

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

Simulace chování mravenčích kolonií
Bakalářská práce

Autor: Jan Krása

Studijní obor: Aplikovaná informatika

Vedoucí práce: doc. RNDr. Petr Tučník, Ph.D.

Hradec Králové

srpen 2023

Prohlášení:

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

V Hradci Králové dne 13.8.2023

Jan Krása

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. RNDr. Petru Tučnickovi, Ph.D. za metodické vedení a cenné rady při vypracování této práce, vstřícnost a trpělivost.

Anotace

Cílem bakalářské práce je seznámení se s tvorbou a využitím multiagentních systémů (MAS) a vytvořením jednoduchého modelu chování mravenčí kolonie. Teoretická část je zaměřena na popis prostředí, jeho vlastností v rámci MAS a základní typy agentů s bližším zájmem věnovaným architektuře reaktivních agentů a jejich užití v modelech využívajících inteligenci roje. V druhé části jsou shrnuty základní poznatky o mravencích z rodu *Formica*. Praktická část je zaměřena na návrh a implementaci modelu mravenčího roje v prostředí NetLogo, kde cílem mravenců je zajistit dostatek potravy pro zachování roje. Po ověření stability modelu jsou následně přidány dva další roje, se kterými je provedeno několik experimentů.

Klíčová slova: multiagentní systém, agentově-orientovaný model, simulace, NetLogo, mravenci

Annotation

Title: Simulation of Ant Colonies Behavior

The goal of this Bachelor's Thesis is to provide introduction onto design and use of multi-agent systems (MAS) and the development of a simple model of ant colony behaviour. The theoretical part is focused on the description of the environment and its attributes within MAS and common types of agents with a closer look at the architecture of simple reactive agents and their application in models based on swarm intelligence. In the second part, there is a summary of basic knowledge about ants of the *Formica* genus. The practical part is focused on the design and implementation of an ant swarm using NetLogo, where the goal of the colony is to secure enough food to ensure survival of the colony. After verifying stability of the model two more colonies are added and they are subjected to several experiments.

Key words: multi-agent system, agent-based model, simulation, NetLogo, ants

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část a základní pojmy	3
2.1	Multiagentní systémy.....	3
2.1.1	Agent.....	3
2.1.2	Prostředí.....	7
2.2	Intelligence roje.....	8
2.3	Příklady využití MAS a SI.....	9
2.4	Mravenčí roje v přírodě	11
2.4.1	Mraveniště	13
2.4.2	Práce v průběhu roku	15
2.4.3	Práce v kolonii	17
2.4.4	Komunikace.....	20
2.4.5	Hrozby pro roj	21
3	Model mravenčí kolonie	23
3.1	Volba technologie	23
3.1.1	Repast Suite.....	23
3.1.2	Anylogic	23
3.1.3	NetLogo.....	24
3.2	Analýza modelu	27
3.2.1	Výběr živočichů.....	27
3.2.2	Výběr prostředí.....	28
3.2.3	Výběr zdrojů.....	29
3.2.4	Činnosti	29
3.3	Implementace modelu	32

3.3.1	Grafické uživatelské rozhraní	32
3.3.2	Shrnutí funkčnosti modelu.....	36
3.3.3	Proměnné.....	38
3.3.4	Inicializace	39
3.3.5	Zrození agentů.....	40
3.3.6	Úmrtí agentů	41
3.3.7	Go procedura	42
3.3.8	Mravenci	43
3.3.9	Feromony	47
3.4	Kalibrace proměnných	48
3.4.1	Běh první	48
3.4.2	Běh druhý.....	50
3.4.3	Běh třetí	55
3.4.4	Test při náhodně generovaném prostředí	56
3.5	Tři kolonie	56
3.5.1	Ověření stability	57
3.5.2	Experiment	59
4	Shrnutí výsledků	68
5	Závěr	70
6	Seznam použité literatury	71
7	Přílohy.....	74

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Schéma ryze reaktivního agenta. Zdroj: [4]</i>	5
<i>Obr. 2: Schéma uvažujícího agenta. Zdroj: [4]</i>	6
<i>Obr. 3: Schéma reaktivního agenta založeného na modelu. Zdroj: [4]</i>	7
<i>Obr. 4: Ukázka výsledného chování hejna. Zdroj: [10]</i>	11
<i>Obr. 5: Model Ants. Zdroj: [22]</i>	25
<i>Obr. 6: Model Ant Lines. Zdroj: [23]</i>	26
<i>Obr. 7: Model Ant Adaptation. Zdroj: [24]</i>	27
<i>Obr. 8: Diagram Entit. Zdroj: Autor</i>	31
<i>Obr. 9: GUI. Zdroj: Autor</i>	32
<i>Obr. 10: Ovládací panel GUI. Zdroj: Autor</i>	33
<i>Obr. 12: Mapa a monitory. Zdroj: Autor</i>	34
<i>Obr. 12: GUI Grafy. Zdroj: Autor</i>	35
<i>Obr. 13: Vývoj velikosti roje. Běh první. Zdroj: Autor</i>	52
<i>Obr. 14: Vývoj počtu uskladněného jídla. Běh první. Zdroj: Autor</i>	52
<i>Obr. 15: Vývoj úmrtí na věk. Běh první. Zdroj: Autor</i>	52
<i>Obr. 16: Vývoj úmrtí na hlad. Běh první. Zdroj: Autor</i>	53
<i>Obr. 17: Vývoj velikosti roje. Běh třetí. Zdroj: Autor</i>	53
<i>Obr. 18: Vývoj počtu uskladněného jídla. Běh třetí. Zdroj: Autor</i>	54
<i>Obr. 19: Vývoj úmrtí na věk. Běh třetí. Zdroj: Autor</i>	54
<i>Obr. 20: Vývoj úmrtí na hlad. Běh třetí. Zdroj: Autor</i>	54
<i>Obr. 21: Vývoj velikosti rojů. Běh první. Zdroj: Autor</i>	60
<i>Obr. 22: Vývoj úmrtí na hlad. Běh první. Zdroj: Autor</i>	60
<i>Obr. 23: Vývoj zabití cizími roji. Běh první. Zdroj: Autor</i>	60
<i>Obr. 24: Vývoj velikosti rojů. Běh druhý. Zdroj: Autor</i>	61
<i>Obr. 25: Vývoj zabití cizími roji. Běh druhý. Zdroj: Autor</i>	61
<i>Obr. 26: Vývoj velikosti rojů. Běh třetí. Zdroj: Autor</i>	62
<i>Obr. 27: Vývoj zabití cizími roji. Běh třetí. Zdroj: Autor</i>	62
<i>Obr. 28: Vývoj velikosti rojů. Běh čtvrtý. Zdroj: Autor</i>	63
<i>Obr. 29: Vývoj velikosti rojů. Běh pátý. Zdroj: Autor</i>	64
<i>Obr. 30: Vývoj velikosti rojů. Běh sedmý. Zdroj: Autor</i>	66

<i>Obr. 31: Vývoj velikosti rojů. Běh osmý. Zdroj: Autor</i>	66
<i>Obr. 32: Vývoj zabítí cizími roji. Běh osmý. Zdroj: Autor</i>	67
<i>Obr. 33: Vývoj velikosti rojů. Běh devátý. Zdroj: Autor</i>	67

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Ovládací panel, inicializační proměnné. Zdroj: Autor</i>	32
<i>Tab. 2: Ovládací panel, proměnné ovlivňující běh modelu. Zdroj: Autor</i>	33
<i>Tab. 3: Sledované proměnné. Zdroj: Autor</i>	34
<i>Tab. 4: Proměnné políček. Zdroj: Autor</i>	38
<i>Tab. 5: Proměnné agentů. Zdroj: Autor</i>	39
<i>Tab. 6: Pravděpodobnost změny práce. Zdroj: Autor</i>	47
<i>Tab. 7: Stabilní hodnoty, test první. Zdroj: Autor</i>	50
<i>Tab. 8: Stabilní hodnoty, test druhý. Zdroj: Autor</i>	51
<i>Tab. 9: Stabilní hodnoty, test třetí. Zdroj: Autor</i>	56
<i>Tab. 10: Stabilní hodnoty, test tři roje. Zdroj: Autor</i>	58
<i>Tab. 11: Vstupní hodnoty pro experiment. Zdroj: Autor</i>	59

Seznam používaných zkratk

MAS – multi-agent system

ABM – agent-based modelling

SI – swarm intelligence

GUI – graphical user interface

1 Úvod

Agentově-orientované programování je jednou z oblastí umělé inteligence, která se zaměřuje na studium a modelování komplexních systémů. Jejich příkladem mohou být celé ekosystémy, logistika nebo ekonomika státu. Agentově-orientovaný přístup umožňuje modelování těchto systémů i pokud postrádáme přesnou znalost jejich fungování. To je umožněno kladením důrazu na interakce mezi jednotlivci a prostředím, ze kterých globální chování systému vyplývá, takzvaně emerguje. A samozřejmě schopností tyto systémy modelovat, získáváme možnost předvídat jejich budoucí chování.

Vůči evoluci a toku času obstálo několik, v přírodě se vyskytujících, vzorů chování, které přes svoji zdánlivou nahodilost a jednoduchost na úrovni jedince, v makro měřítku vykazují složité chování. Představme si tvorbu rybího, nebo ptačího roje, či chování mraveniště a jeho schopnost nalezení optimální cesty. Je tedy přirozené, že se necháváme inspirovat, v přírodě osvědčenými způsoby, při řešení našich problémů.

V rámci této práce se budeme zabývat právě jedním z těchto v přírodě se vyskytujících rojů, jmenovitě mravenci. V teoretické části práce je seznámení se základy multiagentních systémů a agentů, definice inteligence roje a je uvedeno několik příkladů jejich možného využití. Teoretická část je zakončena rešerší zabývající se mravencem lesním (rod *Formica*). Tento rod byl zvolen jako podklad pro model této práce, právě pro jeho hojné rozšíření ve zdejších lesích a mýtinách.

V praktické části je zmíněno pár volně dostupných modelovacích nástrojů, které lze užít pro agentově-orientované modely, bližší zájem je věnován prostředí NetLogo, ve kterém je práce implementována. Následuje návrh modelu mravenčí kolonie a jeho implementace. Nakonec je uvedeno pár jednoduchých experimentů se třemi vzájemně soupeřícími koloniemi.

Cíle práce

Cílem této práce je nabídnout stručný přehled v oblasti multiagentních modelů a jejich možného využití, a vytvořit model zachycující chod mravenčí kolonie. Součástí modelu budou dynamické změny populace, interakce s prostředím, existence

hrozeb pro mravence a jejich reakce na ně. Výsledný model bude podporovat až tři různé kolonie.

K dosažení tohoto úkolu bude nejprve provedena pečlivá charakterizace chování mravenců lesních v jejich přirozeném prostředí. Tak budou získány informace, co vše by bylo možno do modelu zahrnout. Tento přehled bude zanalyzován a na základě této analýzy dojde k výběru konkrétních typů agentů a jim odpovídajících činností, které budou v konečném modelu implementovány.

Po potvrzení funkčnosti modelu pro chod jedné kolonie, dojde k rozšíření o dvě další konkurenční kolonie, které bude možno porovnávat dle výkonnostních kritérií těchto kolonií. Nakonec bude provedeno několik jednoduchých testů.

2 Teoretická část a základní pojmy

V této kapitole je nejprve uvedeno několik základních poznatků o multiagentních systémech a agentově orientovaném modelování. Načež je upřesněno, co je to agent a jaké základní typy lze rozlišovat. A nakonec je uveden přehled o chování rojů lesních mravenců.

2.1 Multiagentní systémy

Wooldridge [1] definuje multiagentní systémy (multi-agent system) následovně: *„Multiagentní systémy jsou systémy složené z několika interagujících výpočetních jednotek, známých jako agent.“*

Skrze vzájemnou spolupráci agenti nabízejí řešení na problémy, které přesahují možnosti jednotlivců. Tím také nabízí řešení problémům, které by běžnými centrálně řízenými algoritmy byly jen obtížně řešitelné [2], neboť předem není vyžadována znalost podrobného fungování daného systému.

Řešení problému tak můžeme dosáhnout i bez potřeby jeho přesné formulace, protože emerguje, právě z jednotlivých interakcí agentů. Například při hledání optimální cesty s využitím mravenčího roje nikde v rámci modelu není uveden požadavek, aby byla nalezena optimální cesta, ale roj se snaží nalezenou cestu sám od sebe optimalizovat.

Podmnožinou MAS je agentově-orientované modelování (agent-based modeling). Rozdíl mezi nimi spočívá hlavně v tom, že zatímco MAS se pokouší najít řešení na konkrétní, předem zadaný problém s použitím agentově-orientovaného přístupu, ABM zkoumá samotné chování komplexních systémů, kterými může být například fungování ekosystémů. [3]

2.1.1 Agent

Základem těchto modelů je agent. Samotný pojem agent nemá přesně stanovenou, jednotnou definici, například Wooldridge [1] jej definuje následovně: *„Agent je počítačový systém, situovaný v nějakém prostředí a schopný samostatně v tomto prostředí jednat tak, aby dosáhl splnění svého úkolu.“* Z této definice lze odvodit základní vlastnosti, každého agenta:

- agent je pevně spjat se svým prostředím
- agent je autonomní, tedy schopen ve svém prostředí vykonávat svoji činnost samostatně
- agent má daný cíl, který se svým chováním snaží splnit

Agent může představovat téměř cokoliv – lidi, živočichy, skupiny živočichů, nebo část infrastruktury. Například při modelu rozložení elektrické sítě, je možno jednotlivá vedení modelovat, co by agenty, přestože se zdají být pasivní.

Jedna z možností klasifikace agentů je na základě složitosti jejich vnitřní architektury. Tím je dosaženo následujícího rozřazení [4]:

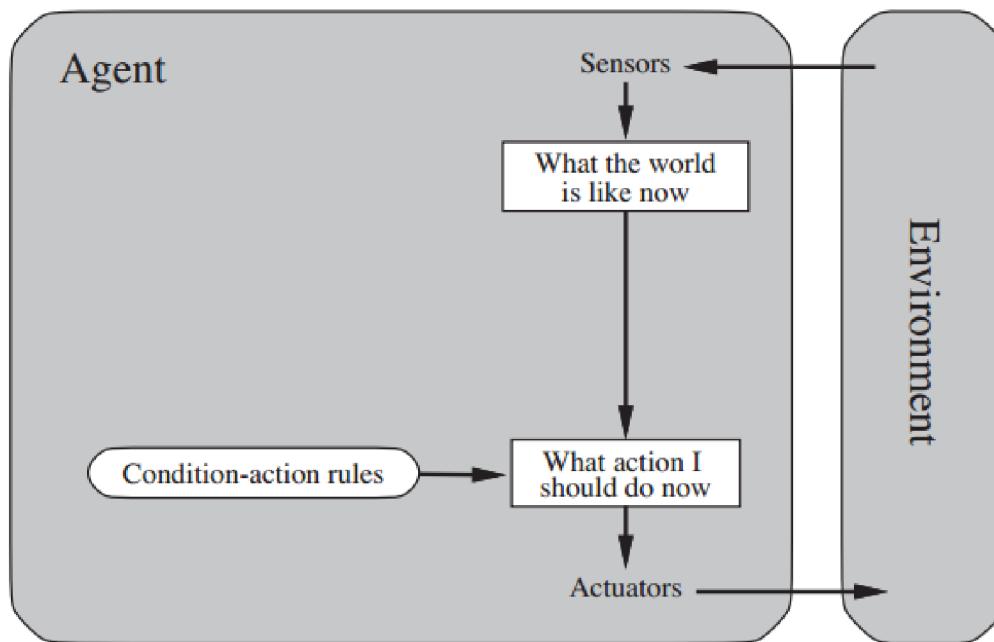
- reaktivní
- deliberativní
- sociální
- hybridní

Reaktivní agent

Reaktivní agenty jsou nejjednodušším typem agentů. Jsou schopny rychlých a efektivní reakcí na podněty z prostředí, bez potřeby jeho vnitřní interpretace. Postrádají dlouhodobý plánovací a rozhodovací procesy. Jejich reakce jsou založené na aktuálně vnímaných datech, které zpracovávají pomocí množiny pravidel.

Jejich architektura se skládá ze tří vrstev:

- Senzory umožňující vnímat podněty z prostředí, například identifikace překážky.
- Množina pravidel, která rozhoduje o okamžitém chování agenta, například pokud je v cestě překážka, zatoč vpravo.
- Aktuátory umožňující provádět reakce agenta, například zajišťují pohyb.



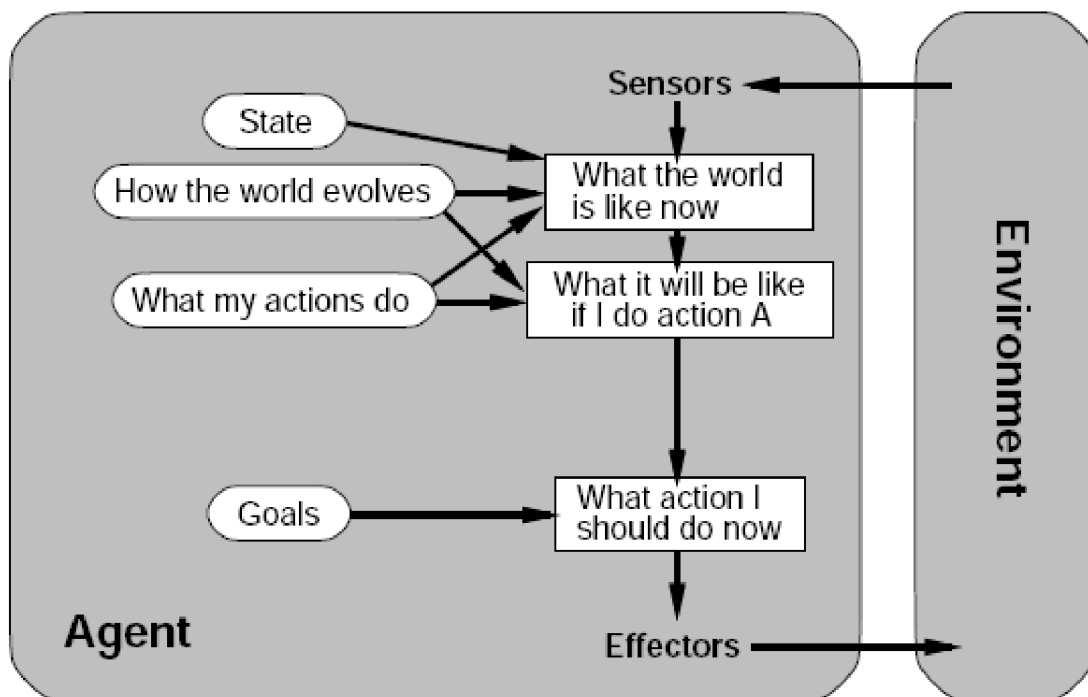
Obr. 1: Schéma ryze reaktivního agenta. Zdroj: [4]

Výhodou této architektury je její jednoduchost, nízká náročnost na zdroje v porovnání s komplexnějšími typy a schopnost okamžité reakce na změnu v prostředí. Nevýhodou je neschopnost se učit, nebo plánovat.

Deliberativní agent

Deliberativní (uvažující) agent si uchovává svůj vnitřní stav. Díky tomu je schopen učit se ze svých zkušeností a plánovat. Jsou tak schopní zpracovávat dlouhodobé cíle a strategie, jak jich dosáhnout.

V jejich architektuře je tedy navíc potřeba reprezentovat jejich znalosti a zkušenosti. Toho může být dosaženo například neuronovými sítěmi, nebo pravděpodobnostními modely. Potřebu tyto znalosti využívat, umožňuje plánovací vrstva. Jejím úkolem je generovat různé plány a strategie s jejichž pomocí dosáhnout svých cílů. A umožňuje se mezi nimi rozhodovat.



Obr. 2: Schéma uvažujícího agenta. Zdroj: [4]

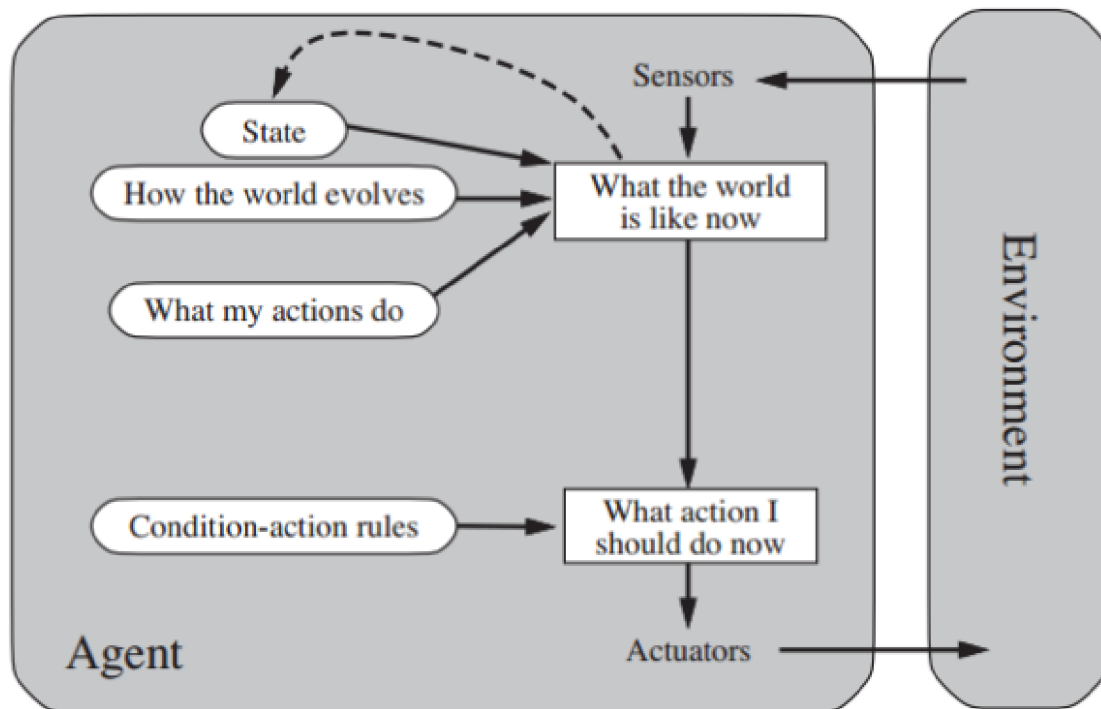
Sociální agent

Sociální agenty, jsou schopny plánování a volbou mezi těmito plány s účelem splnění svých cílů. Jejich model světa je navíc obohacen o informace o dalších agentech, což jim umožňuje vyšší formy vzájemné komunikace a spolupráce.

Hybridní agent

A samozřejmě můžeme tvořit hybridní architektury. Jak jméno napovídá, jedná se o kombinace výše zmíněných architektur. Příkladem může být reaktivní agent založený na modelu, který je kombinací reaktivního a deliberativního agenta.

