

**Univerzita Hradec Králové**  
**Fakulta informatiky a managementu**  
**Katedra informačních technologií**

**Teorie her v epidemiologii**  
Diplomová práce

Autor: Bc. Jiří Černožský  
Studijní obor: Informační management

Vedoucí práce: doc. RNDr. Kamila Štekerová, Ph.D., MSc.

Prohlášení:

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

V Hradci Králové dne 11.8.2023

Jiří Černožský

Poděkování:

Děkuji vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Kamile Štekerové, Ph.D., MSc. za metodické vedení práce, rady a trpělivost. Dále děkuji své rodině, které mě byla oporou po celou dobu studia.





## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá aplikací teorie her v epidemiologii. Jedním z možných nástrojů, který dokáže pomoci epidemiologům v jejich práci je modelování a simulace průběhu nemocí v lidské populaci. Díky stále se zvyšujícímu výpočetnímu výkonu je možné provádět rozsáhlé simulace. V modelování epidemií hraje důležitou roli rozhodování jedince. K modelování lidského chování se využívá matematická disciplína nazvaná teorie her. V první teoretické části je popsán úvod do epidemiologie a epidemiologického modelování. Druhá teoretická část se věnuje základům teorie her a popisu článků využívajících teorii her v epidemiologii. Třetí část se skládá z popisu epidemiologických a herně teoretických modelů v programu NetLogo. V praktické části je popsán vývoj modelu v programu NetLogo a jsou provedeny experimenty, které ověřují, zda výsledky modelování odpovídají zjištěním ve vědeckých člancích popsaných v teoretické části.

**Klíčová slova:** teorie her, výpočetní epidemiologie, modelování, NetLogo

# **Annotation**

## **Title: Game Theory in Modelling Epidemics**

The diploma thesis deals with the application of game theory in epidemiology. One of the possible tools that can help epidemiologists in their work is modeling and simulation of the course of diseases in human population. Thanks to ever-increasing computing power, large-scale simulations are possible. Individual decision making plays an important role in epidemic modelling. A mathematical discipline called game theory is used to model human behavior. In the first theoretical section, an introduction to epidemiology and epidemiological modeling is described. The second theoretical section is devoted to the basics of game theory and a description of articles using game theory in epidemiology. The third part consists of a description of epidemiological and game theoretic models in NetLogo. The practical part describes the development of the model in NetLogo and experiments are conducted to verify that the modeling results are consistent with the findings in the scientific articles described in the theoretical part.

Keywords: game theory, computational epidemiology, modelling, NetLogo

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Výpočetní epidemiologie</b> .....	<b>2</b>
2.1	Epidemiologie.....	2
2.1.1	Pojmy v epidemiologii .....	2
2.1.2	Typy epidemií .....	4
2.1.3	Protiepidemiologická opatření.....	5
2.2	Modely epidemií .....	7
2.2.1	Deterministické modely.....	10
2.2.2	Síťové modely epidemií .....	12
2.2.3	Stochastické modely.....	12
2.3	Software pro modelování v epidemii .....	14
<b>3</b>	<b>Teorie her</b> .....	<b>16</b>
3.1	Pojmy a principy .....	16
3.1.1	Hra .....	16
3.1.2	Hráč.....	17
3.1.3	Racionalita.....	18
3.1.4	Výhra .....	18
3.1.5	Strategie .....	19
3.1.6	Informace.....	20
3.1.7	Normální zápis hry.....	20
3.1.8	Extenzivní zápis her.....	21
3.2	Využití teorie her v epidemiologii .....	21
3.2.1	Vakcinace a vakcinační hry .....	22
3.2.2	Společenský odstup .....	27
3.2.3	Využití osobních ochranných pomůcek.....	32

3.2.4	Evoluční hry v epidemiologii .....	34
<b>4</b>	<b>Přehled epidemiologických modelů v Netlogu .....</b>	<b>36</b>
4.1	epiDEM Basic .....	36
4.2	epiDEM Travel and Control .....	37
4.3	Spread of Diseases .....	39
4.4	Virus .....	40
4.5	Virus on Network .....	41
4.6	Přehled herně teoretických modelů zmíněných v textu .....	43
4.6.1	Věžňovo dilema .....	43
4.6.2	Braessův paradox .....	45
<b>5</b>	<b>Praktická část.....</b>	<b>47</b>
5.1	Návrh modelu a implementace .....	47
5.1.1	Účel a vzory .....	47
5.1.2	Entity, stavové proměnné a měřítko .....	48
5.1.3	Přehled procesů a plánování.....	49
5.1.4	Koncepce návrhu .....	49
5.1.5	Inicializace.....	51
5.1.6	Vstupní data.....	51
5.1.7	Submodely.....	52
5.2	Experimenty .....	55
5.2.1	Experiment 1 .....	55
5.2.2	Experiment 2 .....	56
5.2.3	Experiment 3 .....	57
<b>6</b>	<b>Výsledky a diskuze .....</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>Přílohy .....</b>	<b>67</b>

8.1	Příloha 1 - Literatura.....	67
8.2	Příloha 2 - Kopie zadání práce .....	73
8.3	Příloha 3 - zdrojový kód.....	74

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Model SIS [vlastní] .....	7
Obrázek 2 Model SIR [vlastní] .....	8
Obrázek 3 Model SIRS [vlastní] .....	8
Obrázek 4 Model SEIR [vlastní].....	9
Obrázek 5 Model SIERS [vlastní] .....	9
Obrázek 6 Extenzivní zápis [10] .....	21
Obrázek 7 Dosažení absorpčního stavu [3].....	28
Obrázek 8 Model SIRD [20].....	28
Obrázek 9 Výplatní matice pro oba vnímavé [30] .....	33
Obrázek 10 Výplatní matice pro vnímavý, nakažený [30].....	33
Obrázek 11 Netlogo - epiDEM basic [vlastní] .....	37
Obrázek 12 NetLogo - epiDEM travel and Control [vlastní] .....	39
Obrázek 13 NetLogo – Spread of Diseases [vlastní].....	40
Obrázek 14 NetLogo – Virus [vlastní].....	41
Obrázek 15 NetLogo - Virus on a Network [vlastní] .....	42
Obrázek 16 NetLogo - Prisoners Dilemma [vlastní].....	44
Obrázek 17 NetLogo - Braess paradox [vlastní] .....	46
Obrázek 18 Celkové grafické rozhraní modelu [vlastní] .....	47
Obrázek 19 Grafy v modelu [vlastní] .....	49
Obrázek 20 Vytvoření epidemiologický model SIV [vlastní] .....	50
Obrázek 21 Vstupní parametry [vlastní] .....	51
Obrázek 22 spread-virus [vlastní] .....	53
Obrázek 23 Become-recovered [vlastní] .....	53
Obrázek 24 Calculate-payoff [vlastní] .....	54
Obrázek 25 Max-payoff [vlastní] .....	54
Obrázek 26 Zobrazení počtů hráčů v kategoriích a jejich max výplaty [vlastní] .....	55
Obrázek 27 calculate-transmission-rate [vlastní] .....	55
Obrázek 28 Výsledky simulace v článku [22] .....	56
Obrázek 29 Experiment 1 [vlastní].....	59
Obrázek 30 Experiment 1 – průměrná délka hry [vlastní].....	60

Obrázek 31 Experiment 2 – neočkovaní hráči [vlastní].....	61
Obrázek 32 Experiment 3 - počet očkovaných hráčů [vlastní] .....	62
Obrázek 33 Experiment 3 - počet nakažených hráčů [vlastní] .....	63
Obrázek 34 Experiment 3 - maximální výplaty (stejné náklady) [vlastní] .....	63
Obrázek 35 Experiment 3 - maximální výplaty (rozdílné náklady) [vlastní].....	64

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Establish-color .....	52
Tabulka 2 Become-infected .....	52
Tabulka 3 Become-vaccinated .....	52
Tabulka 4 Become-susceptible .....	52
Tabulka 5 Experiment 1 - výsledky .....	59
Tabulka 6 Experiment 3 - Rozdíl maximálních výplat (stejná výše nákladů) .....	62
Tabulka 7 Experiment 3 - Rozdíl maximálních výplat (rozdílná výše nákladů) .....	62



# 1 Úvod

V posledních několika letech se lidská společnost ukázala jako zranitelná a velmi nepřípravená na náhlé epidemie/pandemie nemocí. Navzdory pokroku na poli technologií a medicíny naší civilizace, společnost nedokázala rychle reagovat a přizpůsobit se nastalé situaci. Epidemie viru COVID-19 způsobila zmatek a zanechala nezapomenutelnou stopu v moderní historii. Obyčejní lidé, zdravotnické instituce i vlády se ocitly v chaosu. V moderní historii jsme se nesetkali s epidemií/pandemií takových rozměrů. Přestože několik málo odborníků varovalo před možností takové situace, ukázalo se, že společnost nemá funkční plán a prostředky k zvládnutí epidemie.

Podporu pro plánování, vyvážení scénářů a účinných protopatření mohou poskytnout simulace. Ovšem nastává problém se složitostí různých situací, počty parametrů ovlivňující vývoj pandemie a rozhodování lidí. Dynamiku událostí můžeme popsat matematickými modely. Vznik matematických modelů šíření epidemií se datuje do dob průmyslové revoluce. Daniel Bernoulli vytvořil první modely šíření epidemií. Při modelování epidemií se často využívají diferenciální rovnice a teorie grafů. Herní modely poskytují decentralizovaný rozhodovací rámec, což umožňuje škálovatelnost výpočtů a návrhů modelů pro rozsáhlé populace a decentralizované systémy. Teorie her je pokročilý nástroj s širokým spektrem aplikací, který poskytuje soubor analytických technik a nástrojů vhodných pro popis lidského chování v průběhu epidemie.

V této práci se zaměřím na epidemiologii a konkrétně na využití teorie her v epidemiologii. Cílem této práce je zkoumat význam teorie her v epidemiologii, poskytnout přehled metod modelování a využít získané poznatky k vytvoření vlastního modelu, který by porovnal výsledky, některého již vytvořeného modelu.

## 2 Výpočetní epidemiologie

Výpočetní epidemiologie je disciplína, která kombinuje principy epidemiologie, statistiky a výpočetního modelování k analýze a předpovídání šíření infekčních chorob a jiných epidemiologických jevů. Využívá počítačové simulace, statistické metody a matematické modely k identifikaci vzorců a trendů ve výskytu nemocí, analýze rizikových faktorů a vyhodnocení efektivity opatření. Odvětví výpočetní epidemiologie se zaměřuje na vytváření matematických modelů, které popisují šíření nemocí v lidské populaci. Modely zahrnují proměnné jako počet jedinců, počet nakažených, rychlost šíření infekce, doba inkubace, úmrtnost atd. Pomocí těchto modelů lze zkoumat, jaké faktory ovlivňují rozšíření chorob a jaké intervence mohou být účinné při jejich omezení. K přesnější předpovědi se využívají počítačové simulace, které umožňují v krátké době vytvořit více scénářů průběhu nemoci. V následujících kapitolách bude popsána epidemiologie a její základní terminologie, modely využívané ve výpočetní epidemiologii a vybraný software pro provádění simulací.

### 2.1 Epidemiologie

#### 2.1.1 Pojmy v epidemiologii

Epidemiologie je vědní obor, který se zabývá rozložením zdraví a nemoci v lidské populaci sledováním výskytů nemocí a zkoumáním faktorů a podmínek, které tento výskyt podmiňují a ovlivňují. Epidemiologie se také zabývá studiem metod, kterými můžeme výskytu nemoci předcházet nebo výskyt nemocí výrazně potlačit [37]. Epidemiologie se dělí na dva základní obory. Obecná epidemiologie se zabývá teoretickými základy a společnými znaky všech nemocí. Speciální epidemiologie se zabývá studiem konkrétních nemocí a jejich parametry.

V epidemiologii se pracuje s pojmy neboli se základními ukazateli. Hlavní části jsou ukazatelé nemocnosti a ukazatelé úmrtnosti. Ukazatele jsou důležitými statistickými měřítky, která slouží k hodnocení rozsahu a závažnosti nemocí v populaci. **Ukazatele nemocnosti** se dělí na Nemocnost, Incidenci a Prevalenci. Nemocnost je poměr počtu nemocných obyvatel v určitém časovém období k celkovému počtu obyvatel v dané populaci. Vyjadřuje, jaký podíl populace je

postižen nemocí. Incidence je poměr počtu nově nemocných jedinců v daném časovém období k celkovému počtu obyvatel. Tento ukazatel slouží k určení rychlosti výskytu nových případů nemoci v populaci. Prevalence je poměr počtu všech existujících případů nemoci v určitém časovém období k celkovému počtu obyvatel. Vyjadřuje, jaký podíl populace má danou nemoc v určitém časovém okamžiku. Prevalence a morbidita se často vyjadřuje jako počet případů na 1 000 nebo 100 000 obyvatel. Incidence se obvykle vyjadřuje jako počet nových případů na 1 000 nebo 100 000 obyvatel za určité období. Ukazatelé úmrtnosti se dělí na úmrtnost (mortalita), specifická úmrtnost a smrtnost. Úmrtnost je poměr počtu úmrtí v daném časovém období k celkovému počtu obyvatel. Tento ukazatel vyjadřuje, jaký podíl populace zemřel v určitém období. Specifická úmrtnost je poměr počtu úmrtí ve specifické skupině obyvatel (například podle věku, pohlaví, regionu) k celkovému počtu obyvatel v této skupině. Tento ukazatel pomáhá porozumět riziku úmrtí v konkrétní skupině populace. Smrtnost je procentuální závažnost onemocnění a vyjadřuje poměr počtu zemřelých k počtu nakažených jedinců. Tento ukazatel je často používán při hodnocení závažnosti epidemie nebo pandemie, kde se sleduje, kolik lidí s danou nemocí zemře ve srovnání s celkovým počtem nakažených [38].

Epidemiologové využívají různé metody k pochopení, analýze a popisu šíření nemocí. Zde jsou popsány čtyři hlavní metody epidemiologie. **Deskriptivní epidemiologie** je metoda, která se zabývá tvorbou studií zaměřující se na pozorování a popis výskytu nemoci v populaci. Epidemiologové shromažďují údaje o počtu případů nemoci, charakteristikách postižených jedinců, distribuci nemoci v čase a prostoru a dalších faktorech. Deskriptivní epidemiologie pomáhá identifikovat trendy, vzorce a případné vazby mezi nemocí a různými faktory. **Analytická metoda** se zabývá prověřováním hypotéz získaných z deskriptivních studií. Epidemiologové používají analytické metody, jako je statistická analýza dat, aby zkoumali vztahy mezi různými faktory a výskytem nemoci. Cílem je identifikovat příčinné a rizikové faktory a poskytnout vědeckou podporu pro navrhování preventivních opatření. **Experimentální epidemiologie** se zaměřuje na ověřování platnosti studií a hypotéz získaných v analytické části. Epidemiologové

provádějí experimenty, kde zasahují do faktorů prostřednictvím intervencí (např. léčby, očkování) a sledují výsledky ve skupině pacientů.

**Matematické modelování** je další důležitou součástí epidemiologie. Pomocí matematických modelů, jako jsou diferenciální rovnice, statistika nebo simulace, se snažíme předpovědět šíření nemocí, vyhodnotit dopad různých zásahů a navrhnout strategie pro kontrolu nemoci. Matematické modelování je užitečné pro plánování a reakci na epidemie nebo pandemie [38].

### 2.1.2 Typy epidemií

Hlavním typem epidemie zabývající se v této práci je epidemii infekčních nemocí. Epidemiologie infekčních nemocí zkoumá procesy šíření nemocí. Faktory šíření nákazy jsou zdroj nákazy, cesta přenosu a vnímavý jedinec. Zdroje nákazy jsou většinou lidé, zvířata nebo prostředí, ve kterém dokáže původce nákazy přežít, vyvíjí se a rozšiřuje na další jedince. Zdrojem nákazy je nemocný nebo přenašeč. U nemocného se projevuje symptomy nemoci. Nebezpečnější je přenašeč, který nejeví známky nemoci, ale přitom je šířitelem. Cesta přenosu je způsob, jakým se nemoc šíří ze zdroje na vnímavou osobu. Přenos je ovlivněn způsobem vylučování ze zdroje nákazy, odolností nositele a branou vstupu vnímavé osoby. Přenos nemoci je dělen na přímý a nepřímý. K přímému přenosu dochází například kontaktem, kapénkovou cestou, transplacentárně (placentou z matky na dítě) nebo perinatálně (při porodu). Za kontakt se považuje styk kůže nebo sliznic. Při přenosu kapénkovou cestou vylétají z dýchacích cest infikované kapénky např. při mluvení nebo kašlání. Nepřímý přenos nemoci probíhá například přes vodu, potravinami, vzduchem, půdou, předměty nebo pomocí přenašečů. Vnímavý jedinec je charakterizován jako poslední část přenosového řetězce. Jedinec může být vnímavý nebo odolný. O stavu v jakém se jedinec nachází rozhodují faktory jako strava, genetická výbava, věk, ostatní onemocnění, osobní návyky, psychický stav. Odolnosti jedince se říká imunita. Imunita může být vrozená nebo získaná. Důležitým pojmem je kolektivní imunita. Kolektivní imunita je stav populace, ve které je imunní 85-95 % populace a dochází v ní k zastavení šíření nemoci. [38]

### 2.1.3 Protiepidemiologická opatření

Opatření jsou metody k zastavení šíření nemoci. Opatření jsou preventivní nebo represivní. Proti vypuknutí epidemie je soubor opatření nazván preventivní opatření. Represivní opatření jsou nasazena ve chvíli, kdy už k epidemii došlo a je nutné zlikvidovat zdroj nákazy a zabránit dalšímu šíření.

Zde budou popsána základní preventivní opatření. V populaci je nutné **zvyšování hygienické úrovně**. Dodržování dobré osobní hygieny, je základním preventivním opatřením. Osobní hygiena zahrnuje pravidelné mytí rukou s mýdlem a vodou, správné používání toalety, zachování čistoty prostředí a zabezpečení dostupnosti pitné vody, stravy a hygienických zařízení. Dalším důležitým bodem je **výchova ke zdraví**. Edukace a osvěta veřejnosti o zdravotních tématech jsou důležité pro prevenci nemocí. Informování o správných životních stylech, výživě, fyzické aktivitě, prevenci infekčních nemocí, preventivních prohlídkách a dalších zdravotně významných faktorech pomáhá lidem přijímat informovaná rozhodnutí ohledně jejich vlastního zdraví.

**Očkování** je další účinný způsob prevence proti vybraným druhům nemocí. Očkování poskytuje imunitu proti konkrétním patogenům a chrání jednotlivce i populaci před šířením nemocí. Dodržování očkovacího plánu a očkování podle doporučených schémat jsou důležité pro dosažení co nejvyššího pokrytí očkováním. V dnešní době je také nutné zmínit, že důležitou součástí očkování je informovanost příjemců očkování. Dále je klíčové **identifikování a sledování nosičů** infekčních nemocí a tím posilovat prevenci šíření nemocí. Pravidelná evidence a kontrola nosičů umožňuje přijmout vhodná opatření k izolaci a léčbě nosičů. V souvislosti se sledováním nosičů nemoci je dalším preventivním opatřením **Omezení zavlečení nemocí**. Nemoci mohou být zavlečeny z jiných regionů nebo zemí. Omezení zahrnuje kontrolu cestování, monitorování osob přicházejících z oblastí s vysokým výskytem nemocí, provádění screeningových testů a přijímání vhodných karanténních opatření. Dalším preventivním opatřením je **používání dezinfekčních prostředků**. Dezinfekce prostorů, předmětů a povrchů může zpomalit šíření nemocí. Dezinfekce je hojně využívána v nemocnicích, ale v ostatních

veřejných prostorech není využívána vůbec nebo jen zřídka. Celkové využívání dezinfekce se zlepšilo z důvodu nedávné pandemie.

Nyní budou popsána základní represivní opatření, která jsou využívána při potlačování epidemií/pandemií. Prvním opatřením je **včasná diagnostika nemoci**. Rychlá a přesná diagnostika infekčních nemocí je klíčová pro identifikaci a izolaci nemocných jedinců. Včasná diagnostika umožňuje rychlou léčbu a minimalizuje riziko dalšího šíření nemoci. Následující opatření je **hlášení infekčních nemocí**. Zdravotnická zařízení a zdravotníci mají povinnost hlásit případy infekčních nemocí odpovídajícím zdravotním autoritám. Hlášení umožňuje sledování výskytu nemocí, identifikaci ohnisek nákazy a přijímání opatření k omezení šíření. Dalším opatřením je **izolace a hospitalizace**. Nemocné jedince s infekčními nemocemi je třeba izolovat od zdravých jedinců. Izolace může být prováděna doma, ve zdravotnických zařízeních nebo v karanténních zařízeních, v závislosti na závažnosti a povaze nemoci. Hospitalizace je nutná pro léčbu těžších případů a prevenci komplikací z důvodu nutnosti využití speciálních přístrojů a vybavení. Jako u preventivních opatření hraje **pravidelná dezinfekce** prostorů, povrchů, nástrojů a zařízení důležitou roli v boji s šířením nemocí. Dezinfekce se provádí pomocí vhodných dezinfekčních prostředků, které pomáhají ničit patogeny nemoci. Dalším opatřením je **epidemiologické šetření v ohnisku nákazy**. Po identifikaci ohniska nákazy je prováděno epidemiologické šetření, které zahrnuje zjištění možných příčin, kontakty a rozsahu šíření nemoci. Šetření umožňuje identifikovat další nemocné jedince, přerušit řetězce přenosu a přijmout další preventivní opatření. Další opatření je autoritami zavedený **protiepidemický režim**, to je soubor opatření, která mají za cíl kontrolovat a potlačit šíření infekčních nemocí. Soubor zahrnuje vyhledávání nemocných a podezřelých jedinců, stanovení karantény, provádění ohniskové dezinfekce, imunizaci, kontrolu hygienických opatření a zvyšování povědomí populace o nemoci. Na konci řetězce je **kontrola a vyhodnocení účinnosti opatření**. Pro včasné a účinné reakce na vývoj nemoci je důležité pravidelně kontrolovat a vyhodnocovat účinnost přijatých opatření. Kontrolovat a vyhodnocovat můžeme: šíření nemoci, efektivitu izolace, očkování a dalších protiepidemických opatření. [37]

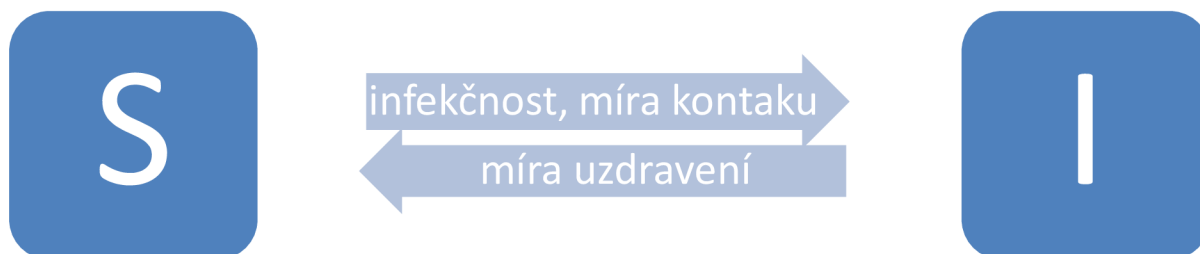
## 2.2 Modely epidemií

Compartment Model (česky rozčleněný model) je základem mnoha matematických modelů epidemií. V tomto modelu se uvažuje, že každý jedinec na základě svého stavu spadá do určité kategorie. Dynamika modelu se zachycuje jako rychlost, s jakou jedinec předchází z jedné kategorie do jiné. Populace bývá rozdělena do několika kategorií např.: vnímaví (S), exponovaní (E), nakažení (I), asymptomaticí (A) a uzdravení (R). Modely uvažují homogenní míšení populace, tzn. že se každý setkává s každým se stejnou pravděpodobností.

Z důvodů různých mechanismů nemocí se nejčastěji definují modely jako:

- SIS (Susceptible – Infected – Susceptible)
- SIR (Susceptible – Infected – Recovered)
- SIRS (Susceptible – Infected – Recovered – Susceptible)
- SEIR (Susceptible – Exposed – Infected – Recovered)[49]

Model SIS definuje tři kategorie. Při propuknutí nemoci se vnímaví jedinci setkají s nakaženými a s určitou pravděpodobností se určitou rychlostí přesunou do stavu nakažený, odkud se po uzdravení vrací mezi vnímavé. Modelem SIS se dají modelovat nemoci jako chřipka nebo nachlazení.



