds./ 1987; Gregg 1988; Hladík 2014; Fischer et al. 2010; etc.*). Naturally, the risk of all models is their inevitable subjectivity; e.g. the production potential of the surrounding economic area can be easily confused with the actual use of resources. Therefore, the demographic estimate (more precisely 'demographic data') and the most in-depth knowledge of the local economy are of key importance for the success of the model; nevertheless, they are usually far from being complete or detailed. Experiments involving social simulation could provide a solution. Models that employ social simulation have a similar starting point as quantitative models; they begin with a 'design', i.e. a conceptual model, and can also have a preparatory phase comprised of a quantitative model that makes it possible to determine whether the posited questions and variables are realistic for the model. Simulation is actually the next stage of traditional models. It is essential that the social simulation provide a sufficiently reliable reflection of the studied system, i.e. that it captures its main characteristics despite the inherent simplification. An emphasis is also placed on the clarity, transparency and replicability of the model. Realistic (emulative) models have been criticised recently for the nature of their input data (the fragmented nature thereof), for their equifinality (various processes can lead to the same results) and for their stochasticity (one model or its part can produce various results; cf. *Premo 2010, 30–33; Lake 2010, 13; Madella et al. 2014, 252*). In this situation, some scholars believe it is impossible to argue in favour of or against the initial hypothesis. On the other hand, explorative models run into problems with their validation using empirical data, which in many cases do not even exist. Despite the methodological problems accompanying the two main purposes of simulation, both approaches should continue to be part of archaeological theory.

As is the case with the majority of computational methods, social simulation (like conceptual and quantitative models) relies on input data. Archaeological data in particular is known for its fragmentary nature. In contrast, models mostly demand precise values. If these are unavailable, it is possible to experiment with min-

imum and maximum ranges of values (e.g. the starting population, the size of the surrounding economic area) and to study the results for individual settings. In this case, emulative models essentially acquire an exploratory value in that they determine parameters that were not known in advance. Emulative models are especially welcome in cases when an answer to a specific archaeological question is sought, and these can enrich existing conceptual models by adding a dynamic aspect – a combination of time and space, in which changes occur in the starting parameters (e.g. the population, which changes over time). In this way it is possible to clarify the mechanisms of the interaction of human societies with the environment and their adaptation mechanisms over time.

Conclusion

Models and simulation are accepted as useful tools today in archaeological theory. The examples of models offer an idea of the possibilities and limits of the method. The objective was to clearly demonstrate the principles of the creation of social simulations. Each presented model aims to address a specific question or hypothesis, and the models were designed to make the best use of all available sources of data and other materials. The presented models differ in the degree of abstraction and the employed scale; the definition of the agent differs, as does the length of the time steps (e.g. days, decades). The purpose of the models also differs: the model of demographic development, the model for the allocation of work capacity and the 'siege' model are examples of the emulative approach, whereas the fuzzy model of crop production is more explorative in nature. The model for the occupation of the region shows the interconnection of the two approaches. The results from the experiments are presented graphically to make the explanation of the research method as clear as possible.

Translated by David J. Gaul,
proofreading by Zuzana Maritzová

Literatura

Altaweel, M. 2007:

Addressing the Structures and Dynamics of Modeled Human Ecologies. In: Clark, J. T. — Hagemester, E. M. /eds./: *Digital Discovery. Exploring New Frontiers in Human Heritage. CAA2006. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Budapest, 30–41.

Altaweel, M. 2008:

Investigating agricultural sustainability and strategies in northern Mesopotamia: results produced using a socio-ecological modeling approach. *Journal of Archaeological Science* 35, 821–835.

Angourakis, A. et al. 2014:

Angourakis, A. — Rondelli, B. — Stride, S. — Rubio-Campillo, X. — Balbo, A. — Torrano, A. — Martinez, V. — Madella, M. — Gurt, J. M.:

Land Use Patterns in Central Asia. Step 1: The Musical Chairs Model. *Journal of Archaeological Method and Theory* 21, 405–425.