Ten oproti své ryzí formě navíc disponuje vnitřní reprezentací světa. V tomto případě agent potřebuje mít znalosti o vývoji prostředí a musí vědět, jak ho jeho vlastní akce ovlivní. Na základě těchto informací si agent uchovává přibližný model prostředí, který mu umožňuje učit se ze svých zkušeností a vylepšovat tak své reakce na různé podněty.



Obr. 3: Schéma reaktivního agenta založeného na modelu. Zdroj: [4]

Pro potřeby této práce, tedy modelování mravenců je na snaze využití ryze reaktivních agentů, neboť jednotliví mravenci nemají informace o širším dění ve světě. Vnímají jen to, co je před nimi teď a nyní. Byť by bylo možno použít i hybridní architektury reaktivního založeného na modelu, protože mravenci vykazují schopnost pamatovat a rozpoznávat své okolí, čehož využívají při orientaci. Jednalo by se však o vcelku zbytečné zkomplikování modelu.

2.1.2 Prostředí

Mimo agentů samotných v MAS zastává kritickou úlohu prostředí, ve kterém se agenty vyskytují. Prostředí můžeme rozlišovat, dle několika základních charakteristik [4]:

- Pozorovatelnost – prostředí může být plně nebo jen částečně pozorovatelné, v plně pozorovatelném prostředí má agent přístup ke všem informacím.
- Počet agentů – prostředí může obsahovat jen jednoho, nebo několik agentů.
- Determinismus – v deterministickém prostředí je jeho následující stav definován současným stavem a akcí agenta, neexistuje náhoda. V případě

stochastického prostředí se následující stav nedá předpovědět, protože je ovlivněn náhodou.

- Stabilita– statické prostředí je neměnné, dokud nedojde k jeho změně akcí agenta. Pro prostředí dynamické se mění bez ohledu na chování agentů.
- Kontinuita – v diskrétním prostředí, existuje jen jasně definovaná množina stavů a akcí, akce mohou probíhat pouze v diskrétním čase. Kontinuální prostředí mohou proměnné nabývat hodnotu z předem daných intervalů, akce mohou probíhat spojitě.

Například prostředí v šachách můžeme popsat jako: plně pozorovatelné, multiagentní, deterministické, statické a diskrétní.

Rozsah a složitost daného systému se nutně odvíjí od počtu rozdílných pravidel chování, která v daném modelu chceme modelovat. Zásadní roli zde hraje, v jak velkých detailech je daný systém pozorován. [2] Nezbytně tedy dochází ke kompromisům mezi měřítkem a složitostí.

2.2 Inteligence roje

Roj se skládá z mnoha jednotlivců, kteří se řídí jednoduchými pravidly chování a vzájemně se ovlivňují. Skrze tyto zdánlivě jednoduché interakce mezi jedinci a jejich interakcemi s prostředím vzniká složité chování roje. To nabízí řešení mnoha složitým problémům, jako je například nalezení nejkratší cesty, formulace letové formace u ptactva, nebo vyhýbání se predátorům. Typickými představiteli přírodních rojů jsou kolonie hmyzu a bakterií a zvířata tvořící hejna, příkladem mohou být ptáci a ryby.

Jejich zdánlivě jednoduché chování slouží jako inspirace pro tvorbu algoritmů umělých rojů. Bonabeau, Dorigo a Theraulaz [5] definují inteligenci roje následovně: *„Objevující se kolektivní inteligence skupin jednoduchých agentů.“* Inteligence roje (Swarm Intelligence) je tedy formou MAS využívající jednoduché reaktivní agenty, jejichž chování bývá inspirováno jejich přírodními ekvivalenty.

Pro správné fungování roje je nezbytné zajištění komunikace mezi agenty, nicméně složitější formy komunikace nejsou architekturou reaktivních agentů podporovány. Jedním z ukázkových způsobů, jak můžeme komunikace dosáhnout, je

takzvaná Stigmergie, dle Bonabeau, Dorigo a Theraulaz [5]: „*Stigmergie je nepřímá komunikace založená na modifikaci prostředí.*“ S užitím stigmergie si agenti jsou schopny předávat zprávy a instrukce skrze jednoduché úpravy prostředí. V přírodě jsou ukázkovým příkladem mravenci nebo včely a jejich feromonové značky, kterými se mimo jiné koordinují při lovu a sběru potravy.

2.3 Příklady využití MAS a SI

SI algoritmy a jejich aplikace v optimalizaci

V tomto průzkumu se autoři Obagbuwa a Christiana [6] zaměřili na užití algoritmů využívajících inteligenci roje při řešení optimalizačních funkcí. SI algoritmy jsou pro využití v optimalizaci obzvláště oblíbené pro svoji účinnost, flexibilitu a univerzálnost.

Článek ukazuje několik problémů a odkazuje na práce, kde k jejich řešení byly užity právě tyto algoritmy. Zmiňovány jsou například:

- Problém cestujícího obchodníka (Traveling Salesman Problem – TSP), který se snaží navštívit předem známé zákazníky, po jedné co nejkratší cestě.
- Problém se směřováním vozidla (Vehicle Routing Problem – VRP), kde z centrální stanice musí několik vozidel objet všechny zákazníky s cílem minimalizovat celkovou uraženou vzdálenost.
- Problém směřování sítě (Network Routing Problem – NRP), kde je cílem najít co možná nejlepší spoj dvou uzlů v síti pro přenos dat.

Ve všech třech případech se jedná o časté logistické problémy.

Provázání dopravy

Studie vypracovaná Calabrem a dalšími [7], pojednává o optimalizačním problému typu VRP a nabízí řešení skrze Ant Colony Optimization (ACO) algoritmus. Konkrétně se jedná o způsob provázání dopravy v italském městě Katánie, kde se plánuje rozšíření metra z centra města i do jeho periferií. Autoři navrhují řešení skrze agentní model.

Vytvořili zde model, kde vytipují všechna vhodná místa pro budoucí autobusové zastávky, které mají navazovat na jednotlivé stanice metra (jež zastupují úlohu terminálu v VRP). Ty jsou následně hodnoceny na základě jejich dostupnosti. Model byl vytvořen v multiagentním programovacím prostředí NetLogo. Pomocí rozšíření GIS (Geographic Information Systems) byla vložena mapa města a následně byla vypočtena dostupnost jednotlivých stanic a pomocí ACO algoritmu (ant colony optimization) došlo k navržení samotných tras.

Městská expanze

Pro potřeby stavebního průmyslu v Číně dochází k častému odkupování půdy. Nicméně během těchto odkupů vznikají konflikty zájmů se současnými majiteli.

Studie vypracovaná Tangem a dalšími [8], nabízí řešení těchto problémů skrze aplikaci vyjednávacího modelu a modifikovaného ACO algoritmu. Vyjednávací model nejprve vyhledá všechny možné kandidáty na odkoupení půdy, načež pomocí ACO algoritmu dojde k simulaci samotné městské expanze.

Pro potřeby modelu byla využita data z města Wuhan, na základě urbanizace v letech 2006 až 2016. Na vysvětlení volby urbanizované půdy bylo užito několik volných proměnných, jako je nadmořská výška, sklon terénu, nebo vzdálenost od centra, či hlavních cest. Vzniklý model byl schopen pojmout data z roku 2011 a simulovat návrh zástavby v roce 2016 s přesností přes 92 %. [8]

Problém ekonomického rozložení zatížení

U rozlehlých vodních elektráren vzniká problém s regulací minimálního objemu vody. Jednotlivými generátory musí protékat takové množství, aby docházelo ke generaci minimální hranice požadovaného proudu.

K řešení tohoto problému autoři Wang a Yang [9] navrhují využít multiagentní optimalizaci roje světlušek (multi-agent glowworm swarm optimization) ve zkratce MAGSO. Vytvářejí matice z pravidelných šestistěnů, ve kterých jsou rozmístěny jednotlivé agenty. Každý z těchto agentů je definován svojí pozicí, svítivostí a dosahem detekce. Agenty nejprve vyextrahují informace od svých sousedů, a pak dojde k evoluci s pomocí GSO (genetical swarm optimization) algoritmu.

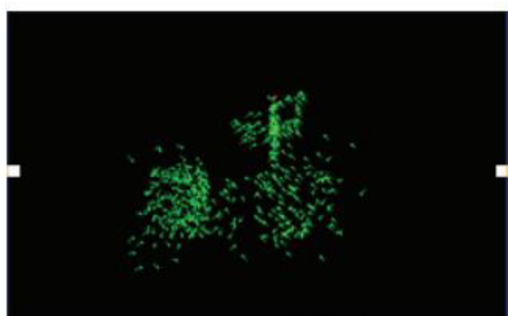
V tomto článku je nejprve přesně definován problém ELD (economic load dispatch) a je představeno navrhované MAGSO řešení, které je následně podrobena čtyřem benchmark testům pro ověření jeho efektivity. Následně je tento algoritmus aplikován na model hydroelektrárny Tři Soutěsky, která disponuje dvaceti šesti jednotlivými generátory.

Nakonec došlo ke dvou experimentům, z čehož první ukazuje sílu MAGSO algoritmu v rychlosti nalezení a kvality řešení. Druhý experiment zkouší jeho robustnost, skrze provedení simulace s jinými vstupními požadavky zátěže.

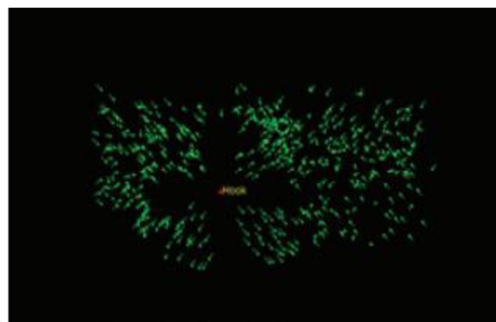
Zkoumání chování roje ryb

Zřejmým užitím agentových modelů založených na skutečně pozorovaném chování živočichů je dodatečný výzkum jejich chování za různých podmínek.

Ve článku Jun [10] vytvořil model, ve kterém lze pozorovat chování a formulaci hejna v závislosti na výskytu potravy, nebo naopak nebezpečí ať již v podobě predátora, či rybářského háčku.



(a) Hurl food state



(b) Fish flee hook

Obr. 4: Ukázka výsledného chování hejna. Zdroj: [10]

2.4 Mravenčí roje v přírodě

Mravenci jsou *eusociálním* druhem hmyzu rozšířeným po takřka celém světě. Wilson [11] eusocialitu definoval následovně: „*Eusociální živočichové sdílí 4 hlavní charakteristiky: dospělí jedinci žijí ve skupinách, společně se starají o potomstvo, dochází k reprodukčnímu dělení práce a soužití několika generací.*“

Je nám známo přes 14000 druhů mravenců [11] a Schultz [12] odhaduje, že zastávají 15 až 20% suchozemské biomasy. Je tedy patrné, že se jedná o evolučně velmi úspěšný živočišný druh.

Eusocialita

Jedná se o společenské dělení vyskytující se u hmyzu, například u mravenců a včel. Eusocialita je charakterizována několika poměrně jedinečnými rysy [11]:

- žijí spolu alespoň 2 generace
- dochází ke společné péči o potomstvo
- reprodukčního dělení práce (výskyt pohlavních jedinců)
- zájmy roje mají přednost nad zájmy jedince

Tento způsob soužití přináší několik výhod: větší šance (pro jedince) na přežití při napadení predátorem, zvýšená obranyschopnost, dělba práce. A samozřejmě i několik nevýhod: zvýšená konkurence na získání zdrojů v rámci roje, zvýšená rychlost šíření nemocí a parazitů, jednodušší detekce predátory.

Pro potřeby této práce podkladem slouží mravenci rodu *Formica*, neboť mravenci lesní jsou jedním z nejběžnějších druhů, na které můžeme narazit v lesích Evropy. Tato podkapitola je vypracována převážně na základě Armina [13] a Sadila [14].

Diverzifikace kast

Reprodukční dělení se přímo projevuje diverzifikací na kasty, kde vznikají alespoň dvě kasty: pohlavní jedinci, jejichž prací je reprodukce, tudíž zajištění kontinuity roje, a nepohlavní jedinci (dělníci), jejichž úkol je zajištění bezpečí, obydlí a potravy pro roj.

V mravenčích rojích se vždy vyskytují alespoň tři kasty. Královna a samečci, kteří se množí a dělnice. U některých druhů dochází k další diverzifikaci, dle specializace dělnic na válečníky, nebo jiné specifické činnosti. U rodu *Formica* se vyskytují jen tři základní kasty:

- a) Dělnice, velikosti 4–9 mm. Mladé dělnice pečují o královnu a potomstvo, udržují a rozšiřují mraveniště. Starší dělnice shánějí potravu a stavební materiál mimo mraveniště. Dožívají se až 6 let, průměrný věk jsou 2 roky.
- b) Královny, velikosti 9–11 mm. Po vyklubání jsou okřídlené, krátce po páření křídla odlomí a vyhledají vhodné místo pro založení mraveniště. Dožívají se až 25 let.
- c) Samci, velikosti 9–11 mm, okřídlení. Zcela závislí na zdrojích obstaraných dělnicemi. Klubou se a naživu jsou jen během období rojení, tj. 2-3 týdny.

Vývoj jedinců rodu *Formica* je dokonalý, to znamená, že z vajíčka se vylíhne larva, která se po dospění a nasycením zakuklí a z kukly se klube dospělý jedinec. Vaječné stádium trvá jeden až pět týdnů. Záleží ovšem také na roční době. Pakliže by se larva vyklubala až na podzim, vyklube se až na jaře, nebo počátkem léta příštího roku. Larvy mravenců z rodu *Formica* se vyvíjejí poměrně rychle, jmenovitě jeden až tři týdny. Během této doby stihnout prodělat několik růstových stádií. Nakonec se zakuklí a za jeden až pět týdnů se z kukly vylíhne dospělý jedinec.

2.4.1 Mraveniště

Mraveniště lesních mravenců mají obvykle jednu královnu, ta předává svůj „pach“ na ostatní mravence, díky čemuž se rozlišují jednotlivci z cizích mravenišť. Vůči cizím jedincům jednají relativně agresivně.

Založení mraveniště

Založení předchází rojení, během kterého se setkají roje samců a královen. K rojení dochází za slunečných dnů v pozdním květnu až po konec srpna. Po páření se samci stávají apatickými a hynou, královny ulomí svá křídla a začnou hledat vhodné místo pro založení nového roje. Na nalezení vhodného místa mají dva týdny, načež jim začne docházet energie z připravených zásob. Novou kolonii královna může založit buď sama, s pomocí dalších královen, nebo za pomoci cizích mravenců.

a) Neodvislý způsob založení kolonie

V tomto případě si královna najde bezpečné místo podzemí, pod kamenem, pařezem, nebo pod kůrou v lýku stromů, kde si vyhloubí komůrku a naklade vajíčka. Většina druhů mravenců v tomto stádiu již své hnízdo neopustí a potřebnou energii doplňují pojidáním vajíček a larev. Toto pokračuje, než se královně podaří odchovat první generaci dělnic, která okamžitě začne opečovávat královnu a potomstvo, shánět potravu a stavět mraveniště.

V případě, že několik královen zakládalo mraveniště dohromady (čímž si zvýšily šance na úspěch v kritických počátcích) brzy vypukne uvnitř nového hnízda válka, která končí přežitím jediné královny. Královny některých druhů například *Formica rufa*, jsou schopny spolu dlouhodobě koexistovat, což vede ke vzniku obzvláště velkých a početných kolonií.

b) Závislé zakládání kolonie

Tato metoda je u našich mravenců lesních běžnější, má totiž vyšší šance na úspěch. Královna vyhledá mraveniště stejného, nebo cizího druhu a stane se tamější královnou. K tomu dojde v případě, že kolonie je v současnosti bez královny, a je tak rovnou přijata.

Pokud v mraveništi královna stále je, musí vniknout do mraveniště a tam vyhledat a usmrtit tamější královnu, než ji dělnice udolají. Po úspěšném usmrcení královny je rojem, který se jí ještě před chvílí snažil zabít, přijata za vlastní.

Architektura mraveniště

Pozemní mraveniště je nejčastěji umístěno pod kameny, u kořenů stromů, nebo u pařezu. Tyto přírodní překážky nabízejí dostatečnou ochranu pro komůrky královny a vajíček, které jsou pod nimi skryty. Nad nimi mravenci hromadí kupu materiálu s dodatečnými komůrkami. Samotná kupa kromě životního prostoru zajišťuje stálou vlhkost v hlubších částích mraveniště a skrze větší povrchovou vrstvu, která vstřebává sluneční paprsky, je mraveniště schopno regulovat teplo.

Centrem mraveniště je komůrka královny, která bývá hluboko uvnitř tlejících stromů, pod pařezem, nebo pod kamenem. Díky tomu královna zůstává v bezpečí, dojde-li k povrchnímu poškození mraveniště.

Pod tímto bodem se rozkládá složitý systém komůrek a chodbiček, jejichž primárním účelem je zabezpečení stabilní teploty a vysoké vlhkosti, což poskytuje ideální podmínky pro vajíčka a útočiště proti extrémním teplotám v létě, nebo v zimě. Čerstvě vylíhnuté larvy stále vyžadují vysokou vlhkost, potřebují ale i vyšší teploty, tyto podmínky zajišťují komůrky vyskytující se v podzemí po obvodu mraveniště. Odrostlé larvy potřebují vyšší teploty a jsou přenášeny do méně zabezpečených komůrek nadzemí v kupě nanošeného materiálu. Na kraji kupy se uchovávají i kukly, které vyžadují vysoké teploty a sucho.

Dělnice neustále rozšiřují podzemní část mraveniště, vykopaný drobný materiál a kamínky vynášejí na povrch na kupu, nebo jej umísťují po jejím obvodu, díky čemuž vzniká jakýsi val, který kupu podpírá. Také pravidelně vynášejí vlhký materiál z útrob mraveniště na jeho povrch, aby vyschl a zamezilo se tak šíření plísně v kolonii.

Starší dělnice, vyskytující se mimo mraveniště, také neustále shánějí vhodný materiál k umístění na samotnou kupu, ať už jehličí, drobné kamínky, větvičky, nebo rostlinky. Ten je využíván k rozšiřování a opravám kupy.

2.4.2 Práce v průběhu roku

Činnost kolonie je závislá na počasí, za deště a nízkých teplot aktivita mimo i vně kolonie klesá. Hlavní pracovní činnosti se v průběhu roku značně odlišují. Následující body jsou zpracovány za pomoci.

Jaro (duben–květen)

Mravenci jsou studenokrevní. Život kolonie tedy začíná zjara, s koncem zimní hibernace. Primárním úkoly je probuzení kolonie, vyhřátí mraveniště a prvotní nalezení potravy. O probuzení mraveniště se starají starší dělnice, které přezimují ve výše umístěných komůrkách, kde jsou méně chráněny (proto starší, více nahraditelné dělnice) a kam se jarní teplo dostane rychleji nežli do útrob mraveniště. Po probuzení se dělnice i s královnou sluní na povrchu mraveniště.

Pokud jsou nějaké dělnice stále příliš ztuhlé na to, aby zvládly cestu na povrch, jiné dělnice je nahoru vynesou.

Poté, co se dostatečně zahřejí, odkryjí dělnice svrchní krycí část kupy a mraveniště začne prosychat. Pokračují ve vyhřívání se na slunci a teplo pak v podobě tělesného tepla nosí do podzemních, stále studených komůrek. Začínají se starat o první snůšku královny a samozřejmě několik nejzkušenějších dělnic jde hledat zdroje potravy. Královna snáší zimní snůšku, ze které se vylíhnou samci (neoplozená vajíčka) a královny (oplozená vajíčka).

Léto (červen–srpen)

Po odletu pohlavních jedinců královna začne snášet letní vajíčka, z nichž se budou líhnout dělnice. Dělnice mezitím znovu sestaví kupu mraveniště, která pomáhá sbírat sluneční teplo a vyhřívá tak kolonii. Výšku a sklon kupy postupně upravují, čímž přichází teplo regulují. Dělnice se přesouvají do doposud nevyhřátých částí mraveniště v jeho hlubinách a expedice za potravou značně zintenzivní. V případě obzvláště teplých dní dělnice otevírají v kupě nové vstupy, díky kterým mraveniště více větrá a, zabrání se tak přehřátí.

Podzim (září–říjen)

Královna přestává klást vajíčka, tudíž klesá spotřeba potravy. Dělnice začínají vystavovat kupu co nejvýše, aby zachytávala co nejvíce slunečních paprsků. Uzavřou většinu průchodů v kupě, nahradí je novými průchody po jejím obvodu. Ustávají práce na nadzemní části mraveniště a dělnice místo toho rozšiřují podzemní prostory. Ustávají expedice za potravou, neboť odpadá potřeba krmit potomstvo. Stále se pečuje o mšice a z medovice si mravenci připravují tukové zásoby.

Po odchování poslední snůšky, dělnice přestávají udržovat stabilní teplotu po celém mraveništi. V postranních komůrkách, které sloužily k odchování potomstva, klesá teplota.

Zima (listopad–březen)

Uzavřou se poslední průchody na povrch a probíhají poslední práce v podzemí. Při poklesu teploty pod deset stupňů celsia, se mravenci stahují do nejhlubších

komůrek, kde se shluknou u královny a přečkají tam zimu. Během hibernace nespalují žádnou potravu. Část dělnic (staré a nemocné) zůstává těsně pod hranicí promrzání půdy (cca osmdesát cm hluboko), kde vyčkají zvýšení teplot, aby brzy z jara mohly zbytek mraveniště opět probudit.

2.4.3 Práce v kolonii

Péče o potomstvo a královnu

Dělnice královnu neustále olizují, a tak ji zbavují chorobotvorných zárodků a nabírají její pach. Ten se pak kontaktem s dalšími dělnicemi postupně přenáší na všechny jedince v kolonii. Tento pach také způsobuje, že pečovatelky královnu živí výživnější stravou z labiálních žláz.

Královna snáší naráz kolem šestnácti až třiceti vajíček. Mezi jednotlivými snůškami u druhů rodu *Formica* může být jen několik desítek minut. Tato čerstvá vajíčka jsou malá a lepkavá, což umožňuje jednoduché přenášení ve shlucích.

Dělnice přenáší vajíčka do spodních komůrek, kde je vysoká vlhkost vzduchu a teploty kolem 20–25 °C. Tam je neustále olizují, aby je vlhčili a odstraňovali chorobotvorné zárodky a přemísťují je z hromady na hromadu, díky čemuž pozornost dostane většina vajíček.

Vajíčka se postupně zvětšují, až se z nich vyklubou larvy. Ty mají štětinky, které jim umožňují držet při sobě, což opět ulehčuje přepravu. Larvy jsou po vylíhnutí přenášeny do postranních komůrek, kde je stále vysoká vlhkost, ale vyšší teploty: v rozmezí 27–28 °C. Zde jsou krmeny (pohlavní jedinci potravou z labiální žlázy, budoucí dělnice z volete).

Larvy procházejí čtyřmi stádii růstu, v každém dalším stádiu je ideální o něco méně vlhké a teplejší prostředí. Larvy ve čtvrtém stádiu před zakuklením se tak uchovávají v komůrkách ve středu kupy, kde jsou teploty 29–31 °C.