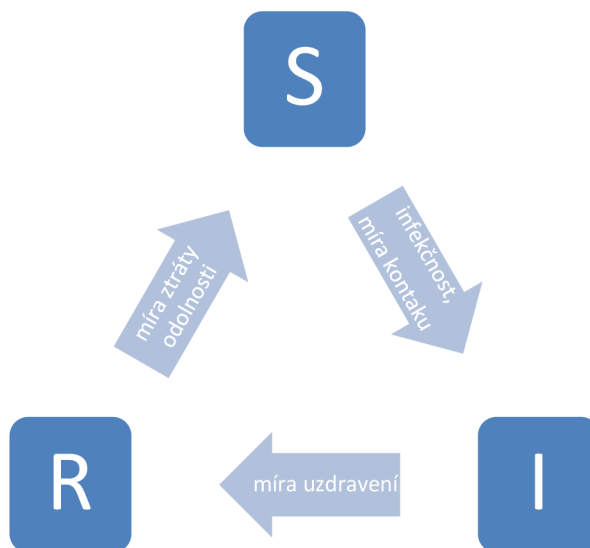
Obrázek 1 Model SIS [vlastní]

V modelu SIR je jedinec vnímavý k nemoci, při propuknutí nemoci se vnímaví jedinci setkají s nakaženými jedinci a s určitou pravděpodobností, s určitou rychlostí se přesunou do stavu nakažený. Nakažení jedinci jsou nakonec po uzdravení ve stavu imunní. V tomto modelu je získaná imunita doživotní. Model se používá ke studiu infekčních onemocnění, jako jsou spalničky, příušnice a pravé neštovice. To znamená že se předpokládá úplná imunita osoby po prodělání onemocnění.



**Obrázek 2 Model SIR [vlastní]**

V modelu SIRS se oproti předchozím modelům uvažuje také dočasná imunita. Délka trvání imunity je určena parametry onemocnění. Model se používá ke studiu infekčních onemocnění, jako chřipka nebo COVID-19.



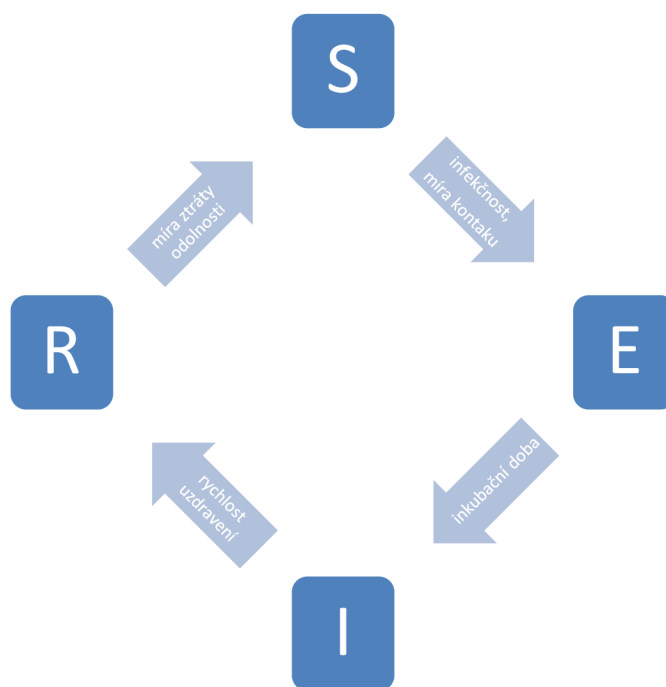
**Obrázek 3 Model SIRS [vlastní]**

Model SEIR přidává kategorii exponovaný (exposed E), ze které se jedinec může přesunout do stavu infekční. Nakažení jedinci jsou nakonec po uzdravení ve stavu imunní. V tomto modelu se předpokládá doživotní imunita. Na model SIER navazuje model SIERS, který předpokládá, že uzdravený může ztratit imunitu a být opět vnímavý.





**Obrázek 4 Model SEIR [vlastní]**



**Obrázek 5 Model SIERS [vlastní]**

Na tuto základní sadu modelů navazují další varianty, například:

- SAIRS (Susceptible – Asymptomatic – Infected–recovered–Susceptible)
- SIQR (Susceptible – Asymptomatic – Infected – Quarantine – Recovered)[50]
- SIDARTHE (Susceptible – Infected – Diagnosed – Ailing – Recognized- Threatened – Healed – Extinct)[51]

### 2.2.1 Deterministické modely

Deterministické modely popisují šíření epidemií na makroskopické úrovni a pro velkou populaci. Tyto modely byly vytvořeny za účelem předpovídat budoucí vývoj epidemie na základě znalostí o interakcích mezi jednotlivými faktory (jednotlivci, nakažlivosti choroby a dalších). K popisu deterministického modelu jsou využity systémy obyčejných diferenciálních rovnic, které obsahují pouze neznámou funkci jedné nezávislé proměnné a její derivaci. Rovnice popisují změny v počtu jedinců v jednotlivých kategoriích v průběhu času. Deterministické modely se využívají pro svou schopnost analyzovat složitější modely při dostačujících numerických výsledcích. V minulém století prošly deterministické modely velkým pokrokem a jsou schopny zachycovat stále složitější situace [14]. Deterministické modely pracují s předpoklady o homogenitě populace a konstantních parametrech, což nemusí vždy přesně odpovídat složitosti reálných situací. Pro zahrnutí náhodnosti a nejistoty do modelů se používají stochastické modely epidemií, které zohledňují škálovatelnost a náhodné procesy ve šíření infekce. Zde jsou uvedeny dva příklady popisu deterministického modelu SIS.

Kermack a McKendrickův model SIS je definován takto:

$$S' = -\beta S(t)I(t) + \delta I(t), \quad (1)$$

$$I' = \beta S(t)I(t) - \delta I(t). \quad (2)$$

Kde  $S(t)$  je podíl vnímavé populace,  $I(t)$  je podíl infikovaných osob,  $\beta$  je mírou infekce, kterou může osoba nakazit své sousedy,  $\delta$  je rychlost, se kterou se nakažený jedinec uzdravuje.

První rovnice (1) zachycuje rychlost vývoje podílu infikovaných osob ( $\delta I(t)$ ) a rychlost uzdravení infikovaných osob ( $\beta S(t)I(t)$ ). Druhá rovnice (2) zachycuje rozdíl mezi podílem zdravých jedinců (vnímavých) a infikovaných. Předpoklad tohoto modelu je homogenní rozložení populace, to znamená že se všechny osoby setkávají se stejnou pravděpodobností. [14]

Kerphart a White Kerphart model SIS je definován takto:

$$I' = \beta kI(t)[1 - I(t)] - \delta I(t), \quad (3)$$

kde míra infekce je  $\beta kI(t)(1 - I(t))$ , která je úměrná podílu vnímavých osob,  $1 - I(t)$ . Pro každého vnímavého jedince je míra infekce součinem míry infekce  $\beta$  a počtu infikovaných sousedů  $kI(t)$ .

Tento model je tedy doplněn o stupeň uzlu, počet sousedních osob. Je označován jako homogenní, protože každá osoba má stejný počet sousedů. [39]

Soustava rovnic modelu SIR (4) popisuje dynamiku přechodu ze stavů vnímavý (S), infekční (I) a imunní (R).  $\mu$  je poměr narození a úmrtí,  $\beta$  je mírou přenosu infekce,  $p$  je úroveň vakcinace populace,  $1/\gamma$  je doba infekčnosti. [5]

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu(1 - p) - \beta SI - \mu S, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I - \mu I \\ \frac{dR}{dt} &= \mu p + \gamma I - \mu R \end{aligned} \quad (4)$$

Takto vypadá soustava diferenciálních rovnic deterministického modelu SEIR. (5) Populace je rozdělena na vnímavou ( $S_H$ ), exponovanou ( $E_H$ ), infekční ( $I_H$ ) a uzdravenou ( $R_H$ ) část. Jedinci vstupují do vnímavé populace rychlostí  $B$  a poté se stávají exponovanými po setkání s infekčními jedinci rychlostí  $\beta$ . Po časového období  $\frac{1}{\gamma_H}$  se stávají infekčními a uzdravují se rychlostí  $\sigma$ . [14]

$$\begin{aligned} \frac{dS_H}{dt} &= BN_H - \frac{\beta S_H I_H}{N_H} - \mu_H S_H, \\ \frac{dE_H}{dt} &= \frac{\beta S_H I_H}{N_H} - \gamma_H E_H - \mu_H E_H, \\ \frac{dI_H}{dt} &= \gamma_H E_H - \sigma I_H - \mu_H I_H, \\ \frac{dR_H}{dt} &= \sigma I_H - \mu_H R_H. \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2.2 Síťové modely epidemií

Síťové modely uvažují heterogenní interakce v populaci, což znamená, že se agenti nepotkávají se stejnou pravděpodobností, ale kontakty závisí na síťové struktuře populace. Pro celkovou kvalitu modelu záleží na správném sestavení sítě, která zohledňuje vazby mezi agenty. Čím víc vazeb v síti existuje, tím náročnější je sestavení modelu. Síťové modely jsou považovány za realističtější a flexibilnější.

Sítě mohou být statické nebo dynamické. Statické sítě jsou takové, u kterých se nemění rozložení stupňů. Rozložení stupňů sítě určuje topologii sítě. Různými topologiemi se modelují různé sociální systémy [15].

V síťových modelech se využívá termín bezškálové sítě neboli „scale-free networks“. Bezškálové sítě jsou typem sítí s různým rozdělením stupňů uzlů, které nejsou závislé na velikosti sítě. To znamená, že v bezškálové síti existují některé uzly, které mají mnohem více spojení než většina ostatních uzlů. Vysoce propojené uzly, tzn. že mají vyšší stupeň spojení než běžné uzly, jsou označovány jako „huby“ nebo v epidemiologii jako superrozšiřovatelé [19]. Superrozšiřovatelé jsou důležitou součástí modelu pro přesnější modelování epidemií, protože mohou simulovat veřejně exponované jedince, na které je třeba dávat pozor a cílit na ně epidemiologická opatření jako očkování nebo karanténu. Tento typ sítí je schopný čelit výpadkům uzlů s nízkým počtem spojení. Problém nastává při výpadku „hubu“, to může zapříčinit kolaps sítě.

Dalším důležitým termínem jsou sítě malých světů. To jsou sítě vyznačující se vysokou shlukovitostí a krátkými průměrnými vzdálenostmi mezi uzly, což znamená, že existuje krátká cesta, která spojuje většinu uzlů v síti (fenomén malého světa). Malé světy lze vytvořit přidáním několika náhodných spojení do grafu sítě. Díky krátkým cestám je šíření epidemie rychlé [19].

### 2.2.3 Stochastické modely

Stochastické modely dokážou lépe popsat šíření nemoci, protože podstata šíření nemocí je řízena náhodně, stochasticky. U stochastických modelů je přenos nemoci mezi jednotlivci popsán pravděpodobnostmi, deterministické modely využívají míry, poměry. Stochastické modelování poskytuje mikroskopický popis epidemického procesu. Stochastické modely epidemií mohou zachytit nejistotu a

variabilitu v procesu šíření nemoci, která je často přítomna v reálných situacích. Stochastické modely jsou založeny na pravděpodobnosti přechodu z jednoho stavu do druhého. Tyto modely umožňují simulovat různé scénáře a generovat pravděpodobnostní rozdělení výsledků, což umožňuje posoudit nejistotu při predikci vývoje epidemie. Některé modely využívají Markovovy řetězce [14]. Markovův řetězec s diskretním časem (DTMC) se skládá z konečného počtu stavů, mezi kterými systém přechází v diskretních časových krocích. Pravděpodobnost přechodu ze stavu do stavu závisí pouze na aktuálním stavu a nezávisí na předchozích stavech. Pravděpodobnost přechodu je reprezentována pomocí přechodové matice. Markovův řetězec se spojitým časem (CTMC) je matematický model, který se používá k popisu pravděpodobnostního chování systému, který prochází různými stavy v nepřetržitém časovém intervalu. Oproti DTMC, který pracuje s časovými kroky. CTMC popisuje pravděpodobnost přechodu mezi stavy jako funkci času. [2]

Další využívaná metoda modelování epidemiologických procesů jsou stochastické diferenciální rovnice (SDE). SDE jsou matematickým nástrojem používaným k popisu evoluce systémů, ve kterých jsou přítomny náhodné vlivy nebo nejistoty [2]. Mezi výpočetní metody SDE patří Monte-Carlo nebo Gillespieho algoritmus [15]. Metoda Monte Carlo zaštiťuje třídu metod, které využívají k výpočtům generátor náhodných čísel. Gillespieho algoritmus využívá metodu Monte Carlo a využívá se pro generování statistických přesných řešení stochastických rovnic.

Stochastické modely musejí mít odpovídající míru složitosti, aby bylo jejich matematické vyhodnocení úspěšné. Stochastické modely umožňují zaměřit se na přetrvávání nebo vymírání nemoci v populaci. Modely jsou vždy zatíženy různými neurčitostmi, v případě infekčních nemocí to může být délka inkubační doby a infekčnost. [14]

V základním stochastickém modelu s jedním rozčleněním můžeme rychlost vstupu a výstupu z jednoho stavu zapsat jakou soustavu rovnic (6):

$$\begin{aligned} P(X(t + \Delta t) - X(t) = 1) &= \lambda \Delta t + o(\Delta t), \\ P(X(t + \Delta t) - X(t) = 0) &= 1 - \lambda \Delta t + o(\Delta t). \end{aligned} \tag{6}$$

Kde  $X(t)$  je počet obyvatel v boxu v čase  $t$  a  $\lambda$  je pravděpodobnost přechodu [14]. Jednoduchý stochastický SEIR model je rozšířením modelu SEIR o pravděpodobnostní přechody. Tento model zkoumá, zda existuje pravděpodobnost vymizení choroby. Pravděpodobnosti přechodu jsou dány rovnicemi (7):

$$\begin{aligned}
P\{\Delta S_H = 1|X\} &= BN_H\Delta t + o(\Delta t), \\
P\{(\Delta S_H, \Delta E_H) = (-1,1)|X\} &= \frac{\beta S_H I_H}{N_H \Delta t} + o(\Delta t), \\
P\{\Delta S_H = -1|X\} &= \mu_H S_H \Delta t + o(\Delta t), \\
P\{(\Delta E_H, \Delta I_H) = (-1,1)|X\} &= \gamma H E_H \Delta t + o(\Delta t), \\
P\{(\Delta I_H, \Delta R_H) = (-1,1)|X\} &= \sigma I_H \Delta t + o(\Delta t), \\
P\{\Delta E_H = -1|X\} &= \mu_H E_H \Delta t + o(\Delta t), \\
P\{\Delta I_H = -1|X\} &= \mu_H I_H \Delta t + o(\Delta t), \\
P\{\Delta R_H = -1|X\} &= \mu_H R_H \Delta t + o(\Delta t).
\end{aligned}
\tag{7}$$

Po matematických úpravách dostáváme rovnici pravděpodobnosti vyhnutí nemoci (8):

$$\mathbb{P}_0 = s_1^{e_0} s_2^{i_0} = \left( \frac{\mu_H}{\gamma_H + \mu_H} + \frac{\mu_H + \sigma}{\beta} \right)^{e_0} \left( \frac{(\gamma_H + \mu_H) + (\sigma + \mu_H)}{\beta \mu_H} \right)^{i_0}
\tag{8}$$

Kde  $\mathbb{P}_0$  je pravděpodobnost vyhnutí nemoci,  $e_0$  a  $i_0$  jsou počáteční pravděpodobnosti exponování a nakažení,  $s_1^{e_0}$  a  $s_2^{i_0}$  jsou fixní body.[14]

### 2.3 Software pro modelování v epidemii

K modelování epidemií lze využít různé vývojové nástroje a platformy, mezi něž patří mj. následující:

**NetLogo** je programovací jazyk a vývojové prostředí používané pro modelování a simulaci komplexních systémů. Podporuje agentové modelování. NetLogo poskytuje prostředky pro vizualizaci a interakci s modely, což umožňuje zkoumat dynamiku systémů a jejich chování. NetLogo je vyvinuto na platformě Java a je volně dostupné. Pro svou jednoduchost a flexibilitu jsem zvolil NetLogo pro praktickou část práce. [41]

**MATLAB** je interaktivní programovací prostředí a programovací jazyk vyvinutý společností MathWorks. Poskytuje bohatou sadu funkcí, nástrojů a je

vybaven širokou paletou knihoven, které obsahují specializované funkce pro různé oblasti aplikací. Programování probíhá ve vlastním jazyce MATLAB [24]. Program je díky své komplexitě velmi nákladný na pořízení a proto vznikla open-source varianta **GNU Octave**.

**EpiModel** je rozšíření pro freeware statistický software **R**. EpiModel poskytuje nástroje pro simulaci a analýzu matematických modelů dynamiky různých infekčních onemocnění založených na různých mechanismech šíření nákazy [17].

**FRED** (Framework for Reconstructing Epidemiological Dynamics) je softwarový nástroj vyvinutý pro modelování a simulaci epidemie. Poskytuje robustní framework pro vytváření epidemiologických modelů, zahrnujících různé faktory, jako je vektorová přenosová cesta, mobilita populace a imunitní stav jedinců. [13]

Další příklady by bylo možné najít například na stránkách Epidemic [9] nebo The Journal of Infectious Diseases [36], což jsou odborné časopisy zabývající se infekčními nemocemi.

## 3 Teorie her

V této kapitole bude stručně popsána teorie her a její využití v epidemiologii. Teorie her je oblast aplikované matematiky, která studuje konflikty či střety zájmů. Dále se teorie her klasifikuje jako rozšíření rozhodovací teorie, která patří do odvětví pravděpodobnosti. Jiná definice označuje teorii her jako souhrn analytických nástrojů sestavených pro pochopení chování zkoumaných subjektů. Teorie her poskytuje rámec analytických nástrojů, které umožňují zkoumání v různých vědních oborech (ekonomie, psychologie, sociologie, politika, biologie) z různých souborů dat. Použití stejných analytických metod zajišťuje možnost přenosu dat a výsledků mezi jednotlivými obory.

### 3.1 Pojmy a principy

Základními pilíři teorie jsou pojmy hráč, strategie a výplata.

#### 3.1.1 Hra

Hrou se nazývá konfliktní situace, kterou řešíme. Je dána souborem pravidel. Hráči aplikují strategie, proběhne vyhodnocení, určení vítěze hry a přidělení výplat (popř. dělení výhry) [16]. Hrou můžeme modelovat problémovou situaci z reálného života, nebo se jedná o smyšlenou záležitost. Pro vytvoření hry je třeba definovat pravidla hry, hráče, strategie a výplaty. Hry se dělí do kategorií a pro každou kategorii jsou navrženy metody řešení hry.

V **kooperativních hrách** hráči uzavírají dohody, které jsou platné o vymahatelné po celou dobu hry a zlepšují výplatu celé skupině. V těchto hrách je možná tvorba koalic (aliancí) a výběru stejných strategií. Výběr pokut za nedodržení dohod bývá nastaven tak, aby fungoval jako odstrašující prvek od porušení smluvené dohody. V **nekooperativní hrách** není dovolena komunikace hráčů a tvoření dohod. Hráči se tedy chovají sobecky a volí strategii čistě podle svého nejlepšího zájmu.

V **jednokolových hrách** si hráči volí strategie, které odpovídají strategii posledního kola a nepřipouští pokračování hry. Zkušenosti získané hraním zapomínají. U **vícekolových her** je u hráčů kladen větší důraz na výběr strategie, protože se hraje více kol a existuje možnost reakce protihráčů, které může být



pozitivní nebo negativní v závislosti na míře ovlivnění výplatní funkce. Výběr strategie na konci hry může ovlivnit informace o konci hry a strategie se mohou přizpůsobovat. V modelování se také **vícekolové hry** nazývají iterační hry. Hráči hrají hru kdykoli v průběhu epidemického období a jejich strategie se v průběhu času mění podle toho, jak epidemie postupuje. V případě, že o epidemické situaci uvažujeme jako o hře, iterační hra spočívá například v přijetí preventivních opatření. Rozhodování, zda se nechat očkovat, představuje jednokolovou hru.

V **symetrických hrách** mají hráči stejnou množinu strategií nebo výplatních funkcí. **Asymetrické hry** se vyznačují rozdílnou množinou strategií a mohu být pro hráče neférové.

Podle součtu výplat lze **rozlišit hry s nulovým a nenulovým součtem**. V **sekvenčních hrách** hráči hrají postupně za sebou a znají tah hráče před sebou. V **simultánních hrách** hráči hrají naráz a nevidí chování, zvolené strategie ostatních hráčů. [16]

**Evoluční hry** jsou založené na evolučních principech položených vědcem Charlesem Darwinem. Tyto hry slouží k popisu chování rostlinných a živočišných druhů. Evoluční hry jsou hry založeny na adaptaci a učení v nekonečných hrách (nekonečně kol). Hráči jsou nazýváni agenti a jsou omezeně racionální. Hráči se pokouší najít evolučně stabilní strategie (analogie k Nashově rovnováze), které jsou odolné vůči strategiím hráčů, u kterých vznikla potřeba změnit strategie z důvodu přirozeného vývoje hráče při replikaci (mutantní strategie).[35]

**Populační hry** jsou speciálním typem evolučních her. Populační hry jsou definovány jako hry pro dva hráče (nebo dvě skupiny). Nejsou v nich povoleny smíšené strategie a volba strategie probíhá podle stanovených pravidel.

**Diferenciální hry** mají strategie závislé na čase; v každém časovém okamžiku může hráč zvolit jinou strategii. Například pronásledovací hra mezi cílem a pronásledovatelem je diferenciální hra pro dva hráče, kde strategie každého hráče spočívají ve volbě způsobu pohybu v každém následujícím čase.

### 3.1.2 Hráč

Účastníci her se nazývají hráči. Hráči dělají rozhodnutí o tom, co budou ve hře dělat. Počet hráčů je závislý na zvolené hře, minimum jsou 2. Hráči se dělí na inteligentní

a neinteligentní. Inteligentní hráč usiluje o výhru (maximální výplatu, nejlepší možný výsledek). Hráč má informace o hře a využívá je k dosažení nejlepšího výsledku [26]. Neinteligentní hráč není motivován k vítězství a ve hře zastupuje prvek náhody či nejistoty, kterému inteligentní hráč musí čelit. Při využití teorie her v modelování epidemie budeme z logiky věci uvažovat více než 2 hráče v populaci. Pod označením hráč se může skrývat i samotná populace, jde o vymezení pojmů před začátkem simulace.

### **3.1.3 Racionalita**

Racionální volba spočívá v hráčově volbě nejlepších strategií podle svých zájmů a jako tendence maximalizovat vlastní užitek. Racionalita spočívá v konzistentnosti rozhodnutí při rozhodování s různými soubory dostupných akcí (tahů). Racionalita není ovlivněna hráčovou povahou [29]. Novější studie zavedli realističtější scénář a zahrnuli do něj iracionalitu. Pro napodobení rozhodování jedince, jejichž rozhodování není zcela racionální. Iracionalita se využívá k modelování veřejného blaha neboli hráč myslí i na ostatní a není úplně ovlivněn svou sobeckostí. V literatuře se uvádí termín parametr racionality, který popisuje hráče měnícího náhodně strategie nebo jen zřídka mění strategii z důvodu ovlivnění výplaty [15]. Pojem omezená racionalita je experimentální zjištění, že se někteří hráči výrazně odchylují od předpovědí daných Nashovou rovnováhou. Tato anomálie je pravděpodobně způsobena nedokonalou informací o soupeřově množině strategií, soupeřově tahu a jeho výplatách. Dalším možným způsobem je omezený čas na rozhodnutí o výběru strategie. Výpočet Nashovy rovnováhy pro modely s omezenou racionalitou byly navrženy speciální modely QRE (Quantal Response Equilibrium). [25]

### **3.1.4 Výhra**

Výhra neboli výplata (anglicky payoff) je cíl hry. Výsledek hry se pro každého hráče může lišit a závisí na zvolené strategii. Vyjadřuje užitek, který přinese hráči určitá strategie. Při modelování reálných situací dochází k problému při vyčíslování výplat. Výhra může být vše, co hráči přinese užitek. Při epidemii může být výplata spojená s udržením zdraví. Například zůstanu doma a moje zdraví zůstane v pořádku nebo

půjdu ven pro jídlo a riskuji nakažení a tím ohrozím svoje zdraví, ale můžu získat něco navíc v podobě jídla. Podobně může být výplata vyčíslena jako náklady, záporné částky. V tomto případě je lepší možnost ta s menšími náklady.

### 3.1.5 Strategie

Strategie představuje soubor tahů, akcí nebo rozhodnutí, která hráč provádí při hraní hry. Existují čisté strategie, kdy hráč zvolí jednu strategii a drží se jí po celou dobu hry, a smíšené strategie, které kombinují sadu strategií a hráč je vybírá s určitou pravděpodobností. Dominantní strategie je taková, která nepřihlíží k strategiím ostatních hráčů. Rozhodování hráče je závislé na dostupných informacích.