AnyLogic. 2015:

www.anylogic.com (25. 11. 2014)

Axtell, R. L. et al. 2002:

Population Growth and Collapse in a Multi-Agent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99(3), 7275–7279.

Babuška, R. 2001:

Fuzzy and Neural Control Disc. Course Lecture Notes (October 2001). Delft University of Technology.

Bandy, M. S. 2004:

Fissioning, Scalar Stress, and Social Evolution in Early Village Societies. *American Anthropologist* 106/2, 322–333.

Barton, C. M. — Ullah, I. I. — Mitasova, H. 2010:

Computational modeling and Neolithic socioecological dynamics: a case study from Southwest Asia. *American Antiquity* 75, 364–386.

Barton, C. M. 2014:

Complexity, Social Complexity, and Modeling. *Journal of Archaeological Method and Theory* 21 (2) 306–324.

Bayliss-Smith, T. 1978:

Maximum populations and standard populations: the carrying capacity question. In: Green, D. — Haselgrove, C. — Spriggs, M. /eds./: *Social Organisation and Settlement: Contributions from Anthropology, Archaeology and Geography. BAR International Series (Supplementary) 47(i)*, 129–151.

Bentley, R. A. — Lake, M. W. — Shennan, S. J. 2005:

Specialization and Wealth Inequality in a Model of a Clustered Economic Network. *Journal of Archaeological Science* 32, 1346–1356.

Bertalanffy, L. von 1968:

General System Theory. New York.

Brázdil, R. — Valášek, H. — Chromá, K. 2006:

Documentary evidence of an economic character as a source for the study of meteorological and hydrological extremes and their impacts on human activities. *Geografiska Annaler* 88 A (2), 79–86.

Briz I Godino, I. et al. 2014:

Briz I Godino, I. — Santos, J. I. — Galán, J. M. — Caro, J. — Álvarez, M. — Zurro, D.:

Social Cooperation and Resource Management Dynamics Among Late Hunter-Fisher-Gatherer Societies in Tierra del Fuego (South America). *Journal of Archaeological Method and Theory* 21, 343–363.

Chapman, R. 2003:

Archaeologies of complexity. London – New York.

Cimler, R. et al. 2012:

Cimler, R. — Olševičová, K. — Machálek, T. — Danielisová, A.: Agent-based Model of Agricultural Practices in Late Iron Age. In: *Proceedings of the 15th Czech-Japan Seminar on Data Analysis and Decision Making under Uncertainty*, September 24–27. Osaka, 166–171.

Cioffi-Revilla, C. 2010:

A Methodology for Complex Social Simulations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13, (1), 7.

Čížmář, M. 2005:

Keltské oppidum Staré Hradisko. Olomouc.

Clarke, D. /ed./ 1972:

Models in Archaeology. London.

Cockburn, D. et al. 2013:

Cockburn, D. — Crabtree, S. A. — Kobti, Z. — Kohler, T. A. — Bocinsky, R. K.:

Simulating social and economic specialization in small-scale agricultural societies. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 16 (4), 4.

<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/4.html> (14. 11. 2014).

Computational Modelling and Human Use of Space:

http://www.ucl.ac.uk/archaeology/research/directory/computational_modelling_bevan_lake (12. 11. 2014).

CoMSES (2014):

<http://www.openabm.org/faq/what-model-certification-and-how-does-it-work> (12. 11. 2014).

Conolly, J. — Colledge, S. — Shennan, S. 2008:

Founder effect, drift, and adaptive change in domestic crop use in early Neolithic Europe. *Journal of Archaeological Science* 35, 2797–2804.