Zde se zakuklí a následně je potřeba je přenést do svrchních částí kupy, kde je sucho a teplo. Pakliže přišlo a kupa promokla, dělnice kukly vynášejí na povrch, kde proschnou. Eventuálně se začnou líhnout dospělí jedinci a dělnice jim pomáhají zbavit se kokonu.

Čerstvě vylíhnutí mravenci mají ještě bezbarvou a měkkou skořápku a nemají na sobě pach královny. V této fázi jsou olizováni a krmeni, mezi tím na nich ulpí královnin pach. Schránka se obarví a ztvrdne během pár dní. Dělnice začínají vykonávat práce uvnitř mraveniště a samci a královny stráví několik dní v mraveništi vzájemnou péčí, než se začnou rojit.

Pokud má dělnice hlad, vylučuje krátkodobý feromon, kterým dává najevo, že potřebuje nakrmit. Pokud kolonie trpí nedostatkem potravy a nemá dostatečné zásoby, zvýšená hladina tohoto feromonu vede k zintenzivnění vnějších expedicí, do kterých se zapojují i mladé dělnice, které normálně zůstávají v kolonii.

Vynášení odpadu

Zkažená potrava, uhynulí jedinci, výkaly a různé rušivé předměty musí být z mraveniště odklizeny, aby se zamezilo šíření nemocí a nechtěných hub. Je-li mraveniště na suchém stanovišti, pro jejich odkládání slouží nejhlubší komůrky. V opačném případě dělnice vynášejí odpad ven z mraveniště, kde jej převezmou starší dělnice a odnesou jej těsně mimo lovecké teritorium. Kolonie si tak efektivně značí své teritorium.

U druhu *Formica polyctena* bylo zjištěno až dvanáct potravních cest a teritorium mraveniště zaujímal více než jeden a půl hektaru. Průměrná kolonie lesních mravenců má několik set tisíc jedinců, kteří hospodaří na teritoriu kolem sto m², a je schopna během jednoho roku ulovit až osm miliónů kusů hmyzu, přemístit na padesát tisíc semen a jimi opečovávané mšice vyprodukují kolem dvou set litrů medovice. [15]

Dělba práce

Dělba práce v kolonii probíhá skrze pachové vzruchy. Každá dělnice je vůči nim jinak citlivá, a aby začala reagovat, musí ji zasáhnout v určité minimální intenzitě. Jak feromony královny, tak vajíček a larev působí jinak. Dochází tak ke specializaci na péči o vajíčka, larvy, kukly a královnu. Zbývající mladé dělnice se starají o mraveniště.

Potrava

Hlavním úkolem starších dělnic je zajištění potravy, ať už v původní podobě, nebo v podobě tráveniny uchovávané ve voleti. Mraveniště vyžaduje, jak rostlinnou (sacharidy – energie), tak živočišnou potravu (bílkoviny – stavební prvky). Bílkoviny jsou potřeba hlavně pro královnu a potomstvo, v případě dostatku je rozložení stravy přibližně v poměru 2:1 s převahou rostlinné stravy.

Rostlinná strava se stává například z: lesních plodů, nektaru květin, pryskyřice stromů, semen rostlin a medovice, kterou získávají od mšic. Tuto stravu si dělnice venku předávají ve formě tráveniny bezmála při každém setkání.

Příkladem živočišné stravy jsou: plži, mlži, žížaly, housenky, pavouci a všelijaký další hmyz, mnohdy včetně cizích mravenců. Kořist zanáší k mraveništi, kde je rozporcována a nakrmí se jí vnitřek mraveniště. Mravenci také požírají čerstvé mršiny.

Průzkum a nalezení potravy

Zdroj potravy je v první řadě samozřejmě potřeba identifikovat. Z tohoto důvodu jsou vysílány průzkumnice, jejichž prací je procházet les a najít zdroje potravy. Jedná-li se například o malý plod, odnesou jej vcelku zpět. Pokud se jedná o něco, co dělnice sama není schopná unést, nakrmí se a vrátí se zpět s plným voletem. Plné vole vede k vylučování exkrementů, které obsahují feromon, pomocí něhož si značí cestu.

Pomocí postavení vůči Slunci nebo hvězdám dělnice znají svoji přibližnou polohu vůči mraveništi a vydávají se tedy jeho přibližným směrem. U některých tropických druhů byla i prokázána schopnost hledat mraveniště pomocí magnetického pole. [16] Přibližným směrem dělnice půjde, než nalezne orientační body, podle kterých se zorientuje. Těmito body mohou být například stromy poblíž mraveniště, od kterých volí přímou cestu zpět do mraveniště.

Dělnice eventuálně dorazí k mraveništi. Pokud přinesla část ještě nestrávené potravy (uložený hmyz, velké semeno nebo plod), vypustí akutní feromon, který přiláká další dělnice a úlovek rozporcují. Jestliže přišla jen čerstvě nakrmena, snaží se o nalákání dalších dělnic. K tomu použije kombinaci specifických pohybů a krmení z volete.

Po naverbování několika dalších dělnic se vydávají z mraveniště po zanechané stezce zpět ke zdroji potravy, kde se najedí a následně sami zanechají stopu. Takto vznikne základ stezky, který bude mít dostatečně silnou stopu, aby se další dělnice přidávaly samostatně, a odpadá tak potřeba je přímo verbovat.

Postupně se přidává čím dál tím více dělnic, až se jich eventuálně ke zdroji vydá více, než kolik jich je schopno přijmout stravu. Dochází totiž k dlouhému čekání u zdroje potravy. Dělnice, které se k potravě nedostaly, na zpáteční cestě nezanechají feromon, díky čemuž se udrží síla pachové stopy přibližně úměrná počtu mravenců, kteří jsou schopni zdroj efektivně zpracovávat.

Byly prováděny testy na mravencích rodu *Acromyrmex*, za účelem zjištění, zda dělnice více věří svým zkušenostem, nebo slepě následují feromonovou stopu při zpětné lokalizaci zdroje jídla. [17] Tyto testy ukázaly, že minimálně dělnice tohoto rodu preferují svoji vlastní zkušenost nad rojem značenou cestou.

Pokud se na zpáteční cestě nějaké dělnice oddělí od původního směru a najde kratší cestu, bude následována několika dalšími. A protože tuto cestu urazí rychleji, bude se na ní rychleji hromadit feromon, což vede ke zvýšení jeho koncentrace, a tím i větší lákavosti pro další dělnice. Tímto způsobem efektivnější stezka nahrazuje stezku původní.

Hlavním zdrojem potravy pro lesní mravence jsou kolonie medovnicovitých mšic, které sají mizu stromů a vylučují ji ve formě medoviny. Po nalezení takovéto kolonie se k ní rychle vytvoří stabilní potravinová cesta, která trvá zbytek roku (nebo do zániku kolonie). Mravenci na oplátku za medovinu mšice chrání před dravci a přenášejí je na čerstvé větve (sání mízy z větví eventuálně vede k jejich uhynutí).

2.4.4 Komunikace

Primárním způsobem komunikace jsou různé feromonové stopy. Mravenci užívají minimálně dva typy feromonů pro organizaci pátracích výprav: dlouhodobý feromon značící výskyt potravy (vydrží přes dvacet čtyři hodin) a krátkodobý, akutní feromon (vydrží kolem půl hodiny), kterým si předávají naléhavé informace (mám hlad nebo nebezpečí). [18]

Všichni mravenci nereagují stejně. Například mravenci druhu Faraon mají vymezené kasty dělnic, které čtou dlouhodobé a umísťují krátkodobé feromony. Na ty reagují dělnice, které mají za úkol samotnou přepravu potravin. Tyto dělnice ale sami nevypouštějí žádné feromony. [18]

Příkladem akutního feromonu je pach kyseliny mravenčí, která je vedle kusadel hlavní zbraní mravenců. K jejímu uvolňování dochází v případě rozrušení. Mladé dělnice od tohoto místa mají tendenci prchat, kdežto u starších dělnic vzbuzuje agresivitu, a tak spěchají na místo jejího uvolnění připraveny k boji.

Kromě pachové komunikace mravenci také využívají hmat, ať už přímý kontakt pomocí tykadel, nebo skrze vnímání otřesů v zemi. Také využívají zvukové vjemy. Třením částí svého těla vytvářejí jakési ‚cvrkání‘. Tyto metody, ale u většiny druhů mají primárně podpůrný charakter. Typickým příkladem je dělnice, která právě našla nový zdroj potravy a snaží se aktivně naverbovat další dělnice, aby ji následovaly zpět, než dojde k dostatečnému nahromadění feromonu.

2.4.5 Hrozby pro roj

Prostory mimo mraveniště jsou nebezpečné, proto za normálních okolností chodí mimo bezpečí mraveniště jen starší dělnice. Mezi hrozby, na které mohou narazit patří: pavouci, ptáci, larvy mravkolvů a mnoho dalšího, převážně okřídleného hmyzu. A samozřejmě mravenci z cizích kolonií.

Mravenci

Většina druhů mravenců je mezi jednotlivými koloniemi velmi kompetitivní. Mravenci jsou známí vedením válek, které jsou proječovány skrze lokální potyčky v místech s vysokou koncentrací potravy. Drobné potyčky často končí plnohodnotnou invazí a vypleněním cizího mraveniště.

Existují druhy, jmenovitě váleční mravenci, kteří se na toto specializují. Sami nebudují permanentní mraveniště, ale jsou neustále v pohybu a loví a plení vše, co se jim připlete do cesty.

Na druhou stranu existují rody, například Faraon, nebo Argentinský mravenec, kteří tvoří takzvané superkolonie, tj. síť několika mravenišť, každé mající

několik královen, které neprojevují vzájemnou agresi. Tyto druhy jsou úspěšně rozšířeny po většině světa, včetně Evropy.

Naši lesní mravenci jsou převážně pasivní při náhodném setkání s jedinci z jiné kolonie. Pakliže v okolí převažuje pach cizí královny (více cizích mravenců), projevují snahu se jim vyvarovat. Pokud naopak převažuje počet mravenců z vlastní kolonie, snaží se s pomocí výstražného chování vetřelce zapudit. Dostane-li se vetřelec až do blízkosti mraveniště nebo zdroje potravy, stávají se mravenci agresivními a napadnou ho.

Hrozby pro mraveniště

Někteří živočichové jsou však schopni poničit i samotné mraveniště, a tak ohrozit přežití celé kolonie. Ukázkovým příkladem jsou divoká prasata, jezevci, nebo vysoká zvěř. Během zimy se mraveniště také stává cílem šplhavého ptactva a žlun, které mraveniště rozhrabou s cílem vytáhnout nechráněné mravence. To může způsobit až úplné vymrznutí a zánik kolonie. [15]

Přesun mraveniště

Dojde-li k velkému poškození mraveniště, mravenci mohou preferovat založení nového nad záchranou stávajícího. K přesunu mraveniště také může dojít, pokud v teritoriu mraveniště začnou docházet zdroje potravy.

Proces hledání vhodné lokace pro nové mraveniště probíhá podobně jako hledání zdroje potravy. Vyšlou se dělnice s cílem najít suché místo v polostínu u stromu, nebo ještě lépe u pařezu, označí si cestu zpět a na nové místo lákají další dělnice.

Brzy se na místě nakupí dostatek dělnic a zahájí se stavba nového mraveniště, zatímco jiné dělnice přesouvají potomstvo a mladé dělnice. Ve chvíli, kdy se přesune dostatek dělnic, je přesunuta i královna. V případě, že práce započaly na dvou nebo více místech, na alternativních staveništích práce po odnesení královny brzy skončí. Dělnice se pak vrátí do původního hnízda a odtud následují královnu, která již byla odnesena do nového mraveniště.

3 Model mravenčí kolonie

V této kapitole je uvedeno několik vhodných programovacích prostředí určených pro práci s MAS. Dále je rozebrán návrh a implementace modelu mravenčí kolonie. Kapitola je zakončena verifikací modelu pro jeden roj, rozšíření modelu o dva další roje a po verifikaci následuje jednoduchý experiment.

3.1 Volba technologie

Pro potřeby agentově-orientovaného modelování se nabízí několik volně dostupných prostředí. Například Repast Suite, Anylogic nebo Netlogo. Programu NetLogo je věnován obzvláštní zájem, protože bylo zvoleno pro potřeby této práce.

3.1.1 Repast Suite

Repast Suite nabízí tři možné alternativy [19]:

- Repast Symphony – založen na jazyku Java, určen pro stolní počítače a malé sítě. Jednoduchý, nabízí bohatou interaktivitu modelů.
- Repast for High Performance Computing (HPC) – založen na jazyku C++, určen pro superpočítače a velké síťové clustery.
- Repast for Python – výkonnější než Symphony, jednodušší nežli HPC. Jak jméno napovídá, je založen na jazyce Python.

Volně dostupné jsou všechny tři verze. Nabízejí jednoduché modelovací prostředí, které umožňuje objektový přístup. Nabízí vestavenou knihovnu předpřipravených modelů a funkcionalit, jako je třeba knihovnu s genetickými algoritmy. Je často používán pro modely geografických informačních systémů (GIS).

3.1.2 Anylogic

Anylogic je high-end komerční modelovací prostředí založené na jazyce Java. Nabízí volně dostupnou verzi, určenou pro univerzitní výzkumy, a verzi placenou, určenou pro firmy a vládní organizace.

Volně dostupná verze je omezená velikostí modelu a testovací rámec pro simulace a variace proměnných je omezen na maximálně sedm různých

proměnných a maximum pěti set běhů. Nabízí přístup k vestavěné databázi kompatibilní s MS Excel a textovými soubory. [20] Vhodné pro práci s 2D i 3D modely.

3.1.3 NetLogo

NetLogo je programovatelné modelovací prostředí vhodné pro modelování přírodních a společenských jevů. Roku 1999 jej vytvořil Uri Wilensky a spolu s CCL (Center for Connected and Computer-based Modeling, z Northwestern University v Chicagu) ho stále vyvíjí [21].

NetLogo je rozšířením předchozího StarLoga, vůči němuž nabízí několik vylepšení. Například lepší uživatelského rozhraní. Desktopová aplikace běží na Java Virtual Machine, díky čemuž jej lze využít na všech hlavních platformách. V podobě Java appletů se modely také dají spouštět ve webových prohlížečích.

NetLogo je založeno na programovacím jazyce Logo, který je pro svoji jednoduchost primárně určen pro výuku základů programování. Jednoduchost jazyka, ale také nabízí možnost tvořit složité modely relativně jednoduše. NetLogo je využíváno jak pro výuku, tak pro potřeby výzkumu. Je vyvíjeno pod licencí GNU GPLv2.0.

Specializací NetLoga je zejména modelování komplexních systémů, které se v průběhu času vyvíjejí, toho dosahuje pomocí tří typů agentů, kterými jsou:

- Želvy (Turtles) – agenty pohybující a ovlivňující prostředí modelu. Lze vytvářet různé rody (Breeds) agentů.
- Políčka (Patches) – agenty tvořící prostředí daného modelu. Jsou rozmístěné ve dvourozměrné síti, jejíž značení odpovídá kartézské soustavě souřadnic. Políčka si mohou uchovávat předem definované hodnoty, které se za daných podmínek mohou měnit.
- Spoje (Links) – spojují dvě želvy, mohou být orientované i neorientované. Slouží k tvoření grafových struktur.

K tomu je navíc čtvrtý „agent“, kterým je sám pozorovatel. Pozorovatel zadává agentům instrukce, čímž se celý model dává do pohybu.

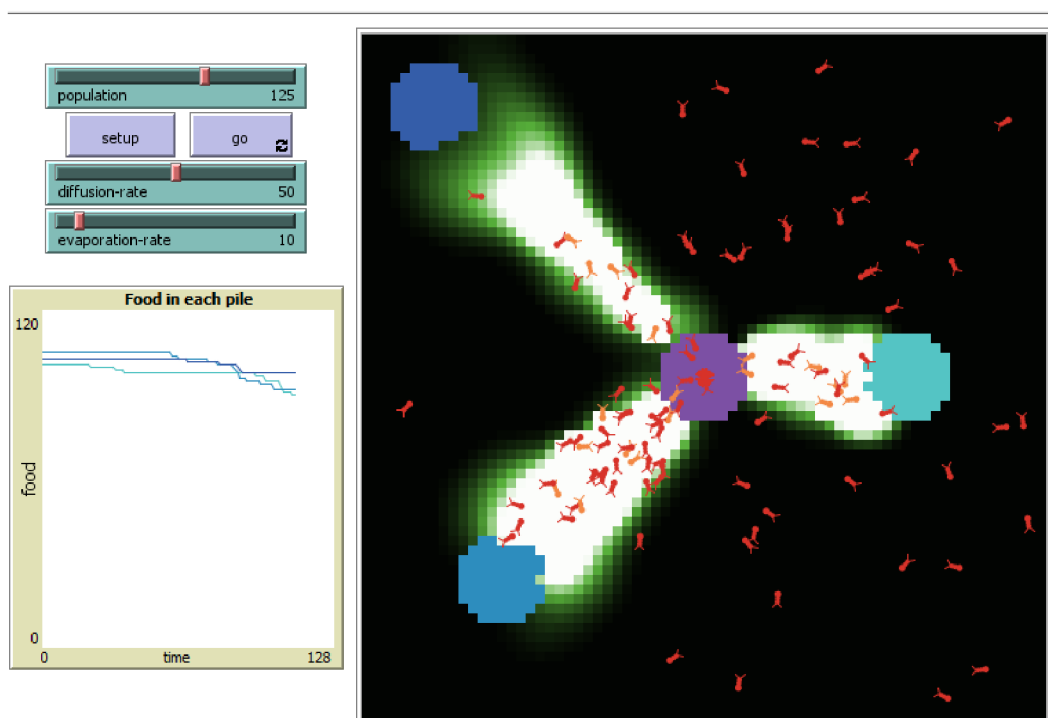
NetLogo u každého modelu zobrazuje tři záložky. Grafické uživatelské rozhraní, kde lze sledovat a ovládat chování modelu. Info, kde je popis modelu, podmínky k jeho rozšíření a odkazy na modely podobné. A nakonec záložka Kód, kde je model naprogramován. NetLogo také nabízí množství ukázkových modelů a vestavěný testovací rámec (zvaný Behavior Search) pro testování modelů a vzájemných závislostí proměnných.

Kombinace jednoduchosti jazyka s dostupností ukázkových modelů, na kterých si lze prohlédnout jeho fungování, jsou hlavními důvody, proč jsem pro potřeby této práce zvolil právě NetLogo.

Ukázky volně dostupných modelů s mravenci z NetLogo

Ants

V tomto modelu můžeme vidět mraveniště, které je zobrazeno fialovou barvou uprostřed mapy, 3 různě vzdálené zdroje potravy zobrazené modrou barvou. Po spuštění se mravenci postupně vyrojí z hnízda a nahodile procházejí mapu. Pokud narazí na kupu jídla, kousek odeberou, začnou se vracet k mraveništi a zpáteční cestu si značí feromonem.



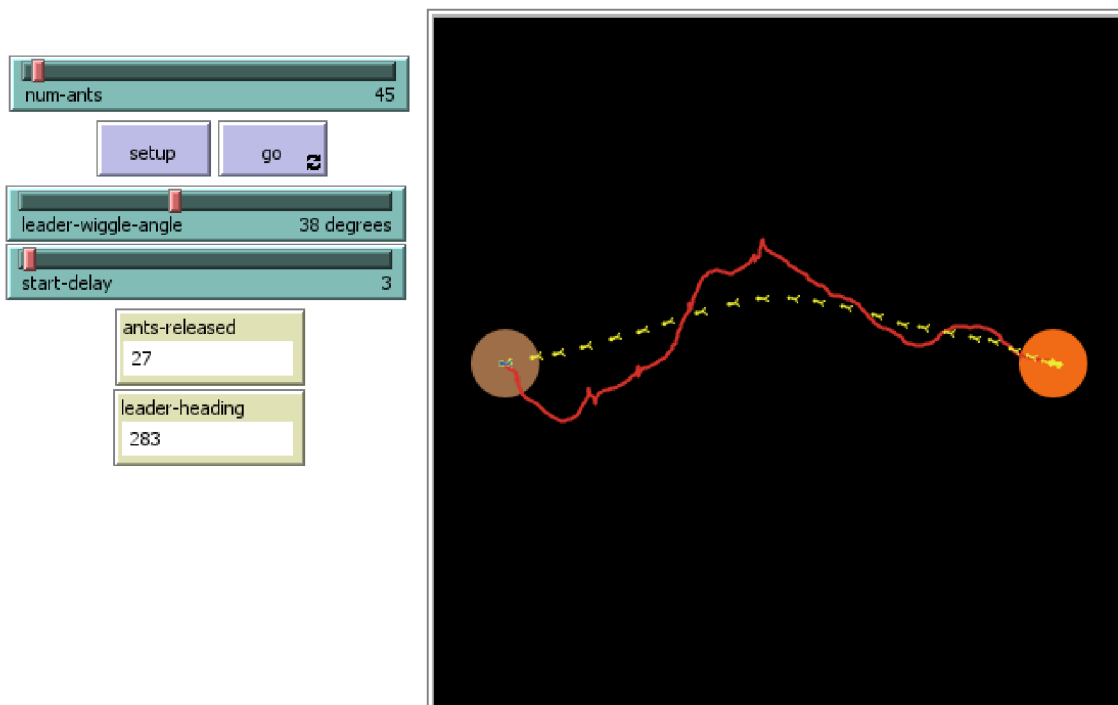
Obr. 5: Model Ants. Zdroj: [22]

Lze experimentovat s různou počáteční velikostí populace, rychlostí difuze feromonu a rychlostí jeho vypařování. Graf nám ukazuje, kolik potravy, v jaké hromádce zbývá.

Ant Lines

V tomto modelu můžeme vidět hnědě vyznačené mraveniště v levé části mapy a oranžový zdroj potravy vpravo. Po spuštění vyjde první mravenec obarven červeně, který za sebou zanechává červeně vyznačenou trasu. Pomocí nahodilých otáček s definovanou maximální velikostí úhlu se pohybuje po mapě, než dorazí ke zdroji potravy.

Chvíli po něm vyráží i zbytek mravenců značených žlutě. Tito mravenci, na rozdíl od vedoucího s nahodilým vzorem pohybu, následují mravence před sebou. Můžeme tedy pozorovat, jak dochází k postupnému vyhlazení mravenčí stezky. Lze experimentovat s rozdílným množstvím mravenců, vymezením maximálního úhlu otáček vedoucího mravence a časovou prodlevou mezi vedoucím mravencem a jeho následníky.