V prostředí strategického rozhodování existuje množina strategií, kterých by se žádný dokonale racionální hráč neodchýlil, protože by snížil svou výhru a ovlivnil svůj užitek. Tato situace je známá jako Nashova rovnováha. Konvergentně stabilní Nashova rovnováha nastává tehdy, když většina populace přijme strategii  $S_1$  a jedinci, kteří zvolí jakoukoli jinou strategii, získají vždy nižší odměnu než ti, kteří zvolili strategii  $S_1$ .  $S_1$  je pak označována jako Nashova rovnováha. Naopak, pokud většina jedinců přijme strategii  $S_2$ , ale jedinci, kteří zvolí strategii blíže k  $S_1$  než  $S_2$ , získají vyšší výhru než ti, kteří zvolili  $S_2$  (a ti, kteří zvolili strategii vzdálenější od  $S_1$ , získají nižší výhru), pak se říká, že  $S_1$  je konvergentně stabilní. Pokud je  $S_1$  Nashova rovnováha a všichni ji v současnosti používají, nikdo by neměl změnit strategii. Pokud je  $S_1$  konvergentně stabilní, pak bez ohledu na nejběžnější strategii v populaci by jedinci měli začít hrát strategii blíže k  $S_1$  a nakonec ji přijmout [5].

Volba strategie hráčů může být ovlivněna dvěma způsoby: sebehodnocením a napodobováním. Sebehodnocení představuje techniku, při které hráč bere v úvahu aktuální situaci a vlastní zkušenosti jako sebestředný a nekomunikativní jedinec. Jednodušší forma vyhodnocování výhod sebehodnocení se objevovala na počátku modelování. Napodobování znamená, že hráči napodobují úspěšnější strategie ostatních hráčů. Tento přístup bere v úvahu sociální dynamiku a vzájemné vazby mezi jedinci. [15]

### 3.1.6 Informace

Informace hraje v teorii her klíčovou roli a ovlivňuje průběh a výsledky her. Ve **hrách s úplnou informací** hráči znají všechny možné parametry hry, ve **hrách s neúplnou informací** hráč například nezná výplatní funkci soupeře.

Důležitost informace spočívá v tom, že hráči v reálném světě často nejsou plně informováni o strategiích, akcích nebo preferencích ostatních hráčů. Znalost informace o stavu hry, strategiích ostatních hráčů nebo počtu kol do konce hry může hráčům umožnit vytvořit lepší strategie a dosáhnout lepších výsledků. Hráči se mohou pokusit odhadnout chování ostatních hráčů a využít své znalosti k dosažení co nejlepšího výsledku pro sebe. V praxi se hráči často pokouší získat co nejvíce informací o svých soupeřích prostřednictvím pozorování, analýzy minulého chování, komunikace nebo spolupráce s ostatními hráči. K modelování neznámých informací a predikci chování ostatních hráčů se využívají analytické metody, jako je teorie pravděpodobnosti a statistika.

### 3.1.7 Normální zápis hry

Normální, někdy nazývaná jako strategická, forma zápisu hry je popisného charakteru. K popisu hry se využívá slovní (matematický) popis a matice (9), ve které jsou ukázáni hráči, strategie a výplaty. Hry v normálové formě jsou především simultánní (hráči hrají ve stejný okamžik a neznají tahy ostatních hráčů).

Příklad obecného normálního zápisu hry [11]:

- Množina hráčů  $i = 1, \dots, n$
- Množinu strategií  $S_i$  pro  $i = 1, \dots, n$ , nazýváme prostorem strategií  $s = (s_1, \dots, s_n)$ , kde  $s_i \in S_i$  pro  $i = 1, \dots, n$
- Funkci  $\pi_i: S \rightarrow \mathbf{R}$  pro hráče  $i = 1, \dots, n$ , kde  $S$  je množina strategií, tak funkci  $\pi_i(s)$  nazýváme výplata hráče  $i$ , která zvolil strategii  $s$ .

Zde je příklad normálního zápisu hry zvané věžňovo dilema [16]:

- Definujme symetrickou hru  $G = (H, X, M)$  v normálním tvaru takto:
- Počet hráčů  $N = 2$
- Prostory strategií hráčů  $X_i = \left\langle \frac{\text{zapírat}}{\text{přiznat se}}, i = 1, 2$

- Výplatní funkce hráčů zapíšeme maticí  $Z = \{z_{ij}\}_{i,j \in \{1,2\}}$ , kde  $Z_{ij} = (M1(i,j), M2(i,j))$ , přičemž:
  - $i, j = 1 \Leftrightarrow$  hráč 1, resp. hráč 2 zvolil strategii zapírat
  - $i, j = 2 \Leftrightarrow$  hráč 1, resp. hráč 2 zvolil strategii přiznat se

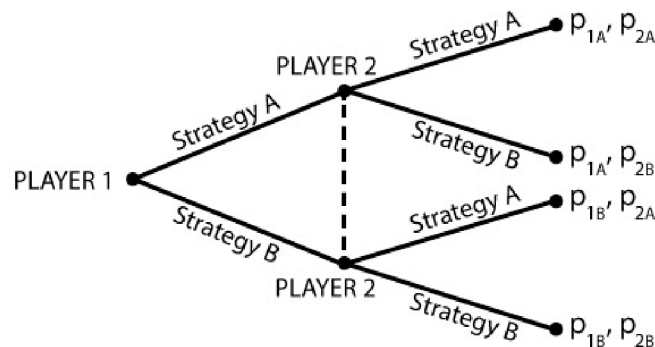
Výplatní matice je definována (9):

	zapírat	přiznat se
zapírat	$(-2, -2)$	$(-10, -1)$
přiznat se	$(-1, -10)$	$(-5, -5)$

(9)

### 3.1.8 Extenzivní zápis her

Extenzivní forma se používá pro zápis hry pomocí stromového grafu. Diagram ukazuje volby v různých stupních hry. Výplaty jsou zobrazené na každém konci větve. Tento zápis her se zobrazuje pro sekvenční hry, protože rozhodnutí volby přicházejí po sobě. [10]



Obrázek 6 Extenzivní zápis [10]

## 3.2 Využití teorie her v epidemiologii

Teorie her využívaná v epidemiologii simuluje rozhodování jedinců. V této kapitole budou popsány herně epidemiologické modely různých typů zásahů proti šíření epidemie. Pro modelování a aplikaci teorie her vznikají aplikační rozhraní neboli framework. Aplikační rozhraní je sada nástrojů a pravidel, na kterých mohou výzkumníci stavět další výzkum, vylepšovat a posouvat hranice jeho využití.

### 3.2.1 Vakcinace a vakcinační hry

Vakcinační hry se zabývají změnami přístupu jednotlivců k očkování, jejich postoje k očkování a také tím, jak míra proočkování populace ovlivňuje šíření epidemie. Důležitým pojmem v rámci vakcinačních her je metapopulace, což je skupina vzájemně propojených subpopulací. V rámci metapopulace můžeme sledovat dvě dynamiky: jednu mezi jednotlivci uvnitř lokálních populací a druhou mezi samotnými populacemi. Subpopulace jsou propojené a jednotlivci mohou migrovat mezi populacemi [12]. Chování a sobeckost jedinců mohou ovlivnit průběh pandemie. Autoři článku [46] navrhují hru s třemi strategiemi: očkování, sebeochrana a laissez-faire (nechat být). Na začátku každého nového období šíření epidemie by měli jednotlivci upravit své strategie na základě sledování strategií a výplat svých sousedů. Zjistilo se, že zvýšení míry úspěšné sebeochrany nemusí nutně vést ke snížení velikosti epidemie nebo k lepší systémové výplatě. Lepší podmínky pro jednotlivce mohou přinést horší výsledek pro společnost. Tento jev je znám jako Braessův paradox (podrobně popsán v kapitole 4.6), kdy lepší podmínky mohou vést k horšímu výkonu.

Důležitost šíření informací o nemoci, o vakcínách a o přístupech jednotlivců je ukázána v článku [18], kde autor představuje dvouvrstvý model šíření epidemie SIR/V-UA. Tento model je zapracován do metapopulačního migračního modelu pro náhodné chodce, s cílem studovat vliv informovanosti jednotlivců na jejich přístup k očkování nebo na přesun na bezpečnější místo. Teorie her je využita pro zvážení změny strategie jednotlivce, zda přijme nebo nepřijme očkování, nebo zda se přesune na bezpečnější místo. Jednotlivci jsou rozděleni do skupin podle svého zdravotního stavu a vakcinace, přičemž každá skupina má svou vlastní výplatní matici. Každá skupina má různou náchylnost k nemoci a míra nakažlivosti se může snižovat na základě dostupných informací. Výsledkem simulace je, že informace o nemoci a jejím šíření jsou důležitou součástí procesu zvládnání epidemie.

Dopady neúplných informací na odkládání očkování se zabývá článek [7]. Předlohou pro hru bylo chování lidí, kteří odkládali očkování proti viru H1N1 v roce 2009. Důvodem pro odkládání byly nedokonalé informace o vakcíně (neznáme vedlejší účinky, netestované). Paralelu můžeme vidět i u nedávné pandemie COVID-

19, kde populace byla rozdělena různými pohledy a přístupy k očkování. K rozdělení společnosti přispělo i silné rozšíření sociálních sítí, které umožnily šíření informací (oficiálních i neoficiálních). K popisu dynamiky modelu je využit epidemický model SIR, který rozlišuje očkované a neočkované jedince. V této hře se jedinci mohou rozhodnout, zda se nechají očkovat během kteréhokoli týdne pandemie nebo se vůbec nenechají očkovat. Jedna hra trvá 52 týdnů. Očkování poskytuje ochranu po dobu dvou týdnů. Strategie jedince je zvolit si týden, ve kterém se nechá očkovat. Výplatní funkce pro jednotlivé strategie jsou definovány následujícími parametry: základní výplata  $L$ , týden epidemie  $k$ ,  $\rho_{\leq k}$  je pravděpodobnost nákazy před týdnem  $k$ ,  $\rho_{>k}$  je pravděpodobnost nákazy po týdnech  $k$ ,  $r_{vac}^k$  jsou náklady spojené s možnými vedlejšími účinky vakcíny,  $r_{inf}$  jsou náklady spojené s nákazou,  $\varepsilon$  je efektivita vakcíny. Výplatní funkce pro jedince, kteří se nechají očkovat před vypuknutím epidemie, vypadá následovně (10):

$$L - r_{vac}^0 - r_{inf}\rho_{>0}(1 - \varepsilon) \quad (10)$$

Výplatní funkce pro jedince, kteří se nechají očkovat mezi začátkem a koncem epidemie, má následující podobu (11):

$$L - r_{vac}^0 - r_{inf}\rho_{\leq k+1} - r_{inf}\rho_{>k+1}(1 - \varepsilon) \quad (11)$$

Výplatní funkce pro jedince, kteří se nenechají očkovat, vypadá takto (12):

$$L - r_{inf}\rho_{\leq 52} \quad (12)$$

Jedinci, kteří se okamžitě nechají očkovat, přispívají k dosažení skupinové imunity pro neočkované jedince. Těm, kdo již mají skupinovou imunitu a jsou obklopeni očkovanými jedinci, se snižují hypotetické náklady na očkování díky informacím o bezpečnosti vakcíny získaným ze svého okolí. Cílem této hry bylo nalézt rovnovážné strategie, které se liší v závislosti na zvolených parametrech. Například, pokud platí rovnice (13):

$$r_{vac}^k = r_{vac} \ll r_{inf} \quad (13)$$

Strategie prioritního očkování před vypuknutím epidemie převládá. Naopak, v případech nižších nákladů na nakažení, kdy platí rovnice (14):

$$r_{vac}^k = r_{vac} > r_{inf}$$

(14)

se nejčastěji zvolí strategie „počkej a uvidíš“, kdy hráč vyčkává s očkovaním. Je zajímavé, že v obou případech se přibližně 20 % hráčů rozhodne nechat se vůbec neočkovat.

V článku [21] autoři Kuga a Tanimoto představují rámec pro porovnání dvou nedokonalých způsobů ochrany proti infekčnímu onemocnění: očkovaní poskytující pouze částečnou imunitu a používání ochranných pomůcek (roušek). Hra je založena na matematickém modelu epidemie SIR a je vícekolová. Každé kolo trvá až do uzdravení všech jedinců a změna strategie jedince probíhá po každém kole. Změna strategie je ovlivněna strategií náhodně potkaného jedince, porovnáním průměru zvolených strategií v populaci a náhodnou volbou. Výplatní funkce závisí na nákladech infekce (při nákaze) a nákladech na očkovaní. Pro porovnání výsledků byly použity dva ukazatele: efektivita vakcíny a účinnost ochranných pomůcek. Výsledky modelování naznačují, že při stejném koeficientu efektivity očkovaní a účinnosti nošení ochranných pomůcek je používání ochranných pomůcek méně efektivní při zvládnutí pandemie než nedokonalé očkovaní.

Vzhledem k rostoucí tendenci odkládání očkovaní, i přes prokazatelný význam plánovaného očkovaní při zamezení šíření nemocí, se vědecká obec zabývá otázkou, zda je možné ovlivnit a předpovídat tyto tendence. Článek [6] popisuje hru týkající se odkládání dobrovolného očkovaní proti dětským nemocem v závislosti na věku a vnímaném riziku. V této hře mohou hráči zvolit jednu ze tří strategií: očkovaní, odkládání nebo neočkovaní. Populace je rozdělena do dvou věkových skupin: 0-4 let a 4+ let. Očkující hráči aplikují vakcíny v první věkové skupině podle doporučení odborníků. Odkladači očkovaní odloží až do druhé věkové skupiny. Výhra očkujícího je ovlivněna pouze pravděpodobností úmrtí jako vedlejším účinkem očkovaní, spolu s náklady na očkovaní. Výhra odkladačů závisí na nákladech očkovaní v první věkové skupině, nákladech očkovaní v druhé věkové skupině a pravděpodobnosti nákazy v první věkové skupině. Neočkující jsou postiženi náklady na očkovaní v obou věkových skupinách a pravděpodobností nákazy. Změna strategií probíhá porovnáním zisku. Zisk je vypočítán jako rozdíl mezi stávající výhrou a výhrou po změně strategie. Výsledky hry naznačují, že při



velmi vysokých nákladech na očkování v první věkové skupině nebo velmi nízkém riziku nákazy v této skupině existuje rovnováha mezi odkladači a neočkujícími. To naznačuje, že jedinci se rozhodují odkládat očkování až do druhé věkové skupiny při vysokých nákladech na očkování nebo nízkém riziku nákazy u mladších dětí. Když se zvyšuje počet infikovaných jedinců, stoupá riziko nákazy a jedinci se rozhodují pro časnější očkování. To zase snižuje počet onemocnění, což následně zvyšuje počet odkladačů, což zase zvyšuje počet infikovaných jedinců. Dále byla testována hra bez odkladačů, a výsledkem bylo negativní ovlivnění frekvence změny počtu nakažených jedinců.

Článek [22] modeluje rozhodování jako nákladovou funkci a hráči se její minimalizací snaží zajistit si nejlepší výplatu. Ve hře existují dva druhy nákladů spojených s rozhodnutím hráče o výběru strategie očkování: náklady očkování (např. potenciální riziko nežádoucích účinků vakcíny nebo náklady na aplikaci vakcíny) a náklady spojené s infekcí, pokud není jedinec naočkován (např. komplikace onemocnění, náklady na léčbu nebo absence z práce). Jednotlivci odhadují riziko nákazy chorobou na základě vnímání závažnosti onemocnění, což se odráží ve vnímané míře šíření choroby (transmission rate) a proočkovaností svých sousedů. Podrobné informace a výpočtech budou uvedeny v praktické části práce, protože jsou využity ve vytvořeném modelu.

V této části podrobně představím existující hru, která se zabývá problémem, zda se nechat dobrovolně očkovat, když už je velké procento populace očkované a negativní dopady očkování jasně převáží ty pozitivní. Motivace pro tuto hru je podle autorů hry, Chrise T. Baucha a Davida J. D. Earna [5], v klesající poptávce po očkování proti dětským nemocem, jako jsou spalničky, obrna a záškrť, což vede k zvýšenému počtu úmrtí. Cílem modelu je kvantifikovat, jak vnímání rizika ovlivňuje míru přijetí vakcíny a pokrytí, a jakou roli hrají epidemiologické charakteristiky nemoci. Ve hře je očkovací skupina tvořena malými dětmi. Všichni hráči mají stejné informace a používají je k vyhodnocování rizik. Jednotlivci jsou ovlivněni svými sousedy, což znamená, že výběr strategií je nepřímo ovlivněn výběrem strategií ostatních jedinců v populaci. Jednotlivci mohou zvolit strategii očkování nebo neočkování s určitou pravděpodobností  $P$ . Míra přijetí vakcíny v populaci je určena podílem novorozenců, kteří budou očkováni, a průměrnou strategií přijatou jednotlivci v populaci. Výplata

pro jednotlivce je vyšší, pokud je riziko nemoci (pravděpodobnost nežádoucích následků) nižší. Riziko nemoci v důsledku očkování a infekce je označeno jako  $r_v$  a  $r_i$ . Pravděpodobnost, že se neočkovaný jedinec nakazí, je označena jako  $\pi_p$  a závisí na úrovni pokrytí populace vakcínou  $p$ . Výsledná rovnice pro výplatu je následující (15):

$$E(P, p) = P(-r_v) + (1 + P)(-r_i\pi) \quad (15)$$

Očekávanou strategií je strategie, která je konvergentně stabilní Nashova rovnováha. Dalším důležitým pojmem je míra zisku (payoff gain), která vyjadřuje míru motivace ke změně strategie  $\Delta E$  (16). Koeficient  $P$  a  $Q$  označují rozdílné strategie. Podíl  $r_v$  a  $r_i$  je nazýván relativní riziko a označuje se  $r$ .

$$\Delta E = E_P - E_Q = [\pi_{\varepsilon P + (1+\varepsilon)Q} - r](P - Q) \quad (16)$$

Model využívá klasický model SIR (vnímavý, infekční, imunní) (17). Následná úprava modelu vychází z předpokladu, že součet vnímavých, infekčních a imunních osob je roven jedné:

$$S + I + R = 1 \quad (17)$$

a úpravou dostáváme soustavu rovnic (18):

$$\begin{aligned} \frac{dS}{d\tau} &= f(1 - p) - R_0(1 + f)SI - fS, \\ \frac{dI}{d\tau} &= R_0(1 + f)SI - (1 + f)I \end{aligned} \quad (18)$$

Kde  $\tau$  je čas měřený v jednotkách střední doby infekce,  $f$  je doba infekce jako podíl střední doby života a  $R_0$  je základní reprodukční číslo. Pravděpodobnost nakažení osoby bez očkování je vyjádřena jako rovnice (19):

$$\pi_p = 1 - \frac{1}{R_0(1 - p)} \quad (19)$$

Kde  $p$  je kritická hodnota pro očkování populace, která eliminuje šíření choroby. A při podmínce (20):

$$r = \pi_{P^*} \quad (20)$$

kde  $P^*$  je CSNE (21):

$$P^* = 1 - \frac{1}{R_0(1-r)}$$

(21)

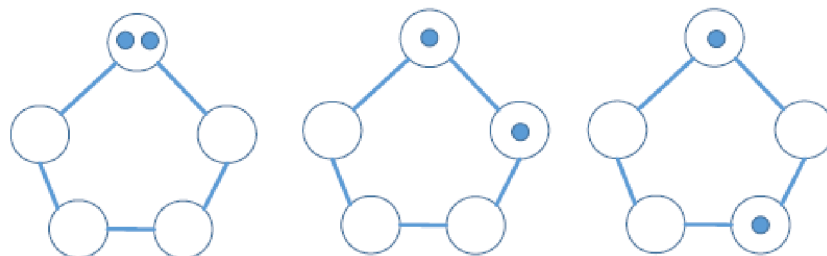
Proočkovanosť populácie sa teda bude meniť na základe zmien vnímania relatívneho rizika. Vnímanie relatívneho rizika môže byť ovplyvnené médiami, protioočkovacími skupinami, vzdelaním obyvateľstva a ďalšími faktory. Rozhodovanie a využitie vakcíny je silne ovplyvnené nesprávnym vnímaním rizika. [5]

### 3.2.2 Spoločenský odstup

V raných fázich pandémie, kedy chýbajú informácie o nemoci a spôsobe šírenia, nedostatok liečiv a jiných ochranných pomôcok, je sociálny distancovanie jedinou ochranou pred nákazou. Sociálny distancovanie znamená, že ľudia si udržujú fyzický odstup, čímž snižujú mieru kontaktu medzi vnímavými a infikovanými jedincami, ktorí môžu preniesť nemoc. Jedná sa o omešenie bežných spoločenských aktivít. Sociálny distancovanie môže zahŕňať dodržiavanie doporučených odstupů medzi jednotlivcami alebo i karanténne opatrenie. Veľkosť odstupů sa môže líšiť v závislosti na druhu nemoci a spôsobe šírenia. Sociálny distancovanie môže zahŕňať zákazy zhromažďovania, zákazy návštev alebo karanténu. Během pandémie COVID-19 byla karanténne opatrenie jedním z nejčastěji používaných nástrojů k zastavení nebo zpomalení šírenia nemoci. Karanténne opatrenie sa vzťahovala na jednotlivce, napríklad domáci karanténa. Prísnejšie pravidlá zahŕňovali zákaz opouštenia oblasti alebo uzavrenia obchodů. Úspěchy karanténnych opatrení byly však zastiňovány vzrůstajícím počtem pacientů s duševními poruchami, počtem sebevražd, zvýšenou konzumací alkoholu a nárůstem domácího násilí [8].

Článek [3] zkoumá teoretické sociálny distancovanie a modeluje ho pomocí teorie grafů. Hráči jsou umístěni ve vrcholech grafu. Pohyb hráčů je popsán jako líná náhodná chůze (lazy random walk), kde lenosť hráče je označena písmenem  $p$  a udává pravděpodobnosť setrvání na stejném místě. Pravděpodobnosť přesunu je tedy  $1-p$ . Cílem hráčů je dosáhnout vzdálenosti  $D$  (počet hran grafu mezi dvěma body-hráči). Hráči se snaží rozmístit tak, aby platilo  $D \geq 1$ . Každý hráč zná stupeň svého uzlu a nešíří informace do dalšího kola, nemá paměť. Cílem hry je zjistit tzv. čas absorpčních stavů, což znamená čas, kdy každý hráč bude vzdálen  $D$  od

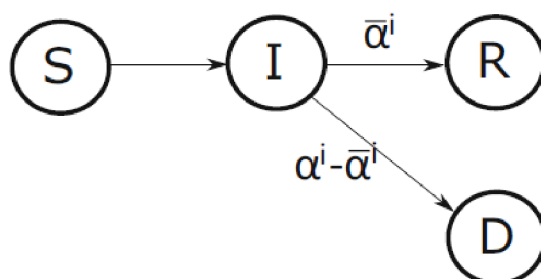
ostatních. Proces hry s dvěma hráči,  $D \geq 2$  a stupeň grafu 5 můžeme vidět na obrázku níže:



Obrázek 7 Dosažení absorpčního stavu [3]

Autoři dále zkoumali několik variant her na různých typech grafů, jako jsou lineární, cyklický nebo mřížkový graf. V kooperativní hře všichni hráči spolupracují a snaží se co nejdříve dosáhnout absorpčního stavu. Naopak ve hře, kde dva hráči hledají třetího hráče, záleží výplata na čase, ve kterém dosáhnou absorpčního stavu. Výplata hledačů je závislá na tom, zda jeden hledač chytí schovávajícího se hráče (celá výplata) nebo oba hledači chytí schovávajícího se hráče (výplata se rozdělí). Problém dále rozdělili na hry, kde hráči mohou stát na jednom uzlu (hráči se mohou nacházet ve stejném místě) nebo naopak (hráči nemohou být na stejném místě).