- Costopoulos, A. — Lake, M. W. — Gupta, N. 2010: Introduction. In: Costopoulos, A. — Lake, M. W. /eds./: 1–8.
- Costopoulos, A. — Lake, M. W. /eds./ 2010: Simulating the change. Archaeology into the twenty-first century. Salt Lake City.
- Craenen, B. et al. 2010:
Craenen, B. — Theodoropoulos, G. — Suryanarayanan, V. — Gaffney, V. — Murgatroyd, P. — Haldon, J.: Medieval Military Logistics: A Case for Distributed Agent based Simulation.
<http://eudl.eu/doi/10.4108/ICST.SIMUTOOLS2010.8737> (14. 11. 2014).
- Crema, E. R. 2014:
A Simulation Model of Fission–Fusion Dynamics and Long-Term Settlement Change. *Journal of Archaeological Method and Theory* 21, 385–404.
- Crumley, C. 2007:
Notes on a New Paradigm. In: Kohring, S. — Wynne-Jones, S. /eds./: *Socialising Complexity. Structure, Interaction and Power in Archaeological Discourse*. Oxford, 30–36.
- Dalla Bona, L. 2003:
Predictive Modelling Methodology. <http://modelling.pictographics.com/method.htm> (19. 1. 2003).
- Danielisová, A. 2014:
Oppida, production and social status. Complexity of the Late La Tène period in Central Europe. In: Fernández-Götz, M. — Wendling, H. — Winger, K. /eds./: *Paths to complexity. Centralisation and urbanisation in Iron Age Europe*. Oxford, 76–83.
- Danielisová, A. — Hajnalová, M. 2014:
Oppida and agricultural production – state of the art and prospects. Case study from the Staré Hradisko oppidum (Czech Republic). In: Hornung, S. /ed./: *Produktion – Distribution – Ökonomie. Siedlungs- und Wirtschaftsmuster der Latènezeit*. Kolloquium Otzenhausen 2011. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie. Bonn, 407–428.
- Danielisová, A. — Miličková, J. 2014:
Pozdně laténské spony z oppida Třisov získané povrchovou prospekci v letech 2008–2013. *Archeologické rozhledy* 66, 40–66.
- Danielisová, A. et al. 2015:
Danielisová, A. — Olševičová, K. — Cimler, R. — Machálek, T.: Understanding the Iron Age Economy: Sustainability of Agricultural Practices under Stable Population Growth. In: Wurzer, G. — Kowarik, K. — Reschreiter, H. /eds./: *Agent-based Modeling and Simulation in Archaeology*. Wien, 95–128.
- Dean, J. S. et al. 2000:
Dean, J. S. — Gumerman, G. J. — Epstein, J. M. — Axtell, R. L. — Swedlund, A. C. — Parker, M. T. — McCarroll, S.: Understanding Anasazi Culture Change Through Agent Based Modeling. In: Kohler, T. A. — Gumerman, G. J. /eds./: *Dynamics of Human and Primate Societies. Agent Based Modeling of Social and Spatial Processes*. New York – London, 179–205.
- Dekker, A. 2014:
Revisiting Artificial Anasazi: a NetLogo tutorial (part 1, 2). <http://scientificgems.wordpress.com/2014/06/07/revisiting-artificial-anasazi-a-tutorial-part-1/>, (14. 11. 2014).
- Del Castillo, F. — Barceló, J. A. 2013:
Why Hunter and Gatherers did not Die More Often? Simulating Prehistoric Decision Making. In: Earl, G. — Sly, T. — Chrysanthi, A. — Murrieta-Flores, P. — Papadopoulos, C. — Romanowska, I. — Wheatley, D. /eds./: *Archaeology in the Digital Era. papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. Southampton, 26–29 March 2012, 154–163.