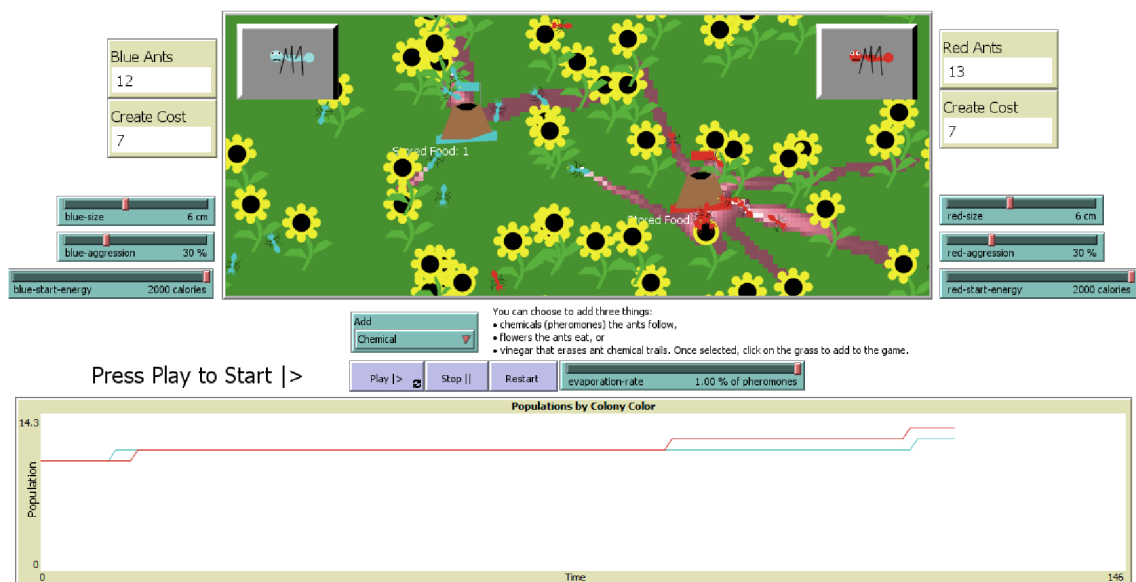


Obr. 6: Model Ant Lines. Zdroj: [23]

Ant Adaptation

Tento model reprezentuje dvě soupeřící mraveniště umístěné na louce plné květin. Po spuštění se mravenci vydají sbírat části rostlin, které slouží jako potrava. Pokud narazí na mravence z druhého týmu, je šance (změnitelná v GUI), že se vůči němu bude chovat agresivně a napadne jej. Šance na zvládnutí druhého mravence je dána velikostí jedince, která se dá také změnit. Po získání potravy se ji mravenec pokusí odnést do mraveniště. Pokud se v mraveništi nahromadí dostatek potravy, vzniká další mravenec.

Jedná se o hru pro dva hráče, kde můžeme pozorovat 2 soupeřící roje. My jako hráč máme možnost vyznačovat nebo mazat feromonové stezky a vytvářet rostliny (které dorůstají i samovolně).



Obr. 7: Model Ant Adaptation. Zdroj: [24]

3.2 Analýza modelu

Model reprezentuje jednoduché prostředí obsahující volná pole, stromy, drobné křoviny, rostliny a mraveniště. V tomto prostředí je úkolem mravenců získat potravu, pro zajištění chodu mraveniště, zatímco pečují o královnu a potomstvo.

3.2.1 Výběr živočichů

Z rešerše z předchozí kapitoly vyplývá několik živočichů, které by bylo možno v modelu zahrnout:

- Mravenci a všechny jejich vývojová stádia, jmenovitě královna, vajíčka, larvy, kukly, dělnice a samci.
- Zvěř lovcí a škodící mravencům: ptactvo, larvy mravkolvů, pavouci, létající hmyz. Dále divočáci, nebo jezevci, napadající mraveniště.
- Kořist mravenců: drobní brouci, housenky, plži, žížaly.
- Mšice, o které mravenci pečují a slunéčka sedmitečná, která je loví.

Z nich k reprezentaci byly zvoleny královny, vajíčka, larvy, kukly a dělnice. První jarní potomstvo, z něhož se líhnou noví samci a královny v modelu zahrnutí nejsou, neboť jejich jediný význam je rojení, tedy snaha o založení nových mravenišť. Pro chod kolonie tedy mají malý význam a zakládání nových kolonií je vynecháno, neboť šance na založení zcela nového mraveniště jsou mizivé a ve dvourozměrném prostoru simulace proniknutí královny do stávajícího mraveniště, takřka není možná. Docházelo by tak hlavně k opouštění mapy nebo jejich úhynu.

Z řad predátorů jsou implementováni pouze mravkolvové a pavouci. Zpěvné ptactvo je vynecháno, neboť mravenci proti nim nemají možnost obrany. Stejně tak bude vynechán útočný hmyz typu: vosy, sršně, či větší brouci. Ti jsou vynecháni, neboť jsou-li v pozici útočníka, mravenci mají pramalé šance na přežití, pokud jsou samotní a nejsou schopni útočníka obklíčit. Tuto funkčnost v modelu zastávají pavouci. Jejich začlenění by tedy bylo poněkud redundantní za cenu zvýšení výpočetní náročnosti modelu.

Kořist mravenců je simulována formou jednoho typu agenta. Mšice jsou reprezentovány formou proměnné u mšicí kolonie, tím se ulehčí výpočetní náročnosti. Slunéčka sedmitečná reprezentována nejsou, mšice loví drobná kořist.

3.2.2 Výběr prostředí

Prostředí je 2D mapa, skládající se z políček. Na nich mohou být stromy, keře, rostliny, nebo mraveniště. Teplota a vlhkost prostředí nejsou simulovány. Vzhledem k omezení do 2D prostoru, mraveniště je reprezentováno pouze formou agenta a zabarvených polí. Stejně jsou zobrazovány stromy, keře a rostliny.

3.2.3 Výběr zdrojů

V modelu jsou využity následující zdroje:

- Jídlo, získávané z rostlin, lesních plodů a ulovené kořisti. Jídlo má výživnost, která definuje kolik energie získají mravenci jeho konzumací. Pro snížení výpočetní náročnosti modelu, je energie sledována jen u mravenců.
- Feromony, skrze které mravenci komunikují. V modelu jsou užity dva typy. Dlouhodobý feromon, kterým si značí cestu od potravy a krátkodobý feromon, který vypouští před a během boje. Formou krátkodobého feromonu je také prezentována vůně jídla – rostlin, plodů a medovice mšic.

3.2.4 Činnosti

V modelu jsou modelovány následující činnosti:

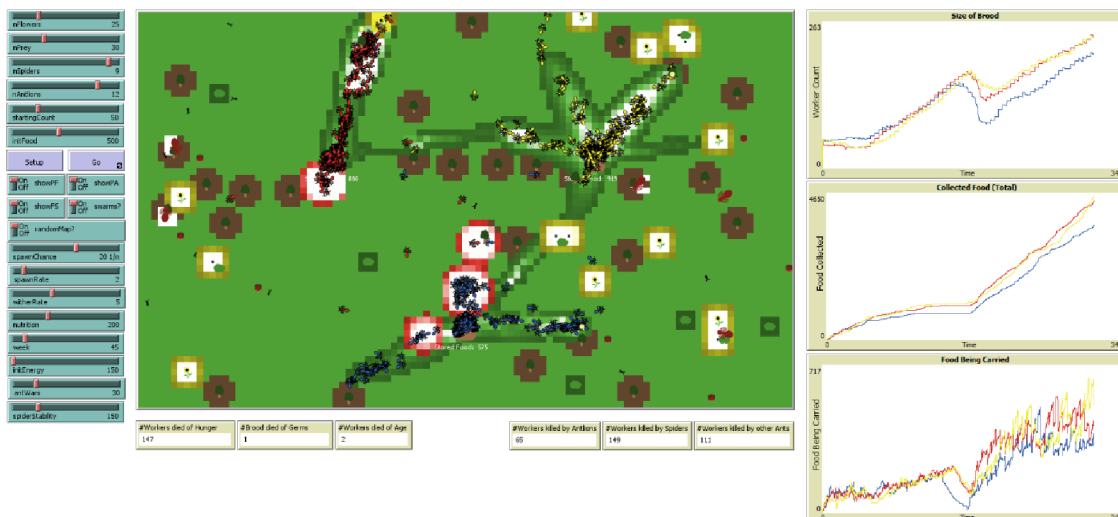
- Královny kladou vajíčka.
- Vajíčka, larvy a kukly čekají, než se vylíhnou. To je ovlivněno časem, v případě larev musí také být dostatečně nakrmeny.
- Mladé dělnice pečují o královnu a potomstvo: odstraňování chorobotvorných zárodků a krmení. V případě, že mraveniště začíná hladovět, přidávají se k výpravám za potravou. A neboť, u uskladněného jídla nelze sledovat, jak dlouho a v jakých podmínkách je uloženo, nebude se kazit ani vynášet.
- Zkušené dělnice chodí na výpravy za potravou. Počáteční přímé verbování není implementováno. Stejně tak porcování potravy. Při nalezení mravenců z cizí kolonie, buď jednají pasivně, nebo se konkurenty pokouší napadnout. Formu reakce závisí na lokální převaze.
- Dělnice si potravu nepředávají na přímo, pouze ji vybírají z nalezišť, nebo ze skladu v mraveništi, tak je zabráněno množství interakcí, které by zbytečně zpomalovaly průběh modelu.

Pro potřeby modelu bude chování ostatních živočichů velmi zjednodušeno, tím snížíme náročnost na paměť a výpočetní sílu.

- Pavouci a mravkolvové loví v rámci svých hnízd. Pavouci čas od času vyhledávají nové místo pro pavučinu, během tohoto přesunu loví případné mravence. Budou-li jimi obklíčeni, hrozí že budou sami uloveni.
- Drobná kořist se neustále toulá po mapě, narazí-li na mšicí kolonii, sníží se počet mšic, tak dosáhneme částečné reprezentace slunéček sedmitečných.
- Mšicí kolonie se rozšiřují. V závislosti na počtu mšic generují medovici.
- Rostliny mají nektar. Křoviska generují lesní plody.

3.3 Implementace modelu

3.3.1 Grafické uživatelské rozhraní



Obr. 9: GUI. Zdroj: Autor

Na obrázku lze vidět GUI modelu. Čtyři vrchní posuvníky vlevo slouží k definici inicializačních proměnných:

Tab. 1: Ovládací panel, inicializační proměnné. Zdroj: Autor

Proměnná	Účel proměnné
nFlowers	množství vygenerovaných květin
nPrey	startovní množství drobné kořisti
nSpiders	maximální počet pavouků a jejich počet při inicializaci
nAntlions	maximální počet mravkolvů a jejich počet při inicializaci
nAphids	počáteční množství mšic v koloniích
initFood	zásoby jídla v mraveništi po inicializaci
startingCount	startovní počet dělnic

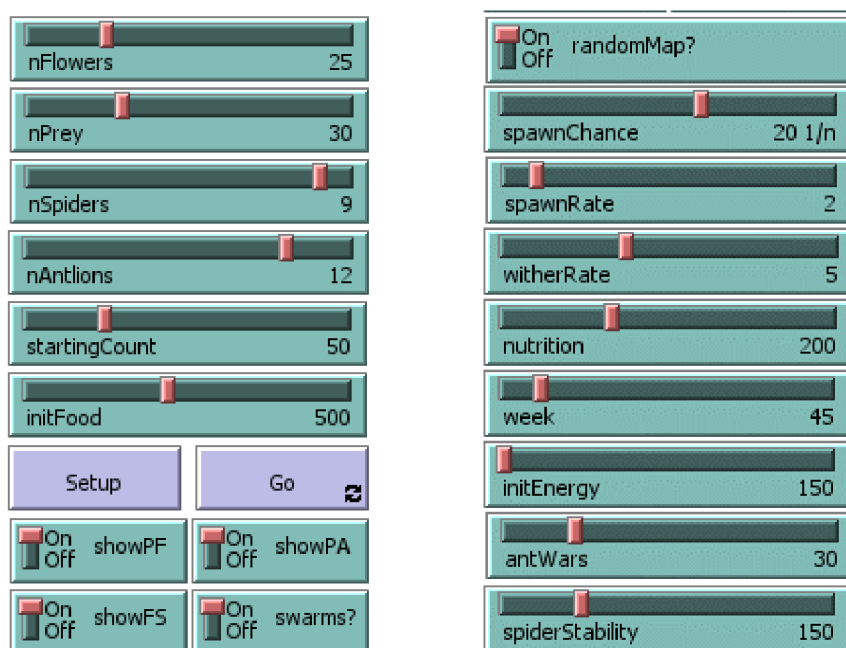
Následují tlačítka na inicializaci a spuštění modelu. Hned za nimi jsou přepínače umožňující zobrazení feromonů. *PF* zobrazuje zelený feromon značící cestu ke zdrojům potravy. *PA* zobrazuje červený feromon značící agresi dělnic a *FS* zobrazuje žlutý pach, který vzniká ze zdrojů potravy. Přepínač *swarms?* přehazuje

mezi nastavením pro jedno, nebo tři mravenišť. Přepínač *randomMap?* umožňuje zapnout náhodné rozmístění stromů, keřů a kolonií mšic při generaci mapy.

Spodní posuvníky mají vliv na proměnné, které lze měnit za běhu a ovlivňovat tak chování modelu. Jmenovitě se jedná o následující proměnné:

Tab. 2: Ovládací panel, proměnné ovlivňující běh modelu. Zdroj: Autor

Proměnná	Účel proměnné
week	délka týdne v tickách, od ní se odvozuje rychlost kladení vajíček a vývoj potomstva.
spawnChance	šance na vznik nového jídla
witherRate	po kolika weeks dojde k úhynu nesklizených květín a plodů
nutrition	kolik jednotek energie, lze získat konzumací jedné jednotky potravy
initEnergy	počáteční energie s kterou se líhnou čerstvě vyklubané dělnice, ovlivňuje požadovanou energii pro kladení vajíček a zakuklení
antWars	šance dělnice na udolání dělnice z cizí kolonie
spiderStability	určuje, jak dlouho pavouci zůstávají čekat v pavučině



Obr. 10: Ovládací panel GUI. Zdroj: Autor

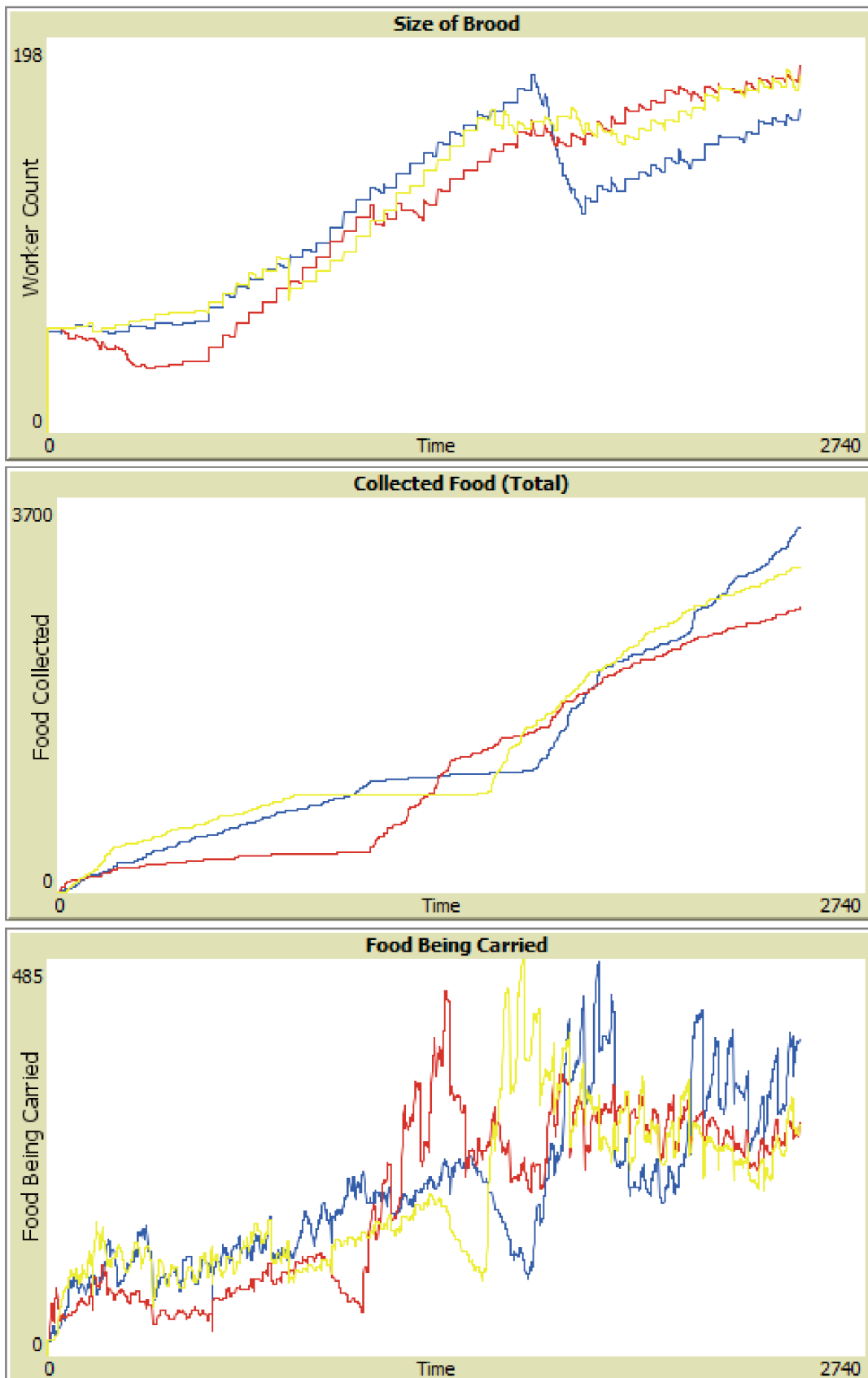
Uprostřed lze vidět samotnou mapu světa, kde se vykresluje model, a pod ní šest monitorů. Na nich se postupně aktualizuje počet zemřelých mravenců, který se dělí podle příčiny smrti: vyhladovění, chorobotvorné zárodky, věk, larvy mravkolvů, pavouci nebo cizí mravenci. Grafy vedle mapy popisují vývoj velikosti populace kolonií, celkově sesbírané množství potravy a aktuálně přenášené množství potravy.



Obr. 11: Mapa a monitory. Zdroj: Autor

Tab. 3: Sledované proměnné. Zdroj: Autor

Proměnná	Význam proměnné
workerCount	počet dělnic daného roje
storedFood	množství uskladněného jídla v daném mraveništi
foodTotal	celkové množství jídla získané kolonií
energyKills	kolik dělnic z roje zemřelo hladu
germKills	počet vajíček, larev a kukel roje, který zemřel na chorobotvorné zárodky
antKills	kolik dělnic bylo zabito dělnicemi z cizího roje



Obr. 12: GUI Grafy. Zdroj: Autor

3.3.2 Shrnutí funkčnosti modelu

Prostředí

V modelu je implementována náhodná generace prostředí, lze zapnout nebo vypnout pomocí přepínače *randomMap?*. Je-li přepínač vypnutý, vykreslí se předdefinovaná mapa nezbytná pro testování. Pokud je zapnutý, umístění a počet stromů i keřů je náhodné a na libovolném stromě, v rádiu patnáct až dvacet pět polí od mraveniště, vzniká kolonie mšic. Tento rádius je nadefinován, aby nemohly vzniknout v jeho těsné blízkosti, nebo naopak až na druhém konci mapy.

Prostředí se skládá ze zelených polí, kde se vyskytují čtyři typy agentů:

- Mraveniště ohraničené černými poli
- Stromy vyznačené hnědými poli
- Keře na tmavě zelených polích
- Rostliny na žlutých polích.

Mraveniště obstarává inicializaci roje, tj. vytvoří královnu a počáteční várku mravenců a potomstva. Také slouží jako sklad potravin. *Stromy* představují překážku, na které se všichni agenti, s výjimkou pavouků, pohybují poloviční rychlostí, tím je alespoň částečně simulován pohyb vertikálně. *Keře* generují lesní plody, které představují jeden ze zdrojů potravy. Jejich přítomnost je znázorněna zmodráním daného pole. *Rostliny* představují další zdroj potravy. Dělnice chodí sbírat jejich nektar. Po vyčerpání zdroje rostlina ztrácí význam pro model a zaniká. V čas nesebraná potrava z lesních plodů a rostlin mizí.

Agenty

Je implementována *kořist*, která se po ulovení stává potravou pro mraveniště. Objevují se na náhodných polích. Náhodně se pohybují, pokud se přiblíží ke kolonii mšic, dojde ke snížení tamější populace.

Jsou reprezentovány dva typy predátorů mravenců v podobě *mravkolvů* a *pavouků*. Mravkolvové se objevují na náhodných polích a ve svém okolí vytvářejí jámu, kam chytají potulující se dělnice. Po ulovení patnácti mravenců se zakuklí, ztrácejí význam pro model a zmizí. Tak jsou balancovány případy, kdy se objeví

v těsné blízkosti mraveniště nebo potravinové cesty, kde by jinak byli jednoduše schopni způsobit zánik kolonie.

Pavouci, podobně jako mravkolvové vytvářejí pasti, ve kterých číhají. Loví mravence i drobnou kořist. Po ulovení deseti mravenců nebo uplynutí dané doby se přesouvají. Hodnota deset byla určena během vytváření modelu. Tímto je balancována jejich nebezpečnost obdobně jako u mravkolvů. Plus je tím simulován fakt, že postupně dochází k poškození pavučiny a pavouci eventuálně vytvoří novou. Pokud po cestě narazí na mravence, snaží se ho ulovit. Dělnice jsou schopny efektivní obrany jen pokud jsou v přesile alespoň tři ku jedné, tím pavouci zůstávají být nebezpeční i mimo pavučinu a je tak reprezentována nebezpečná kořist na jejíž zdolání je potřeba přesila.

Královna je umístěna v centru mraveniště, klade vajíčka. Musí být krmena a čištěna dělnicemi jinak hrozí, že uhynie. Vajíčka po nabytí věku pěti týdnů zanikají a na jejich místě se klubou larvy. Larvy je navíc třeba krmit, nebo zahynou. Po třech týdnech vytvářejí kukly. Z kukel se po uplynutí čtyř týdnů klubou nové dělnice. Tyto časové hodnoty jsou založeny na základě údajů o rychlosti vývoje z kapitoly 2.4. Délka týdne je dána posuvníkem *week*, který určuje kolik *ticků* představuje jeden týden.

Mladé dělnice zůstávají v mraveništi, kde krmí královnu a larvy. Navíc musí neustále čistit chorobotvorné zárodky z královny a veškerého potomstva, jinak dochází k jejich úmrtí. Každý *tick* na všech vajíčkách, larvách, kuklách a královnách přibývá jeden zárodek. Při překročení padesáti u potomstva dochází k jeho úmrtí. V případě královny je hranice dána jedním stem. Tyto hodnoty byly zvoleny během vytváření modelu, byly zvoleny tak, aby královna měla, vyšší života schopnost než potomstvo a tak, aby vyžadovaly častou péči, ale mohlo dojít k jejímu přerušení na omezenou dobu. To připadá v potaz hlavně ze začátku běhů, když je v mraveništi málo dělnic a když mladé dělnice opouští mraveniště při nedostatku potravy.

Dělnice přestává být mladá při dosažení věku padesáti čtyř týdnů, tedy jednoho roku, tato hodnota je odvozena z reality. Pokud mraveniště začíná hladovět, i mladé dělnice se začínají přidávat k výpravám za potravou.