V článku [20] autoři zkoumají situaci, kde hráči nemají přesnou informaci o svém aktuálním stavu, ale pouze pravděpodobnost ve kterém stavu se nacházejí. Pravděpodobnost přechodu z jednoho stavu do druhého je ovlivněna chováním daného hráče, chováním ostatních hráčů a rozsahem epidemie. Hra je založena na modifikovaném epidemiologickém modelu SIRD, který zahrnuje další možný stav „dead“ (mrtvý). Model tedy vypadá následovně:



Obrázek 8 Model SIRD [20]

Hráč se tedy na základě svého zdravotního stavu přesune ze stavu „infikovaný“ do stavu „mrtvý“ nebo „vyléčený“. Vyléčení nebo smrt závisí na zranitelnosti (vulnerability) daného hráče. Nákaza vnímavého hráče závisí na velikosti epidemie, tj. počtu infikovaných hráčů. Hráči volí strategie na základě své zdravotní stavu (zranitelnosti) a na váze, kterou přiřazují svým sociálním kontaktům. Hráči s identickými vlastnostmi a stejnou strategií mohou volit různé další strategie, což autoři nazývají asymetrickým řešením. Výplatní funkce je sestavena následovně (22):

$$J^i = G^i (1 - S^i(T)) - s^i \int_0^T u^i(t) \bar{u}(t) dt - s^i \int_0^T \kappa u^i(t) dt,$$

(22)

Kde index  $i$  je označení hráče,  $T$  je časový horizont,  $G^i$  určuje hráčovu zranitelnost vůči nemoci, vyraz  $1 - S^i(T)$  udává pravděpodobnost, že hráč bude nakažen v časovém horizontu  $T$ ,  $u^i$  je zvolená strategie hráče a určuje počet kontaktů, které hráč má,  $\bar{u}$  je průměr strategií zvolených všemi hráči, konstanta  $\kappa$  je relativní vyjádření touhy hráče po sociálním kontaktu,  $s^i$  je parametr sociability, který simuluje důležitost, kterou hráč přiřazuje sociálnímu kontaktu. Autoři prostřednictvím numerických experimentů identifikovali Nashovu rovnováhu a zjistili, že strategie hráčů a vývoj epidemie jsou silně závislé na parametrech hráčů (zranitelnost  $G^i$ , sociabilita  $s^i$ ) a počátečním šíření epidemie. Dále autoři potvrdili myšlenku asymetrického rozhodování a zjistili souvislost mezi zvyšováním opatření (snížením sociálních kontaktů prostřednictvím vládních opatření) a zvýhodňováním zranitelnějších hráčů na úkor méně zranitelných.

Vztah mezi náklady epidemie a společenským odstupem je zkoumán v článku [33]. Autoři představují diferenciální hru založenou na epidemiologickém modelu SIR. Výplata jednotlivce je určena jeho strategií chování a průměrnou strategií chování v populaci. Hráči mohou kdykoli rozhodnout, zda zaplatí náklady na společenský odstup výměnou za snížení rizika nákazy. Hra je rozdělena do dvou částí. V první části se předpokládá existence vakcíny a její vytvoření v dané fázi epidemie, zatímco ve druhé části vakcína neexistuje. Předpokládá se, že hráči mají informaci o čase vytvoření vakcíny. V části bez vakcíny je ukázáno, že neefektivní

společenský odstup je zbytečný při jakémkoliv vysokém reprodukčním čísle nemoci. Efektivní společenský odstup je nevýhodný do určitého prahového hodnoty reprodukčního čísla, protože očekávané náklady na jednotlivce za den jsou příliš malé ve srovnání s náklady na společenský odstup. Situace s existencí vakcíny ukazuje, že pokud je vakcína vyvinuta a aplikována včas a společenský odstup je dodržován, existuje omezené časové období, během kterého vakcína může výrazně snížit náklady na epidemii a společenský odstup prodlužuje časové období.

V článku [43] autoři vytvořili antagonistickou hru, ve které hráč hraje proti populaci. Představili jednoduchou variantu hry, ve které jednatel musí rozhodnout, zda si vezme riziko nákazy nemocí nebo se bude držet sociálního odstupu a ztratí tak přístup ke společenským aktivitám (jako je škola nebo kino). Rozhodnutí hráče závisí na rozhodnutí populace a naopak. Vzniká rozhodovací problém, kdy populace se rozhodne pro odstup a jedinec může zvolit společenské aktivity. Jelikož je jediný, nehrozí mu riziko nákazy a může těžit z výhod společenských aktivit. Poté, co si to ostatní populace uvědomí, změní své rozhodnutí a také se vrátí k společenským aktivitám, čímž stoupá riziko nákazy. Tento problém lze zobecnit na dva hráče: jednotlivce a populaci a dvě strategie: karanténu a společenské aktivity, které lze popsat pomocí matice  $2 \times 2$ . Autoři objevili zajímavou cyklickou vlastnost této hry, kdy celá populace se pohybuje mezi úplnou karanténou a úplným využíváním společenských aktivit. Tuto cykličnost lze vyřešit přidáním časového limitu, který omezuje dobu, po kterou hráč může zůstat v jednom stavu. Tato jednoduchá hra byla dále rozšířena na více hráčů (jednotlivce a subpopulace) a více aktivit. Aktivity byly ohodnoceny hodnotou kontaktu, která vyjadřuje rizikovost aktivity ve smyslu setkávání se s větším počtem lidí. Byla také definována optimální frekvence střídání/navštěvování aktivit, která závisí na jejich rizikovosti. Čím vyšší rizikovost, tím méně často by měly být navštěvovány. Aktivity mohou mít přímý nebo nepřímý společenský kontakt, přičemž přímý kontakt znamená setkání s jiným hráčem, zatímco nepřímý kontakt se týká například cestování autobusem s jiným hráčem, kdy jdou na různé aktivity. Pokud existuje dostatečně velká skupina aktivit s nepřímým společenským kontaktem, optimální strategií je vyhýbat se aktivitám, ve kterých se nachází ostatní hráči.

Článek [30] popisuje hru, ve které hráč musí rozhodnout, zda vyjde ven nebo zůstane doma. Tato hra je součástí širšího mechanismu reakce na pandemii, který by měl sloužit jako nástroj pro státní orgány při zavádění ochranných opatření. Autoři článku přiřazují konkrétní hodnoty lidskému životu a vyčíslují náklady spojené se schůzkou v dolarech. Stanovují hranici, při které by se vyplatilo riskovat svůj život a zvolit strategii vycházet mezi lidmi, tak aby výhody získané ze schůzky převážily potenciální ztrátu života. Pro sestavení výplatní funkce jsou použity tyto parametry: náklady na pobyt doma  $C$ , zisk ze schůzky  $B$ , smrtelnost  $m$ , cena lidského života  $L$ , Pravděpodobnost infekce a setkání  $q$  a  $p$ . Pravděpodobnost infekce je složena ze dvou parametrů: délka trvání schůzky  $t$  a velikost skupiny lidí  $g$ . Jde tedy spočítána rovnicí (23):

$$q = 1 - (1 - q)^{gt} \quad (23)$$

Výplatní funkce je vypočítána rovnicí (24):

$$U = p(B - qmL) - (1 - p)C \quad (24)$$

Pro vyčíslení ceny lidského života autoři využívají statistická data. Můžeme tedy rozdílným vnímáním ceny lidského života ovlivňovat výsledky hry.

Pro vyčíslení ceny lidského života autoři využívají statistická data. Rozdílné vnímání ceny lidského života ovlivňuje výsledky hry. Globalizace přinesla výhody v podobě dostupného a relativně snadného cestování. Lidé cestují za prací nebo zábavou. Avšak v případě epidemií cestování nepřináší užitek, ale spíše naopak, podporuje rychlejší přenos nemoci a celkově urychluje nárůst počtu nakažených. V článku [47] autoři navrhnou hru, ve které se hráči rozhodují, zda navštíví nebo nenavštíví místo, které je postiženo nemocí. Cílem je najít individuální optimální strategii a skupinovou optimální strategii. Hráči se mohou nacházet ve stavech:

- individual in homeland – obyčejný jedinec
- potential visitor – jedinec s možností cestování
- visitor outside – jedinec, který zvolí možnost cestovat
- visitor inside – jedinec, který se nachází v destinaci

posloupnost stavů je taková:

*individual in homeland* → *potential visitor* → *visitor outside* → *visitor inside*  
 → *visitor outside* → *individual in homeland*

Pro modelování dynamiky šíření epidemie je využit model SIR. Výplata pro jedince, kteří se rozhodnou cestovat, je vyjádřena jako (25):

$$E_1 = -\alpha\phi(p; P)r_1 \quad (25)$$

Pro jedince, kteří se rozhodnou necestovat, je výplatní funkce (26):

$$E_0 = -r_0 \quad (26)$$

Kde  $\alpha$  je pravděpodobnost epidemie v oblasti cesty,  $\phi(p; P)$  pravděpodobnost nakažení cestovatele a  $r_x$  je pravděpodobnost nakažení. Pravděpodobnost nakažení je závislá na parametru  $R_0$  (reprodukční číslo). Výplatní funkce (27) pro smíšené strategie populace je součtem strategií  $E_1$  zvolených s pravděpodobností  $p$  a  $E_0$  zvolených s pravděpodobností  $(1 - p)$ :

$$E(p, \rho; P) = pE_1 + (1 - p)E_0 \quad (27)$$

Při vysokých hodnotách těchto parametrů nikdo nechce cestovat, protože je extrémně vysoká pravděpodobnost nakažení a tím i velké riziko snížení veřejného blaha (nakažení více lidí, ekonomické zájmy). Naopak, při nízkých hodnotách těchto parametrů cestují všichni. V úzkém intervalu a při velmi malé změně hodnot parametrů se strategie neshodují. Tato oblast představuje situaci, kdy se cestuje málo, ale celkový počet cestujících by mohl být větší, a naopak.

### 3.2.3 Využití osobních ochranných pomůcek

Mezi nejznámější osobní ochranné pomůcky, které se používaly během pandemie COVID-19, patřily roušky nebo respirátory. V průběhu času se měnila vládní nařízení a s nimi i parametry používané ochrany. Postupně se zvyšovaly požadavky na ochranné pomůcky a jejich používání bylo povinné na stále větším počtu míst. Zpočátku stačila obyčejná rouška ušitá z látky. Následně se začaly vyžadovat zdravotnické roušky a nakonec respirátory. Postupné zvyšování nároků na ochranu způsobilo růst cen ochranných pomůcek a pro některé jedince se stalo velmi nákladné opustit svůj domov. V hře popsané v článku [30] autoři zkoumají, zda si hráči obléknou roušku nebo ne a jakou ochranu si zvolí. Hra je určena pro dva hráče



a vyskytují se v ní dvě různé typy roušek s odlišnou úrovní ochrany, a tedy i různými náklady na jejich pořízení. Rouška typu „in“ poskytuje dokonalou ochranu proti nakaženému hráči, zatímco rouška typu „out“ chrání ostatní hráče před nakaženým hráčem. Každý hráč může zvolit tři strategie: nosit roušku „in“, nosit roušku „out“ nebo nenosit žádnou roušku. Každá varianta má své náklady, které ovlivňují výplatní matici. V jedné verzi hry se předpokládá, že oba hráči jsou vnímaví (nejsou nakaženi), a ve druhé verzi je jeden z hráčů nakažen.  $C_{out}$  jsou náklady na roušku pro ochranu ostatních,  $C_{in}$  jsou náklady na roušku pro osobní ochranu,  $C_i$  jsou náklady spojené s nakažením.

	no	out	in
no	$(0, 0)$	$(0, C_{out})$	$(0, C_{in})$
out	$(C_{out}, 0)$	$(C_{out}, C_{out})$	$(C_{out}, C_{in})$
in	$(C_{in}, 0)$	$(C_{in}, C_{out})$	$(C_{in}, C_{in})$

Obrázek 9 Výplatní matice pro oba vnímavé [30]

	no	out	in
no	$(C_i, C_i)$	$(0, C_{out} + C_i)$	$(C_i, C_{in} + C_i)$
out	$(C_{out} + C_i, C_i)$	$(C_{out}, C_{out} + C_i)$	$(C_{out} + C_i, C_{in} + C_i)$
in	$(C_{in}, C_i)$	$(C_{in}, C_{out} + C_i)$	$(C_{in}, C_{in} + C_i)$

Obrázek 10 Výplatní matice pro vnímavý, nakažený [30]

Při nastavení parametrů  $C_i \gg C_{in} \gg C_{out}$  ve hře s dvěma vnímavými hráči je Nashova rovnováha nenosit žádnou roušku  $(0, 0)$ , protože jejich výplaty nebudou ovlivněny náklady  $C_{in}, C_{out}$ . Zajímavější je analýza hry s jedním nakaženým hráčem, kde se zohledňují náklady spojené s nakažením, které jsou vyšší než náklady spojené s ochranou. V této situaci je Nashova rovnováha ve strategii  $(C_{in}, 0)$ . Autoři také diskutují o sociálním optimu, které popisuje strategii s nejnižšími náklady a nejmenším zatížením pro společnost. V první hře je sociální optimum stejné jako Nashova rovnováha, zatímco ve druhé hře je rozdílné, protože strategie s nižšími náklady je  $(C_i, C_{out})$ .

Nepřímo spojený s epidemií je článek [1], který popisuje hru, ve které se pokouší zdravotní střediska optimalizovat využití skladových zásob osobních

ochranných pomůcek a nákladů na OOP. Hra je rozdělena na intervaly. Po každém intervalu se hráč rozhodne, jakou strategii zvolí. Strategií je v této hře myšleno kolik OOP objednat, vydat nebo uložit na sklad. Výplatní, v tomto případě nákladová funkce spotřeby vypadá následovně: se zabývá hrou, ve které se zdravotnická zařízení snaží optimalizovat využití svých skladových zásob osobních ochranných pomůcek a náklady spojené s nimi. Hra je rozdělena do intervalů, kde po každém intervalu hráči rozhodují o své strategii, tedy o tom, kolik ochranných pomůcek objednat, vydat nebo uložit na sklad. Výplatní funkcí v této hře je nákladová funkce spotřeby, která je dána vzorcem  $Q = d + a$ , kde  $d$  představuje poptávku po osobních ochranných pomůckách podle počtu léčených pacientů a  $a$  je počet pomůcek, které jsou vloženy nebo vybrány ze skladu. Parametr  $a$  je omezen maximální kapacitou skladu a maximálním počtem vydaných ochranných pomůcek omezených poptávkou a počtem uložených pomůcek. V modelu se předpokládá exponenciální růst nákladů na ochranné pomůcky v závislosti na velikosti poptávky a hra hráče směřuje k stabilitě objednávek, tedy k nízkým a pravidelným objednávkám. Výsledkem optimalizačního problému je tvrzení, že správné strategie řízení zásob (časné objednávky, omezení skladovací kapacity) nezatěžují dodavatelský řetězec a usnadňují celkovou distribuci osobních ochranných pomůcek. To naznačuje, že je výhodné mít vhodný počet osobních ochranných pomůcek skladem a připravených k distribuci při náznacích začínající epidemie.

### 3.2.4 Evoluční hry v epidemiologii

Příkladem využití evolučních her v epidemiologii je popsán v článku [23]. Autoři studovali vzájemný vztah mezi šířením infekce a sklonem lidí ke spolupráci (dodržování opatření). Pracují s epidemiologickým modelem SIRS a replikační rovnicí evolučních her, model nazývají SIRS-RE. Replikační rovnice popisuje sklon lidí k dodržování opatření vzhledem k vývoji a naléhavosti epidemie. Model je založen na hře vězňova dilema a při určitých nastaveních parametrů se chování lidí v této situaci s touto hrou koreluje. Výplatní matice (28) pro interakci hráčů je následující:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & T \\ S & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Kde  $S$  je míra strachu z toho, že druhý hráč nebude spolupracovat, respektive nedodrží pravidla nastavená vládou,  $T$  je pokusení porušit tato pravidla, a 1 a 0 jsou hodnoty při dodržování nebo nedodržování pravidel oběma hráči. Model předpokládá, že míra infekce klesá s počtem hráčů, kteří spolupracují. Ochotu spolupracovat ovlivňuje míra ohrožení (počet infikovaných hráčů). Po vložení replikační rovnice do modelu a provedení simulace bylo zjištěno, že v porovnání s běžným modelem SIRS je snížen vrchol epidemie (peak), nejvyšší počet nakažených, a také celkový počet nakažených v průběhu epidemie.

Článek [4] zapracovává evoluční teorii her do modelu SIR a předpokládá průběh epidemie, kde hráči mohou rozhodnout, zda zvolí strategii sebeizolace nebo budou ignorovat nebezpečí a pohybovat se bez omezení. Hráči volí strategii individuálně na základě vnímaného rizika nemoci v porovnání s náklady na karanténu. Míra nakažení závisí na strategii hráče, zatímco vnímané riziko onemocnění závisí na podílu nakažených hráčů. Výherní funkce pro strategii sebeizolace je rovna nákladům na nemoc:  $\pi_q = -Q$ . Druhá výherní funkce je zatížena pravděpodobností nákazy vynásobenou parametrem vnímaných nákladů na onemocnění ( $\delta$ ):  $\pi_N = -\delta\beta_N I$ . K popisu evoluce a změny strategií hráčů využívá článek Fermiho pravidlo (29):

$$\theta_{(\pi_i, \pi_j)} = \frac{1}{1 + e^{-(\pi_j - \pi_i)/k}} \quad (29)$$

Kde  $\theta_{(\pi_i, \pi_j)}$  se nazývá pravděpodobnost změny strategie,  $\pi_i$  a  $\pi_j$  jsou strategie hráčů a  $k$  je míra šumu.

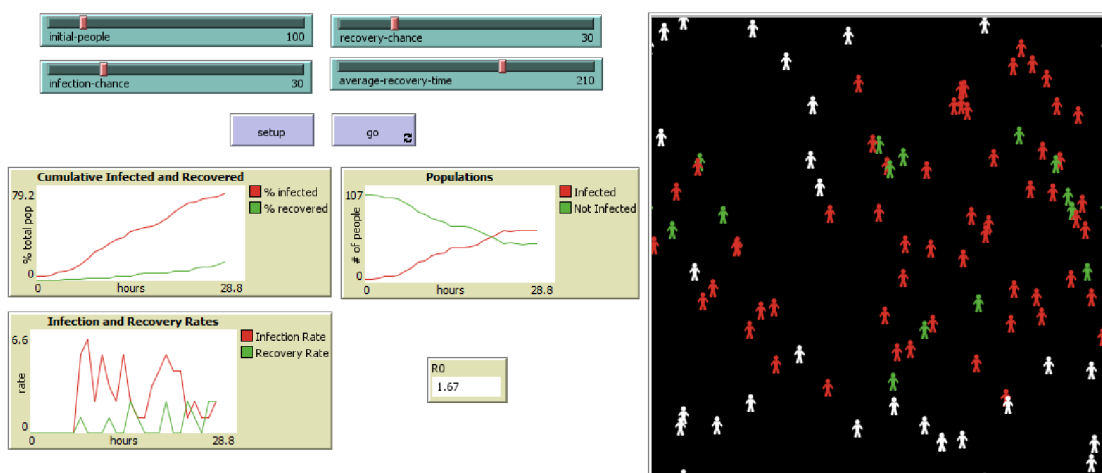
## 4 Přehled epidemiologických modelů v Netlogu

Praktická část práce je vypracována v programu NetLogo a z toho důvodu zde uvedu několik modelů epidemiologických modelů a několik modelů zabývajících se teorií her, které jsou součástí knihovny (Models Library).

### 4.1 *epiDEM Basic*

Model *epiDEM Basic* [44] simuluje šíření nemoci v uzavřené populaci. Uzavřená populace znamená, že v populaci není žádný přírůstek ani úbytek lidí, ani cestování. Model je založen na Kermack-McKendrickův modelu, který popisuje dynamiku přenosu nemoci mezi zdravou populací, která nemá s nemocí žádné zkušenosti. Předpokladem modelu je uzavřená populace a homogenní míchání, což znamená, že každý má stejnou pravděpodobnost setkat se s jinou osobou v populaci. Tento model nezahrnuje latentní a klidové období viru nebo virové mutace, které by mohly ovlivnit jeho chování nebo parametry. Model umožňuje výpočet prahové hodnoty, při které se očekává epidemie. Tato hodnota je známá jako reprodukční číslo. V modelu se agenti náhodně pohybují po světě a při kontaktu s nakaženým agentem existuje pravděpodobnost, že se nenakažený agent nakazí. Kontakt je definován, když se agenti nacházejí vedle sebe nebo na stejném místě. Uživatel může nastavit počet lidí ve světě a také pravděpodobnost nákazy. Nakažený agent se může vyléčit s určitou pravděpodobností po dosažení doby uzdravení. Doba uzdravení každého agenta je určena z normálního rozdělení se střední hodnotou průměrné doby uzdravení. Barvy agentů zobrazují jejich zdravotní stav. Používají se tři barvy: bílí agenti jsou nenakažení, červení agenti jsou nakažení a zelení agenti jsou uzdravení. Po uzdravení jsou agenti trvale imunní vůči viru. Model zobrazuje graf Rychlost změny počtu nakažených a uzdravených, celkové procento nakažených a uzdravených a počty nakažených a nenakažených v čase. V modelu je možné upravovat parametry. Parametr **INITIAL-PEOPLE** udává počáteční počet agentů v populaci. Pravděpodobnost nákazy je **INFECTION-CHANCE** tedy pravděpodobnost, že jednotlivý agent bude infikován. Pravděpodobnost uzdravení agenta udává **RECOVERY-CHANCE**. Průměrnou dobu uzdravení představuje **AVERAGE-**

**RECOVERY-TIME**, tedy časový interval, který je typicky potřebný pro uzdravení infikovaného agenta.

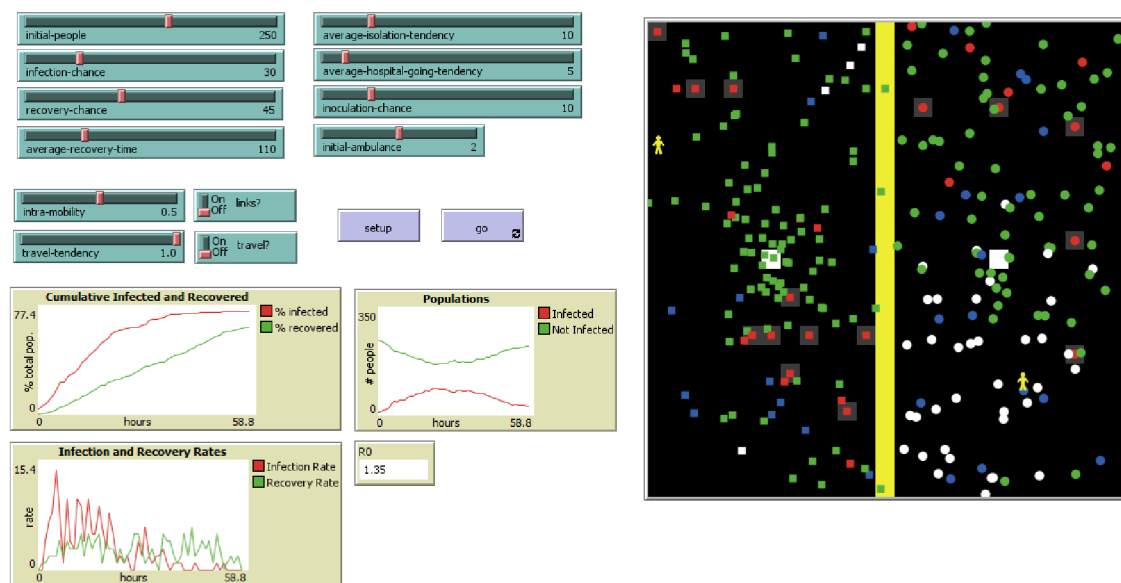


Obrázek 11 Netlogo - epiDEM basic [vlastní]

## 4.2 epiDEM Travel and Control

Model epiDEM Travel and Control [45] je rozšířením základního modelu epiDEM a simuluje šíření nemoci v polouzavřené populaci s dalšími prvky, jako je cestování, izolace, karanténa, očkování a vazby mezi jednotlivci. Jedinci, kteří se úspěšně uzdraví, nemohou být znovu infikováni. V modelu se agenti pohybují náhodně a jsou rozděleni do dvou skupin. Jedni jsou znázorněni čtvercem a druzí kruhem. Nemoc se šíří kontaktem, který je znázorněn žlutou čarou. Agenti jsou barevně rozlišováni: bílí jsou zdraví, červení jsou nakažení, zelení jsou uzdravení a modří jsou očkováni. Plocha je rozdělena žlutým pásem, který představuje hranici pohybu agentů. Agent má možnost rozhodnout se mezi následujícími možnostmi. První možnost je izolovat se doma: Agent se rozhodne zůstat doma a izolovat se od ostatních. Tím se snižuje riziko dalšího šíření nemoci a kontaktu s nakaženými jedinci. Za druhé může jít do nemocnice: Agent se rozhodne vyhledat pomoc a jde do nemocnice. Tam bude poskytnuta lékařská péče a případně podstoupí vhodnou léčbu nebo karanténu. Třetí možností je být umístěn do nemocnice: V případě těžkého stavu nebo vysokého rizika pro ostatní jedince může být agent umístěn do nemocnice proti své vůli. Tím se zajišťuje izolace a léčba v kontrolovaném prostředí. Poslední možnost

je pokračovat v pohybu: agent se rozhodne nepřijmout žádná opatření a pokračovat ve svém pohybu a každodenních aktivitách. Tím zvyšuje riziko dalšího šíření nemoci a kontaktu s nakaženými jedinci. Po umístění agenta do samoizolace se kolem něj objeví šedivý čtverec. Po ploše se pohybuje zdravotník, symbolizovaný žlutým panáčkem, který při kontaktu s nakaženým agentem reaguje a přepravuje jej do nemocnice. Zdravotník je imunní vůči nemoci a nedoprovází nakaženého do nemocnice, může tedy pokračovat ve svém poslání. Zdravotníci se pohybují pětkrát rychleji než běžní agenti. V nemocnici jsou agenti vyléčeni dvakrát rychleji. Grafy zobrazené v modelu zahrnují: Rychlost změny počtu nakažených a uzdravených, celkové procento nakažených a vyléčených a počty nakažených a nenakažených v čase. V modelu je možné upravovat následující parametry. Parametr **INITIAL-PEOPLE** udává celkový počet lidí v simulaci. **INFECTION-CHANCE** je pravděpodobnost přenosu nemoci z jednoho agenta na druhého. Parametr **RECOVERY-CHANCE** udává pravděpodobnost, že se agent uzdraví dříve, než uplyne průměrná doba uzdravení. **AVERAGE-RECOVERY-TIME** představuje průměrnou dobu trvání uzdravení. Parametr **AVERAGE-ISOLATION-TENDENCY** je pravděpodobnost, že se agent po infikování sám umístí do samoizolace. **AVERAGE-HOSPITAL-GOING-TENDENCY** udává pravděpodobnost, že se infikovaný agent rozhodne vyhledat nemocnici. **INITIAL-AMBULANCE** určuje počet zdravotníků ve hře. Parametr **INOCULATION-CHANCE** je pravděpodobnost, že agent bude očkovan a zabrání tak infekci. **INTRA-MOBILITY** určuje vzdálenost, kterou agent urazí za jednotku času v rámci svého prostředí. **LINKS** umožňuje náhodné propojení mezi agenty, čímž se zrychlí šíření nemoci. **TRAVEL** určuje, zda mají agenti možnost cestovat mezi různými regiony ve světě. **TRAVEL-TENDENCY** je pravděpodobnost s jakou se agenti rozhodnou cestovat do jiného regionu.