- Dinter, M. van et al. 2014:
Dinter, M. van — Kooistra, L. I. — Dütting, M. K. — Rijn, P. van — Cavallo, C.:
Could the local population of the Lower Rhine delta supply the Roman army? Part 2: Modelling the carrying capacity using archaeological, paleo-ecological and geomorphological data. *Journal of Archaeology in the Low Countries* Vol. 5, Nr. 1. <http://jaloc.nl/cgi/t/text/get-pdf75d9.pdf?c=jalc;idno=0501a04> (14. 11. 2014).
- Doran, J. E. 1970:
Systems Theory, Computer Simulations and Archaeology. *World Archaeology* 1, (3), 289–298.
- Eastman, J. R. 2006:
IDRISI Andes. Guide to GIS and Image Processing. Worcester.
- Ebert, J. I. 2000:
The State of the Art in „Inductive“ Predictive Modelling: Seven Big Mistakes (and Lots of Smaller Ones). In: Wescott, K. L. — Brandon, R. J. /eds./: *Practical Application of GIS for Archaeologist. A Predictive Modeling Toolkit*. London, 129–134.
- Ebersbach, R. 2002:
Von Bauern und Rindern. Eine Ökosystemanalyse zur Bedeutung der Rinderhaltung in bäuerlichen Gesellschaften als Grundlage zur Modellbildung im Neolithikum. *Basler Beiträge zur Archäologie* 15. Basel.
- Erdkamp, P. 2005:
The grain market in the Roman Empire. A social, political and economic study. Cambridge.
- Fischer, E. et al. 2010:
Fischer, E. — Rösch, M. — Sillmann, M. — Ehrmann, O. — Liese-Kleibner, H. — Voight, R. — Stobbe, A. — Kalis, A. J. — Stephan, E. — Schatz, K. — Posluschny, A.:
Landnutzung im Umkreis der Zentralorte Hohenasperg, Heuneburg und Ipf. Archäobotanische und archäozoologische Untersuchungen und Modellberechnungen zum Ertragspotential von Ackerbau und Viehhaltung. In: Krausse, D. /Hrsg./: *„Fürstentum“ und Zentralorte der frühen Kelten. Abschlusskolloquium des DFG-Schwerpunktprogramms 1171 in Stuttgart, 12.–15. Oktober 2009*. *Forsch. u. Ber. Vor- u. Frühgesch. Baden-Württemberg*, 195–265.
- Gabriel, R. A. 2007:
The Ancient World (Soldiers' Lives Through History). Westport.
- Gabriel, R. A. — Metz, K. S. 1991:
From Sumer to Rome: The Military Capabilities of Ancient Armies. Westport.
- Gent, H. — Dean, C. 1986:
Catchment Analysis and Settlement Hierarchy: a Case Study from Pre-Roman Britain. In: Grant, E. /ed./: *Central Places, Archaeology and History*. Sheffield, 27–36.
- Gorenflo, L. J. — Gale, N. 1990:
Mapping regional settlement in information space. *Journal of Anthropological Archaeology* 9, 240–274.
- Gregg, S. A. 1988:
Foragers and Farmers. Population Interaction and Agricultural Expansion in Prehistoric Europe. Chicago – London.
- Grimm, V. et al. 2006:
Grimm, V. — Berger, U. — Bastiansen, F. — Eliassen, S. — Ginot, V. — Giske, J. — Goss-Custard, J. — Grand, T. — Heinz, S. K. — Huse, G. — Huth, A. — Jepsen, J. U. — Jørgensen, C. — Mooij, W. M. — Müller, B. — Pe'er, G. — Piou, C. — Railsback, S. F. — Robbins, A. M. — Robbins, M. M. — Rossmannith, E. — Rüger, N. — Strand, E. — Souissi, S. — Stillman, R. A. — Vabø, R. — Visser, U. — DeAngelis, D. L.:
A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198 (1–2), 115–126.