Starší dělnice se snaží zajistit potravu ve formě rostlinného nektaru, lesních plodů, nebo nějaké kořisti. Ke koordinaci využívají dvou feromonů: jeden značí zpáteční cestu k potravě, druhý lov a boj.

3.3.3 Proměnné

V modelu je využito globálních proměnných, které jsou napojeny na GUI a několika proměnných sloužících k hodnocení simulace, jedná se o proměnné zaznamenávající množství skladovaného jídla, úmrtí. Soupis jednotlivých proměnných políček a agentů se stručným vysvětlením:

Tab. 4: Proměnné políček. Zdroj: Autor

Proměnné políček	
pheromoneF	Síla feromonu značící cestu k potravě
pheromoneA	Síla feromonu značící agresi
foodScent	Síla pachu jídla
feed?	Síla pachu značící potřebu jídla v mraveništi
tend?	Síla pachu značící potřebu o péči o potomstvo
pFood	Množství dostupné potravy
nest?	Jedná se o mraveniště?
tree?	Jedná se o strom?
bush?	Jedná se o křoví?
flower?	Jedná se o květinu?
lionHole?	Jedná se o jámu mravkolva?
web?	Jedná se o pavučinu?
Proměnné kolonií mšic	
aphids	Počet mšic v kolonii
Proměnné mraveniště	
storedFood	Množství jídla v mraveništi
scent	Pach roje – zbytek roje dědí, slouží k rozlišení příslušníků roje
homeNest	Ukazatel na domovské mraveniště – zbytek roje dědí

Tab. 5: Proměnné agentů. Zdroj: Autor

Proměnná dělnic, vajíček, larev, kukel, rostlin a lesních plodů	
age	Věk
Proměnné královny, vajíček, larev a kukel	
scent	Pach královny – rozlišuje kolonie
homeNest	Ukazatel na domovské mravenišťě
energy	Současná hladina energie, může způsobit uhynutí agenta
germs	Množství zárodků, může způsobit uhynutí agenta
Proměnné dělnic	
scent	Pach královny – rozlišuje kolonie
homeNest	Ukazatel na domovské mravenišťě
energy	Současná hladina energie, může způsobit uhynutí agenta
food	Aktuálně přenášené množství jídla
victim	Ukazatel na právě lovenou kořist
fighting?	Zdali právě bojuje?
carrying?	Zdali právě něco nese?
young?	Zdali je mladší 54 týdnů?
webbed?	Zdali je v pavučině?
foodSource?	Zdali našla zdroj potravy? – Slouží k rozlišení rostlinné stravy a kořisti, v případě kořisti neznáčí cestu
Proměnné kořisti	
hp	Životy – slouží k nastavení odolnosti v boji
webbed?	Zdali je v pavučině?
Proměnné larev mravkolvů	
kills	Počet ulovených mravenců
Proměnné pavouků	
kills	Počet ulovených mravenců
hp	Životy – slouží k nastavení odolnosti v boji
counter	Pomocné počítadlo – jak dlouho je v pavučině
victim	Ukazatel na právě lovenou kořist
fighting?	Zdali právě bojuje právě?

3.3.4 Inicializace

K inicializaci slouží procedura, která je spojena s tlačítkem Setup z GUI. Dojde ke smazání všech agentů a proměnných a vyresetuje se časomíra (*ticks*).

Na základě nastavení se vygeneruje svět pro jeden nebo tři roje. Na předem daných souřadnicích vytvoří stromy, keře a kolonie mšic, případně se vygenerují na

náhodných souřadnicích. Vzniká mraveniště, v kterém vznikne královna, vajíčka, larvy, kukly a dělnice. Počáteční množství dělnic, lze nastavit z GUI. Počet vajíček, larev a kukel je roven jedné desetíně počátečního množství dělnic, což odpovídá velikostně přibližně jedné snůšce vajíček. Jedna třetina dělnic bude mladá, dvě třetiny budou zkušené, toto dělení je odvozeno z průměrného věku dožití, dvou let. Přiřadí náhodně věk v daném rozmezí.

Na náhodných polích (která nejsou mraveniště, strom nebo keř) vytvoří rostliny, vygeneruje kořist a mravkolvy. Na kraji mapy se objeví pavouci. Množství závisí na hodnotách nastavitelných v GUI.

Nakonec proběhne procedura *paint*, která zbarví políčka podle jejich typu. Prázdné políčko světle zeleně, keře tmavě zeleně, rostliny žlutě, mraveniště černě, stromy a jámy mravkolvů tmavě hnědě a pavučiny bíle. Pokud na keři jsou přítomné plody, políčko se zbarví tmavě modře.

3.3.5 Zrození agentů

Stromy, keře, kolonie mšic, mraveniště a královny jsou vytvořeny během inicializace. V průběhu modelu další zástupci těchto typů nevznikají. Spolu s královnou se vytváří roj. Po mapě jsou náhodně rozmístěni mravkolvové, rostliny, kořist a na krajích se objeví pavouci, viz Inicializace.

V průběhu běhu modelu se objevuje lesní ovoce na keřích a nový jedinci z řad rostliny a kořist. Šance na jejich zrození je dána skrze *spawnChance*, tuto proměnnou lze měnit v průběhu modelu. Tato šance je rovna jedné lomeno *spawnChance*. Bude-li tedy *spawnChance* na příklad deset, šance na vytvoření nových agentů je jedna desetina a dá se tedy předpokládat, že každých deset *ticků* vzniknou nové zdroje jídla. Vzniká jich nula až *spawnRate* bez jedné. Rostlin vzniká dvojnásobek.

Pokud klesne počet pavouků pod polovinu *nSpiders*, na kraji mapy vznikají další, v dopočtu do *nSpiders*. Obdobně pokud klesne počet mravkolvů pod polovinu *nAntlions*, na náhodných polích se objeví dopočet do plného počtu. Není tedy možno mít mapu bez těchto predátorů (jestliže jejich maximální počet není nula).

Má-li královna dostatek *energie* (tj. alespoň dvojnásobek *initialEnergy*, tím je zabezpečeno, že se sama nezabije), tak jednou za *week ticků* má příležitost za cenu *initialEnergy*, naklást až čtyři až osm vajíček. Jedná se o čtvrtinu množství, které jsou

v realitě schopny klást v rozmezí několika málo minut, jedná se samozřejmě o omezení kvůli velikosti roje, model běží stabilně s pěti sty mravenci, následně začíná docházet k jeho zpomalení.

Vajíčka po přečkání pěti *week ticků*, zahynou a zrodí larvu. Ta po přečkání tří a více *week ticků*, je-li dostatečně nakrmena (alespoň trojnásobek *initialEnergy*, tato hodnota byla zvolena, kvůli vysoké energetické náročnosti metamorfózy), uhynie a vytváří kuklu. A kukla po přečkání čtyř *weeks ticků* zaniká a zrodí se nová dělnice s počáteční energií danou *initialEnergy*.

3.3.6 Úmrtí agentů

Rostliny a lesní plody se „zkazí“, nejsou-li v daném čase sklizeny, tj. pokud existují déle nežli *witherRate week ticků*. Tímto je zamezeno přeplnění mapy zdroji jídla. Kolonie mšic zaniká, pokud vymřou všechny mšice.

Larvy mravkolvů „zahynou“, poté co uloví patnáct mravenců. Drobná kořist a pavouci uhynou, pakliže je dělnice zvládnou ulovit. K tomu mají definované *hp* (životy), po jejich vyčerpání umírají a stávají se jídlem, které ponese dělnice, co udělila poslední ránu. Drobná kořist také uhynie, pokud se chytí v pavučině a pavouk ji uloví. Jsou schopni ulovit jednu kořist za *tick*.

Dělnice mohou zemřít v pavučině nebo jámě mravkolva. Dále mohou zemřít v boji s mravenci cizího roje nebo s pavoukem. Pavouci mají šanci, že dělnici zabijí jedna ku deseti, což je činí nebezpečnými i mimo pavučiny. Dělnice má šanci na skolení jiné dělnice jedna ku pětadvaceti, tímto dosahujeme podobné délky boje jako v případě lovu drobné kořisti, která je nastavena, tak aby byl čas agresí vypočítat a dělnice měly příležitost stihnout zareagovat na potyčku. Dále umírají, pokud jejich věk přesáhne sto šedesát dva *weeks*, jedná se o polovinu maximálního věku dožití, o rok více než je průměr. Hodnota je tak nastavena, aby počty mravenců byly omezeny. A samozřejmě umírají, pokud jim dojde energie.

Královny, vajíčka, larvy a kukly navíc ohrožují chorobotvorné zárodky, které z nich dělnice musí pravidelně očišťovat. Pakliže se jich nahromadí více než sto u královny, nebo více než padesát u potomstva, daný agent zahyne. Přibývají rychlostí plus jedna za *tick*. Královny a larvy navíc mohou přijít o energii, tudíž zemřít.

3.3.7 Go procedura

Go procedura je hlavní ovládací metodou, která udává do pohybu celý model. Proběhne právě jednou každý *tick*.

Prvním krokem je chování mravenců, to bude podrobně rozebráno v další podkapitole. Následuje volání na kolonie mšic. Každých *week* *ticků* generuje *pFood* rovno čtvrtině mšic v kolonii. Pokud je v kolonii méně než sto mšic, kolonie se rozšíří o desetinu současného počtu. Tímto je zabezpečena stabilní generace jídla, ale je omezeno kolik jej může vznikat. Kolonie tak bude muset využívat i jiné zdroje.

Dále dojde k pohnutí drobné kořisti, které je simulováno náhodným natočením vlevo, či vpravo o nula až čtyřicet pět stupňů a pohybem vpřed o tři desetiny pole. Pokud jsou na stromě, pohybují se poloviční rychlostí. Jestli jsou chyceni v pavučině, nehýbou se vůbec. Jsou-li v blízkosti kolonie mšic, každých šest *ticků* jednu mšici uloví, tím se omezuje, jak rychle jsou schopni kolonii vyhledit, odvozeno experimentálně během vývoje.

Ověří se, zdali dělnice, nebo kořist nevkročily do pavučiny. Pokud ano, jsou uvězněny v pavučině, ztrácí schopnost pohybu až do doby, než uhynou, nebo než se pavouk přemístí a původní pavučina se „roztrhá“.

Následně pavouci a larvy mravkolvů loví cokoliv, co se dostalo do jejich pastí. Pokud je v jámě nebo pavučině více kořisti najednou, náhodně zvolí, jakého agenta ulovit. Uloví maximálně jednoho za *tick*.

Pokračuje se voláním na pavouky. Pakliže pavouci aktuálně bojují, v boji pokračují. Pokud ne, snaží se nalézt strom či křoví, kde by mohli vytvořit pavučinu. Křoví a stromy jsou schopni identifikovat na vzdálenost dvou polí s rozhledem tři sta třicet stupňů kolem sebe.

Když strom nebo křoví naleznou, začnou tvořit pavučinu. Nejprve ji vytvoří pod sebou a pak každých deset *ticků*, na nějakém ze sousedních polí. V tuto chvíli také začíná běžet počítadlo, každý *tick* se zvedne o jedna. Ve chvíli, kdy počítadlo dosáhne hodnoty rovnou *spiderStability*, nebo po ulovení deseti mravenců, zaniká pavučina a pavouk se přesouvá na jiné místo. Je tak imitován fakt, že pavouci neopravují poškozené pavučiny. Navíc je tak balancována jejich nebezpečnost.

Během hledání křovisek a stromů bloudí podobně jako dělnice s rychlostí půl pole na *tick*. Pokud během bloudění zpozorují mravence snaží se je ulovit. Mravence jsou schopni identifikovat na vzdálenost dvou polí v tři sta třicet stupňů kolem sebe a šance na úspěšné skolení mravence je jedna ku deseti, díky tomu jsou schopni dělnice usmrtit velmi rychle.

Po pavoucích následuje *paint* procedura, která označí změny v identifikaci políček (změní barvu). Následně na políčkách, u kterých je *pFood* větší než nula, vzniká *foodSmell*. Je-li daná varianta vybraná, na mapě se zbarví zvolené feromony a vypočítá se jejich rozptyl do okolí.

Následuje procedura úmrtí, která všem agentům s energií, jednu jednotku ubere, potomstvu přidá jednu jednotku zárodků a každých *week ticků*, zvedne jejich věk. Nakonec zkontroluje, zdali nějaký agent nesplňuje podmínky pro uhynutí, viz Úmrtí agentů.

Na konec dojde k přidání nových rostlin, lesních plodů a kořisti, pokud klesly počty predátorů, objeví se noví. Mraveniště vypíše, kolik je v něm uskladněno jídla. Dojde k vykreslení grafů a navýšení *tick* počítadla.

3.3.8 Mravenci

ActAnts

Hlavní procedurou je *actAnts*. Skrze ni jsou volány rutiny, které vyvíjí potomstvo a královna klade vajíčka. Následně skrze proceduru *help* umísťují značku *tend?*, kterou značí, že potřebují očistit. Královna a larvy také umísťují značku *feed?*, kterou žádají o nakrmení.

Následně se ptá dělnic, zdali se nacházejí v domovském mraveništi, pokud ano a jedná se o mladé dělnice, budou se starat o královnu a potomstvo skrze proceduru *tend*. Pokud jim dochází energie, vezmou si uskladněné jídlo. Jestliže začínají docházet zásoby uskladněného jídla, umísťují značku *feed?* signalizující, že potřebují nakrmit.

Pokud se starší dělnice nachází v mraveništi, nabíhá procedura *moveWorkers*, ta také probíhá pro všechny dělnice mimo mraveniště, pokud nejsou uvězněny v pavučině. Nakonec se skryje zobrazení dělnic a potomstva ukrytého

v mraveništích. Dělnice, které přenášejí jídlo se nakrmí, dochází-li jim energie. Tím za cenu jedné jednotky jídla, získají energii danou proměnnou *nutrition*.

MoveWorkers

Procedura *moveWorkers* zajišťuje pohyb dělnic mimo mraveniště. Pokud dělnice bojují, v boji pokračují skrze proceduru *fight*. Jestli dělnice něco přenáší, vrací se do mraveniště, pomocí procedury *return*. Pokud zrovna nic nenese, má za úkol hledat potravu, k tomu slouží procedura *forage*. Ta také nabíhá poté, co se dělnice vrátila s jídlem do mraveniště.

Forage

Procedura *forage* má za úkol nalezení zdroje jídla. Dochází zde pouze ke změně směru pohybu dělnice. Začíná náhodným otočením pomocí procedury *wiggle*. Následně se ptá, zdali se na jejím poli vyskytuje potrava. Pokud ano, příznaky *carrying?* a *foodSource?* jsou nastaveny jako pravda, a z políčka vezme pět jednotek jídla, tento počet byl experimentálně určen v průběhu vývoje modelu.

Pokud se zde potrava nevyskytuje, ale je zde cítit *feromon* vyznačující cestu k potravě, přítomnost boje nebo potravy, natočí se dělnice vyznačeným směrem. Citlivost na feromon pro potravinové stezky je omezena shora i zdola, díky čemuž dělnice nenásledují dělnici vracející se s jídlem, ale vydají se směrem odkud přišla. A nakonec pokud se dělnici nedaří nalézt žádný zdroj potravy a dochází jí energie, vrátí se zpět do mraveniště skrze *return*. Hranicí je padesát jednotek energie, tato hranice byla určena během vývoje modelu, dělnicím dává padesát ticků na návrat do mraveniště, před smrtí na vyhladovění. Pokud má dostatek energie, probíhá procedura *hunt*, kterou se zacílí na případnou kořist, v její blízkosti (sousedství jejího pole).

Směr dělnice tedy bude primárně zaměřen na kořist, nebo zdroj potravy. Pokud v jejím okolí nic z toho není, následuje feromony značenou stezku. Pokud se žádná v jejím okolí nevyskytuje, její směr zůstává určen náhodným otočením ze začátku procedury.

Hunt

Procedura hunt se podívá, zdali se v okolí dělnice nachází potencionální kořist. Nejprve se táže, zdali se v okolí jejího políčka nevyskytuje pavouk. Pakliže ano, zacílí jej skrze proceduru *engage* (příznak *fighting?* se nastaví na pravda a vypustí feromon značící boj).

Dále se zjišťuje, jestli v jejím okolí není mravenec z cizího roje. Jestliže ano a na políčkách v rozsahu tří polí mají dělnice z jejího roje lokální přesilu, zacílí skrze *engage* danou dělnici. Pokud podmínka lokální přesily splněna není, dělnice zůstává pasivní. Tak dochází k částečné simulaci pasivity, kterou mravenci rodu *Formica* vykazují, pokud nebrání mravenišťe nebo zdroj potravy. Nakonec se zacílí, běžná kořist, jestliže se v jejím okolí nějaká vyskytuje.

Fight

Pokud dělnice má zacílenou nějakou kořist bude s ní bojovat. Toto obstarává procedura *fight*. V první řadě se ptáme, zdali vytipovaná kořist ještě stále žije, může se totiž stát, že nějaká dělnice ji již stihla ulovit. Jestliže ano, dělnice vypustí *pheromoneA* a pokračuje v boji. U boje záleží na kořisti.

- Jedná-li se o pavouka, tak pokud s ní bojují alespoň dvě další dělnice, každá každý *tick*, ubere pavoukovi jeden *hp*. Tímto jsou pavouci schopni vážně ohrozit dělnice i ve volném prostředí a dělnice tak musí pro jejich udolání spolupracovat.
- Pakliže bojují s cizí dělnicí, mají šanci danou proměnnou *antFights* na její ulovení.
- Pokud s běžným hmyzem, každý *tick* jim uberou jeden *hp*.

Hodnoty *hp* jsou dvacet pět u běžné kořisti a padesát u pavouků. Tyto hodnoty byly nastaveny v průběhu vytváření modelu, tak aby měly dělnice dostatek času na přilákaní dalších dělnic. Ale zároveň, pokud v jejich blízkosti další dělnice nejsou, aby byly schopny kořist ulovit relativně rychle.

Nakonec se ověří, zdali vytipovaná kořist stále existuje. Pokud ne, znamená to, že se ji právě podařilo úspěšně zahubit. Dělnice si nastaví příznaky *carrying?* true

a *fighting?* false a získává deset jednotek jídla, jedná se o dvojnásobnou hodnotu získanou z rostlinné stravy, tím je reprezentována vyšší výživnost živočišné stravy.

Return

Předchozími procedurami dělnice identifikovaly a sebraly, případně ulovily něco k jídlu. Nyní je potřeba jídlo dopravit zpět do mraveniště, k čemuž slouží právě procedura *return*.

Pokud již dělnice dorazila do cíle, tj. mraveniště se stejným pachem. Nastaví se *foodSource?* a *carrying?* jako nepravda a do mraveniště se předá veškeré jídlo, které dělnice nesla. Nakonec, je-li v mraveništi dostatek jídla (více než třicet, tato hodnota byla určena během vývoje modelu, zabezpečí, že krmivo pro larvy a královnu má vyšší prioritu), dělnice si vezme dva kousky jídla (tato hodnota byla určena během vývoje modelu, dá dělnicím dostatek energie na pátrání po nových zdrojích potravy) a otočí se o sto osmdesát stupňů. Případně pokud se právě vrátila mladá dělnice, a potravinová nouze byla zažehnána, tj. příznak *feed*, klesl pod danou hranici, dělnice zůstává v mraveništi a vrací se k péči o roj.

Pakliže se do mraveniště ještě nevrátila, pokračuje jeho směrem. Pokud příznak *foodSource?* je pravda, vylučuje *pheromoneF*. Pro zjednodušení modelu mravenci vždy přesně vědí, jakým směrem se nachází mraveniště, jeho lokace je uložena v pomocné proměnné *homeNest*. Příznak *foodSource?* slouží k odlišení získávání potravy ze sběru a z lovu. Nevzniká tak tedy stezka k místu, kde dělnice ulovila svoji kořist.

Tend

Mladé dělnice, které zůstávají v mraveništi se primárně starají o zdraví roje. To je implementováno procedurou *tend*. Značky *feed?* nebo *tend?* jsou umístovány potomstvem a královnou skrze rutinu *help*, nebo hladovou dělnicí při nedostatku jídla. Přítomnost těchto značek (jejich hodnota je větší než nula) vybízí dělnice k péči o potomstvo a královnu.

Jedna dělnice v jednu chvíli může pečovat o právě jedno vajíčko, larvu, kuklu, či královnu. V případě, že pečuje o královnu nebo larvy, bude je krmit i čistit. Vajíčka a kukly dělnice pouze čistí. Pokud se o někoho tento *tick* staraly, sníží hodnotu dané

značky. Očišťují, pokud je na daném potomstvu, případně královně, alespoň deset zárodků. Sundají jich deset za *tick* a hodnota značky *tend?* klesne o dvacet. Královnou a larvy krmí, pokud jejich energie klesne pod požadované hodnoty, tj. dvojnásobek *initEnergy*, což je hodnota potřebná u královny na kladení vajíček a trojnásobek *initEnergy* u larev, kde se jedná o požadovanou energii k zakuklení.

Pokud hodnota značky *feed?* přesahuje určité hodnoty, se vzrůstající pravděpodobností se mladé dělnice budou vydávat ven s cílem zajistit potravu:

Tab. 6: Pravděpodobnost změny práce. Zdroj: Autor

Větší než	Pravděpodobnost
10 000	80 %
5000	50 %
1000	20 %

Hodnoty značek *feed?* a *tend?* byly určeny experimentálně během vývoje modelu. Lepší reprezentace by byla skrze feromony, tudíž i difuzi. Význam těchto značek, je ale omezen jen na samotné mraveniště. Byla tedy zvolena tato reprezentace, pro jednodušší výpočetní náročnost.

Splnění těchto podmínek se kontroluje každých padesát *ticků*. Tím mají dělnice trochu času potravu zajistit a zabraňuje se tak kompletnímu vyprázdnění mraveniště, což by vedlo k záhynu královny, a tudíž záhynu roje.

3.3.9 Feromony

V modelu jsou rozlišovány dva druhy feromonů. Jeden méně intenzivní, dlouhodobý, tj. feromon značící cestu ke zdroji potravy. A druhý, který je velmi intenzivní, ale také velmi těkavý, tj. feromon sloužící k signalizaci boje. Druhým typem je také simulován pach potravy.

Tohoto je dosaženo skrze přidávání *pheromoneF* po desítkách s rychlostí difuze pět procent za *tick* a přidáváním *pheromoneA* po tisících s rychlostí difuze padesát procent. *FoodScent* roste úměrně s množstvím jídla na daném políčku, konkrétně každý *tick* se zvýší jeho koncentrace o pěti násobek hodnoty *pFood*. Rychlost difuze je taktéž padesát procent. Difuze je implementována skrze

zabudovanou funkci *diffuse*, která n procent částic rozšíří mezi sousední políčka. Hodnoty byly zvoleny experimentálně během vývoje modelu, tak aby se *pheromoneA* a *FoodScent* rychle šířil po okolí, ale i rychle mizel, naopak *pheromoneF* se šíří mnohem pomaleji, ale vydrží déle.

Sledování feromonové stezky sleduje sílu feromonů přímo vpřed a vlevo a vpravo pod úhlem čtyřicet pět stupňů. Zároveň se porovnává, zdali je silnější koncentrace feromonu vedoucího k jídlu, či způsobujícího agresi. Vzhledem ke vstupním hodnotám téměř vždy bude převažovat hodnota *pheromoneA*, nebo *foodScent*.