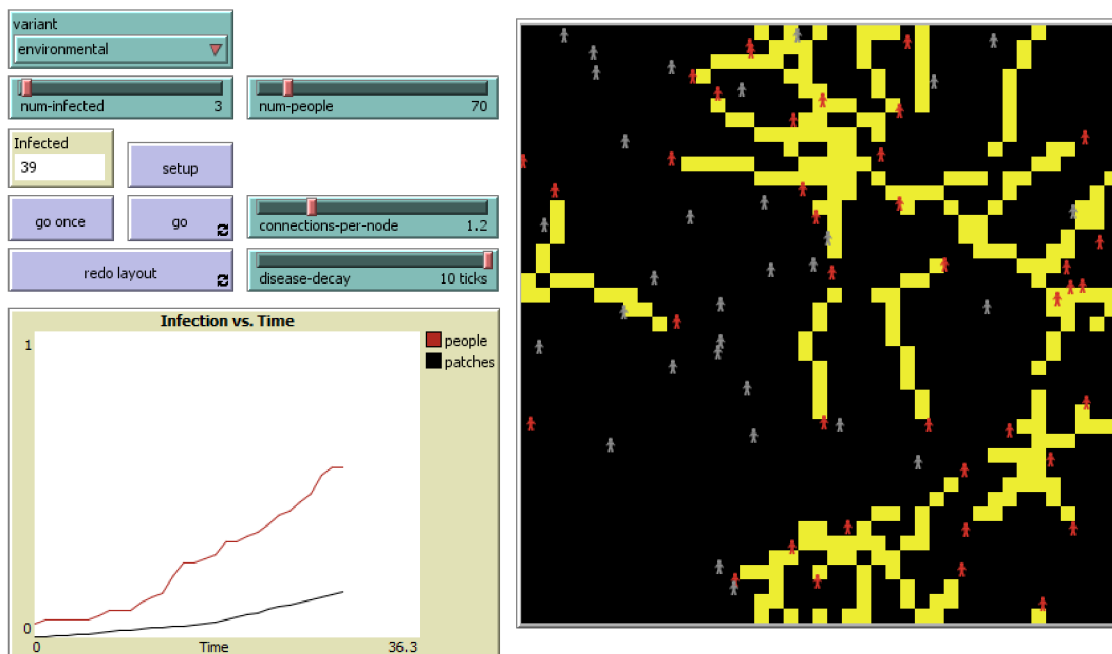


Obrázek 12 NetLogo - epiDEM travel and Control [vlastní]

### 4.3 Spread of Diseases

Model Spread of Diseases [31] zkoumá šíření nemocí v různých podmínkách a prostředích. Jeho hlavním cílem je studovat, jaké předpoklady a interakce mezi agenty mohou zásadně ovlivnit výsledky modelu. Agenti se pohybují v souladu s nastavením proměnné **VARIANT**. Pokud je zvolena možnost Network, agenti se pohybují v rámci své sítě, sociální bubliny, která také přispívá k šíření nemoci mezi agenty v této síti. Pokud je zvolena možnost Mobil nebo Enviromental, agenti se pohybují náhodně po krajině. Volba Enviromental také umožňuje šíření nemoci po krajině, kdy agent za sebou zanechává nemoc, která trvá po dobu nastavenou v parametru **DECEASE-DECAY**. Graf, který je zobrazen v modelu, prezentuje vztah mezi infekcí a časem, což umožňuje sledovat šíření nemoci v průběhu času. V modelu je možné upravovat následující parametry. Parametr **NUMBER-PEOPLE** určuje počet agentů v populaci, tedy kolik jedinců se bude nacházet v simulaci. **INFECTIOUSNESS** určuje míru nakažlivosti nemoci a rychlost, jakou se může šířit mezi agenty. Vyšší hodnota znamená vyšší pravděpodobnost přenosu nemoci. **CHANCE-RECOVER** udává pravděpodobnost, že se agent zotaví a stane se imunním vůči nemoci. Vyšší hodnota značí vyšší pravděpodobnost uzdravení. **DURATION** určuje dobu, po kterou je agent nakažlivý pro své okolí. Znamená, jak dlouho může šířit infekci na ostatní agenty před uzdravením nebo získáním imunity. **TURTLE-**

**SHAPE** ovlivňuje vzhled agentů v simulaci. Může být nastaven jako panák nebo kolečka. Tato úprava se týká pouze vizuální reprezentace agentů a nemá vliv na jejich chování ani interakce.



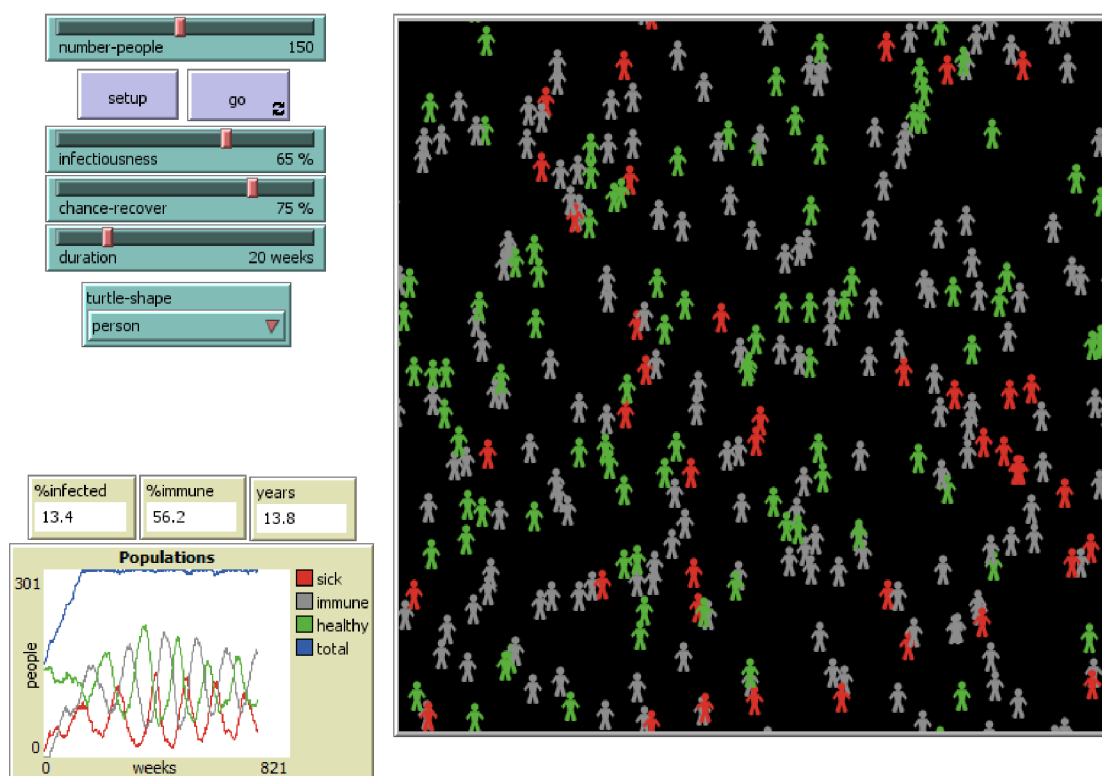
Obrázek 13 NetLogo – Spread of Diseases [vlastní]

#### 4.4 Virus

Model Virus [40] simuluje přenos a šíření viru v lidské populaci. Agenti se pohybují náhodně a jsou generováni s náhodným stářím. Ve simulaci jsou tři druhy agentů. Zelení agenti jsou zdraví a náchylní k nemoci, červení jsou nemocní a nakažení, šedí jsou zdraví a imunní. Agenti mohou zemřít na nemoc nebo v důsledku stáří. Věk úmrtí je nastaven na 50 let. Agenti mají schopnost plodit další agenty, kteří jsou zdraví a náchylní k nemoci, pokud počet agentů klesne pod únosnou kapacitu prostředí, která je pevně nastavena na 300 agentů. Míra plodnosti je konstantní a každý agent má jedno procento šance na reprodukci. Po vyléčení trvá imunita proti viru 1 rok. Jeden tik systému v modelu odpovídá jednomu týdnu. Během simulace můžeme sledovat procento nakažených, imunních a uplynulých let. Graf, který je zobrazen v modelu, prezentuje vývoj populace v čase, zahrnující počty nakažených, zdravých, imunních a celkový počet agentů. V modelu je možné upravovat následující parametry. **NUMBER-PEOPLE** určuje počet agentů v populaci, tedy kolik



jedinců se bude nacházet v simulaci. **INFECTIOUSNESS** určuje nakažlivost nemoci a rychlost, jakou se může šířit mezi agenty. Vyšší hodnota znamená větší pravděpodobnost přenosu nemoci. **CHANCE-RECOVER** udává pravděpodobnost, že se agent zotaví a stane se imunním vůči nemoci. Vyšší hodnota znamená vyšší pravděpodobnost uzdravení. **DURATION** určuje dobu, po kterou je agent nakažlivý pro své okolí. Znamená, jak dlouho může šířit infekci na ostatní agenty, než se uzdraví nebo se stane imunním. **TURTLE-SHAPE** ovlivňuje vzhled agentů v simulaci. Může být nastaven jako panák nebo kolečko. Tato úprava se týká pouze grafického zobrazení agentů a nemá vliv na jejich chování nebo interakce.

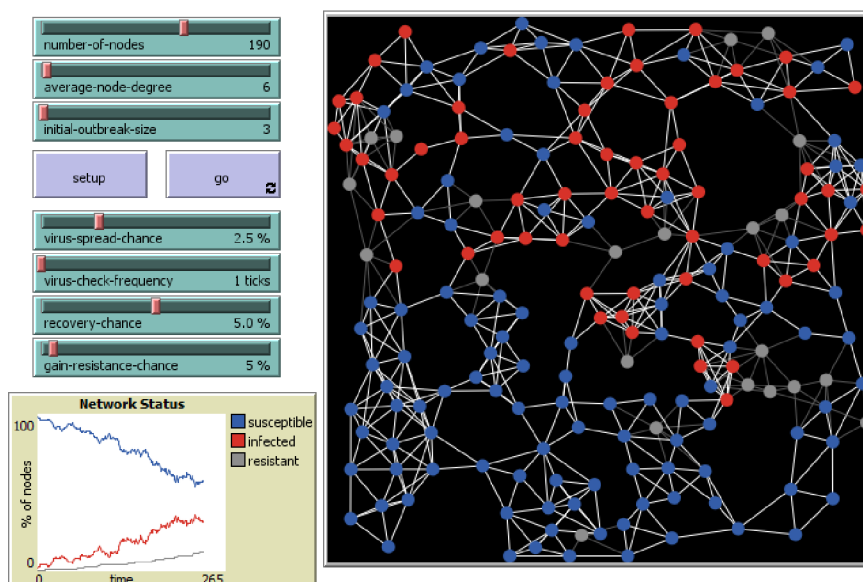


Obrázek 14 NetLogo – Virus [vlastní]

## 4.5 Virus on Network

Model Virus on Network [34] byl původně vytvořen pro modelování napadení počítačové sítě virem, ale lze jej také využít v epidemiologii jako SIR model, který simuluje šíření infekčních chorob. V tomto modelu jsou uzly rozděleny do tří stavů: zdravý, nakažený a imunní. Každý tick modelu reprezentuje určitý časový úsek.

Infikované uzly se v každém ticku pokouší infikovat své sousední uzly s pravděpodobností určenou parametrem **VIRUS-SPREAD-CHANCE**. Imunní uzly nemohou být infikovány. Každý uzel pravidelně kontroluje svůj nakažený stav v časových intervalech určených parametrem **VIRUS-CHECK-FREQUENCY**. Uzly mají také možnost se vyléčit a získat imunitu. Po získání imunity je uzel vyřazen ze sítě a zamezí dalšímu šíření viru tímto uzlem. V modelu jsou zobrazen graf Network Status, který zobrazuje počet napadených, zdravých a imunních uzlů v čase. V modelu je možné upravovat parametry: **NUMBER-OF-NODES** určuje počet uzlů v síti, tedy kolik uzlů bude ve hře přítomno. **AVERAGE-NODE-DEGREE** představuje průměrný počet propojení, tedy kolik spojení má jeden uzel s ostatními uzly v síti. **INITIAL-OUTBREAK-SIZE** určuje počet uzlů, které budou na počátku simulace infikovány, tedy kolik uzlů bude mít na začátku hry nakažený stav. **VIRUS-SPREAD-CHANCE** reprezentuje pravděpodobnost, s jakou se virus šíří z infikovaného uzlu na jiné uzly v síti. **VIRUS-CHECK-FREQUENCY** určuje frekvenci, jak často uzel kontroluje, zda je napaden virem, tedy jak často provádí kontrolu svého stavu. **RECOVERY-CHANCE** představuje pravděpodobnost, že se uzel uzdraví, tedy jaká je pravděpodobnost, že se uzel zvládne zbavit infekce a přejít do stavu imunity. **GAIN-RESISTANCE-CHANCE** značí pravděpodobnost získání imunity po uzdravení, tedy jaká je šance, že uzdravený uzel získá dlouhodobou imunitu proti viru.



Obrázek 15 NetLogo - Virus on a Network [vlastní]

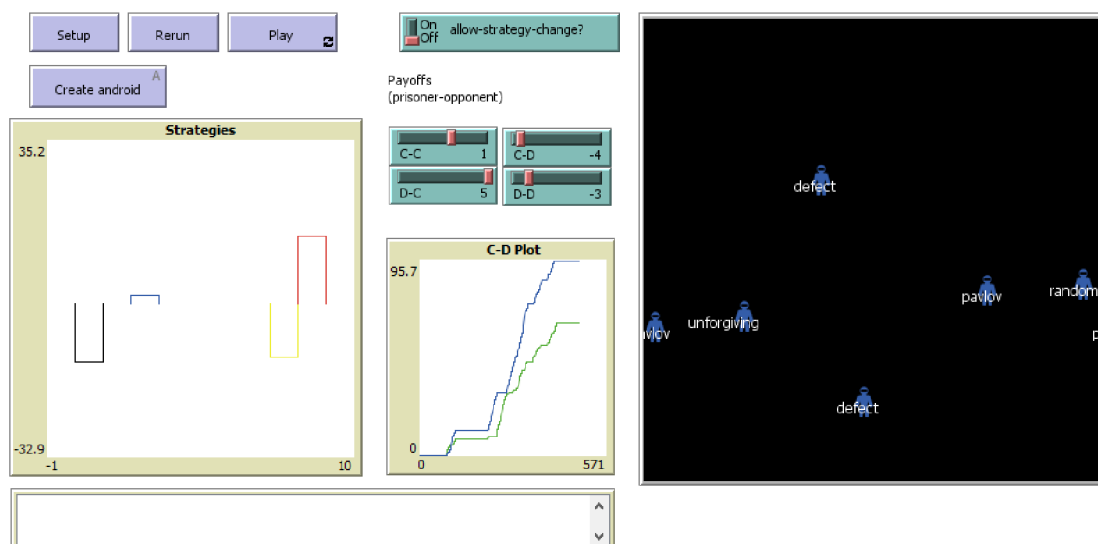
## 4.6 Přehled herně teoretických modelů zmíněných v textu

### 4.6.1 Vězňovo dilema

Nejznámější hrou aplikující teorii her je Vězňovo dilema. Jedná se o nekooperativní jednokolovou hru mezi dvěma hráči, kteří jsou zločinci obviněni z trestného činu a jsou vyslýcháni vyšetřovatelem. Každý zločinec má dvě možnosti: přiznat se k činu nebo ho popírat. Existují čtyři možné kombinace výsledků a trestů, které jsou závislé na rozhodnutí obou hráčů. Například, pokud jeden zločinec zapírá a udá druhého, dostane první zločinec mírný trest jednoho roku a druhý zločinec dostane těžký trest deseti let. Další možností je, že oba zločinci se přiznají, což je odměněno středním trestem pěti let vězení. Pokud oba zločinci popírají čin, hrozí jim oběma trest tří let vězení. Pro zločince vzniká dilema, protože existuje lákavá možnost udání druhého zločince, i když nejlepší strategií pro oba by bylo popírání činu. Výplatou je v tomto případě záporná hodnota délky trestu. V [28] je hra přirovnávána k problémům dvou poskytovatelů internetu s oddělenými sítěmi.

Vícekolová hra umožňuje hráčům experimentovat se strategiemi, protože si mohou pamatovat tah druhého hráče a jednat podle aktuální situace. V roce 1981 byl proveden experiment, který přinesl několik strategií, jako je vždy zapírání, zapírání do té doby, dokud nejsou zrazeni, a strategie „tit for tat“, kdy hráč nejprve zapírá a poté kopíruje strategii protihráče [16]. Model umožňuje generování agentů s předem stanovenou strategií, kteří se pohybují v poli s danou strategií. Model také umožňuje nastavení výplat pro jednotlivé strategie pomocí posuvníku. Existuje několik různých strategií, které agenti v našem modelu mohou mít. Náhodná strategie znamená, že agenti se rozhodují náhodně bez ohledu na předchozí situaci nebo chování ostatních hráčů. **Spolupracující** strategie je charakterizována tím, že agent vždy spolupracuje bez ohledu na to, jak se rozhodne druhý hráč. **Udavačská** strategie znamená, že agent vždy udává druhého hráče bez ohledu na to, jak se rozhodne druhý hráč. Strategie **na základě zkušeností** spočívá v tom, že agent si pamatuje předchozí situace a na základě toho volí, zda se rozhodne spolupracovat nebo ne. Pokud převažuje negativní spolupráce, agent zvolí negativní spolupráci, v opačném případě zvolí pozitivní spolupráci. **Tit for tat** strategie znamená, že agent nejprve spolupracuje a poté kopíruje rozhodnutí druhého hráče. Pokud druhý hráč

spolupracuje, agent také spolupracuje. Pokud druhý hráč zradí, agent také zradí. **Podezřelá „Tit for tat“** strategie je podobná jako „Tit for tat“, ale na začátku zapírá. Agent tedy nejprve zapírá a poté kopíruje rozhodnutí druhého hráče. **„Tit for Two Tat“** strategie spočívá v tom, že agent nejprve spolupracuje. Pokud byl v předchozích dvou kolech zrazen, agent zradí v tomto kole. V opačném případě agent spolupracuje. **Pavlov** strategie znamená, že agent opakuje své předchozí rozhodnutí, pokud byl v minulém kole odměněn (spolupracoval). Pokud byl v minulém kole potrestán (zrazen), agent volí opačnou akci než v předchozím kole. Zpočátku jsou volby náhodné. **Neodpouštějící** strategie spočívá v tom, že agent spolupracuje, dokud není zrazen. Jakmile je agent zrazen druhým hráčem, už nikdy nepřejde zpět k spolupráci a nadále zradí všechny následující kola [42].



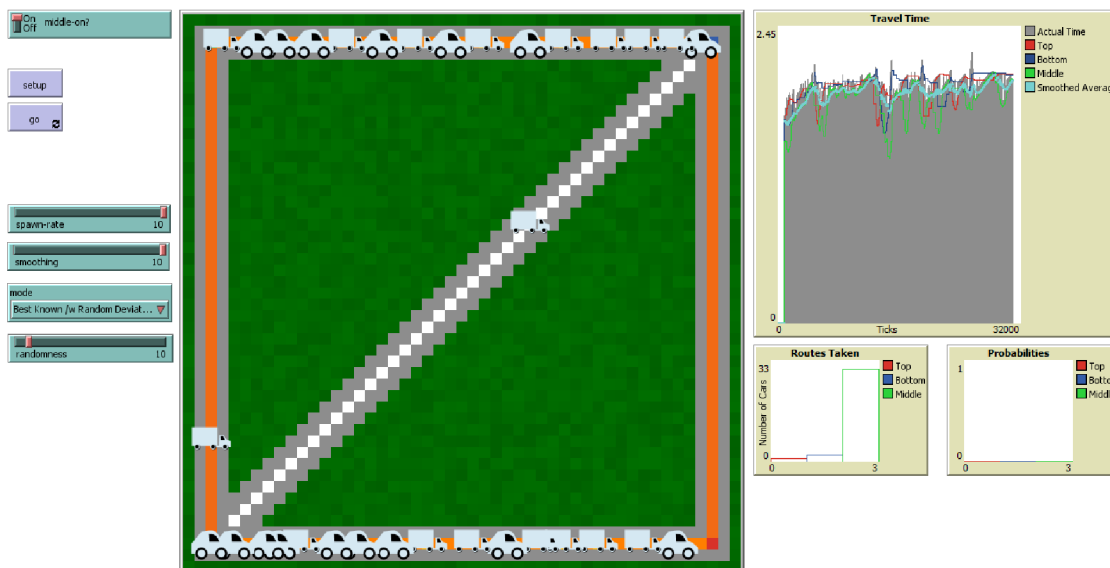
Obrázek 16 NetLogo - Prisoners Dilemma [vlastní]

#### 4.6.2 Braessův paradox

V roce 1968 německý matematik D. Braess vysvětlil nečekané zhoršení dopravní situace ve Stuttgartu, které nastalo po rozšíření silniční sítě. Tento jev byl pojmenován Braesův paradox. Braessův paradox ukazuje, že přidání nových cest nemusí vždy zlepšit dopravní situaci, ale naopak ji může zhoršit. Například, pokud není postavena silnice mezi bodem A a bodem B, lidé budou jezdit přes bod A nebo bod B. Očekává se, že řidiči chtějí dorazit do cíle co nejrychleji, a tak se rovnoměrně rozdělí mezi ty, kteří volí trasu přes bod A a ty, kteří volí trasu přes bod B. Pokud je však postavena zkratka, která zkracuje dobu cesty z bodu A do bodu B, celkový čas potřebný k dojetí do cíle se může zvýšit kvůli nadměrnému využívání této zkratky, která byla původně pro řidiče výhodná.

Podobný problém byl řešen v New Yorku, kde vědci dospěli k závěru, že uzavření ulice Broadway pro automobily by zlepšilo dopravní situaci ve městě. Tento jev byl také použit k analýze elektrické rozvodné sítě v Británii, kde se hledaly přetížené části sítě [27]. Tento model demonstruje neintuitivní důsledek Braesova paradoxu v dopravní síti. V grafu je možné identifikovat množinu stabilních strategií, tedy preferovaných tras, kterými agenti projíždějí. Agenti jsou generováni na výchozím uzlu dopravní sítě v levém horním rohu a jsou zobrazeni jako automobily. Všichni agenti se řídí stejnými pravidly. Při výběru trasy využívají agenti pravděpodobnost, kterou se rozhodnou jet po dané silnici, ještě před samotným začátkem cesty. Pohybují se po jednotlivých čtvercových políčkách silnic a v každém políčku setrvávají po určitý počet tiků, než přejdou na další políčko. Když dosáhnou cílového uzlu, zaznamenají svou cestu a celkový počet čtvercových políček, které na cestě strávili. Tyto informace jsou použity k vytvoření reportu, který je poté využit novými agenty při volbě trasy. V modelu existují dva typy silnic: silnice se statickými náklady a silnice s dynamickými náklady. Silnice se statickými náklady vyžadují, aby automobil setrval na daném úseku po pevně stanovenou dobu než pokračuje dále. Silnice s dynamickými náklady vyžadují, aby automobil setrval na daném políčku po dobu, která je závislá na počtu políček od posledního obsazení agentem, což simuluje dopravní zácpy. V modelu je také přepínač, který umožňuje otevírat nebo uzavírat střední cestu z políček silnic s téměř nulovými náklady. Způsob, jakým

agenti využívají informace, závisí na zvolené možnosti a může být náhodný, empirický nebo „Probabilistic Greedy“. Je možné upravovat parametr „smoothing“, který určuje, z kolika předchozích cest se volí nejlepší cesta a jakou váhu mají tyto záznamy. Při hodnotě 1 je rozhodování založeno pouze na poslední cestě [32].