- Groenman-van Waateringe, W. — Wijngaarden-Bakker, L. H. /eds./ 1987: Farm-life in a Carolingian village. A model based on botanical and zoological data from an excavated site. Assen – Wolfboro.
- Hagget, P. — Cliff, A. D. — Frey, A. 1977: Locational Analysis in Human Geography I., II. Locational Models. London.
- Halstead, P. 2014: Two Oxen Ahead. Pre-mechanized Farming in the Mediterranean. Chichester.
- Higgs, E. S. — Vita-Finzi, C. 1972: Prehistoric Economies: a Territorial Approach. In: Higgs, E.S. /ed./: Papers in Economic Prehistory. Studies by Members and Associates of the British Academy Major Research Project in the Early History of Agriculture, 27–36.
- Hladík, M. 2014: Hospodářské zázemí Mikulčic. Sídlná štruktura na střednom toku rieky Morava v 9. – 1. polovici 13. storočia. Brno.
- Janssen, M. A. 2009: Understanding Artificial Anasazi. Journal of Artificial Societies and Social Simulation 12 (4) 13.
- Jarostaw, J. — Hildebrandt-Radke, I. 2009: Using multivariate statistics and fuzzy logic system to analyse settlement preferences in lowland areas of the temperate zone: an example from the Polish lowlands. Journal of Archaeological Science 36, 2096–2107.
- Johnson, G. A. 1982: Organizational Structure and Scalar Stress. In: Renfrew, C. — Rowlands, M. — Seagraves-Whallon, B. /eds./: Theory and Explanation in Archaeology. New York, 389–421. <http://www.springer.com/social+sciences/anthropology+%26+archaeology/journal/10816>
- Kakrda, P. 2014: Agentové simulace obléhacích taktik. Magisterská diplomová práce, Univerzita Hradec Králové.
- Knapett, C. /ed./ 2013: Network Analysis in Archaeology: New Approaches to Regional Interaction. Oxford.
- Kohler, T. A. 2005: Simulating Ancient Societies. Scientific American 293, 76–84.
- Kohler, T. A. et al. 2007: Kohler, T. A. — Johnson, C. D. — Varien, M. — Ortman, S. — Reynolds, R. — Kobti, Z. — Cowan, J. — Kolm, K. — Smith, S. — Yap, L.: Settlement Ecodynamics in the Prehispanic Central Mesa Verde Region. In: Kohler, T. A. — van der Leeuw, S. E. /eds./: 61–105.
- Kohler, T. A. — van der Leeuw, S. E. /eds./ 2007: The Model-Based Archaeology of Socionatural Systems. Santa Fe – New Mexico.
- Kohler, T. A. — Varien, M. D. /eds./ 2012: Emergence and Collapse of Early Villages. Models of Central Mesa Verde Archaeology. Berkeley – Los Angeles – London.
- Kowarik, K. — Reschreiter, H. — Wurzer, G. 2009: Modeling a mine. Agent based Modeling, System dynamics and Experimental Archaeology applied to the Bronze Age Saltmines of Hallstatt. In: Mining in European History. Special Conference of the SFB HiMAT: Historical Mining Activities in the Tyrol and Adjacent Areas: Impact on Environment and Human Societies. Innsbruck, 64–65.
- Kowarik, K. — Reschreiter, H. — Wurzer, G. 2012: Modelling Prehistoric Mining. Mathematical Modelling 7/1, 17–29.
- Lake, M. W. 2000: Computer Simulation of Mesolithic Foraging? In: Gumerman, G. — Kohler, T. /eds./: Dynamics in Human and Primate Societies: Agent-Based Modeling of Social and Spatial Processes. New York, 107–143.
- Lake, M. W. 2010: The Uncertain Future of Simulating the Past. In: Costopoulos, A. — Lake, M. W. /eds./: 12–20.
- Lake, M. W. 2014: Trends in Archaeological Simulation. Journal of Archaeological Method and Theory 21, 258–287.
- Lake, M. W. — Crema, E. R. 2012: The cultural evolution of adaptive-trait diversity when resources are uncertain and finite. Advances in Complex Systems 19, 1150013.
- Lee, C. T. — Tuljapurkar, S. 2008: Population and prehistory I: Food-dependent population growth in constant environments. Theoretical Population Biology 73, 473–482.
- Lee, C. T. — Puleston, C. O. — Tuljapurkar, S. 2009: Population and prehistory III: Food-dependent demography in variable environments. Theoretical Population Biology 76, 179–188.
- Madella, M. et al. 2014: Madella, M. — Rondelli, B. — Lancelotti, C. — Balbo, A. — Zurro, D. — Campillo, X. R. — Stride, S.: Introduction to Simulating the Past. Archaeological Method and Theory 21, 251–257.
- Magliocca, N. R. — Brown, D. G. — Ellis, E. C. 2013: Exploring Agricultural Livelihood Transitions with an Agent-Based Virtual Laboratory: Global Forces to Local Decision-Making. Plos One Vol. 8, Iss. 9. <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0073241> (14. 11. 2014).
- Machálek, T. 2013: Fuzzy extension for NetLogo. <https://github.com/tomachalek/nlfuzzy> (14. 11. 2014).
- Machálek, T. — Olševičová, K. — Cimler, R. 2012: Modelling Population Dynamics for Archaeological Simulations. Proc. of 30th International Conference on Mathematical Methods in Economics. Karviná, 536–539.
- Machálek, T. et al. 2013: Machálek, T. — Cimler, R. — Olševičová, K. — Danielisová, A.: Fuzzy Methods in Land Use Modeling for Archaeology. Proceedings of 31st International Conference on Mathematical Methods in Economics, part II. Jihlava, 552–557.
- Marcks, T. 2012: Accuracy vs. distance formula. Game Development. <http://gamedev.stackexchange.com/questions/28162/accuracy-vs-distance-formula> (14. 11. 2014).
- Marsden, E. W. 1969: Greek and Roman Artillery: Historical Development. Oxford.
- Mařík, J. 2009: Libická sídelní aglomerace a její zázemí v raném středověku. Praha.
- Monte-Luna, P. del et al. 2004: Monte-Luna, P. del — Brook, B. W. — Zetina-Rejón, M. J. — Cruz-Escalona, V. H.: The carrying capacity of ecosystems. Global Ecology and Biogeography 13, 485–495.
- Müller, B. et al. 2013: Müller, B. — Bohn, F. — Dreßler, G. — Groeneveld, J. — Klas-