Jsou-li povoleny odpovídající vypínače, *pheromoneF* je na mapě zakreslen zeleně, *pheromoneA* červeně a *foodScent* žlutě. Při malé koncentraci dosahují tmavých barev, při vysoké koncentraci přebíhají do bíla.

3.4 Kalibrace proměnných

V této části je využito v NetLogu vestavěné funkce Behaviour Search, která slouží ke zkoumání chování modelu s různými hodnotami proměnných a umožňuje spouštět naráz několik běhů, kde se jednotlivé proměnné budou postupně kombinovat. Výsledná data jsou přiložena v excel souboru BP_MasterSheet.

Prvním úkolem je nalézt takové kombinace vstupních proměnných, které vedou ke stabilitě modelu. Stabilní model je definován jednoduše: po několik tisíc *ticků*, přežije královna a na konci běhu velikost roje přesahuje sto padesát dělnic, tj. alespoň trojnásobek počtu s kterým byl model inicializován, je uskladněno mezi jedním stem až dvěma tisíci jednotek jídla a na nedostatek péče zemřelo méně než sto potomků. Při splnění těchto podmínek se dá předpokládat, že v nejbližší době nehrozí vymření roje.

3.4.1 Běh první

Vstupními parametry a jejich hodnoty jsou: *initFood* rovno pěti stům, *startingCount* je padesát, *nPrey* a *nFlowers* jsou rovny dvaceti. V této fázi vynecháme predátory, tudíž *nSpiders* a *nAntlions* jsou nula. Proměnné *antWars* a *spiderStability* jsou zde irelevantní. Testované proměnné a jejich zkoušené hodnoty jsou:

- *spawnChance*: 5, 15, 25
- *spawnRate*: 2, 6, 10
- *witherRate*: 1, 6, 10
- *nutrition*: 120, 240, 360
- *initEnergy*: 100, 200, 300
- *week*: 30, 65, 100

S těmito parametry model běžel po dobu tři tisíce *ticků*. Stabilních stavů vzniklo 117 z celkových 1458 běhů, z čehož 729 běhů bylo dáno jedinečnou kombinací výše uvedených proměnných, která se následně ještě jednou opakovala.

V pěti případech roj vymřel před dosažením požadovaných tří tisíc *ticků*. Jednalo se o ojedinělé případy, kde ze začátku roj nestihl získat dostatek potravy, všechny mladé dělnice opustily mraveniště a než se stihly vrátit došlo k úhynu královny.

Ve sto třiceti dvou bězích na konci testu žilo méně než sto padesát dělnic. V několika případech to bylo způsobeno nedostatkem potravy, tudíž vymřením značné části roje. Ve většině případů však k žádnému hromadnému vymírání nedocházelo, v těchto případech byla délka *week* nastavena na sto *ticků*. Je-li tedy požadavkem sledovat dynamický vývoj populace, délka týdne, od které se odvozuje rychlost vývoje potomstva, by se měla pohybovat pod hodnotou jednoho sta.

Během třiceti dvou běhů na jejich konci v mraveništi bylo méně než sto jednotek jídla. Vesměs se jednalo o nastavení s nejnižšími příbytky nových zdrojů, minimální výživností jídla a s týdnem délky třicet *ticků*.

Většina běhů selhala na příliš velkém přebytku jídla. Ve dvanácti stech osmdesáti devíti bězích bylo na jejich konci uskladněno více než dva tisíce jednotek jídla. Tyto běhy lze sice považovat za úspěšné, ale v rámci simulace jsou nezajímavé, neboť roj takřka není ohrožen strádáním, protože, je konstantní rychlost kladení vajíček. Výjimku zde tvoří, případy s dlouhým týdnem, kdy nedostatek potravy by teprve začal hrozit až po rozšíření roje na několik set členů.

V rámci simulací, které jsou považovány za stabilní došlo k následujícímu zastoupení hodnot:

Tab. 7: Stabilní hodnoty, test první. Zdroj: Autor

	Hodnota	Četnost	Hodnota	Četnost	Hodnota	Četnost
spawnChance	5	5	15	47	25	65
spawnRate	2	105	6	8	10	4
witherRate	4	46	6	41	10	30
nutrition	120	53	240	39	360	25
initEnergy	100	41	200	40	300	36
week	30	53	65	58	100	6

Z těchto hodnot, lze vypožorovat, že na hodnotě *initEnergy*, příliš nezáleží. To je nejspíše způsobeno tím, že čím vyšší je *initEnergy*, tím více času mají dělnice na nalezení potravy. Zároveň však stoupá spotřeba potravy pro královnu a larvy. Zdá se, že se tato proměnná sama balancuje. *Week*, jak bylo zmíněno výše, hlavně činí model zajímavějším. Co do funkčnosti modelu na samotné hodnotě příliš nezáleží.

Mezi hodnotami výživy se dá vypožorovat jakási nepřímá úměra, neboť čím více energie jednotka jídla dodá, tím méně jídla musí být k dispozici. To je, ale vcelku zřejmé vzhledem k podmínce pro maximální počet uskladněného jídla. Naopak při nízké výživnosti je potřeba vyšší koncentrace zdrojů jídla v kombinaci s delším týdnem.

3.4.2 Běh druhý

Na základě těchto pozorování je proveden další test, kde model poběží deset tisíc *ticků*. Vstupní parametry zůstávají beze změny. Navíc byly vymezeny proměnné *spawnRate* na hodnotu dva a *spawnChance* na dvacet, na základě předchozího testu. V tomto pokusu testované proměnné a jejich hodnoty jsou:

- *witherRate*: 4, 8
- *nutrition*: 100, 200
- *initEnergy*: 120, 240
- *week*: 30, 70

Podmínka pro úspěšný běh byla upravena na: přežití královny, velikost roje přesahuje tři sta dělnic, je uskladněno mezi jedním stem až pěti tisíci jednotek jídla a na nedostatek péče zemřelo méně než dvě stě potomků.

S těmito parametry model běžel 80krát, z čehož 16 bylo jedinečných běhů, které se ještě čtyři krát opakovaly. 19 běhů splnilo podmínku, a tak se klasifikovalo jako stabilní běh.

Roj vymřel ve čtyřech případech. Všechny čtyři měli stejné nastavení, v nejhrošším případě roj uhynul před třemi tisíci *ticky*, v případě nejlepšího po osmi tisíci *tickách*. Ve všech případech došlo k naprostému zkolabování roje, poté co se příliš rozšířil a došla potrava. A ve dvou dalších případech simulace skončila těsně před jeho vymřením.

V osmnácti případech na konci běhu měl roj uskladněno více než pět tisíc jednotek potravy. Jinak se jednalo o úspěšné běhy, společným prvek byly proměnné *nutrition* rovna dvěma stům a *week* roven sedmdesáti. Jen ve dvou případech, s touto kombinací, se běh kvalifikoval jako úspěšný. Ve většině případů běhy selhaly nízkým počtem dělnic ve chvíli ukončení testu, kde se počty pohybovali kolem dvou set, což lze vesměs stála považovat za úspěšný běh.

V rámci simulací, které jsou považovány za stabilní došlo k následujícímu zastoupení hodnot:

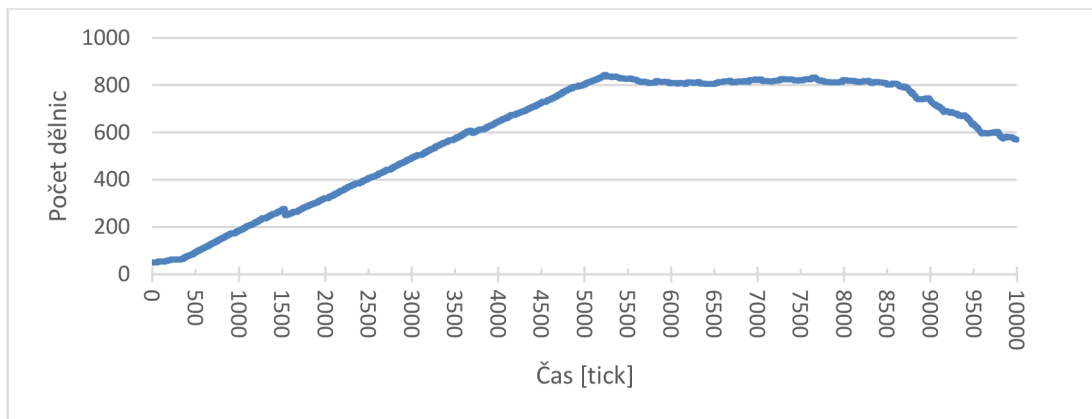
Tab. 8: Stabilní hodnoty, test druhý. Zdroj: Autor

	Hodnota	Četnost	Hodnota	Četnost
<i>witherRate</i>	4	6	8	13
<i>nutrition</i>	120	6	240	13
<i>initEnergy</i>	100	8	200	11
<i>week</i>	30	11	65	8

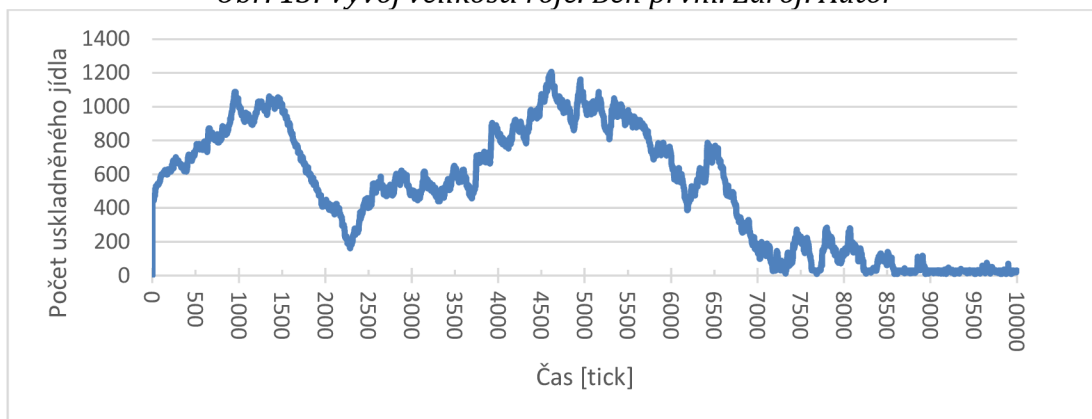
Podrobný výpis

Nyní je proved pokus, jehož účelem je přesně popsat vývoj běhu. Vstupní proměnné jsou ponechány stejně jako v minulém testu. Navíc na základě jeho výsledků byly určeny: *witherRate* osm, *nutrition* dvě stě, *week* třicet a *initEnergy* dvě stě čtyřicet. Běh s těmito parametry běží po dobu deset tisíc ticků, tentokrát, ale jsou vypsány výstupy pro všechny *ticky*. Pokus s tímto nastavením se opakuje čtyřikrát.

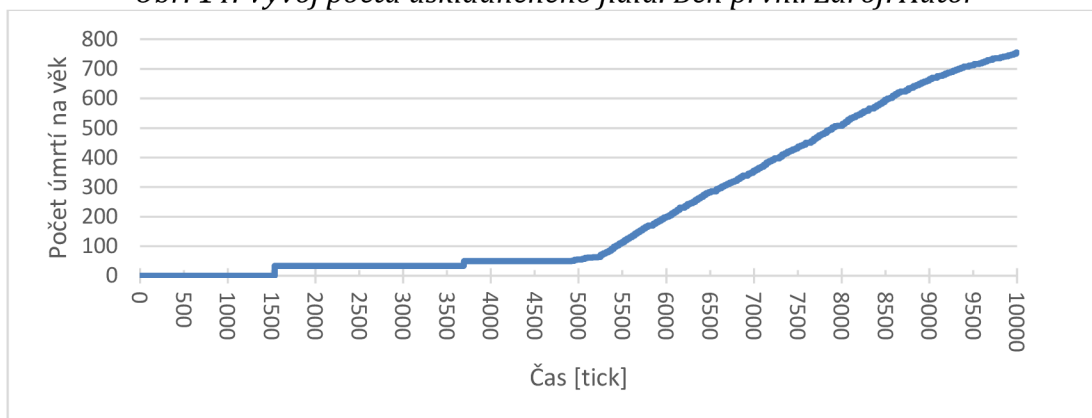
Během prvního běhu, lze pozorovat stabilní růst populace přes úroveň osm set jedinců. Po dosažení této úrovně, začínají dělnice umírat na maximální věk a populace se stabilně drží. O dva tisíce ticků později dochází k jídlu a roj začíná vymírat. Vše naznačuje, že tento trend by pokračoval nadále, než by došlo k dostatečnému snížení velikosti roje, případně až jeho vymření.



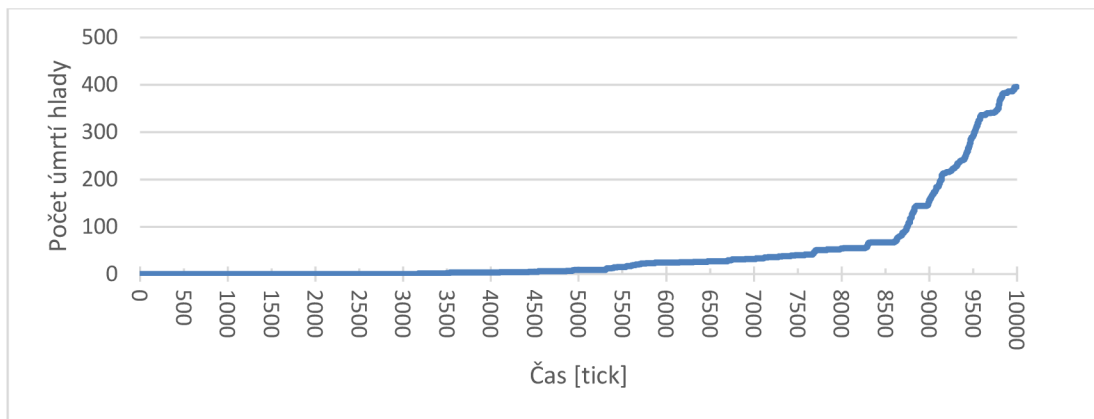
Obr. 13: Vývoj velikosti roje. Běh první. Zdroj: Autor



Obr. 14: Vývoj počtu uskladněného jídla. Běh první. Zdroj: Autor



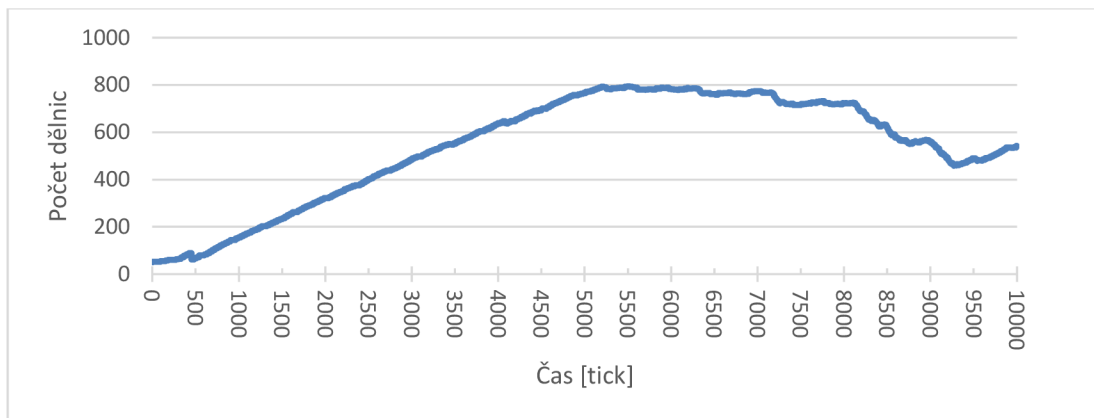
Obr. 15: Vývoj úmrtí na věk. Běh první. Zdroj: Autor



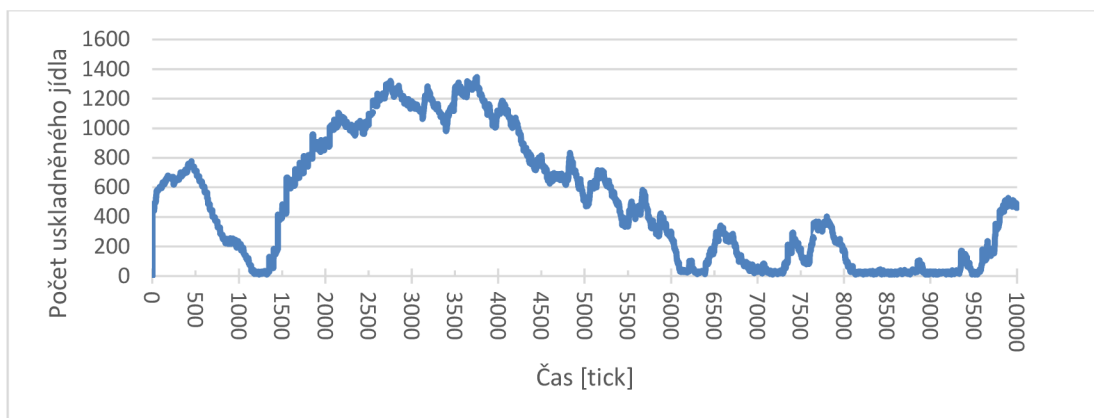
Obr. 16: Vývoj úmrtí na hlad. Běh první. Zdroj: Autor

V druhém běhu lze pozorovat obdobný vývoj. Nejprve dochází ke stabilnímu růstu populace přes úroveň osmi set. Načež dělnice začínají umírat na dosažení maximálního věku a populace se drží na stabilní hladině. Tento stav zde trvá až konce běhu. Dojde ke snížení zásob pod hladinu patnácti set. Dá se předpokládat, že by došlo k podobnému vývoji jako v prvním běhu.

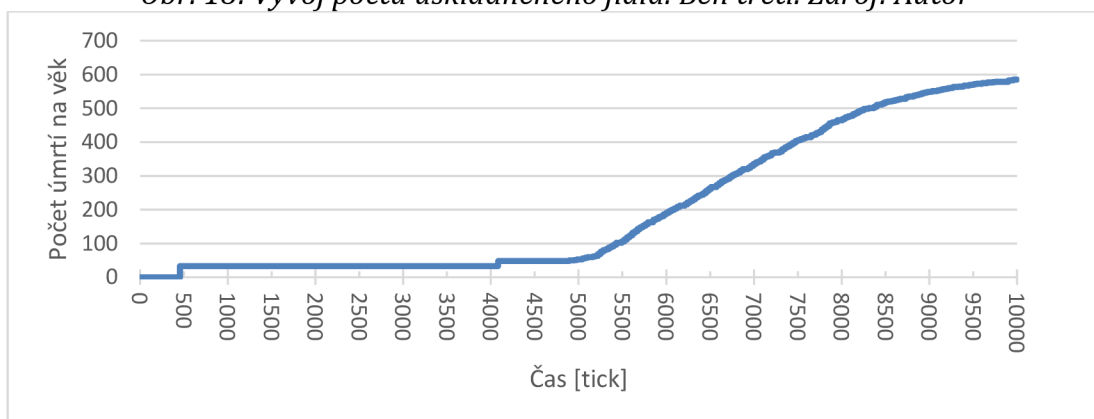
Třetí a čtvrtý běh probíhají podobně. Stabilní růst populace pokračuje do dosažení úrovně osmi set jedinců. Následně začíná docházet jídlo a populace klesá. V obou případech se však roj brzy vzchopí a začne získávat dostatek jídla na udržení stabilní hladiny a opětovný růst populace.



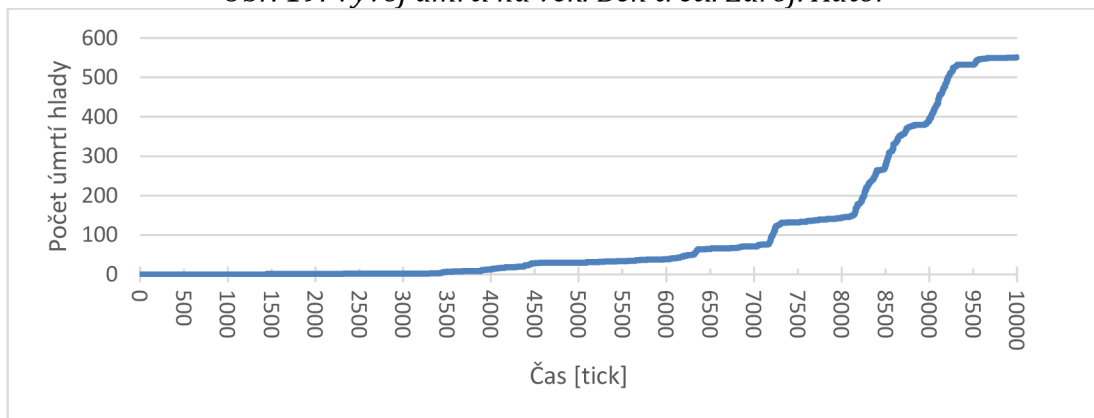
Obr. 17: Vývoj velikosti roje. Běh třetí. Zdroj: Autor



Obr. 18: Vývoj počtu uskladněného jídla. Běh třetí. Zdroj: Autor



Obr. 19: Vývoj úmrtí na věk. Běh třetí. Zdroj: Autor



Obr. 20: Vývoj úmrtí na hlad. Běh třetí. Zdroj: Autor

Na základě těchto pokusů, lze s rozumnou mírou jistoty dojít k závěru, že při této kombinaci proměnných, roj dosahuje stabilního růstu do úrovně osmi set členů. V této chvíli ale přestává být schopen, získat z okolí dostatek potravy, a roj začíná vymírat. Z této situace, je však roj stále schopen se vzpamatovat. Po poklesu

populace na úroveň kolem pěti set, začíná znovu prosperovat. S největší pravděpodobností by jídlo zase brzy začalo docházet a tento cyklus by pokračoval.

3.4.3 Běh třetí

Nezbývá než přidat predátory. Vstupní proměnné zůstávají stejné s výjimkou *nSpiders* a *nAntlions* a *spiderStability*, které jsou testovány. Podmínka pro úspěšný běh zůstává stejná, tj. přežití královny po dobu deset tisíc *ticků*, velikost roje přesahuje tři sta dělnic, je uskladněno mezi jedním stem až pěti tisíci jednotek jídla a na nedostatek péče zemřelo méně než dvě stě potomků. Testované hodnoty jsou následující:

- *nSpiders*: 3, 6
- *nAntlions*: 4, 8
- *spiderStability*: 100, 150, 200

S těmito parametry model běžel 24krát, z čehož 12 bylo jedinečných běhů, které se následně opakovaly. 18 běhů splnilo podmínku stability.

V případech, kdy došlo k nesplnění podmínky, byl na vině pokles uskladněného jídla, pod povolenou hranici. V jednom případě uskladněného jídla bylo těsně nad hranici pět tisíc. Ve směs tak můžeme všechny běhy považovat za úspěšné.