Obrázek 17 NetLogo - Braess paradox [vlastní]

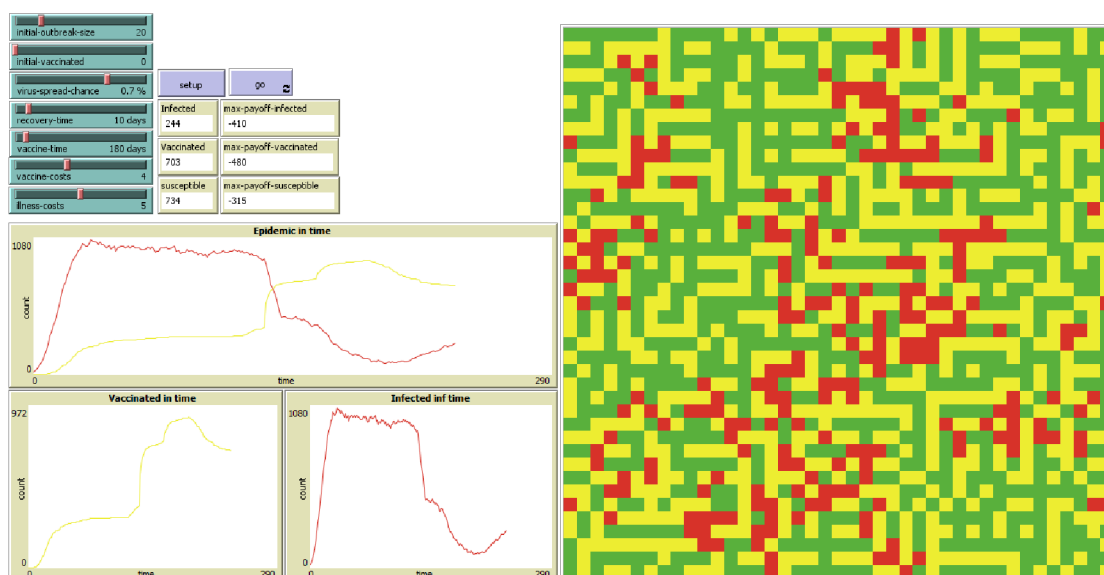
## 5 Praktická část

### 5.1 Návrh modelu a implementace

Pro následující popis modelu je využita struktura ODD (Overview, Design concepts, Details) protokolu [48], který vznikl pro potřeby jednotného popisu agentových modelů.

#### 5.1.1 Účel a vzory

Cílem je vytvořit epidemiologický model s využitím teorie her, přičemž budou zachyceny interakce mezi jednotlivými jedinci a dopady jejich rozhodnutí na šíření nemoci. Z hlediska teorie her se jedná o vakcinační hru, kdy se hráči rozhodují, zda se nechají očkovat, a to na základě určitých parametrů, které se vyvíjí v průběhu epidemie. Model umožní pochopit, jak různé nastavení parametrů ovlivní chování a výběr strategie hráčů a jak počty očkovaných jedinců ovlivňují šíření nemoci. Vzorem pro vytvořený model je model Virus on Network [34], ze kterého jsou čerpány některé komponenty.



Obrázek 18 Celkové grafické rozhraní modelu [vlastní]

### 5.1.2 Entity, stavové proměnné a měřítko

Model zahrnuje pouze jednu entitu – hráče (jedince z populace), kteří se rozhodují, jak reagovat na vzniklou epidemii nemoci – buď se nechají naočkovat, nebo riskují nákazu chorobou.

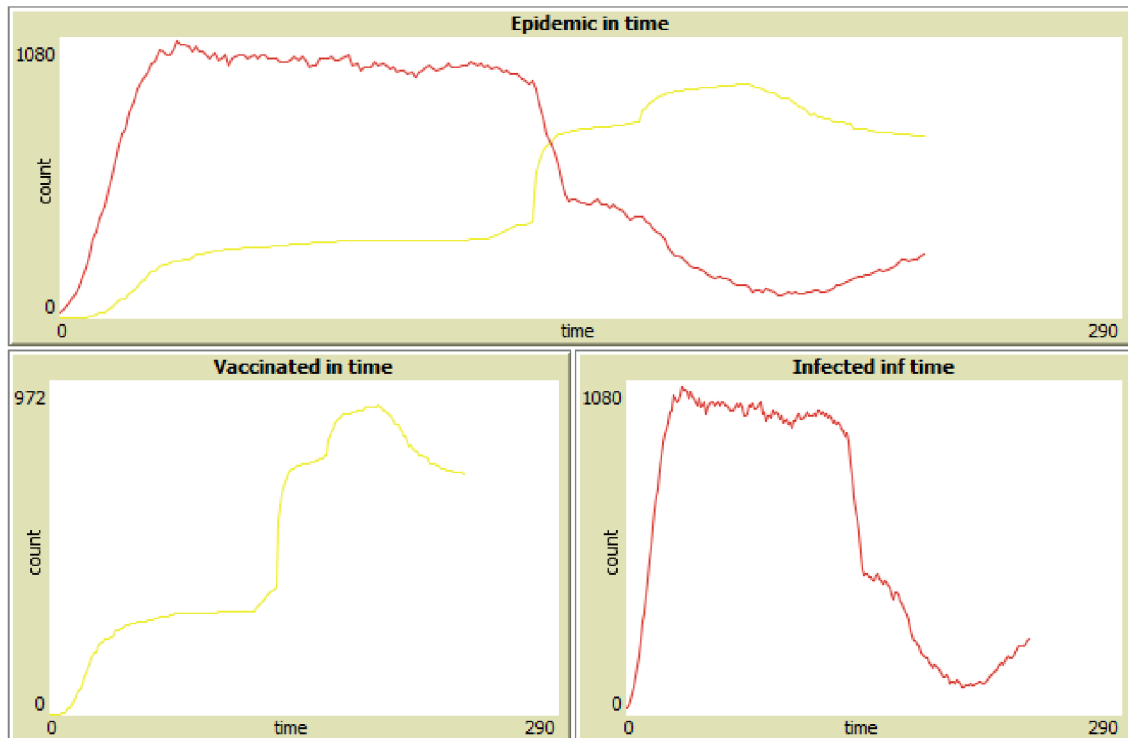
Každý hráč má své parametry: **color-class** určuje barvu hráče v závislosti na jeho stavu. Zelená barva označuje hráče ve stavu „susceptible“ (náchylný k nákaze). Žlutá barva označuje očkovaného hráče, který je chráněn proti nákaze, ale jeho výplata klesá v závislosti na nákladech na očkování. Červená barva reprezentuje nakaženého hráče, který roznáší nemoc mezi hráči ve stavu „susceptible“. Nakaženému hráči klesá výplata o aktuální náklady na nemoc a nemůže se očkovat. Logická proměnná **infected** nabývá hodnoty TRUE nebo FALSE, která značí, zda je hráč nakažený. Proměnná **vaccinated** je logická proměnná nabývající hodnoty TRUE nebo FALSE, která značí, zda je hráč očkovaný. Proměnná **timerr** je použita k počítání času stráveného ve stavu „nemocný“ nebo „očkovaný“. Velikost proměnné **infection-risk** závisí na aktuálním dění kolem hráče, jeho sousedech a na parametrech probíhající epidemie. Proměnná **cost-change** slouží k rozhodování hráčů, zda změni svou strategii a nechají se očkovat. Je porovnávána s proměnnou **cost-unchanged**, která vyjadřuje vůli hrát stávající strategii – neočkovat se. Aktuální výplatu hráče vyjadřuje hodnota **payoff**.

Model obsahuje pět globálních proměnných, ve kterých je uložena informace o aktuálních maximálních výplatách pro všechny tři stavy, incidence a míru přenosu nemoci.

Hráči jsou rozmístěni do čtvercové mřížky, kde každý hráč má 8 sousedů. Hra zahrnuje 1681 hráčů a trvá 2000 kol (nebo skončí v případě vymizení epidemie).

Model obsahuje tři grafy, které slouží v reálném čase ke sledování vývoje epidemie a vývoje počtu zvolených strategií „očkovat se“ (obr.19).





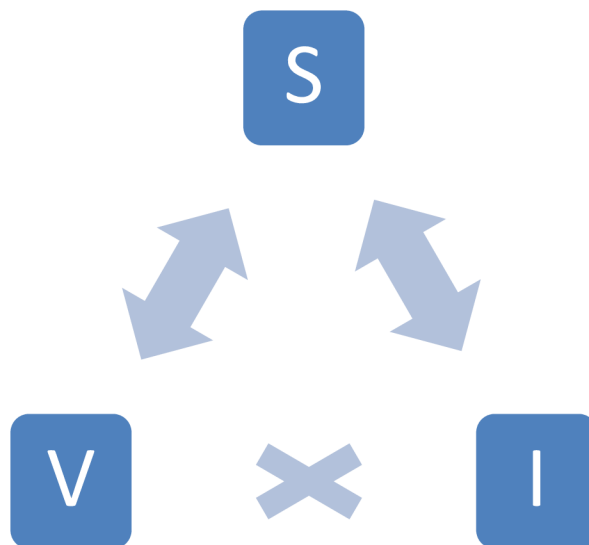
Obrázek 19 Grafy v modelu [vlastní]

### 5.1.3 Přehled procesů a plánování

V proceduře **go** je nejprve zavolána funkce **spread-virus**, která šíří nemoc na sousední hráče a nastaví každému nově infikovanému hráči **timerr** na určenou hodnotu. Poté funkce **become-recovered** provede odečet hodnoty **timerr** a příslušné hráče vyléčí nebo zruší očkovací ochranu. Funkce **calculate-transmission-rate** vypočítá z incidence a prevalence míru přenosu nemoci, která se využívá ve výpočtu nákladů a tedy při výběru strategie. Následně je vypočítána hodnota výplat pro všechny hráče a je uložena největší výplata u každého stavu **calculate-payoff** a **max-payoff**. Poté si každý hráč pomocí **strategy-selection** zvolí strategii a je mu přidělena barva, podle stavu do kterého se dostal **establish-color**. Následuje příkaz **tick**, vynulování ‚incidence‘ a kontrola, zda nemoc nevyvymizela nebo neuběhl časový interval 2000 ticků/dní.

### 5.1.4 Koncepce návrhu

Model je modifikace modelu SIR, kompartmentový model se třemi stavy. Model je tedy spíše SIV (Susceptible, Infected, Vaccinated).



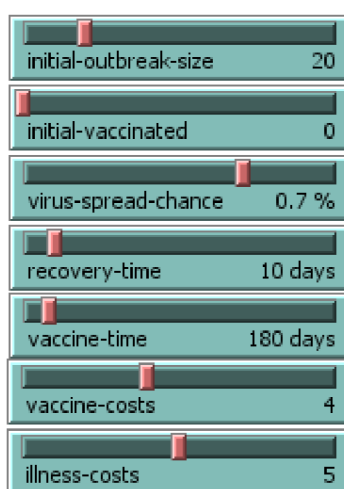
**Obrázek 20 Vytvoření epidemiologický model SIV [vlastní]**

Populace je rozdělena na náchylné jedince, infikované jedince a očkované jedince a hráči mezi nimi prochází za určitých podmínek. Náchylný jedinec se může nakazit nebo se nechat očkovat a získat imunitu. Nakažený hráč se může stát náchylný, ale ze stavu nakažený se nemůže nechat očkovat. Očkovaný hráč se může stát náchylným. Změna stavu očkovaný závisí na zvolené délce ochrany očkovaní. Teoretickoherní část modelu zajišťuje rozhodování hráčů, zda se nechají očkovat nebo ne. Hráč si v každém kole porovná náklady na změnu strategie a na zachování strategie, tedy jestli se nechá naočkovat nebo ne. Hráč, který si zvolí strategii „očkovat se“ platí náklady na očkování. Hráč, který se rozhodne neočkovat se, neplatí žádné náklady, ale může být infikován a v tom případě platí náklady na nemoc po celou dobu nakažení. Nejvyšší teoretickou hodnotou výplaty tedy může být 0, tu by dostal hráč, který by se za celou dobu nenakazil a nenechal očkovat. Hra má konečný počet kol, ale hráči tuto informaci nemají a proto se rozhodují na základě aktuální situace, aktuálního kola. Jedná se tedy o hru symetrickou, iterační a vícekolovou s nedokonalou informací.

### 5.1.5 Inicializace

Simulace začíná příkazem setup a je stejná pro každou simulaci. Mění se pouze vstupní parametry. Vyčištěním všech proměnných. Následně je u všech hráčů nastaven parametr **infected** a **vaccinated** na hodnotu FALSE. Následně jsou náhodně rozmístěni nakažení a očkovaní hráči v přesně definovaném počtu a je jim přiřazena barva, podle stavu ve kterém se nacházejí.

### 5.1.6 Vstupní data



Obrázek 21 Vstupní parametry [vlastní]

Před začátkem simulace je možné nastavit tyto parametry: **initial-outbreak-size** vyjadřuje počet jedinců, kteří jsou nakaženi na začátku šíření epidemie dané nemoci. Parametr **initial-vaccinated** nastavuje počet jedinců, kteří byli očkovaní proti nemoci ještě před začátkem epidemie. Očkovaní jedinci mají odolnost vůči nákaze a mohou pomoci snížit rozsah šíření nemoci tím, že zvyšují povědomí o vakcínách u svých sousedů. Parametr **virus-spread-chance** vyjadřuje procentuální pravděpodobnost, že nakažená osoba přenesení virus na náchylnou osobu. Čím vyšší je tato pravděpodobnost, tím rychleji se nemoc šíří v populaci. Časový údaj **recovery-time** určuje dobu(dny), po kterou trvá, než se nakažená osoba uzdraví a již nešíří nemoc dále. Parametr **vaccine-time** vyjadřuje dobu(dny), po kterou je očkovaná osoba chráněna proti nákaze danou nemocí. Náklady spojené s očkováním jednotlivého jedince proti nemoci jsou nastaveny parametrem **vaccine-costs**. Může

se jednat o finanční náklady, časové náklady nebo další faktory, které ovlivňují ochotu jedinců nechat se očkovat. Parametrem **illness-costs** jsou nastaveny náklady spojené s léčbou a péčí o nakaženého jedince. Tyto náklady mohou zahrnovat lékařskou péči, hospitalizaci, izolaci a další faktory, které souvisejí s průběhem a léčbou nemoci. Náklady jsou bezrozměrné poměrové veličiny nabývající hodnot 1-10.

### 5.1.7 Submodely

Procedura **establish-color** nastaví **barvu hráče na základě stavu**:

Stav	podmínka
Zelená	infected = FALSE; vaccinated = FALSE
Žlutá	vaccinated = TREU; infected = FALSE
Červená	infected =TREU; vaccinated = FALSE

**Tabulka 1 Establish-color**

Procedura **become-infected** nastaví parametry hráče:

Proměnná	Hodnota
infected	TREU
vaccinated	TRUE

**Tabulka 2 Become-infected**

Procedura **become-vaccinated** nastaví parametry hráče:

Proměnná	Hodnota
infected	FALSE
vaccinated	TRUE

**Tabulka 3 Become-vaccinated**

Procedura **become-susceptible** nastaví parametry hráče:

Proměnná	Hodnota
infected	FALSE
vaccinated	FALSE

**Tabulka 4 Become-susceptible**

O šíření viru se stará procedura **spread-virus**, která je převzata a upravena z modelu Virus on Network [34]. Procedura zkontroluje, zda je hráč ve stavu susceptible a poté podle parametru **virus-spread-chance** nakazí sousední hráče a zvýší incidenci o počet nově nakažených hráčů.

```

to spread-virus
  ask patches with [infected? = true and vaccinated = false]
  [ ask neighbors with [vaccinated = false and infected? = false]
    [ if random-float 100 < 10 * virus-spread-chance
      [ become-infected
        set incidence incidence + 1 ] ] ]
end

```

Obrázek 22 spread-virus [vlastní]

Proces uzdravení nebo vyprchání ochrany vakcíny zajišťuje procedura **become-recovered**.

```

to become-recovered
  ask patches with [infected? = true and timerr > 0 and vaccinated = false]
  [set timerr timerr - 1]
  ask patches with [infected? = true and timerr = 0 and vaccinated = false]
  [become-susceptible]
  ask patches with [vaccinated = true and timerr > 0]
  [set timerr timerr - 1]
  ask patches with [vaccinated = true and timerr = 0]
  [become-susceptible]
end

```

Obrázek 23 Become-recovered [vlastní]

Rozhodování o strategii hráče se provádí v proceduře **strategy-selection**. Nejprve je vypočten parametr **infection-risk**, který udává nebezpečí infekce.

Originální výpočet z článku [22] vypadá následovně (30):

$$\lambda_i = \beta * \frac{N_i^{non}}{N_i^{vac} + N_i^{non}} \quad (30)$$

Kde  $\lambda_i$  je riziko nákazy,  $\beta$  míra přenosu nákazy,  $N_i^{non}$  počet nevakcinovaných sousedů a  $N_i^{vac}$  počet vakcinovaných sousedů.

Pro zohlednění závažnosti situace byla do výpočtu přidána informaci o počtu nakažených sousedů a výsledná rovnice vypadá takto (31):

$$\lambda_i^* = \left( \beta + \frac{N_i^{noninf}}{N_i^{inf} + N_i^{noninf}} \right) * \frac{N_i^{non}}{N_i^{vac} + N_i^{non}} \quad (31)$$

Kde  $N_i^{noninf}$  je počet zdravých sousedů a  $N_i^{inf}$  počet infikovaných sousedů.

Dále jsou vypočteny náklady na změnu strategie, tedy očkovat se a náklady na nechat se očkovat. Článek [22] uvádí nákladovou funkci (32):

$$F'_i(\sigma_i) = (1 + \sigma_i) * r_c + (1 - \sigma_i) * \lambda_i \quad (32)$$

Kde  $F'_i$  je nákladová funkce,  $r_c$  je poměr nákladů a  $\sigma_i$  je hodnota rozhodnutí 1 pro vakcinaci, -1 pro odmítnutí. Z rovnice (32) byli vytvořeny dvě rovnice (33) a (34) pro parametry:

$$cost - change = (1 + \sigma_i) * r_c \quad (33)$$

a

$$cost - unchanged = (1 - \sigma_i) * \lambda_i \quad (34)$$

Na základě porovnání se hráč rozhodne, zda je pro něho v dané situaci dobré nechat se očkovat nebo ne. Při úspěšné vakcinaci se nastaví proměnná **timerr** podle velikosti **vaccine-time**.

Procedura **calculate-payoff** vypočte hráči výplatu. Pro infikovaného hráč podle rovnice (35):

$$payoff = payoff - illness\_costs \quad (35)$$

Pro očkovaného hráče podle rovnice (36):

$$payoff = payoff - vaccine\_costs \quad (36)$$

```
to calculate-payoff
  if infected? = true [set payoff payoff - illness-costs]
  if vaccinated = true [set payoff payoff - vaccine-costs ]
end
```

Obrázek 24 Calculate-payoff [vlastní]

V každém kroku jsou tedy odečteny náklady podle stavu od aktuální výplaty.

Procedura **max-payoff** najde a uloží do globálních proměnných nejvyšší výplaty hráčů podle jejich stavu.

```
to max-payoff
  ask patches with [infected? = true and vaccinated = false]
  [set max-payoff-infected [payoff] of max-one-of patches with [infected? = true and vaccinated = false] [payoff]]
  ask patches with [infected? = false and vaccinated = false]
  [set max-payoff-susceptible [payoff] of max-one-of patches with [infected? = false and vaccinated = false] [payoff]]
  ask patches with [infected? = false and vaccinated = true]
  [set max-payoff-vaccinated [payoff] of max-one-of patches with [infected? = false and vaccinated = true] [payoff]]
end
```

Obrázek 25 Max-payoff [vlastní]

Infected	max-payoff-infected
244	-410
Vaccinated	max-payoff-vaccinated
703	-480
susceptible	max-payoff-susceptible
734	-315

Obrázek 26 Zobrazení počtů hráčů v kategoriích a jejich max výplaty [vlastní]

Poslední částí je procedura **calculate-transmission-rate**. Míra přenosu je vypočtena jako podíl incidence a prevalence. Když nejsou žádné nové případy, tak se míra přenosu nastaví na 0.

```
to calculate-transmission-rate
  if incidence > 0 [set transmission-rate incidence / count patches with [infected? = true] ]
  if incidence = 0 [set transmission-rate 0]
end
```

Obrázek 27 calculate-transmission-rate [vlastní]

## 5.2 Experimenty

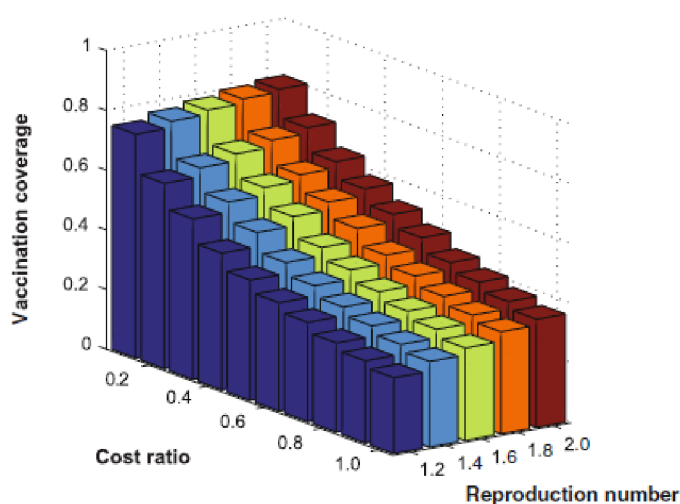
V této části budou provedeny experimenty s modelem a výsledky budou porovnány s výsledky vědeckých článků popsaných v kapitole 3.2. Výsledky a postupy ve vědeckých člancích budou zjednodušeny na úroveň, kterou bude model schopný replikovat. Experimenty byly provedeny v prostředí BehaviorSpace v programu NetLogo.

### 5.2.1 Experiment 1

Experiment slouží k porovnání vytvořeného modelu s výsledky z článku [22]. Z toho článku pochází vzorec na výpočet nákladů a tudíž i rozhodovací vzorec pro hráče, kteří se rozhodují mezi strategií nechat se očkovat nebo vyčkávat. Zkoumá se, zda existuje závislost mezi výší relativních nákladů na nemoc, nákladů na očkování a procentem proočkování populace při dobrovolném očkování? Článek uvádí závislost mezi pokrytím vakcíny na poměru nákladů. Podrobný popis je uveden v kapitole 5.1.

Při reprodukčním čísle 2 a poměru nákladů 1 je celkově naočkována 20 % populace. Simulace udává, že při poměru nákladů 0,8 je pokrytí větší než 70 %.

Budou výsledky vytvořeného modelu totožné s výsledky simulace? Simulace neuvažuje konečnou dobu ochrany očkování. Je tedy nastavena na hodnotu 2100, aby byla zajištěna ochrana po celou dobu simulace. Reprodukční číslo je z důvodu jednoduchosti v modelu nahrazeno procentuální šancí nakažení. Experiment je proveden pro procentuální šanci nakažení 0,7, 0,6, 0,5, 0,4 a 0,3. V prostředí BehaviorSpace bylo spuštěno 5 experimentů. V každém experimentu proběhlo 10 simulací se stejným poměrem nákladů a následně byl spočítán průměr a zanesen do tabulek a grafu v kapitole 6. Dále bude experimentem ověřeno, zda má plošné pokrytí vakcínou vliv na délku trvání epidemie.



Obrázek 28 Výsledky simulace v článku [22]

### 5.2.2 Experiment 2

Článek [7], podrobně popsany v kapitole 3.2.1, představuje hru, kde se hráči musí rozhodnout, zda se nechají očkovat během kteréhokoli týdne pandemie nebo se vůbec nenechají očkovat. Jedna hra trvá 52 týdnů. Očkování v článku [7] poskytuje časově omezenou ochranu. Jedním z výsledků uvedených v článku je, že se přibližně 20 % hráčů rozhodne nechat se vůbec neočkovat. Bude tento výsledek stejný ve vytvořeném modelu?

V experimentu bude hráčům poskytnuta doživotní ochranu očkováním, proto na konci hry zůstanou hráči ve stavu susceptible a infected, kteří se nenechali vůbec očkovat. Součtem obou stavů by mělo být přibližně 20 % celkové populace. Simulace bude provedena s délkou 364 dnů a 2000 dnů. Počet opakování



experimentu je 10 pro každou variantu nastavení. Dále bude v simulaci změněn poměr nákladů podle rovnic uvedených v článku:

$$r_{vac}^k = r_{vac} \ll r_{inf}$$

$$r_{vac}^k = r_{vac} > r_{inf}$$

### 5.2.3 Experiment 3

Cílem experimentu 3 je ověřit cykličnost počtu zvolených strategií očkovat se v závislosti na aktuálním počtu nakažených hráčů a vlivu nákladů na maximální výplaty. Článek [6] podrobněji popsán v kapitole 3.2.1 uvádí, že zvyšující se počet infikovaných jedinců zvyšuje riziko nákazy a jedinci se rozhodují pro časnější očkování. Tím se snižuje počet onemocnění, což následně zvyšuje počet hráčů odkládajících očkování a to způsobí zvýšení počtu infikovaných jedinců. Pro tento experiment nastavíme v modelu náklady na nemoc rovné nákladům na očkování. Pro simulaci takzvaných odkladačů nastavíme konečnou ochranu očkování, protože po vypršení ochrany bude více hráčů náchylných k onemocnění, zvýší se počet nakažených a tím i riziko nákazy. Zvýšené riziko nákazy přesvědčí i dříve neočkované hráče ke změně strategie. Ti hráči, kteří změní strategii a nechají se očkovat, opět sníží nebezpečí nákazy pro ostatní hráče, kteří mohou využít skupinové imunity nebýt v ohrožení a nesnižovat si tak svoji výplatu o náklady na očkování. Délka ochrany bude nastavena na 180 dnů. Počet opakování experimentu je 10. Experiment bude proveden pro tři různé procentuální míry nakažlivosti. Z důvodu ověření vlivu nákladů na maximální výplaty na konci hry bude experiment zopakován se sníženými náklady na očkování.

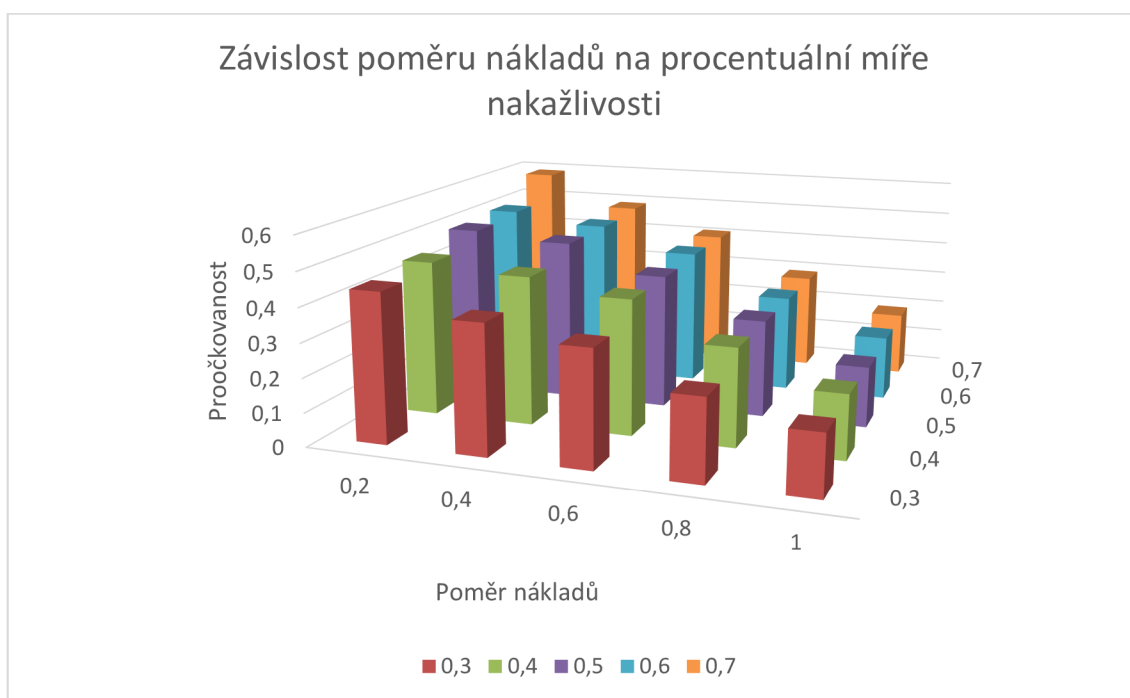
## 6 Výsledky a diskuze

Na základě vytvořeného teoretického podkladu pro výpočetní epidemiologii a teorii her (kapitola 2 a 3.1) byl sestaven výčet a popis modelů zabývajících se probíranou tematikou. Kapitola 3.2 obsahuje popis 17 článků rozdělených do kategorií podle využití protiepidemiologického opatření. Výsledný model vznikl z uvedených modelů v článcích a z modelů představených v kapitole 4. Pro ověření modelu byly navrženy experimenty uvedené v kapitole 5.2.

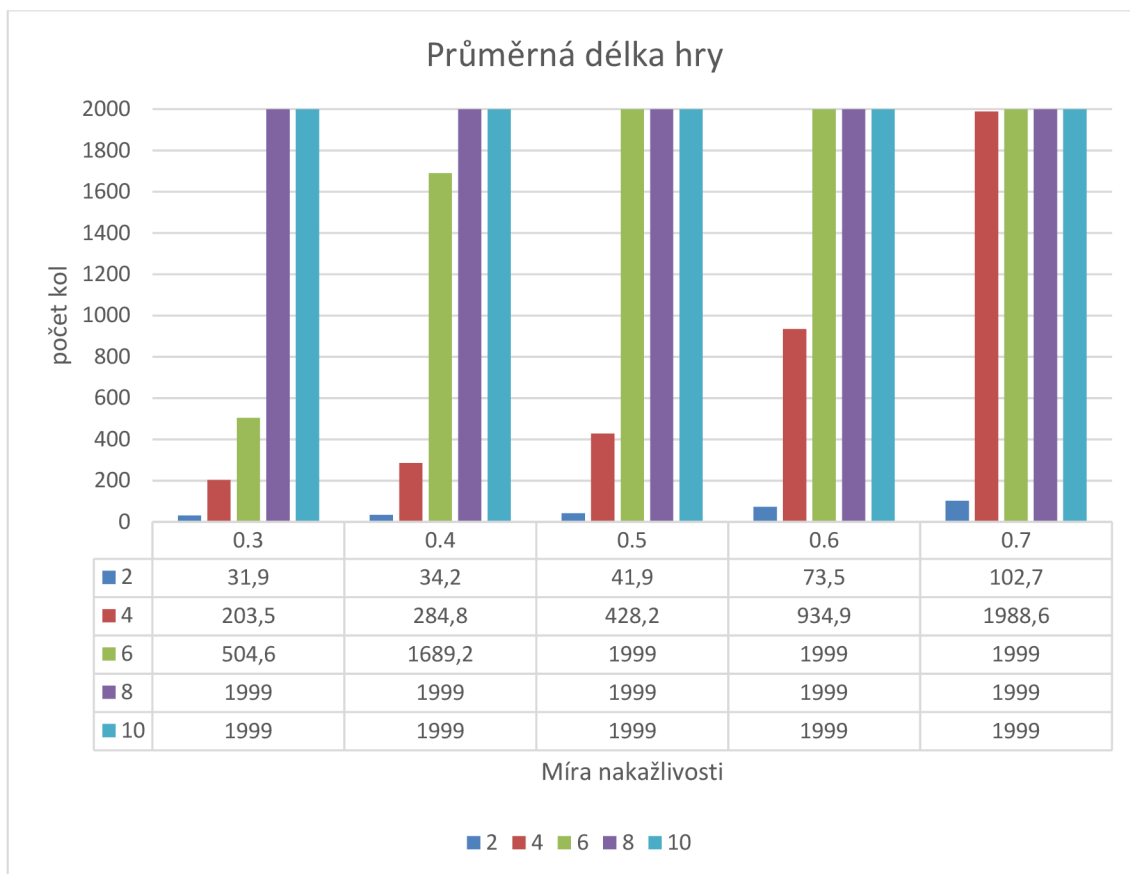
Zde je uvedeno vyhodnocení výsledků modelů. V tabulce č.5 a obrázku č.29 vidíme hodnoty z provedeného experimentu 1. Experiment měl za úkol ověřit, že snižování poměru nákladů na očkování a nákladů na nemoc, tzn. snižování nákladů na očkování, má pozitivní vliv na proočkovanost populace. Výsledky simulací hypotézu potvrzují, hráči tedy volí strategii očkovat častěji, pokud jsou náklady na očkování nižší. Nicméně v některých případech je vidět, že při menší procentuální nakažlivosti je proočkovanost větší nebo stejná než u simulace s větší procentuální nakažlivostí. Tento jev by mohl být způsoben porovnáváním průměrného počtu očkovaných hráčů a malého počtu (10) opakování simulace. Počet očkovaných hráčů se projevil i na délce trvání her. Graf na obrázku č.30 ukazuje závislost délky trvání hry nebo také počet dnů do vymýcení nemoci. Při nejnižších nákladech na očkování 2 se podařilo dostat nemoc pod kontrolu a ukončit hru, před vypršením časového limitu, při všech mírách nakažlivosti. Vyšší náklady na nemoc 4 se projeví prodloužením trvání her, ale při všech mírách nakažlivosti se podařilo nemoc vymýtit. Při nákladech na nemoc 6 skončily hry před časovým limitem při míře nakažlivosti 0,3 a 0,4. Při nákladech na očkování 8 a 10 hráči nezvládli ukončit hry před vypršením časového limitu. Hra tedy potvrdila význam počtu očkovaných nebo jiným způsobem imunizovaných jedinců na urychlení vymizení nemoci z populace. Následně je možné konstatovat, že při zvyšující se nakažlivosti nemoci je pro zastavení nemoci potřeba zvyšování počtu očkovaných jedinců.

Poměr nákladů	0,7		0,6		0,5		0,4		0,3	
	Oočkovan o počet	Oočkovan o %	Oočkovan o počet	Oočkovan o %	Oočkovan o počet	Oočkovan o %	Oočkovan o počet	Oočkovan o %	Oočkovan o počet	Oočkovan o %
1	315	0,19	317	0,19	312	0,18	316	0,19	305	0,18
0,8	494	0,29	493	0,29	491	0,29	485	0,29	415	0,24
0,6	683	0,41	681	0,41	672	0,40	677	0,40	570	0,34
0,4	826	0,49	805	0,48	786	0,48	745	0,44	646	0,38
0,2	990	0,59	869	0,51	845	0,50	777	0,46	742	0,44

Tabulka 5 Experiment 1 - výsledky

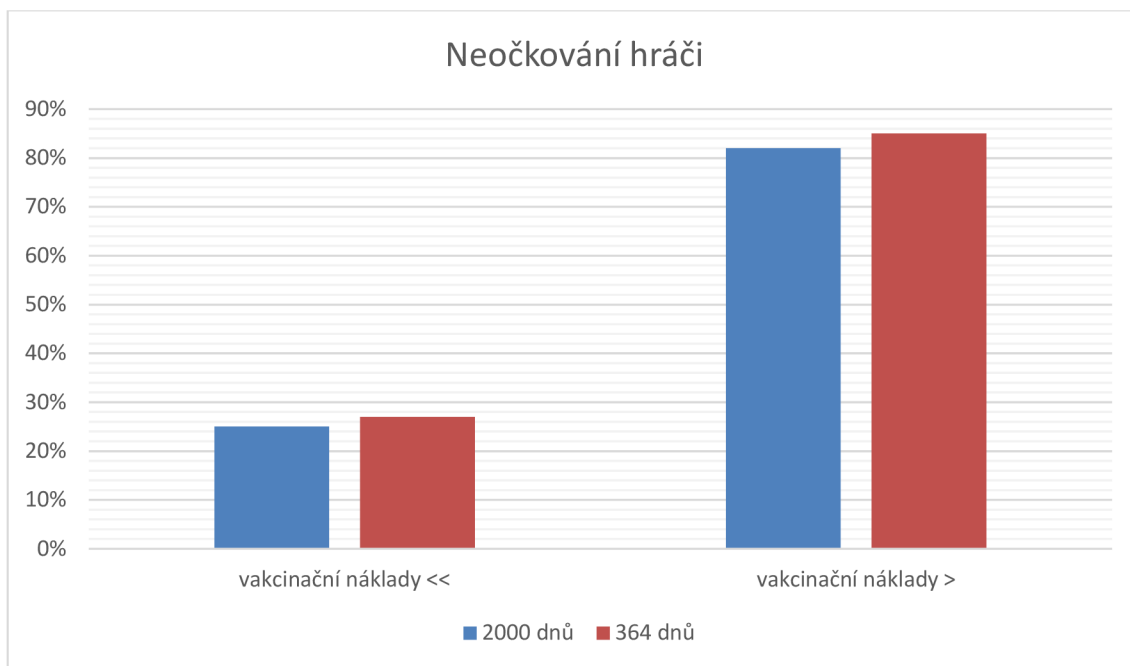


Obrázek 29 Experiment 1 [vlastní]



**Obrázek 30 Experiment 1 - průměrná délka hry [vlastní]**

Výsledky simulace (obr. 31) druhého experimentu jsou zajímavé. Při nastavení nákladů na vakcínu mnohem nižších, než nákladů na nemoc, vyšly výsledky pro 2000 a 364 dnů podobně: 25 % a 27 %. Při nižších nákladech na nemoc, než jsou náklady na vakcínu, vyšla simulace pro 2000 a 364 dnů: 82 % a 85 %. Výsledky simulace se neshodují s výsledky článku [7]. Simulace s mnohem nižšími náklady na očkování se přibližují hodnotám okolo 20 %, ale druhá verze simulace nikoliv. Experiment tedy nevaliduje vytvořený model. Rozdílné výsledky jsou způsobeny jinými postupy při modelování vakcinační hry a přiblížení se výsledkům článku v první verzi simulace bylo překvapivé.



**Obrázek 31 Experiment 2 – neočkovaní hráči [vlastní]**

Grafy na obrázku č.32 a č.33 ukazují cyklické výkyvy v počtu očkovaných v závislosti na počtu nakažených. Míra nakažlivosti hraje roli v počátečním nástupu epidemie a určuje maximální počet očkovaných hráčů a mírně ovlivňuje velikost amplitudy počtu hráčů. Ze začátku je amplituda výkyvu větší a má klesající tendenci. K úplnému ustálení počtu očkovaných však nedochází. Zvyšující se riziko nákazy stoupá s počtem nakažených a navyšuje tak náklady na nemoc a nutí tím hráče ke zvolení strategie neočkovat se. Zvyšující se počet očkovaných hráčů naopak snižuje náklady na očkování a hráči tím brání šíření viru. Experiment potvrdil cykličnost počtu zvolených strategií očkovat se v závislosti na aktuálním počtu nakažených hráčů. Zajímavé výsledky ukazuje graf na obrázku č.34. V případě míry nakažlivosti 0,5 je maximální výplata při ukončení hry u hráče ve stavu vnímavý. Při míře nakažlivosti 0,6 a 0,7 se průměrný rozdíl maximálních výplat mezi oběma strategiemi zmenšil (tabulka č.6) a maximální výplata na konci hry náleží nakaženému hráči. To znamená, že se více hráčů rozhodlo hrát strategii očkovat se a chránit se tak před nemocí, která byla u důvodu vyšší nakažlivosti nebezpečnější. K porovnání maximálních výplat byl experiment zopakován s hodnotou nákladů na očkování 2. Tabulka č.7 ukazuje rozdíl maximálních výplat na konci hry mezi očkovaným a neočkovaným hráčem. Rozdíly mezi výplatami se snížily ve dvou

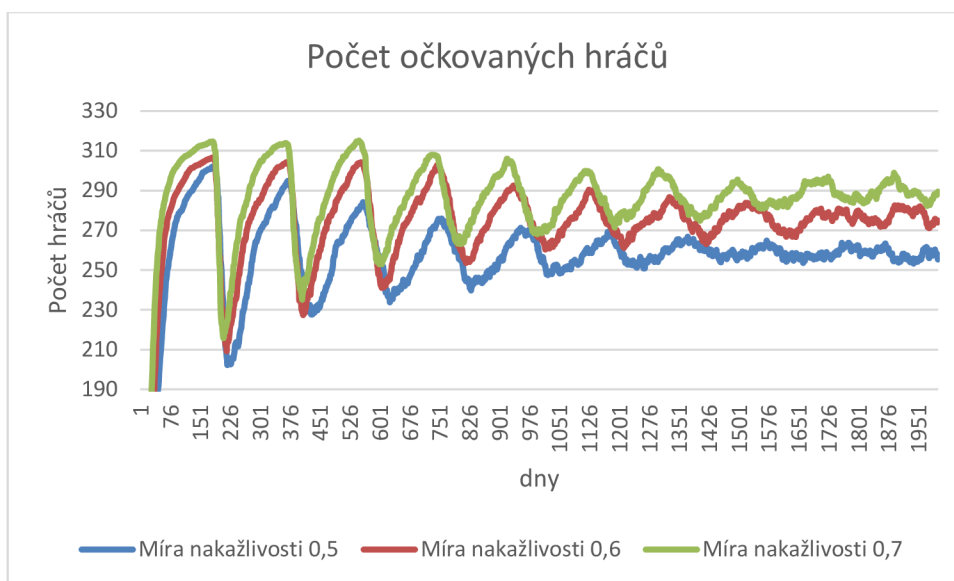
případech míry nakažlivosti 0,5 a 0,7. Zvýšený rozdíl při míře nakažlivosti 0,6 může být způsoben rozložením očkovaných hráčů na hrací ploše, kteří poskytují ostatním hráčům skupinovou imunitu a ti se nemusí očkovat a neplatí náklady na očkování. Dále je možné že byla nemoc uzamčena pouze v určité části populace a zbytek hráčů tedy neměl potřebu se před nemocí chránit. Graf na obrázku č.35 zobrazuje důležitost snížených nákladů na očkování a u míry nakažlivosti 0,6 a 0,7 se projevila na celkové maximální výplatě, která je nejnižší u hráčů, kteří častěji volili strategii neočkovat se a byli častěji nemocní.

	max-payoff-vaccinated	max-payoff-susceptible	Rozdíl
0,5	-5694,5	-5355	-339,5
0,6	-6237,5	-6048	-189,5
0,7	-6703,5	-6462	-241,5

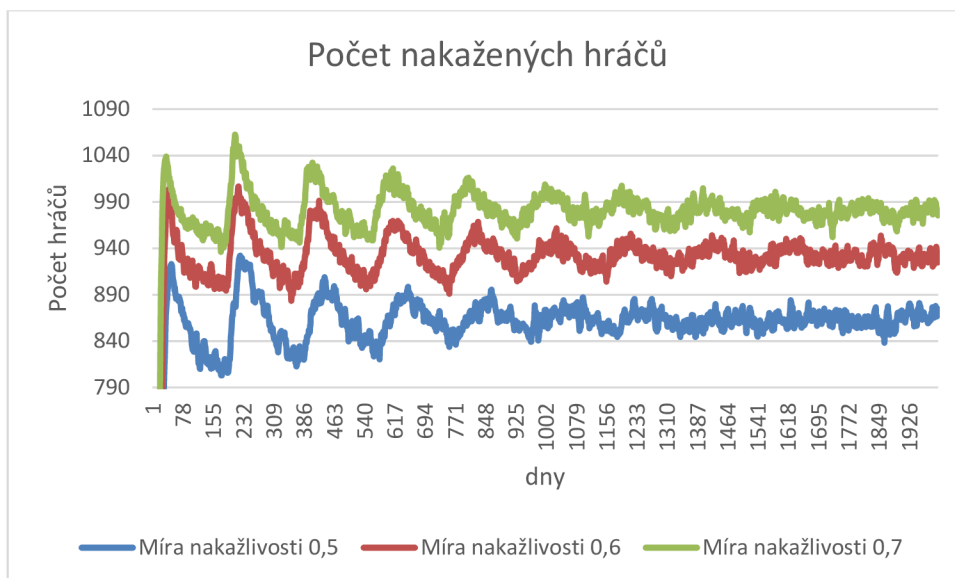
**Tabulka 6 Experiment 3 - Rozdíl maximálních výplat (stejná výše nákladů)**

	max-payoff-vaccinated	max-payoff-susceptible	Rozdíl
0,5	-1617,2	-1425,3	-191,9
0,6	-2063,1	-1712,4	-350,7
0,7	-2354,4	-2271,5	-82,9

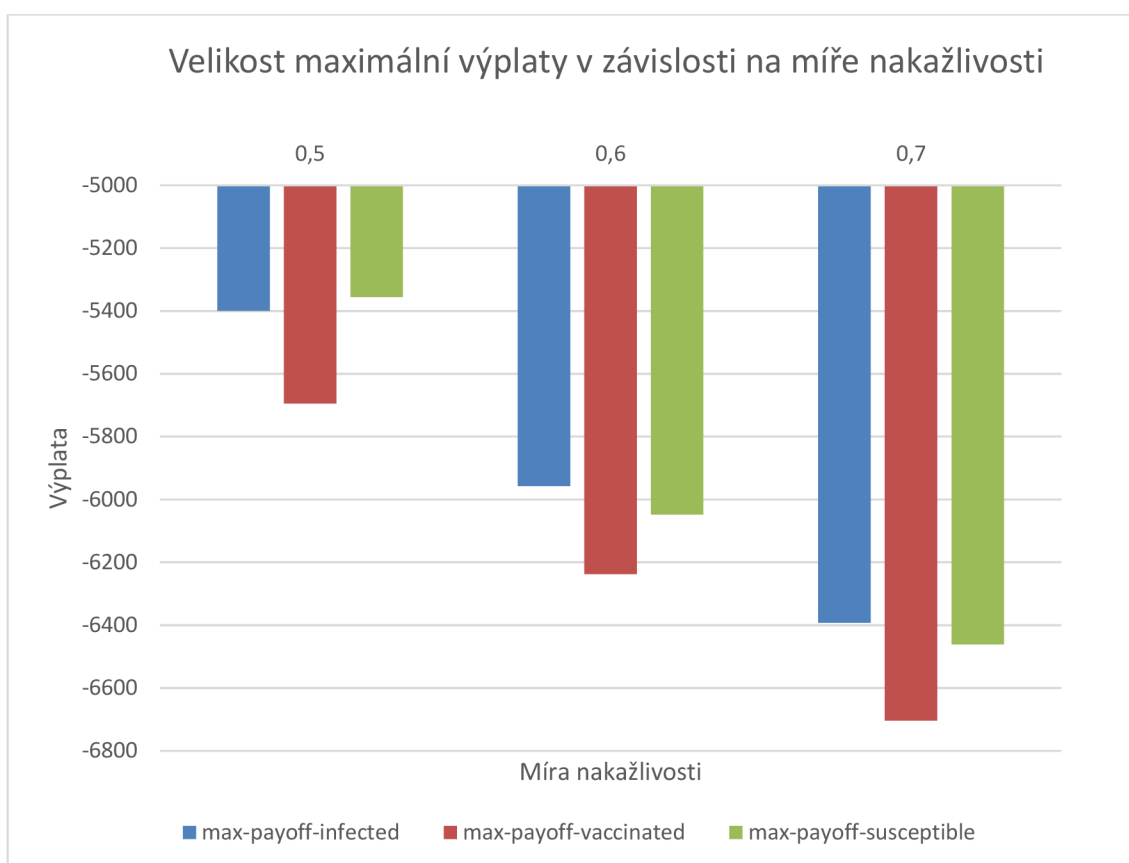
**Tabulka 7 Experiment 3 - Rozdíl maximálních výplat (rozdílná výše nákladů)**



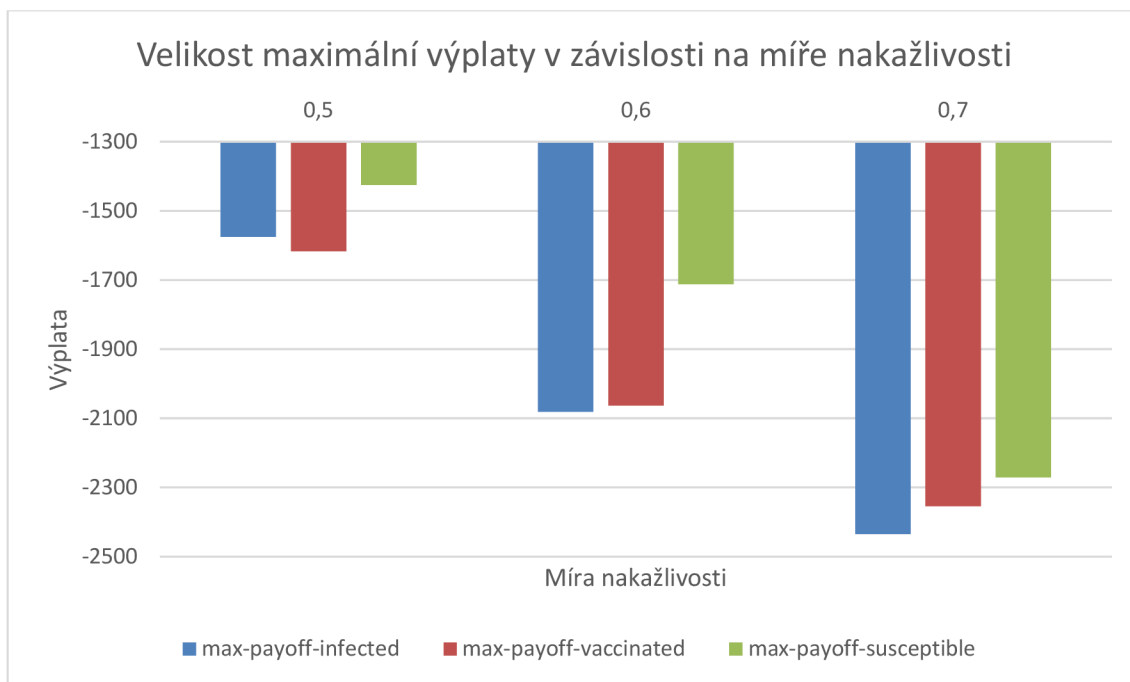
**Obrázek 32 Experiment 3 - počet očkovaných hráčů [vlastní]**



**Obrázek 33 Experiment 3 - počet nakažených hráčů [vlastní]**



**Obrázek 34 Experiment 3 - maximální výplaty (stejné náklady) [vlastní]**



**Obrázek 35 Experiment 3 - maximální výplaty (rozdílné náklady) [vlastní]**

Výsledky dvou experimentů se přibližují k výsledkům publikovaných modelů. Zpřesnění výsledků modelu by bylo možné dosáhnout zvýšením počtu opakování simulací. Odlišné výsledky simulací jsou způsobeny použitím různých metod simulace, pojetím a parametry hry.

Model omezuje počet pevně stanovených hráčů a sousedů. Rozšířením modelu na agenty typu „turtles“ s náhodným pohybem by došlo ke zvýšení náhodnosti interakcí mezi agenty a tím k realističtějšímu šíření viru. Tento koncept by však znemožnil použití rozhodovacího vzorce z důvodu neznámého počtu sousedů (nestálý počet). Počet sousedů by musel být nadále pevně stanoven, jako je tomu v původním modelu. Další možností by bylo sdružování agentů do skupin různých náhodných velikostí, které by představovaly například rodiny či společně žijící jedince. Bylo by vhodné dále rozšířit model tak, aby zahrnoval sledování počtu reinfekcí a revakcinací a jejich dopadů na výplaty hráčů. Model slouží jako demonstrační nástroj pro ilustraci základních principů, podobně jako popsané modely v knihovně NetLogo v kapitole 4. Nebyl konzultován s odborníky z daných oborů a proto může sloužit jako ukázkový model pro představení tématu, ale jiné praktické využití v současné době není možné.



## 7 Závěr

Diplomová práce měla za cíl popsat využití teorie her v epidemiologii. V roce zadání práce bylo téma epidemiologie velmi aktuální, neboť svět právě čelil pandemii viru Covid-19, a zájem veřejnosti byl zaměřen na zdravotnické instituce a zejména epidemiology. Na začátku vypracovávání této práce jsem neměl předchozí zkušenosti s teorií her ani s epidemiologií, a tak tato práce slouží i jako základní přehled informací o výpočetní epidemiologii a o využití teorie her v epidemiologickém modelování.

První část práce se zaměřuje na výpočetní epidemiologii a poskytuje teoretický úvod do samotné epidemiologie. Jsou v ní vysvětleny základní pojmy a metody epidemiologie a stručně popsány typy, způsoby a principy šíření nemocí v lidské populaci. Dále jsou zde popsána preventivní a represivní opatření proti epidemiím. Výpočetní epidemiologie využívá modely epidemií k popisu šíření nemocí. Práce také zmiňuje software používaný pro modelování epidemií.

Následující část práce se zabývá teorií her a jejím využitím v epidemiologii. Jsou zde vysvětleny pojmy a principy teorie her, které se v práci vyskytují. Dále jsou uvedeny a popsány publikované články, které se věnují aplikaci teorie her v epidemiologii. Články jsou rozděleny do 4 kategorií podle využitých epidemiologických opatření: vakcinační hry, společenský odstup, ochranné pomůcky a evoluční hry.

Třetí část práce se zaměřuje na výběr a popis modelů v programu NetLogo, které spadají do kategorií epidemiologie a teorie her. V praktické části práce byl vytvořen model v programu NetLogo, který kombinuje epidemiologii a teorii her. Model představuje symetrickou, iterační, vícekolovou vakcinační hru s nedokonalou informací, kde hráči rozhodují o zvolené strategii na základě porovnání nákladů na nemoc a očkování. Průběh epidemie a rozhodnutí sousedských hráčů ovlivňují výše nákladů. Hráči mají možnost volit mezi dvěma strategiemi: očkovat se nebo neočkovat. Model lze ovládat pomocí vstupních parametrů a tím umožňuje simulovat různé scénáře a nemoci. Model umožňuje sledovat vývoj počtu infekcí, počty hráčů s danou strategií a maximální výplaty hráčů ve všech třech stavech. Pro popis modelu je využita osnova ODD protokolu.

Závěrem práce jsou navrženy tři experimenty, které slouží k validaci vytvořeného modelu pomocí výsledků z vědeckých článků a vysvětlení závislosti určitých parametrů na průběh a výsledek hry. Výsledky dvou z těchto experimentů se blížily očekávaným výsledkům. Model by mohl být použit k prezentaci vakcinačních her a využití teorie her v epidemiologii. Nicméně, aby byl model skutečně užitečný a dále využitelný, je vhodné jej konzultovat s odborníky v oborech výpočetní epidemiologie a teorie her.

## 8 Přílohy

### 8.1 Příloha 1 - Literatura

- [1] ABEDRABBOH, K., M. PILZ, Z. AL-FAGIH, O. S. AL-FAGIH, J. NEBEL, L. AL-FAGIH a Y. KUO. Game theory to enhance stock management of Personal Protective Equipment (PPE) during the COVID-19 outbreak. PLOS ONE [online]. 2021, 16(2) [cit. 2023-02-21]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0246110
- [2] ALLEN, L. J. S. An Introduction to Stochastic Epidemic Models. In: BRAUER, F., P. VAN DEN DRIESSCHE a J. WU, ed. Mathematical Epidemiology [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, 2008, s. 81-130 [cit. 2023-03-02]. Lecture Notes in Mathematics. ISBN 978-3-540-78910-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-78911-6\_3
- [3] ALPERN, S. a L. ZENG. Social Distancing, Gathering, Search Games: Mobile Agents on Simple Networks. Dynamic Games and Applications [online]. 2022, 12(1), 288-311 [cit. 2023-02-14]. ISSN 2153-0785. Dostupné z: doi:10.1007/s13235-022-00427-1
- [4] AMARAL, M. A., M. M. de OLIVEIRA a M. A. JAVARONE. An epidemiological model with voluntary quarantine strategies governed by evolutionary game dynamics. Chaos, Solitons & Fractals [online]. 2021, 143 [cit. 2023-06-21]. ISSN 09600779. Dostupné z: doi:10.1016/j.chaos.2020.110616
- [5] BAUCH, C. T. a D. J. D. EARN. Vaccination and the theory of games. Proceedings of the National Academy of Sciences [online]. 2004, 101(36), 13391-13394 [cit. 2023-02-02]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.0403823101
- [6] BHATTACHARYYA, S. a C. T. BAUCH. A game dynamic model for delayer strategies in vaccinating behaviour for pediatric infectious diseases. Journal of Theoretical Biology [online]. 2010, 267(3), 276-282 [cit. 2023-02-07]. ISSN 00225193. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtbi.2010.09.005
- [7] BHATTACHARYYA, S. a C. T. BAUCH. "Wait and see" vaccinating behaviour during a pandemic: A game theoretic analysis. Vaccine [online]. 2011, 29(33), 5519-5525 [cit. 2023-02-20]. ISSN 0264410X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vaccine.2011.05.028

- [8] BOČEK, J. a J. HROCH. Pod povrchem karantény: psychické problémy, násilí, sebevraždy. Co už teď prozrazují data?. Irozhlas [online]. Praha: Český rozhlas, ©2023, 7. 4. 2020 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: [https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/koronavirus-domaci-nasili-sebevrazdy-uzkost-panika-deprese\\_2004070600\\_jab](https://www.irozhlas.cz/zpravy-domov/koronavirus-domaci-nasili-sebevrazdy-uzkost-panika-deprese_2004070600_jab)
- [9] Epidemics [online]. Elsevier B.V., © 2023 [cit. 2023-06-29]. ISSN 1878-0067. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/journal/epidemics>
- [10] Game theory I: Extensive form. Policonomics [online]. Policonomics, 2017 [cit. 2023-01-18]. Dostupné z: <https://policonomics.com/lp-game-theory1-extensive-form/>
- [11] GINTIS, H.. The bounds of reason: game theory and the unification of the behavioral sciences. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2014. ISBN 9780691160849.
- [12] GOTELLI, N. J. a W. G. KELLEY. A General Model of Metapopulation Dynamics. Oikos [online]. 1993, 68(1) [cit. 2023-02-03]. ISSN 00301299. Dostupné z: doi:10.2307/3545306
- [13] GREFENSTETTE J. J., S. T. BROWN, R. ROSENFELD, J. DEPASSE, N. T. STONE, P. C. COOLEY, W. D. WHEATON, A. FYSHE, D. D. GALLOWAY, A. SRIRAM, H. GUCLU, T. ABRAHAM a D. S. BURKE. FRED (A Framework for Reconstructing Epidemic Dynamics): An open-source software system for modeling infectious diseases and control strategies using census-based populations. BMC Public Health, 2013 Oct;13(1), 940. doi: 10.1186/1471-2458-13-940. PubMed PMID: 24103508
- [14] HUANG, Y. a Q. ZHU. Game-Theoretic Frameworks for Epidemic Spreading and Human Decision-Making: A Review. Dynamic Games and Applications [online]. 2022, 12(1), 7-48 [cit. 2023-02-02]. ISSN 2153-0785. Dostupné z: doi:10.1007/s13235-022-00428-0
- [15] CHANG, S. L., M. PIRAVEENAN, P. PATTISON a M. PROKOPENKO. Game theoretic modelling of infectious disease dynamics and intervention methods: a review. Journal of Biological Dynamics [online]. 2020, 14(1), 57-89 [cit. 2023-02-01]. ISSN 1751-3758. Dostupné z: doi:10.1080/17513758.2020.1720322
- [16] CHVOJ, M.. Pokročilá teorie her ve světě kolem nás. Grada, 2013, 1 online zdroj (232 stran). ISBN 978-80-247-8393-2.

- [17] JENNESS S. M., S. M. GOODREAU a M. MORRIS EpiModel: An R Package for Mathematical Modeling of Infectious Disease over Networks. *Journal of Statistical Software*. 2018; 84(8): 1-47.
- [18] KABIR, K. M. A. a J. TANIMOTO. Evolutionary vaccination game approach in metapopulation migration model with information spreading on different graphs. *Chaos, Solitons & Fractals* [online]. 2019, 120, 41-55 [cit. 2023-02-03]. ISSN 09600779. Dostupné z: doi:10.1016/j.chaos.2019.01.013
- [19] KEELING, M. J. a K. T. D. EAMES. Networks and epidemic models. *Journal of The Royal Society Interface* [online]. 2005, 2(4), 295-307 [cit. 2023-02-02]. ISSN 1742-5689. Dostupné z: doi:10.1098/rsif.2005.0051
- [20] KORDONIS, I., A. LAGOS a G. P. PAPAVALASSILOPOULOS. Dynamic Games of Social Distancing During an Epidemic: Analysis of Asymmetric Solutions. *Dynamic Games and Applications* [online]. 2022, 12(1), 214-236 [cit. 2023-02-13]. ISSN 2153-0785. Dostupné z: doi:10.1007/s13235-021-00403-1
- [21] KUGA, K. a J. TANIMOTO. Which is more effective for suppressing an infectious disease: imperfect vaccination or defense against contagion?. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* [online]. 2018, 2018(2) [cit. 2023-02-07]. ISSN 1742-5468. Dostupné z: doi:10.1088/1742-5468/aaac3c
- [22] LIU, J. a S. XIA. *Computational Epidemiology* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2020 [cit. 2023-07-07]. Health Information Science. ISBN 978-3-030-52107-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-52109-7
- [23] MADEO, D. a C. MOCENNI. Evolutionary Game Theoretic Insights on the SIRS Model of the COVID-19 Pandemic. *IFAC-PapersOnLine* [online]. 2021, 54(17), 1-6 [cit. 2023-06-21]. ISSN 24058963. Dostupné z: doi:10.1016/j.ifacol.2021.11.016
- [24] MathWorks. *MathWorks* [online]. The MathWorks, Inc. ©, 2023 [cit. 2023-06-29]. Dostupné z: www.mathworks.com
- [25] MCKELVEY, R. D. a T. R. PALFREY. Quantal Response Equilibria for Normal Form Games. *Games and Economic Behavior* [online]. 1995, 10(1), 6-38 [cit. 2023-02-15]. ISSN 08998256. Dostupné z: doi:10.1006/game.1995.1023
- [26] MYERSON, R. B. *Game theory: analysis of conflict*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1991. ISBN 06-743-4115-5.

- [27] NAVRÁTIL, R. Braessův paradox a teorie her. Univerzita Karlova. [cit. 2023-06-29]. Dostupné z:  
[Http://www.karlin.mff.cuni.cz/~tuma/Aplikace15/Navratil\\_Teorieher.pdf](http://www.karlin.mff.cuni.cz/~tuma/Aplikace15/Navratil_Teorieher.pdf)
- [28] NISAN, N.. Algorithmic game theory. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-521-87282-9.
- [29] OSBORNE, M. J. An introduction to game theory. [1st ed.]. New York: Oxford University Press, 2004. ISBN 9780195128956.
- [30] PEJÓ, B. a G. BICZÓK. Corona Games. In: Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Modeling and Understanding the Spread of COVID-19 [online]. New York, NY, USA: ACM, 2020, 2020-11-03, s. 24-31 [cit. 2023-02-15]. ISBN 9781450381680. Dostupné z: doi:10.1145/3423459.3430757
- [31] RAND, W. a U. Wilensky (2008). NetLogo Spread of Disease model.  
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/SpreadofDisease>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.
- [32] RASMUSSEN, L. a U. Wilensky (2019). NetLogo Braess Paradox model.  
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/BraessParadox>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [33] RELUGA, T. C. a C. T. BERGSTROM. Game Theory of Social Distancing in Response to an Epidemic. PLoS Computational Biology [online]. 2010, 6(5) [cit. 2023-02-14]. ISSN 1553-7358. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pcbi.1000793
- [34] STONEDAHL, F. a U. Wilensky (2008). NetLogo Virus on a Network model.  
<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/VirusonaNetwork>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [35] SZABÓ, G. a G. FÁTH. Evolutionary games on graphs. Physics Reports [online]. 2007, 446(4-6), 97-216 [cit. 2023-02-22]. ISSN 03701573. Dostupné z:  
doi:10.1016/j.physrep.2007.04.004
- [36] The Journal of Infectious Diseases [online]. Oxford University Press, © 2023 [cit. 2023-06-29]. ISSN 1537-6613. Dostupné z: <https://academic.oup.com/jid>

- [37] TICHÁČEK, B. Základy epidemiologie. Praha: Galén, 1997. Scripta. ISBN 80-85824-53-1.
- [38] TUČEK, M. a. SLÁMOVÁ. Hygiena a epidemiologie pro bakaláře. 2., doplněné vydání. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2018. ISBN 978-80-246-3932-1.
- [39] WIERMAN, J. C. a D. J. MARCHETTE. Modeling computer virus prevalence with a susceptible-infected-susceptible model with reintroduction. Computational Statistics & Data Analysis [online]. 2004, 45(1), 3-23 [cit. 2023-02-02]. ISSN 01679473. Dostupné z: doi:10.1016/S0167-9473(03)00113-0
- [40] WILENSKY, U. (1998). NetLogo Virus model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Virus>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [41] WILENSKY, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [42] WILENSKY, U. (2003). NetLogo Prisoners Dilemma HubNet model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/PrisonersDilemmaHubNet>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [43] WU, Z. a J. TANIMOTO. Social distancing is a social dilemma game played by every individual against his/her population. PLOS ONE [online]. 2021, 16(8) [cit. 2023-02-15]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0255543
- [44] YANG, C. a U. Wilensky (2011). NetLogo epiDEM Basic model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/epiDEMBasic>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [45] YANG, C. a U. Wilensky (2011). NetLogo epiDEM Travel and Control model. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/epiDEMTravelandControl>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [46] ZHANG, H., Z. YANG, Z. WU, B. WANG a T. ZHOU. Braess's Paradox in Epidemic Game: Better Condition Results in Less Payoff. Scientific Reports [online]. 2013, 3(1) [cit. 2023-02-03]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/srep03292

- [47] ZHAO, S., C. T. BAUCH a D. HE. Strategic decision making about travel during disease outbreaks: a game theoretical approach. *Journal of The Royal Society Interface* [online]. 2018, 15(146) [cit. 2023-02-21]. ISSN 1742-5689. Dostupné z: doi:10.1098/rsif.2018.0515
- [48] GRIMM, V., S. F. RAILSBACK, C. E. VINCENOT, et al. The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* [online]. 2020, 23(2) [cit. 2023-08-08]. ISSN 1460-7425. Dostupné z: doi:10.18564/jasss.4259
- [49] BATISTA, A. M., S. L. T. DE SOUZA, K. C. IAROSZ, et al. Simulation of deterministic compartmental models for infectious diseases dynamics. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online]. 2021, 43 [cit. 2023-08-09]. ISSN 1806-9126. Dostupné z: doi:10.1590/1806-9126-rbef-2021-0171
- [50] ERDEM, M., M. SAFAN a C. CASTILLO-CHAVEZ. Mathematical Analysis of an SIQR Influenza Model with Imperfect Quarantine. *Bulletin of Mathematical Biology* [online]. 2017, 79(7), 1612-1636 [cit. 2023-08-09]. ISSN 0092-8240. Dostupné z: doi:10.1007/s11538-017-0301-6
- [51] HIGAZY, M. Novel fractional order SIDARTHE mathematical model of COVID-19 pandemic. *Chaos, Solitons & Fractals* [online]. 2020, 138 [cit. 2023-08-09]. ISSN 09600779. Dostupné z: doi:10.1016/j.chaos.2020.110007



## 8.2 Příloha 2 - Kopie zadání práce

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ  
Fakulta informatiky a managementu  
Akademický rok: 2020/2021

Studijní program: Informační management  
Forma studia: Kombinovaná

# Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta

Jméno a příjmení: Bc. Jiří Černožorský  
Osobní číslo: I2000189  
Adresa: Bukovina nad Labem 10, Bukovina nad Labem, 53352 Staré Hradiště u Pardubic, Česká republika  
Téma práce: Teorie her v epidemiologii  
Téma práce anglicky: Game Theory in Modelling Epidemics  
Jazyk práce: Čeština  
Vedoucí práce: doc. RNDr. Kamila Štekerová, Ph.D., MSc.  
Katedra informačních technologií

### Zásady pro vypracování:

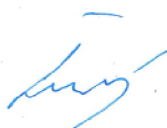
Cílem práce je popsat využitelnost teorie her ve výpočetní epidemiologii, zhodnotit existující modely v NetLogu, navrhnout a realizovat vlastní model.

Osnova práce:

1. Úvod
2. Teoretická část
  - 2.1. Výpočetní epidemiologie
  - 2.2. Teorie her
  - 2.3. Přehled epidemiologických modelů v NetLogu
3. Praktická část
  - 3.1. Návrh modelu
  - 3.2. Implementace
  - 3.3. Experimenty
4. Výsledky a diskuze
5. Závěr

### Seznam doporučené literatury:

- *Algorithmic game theory*. Editor Noam NISAN. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. ISBN 9780521872829.
- ALONSO-BETANZOS, Amparo, Noelia SANCHEZ-MARONO, Oscar FONTENLA-ROMERO, Gary POLHILL, Tony CRAIG, Javier BAJO a Juan Manuel CORCHADO. *Agent-Based Modeling of Sustainable Behaviors*. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 3319463306.
- LIU, Jiming a Shang XIA. *Computational Epidemiology*. Cham: Springer International Publishing, 2020. ISBN 3030521079.
- GINTIS. *The Bounds of Reason: Game Theory and the Unification of the Behavioral Sciences*. Revised Edition. Princeton: Princeton University Press, 2014. ISBN 9780691160849.

 30.6.2023

 30.6.2023  
© IS/STAG, Portál – Podklad kvalifikační práce, cemoji1, 30. června 2023 07:31

### 8.3 Příloha 3 - zdrojový kód

**globals** [

max-payoff-infected  
max-payoff-vaccinated  
max-payoff-susceptible  
transmission-rate  
incidence ]

**patches-own** [

color-class  
infected  
vaccinated  
timerr  
infection-risk  
neighbors-infected  
cost-change  
cost-unchanged  
payoff ]

to **setup**

clear-all  
ask patches [set infected false]  
ask patches [set vaccinated false]  
ask n-of initial-outbreak-size patches  
[ become-infected ]  
ask n-of initial-vaccinated patches with [infected = false]  
[ become-vaccinated ]  
reset-ticks  
ask patches [establish-color]

**end**

to **go**

spread-virus  
become-recovered

```

calculate-transmission-rate
ask patches [calculate-payoff]
max-payoff
ask patches [strategy-selection]
ask patches [establish-color]
tick
set incidence 0
if all? patches [ not infected ]
  [ stop ]
if ticks >= 2000 [stop]
end
to establish-color
if infected = true [set pcolor red
  set color-class 1]
if vaccinated = true [set pcolor yellow
  set color-class 2]
if infected = false and vaccinated = false [set pcolor green
  set color-class 3]
end
to become-infected
set infected true
set vaccinated false
set timerr recovery-time
end
to become-susceptible
set infected false
set vaccinated false
end
to become-vaccinated
set vaccinated true
set infected false
set timerr vaccine-time

```

**end**

to **spread-virus**

```
ask patches with [infected = true and vaccinated = false]
  [ ask neighbors with [vaccinated = false and infected = false]
    [ if random-float 100 < 10 * virus-spread-chance
      [ become-infected
        set incidence + 1 ] ] ] ]
```

**end**

to **become-recovered**

```
ask patches with [infected = true and timerr > 0 and vaccinated = false]
  [set timerr - 1]
ask patches with [infected = true and timerr = 0 and vaccinated = false]
  [become-susceptible]
ask patches with [vaccinated = true and timerr > 0]
  [set timerr - 1]
ask patches with [vaccinated = true and timerr = 0]
  [become-susceptible]
```

**end**

to **strategy-selection**

```
set infection-risk (((transmission-rate + (count neighbors with [infected =
true]))/(count neighbors with [infected = true] + count neighbors with
[infected = false] )) * ((count neighbors with [vaccinated = false])/(count
neighbors with [vaccinated = false] + count neighbors with [vaccinated =
true])))
set cost-change (((1 + 1)*(vaccine-costs / illness-costs)) +((1 - 1) * infection-
risk))
set cost-unchanged (((1 - 1)*(vaccine-costs / illness-costs)) +((1 + 1) * infection-
risk))
if (infected = false and vaccinated = false) [
  If cost-change < cost-unchanged
    [set vaccinated true set timerr vaccine-time]]
```

**end**

to **calculate-payoff**

```

if infected = true [set payoff - illness-costs]
if vaccinated = true [set payoff - vaccine-costs ]
end
to max-payoff
ask patches with [infected = true and vaccinated = false]
[set max-payoff-infected [payoff] of max-one-of patches with [infected = true and
vaccinated = false] [payoff]]
ask patches with [infected = false and vaccinated = false]
[set max-payoff-susceptible [payoff] of max-one-of patches with [infected = false
and vaccinated = false] [payoff]]
ask patches with [infected = false and vaccinated = true]
[set max-payoff-vaccinated [payoff] of max-one-of patches with [infected = false
and vaccinated = true] [payoff]]
end
to calculate-transmission-rate
if incidence > 0 [set transmission-rate incidence / count patches with [infected =
true] ]
if incidence = 0 [set transmission-rate 0]
end

```