- sert, C. — Martin, R. — Schlüter, M. — Schulze, J. — Weise, H. — Schwarz, N.:
Describing human decisions in agent-based models – ODD+D, an extension of the ODD protocol. *Environmental Modelling & Software* 48, 37–48.
- Müller, B. et al. 2014:
Müller, B. — Balbi, S. — Buchmann, C. M. — de Sousa, L. — Dressler, G. — Groeneveld, J. — Klassert, C. J. — Bao Le, Q. — Millington, J. D. A. — Nolzen, H. — Parker, D. C. — Polhill, J. G. — Schlüter, M. — Schulze, J. — Schwarz, N. — Sun, Z. — Talandier, P. — Weise, H.:
Standardized and transparent model descriptions for agent-based models – current status and prospects. *Environmental Modelling and Software* 55, 156–163.
- Müller-Herold, U. — Sieferle, R. P. 1997:
Surplus and Survival: Risk, Ruin, and Luxury in the Evolution of Early Forms of Subsistence. *Advances in Human Ecology*, Vol. 6, 201–220.
- Murgatroyd, P. et al. 2012:
Murgatroyd, P. — Craenen, B. — Theodoropoulos, G. — Gaffney, V. — Haldon, J.:
Modelling medieval military logistics: an agent-based simulation of a Byzantine army on the march. *Computational and Mathematical Organization Theory* 18, 4, 488–506.
- Neuhäuslová, Z. et al. 2001:
Mapa potencionální přirozené vegetace České republiky. Praha.
- Niazi, M. A. 2013:
Complex Adaptive Systems Modeling: A multidisciplinary Roadmap. *Complex Adaptive Systems Modeling*, 1 (1).
<http://link.springer.com/article/10.1186%2F2194-3206-1-1> (14. 11. 2014).
- Olsson, E. G. A. 1991:
The agrarian landscape of Late Bronze Age farmers in Bjäresjö. In: Berglund, B. E. /ed./: *The cultural landscape during 6000 years in southern Sweden*. *Ecological Buletins* 41, 181–184.
- Olsson, E. G. A. 1991:
The agrarian landscape of Viking age farmers at Bjäresjö. *The cultural landscape during 6000 years in southern Sweden*. *Ecological Buletins* 41, 190–193.
- Olševičová, K. — Cimler, R. 2012:
Agent-based Model of Carrying Capacity of Celtic Settlement Agglomeration. In: 3rd World Conference on Information Technology. Barcelona, 14–16.
- Olševičová, K. — Cimler, R. — Machálek, T. 2012:
Agent-based Model of Celtic Population Growth: NetLogo and Python. In: Nguyen, N. T. et al. /eds./: *Advanced Methods for Computational Collective Intelligence*. *Studies in Computational Intelligence* 457. Berlin – Heidelberg, 135–143.
- Olševičová, K. et al. 2014:
Olševičová, K. — Cimler, R. — Tomášková, H. — Danielisová, A.:
Model of Carrying Capacity – System Dynamics in NetLogo and Stella. In: *Proceedings of the International Conference Hradec Economic Days, Part V. Hradec Králové*, 117–123.
- Olševičová, K. — Danielisová, A. 2014a:
Applying System Dynamics and Agent-based Modelling in Archaeological Simulation. In: *Proc. of the 32nd International Conference on Mathematical Methods in Economics*, 721–726.
- Olševičová, K. — Danielisová, A. 2014b:
Economic Sustainability in Relation to Demographic Decline of Celtic Agglomerations in Central Europe: Multiple-Scenario Approach. In: *Simulating the Past to Understand Human History*. Barcelona.