Počet mravenců, kteří byli uloveni larvy mravkolvů jsou v jednotlivých bězích kolem třiceti až sto padesáti. Náhodné rozložení se dalo očekávat, neboť pokud se larvy objeví kolem okraje mapy jsou téměř neškodné. Naopak v blízkosti mraveniště jsou velmi nebezpečné.

Pavoukům se podařilo ulovit od tří do pěti set mravenců. Při bězích se šesti pavouky a stabilitou sto, měli pavouci v průměru na svědomí kolem pěti set dělnic. Při bězích se stabilitou dvě stě, jich v průměru ulovili kolem čtyři sta šedesáti. S růstem hodnoty *spiderStability*, která určuje, jak dlouho budou v pavučině vyčkávat před změnou lokace, tedy v průměru dochází ke snížení počtu ulovených mravenců.

Tab. 9: Stabilní hodnoty, test třetí. Zdroj: Autor

	Hodnota	Četnost	Hodnota	Četnost	Hodnota	Četnost
spiderStability	100	7	150	5	200	6
nAntlions	4	10	8	8	-	-
nSpiders	3	8	6	10	-	-

3.4.4 Test při náhodně generovaném prostředí

Nakonec vstupy z předchozího testu, zkusíme při náhodném rozmístění stromů a keřů. Tím lze ověřit, zdali předchozí výsledky nebyly závislé na nastavení mapy. Vstupní proměnné byly ponechány z předchozího běhu, navíc byly určeny *spiderStability* sto padesát, *nAntlions* šest, *nSpiders* čtyři. Test s tímto nastavením je proveden na dvaceti čtyř různých generovaných mapách.

Podmínka pro úspěšnost běhu zůstala beze změny, tj. přežití královny po dobu deset tisíc *ticků*, velikost roje přesahuje tři sta dělnic, je uskladněno mezi jedním stem až pěti tisíci jednotek jídla a na nedostatek péče zemřelo méně než dvě stě potomků.

Tato podmínka nebyla splněna v 9 případech. Ve všech devíti bylo selhání způsobeno v současnosti uskladněných zásobách, které byly pod úrovní jednoho sta. Jinak, ale všechny podmínky byly splněny, nejnižší počet dělnic byl tři sta sedmdesát osm. Obecně došlo ke zvýšení počtu úmrtí způsobených hladou.

Model přesto, ale vykazoval konzistentní výsledky, kdy nedocházelo k vymření roje. Lze tedy tvrdit, že model, lze aplikovat i při náhodném rozmístění stromů, keřů a kolonie mšic.

3.5 Tři kolonie

V této části je stávající model rozšířen o dvě soupeřící kolonie. Nejprve je vyzkoušeno, zdali model bude dosahovat přijatelných výsledků, při nastavení získaném z předchozí části, nebo zdali by bylo vhodnější mírně navýšit zdroje potravy. Následně proběhne experiment zaměřený na:

- Chování kolonií v scénářích s přebytkem jídla vs chování kolonií ve scénářích s jeho nedostatkem.
- Vliv vzájemné blízkosti kolonií na jejich chování.

3.5.1 Ověření stability

Nejprve bude vyzkoušeno, zdali model dosahuje stabilních výsledků se získanými hodnotami i po rozšíření na tři kolonie, nebo by bylo vhodnější mírně navýšit dostupnost potravy.

Beze změny jsou následující parametry: *initFood*, *startingCount*. *nPrey* a *nFlowers* byly navýšeny na dvacet pět, *witherRate* je osm, *week* třicet a *spiderStability* je 100. Testované proměnné a jejich zkoušené hodnoty jsou:

- *spawnChance*: 15, 20
- *spawnRate*: 2, 4
- *nutrition*: 150, 200, 250
- *initEnergy*: 120, 240
- *antWars*: 20, 35
- *nAntlions*: 8, 12
- *nSpiders*: 6, 9

S těmito parametry model běžel po dobu tři tisíce *ticků*. Stabilních stavů vzniklo 111 z celkových 384 běhů, z čehož 192 běhů bylo dáno jedinečnou kombinací výše uvedených proměnných, která se následně ještě jednou opakovala. Podmínkou stability zde bylo přežití všech tří rojů do konce simulace, velikosti rojů nad sto padesát dělnic a zásoby potravy v rozsahu sto až dva tisíce.

Ve dvou případech došlo k vymření nějakého z rojů. V jednom případě došlo k vymření roje z počátku simulace, s největší pravděpodobností byla v blízkosti mraveniště zvýšená koncentrace mravkolvů a později pavouk. V druhém případě roj vydržel přibližně do třetiny běhu a pak vymřel. Úmrtí na nedostatek energie i na chorobotvorné zárodky bylo jen málo a roji se podařilo nasbírat bezmála osmnáct set jednotek jídla, je tedy nepravděpodobné, že jeho zánik způsobili pavouci nebo mravkolvové. Roj se s největší pravděpodobností dostal do konfliktu se soupeřícími

roji a většina jich zahynula. Co je neobvyklé je, že roj se z toho nevzpamatoval, přestože v mraveništi měl uskladněno dostatek potravy. Zdá se tedy, že bylo napadeno i samotné mraveniště. V třiceti sedmi případech alespoň jeden z rojů měl uskladněno pod sto potravy a v naprosté většině případů naopak nad dva tisíce.

Tab. 10: Stabilní hodnoty, test tři roje. Zdroj: Autor

	Hodnota	Četnost	Hodnota	Četnost	Hodnota	Četnost
spawnRate	2	87	4	24	-	-
spawnChance	15	43	20	68	-	-
Nutrition	150	45	200	39	250	27
initEnergy	120	56	240	55	-	-
antWars	20	67	35	44	-	-
nAntlions	8	60	12	51	-	-
nSpiders	6	53	9	58	-	-

Dále vyzkoušíme, zdali roje budou stabilní i při náhodné generaci. Na základě předchozího testu jsou hodnoty vymezeny na: spawnRate dvě, spawnChance dvacet, witherRate pět, nutrition dvě sta, initEnergy sto padesát, antWars třicet, nAntlions dvanáct a nSpiders devět. Za těchto podmínek model běží po dobu tři tisíce *ticků*. Dojde k testu při dvaceti čtyř náhodně generovaných map.

Podmínka stability zůstala beze změny, tedy: přežití všech tří rojů do konce simulace, velikosti rojů nad sto padesát dělnic a zásoby potravy v rozsahu sto až dva tisíce.

Tato podmínka nebyla splněna v polovině případů. Ve všech dvanácti bylo selhání způsobeno v současnosti uskladněných zásobách, které byly pod úrovní jednoho sta. Ve dvou případech došlo téměř k vymření roje, v dalších dvou by se tak brzy stalo. Obecně došlo ke zvýšení počtu úmrtí způsobených hladou a poklesu počtu dělnic.

Model přesto, ale vykazoval konzistentní výsledky, kdy ve většině případů přežily všechny roje. Lze tedy tvrdit, že model, lze aplikovat i při náhodném rozmístění stromů, keřů a kolonie mšic i při konfiguraci pro tři roje.

3.5.2 Experiment

Provedeme několik běhů, kde se bude lišit dostupnost jídla a vzájemná vzdálenost mravenišť. Předpoklad je, že při sníženém výskytu potravy se mravenci budou stávat agresivnější, stejně tak při snížené vzdálenosti.

Měněna je hodnota *spawnRate* a *spawnChance* a počáteční hodnoty *nPrey* a *nFlowers*. Zbytek hodnot mezi jednotlivými běhy zůstává stejný:

Tab. 11: Vstupní hodnoty pro experiment. Zdroj: Autor

Proměnná	Hodnota	Proměnná	Hodnota	Proměnná	Hodnota
nSpiders	9	initFood	500	witherRate	5
nAntlions	12	startingCount	50	nutrition	200
spiderStability	150	antWars	30	week	45
		initEnergy	150		

S těmito hodnotami proběhne šestnáct jednotlivých běhů, jejichž výsledky následně jsou zprůměrovány. Na základě těchto průměrných hodnot jsou prezentovány grafy. Proběhnou tři série, testů každá se třemi nastaveními. Mění se vzájemná vzdálenost mravenišť a dojde ke snížení počtu kolonií mšic. A mění se hodnoty *nPrey*, *nFlowers*, *spawnRate* a *spawnChance*. V rámci těchto nastavení, dojde k devíti rozdílným běhům.

První série

Základní nastavení. Na mapě jsou k dispozici tři kolonie mšic, mraveniště jsou relativně daleko od sebe.

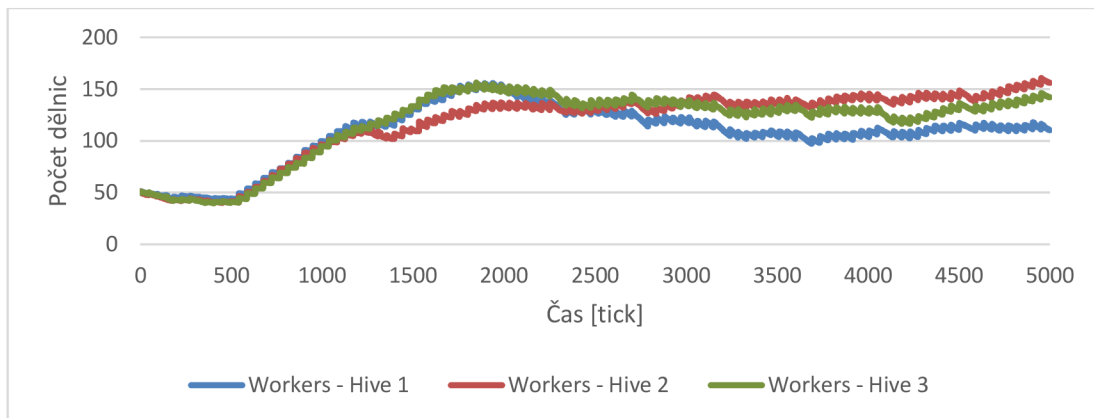
Běh první – Low Food

V prvním běhu, dochází k omezení výskytu nových zdrojů potravy. Hodnoty měněných proměnných jsou:

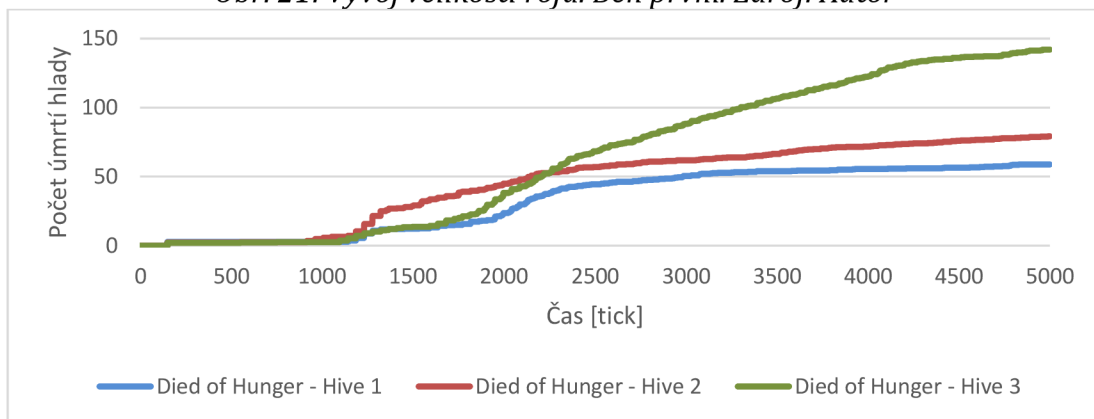
- *nPrey*: 20
- *nFlowers*: 15
- *spawnRate*: 1

- spawnChance: 50

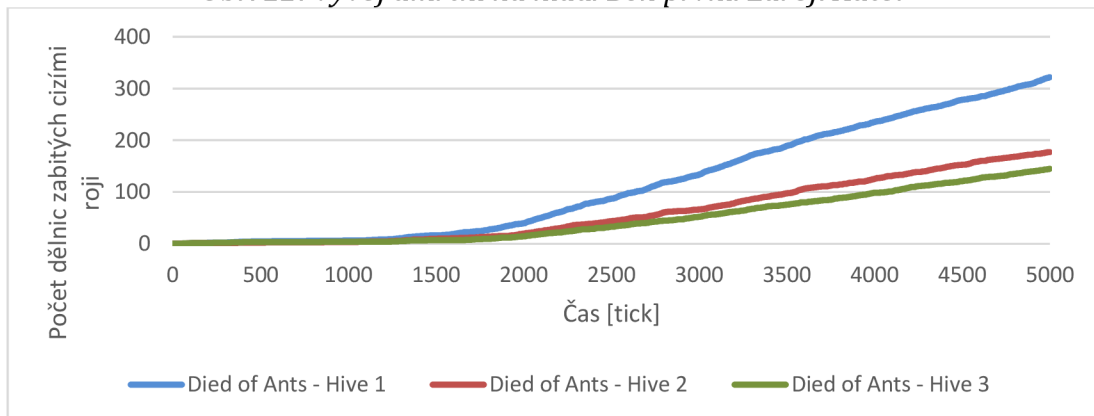
Za těchto podmínek se kolonie drží na stabilní velikosti kolem sto padesáti dělnic, hlavní příčinou úmrtí je konflikt s cizími koloniemi, nebo predátory a na třetím místě je úmrtí z nedostatku energie.



Obr. 21: Vývoj velikosti rojů. Běh první. Zdroj: Autor



Obr. 22: Vývoj úmrtí na hlad. Běh první. Zdroj: Autor



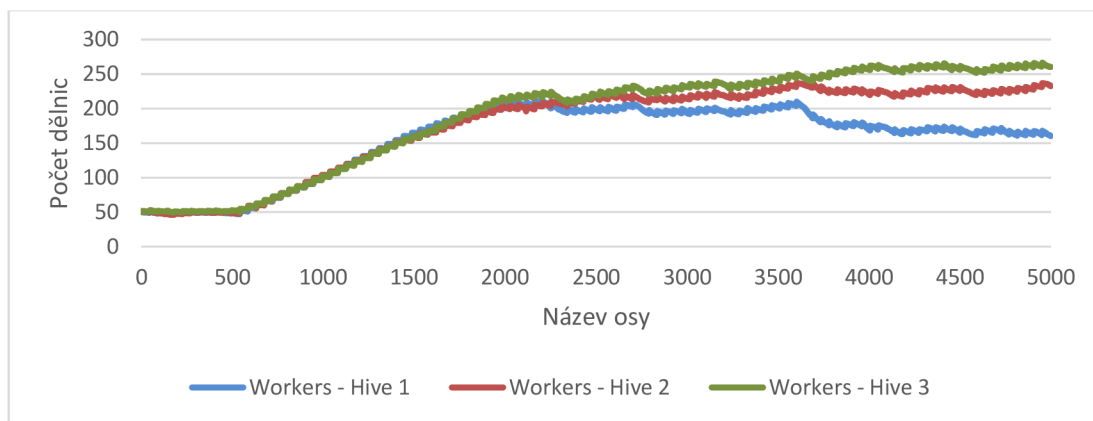
Obr. 23: Vývoj zabítí cizími roji. Běh první. Zdroj: Autor

Běh druhý – Normal Food

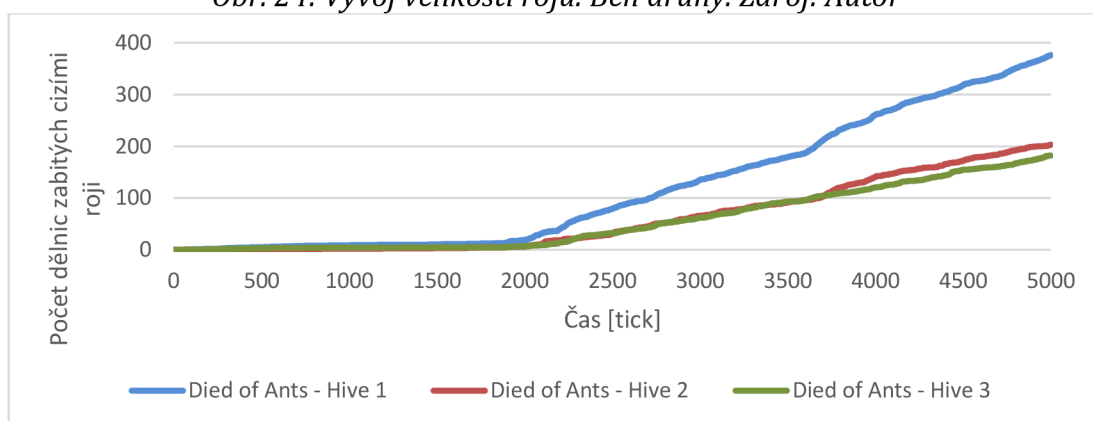
Výskyt nových zdrojů potravy je na předpokládané optimální úrovni získaných z předchozí podkapitoly. Hodnoty měněných proměnných jsou:

- nPrey: 30
- nFlowers: 25
- spawnRate: 2
- spawnChance: 20

V tomto případě, roje dosáhly stabilní velikosti kolem dvou set padesáti jedinců. Nedostatek jídla přestal být problém, a tak úmrtí na nedostatek energie klesla pod dvacet u všech rojů. Hlavní příčinou úmrtí zůstává konflikt se sousedními koloniemi následovaný predátory.



Obr. 24: Vývoj velikosti rojů. Běh druhý. Zdroj: Autor



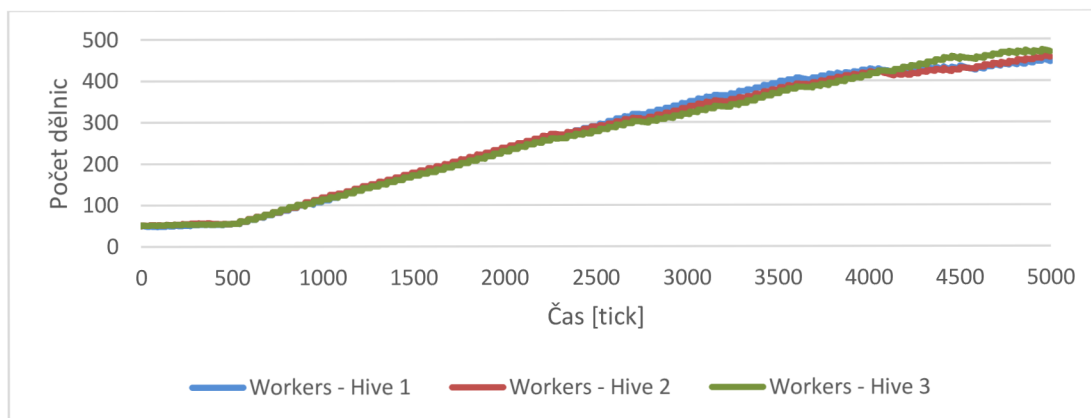
Obr. 25: Vývoj zabití cizími roji. Běh druhý. Zdroj: Autor

Běh třetí – High Food

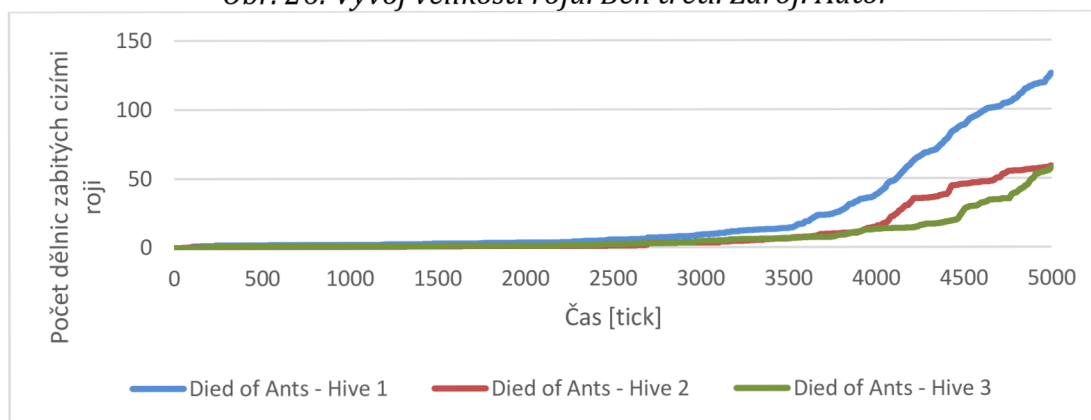
Výskyt nových zdrojů potravy je značně navýšen. Hodnoty měněných proměnných jsou:

- nPrey: 50
- nFlowers: 40
- spawnRate: 4
- spawnChance: 10

Za těchto podmínek se mraveniště rozrůstala do čtyř set dělnic, v několika případech nad pět set. Počty dělnic, které byly uloveny predátory, nebo mravenci z cizího roje, jsou na stejné úrovni. V obou případech došlo k poklesu.



Obr. 26: Vývoj velikosti rojů. Běh třetí. Zdroj: Autor



Obr. 27: Vývoj zabití cizími roji. Běh třetí. Zdroj: Autor

Z výsledků tohoto setu lze vypožorovat, že:

- čím více je dostupné potravy, tím větší populace je stabilní

- čím méně je potravy, tím dále od mraveniště musí dělnice chodit, jsou tak vystaveny většímu riziku od predátorů, nebo cizího roje.

Druhá série

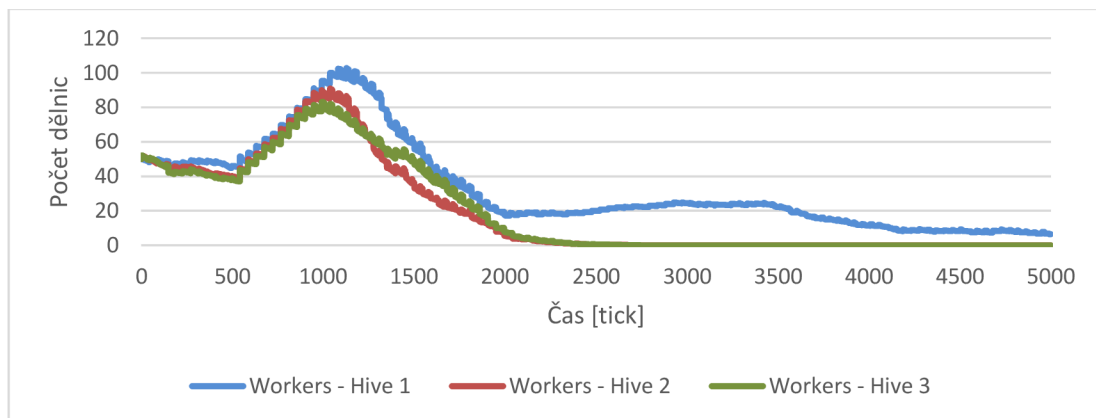
Na mapě je k dispozici pouze jedna kolonie mšic, umístěná přibližně veprostřed mezi koloniemi, dochází tak ke snížení dostupné potravy. Vzdálenost mezi mraveništi se nemění.

Běh čtvrtý – Low Food

Je omezen výskyt nových zdrojů potravy. Hodnoty proměnlivých proměnných jsou:

- nPrey: 20
- nFlowers: 15
- spawnRate: 1
- spawnChance: 50

S tímto nastavením roje vymřely mezi dvěma až třemi tisíci *ticky*, v jednom případě se konce simulace dožil jeden roj. Největší úmrtnost byla na nedostatek energie, nebo predátory. Po zemření značné části roje a poté co se i mladé dělnice vydaly hledat potravu, začíná vymírat potomstvo a roje tak vymírají. Vliv konfliktu mezi mraveništi je zanedbatelný.