http://fawly.uab.cat/SSC2014/SPUHH/socialsimulation2014_106.pdf (25. 11. 2014).
- Polhill, J. G. 2010:
ODD updated. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 13, 4, 9.
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/4/9.html> (20. 11. 2014).
- Polhill, J. G. et al. 2008:
Polhill, J. G. — Parker, D. C. — Brown, D. G. — Grimm, V.:
Using the ODD Protocol for Describing Three Agent-Based Social Simulation Models of Land-Use Change. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 11, 2, 3.
<http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/2/3.html> (14. 11. 2014).
- Polhill, J. G. 2014:
Towards metadata standards for sharing simulation outputs. ESSA conference. Barcelona.
[http://diggingintodata.org/\(14. 11. 2014\)](http://diggingintodata.org/(14.11.2014)).
- Powel, A. S. — Shennan, S. J. — Thomas, M. G. 2009:
Late Pleistocene Demography and the Appearance of Modern Human Behavior. *Science* 324, 1298–1301.
- Premo, L. 2008:
Exploring behavioral terra incognita with archaeological agent-based models. In: Frischer, B. — Dakouri-Hild, A. /eds./: *Beyond Illustration: 2D and 3D Technologies as Tools of Discovery in Archaeology*. *BAR International Series* 1805, 46–56.
- Premo, L. 2010:
Equifinality and Explanation: The Role of Agent-Based Modeling in Postpositivist Archaeology. In: *Costopoulos, A. — Lake, M. /eds./*: 28–37.
- Přichystal, A. — Opravil, E. 1992:
Poznatky k přírodnímu prostředí keltského oppida Staré Hradisko. *Časopis Moravského Muzea* LXXVII, 115–121.
- Puleston, C. O. — Tuljapurkar, S. 2008:
Population and prehistory II: Space-limited human populations in constant environments. *Theoretical Population Biology* 74, 147–160.
- Reshmidevi, T. V. — Eldho, T. I. — Jana, R. 2009:
A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems* 101, 1–2, 101–109.
- Ross, T. J. 2010:
Fuzzy Logic with Engineering Applications. Chichester.
- Rubio-Campillo, X. — Cela, J. M. — Hernandez, F. X. 2012:
Simulating archaeologists? Using agent-based modelling to improve battlefield excavations. *Journal of Archaeological Science* 39, 2, 347–356.
- Salgado, M. — Noguera, J. A. — Miguel, F. 2014:
Modelling Cooperation Mechanisms: Some Conceptual Issues. *Journal of Archaeological Method and Theory* 21, 325–342.
- Saller, R. 1994:
Patriarchy, Property and Death in the Roman Family. Cambridge.
- Schreinemachers, P. — Berger, T. 2011:
An agent-based simulation model of human environment interactions in agricultural systems. *Environmental Modelling & Software* 26, 845–859.
- Shennan, S. 2007:
The Spread of Farming into Central Europe and Its Consequences: Evolutionary Models. In: *Kohler, T. A. — van der Leeuw, S. E. /eds./*: 141–156.
- Schreg, R. 2011:
Feeding the village – Reflections on the ecology and resilience of the medieval rural economy. In: *Klápště, J. — Sommer, P. /eds./*: *Processing, Storage, Distribution of Food. Food in the Medieval Rural Environment*. *Ruralia* VIII, 301–320.

SIMULPAST:

<http://www.simulpast.es/> (12. 11. 2014)

Stonedahl, F. 2011:

Genetic Algorithms for the Exploration of Parameter Spaces in Agent Based Models. (PhD práce, Northwestern University), http://forrest.stonedahl.com/thesis/forrest_stonedahl_thesis.pdf (25. 11. 2014).

Stonedahl, F. — Wilenski, U. 2010:

Evolutionary Robustness Checking in the Artificial Anasazi Model. <http://ccl.northwestern.edu/2010/Stonedahl%20and%20Wilenski.pdf> (20.12.2014).

Thünen von, J. H. 1966:

Von Thünen's Isolated State. In: Hall, P. /ed./: transl. C. M. Wartenberg. Oxford.

Turchin, P. 2009:

Long-Term Population Cycles in Human Societies. *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1162 (May), 1–17.

van der Vart, E. et al. 2006:

van der Vart, E. — de Boer, B. — Hankel, A. — Verheij, B.: Agents adopting agriculture. In: Nolfi, S. et al. /eds./: SAB, LNAI 4095, 750–761.

Wainwright, J. 2008:

Can modelling enable us to understand the rôle of humans in landscape evolution? *Geoforum* 39, 659–674.

Wilensky, U. 2014:

Netlogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling. Northwestern University.

Wilenski, U. — Rand, W. 2007:

Making Models Match: Replicating an Agent-Based Model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 10, (4), 2.

Wilkinson, T. J. et al. 2007:

Wilkinson, T. J. — Gibson, M. — Christiansen, J. H. — Widell, M. — Schloen, D. — Kouchoukos, N. — Woods, C. — Sanders, J. — Simunich, K.-L. — Altaaweel, M. — Ur, J. A. — Hritz, C. — Louniger, J. — Paulette, T. — Tenney, J.:

Modeling Settlement Systems in a Dynamic Environment: Case Studies from Mesopotamia. In: Kohler, T. A. — van der Leeuw, S. E. /eds./: 175–208.

Wilkinson, T. J. — Gibson, M. — Widell, M. /eds./ 2013:

Models of Mesopotamian Landscapes. How small-scale processes contributed to the growth of early civilizations. BAR International Series 2552.

Wright, H. T. 2007:

Progress in Cultural Modeling. In: Kohler, T. A. — van der Leeuw, S. E. /eds./: 229–232.

Mgr. Alžběta Danielisová, Ph.D., Archeologický ústav AV ČR, Praha, v. v. i., Letenská 4, CZ 118 01, Praha 1;

e-mail: danielisova@arup.cas.cz

Mgr. Kamila Štekerová, Ph.D., Univerzita Hradec Králové, Fakulta informatiky a managementu, Rokitanského 62, CZ 500 03 Hradec Králové;

e-mail: kamila.olsevicova@uhk.cz