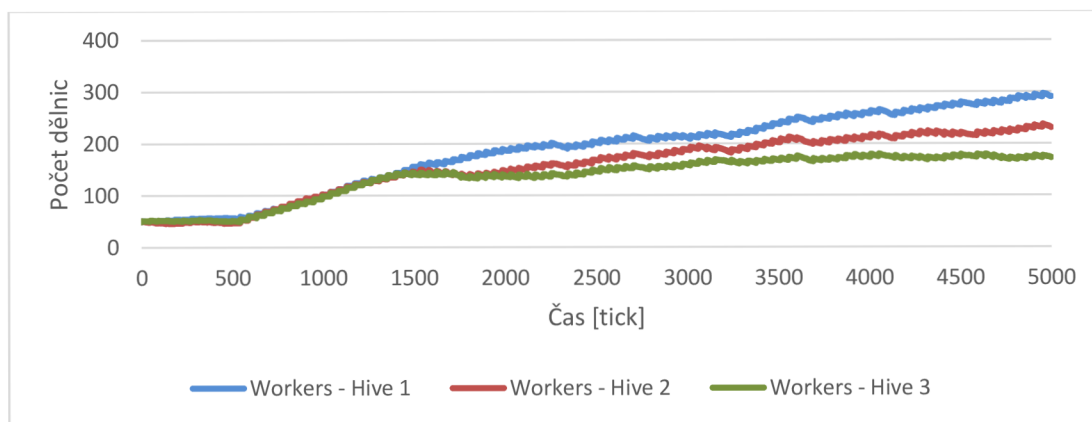
Obr. 28: Vývoj velikosti rojů. Běh čtvrtý. Zdroj: Autor

Běh pátý – Normal Food

Výskyt nových zdrojů potravy je na předpokládané optimální úrovni získané z předchozích testů. Hodnoty proměnlivých proměnných jsou:

- nPrey: 30
- nFlowers: 25
- spawnRate: 2
- spawnChance: 20

V tomto případě se velikosti roje drží vcelku stabilně kolem dvou set padesáti dělnic. Ve dvou případech zelený roj vymírá. Úmrtnost na hlad klesá, jedná se o třetí nejčastější způsob úhynu. Nejvyšší úmrtnosti dosahují predátoři, následování mravenci.



Obr. 29: Vývoj velikosti rojů. Běh pátý. Zdroj: Autor

Běh šestý – High Food

Výskyt nových zdrojů potravy je značně navýšen. Hodnoty proměnlivých proměnných jsou:

- nPrey: 50
- nFlowers: 40
- spawnRate: 4
- spawnChance: 10

Za těchto podmínek opět můžeme pozorovat nekontrolovaný růst populace, končící na úrovni kolem pěti set. Kdyby model měl více času, tento růst by pokračoval. Za naprostou většinu úmrtí jsou zodpovědní predátoři.

Z těchto výsledků lze vyzpozorovat, že k očekávanému konfliktu o kolonii mšic došlo jen v pátém případě. Během čtvrtého běhu mraveniště byla ochromena predátory, než nabraly dostatek sil potřebných na obsazení kolonie. A v šestém běhu pro přebytek jídla nebyla potřeba spásat mšice.

Třetí série

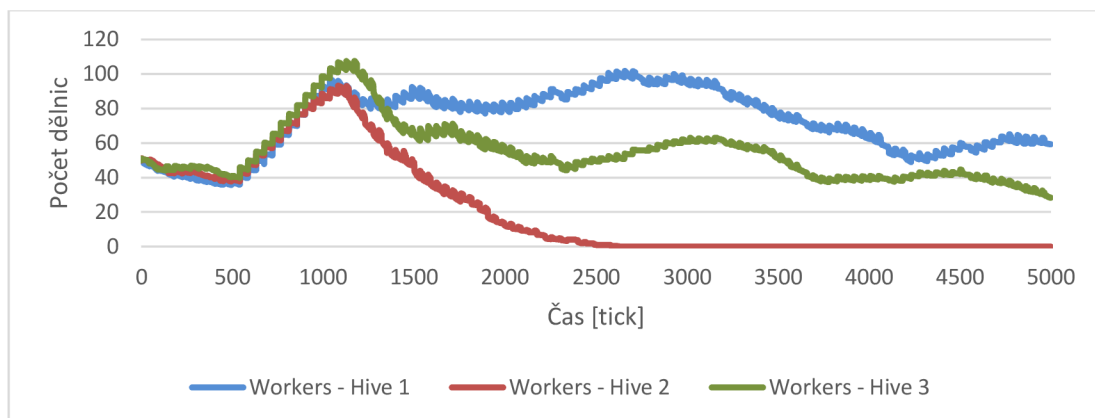
Na mapě je k dispozici pouze jedna kolonie mšic, umístěná přibližně ve prostřed mezi koloniemi, dochází tak ke snížení dostupné potravy. Vzdálenost mezi mraveništi je snížena na polovinu.

Běh sedmý – Low Food

Je omezen výskyt nových zdrojů potravy. Hodnoty proměnlivých proměnných jsou:

- nPrey: 20
- nFlowers: 15
- spawnRate: 1
- spawnChance: 50

I s tímto nastavením roje brzy začínají vymírat. Nicméně vždy jeden roj přežije. Pětkrát se tak stalo s modrým a třikrát se zeleným rojem. Největší úmrtnost byla na nedostatek energie a predátory. Dělnice také umíraly v konfliktu s cizími roji. Po vymření a vyhladování mraveniště se začínají šířit chorobotvorné zárodky a mraveniště definitivně vymírají.



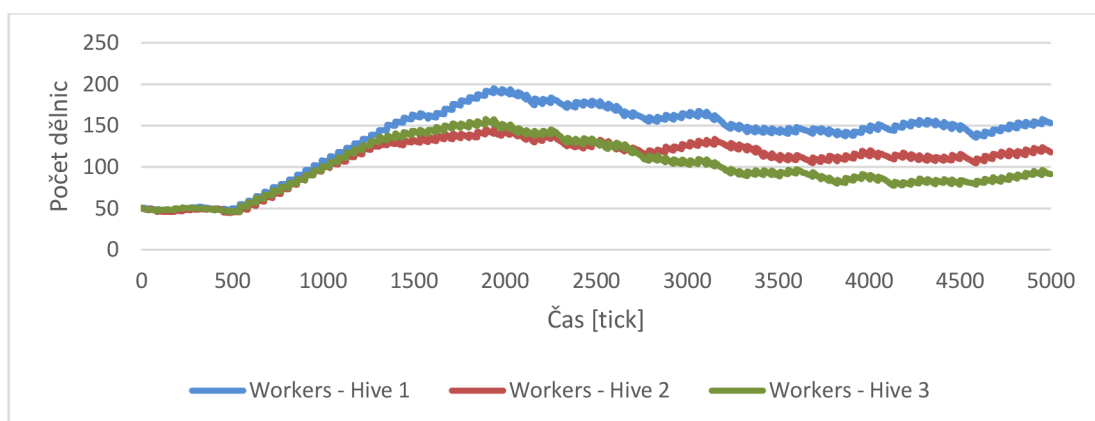
Obr. 30: Vývoj velikosti rojů. Běh sedmý. Zdroj: Autor

Běh osmý – Normal Food

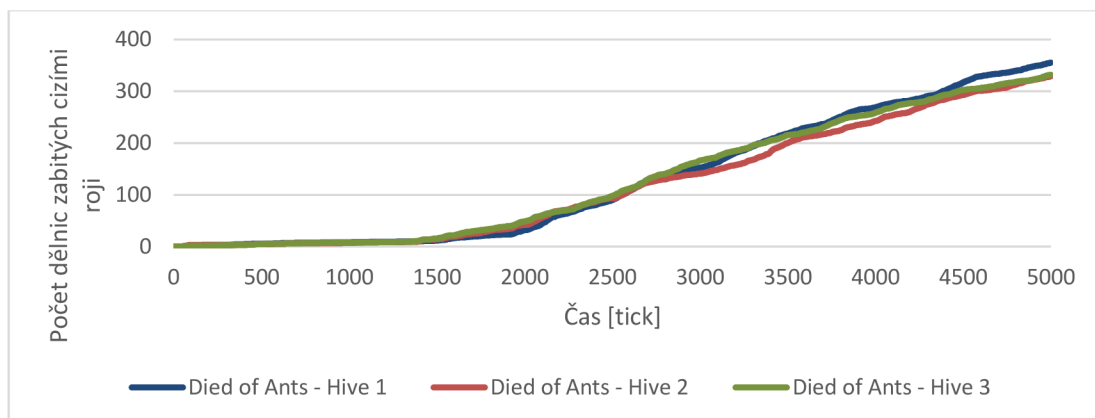
Výskyt nových zdrojů potravy je na předpokládané optimální úrovni získané z předchozích testů. Hodnoty proměnlivých proměnných jsou:

- nPrey: 30
- nFlowers: 25
- spawnRate: 2
- spawnChance: 20

V tomto případě se velikosti rojů drží mezi jedním stem až sto padesáti. Probíhá válka o kolonii mšic, ve které v průměru umírá bezmála tisíc dělnic. Jednotlivé roje se v dominanci a zužitkování mšic střídají.



Obr. 31: Vývoj velikosti rojů. Běh osmý. Zdroj: Autor



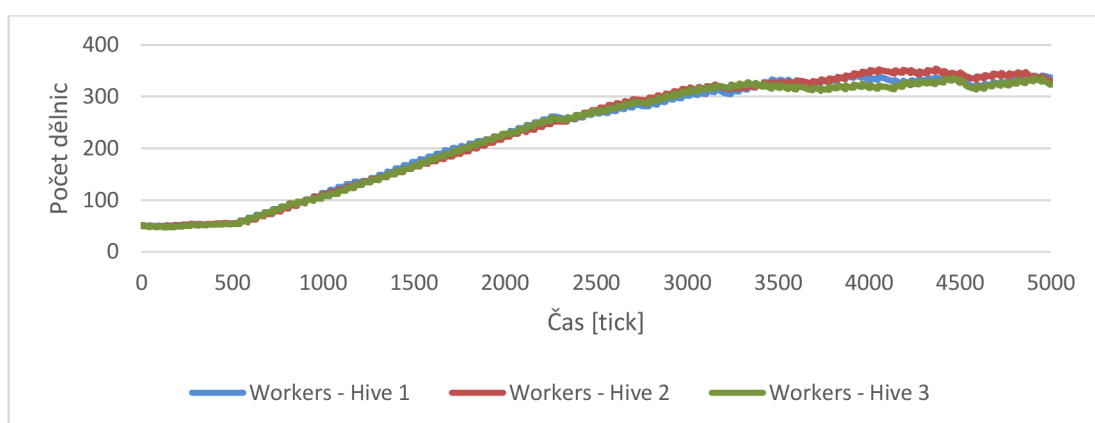
Obr. 32: Vývoj zabítí cizími roji. Běh osmý. Zdroj: Autor

Běh devátý – High Food

Výskyt nových zdrojů potravy je značně navýšen. Hodnoty proměnlivých proměnných jsou:

- nPrey: 50
- nFlowers: 40
- spawnRate: 4
- spawnChance: 10

I zde můžeme pozorovat silný nárůst populace končící na úrovni kolem tři sta padesáti. Další nárůst je pozastaven konfliktem s dalšími koloniemi.



Obr. 33: Vývoj velikosti rojů. Běh devátý. Zdroj: Autor

Z této série je zřejmé, že při snížení vzájemné vzdálenosti a snížení vzdálenosti ke kolonii mšic, dochází k častým a velkým střetům.

4 Shrnutí výsledků

V rámci praktické části byl vytvořen jednoduchý model chování mravenčí kolonie, zaměřující se na obstarání potravy a péči o potomstvo. Model má několik vstupních proměnných, ovlivňujících výslednou stabilitu modelu. Je implementováno získávání rostlinné potravy, lov kořisti a péče o potomstvo. Mravenci jsou ohrožováni larvami mravkolvů a pavouky.

Průběh modelu je podmíněn náhodě, zejména díky náhodnému natočení agentů při jejich bloužení a umístění nově vytvořených zdrojů potravy a larev mravkolva. Při náhodné generaci stromů a keřů ještě více stoupá nestabilita prostředí, neboť může dojít ke generaci mála keřů, které konzistentně produkují potravu a spolu s kolonií mšic, která se objeví na nějakém ze stromů se mohou objevit daleko od mravenišť.

Přesto se skrze analýzu několika set běhů s různými kombinacemi vstupních parametrů podařilo dosáhnout kombinací, které vraceli relativně konzistentní výsledky i při náhodné generaci prostředí, načež byl model rozšířen o další dvě kolonie a bylo potvrzeno, že roje jsou schopny prosperovat, s předem odzkoušenou soustavou proměnných a že v případě náhodné generace lesa se zvyšuje riziko na vymření kolonie.

Následně byl proveden experiment, jehož hlavním cílem bylo zjistit vliv vzdálenosti a dostupnosti potravy na agresivitu dělnic, vůči soupeřícím koloniím. Výsledky potvrdily očekávání.

- S rostoucí dostupností potravy, klesá potřeba vzdalovat se od mraveniště a zápasit o zdroje.
- Se snižující se vzdáleností rojů, se zvyšuje šance na konflikt.

Vylepšení

Vytvořený model vykazuje několik nedostatků. Jedním z hlavních jsou orientační, experimentálně odvozené hodnoty, vedoucí k fungování modelu, místo dat podepřených skutečností, například při volbě výživnosti potravy. Nejhorším příkladem je statická reprezentace času, která byla zvolena jako jakýsi kompromis

mezi modelováním okamžitého chování mraveniště a jeho chování v rámci týdnů, které jsou potřeba pro dospění potomstva. Nebo plně virtuální prostředí.

Model by se dal rozšířit o implementaci mraveniště a dalších živočichů, například divočáků a ptactva. Na základě toho by se dalo rozšířit chování mravenců, stavba a údržba mraveniště, jeho oprava, nebo přesun. Při značném rozšíření plochy a reprezentaci celoročních cyklů, by se dalo implementovat rojení, se šancí na založení nového mraveniště. Při reprezentaci počasí, jmenovitě tepla a vlhka, by bylo možno rozšířit péči o potomstvo o přenášení. Nicméně vše by vedlo k značnému nárůstu výpočetní náročnosti už u tak náročného modelu. Dalším zlepšením by mohlo být využití dat geografického informačního systému – GIS, které by mohlo umožnit nahrání reálného prostředí.

5 Závěr

V reálném světě se vyskytuje mnoho komplexních systémů, a jedním z nejlepších nástrojů pro jejich popsání a pochopení jsou právě multi-agentní modely. Cílem této práce bylo seznámit čtenáře s touto problematikou a na příkladu modelu chování mravenčí kolonie, ukázat a demonstrovat sílu ABM přístupu, pro účely popsání těchto systémů.

V teoretické části práce byly shrnuty základní poznatky o multiagentních systémech, agentově-orientovaném modelování, inteligenci rojů a bylo ukázáno několik příkladů použití SI MAS v praxi. Na konci byl zhotoven podrobný přehled chování kolonií mravence lesního v jejich přirozeném prostředí.

Na základě těchto informací v rámci praktické části, došlo k analýze, kde byly zvoleny konkrétní agenty a činnosti, které byly v modelu realizovány. Byl vytvořen model, který zachycuje klíčové činnosti mravenčí kolonie, jmenovitě získávání potravy a péči o potomstvo. Výsledný model může být použit jako základ pro zkoumání činností mravenčího roje a sloužit jako podklad pro rozvoj sofistikovanějších simulací, a tedy k dalšímu výzkumu v oblasti myrmekologie.

6 Seznam použité literatury

- [1] WOOLDRIDGE, Michael. *An Introduction to Multiagent Systems*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2009. ISBN 978-04-7051-946-2.
- [2] SIEGENFELD, Alexander a Yaneer BAR-YAM. An Introduction to Complex Systems Science and Its Applications. *Complexity*. 2020, **2020**, 1-16. Dostupné z doi: [10.1155/2020/6105872](https://doi.org/10.1155/2020/6105872)
- [3] LUNA-RAMIREZ, Wulfrano A. a Maria FASLI. Bridging the Gap between ABM and MAS: A Disaster-Rescue Simulation Using Jason and NetLogo. *Computers*. 2018, 7(24). Dostupné z doi: [10.3390/computers7020024](https://doi.org/10.3390/computers7020024)
- [4] RUSSEL, Stuart a Peter NORWIG. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3rd ed. New Jersey: Pearson, 2010. ISBN 978013604294.
- [5] BONABEAU, Eric, Marco DORIGO a Guy THERAULAZ. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York: Oxford University Press, 1999. ISBN 0-19-513159-2.
- [6] OBAGBUWA, Ibidun Christiana. Swarm Intelligence Algorithms and Applications to Real-world Optimization Problems: A Survey. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. 2018. Dostupné z doi: [10.5013/IJSSST.a.19.02.05](https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.19.02.05)
- [7] CALABRÒ, Giovanni, Giuseppe INTURRI a Michela Le PIRA, et al. Bridging the gap between weak-demand areas and public transport using an ant-colony simulation-based optimization. *Transportation Research Procedia*. 2020, **45**, 234-241. ISSN 2352-1465. Dostupné z doi: [10.1016/j.trpro.2020.03.012](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.012)
- [8] TANG, Diwei, Heng LIU a Eping SONG, et al. Urban expansion simulation from the perspective of land acquisition-based on bargaining model and ant colony optimization. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2020, **82**. ISSN 0198-9715. Dostupné z doi: [10.1016/j.compenvurbsys.2020.101504](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2020.101504)

- [9] WANG, Xiaoyu a Kan YANG. Economic load dispatch of renewable energy-based power systems with high penetration of large-scale hydropower station based on multi-agent glowworm swarm optimization. *Energy Strategy Reviews* [online]. 2019, **26** [cit. 2022-08-26]. ISSN 2211-467X. Dostupné z doi: [10.1016/j.esr.2019.100425](https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100425)
- [10] JUN, Ma. Research on the Fish Behavior Simulation based on Swarm Intelligence. *Procedia Engineering* [online]. 2012, **43**, 547-551 [cit. 2022-08-27]. ISSN 1877-7058. Dostupné z doi: [10.1016/j.proeng.2012.08.095](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.095)
- [11] PLOWES, N. An Introduction to Eusociality. *Nature Education Knowledge*, 2010, 3(10). Dostupné z url: <https://www.nature.com/>
- [12] SCHULTZ, Ted R. In search of ant ancestors. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2000, 97(26), 14028-14029. Dostupné z doi: [10.1073/pnas.011513798](https://doi.org/10.1073/pnas.011513798)
- [13] ARMIN, Schieb. *Mravenci: Život lesního společenství*. Brno: Kazda, 2021. ISBN 978-80-7670-036-9.
- [14] SADIL, Josef. *Naši mravenci*. 1. vydání. Praha: Orbis, 1955.
- [15] DAŇO, Jan, Pavla KŮSOVÁ a Petr MILES. *Lesní mravenci*. Liberec: ZO ČSOP Formica, 2003. ISBN 80-903214-0-2.
- [16] RIVEROS, A.J. a R.B. SRYGLEY. Do leafcutter ants, *Atta colombica*, orient their path-integrated home vector with a magnetic compass?. *Animal Behaviour*. 2008, 75(4), 1273-1281. ISSN 0003-3472. Dostupné z doi: [10.1016/j.anbehav.2007.09.030](https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2007.09.030)
- [17] SRYGLEY, Luis Carlos Forti, Nilhian GONÇALVES De Almeida, Roberto Da Silva CAMARGO, et al. Hierarchical establishment of information sources during foraging decision-making process involving *Acromyrmex subterraneus* (Forel, 1893) (Hymenoptera, Formicidae). *Revista Brasileira de Entomologia*. 2018, 62(1), 36-39. ISSN 0085-5626. Dostupné z doi: [10.1016/j.rbe.2017.11.006](https://doi.org/10.1016/j.rbe.2017.11.006)

- [18] JACKSON, Duncan E. a Francis L.W. RATNIEKS. Communication in ants. *Current Biology*. 2006, 16(15), 570-574. ISSN 0960-9822. Dostupné z doi: [10.1016/j.cub.2006.07.015](https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.07.015)
- [19] Repast Suite Documentation. Repast Suite Documentation [online]. Dostupné z url: repast.github.io/
- [20] Downloads – AnyLogic Simulation Software. AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions for Business [online]. Copyright. Dostupné z url: anylogic.com/downloads/
- [21] WILENSKY, U. (1999). NetLogo. ccl.northwestern.edu/netlogo/ . Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [22] WILENSKY, U. (1997). NetLogo Ants model. ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Ants. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [23] WILENSKY, U. (1997). NetLogo Ant Lines model. ccl.northwestern.edu/netlogo/models/AntLines. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [24] MARTIN, K. a Wilensky, U. (2019). NetLogo Ant Adaptation model. ccl.northwestern.edu/netlogo/models/AntAdaptation. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.

7 Přílohy

K bakalářské práci je přiložen soubor BP_Ants.zip, který obsahuje zdrojový kód modelu a výstupy získané z experimentů.

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ
Fakulta informatiky a managementu
Akademický rok: 2021/2022

Studijní program: Aplikovaná informatika
Forma studia: Prezenční
Obor/kombinace: Aplikovaná informatika (ai3-p)

Podklad pro zadání BAKALÁŘSKÉ práce studenta

Jméno a příjmení: Jan Krása
Osobní číslo: I1900211
Adresa: Pomněnková 434, Trutnov – Dolní Staré Město, 54102 Trutnov 4, Česká republika
Téma práce: Simulace chování mravenčích kolonií
Téma práce anglicky: Simulation of ant hives behaviour
Vedoucí práce: doc. RNDr. Petr Tučník, Ph.D.
Katedra informačních technologií

Zásady pro vypracování:

Práce bude zaměřena na simulaci mravenčích kolonií formou jednoduchých (reaktivních) agentů. Součástí řešení budou dynamické změny populace, interakce s prostředím, možné existující hrozby a reakce na ně; zachycení celkového chodu kolonie. Po dokončení a verifikaci fungování jedné kolonie bude model rozšířen o dvě další konkurenční kolonie a budou porovnány vybrané výkonnostní kritéria jejich fungování na scénářích s náhodnými inicializačními parametry a také s uživatelem zadanými scénáři.

Osnova: 1) Úvod 2) Teoretická část a základní pojmy 3) Model mravenčí kolonie 4) Konkurenceschopnost kolonií 5) Závěr 6) Literatura

Seznam doporučené literatury:

Russel S., Norvig, P., 2010: Artificial Intelligence: A Modern Approach (Third Ed.). Pearson Edu. ISBN 978013604294.
Wooldridge M., 2009: An Introduction to Multiagent Systems (Second Ed.). John Wiley & Sons, ISBN 9780470519462.

Podpis studenta:

Datum:

Podpis vedoucího práce:

Datum: