

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

Modelování a simulace dynamiky pandemie SarsCov-2 v
České republice
Bakalářská práce

Autor: Bořek, Hnyk

Studijní obor: IM3

Vedoucí práce: prof. Ing. Vladimír Bureš, Ph.D., MBA

Hradec Králové

duben 2023

Prohlášení:

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

V Hradci Králové dne 19.4.2023

vlastnoruční podpis

Bořek Hnyk

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Vladimíru Burešovi, MBA,
Ph.D. za metodické vedení práce a vstřícnost.

Anotace

Práce se zabývá modelováním a simulací dynamiky pandemie SarsCov-2, která postihla s celým zbytkem světa i Českou republiku.

Teoretická část poskytuje ucelený přehled o základních datech a poznatcích ohledně viru a pandemie jím způsobené včetně informací o protiepidemických opatřeních v České republice. Vysvětluje základy ohledně epidemiologických modelů, systémového myšlení a dynamiky potřebných k pochopení praktické části.

Praktická část práce se zaměřuje na popis modelu pandemie, který se snaží simulovat klíčové oblasti pandemie jako jsou její dynamika, kontakty mezi jednotlivými lidmi, očkování a vládní nařízení. Následně je provedena simulace, která umožňuje získat informace o tom, jak by se pandemie mohla vyvíjet v různých situacích.

Annotation

Title: Modelling and Simulation of Dynamics of the SarsCov-2 Pandemics in the Czech Republic

The thesis deals with modelling and simulation of the dynamics of the SarsCov-2 pandemic which affected the Czech Republic together with the rest of the world.

The theoretical part provides a comprehensive overview of the basic data and knowledge about the virus and the pandemic caused by it, including information about anti-epidemic measures in the Czech Republic. It explains the basics about epidemiological models and systems thinking and dynamics needed to understand the practical part.

The practical part of the thesis then focuses on describing a pandemic model that attempts to simulate key areas of a pandemic, such as its dynamics, people-to-people contacts, vaccination, and government regulations. Subsequently, a simulation is carried out to provide information on how a pandemic might evolve in different situations.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce.....	2
3	Metodika zpracování.....	3
4	Teoretická část.....	5
4.1	SARS-CoV-2.....	5
4.1.1	Covid-19 a data.....	5
4.2	Modelování dynamiky pandemie z hlediska epidemiologie.....	7
4.2.1	Dělení matematických modelů.....	7
4.2.2	SIR model.....	8
4.2.3	S(E)IR model.....	9
4.2.4	S(E)IR(V) model.....	10
4.2.5	Reprodukční číslo R.....	11
4.3	Dynamika pandemie v České republice.....	12
4.4	Systémová dynamika, systémové myšlení a systém.....	14
4.4.1	Systémová dynamika.....	14
4.4.2	Causal loop diagram (CLD).....	15
4.4.3	Stock and flow diagram (SFD).....	16
5	Praktická část.....	18
5.1	Příčinný smyčkový diagram.....	18
5.1.1	Princip fungování CLD diagramu.....	19
5.2	Diagram hladin a toků.....	20
5.2.1	Dotazník.....	20
5.2.2	Modul Kontakty (Contacts).....	21
5.2.3	Modul Restrikce (Restrictions).....	23
5.2.4	Modul Očkování (Vaccinations).....	31

5.2.5	Modul Dynamiky pandemie (Pandemic dynamics)	34
5.3	Simulace pandemie.....	39
5.3.1	Modul Kontakty (Contacts).....	40
5.3.2	Modul Očkování (Vaccinations)	42
5.3.3	Modul Pandemic dynamics (Dynamika pandemie)	42
5.4	Test robustnosti	43
5.5	Citlivostní analýza	44
6	Závěr	47
7	Seznam použité literatury.....	48
8	Přílohy	54

Seznam obrázků

Obr. 1 Denní přehled počtu osob s nově prokázaným onemocněním COVID-19	6
Obr. 2 Diagram SIR modelu.....	9
Obr. 3 Struktura S(E)IR modelu používaného ČR.....	10
Obr. 4 Struktura S(E)IR(V) modelu používaného ČR.....	11
Obr. 5 Vztah systémové dynamiky a systémového myšlení.....	14
Obr. 6 Konceptuální diagram	15
Obr. 7 Modulový smyčkový diagram.....	16
Obr. 8 SFD diagram	17
Obr. 9 CLD diagram	19
Obr. 10 Moduly diagramu hladin a toků	20
Obr. 11 Modul Contacts	21
Obr. 12 Modul Restrictions	24
Obr. 13 Modul Restrictions – Roušky.....	25
Obr. 14 Modul Restrictions – Ostatní opatření.....	26
Obr. 15 Počet nakažených na 100 000 obyvatel.....	29
Obr. 16 Reprodukční číslo	30
Obr. 17 Podíl nezachycených hospitalizovaných	30
Obr. 18 Modul Vaccinations.....	31
Obr. 19 Očkování kumulativně	32
Obr. 20 Očkování – relativní poměr.....	33
Obr. 21 Modul Pandemic Dynamics.....	34
Obr. 22 PCR testování – model	37
Obr. 23 Zdravotnictví – model	39
Obr. 24 Contact rate	40
Obr. 25 Contacts at risk a Identifiable contacts	41
Obr. 26 Modul Restrictions – výsledky.....	41
Obr. 27 Modul Vaccinations – výsledky	42
Obr. 28 Modul Pandemic dynamics – výsledky.....	42
Obr. 29 Modul Pandemic dynamics – výsledky 2	43
Obr. 30 Modul Pandemic dynamics – výsledky 3	43

Obr. 31 All new infected – porovnání	44
Obr. 32 All new infected – porovnání 2	45
Obr. 33 All new infected – porovnání 3	46

Seznam tabulek

Tabulka 1 Varianty vzbuzující obavy podle WHO.....	6
Tabulka 2 Dělení matematických modelů.....	7
Tabulka 3 Covid semafor	12
Tabulka 4 Stupně pohotovosti.....	13

Seznam grafů

Graf 1: Nošení roušky během nařízení	25
Graf 2: Dodržování proti-pandemických opatření.....	28
Graf 3: PCR testy poměr	36
Graf 4: Dodržování karantény.....	38

1 Úvod

Pandemie SARS-CoV-2 se stala jedním z nejvýznamnějších zdravotnických a společenských problémů současnosti. Česká republika, jako mnoho jiných zemí, se s touto výzvou potýká již více než 3 roky. Jedním z nejúčinnějších způsobů, jak ovlivnit vývoj pandemie, je použití modelování a simulací. Tyto metody umožňují do jisté míry předpovědět vývoj pandemie a poskytují účinný nástroj pro rozhodování a plánování. Práce se zaměřuje na matematické modely a počítačové simulace, které se snaží zachytit dynamiku šíření nákazy a ukázat a předpovědět vývoj pandemie v různých scénářích.

V teoretické části se práce věnuje samotnému viru SARS-CoV-2, jeho vlastnostem, výskytu a nemoci Covid-19, kterou způsobuje.

Další kapitola se zaměřuje na modelování dynamiky pandemie a popisuje matematické modely sloužící k předpovídání šíření nemoci a primárně se věnuje SIR modelu a jeho variantám.

V kapitole třetí se pak analyzuje dynamika pandemie v České republice, a to hlavně z hlediska způsobu, jakým byla situace řešena.

V poslední kapitole teoretické části je popsáno systémové myšlení, systémová dynamika a její nástroje.

Praktická část této práce se zaměřuje na vytvoření konkrétního modelu pandemie, který bude specifický pro situaci v České republice a bude schopen modelovat dynamiku nákazy v průběhu dní. Tento model je postaven na základech původních epidemiologických matematických modelů a zohledňuje vlivy různých faktorů, jako jsou například opatření vlády a chování obyvatelstva. Cílem je získat co nejuvěrnější odhad vývoje epidemie v České republice.

2 Cíl práce

Práce si klade za cíl vytvořit konkrétní epidemiologický model pro pandemii SARS-CoV-2 v České republice, jenž bude založen na výzkumu dostupných dat o šíření nákazy ve světě, s hlavním zaměřením na Českou republiku. Bude obsahovat různé proměnné, jako jsou počty nakažených, úmrtí, hospitalizací, testování a další faktory.

K vytvoření takového modelu je zapotřebí nejprve postupně dokončit několik dílčích cílů. Prvním z těchto dílčích cílů je nalezení relevantních zdrojů informací o pandemii v České republice. To je nezbytné pro správné podložení všech vztahů v rámci modelu. Důkladný výzkum dat o šíření nákazy v České republice umožní vytvořit model, který bude přesný a spolehlivý.

Dalším dílčím cílem je vytvoření příčinného smyčkového diagramu, který nám pomůže identifikovat hlavní proměnné s největším vlivem na šíření nákazy. Tento diagram umožní lepší porozumění vztahům mezi různými proměnnými a pomůže nám určit, které faktory mají největší vliv na průběh pandemie.

Poté bude již následovat vytvoření diagramu hladin a toků a jeho modulů z příčinného smyčkového diagramu. Tedy přechod z kvalitativního modelování na modelování kvantitativní. Tento diagram umožní simulaci různých scénářů v závislosti na změnách v různých proměnných, jako jsou například opatření vlády, chování obyvatelstva a míru přenosu viru, což poslouží jako poslední dílčí cíle v rámci této práce.

3 Metodika zpracování

Prvním krokem v procesu byla literární rešerše, která sloužila k získání relevantních informací a znalostí týkajících se tématu pandemie, covidu 19, epidemiologických modelů a systémového inženýrství. Tento krok byl klíčový pro pochopení kontextu a souvislostí, které se vztahují k problematice pandemie SARS-CoV-2 v České republice a jejího modelování. Literární rešerše zahrnovala průzkum relevantní zdrojů od literatury přes články a vědecké studie primárně ve vědeckých databázích, mezi které patřily například Science direct, Springer Link a Google Scholar. Výsledky literární rešerše následně posloužily jako výchozí bod pro vytváření jednotlivých diagramů v programu Stella Professional.

Tam, kde literární rešerše neposkytla dostatečné množství informací, bylo přistoupeno k anonymnímu dotazníkovému šetření. Tato metoda byla využita ke shromáždění konkrétních údajů od 131 respondentů z České republiky mezi daty 20.3.2023 a 25.3.2023. Jako nástroj pro vytvoření dotazníku posloužila služba Google Formuláře. Samotný dotazník pak obsahuje mezi 4 a 17 otázkami podle různých odpovědí respondentů. Samotné dotazníkové šetření pak bylo distribuováno primárně přes sociální sítě, například Facebook a Reddit. Nicméně nakonec se v práci nevyužívají všechny získané odpovědi z důvodu ztráty relevantnosti některých otázek pro naši situaci.

Na základě provedené literární rešerše byly identifikovány klíčové faktory, které mají vliv na dané oblasti pandemie a jenž posloužili jako podklad pro proměnné následně vytvořeného příčinného smyčkového diagramu. Diagram pak pomohl ilustrovat vztahy mezi těmito proměnnými.

Na základech příčinného smyčkového diagramu byly pak následně vytvořeny jednotlivé moduly v rámci diagramu hladin a toků, každý zabývající se určitým aspektem pandemie obsahující konkrétní proměnné důležité pro danou oblast. Poté následovalo propojení jednotlivých modulů mezi sebou.

Jelikož se jedná o simulační model, bylo tak posledním krokem spuštění simulace. Samotná simulace pak primárně sledovala pohyb lidí mezi různými stavy jako například nakažený, hospitalizovaný nebo náchylný k nákaze v období od 1. března 2020 do 1. března 2023.

Na konci práce pak došlo k porovnání jednotlivých výsledků, provedení testu robustnosti a citlivostní analýzy.

4 Teoretická část

4.1 SARS-CoV-2

SARS-CoV-2 je RNA virus spadající mezi tzv. koronaviry. Název, jenž poukazuje na tvar jejich lipidového obalu s výběžky připomínající právě sluneční koronu. Konkrétně se, jak již jeho oficiální název naznačuje, jedná o tzv. Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus neboli koronavirus související s těžkým akutním respiračním syndromem.

Způsobuje onemocnění s názvem Covid-19, primárně onemocnění dýchacího traktu, avšak způsobuje i další komplikace, například v rámci takzvaného post-Covid-19 syndromu, který se vyskytuje u velkého množství pacientů po jeho prodělání. Může trvat dny, měsíce i roky, mezi nejčastější příznaky spadá například únava, různé mentální a neurologické poruchy (Del Rio aj., 2020) (Zarei aj., 2021).

Mimo to mezi jeho základní vlastnosti patří šíření kapénkami a poměrně snadné vytváření nových mutací ve svém genomu, které mají odlišné vlastnosti (NCIRD, 2021).

První výskyt se datuje k prosinci 2019 do střední Číny, konkrétně na tzv. "mokrý" tržnici města Wu-chan, kde nejspíše došlo k přenosu ze zvířete, pravděpodobně netopýra, na člověka. Některé studie však poukazují na mnohem dřívější výskyty viru opírající se o několik faktů, např. o počty nakažených a usmrčených chřipkou v Číně od začátku roku 2019 do léta, kdy jejich počet překročil čísla za poslední čtyři roky dohromady nebo o to, že nemocnice ve Wu-chanu mimo chřipkovou sezónu prakticky od poloviny léta uváděly zvýšené počty pacientů s příznaky chřipky (Platto aj., 2021).

Tuto domněnku potvrzuje i studie z Harvard University, která poukazuje na zvýšený počet vyhledávání symptomů spojených s Covidem-19 minimálně od léta 2019 v areálech nemocnic ve Wu-chanu. (Nsoesie aj., 2020).

4.1.1 Covid-19 a data

Pokud se podíváme na oficiální data zveřejněná WHO (světová zdravotnická organizace), tak ke dni 5.8.2022 se Covid-19 ve více či méně závažných mutacích,

dostal do všech zemí světa a nakazil minimálně 597 092 623 lidí, důsledkem čehož přišlo o život bezmála 6 407 556 lidí (WHO 2022).

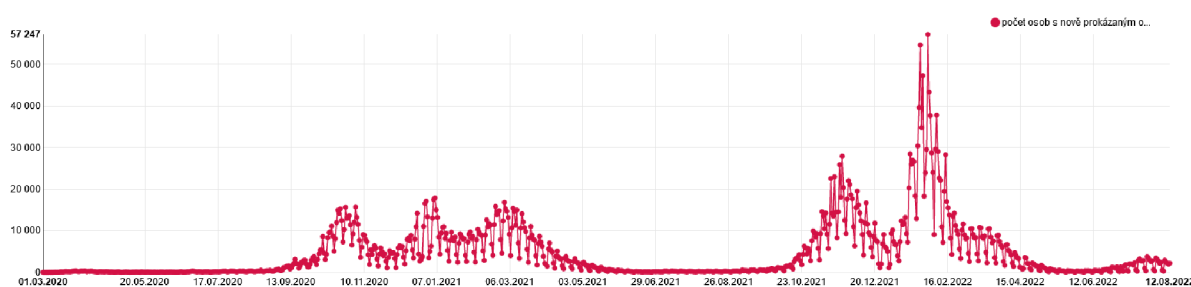
V mutacích, z nichž některé označené WHO jako VOC (Variants of concern – varianty vzbuzující obavy) jsou uvedeny dole v, pro potřeby této práce redukované, tabulce se svým místem prvního výskytu.

Označení WHO	První doložené vzorky
Alpha	Velká Británie, Září 2020
Beta	Jihoafrická republika, Květen 2020
Gamma	Brazílie, Listopad 2020
Delta	Indie, Říjen 2020
Omicron	Více zemí, Listopad 2021

Tabulka 1 Varianty vzbuzující obavy podle WHO
převzato a upraveno z: (NCIRD, 2021)

Tato práce si však klade za cíl podívat se na dynamiku pandemie právě v České republice, a proto se v následujících odstavcích podíváme na její data, primárně ze zpráv MZČR (ministerstvo zdravotnictví), popřípadě ze zpráv UZIS (Ústav zdravotnických informací a statistiky ČR).

Z dat pro ČR zjistíme, že první 3 případy na našem území byly identifikovány 1. března 2020 a k 5.8.2022 virus zatím celkově nakazil 3 998 850 lidí a připravil o život nejméně 40 555 lidí (MZČR 2022).



Obr. 1 Denní přehled počtu osob s nově prokázaným onemocněním COVID-19
převzato z: (MZČR, 13.8.2022)

4.2 Modelování dynamiky pandemie z hlediska epidemiologie

Hlavním nástrojem epidemiologie pro vyjádření a modelování dynamiky různých pandemií jsou matematické modely, vytvořené ze získaných dat a znalostí charakteru onemocnění. Jejich hlavním cílem je předpovídat do jisté míry průběh pandemie (NZIP, 2022).

Matematický model jako takový je tvořen veličinami a vztahy mezi nimi, čímž simuluje danou realitu. Jedná se avšak pouze o abstrakci reality, respektive její vybrané části, a tedy má jen určitou míru přesnosti (AVČR, 2022).

4.2.1 Dělení matematických modelů

Pro potřeby této práce se v následující tabulce podíváme na základní dělení matematických modelů, abychom měli alespoň okrajový pojem o problematice a její terminologii.

Matematické modely mají několik druhů a lze je dělit dle různých kritérií:

Dělení modelu:	Popis:
Deterministické a Stochastické	Stochastické modely při stejných vstupních parametrech nedávají pokaždé stejné výsledky, je tedy přítomna jistá forma náhody.
Explicitní a Implicitní	Rozdíl pramení z procesu nalezení výstupních parametrů. V případě, že známe vstupní parametry a výstupní parametry lze získat konečnou řadou výpočtů, jedná se o model explicitní. V případě, že tomu tak není, jedná se o model implicitní.
Statické a Dynamické	Statické modely neuvažují s prvkem času.
Lineární a Nelineární	Pokud model obsahuje ve funkcích a podmínkách pouze lineární rovnice, jedná se o model lineární.

Tabulka 2 Dělení matematických modelů převzato a upraveno z (Hřebíček a Škrdla, 2006)

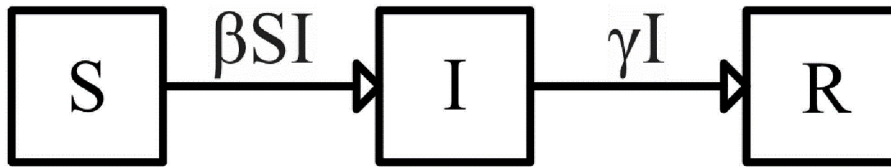
4.2.2 SIR model

Vychází z tzv. Kermack-McKendrickovy teorie, která předpovídá počet a rozložení případů infekční nemoci při jejím přenosu v populaci v průběhu času a občas se proto nazývá také Kermack-McKendrickovým modelem. Dal by se označit za jakýsi základní kompartmentový model, ze kterého vychází všechny ostatní modely v epidemiologii. Rozděluje populaci do tří skupin.

1. S – susceptible
 - a. náchylní jedinci
2. I – infected
 - a. Infikovaní jedinci
3. R – removed
 - a. Kdokoliv, kdo nemůže být už nakažen:
 - i. Uzdravení
 - ii. Usmrcení
 - iii. Atd.

Uvažuje s několika předpoklady:

1. Uzavřená populace
 - a. Velikost populace je stálá v čase = K
 - b. $S(t) + I(t) + R(t) = K$
2. Počet infikovaných za t je přímo úměrný počtu náchylných a infikovaných jedinců. Celkem tedy počet nově nakažených v čase t je:
 - a. $\beta S(t)I(t)$
 - b. $\beta > 0$ = infekční koeficient
3. Počet jedinců v R je přímo úměrný počtu jedinců v I tedy:
 - a. $\gamma I(t)$
 - b. $\gamma > 0$ = koeficient vyléčení/odstranění
 - c. čas v I můžeme vyjádřit jako $1/\gamma$



Obr. 2 Diagram SIR modelu

převzato a upraveno z (Ma a Li, 2009)

Kermack-McKendrickův model:

- $dS/dt = -\beta SI$
- $dI/dt = \beta SI - \gamma I$
- $dR/dt = \gamma I$

Počáteční podmínky modelu:

- $S = S_0$
- $I = I_0$
- $R = 0$

Z toho nám plyne že:

- $S \leq S_0 \rightarrow$ po úpravě 2. rovnice modelu tedy dostaneme:
- $dI/dt < I(\beta S_0 - \gamma) \rightarrow$ epidemie se tedy rozšíří, pokud:
- $S_0 > \gamma/\beta \rightarrow$ o čemž se dá přemýšlet jako o tzv. R_0 (Reprodukční číslo) kdy:
- $R_0 = (\beta/\gamma) * S_0$ což se dá upravit jako: S_0/q
- kdy $q = \beta/\gamma$ ($q =$ část populace, která přijde do kontaktu s infikovanou osobou v době, kdy je infekční)
- $R_0 > 1 =$ počet infikovaných bude růst
- $R_0 < 1 =$ počet infikovaných bude klesat

(Ma a Li, 2009 str. 6-10)

4.2.3 S(E)IR model

Používá se na krátkodobou předpověď primárně u nemocí, kde je výrazná časová prodleva mezi vystavením viru a propuknutí nemoci, jako např. Covid-19. Proto přidává k SIR modelu ještě jednu skupinu populace a to:

- E – exposed
 - obyvatelstvo vystavené viru, avšak ještě neinfekční

Jinak pro něj platí stejné podmínky jako pro SIR model, tedy že část populace v R se nemůže znovu nakazit atd. Případům omezené imunity, reinfekce či přidání skupiny zemřelých se pak věnují jiné modely (Májek aj., 2021).

Tento model byl pak použit v rámci pandemie v České republice ministerstvem zdravotnictví, konkrétně se tak dozvíme z metodické dokumentace UZIS, kde také zjistíme, že konkrétně model S(E)IR byl použit právě pro krátkodobou předpověď dynamiky pandemie. Na následujícím obrázku můžeme vidět strukturu modelu (Májek aj., 2021).



Obr. 3 Struktura S(E)IR modelu používaného ČR
převzato z (Májek aj., 2021)

4.2.4 S(E)IR(V) model

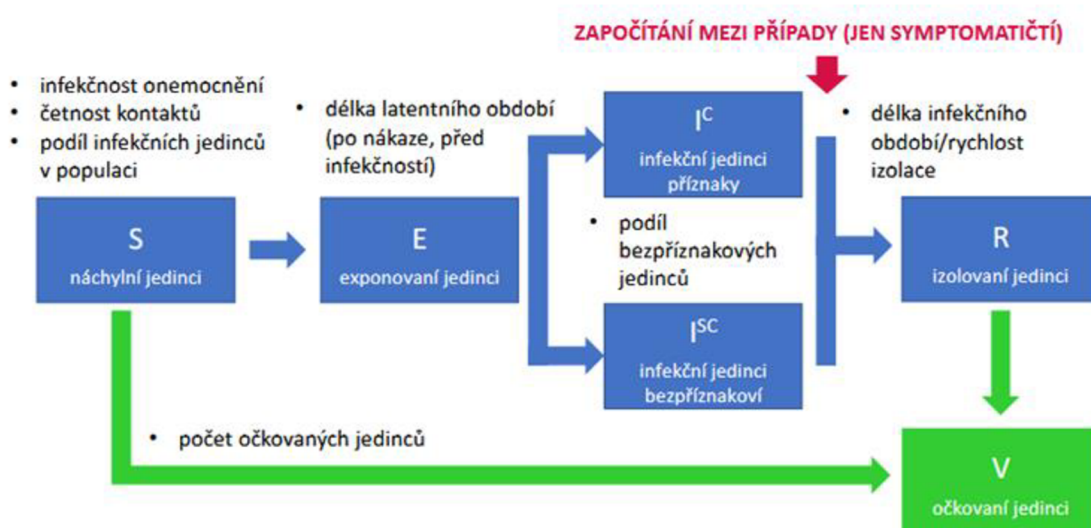
Model používaný Ministerstvem zdravotnictví a UZIS pro projekci dynamiky pandemie v delším časovém horizontu. Původně se jednalo pouze o model S(E)IR stejně jako v krátkodobé projekci, avšak doznal pár změn pro lepší projekci z hlediska časového horizontu a nakonec došlo i přidání nové skupiny populace:

- V – Vaccinated
 - Očkovaná část populace
 - Část populace po nemoci

Mezi důležité změny, kterých model doznal proti krátkodobé projekci, patří:

- Po přesunu do R se někteří přesunou do V a část pacientů z obou kompartmentů se následně přesune zpět do S, tedy model umožňuje reinfekci a manipulaci s efektivitou očkování.
- Změnil se také způsob počítání jedinců s potvrzeným onemocněním, tento model započítává pouze symptomatické jedince, ač pracuje i s asymptomatickými.

Struktura modelu používaného UZIS je k vidění na následujícím obrázku (Májek aj., 2021).



Obr. 4 Struktura S(E)IR(V) modelu používaného ČR převzato z (Májek aj., 2021)

4.2.5 Reprodukční číslo R

V neposlední řadě bychom se ještě v rámci epidemiologických modelů zastavili u reprodukčního čísla neboli R_0 , jak jsme na něj narazili o pár odstavců výše u SIR modelu. Protože po celou dobu pandemie sloužilo jako dobře prezentovatelný orientační ukazatel toho, jak rychle se Covid-19 šíří populací, je i součástí výpočtů v modelech a bylo i součástí výpočtů pro PES (Protiepidemický systém ČR).

Reprodukční číslo je parametr, který vyjadřuje, kolik osob nakazí jedna nakažená osoba, z čehož nám logicky vyplývá, že cílem jakýchkoliv opatření by mělo být dostat toto číslo na co nejnižší hodnotu neboli na tzv. efektivní reprodukční číslo.

Výpočet reprodukčního čísla, stejně jako většina částí modelu, je však zatížen jistou úrovní odhadu a tedy z toho plynoucích nepřesností, ať už se jedná o prodlevu

způsobenou inkubační dobou viru či v současné době neshodou panující ohledně dané inkubační doby Sars-CoV2 a infekčnosti, mělo by tedy být bráno s jistou rezervou (Májek aj., 2020).

4.3 Dynamika pandemie v České republice

K dynamice pandemie ČR přispěla celá řada různých druhů opatření a systémů. V této práci se však zaměříme na 2 z nich, a to koronavirový semafor a Protiepidemický systém České republiky neboli PES.

Koronavirový semafor byl jedním z prvních velkých systémů vlády na zpomalení šíření pandemie. Představuje systém čtyřstupňové pohotovosti, kdy je jednotlivým krajům přiřazena barva odpovídající riziku přenosu a také konkrétním opatřením s tím spojených (MZČR).

Stupeň pohotovosti	Epidemiologické kritérium	Charakteristika
0	Nulové/zanedbatelné riziko	Nulový/ojedinelý výskyt onemocnění v hodnocené oblasti ČR
I	Výskyt nákazy v ČR bez komunitního přenosu	Vyskytují se sporadické případy, lokální klastry, lokální epidemie.
II	Počínající komunitní přenos v ČR	Charakterizován 30 % nebo vyšším podílem případů, u kterých není jasný zdroj nákazy nebo nebyly importovány, a to při úhrnném týdenním počtu nově diagnostikovaných osob v dané oblasti 30/100 000 obyvatel nebo vyšším.
III	Narůstající/přetrvávající komunitní přenos v ČR	Denní incidence případů v rámci komunitního přenosu má trvale narůstající trend anebo setrvalý trend.

*Tabulka 3 Covid semafor
převzato a upraveno z (MZČR)*

Protiepidemický systém České republiky (PES) byl pak vytvořený jako náhrada za Koronavirový semafor v listopadu 2020 ministerstvem zdravotnictví ČR. Rozhodoval o zavedení a zrušení opatření během pandemie Covid-19 a měl tedy podíl na dynamice pandemie. Byl aktivní jen do ledna 2021. Opatření řešil na rozdíl od semaforu celorepublikově za pomocí tzv. indexu rizika, avšak byl počítán pro každý den. Index rizika nabýval hodnot od 0 do 100 a jeho stanovení se určovalo pomocí 4 ukazatelů:

- Počet pozitivních na 100 000 obyvatel za posledních 14 dní (20 %)
- Počet pozitivních seniorů na 100 000 obyvatel ve věku od 65 let za posledních 14 dní (20 %)
- Reprodukční číslo (30 %)
- Průměrná pozitivita testů za posledních 7 dní (30 %)

Hodnota souhrnného indexu rizika	Odvozený stupeň pohotovosti pro daný den	Zjednodušená slovní definice
≥ 76	Stupeň 5: Fialový	Kritický stav
61-75	Stupeň 4: Červený	Vážný stav
41-60	Stupeň 3: Oranžový	Naléhavý stav
21-40	Stupeň 2: Žlutý	Stav pohotovosti
≤ 20	Stupeň 1: Zelený	Stav opatrnosti

Tabulka 4 Stupně pohotovosti

převzato z (MZČR)

Pro přechod do vyššího stupně však musel být index vyšší minimálně 3 dny, pro přechod do nižšího musel být nižší 7 dní (MZČR).

4.4 Systémová dynamika, systémové myšlení a systém

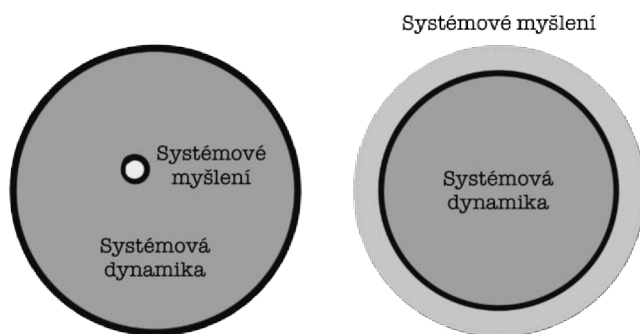
4.4.1 Systémová dynamika

Mentální modely jsou omezenou a proměnlivou reprezentací vnějšího světa, která vzniká kvůli našim nedokonalým smyslům, důkazem čehož je např. velké množství optických klamů a iluzí.

Systémové myšlení se pak pomocí svých metod a nástrojů pokouší tyto omezení překonávat. Jedná se tedy o velmi specifický pohled na svět, který nám pomáhá s konstrukcí mentálních modelů tak, aby byly blíže realitě.

S rostoucí složitostí okolního světa se potřeba pro systémové myšlení stále zvětšuje, jelikož roste potřeba zavést do jednotlivých řešení problémů znalosti z více oblastí.

Obecně se tedy dá říci, že pomocí systémové dynamiky nahlížíme na jednotlivé systémy včetně vztahů mezi jejich prvky. Hlavním pojmem, co nás tedy v rámci systémové dynamiky bude zajímat, je systém. Předtím je však důležité zmínit vztah systémového myšlení a systémové dynamiky, který je poněkud komplikovaný, respektive je otázkou konkrétní dané definice, zda je systémové myšlení součástí systémové dynamiky či obráceně. Obě dvě varianty můžeme vidět na následujících obrázcích (Bureš, 2011).



Obr. 5 Vztah systémové dynamiky a systémového myšlení

Převzato a upraveno z (Bureš, 2011)

Vrátíme-li se k systému, tak jeho samotnou definici bychom z podstaty věci však hledali jen velmi těžko, protože každý obor využívající systémové dynamiky má vlastní, avšak shodují se v některých bodech:

- Systém je v nich komplexem vzájemně spjatých prvků.
- Systém vyjadřuje zvláštní jednotu s okolím.
- Systém může být současně prvkem systému vyššího řádu.
- Prvek může být současně systémem nižšího řádu.

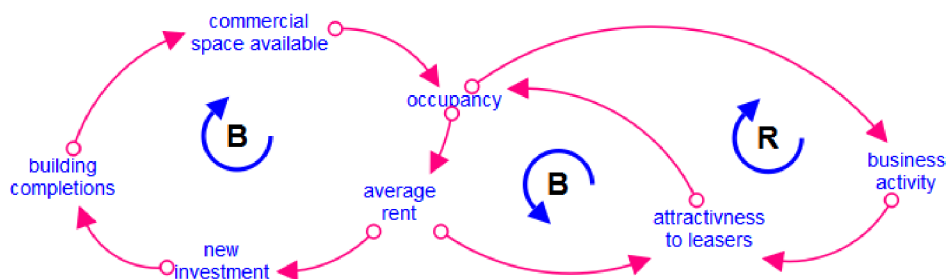
(Bureš, 2011, s.124)

Co se dělení různých systémů týče, je v podstatě stejné jako dělení matematických modelů, o kterém jsem se zmínil výše v této práci, protože matematické modely jsou reprezentací systému, konkrétně tzv. tvrdého systému. Tvrdé systémy lze vyjádřit přesnými matematickými rovnicemi a problémy, které řeší, bývají dobře strukturované. Proti tomu měkké systémy jednají s aspekty lidské činnosti a nemají přesně definovanou strukturu (Kirk, 1995).

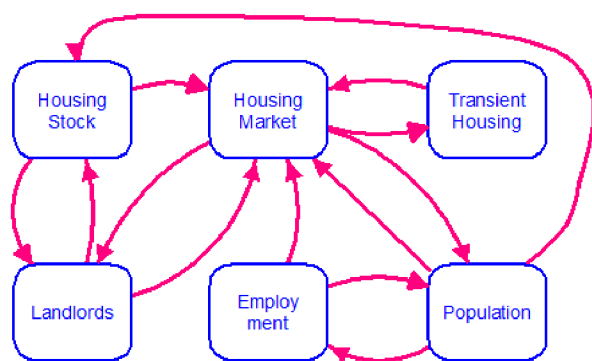
Vzhledem k tomu, že nástroje systémové dynamiky budou využity v praktické části této práce, považuji za vhodné, je zde zmínit. Mezi hlavní nástroje se řadí dva druhy diagramů a to tzv. Causal loop diagram a Stock and Flow diagram. Na oba diagramy se blíže podíváme v následujících odstavcích.

4.4.2 Causal loop diagram (CLD)

Neboli příčinný smyčkový diagram, který slouží ke grafickému znázornění jednotlivých proměnných a jejich vztahů v systému určených polaritou konektorů, které tyto vztahy vytvářejí. Dělí se na konceptuální a modulové mapy. Konceptuální mapy používají zpětnovazební smyčky a nezatěžují se hlubší strukturou systému. Proti tomu modulové mapy tvoří zpětnovazební smyčky mezi jednotlivými modely, ukazují interakci mezi nimi a pomáhají tím udržet přehled o složitějších modelech (iseesystems).



Obr. 6 Konceptuální diagram
převzato a upraveno z (iseesystems)



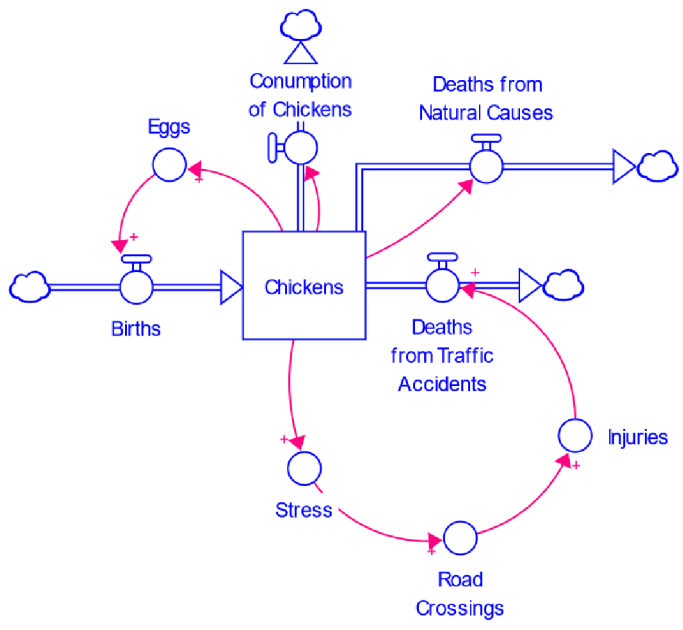
Obr. 7 Modulový smyčkový diagram
převzato a upraveno z (iseesystems)

4.4.3 Stock and flow diagram (SFD)

Neboli diagram hladin a toků, jenž do určité míry vychází z CLD diagramu, avšak reprezentuje strukturu systému daleko podrobněji. Jeho prvky jsou hladiny, toky, konektory a konvertory, popřípadě některé softwary uvádí hranici systému symbolem mraku. (Vensim)

1. Hladina
 - a. Ukazuje konkrétní stav systému
2. Tok
 - a. Prezentuje nám, o kolik a jak rychle se mění stav v hladinách
3. Konvertor
 - a. Víceúčelová součást diagramu
 - b. Slouží pro konstanty, externí hodnoty...

Právě SFD diagramy se dají rozdělit do výše zmíněných CLD modulů, jak bylo zmíněno o odstavec výše. (iseesystems)



Obr. 8 SFD diagram
 převzato z (iseesystems)

5 Praktická část

V rámci praktické části se práce zabýváme vytvořením konkrétního modelu systémové dynamiky na šíření viru SARS-CoV-2 během pandemie v populaci v rámci České republiky.

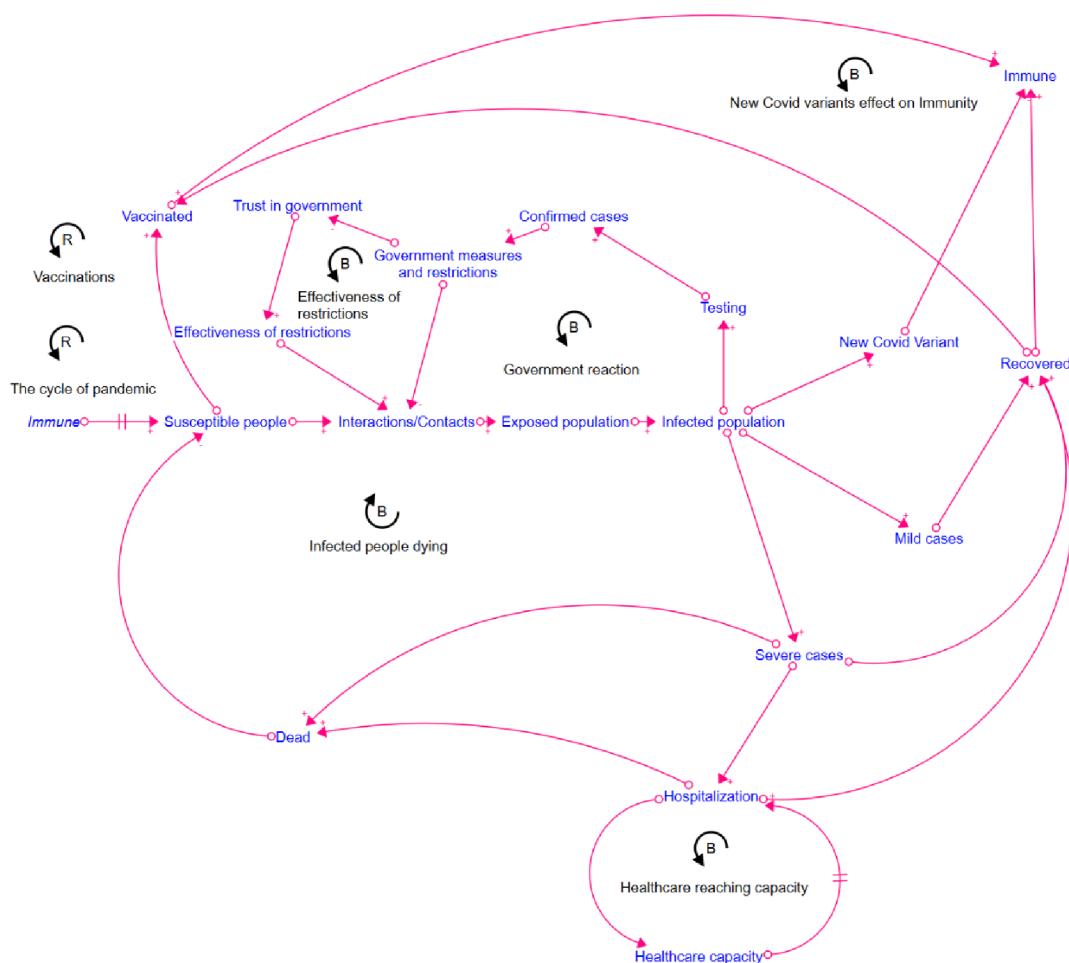
Pro dosažení uceleného chápání dané problematiky budeme při tvorbě modelu využívat kombinaci tvrdých a měkkých systémů. Model je vystaven primárně na základech z modelu SIR a jeho jednotlivých variantách, jež byly popsány v teoretické části, tedy základem modelu je tvrdý systém. Jako nástroj pro vytvoření modelu byl zvolen program Stella Professional. Nejprve se zaměříme na tvorbu Příčinného smyčkového diagramu (CLD) a poté budeme pokračovat diagramem stavů a toků (SFD).

5.1 Příčinný smyčkový diagram

Primárním cílem příčinného smyčkového diagramu neboli CLD je vytvoření první úvahy týkající se tématu, uspořádání a určení si důležitých proměnných a jejich interakce mezi sebou. Kostra modelu byla v principu vytvořena na základech modelu SIR konkrétně jeho S(E)IR(V) variantě, kdy:

- S: V modelu znázorněno proměnnou Susceptible people.
- E: V modelu znázorněno proměnnou Exposed population.
- I: V modelu znázorněno proměnnou Infected population.
- R: V modelu znázorněno proměnnými Dead a Immune.
- V: V modelu znázorněno proměnnou Vaccinated

CLD diagram bohužel v této podobě nereprezentuje koncový SFD diagram, avšak reprezentuje zárodky jeho budoucích modulů. Vzhledem k tomu, že pandemie ovlivňuje mnoho aspektů a proměnných, které se vzájemně ovlivňují, není tento CLD diagram dostatečně komplexní pro zahrnutí celé problematiky pandemie. Proto musí být model abstrahován a vybrány pouze ty nejdůležitější proměnné, které ovlivňují průběh pandemie a které jsou námi sledovány.



Obr. 9 CLD diagram

Vlastní zpracování

5.1.1 Princip fungování CLD diagramu

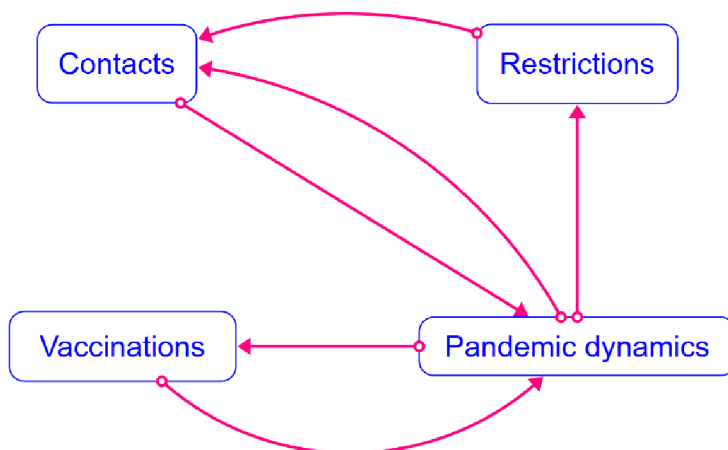
Úvaha ohledně CLD diagramu je následující. Člověk začíná v prvku náchylné osoby, odkud se vlivem interakcí, které jsou ovlivňovány vládními opatřeními a důvěrou v ně, dostává do prvku lidí vystavených viru. Odkud se časem přesouvá do infekčních lidí, kde se model větví podle různých aspektů infekce. Pokud proběhlo testování, dostane se do zaznamenaných případů nemoci, a poté do mírných nebo závažných případů. Odtud pokračuje do uzdravených nebo v případě těžkého průběhu je hospitalizován. Hospitalizace ovšem vytváří tlak na zdravotnický systém, který má jen určité množství kapacit, se kterými pracuje, a pokud dojde k jejich naplnění, nastává kolaps. Pacient následně buďto umírá nebo pokračuje do

uzdravených, odkud následně putuje na určitý čas do imunních a celý koloběh začíná znovu.

Reinfekce je samozřejmě možná nejen po uplynutí určité doby, ale také kvůli novým variantám viru, a vrací tak populaci z imunních do prvku náchylných osob. Prodloužení doby reinfekce je možné absolvováním očkování. Ostatní smyčky se pak zabývají např. reakcí vlády na pandemii a efektivitou dané reakce či důvěrou lidí, avšak ve značně zjednodušené podobě, jelikož se v jádru jedná o měkké systémy, jejichž modelování je značně zkomplikováno tím, že nejsou dány exaktními matematickými vzorci.

5.2 Diagram hladin a toků

V rámci sekce zaměřené na diagram hladin a toků se budeme podrobněji zabývat jednotlivými částmi našeho modelu, včetně jejich charakteristik, zdrojů dat a vzájemných vztahů. Náš model se skládá ze čtyř modulů: Contacts, Restrictions, Vaccinations a Pandemic dynamics, z nichž každý se zaměřuje na klíčový aspekt pandemie.



Obr. 10 Moduly diagramu hladin a toků

Vlastní zpracování

5.2.1 Dotazník

V rámci tvorby SFD diagramu jsem narazil na chybějící část dat, která byla klíčová pro úspěšné sestavení modelu. Vzhledem k tomu, že nebylo možné získat

tyto data jinými způsoby, rozhodl jsem se použít dotazníkové šetření jako alternativní zdroj informací.

Dotazníkové šetření bylo navrženo tak, aby obsahovalo otázky, které byly zaměřené na klíčové proměnné potřebné pro tvorbu SFD diagramu.

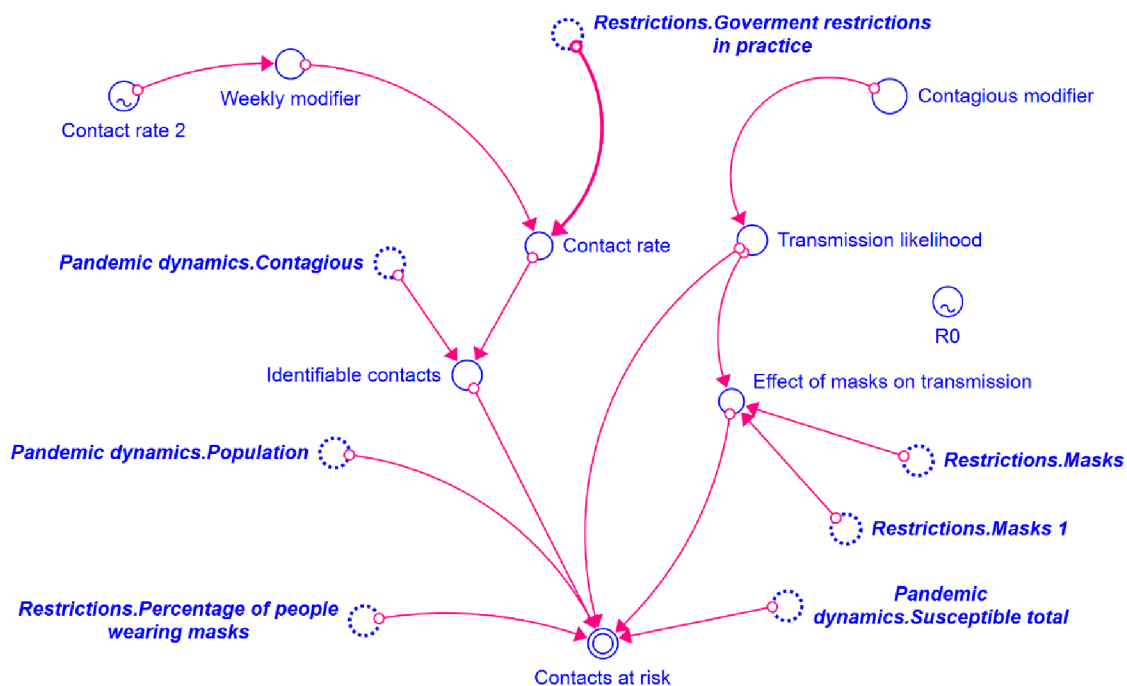
Dotazník jako takový je uvedený v příloze bakalářské práce, samotné otázky jsou pak uvedeny v relevantních částech práce.

5.2.2 Modul Kontakty (Contacts)

Tento modul, skládající se primárně z konvertorů, slouží k určení množství kontaktů, které následně vedou k rozvinutí nemoci u dalších lidí. Ovlivňuje se navzájem s modulem Pandemic dynamics a je ovlivňován modulem Restrictions.

Výsledkem celého modulu je konvertor s názvem Contacts at risk (Rizikové kontakty), která je určena vztahem:

$$\left(\text{Identifiable contacts} * \text{Transmission likelihood} * \frac{\text{Susceptible total}}{\text{Population}} \right) * (1 - \text{Percentage of people wearing masks}) + \left(\text{Identifiable contacts} * \text{Effect of masks on transmission} * \frac{\text{Susceptible total}}{\text{Population}} \right) * \text{Percentage of people wearing masks}$$



Obr. 11 Modul Contacts

Vlastní zpracování

Susceptible total (Náchylní celkem) je část populace, která je náchylná k nákaze virem v tomto čase. Na počátku se jedná o celou populaci České republiky, tedy o 10 533 399 lidí, jak uvádí český statistický úřad, a je tedy shodná s proměnnou Population, avšak jen do 1. nákazy. Identifiable contacts (Identifikovatelné kontakty) jsou všechny kontakty nakažených lidí za daný den, určují se vztahem:

```
Identifiable contacts=Contagious*Contact rate
```

Contagious (Nakažlivý) je pak suma všech hladin kde se vyskytují jednotliví neizolovaní nakažliví v daném čase a mohou tedy někoho nakazit.

```
Contagious = Infected asymptomatic + Infected + symptomatic +  
Population with severe symptoms tested + Waiting for Testing +  
Waiting for Hospitalization + Testing
```

Contact rate (Kontakty) definuje množství jednotlivých kontaktů pro nakažené a je definován vztahem:

```
IF Government restrictions in practice = 0 AND TIME < 535  
    THEN Weekly modifier  
    ELSE IF Governmen restrictions in practice > 0  
        AND TIME < 535  
    THEN Weekly modifier/Restrictions.Goverment_restrictions_in_practice  
    ELSE IF Restrictions.Goverment_restrictions_in_practice = 0  
        AND TIME > 794 THEN 1,14  
    ELSE 1,14/Restrictions.Goverment_restrictions_in_practice
```

Tento vztah zohledňuje svými podmínkami to, zda platila či neplatila vládní nařízení, a také určuje bazální počet denních kontaktů pro období, kdy nemáme přímo dostupná data. Vychází z průměru nalezených dat z České republiky z předchozího období a z odhadu z dat dalších studií z USA (Feehan aj., 2021), Číny (Yunxuan Li aj., 2022).

Government restrictions in practice (Vládní omezení v praxi) je výstupem modulu Restrictions, proto se na něj podíváme až v další části.

Weekly modifier (Týdenní modifikátor) je nástroj, který převádí data z konvertoru "Contact rate from data" (Míra kontaktů z dat) pro účely simulace běžící v dnech. Tato konverze je nutná, protože původní data jsou uváděna v týdnech a omezena na prvních 76 týdnů pandemie. Tyto informace byly převzaty z projektu "Život během pandemie" (Prokop aj.,).

Effect of masks on transmission (Vliv roušek na přenos) závisí na pravděpodobnosti přenosu během kontaktu mezi infikovanou osobou a zdravou osobou. Při výpočtu se zohledňují konkrétní opatření pro nošení ústní ochrany a průměrná účinnost dané ochrany. Vyjádřeno jako:

```

IF TIME ≤ 19
    THEN Transmission likelihood
ELSE IF TIME > 19 AND TIME < 125
    THEN Transmission likelihood * Restrictions.Masks1
ELSE IF TIME ≥ 125 AND TIME < 187
    THEN Transmission likelihood * Restrictions.Masks1
ELSE IF TIME ≥ 187 AND TIME < 491
    THEN Transmission likelihood * Restrictions.Masks
ELSE IF TIME ≥ 491 AND TIME < 553
    THEN Transmission likelihood
ELSE IF TIME ≥ 553 AND TIME < 796
    THEN Transmission likelihood * Restrictions.Masks
ELSE Transmission likelihood

```

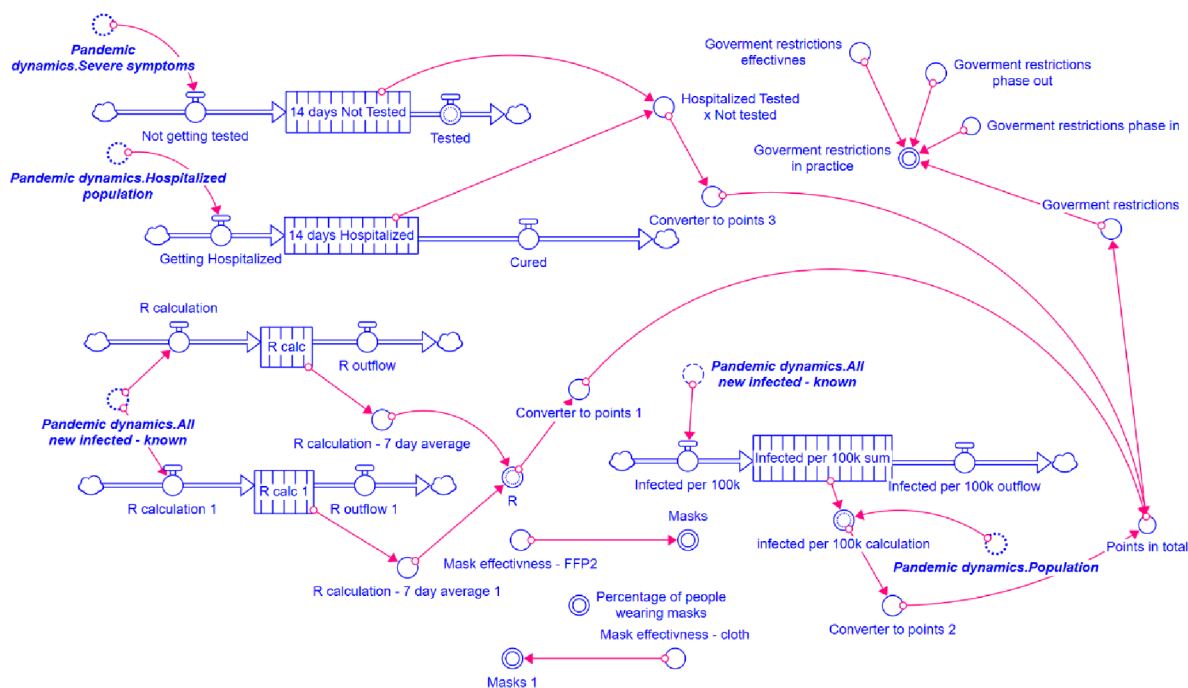
Transmission likelihood (Pravděpodobnost přenosu) je stanovena na základě R_0 , tedy průměrného počtu osob, které může jedna infikovaná osoba nakazit, jak bylo již zmíněno v teoretické části, které se u Covidu-19 podle studií pohybuje od 2,5 do 5,7 (Sanche aj., 2020). Nicméně protože člověk zůstává infekční po několik dní, je R_0 ještě vydělen průměrným počtem dní, kdy je osoba infekční (Contagious Modifier). Tento průměr je stanoven na 7 dní, což odpovídá průměrné době infekčnosti člověka, která se pohybuje mezi 5 a 10 dny (CDC).

$$\text{Transmission likelihood} = \frac{5,7}{\text{Contagious modifier}}$$

5.2.3 Modul Restrikce (Restrictions)

Jak můžeme vidět na obrázku modul Restrictions (Restrikce) má dvě oddělené sekce a to Masks (Roušky) a Omezení kontaktů, které je založené na Protiepidemickém systému. Jenž v České republice fungoval od prosince 2020 až do jara 2021 a byl založen na množství bodů které určovalo konkrétní opatření, tzn. pokud číslo R překročilo určitou hranici, počet lidí v nemocnici, co nebyl testovaný se zvedl, nebo například pokud množství infikovaných na 100 000 obyvatel stouplo,

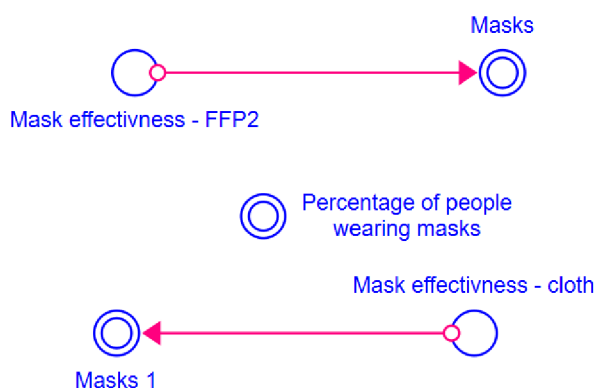
body se přičítaly, v opačném případě se pak body odčítaly (MZČR). Ovlivňuje modul Contacts a je ovlivňován modulem Flow of People.



Obr. 12 Modul Restrictions

Vlastní zpracování

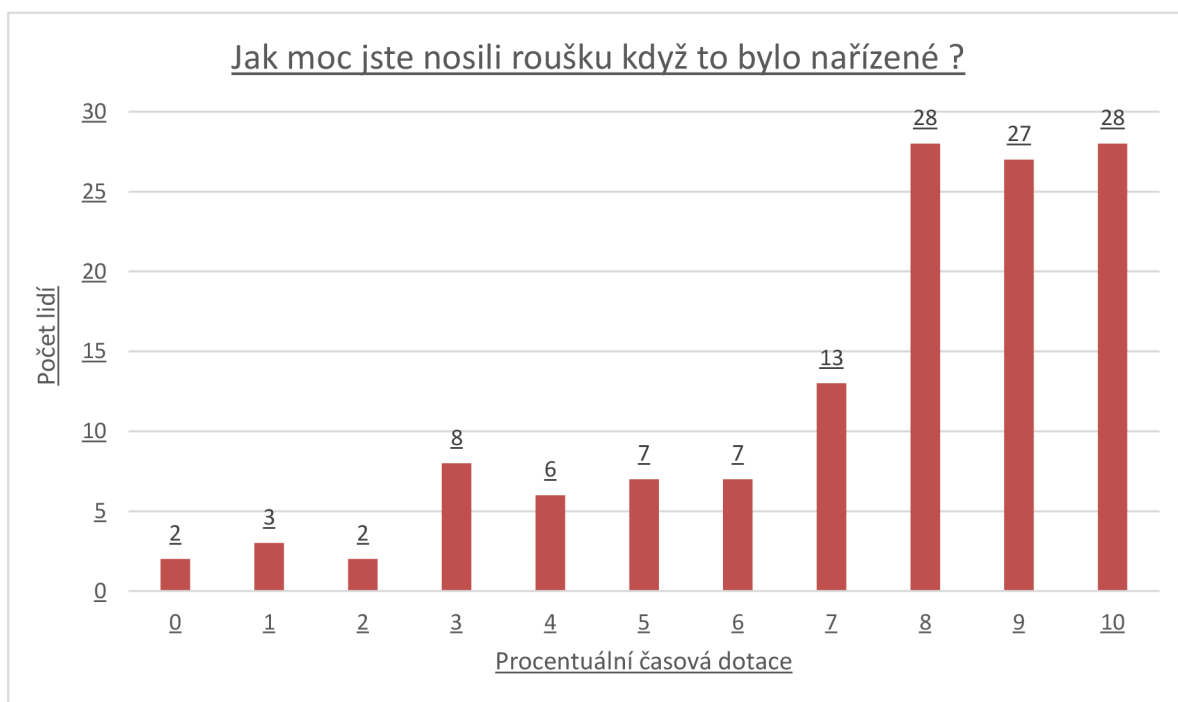
V části vyobrazené na obrázku 13 je vymodelována efektivita roušek s ohledem na efektivitu nařízení. Mask effectiveness (Efektivita roušky) označuje procentuální množství, o které je schopna redukovat kapénky a další nežádoucí látky, které se při dýchání dostanou k další osobě. Článek na stránkách americké CDC (Centers for Disease Control and Prevention) (Centra pro kontrolu a prevenci nemocí) pak uvádí, že masky typu FFP2 a jejich ekvivalenty mají efektivitu přibližně 83 % a látkové masky okolo 56 % (Andrejko aj., 2022).



Obr. 13 Modul Restrictions – Roušky
Vlastní zpracování

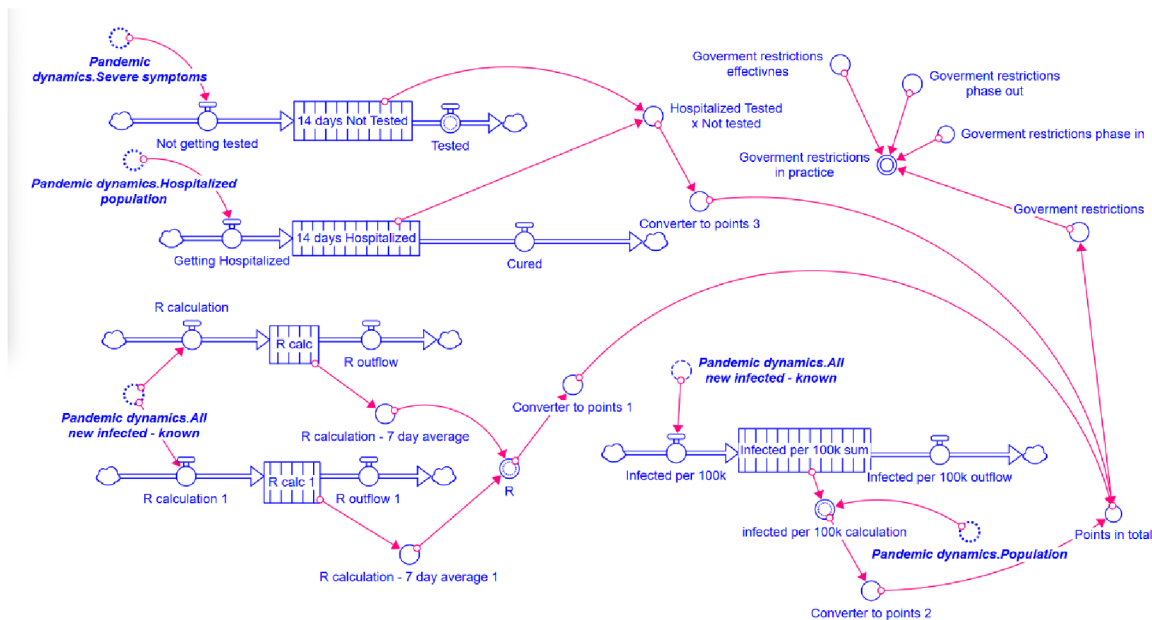
Co se Percentage of people wearing masks (Procento lidí, kteří nosí masky) týče, tak konkrétní data pro Českou republiku se nepodařilo dohledat, proto se jejich získání řešilo formou dotazníku. Avšak pracujeme také s předpokladem, že během 1. vlny pandemie v České republice byla ochota dodržovat opatření, restrikce atd. daleko větší než po zbytek pandemie. Proto rovnice vypadá následovně:

IF TIME<125 THEN 0,95 ELSE 0,74046



Graf 1: Nošení roušky během nařízení
Vlastní zpracování

Čísla 0 až 10 odpovídají procentům času, kdy daný člověk nosil roušku v době platného nařízení. Průměrně se tedy vzhledem k výsledkům dá říci, že roušku v nějaký moment v čase mělo nasazeno cca 74% obyvatelstva.



Obr. 14 Modul Restrictions – Ostatní opatření

Vlastní zpracování

V rámci zbylé části modulu Restrictions bude pro nejlepší pochopení vhodné začít od konce, tedy od jejího výsledku nazvané jako Government restrictions in practice (Vládní restrikce v praxi), které je definováno následujícím výrazem:

```
IF TIME ≥ Government_restrictions_phase_out THEN 0
ELSE IF TIME < Government_restrictions_phase_in THEN 0
ELSE Government_restrictions * Government_restrictions_effectivnes
```

Výraz "Government restrictions phase out" popisuje období, kdy se na území České republiky postupně ukončují veškerá opatření související s pandemií. Na druhé straně výraz "Government restriction phase in" označuje období, kdy jsou opatření poprvé zaváděna.

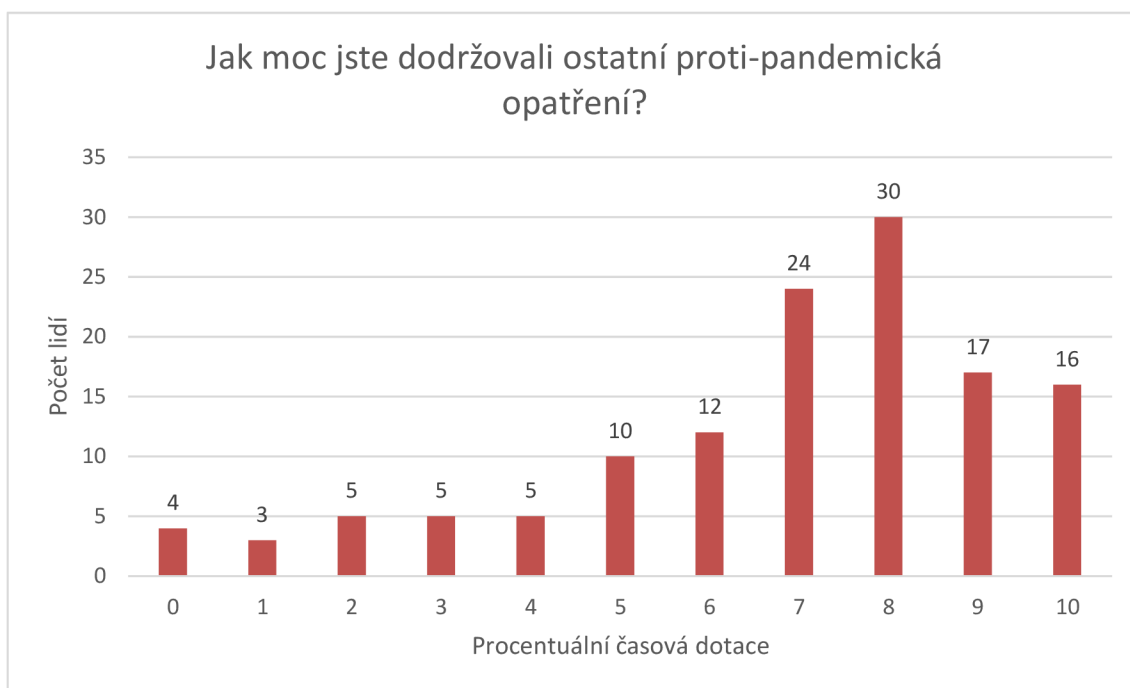
Government restrictions (Vládní restrikce) jsou určována pomocí již zmíněného bodového hodnocení, který je inspirován v protiepidemickém systému v České republice. Na rozdíl od tohoto systému se však bodový systém vládních omezení skládá pouze ze 3 částí.

Points in total (Body celkem), jak již název napovídá, je součtem veškerých bodů z restrikcí.

V rámci modelování Government restrictions (Vládních restrikce) bylo nutné použít velké množství abstrakce, neboť detailní simulace by byla extrémně složitá. V našem konvertoru jsme se proto vzdálili metodologii vládních opatření a místo toho jsme zavedli bodový systém, který odpovídá konkrétním číselným hodnotám. Tímto číslem následně dělíme počtem kontaktů v modulu Contacts (Kontakty), přičemž bere v úvahu efektivitu opatření, kterou podrobněji rozebíráme níže. K usnadnění této práce jsme vytvořili již zmíněný pomocný konvertor Government restrictions in practice (Vládní restrikce v praxi), který aplikuje efektivitu vládních opatření a časy platnosti restrikcí.

```
Government restrictions=IF Points_in_total < 10 THEN 1
ELSE IF Points_in_total ≥ 10 AND Points_in_total < 20 THEN 1,5
ELSE IF Points_in_total ≥ 20 AND Points_in_total < 30 THEN 2
ELSE IF Points_in_total ≥ 30 AND Points_in_total < 40 THEN 2,5
ELSE IF Points_in_total ≥ 40 AND Points_in_total < 50 THEN 3
ELSE IF Points_in_total ≥ 50 AND Points_in_total < 60 THEN 3,5
ELSE IF Points_in_total ≥ 60 AND Points_in_total < 70 THEN 3
ELSE IF Points_in_total ≥ 70 AND Points_in_total < 80 THEN 4,5 ELSE 5
```

Konkrétní data pro Government restrictions effectiveness (Efektivita vládních omezení) jsme opět získali dotazníkovým šetřením.



Graf 2: Dodržování proti-pandemických opatření

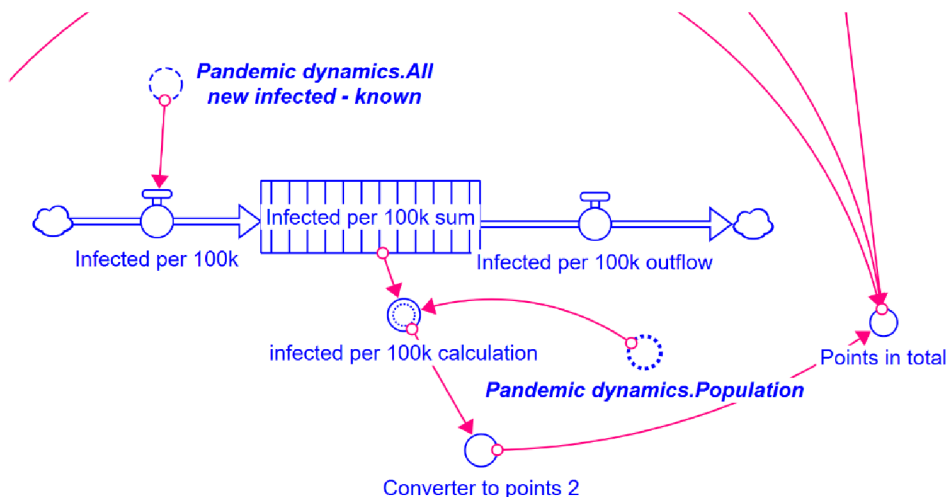
Vlastní zpracování

Čísla 0 až 10 opět odpovídají procentům podle toho, jak lidé opatření dodržovali. Průměrně se tedy dá říci, že zhruba 68% populace dodržovalo veškerá vládní nařízení během pandemie. Avšak i zde pracujeme s předpokladem, že během 1. vlny pandemie v České republice byla ochota dodržovat opatření, restrikce atd. daleko větší než po zbytek pandemie, a proto výsledný výraz v konvertoru vypadá takto:

```
IF TIME < 125
    THEN 0,95
    ELSE 0,68015
```

Infected per 100 000 (Nakažení na 100 000) pak ukazuje počet nakažených na 100 000 obyvatel za posledních 14 dní. All new known infected (Všichni známí nový nakažení) je součet všech nakažených v modelu, o kterých stát ví, a je tedy dán součtem těchto odtoků:

```
Getting_results+_no_Quarantine + Getting_results+_no_Quarantine_1 + Quarantining
```

Obr. 15 Počet nakažených na 100 000 obyvatel

Vlastní zpracování

Infected per 100k sum je součet všech All new known infected za posledních 14 dní a Infected per 100k calculation je výpočet počtu nově infikovaných na 100 tisíc obyvatel:

$$\frac{\text{Infected_per_100k_sum}}{\text{Population}} * 100\ 000$$

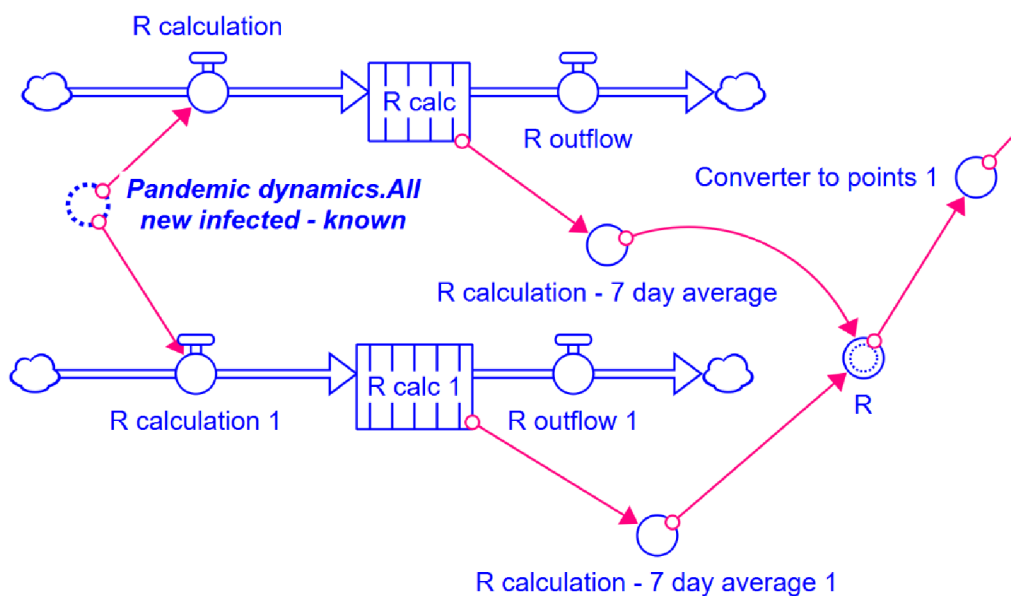
Converter to points 2 pak převádí počet infikovaných na bodovou hodnotu určenou pro vládní opatření podle dokumentace MZČR, stejně jako i Converter to points 1 (MZČR).

```

IF infected_per_100k_calculation < 10 THEN 0
ELSE IF infected_per_100k_calculation ≥ 10
AND infected_per_100k_calculation < 25 THEN 2
ELSE IF infected_per_100k_calculation ≥ 25
AND infected_per_100k_calculation < 50 THEN 4
ELSE IF infected_per_100k_calculation ≥ 50
AND infected_per_100k_calculation < 120 THEN 7
ELSE IF infected_per_100k_calculation ≥ 120
AND infected_per_100k_calculation < 240 THEN 10
ELSE IF infected_per_100k_calculation ≥ 240
AND infected_per_100k_calculation < 480 THEN 13
ELSE IF infected_per_100k_calculation
AND infected_per_100k_calculation < 960 THEN 16 ELSE 20

```

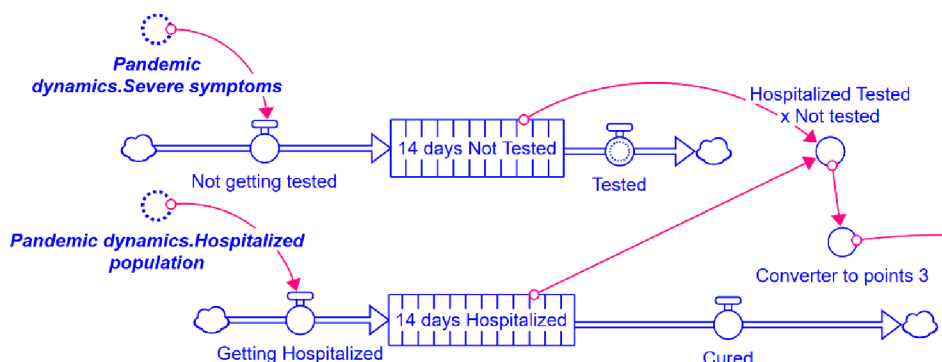
Princip výpočtu reprodukčního čísla je prakticky stejný, jako používalo ministerstvo zdravotnictví ČR, který spočívá ve vydělení průměrného počtu nově nakažených za posledních 7 dní průměrným počtem nakažených za posledních 7 dní, avšak zpožděných o 5 dní.



Obr. 16 Reprodukční číslo

Vlastní zpracování

Následující část modulu určuje podíl nezachycených hospitalizovaných. Populace s vážnými příznaky, která nebyla testována, se hromadí v hladině "14 days Not Tested". Zde zůstávají po dobu 14 dní. Hladina "14 days Hospitalized" zahrnuje všechny hospitalizované během posledních 14 dní.



Obr. 17 Podíl nezachycených hospitalizovaných

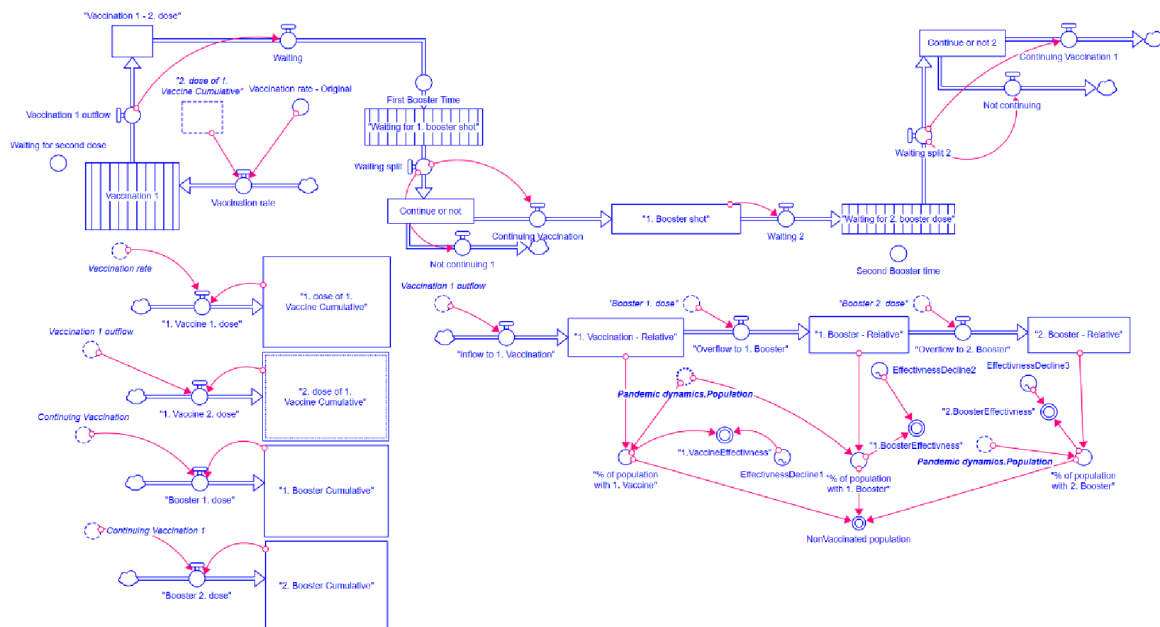
Vlastní zpracování

Poměr netestovaných v rámci hospitalizace oproti testovaným se pak vyjadřuje jako "Hospitalized Tested x Not tested" a je vypočten dělením počtu netestovaných hospitalizovaných lidí a testovaných hospitalizovaných lidí. Kvůli možnosti dělení nulou je použita IF podmínka jako ochrana.

```
IF "14_days_Hospitalized" = 0 THEN 0 ELSE
"14_days_Not_Testetd"/("14_days_Hospitalized"/100)
```

5.2.4 Modul Očkování (Vaccinations)

Tento modul se zaměřuje na modelování situace o očkování v České republice během pandemie a skládá se z několika samostatných částí. Ovlivňuje se navzájem s modulem Flow of People a dále ovlivňuje modul Contacts. Jako jednotku používáme People (Lidé) a data byla primárně čerpána ze stránek MZČR.



Obr. 18 Modul Vaccinations

Vlastní zpracování

Vaccination rate – Original (Původní míra očkování) se určuje jako průměrný denní počet lidí, kteří byli očkovaní v období od 1. dubna do 1. listopadu 2021, kdy proběhla naprostá většina očkování první dávkou a vychází:

$$\text{Vaccination_rate_Original} = 23\,500$$

Na základě toho a omezení maximálního množství lidí očkovaných 1. dávkou stanovených na 7 000 000 se plní hladina Vaccination 1 (Očkování 1) vztahem:

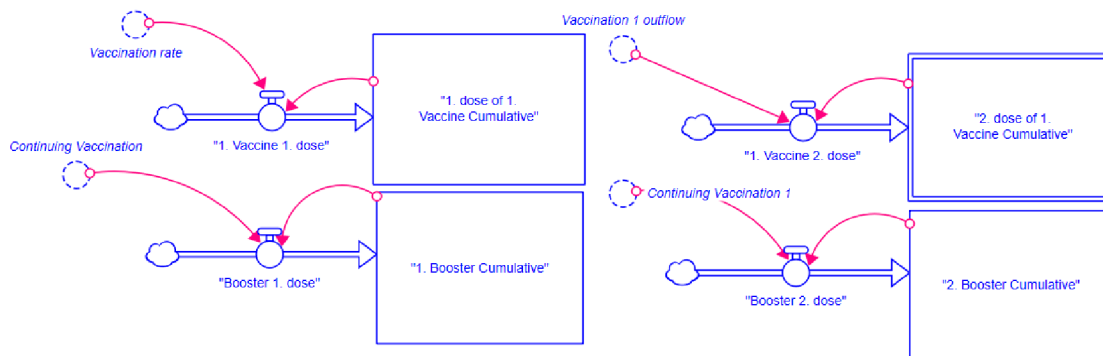
```

IF "2._dose_of_1._Vaccine_Cumulative" < 7000000
THEN DELAY("Vaccination_rate_-_Original"; 274; 0)
ELSE 0

```

Kde hodnota 274 je počet dní do začátku očkování. Lidé, kteří dostanou 1. dávku očkování a jsou tedy v hladině Vaccination 1, v ní pak zůstávají po dobu 14 dní, což je čekací doba mezi první a druhou dávkou, a poté postoupí do hladiny Vaccination 1-2. dose (Očkování 1–2. dávka), protože počet lidí s 1. a 2. dávkou je téměř identický. Odtud se přesouvají do Waiting for 1. booster shot (Čekání na 1. posilovací dávku), kde stráví 170 dní, odkud 65% populace s 1. očkováním pokračuje na posilovací dávku. Waiting for 2. booster shot (Čekání na 2. posilovací dávku) pak zabere dalších 183 dní, odkud 17 % pokračuje na již zmíněnou 2. posilovací dávku očkování.

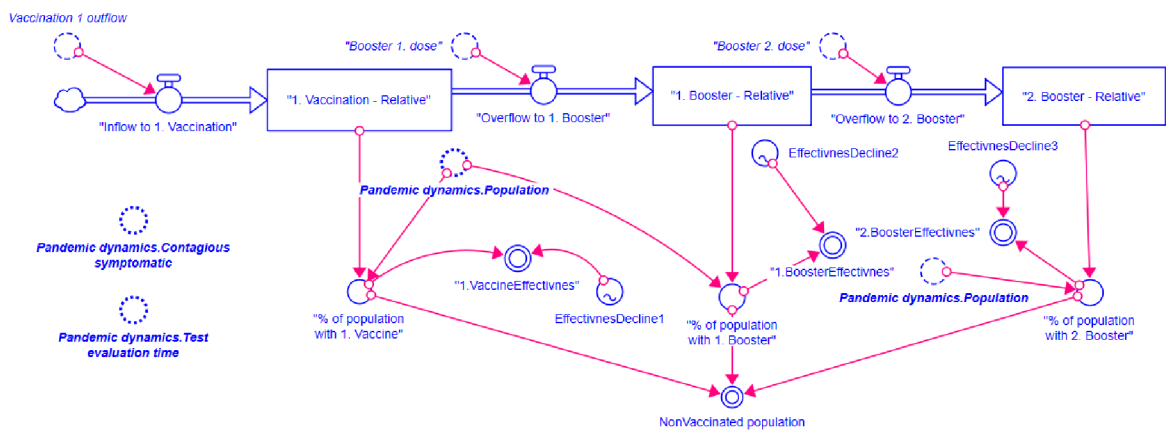
Další částí, na kterou se podíváme v rámci modulu očkování, je kumulativní množství aplikovaných očkování. Bereme tedy jednotlivé míry očkování z předchozí části a přidáváme je do hladin určených pro jednotlivá očkování.



Obr. 19 Očkování kumulativně

Vlastní zpracování

Jako poslední modul očkování obsahuje tzv. relativní poměry očkování vůči sobě a neočkované části populace které, slouží pro výpočet efektivity konkrétních očkování v čase.



Obr. 20 Očkování – relativní poměr
Vlastní zpracování

V praxi to znamená, že sledujeme to, kolik procent populace je jak daleko v očkování a jaké procento ochrany proti reinfekci, těžkému stavu a úmrtí si tato část populace udržuje. Vyjádřeno v modelu to pak znamená následující:

1. Vaccination – Relative (1. Očkování – Relativní) nám pak tedy ukazuje část populace, která absolvovala celé 1. očkování včetně druhé dávky. Časem se samozřejmě část populace, která se rozhodne pokračovat v očkování, přesune do 1. Booster – Relative (1. Posilující dávka – Relativní) a následně po uplynutí určité časové doby se ještě poslední část přesune do 2. Booster – Relative (2. Posilující dávka – Relativní).

Pro výpočet to tedy znamená, že všechny konvertory EffectivnesDecline určují pokles efektivity očkování danou dávkou v čase. Jednotlivá data pro pokles efektivity byla čerpána z několika studií mezi hlavní patřily například (Wu aj., 2023) a (Wright aj., 2022).

Konvertor % of population with 1. Vaccine (% populace s 1. Očkováním) je pak vyjádřený podílem očkovaných ku populaci:

$$\frac{1_Vaccination_Relative}{Population}$$

To samé pak platí i o dalších 2 konvertorech, které určují procentuální poměr populace s daným očkováním. Jejich odečtením od 1 získáme pak podíl populace, která nemá ani jednu dávku očkování.

$$1 - \frac{\%_of_population_with_1_Vaccine + \%_of_population_with_1_Booster + \%_of_population_with_2_Booster}{Population}$$

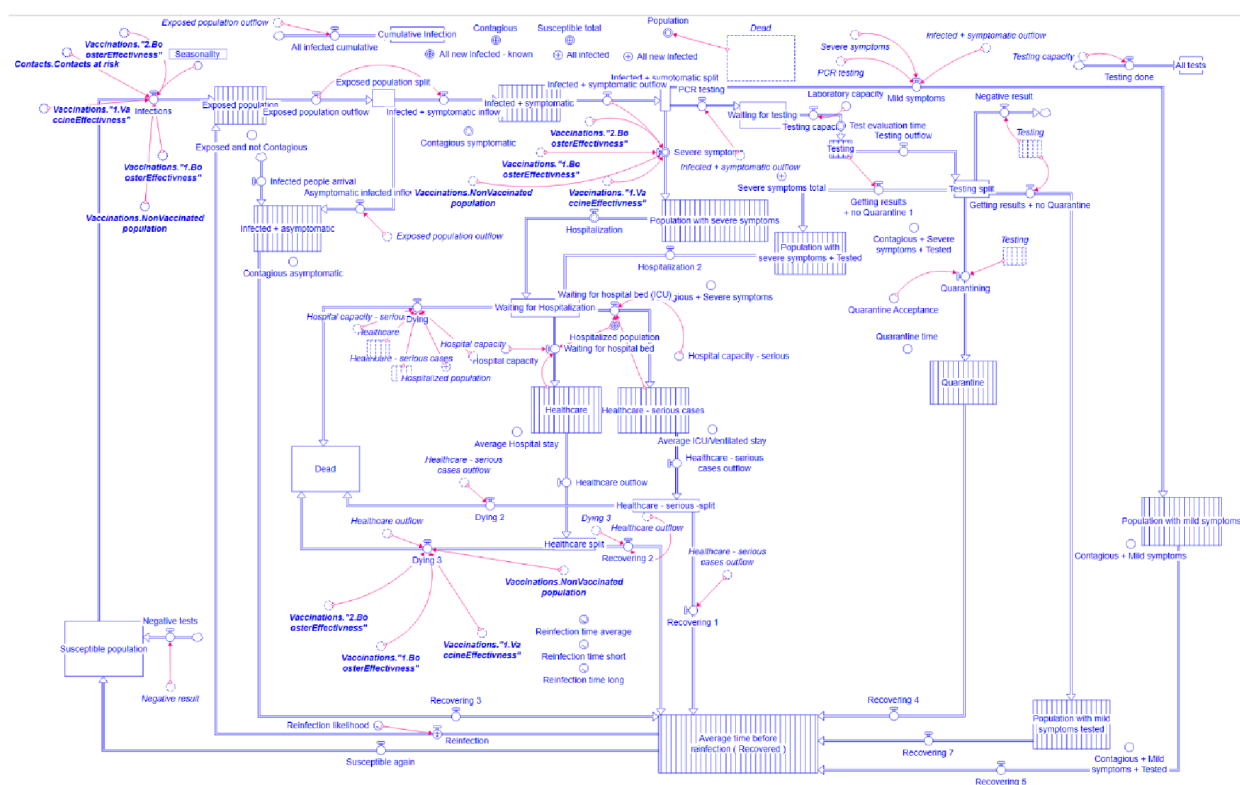
V neposlední řadě pak 1.VaccineEffectivnes (Efektivita 1. očkování), které určuje míru efektivity očkování pro danou část populace, vyjádřené jako:

$$\text{"\%_of_population_with_1._Vaccine"} * \text{EffectivnessDecline1}$$

Na stejném principu pak fungují i konvertory 1.BoosterEffectivness a 2.BoosterEffectivness.

5.2.5 Modul Dynamiky pandemie (Pandemic dynamics)

Modul dynamiky pandemie modeluje celý životní cyklus pandemie a jako takový ovlivňuje všechny 3 předchozí moduly a sám je jimi ovlivňován. Jednotkou v tomto modulu jsou opět People (Lidé).



Obr. 21 Modul Pandemic Dynamics
Vlastní zpracování

Dalo by se říci, že modul dynamiky pandemie má dva začátky. První v hladině Susceptible people (Náchylná populace), jejíž velikost je podle ČSU (Český statistický úřad) 10 526 937 lidí, a druhý v konvertoru Infected people arrival (Příjezd nakažených lidí), která odpovídá prvním třem zaznamenaným nakaženým na území České republiky (ČT24, 2020).

$$\text{Infected_people_arrival} = \text{PULSE}(3; \text{STARTTIME}; 500000)$$

Začneme-li tedy od Náchylné populace, tak odtud se vlivem kontaktů s nakaženými přes odtok Infections (Infekce) definovaného jako:

```
((Vaccinations.NonVaccinated_population) * Contacts.Contacts_at_risk
+ (Vaccinations."1.VaccineEffectivness" * Contacts.Contacts_at_risk)
+ (Vaccinations."1.BoosterEffectivness" * Contacts.Contacts_at_risk)
+ (Vaccinations."2.BoosterEffectivness" * Contacts.Contacts_at_risk))
* Seasonality
```

populace dostává do Exposed population (populace vystavená viru), kde je část populace vystavená viru, avšak ještě není infekční díky inkubační době covidu-19, která je v průměru okolo 5 dní (Mcaloon aj., 2020).

Odtud populace pokračuje a dělí se v poměru 13 ku 7 do Infected + symptomatic a Infected + asymptomatic (Pratha Sah aj., 2021).

Infected + asymptomatic je zároveň hladinou, kde začíná pohyb celého modelu, protože v čase 0 neboli 1.3.2020 přijdou do Infected + asymptomatic 3 lidé, když došlo k prvním záchytům viru na našem území, jak jsem již zmínil výše (ČT24, 2020).

Odtud pak lidé pokračují do Average time before reinfection (Recovered) (Průměrný čas před další nákazou (Uzdravení)), odkud se pak celý proces opakuje.

Průměrná doba infekčnosti je cca 7 dní, jak již bylo uvedeno v modulu Contacts, proto v hladině Infected + asymptomatic zůstávají 7 dní, avšak v hladině Infected + symptomatic pouhé 3 dny, protože tato hladina se následně dělí podle druhu průběhu nemoci a PCR testování jedinců.

Co se Severe symptoms (Těžké symptomy) týče, tak procento populace, jenž trpí těžkým průběhem nemoci, se podle různých studií pohybuje průměrně okolo 5 % (MZČR), což také odpovídá poměru v toku:

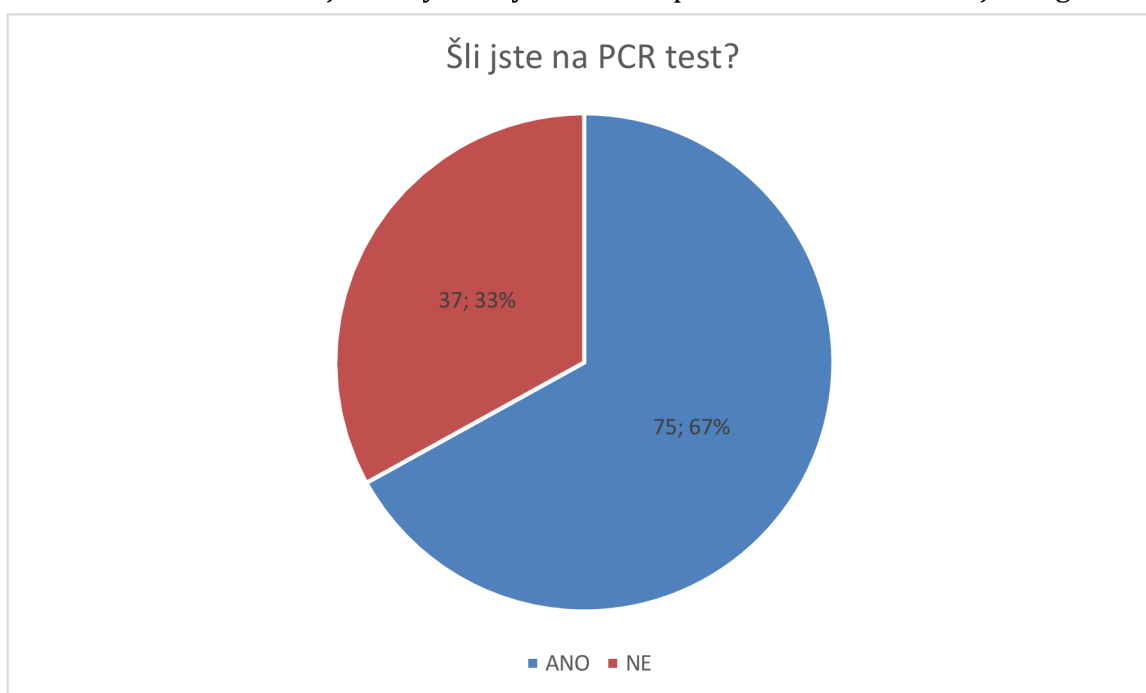
```
IF "Infected+_symptomatic_outflow"=0 THEN 0
ELSE IF TIME < 97
THEN 5/100 * "Infected+_symptomatic_outflow" ELSE
Vaccinations.NonVaccinated_population * 1,65/100*"Infected+_
symptomatic_outflow"+Vaccinations."1.VaccineEffectivness" * 1,65/100*
"Infected+_symptomatic_outflow"+Vaccinations."1.BoosterEffectivness"*
1,65/100*"Infected+_symptomatic_outflow"+Vaccinations."2.BoosterEffectivness"
* 1,65/100*"Infected+_symptomatic_outflow"
```

Avšak vliv na množství těžkých symptomů má i očkování proto od začátku očkování počítá tok i s vlivem očkování.

Mild symptoms (Mírné symptomy) má průměrně 95% populace, což je vyjádřeno v průtoku jako poměr 95/100. Avšak po začátku očkování mild symptoms přebírá všechny, kteří nepřešli do PCR testing a do Severe symptoms, vyjádřeno jako:

```
IF "Infected+_symptomatic_outflow" = 0
    THEN 0
    ELSE IF TIME < 97
    THEN 95/100 * "Infected+_symptomatic_outflow"
    ELSE
    "Infected+_symptomatic_outflow"-PCR_testing-Severe_symptoms
```

V rámci PCR testing (Testování PCR) bylo nutné zjistit, jaké procento populace v průměru vlastně na samotné testy chodí, a proto jsem opět volil variantu dotazníkového šetření, jehož výsledky si můžete prohlédnout v následujícím grafu:

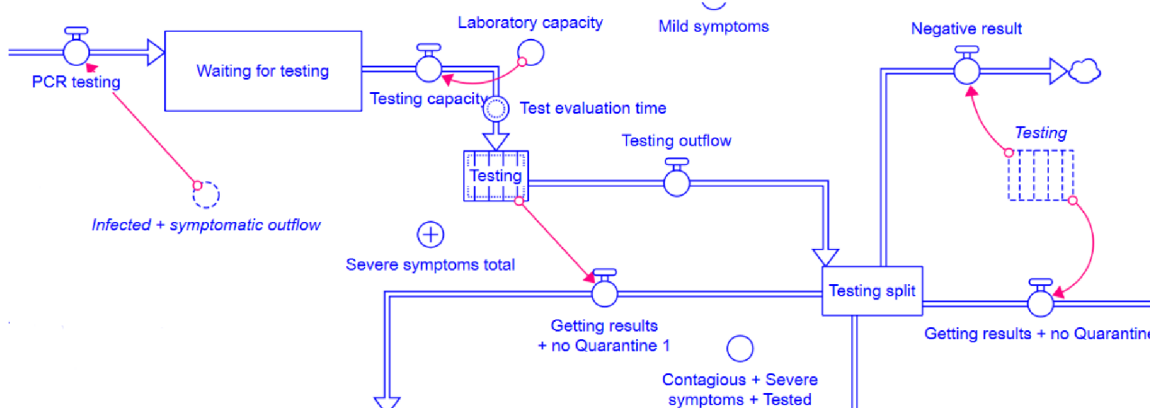


Graf 3: PCR testy poměr
Vlastní zpracování

Tato hodnota pak byla využita v odtoku PCR testing na určení množství lidí, kteří se rozhodli se nechat otestovat a posunuli se tak do Waiting for testing (Čekání na testování). Zároveň však hráli roli i jiné faktory mezi nimi např. čas začátku s testováním, jehož hodnota odpovídala skutečnému začátku testování v České

republiky. Jako u dalších proměnných závislých na vůli obyvatelstva očekáváme vyšší účast v období první vlny, proto výraz v PCR testing vypadá takto:

```
IF "Infected+_symptomatic_outflow" = 0 OR TIME < 97 THEN 0
ELSE IF TIME >= 97 AND TIME < 125
THEN 0,95*"Infected+_symptomatic_outflow" ELSE
0,66964*Infected+_symptomatic_outflow
```



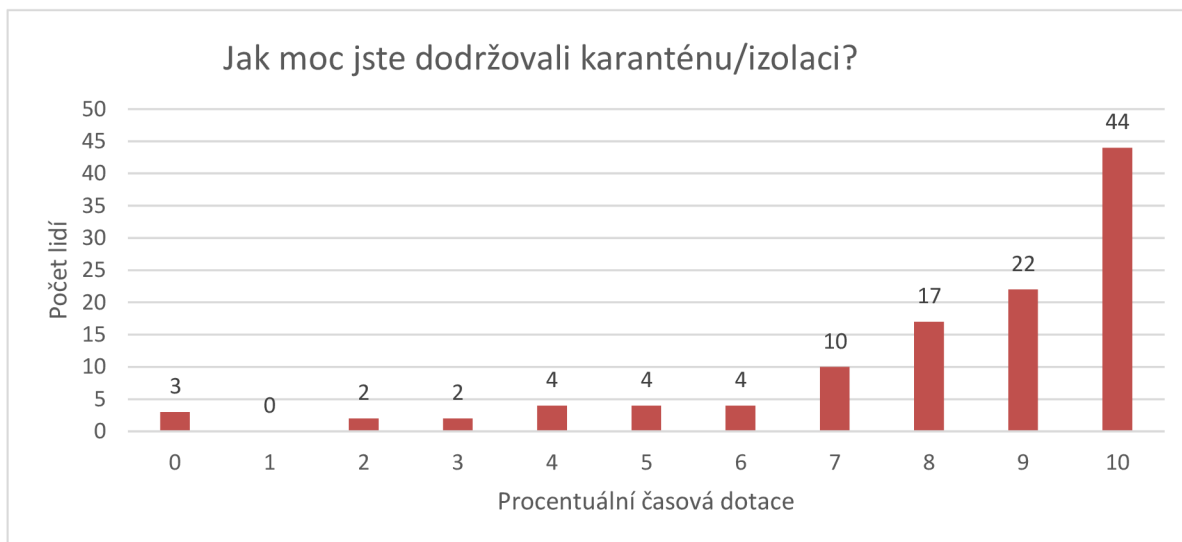
Obr. 22 PCR testování – model
Vlastní zpracování

Lidé pak pokračují k samotnému testování, dokud se nenaplní denní kapacita laboratoří na testování, která byla stanovena na 200 000 testů denně podle vrchní hladiny intervalu zmiňovaného ministerstvem zdravotnictví ve svých vyjádřeních z doby pandemie (Zajac, 2022).

Vyhodnocování testů pak trvá 2 dny, po kterých se člověk přesouvá buď do karantény, mírných symptomů nebo těžkého průběhu nemoci, kde zůstávají po zbytek průměrné doby infekčnosti anebo v případě karantény do jejího skončení.

Přesun do mírných symptomů a těžkého průběhu nemoci probíhá se stejným poměrem jako výše. Z mírných symptomů pak pokračují do Average time before reinfection (Recovered) a z těžkého průběhu nemoci do Healthcare (Zdravotnictví).

Karanténa je poněkud komplikovanější, jelikož je ovlivněna konvertorem Quarantine Acceptance (Akceptace karantény), ke kterému jsme data opět získali dotazníkovým šetřením a jehož výsledky si můžete prohlédnout na následujícím grafu.



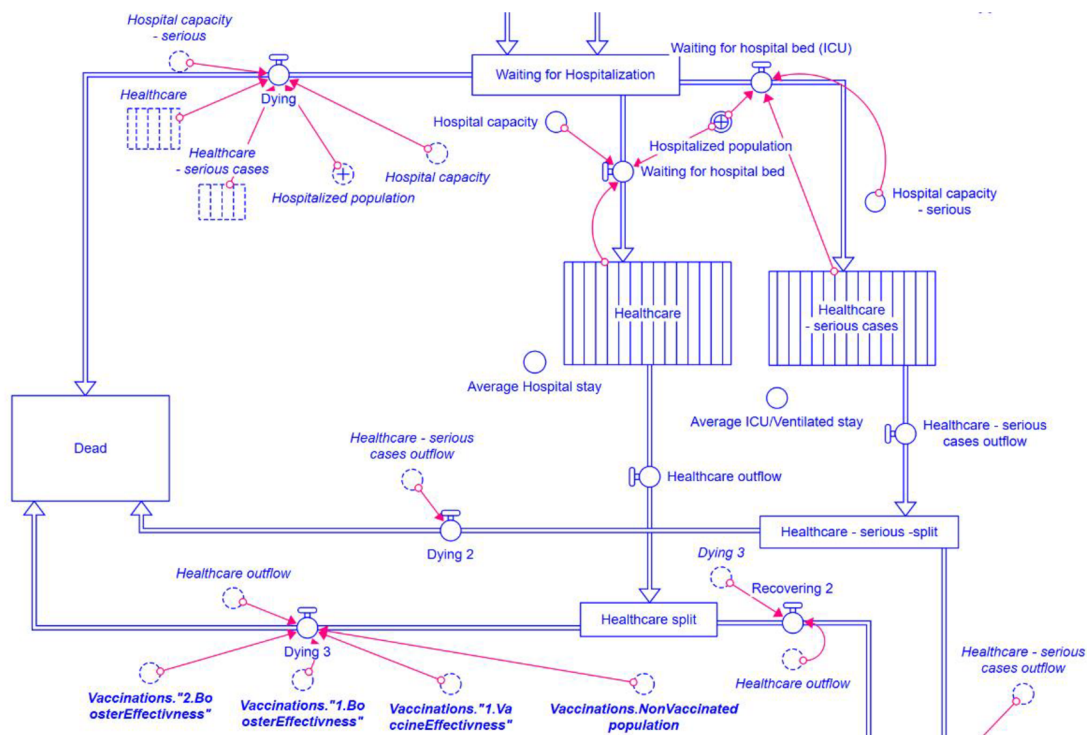
Graf 4: Dodržování karantény
Vlastní zpracování

Jak můžete vidět z grafu, převládá naprosté dodržování karantény, a proto byl průměr 81,607 %, který se pak použil v konvertoru Quarantine Acceptance (Akceptace karantény). I zde bylo předpokládáno s větší účastí v 1. vlně pandemie.

Doba v karanténě se pak pohybovala podle ministerstvem nařízené doby od 7 do 14 dní. Odtud pak lidé pokračují do Average time before reinfection (Recovered), kde vše po určité době začne nanovo.

Zdravotnický systém začíná hladinou Waiting for hospital (Čekání na nemocnici), která existuje pro případ, že by došlo k zaplnění nemocnic, nebylo by pacienty kam dávat a ti by následně nemoci podleli.

Dále se zdravotnictví dělí podle závažnosti onemocnění v poměru 91 ku 9 na Healthcare (Zdravotnictví) a Healthcare – serious cases (Zdravotnictví – závažné případy), přičemž každá kategorie má určitý limit pacientů, které může přijmout, než by došlo k selhání systému. Informace o počtu dostupných míst v každé kategorii jsou získány z oficiálních stránek Ministerstva zdravotnictví ČR (MZČR).



Obr. 23 Zdravotnictví – model
Vlastní zpracování

Zdravotnictví má k dispozici pouze dvě možnosti: uzdravení nebo smrt. Pokud jde o úmrtí, přibližně 11 % pacientů bez vážných příznaků, intenzivní péče a ventilace nebo podobných opatření neustojí onemocnění (Macedo aj., 2021). U pacientů s vážnými příznaky se procento úmrtí pohybuje kolem 40 % (Armstrong aj., 2020). Zbylí pacienti se uzdraví a jsou zařazeni do hladiny do Average time before reinfection (Recovered), kde je sledována průměrná doba, než se opět stávají náchylnými k nákaze. Tato doba závisí na konkrétní variantě viru, která je momentálně dominantní v České republice. Například u varianty Omicron je průměrná doba mezi reinfekcemi $361,2 \pm 131,6$ dnů (Osman Özüdoğru aj., 2022).

Ale i během průměrné doby mezi reinfekcemi je možná reinfekce, procentuální šance na takovou reinfekci se opět mění s dominantní variantou viru. Například u varianty Omicron se rovná 13 % (Osman Özüdoğru aj., 2022).

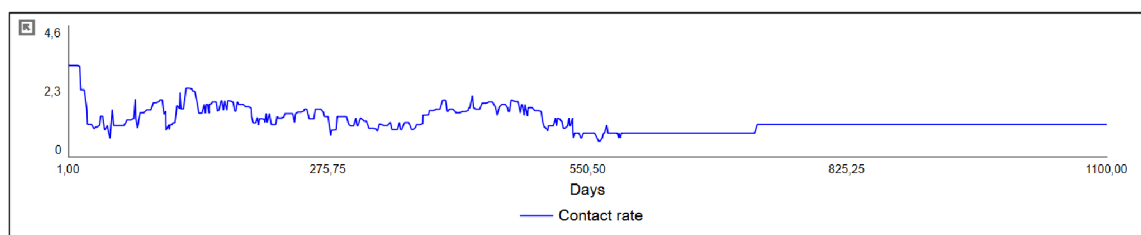
5.3 Simulace pandemie

Simulace se odehrává v období od 1.3.2020 do 1.3.2023, tedy téměř po celou dobu pandemie. Hodnoty by měly co nejlépe odpovídat reálným datům, avšak u

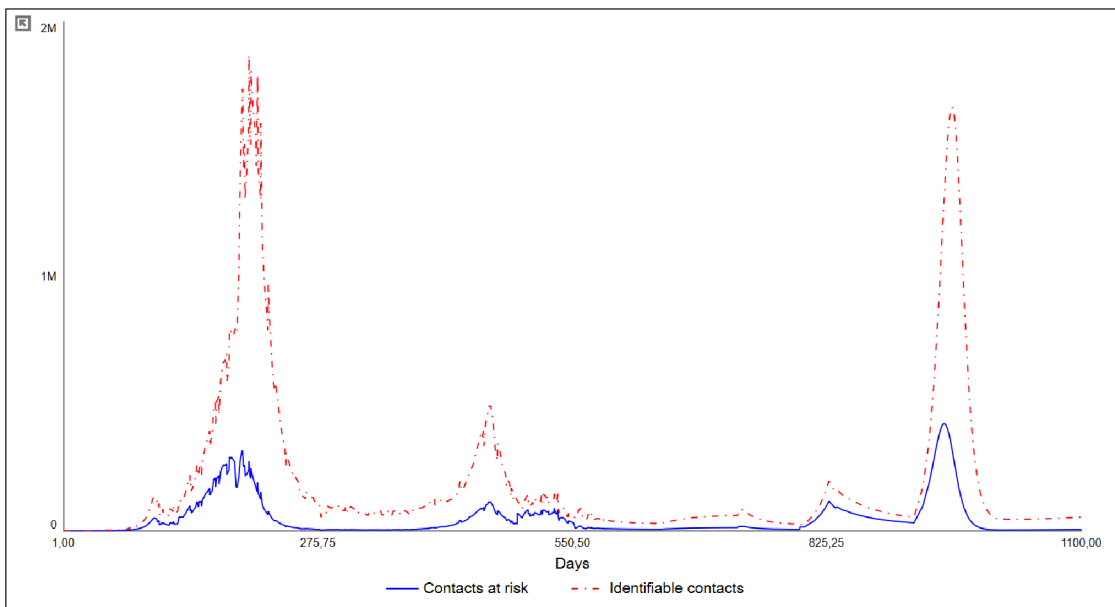
značného množství hodnot nepanuje velká shoda v rámci zdrojů, např. počet kontaktů za den nebo sezónnost virového onemocnění. Další část hodnot se potýká s problémem, kdy bylo jejich nalezení téměř nemožné, v takovém případě, pokud to bylo vzhledem k povaze zkoumané skutečnosti možné, tak se práce uchyluje k dotazníkovému šetření. Avšak i tak se v práci vyskytují hodnoty, jež nelze nijak ověřit, např. celkový počet nakažených. Pokud bereme v úvahu výsledky dotazníku, tak přibližně 33% populace nikdy neabsolvovalo PCR test a tedy nebyla u nich potvrzena nákaza, aby byla zavedena do statistik což, potvrzuje i několik vyjádření ministerstva zdravotnictví.

5.3.1 Modul Kontakty (Contacts)

V modulu Contacts jsou důležité výstupy Contact rate, což je množství denních kontaktů jednoho člověka během pandemie, a Identifiable contacts a Contacts at risk. Identifiable contacts zahrnují všechny denní kontakty nakažených lidí, zatímco Contacts at risk jsou všechny rizikové kontakty, které nakazili někoho dalšího. Ukazuje se, tedy že roušky mají pozitivní vliv na snížení přenosu viru.

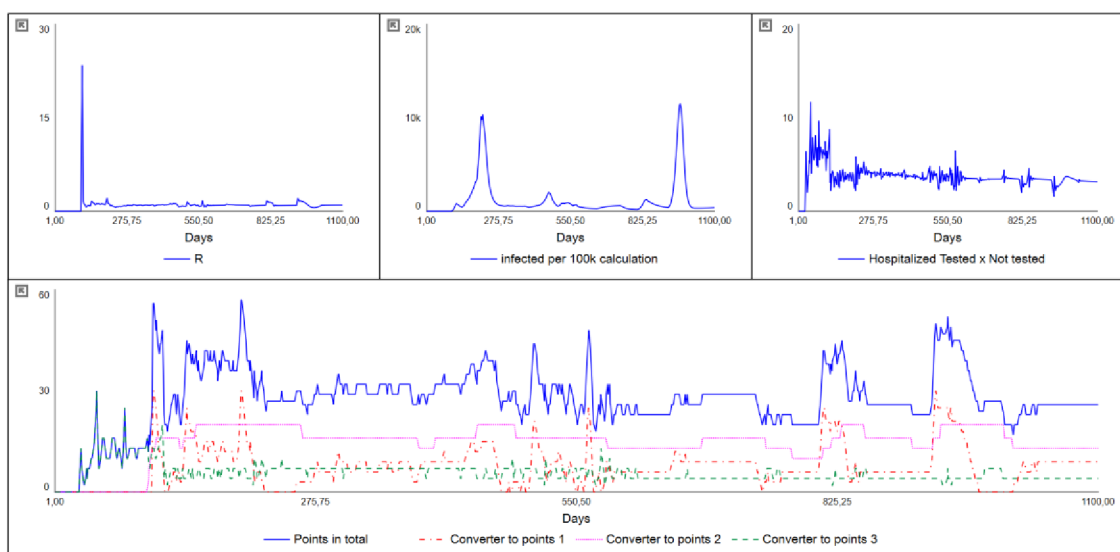


Obr. 24 Contact rate
Vlastní zpracování



Obr. 25 Contacts at risk a Identifiable contacts
Vlastní zpracování

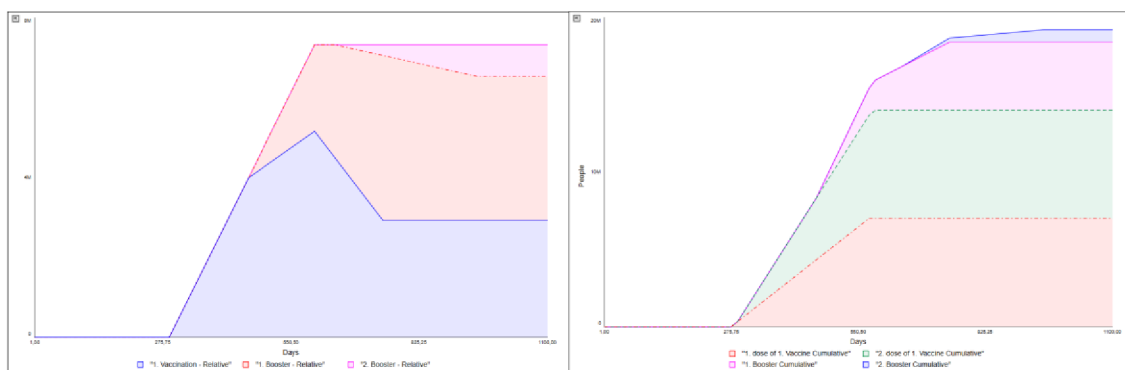
Další na řadě je pak modul Restrictions, z něhož jsou pro nás zajímavé výstupy všech 3 hodnot, které ovlivňovaly opatření. Číslo R, které ukazuje průměrný počet nakažených jedním člověkem, se drží okolo 1 po celou dobu pandemie až na počáteční výkyv. Křivka počtu nakažených na 100 000 obyvatel kopíruje svým tvarem průběh pandemie a poměr hospitalizací mezi testovanými a netestovanými je vlivem koncepce modelu téměř lineární. Přepočítání na body pak slouží jako vizuální reprezentace míry aktivních opatření.



Obr. 26 Modul Restrictions – výsledky
Vlastní zpracování

5.3.2 Modul Očkování (Vaccinations)

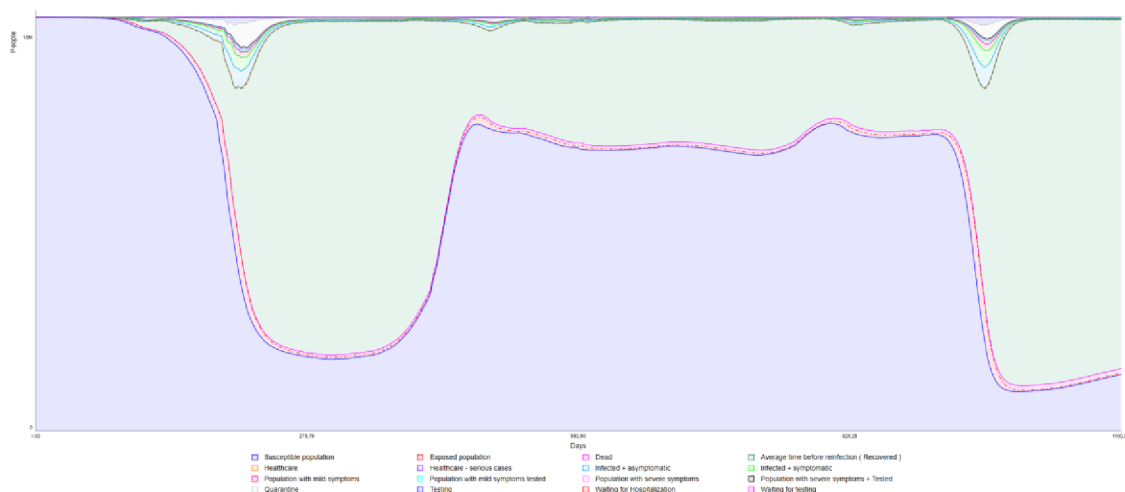
Modul očkování jednak ukazuje celkově podané dávky očkování a také poměr populace s určitou dávkou očkování. V grafu je vidět postupný nástup očkování a poté již o něco méně úspěšný přechod na posilující dávku.



Obr. 27 Modul Vaccinations – výsledky
Vlastní zpracování

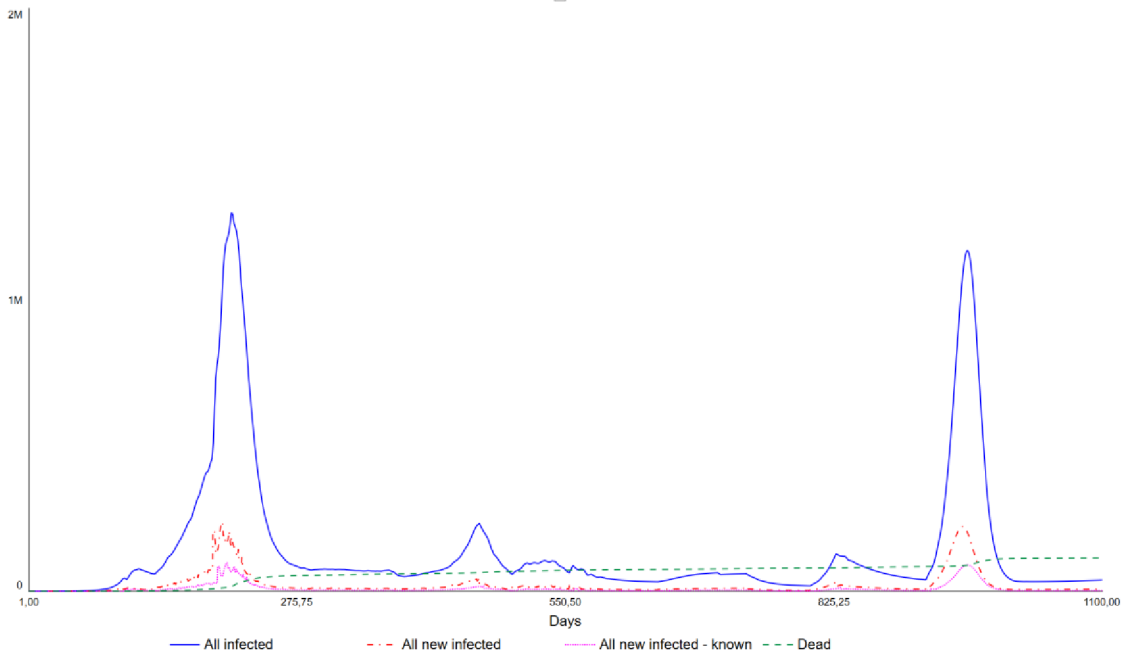
5.3.3 Modul Pandemic dynamics (Dynamika pandemie)

V modulu je pak možné pozorovat vývoj pandemie. Tento graf ukazuje přeliv populace mezi jednotlivými stavy. Jsou zde vidět jednotlivé vlny pandemie ilustrované propady v grafu. V dalších grafech jsou pak jednotlivé hladiny popsány více dopodrobna.



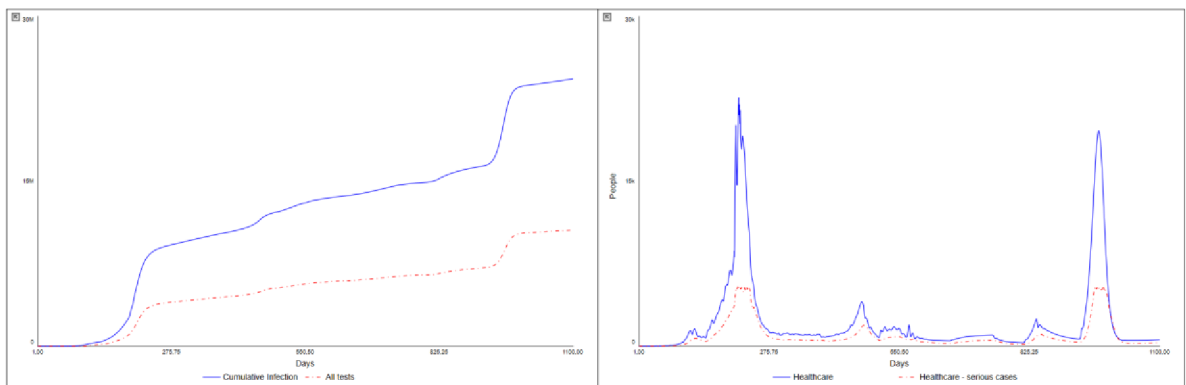
Obr. 28 Modul Pandemic dynamics – výsledky
Vlastní zpracování

Tento graf ukazuje poměry mezi všemi nakaženými, všemi nově nakaženými, všemi nově nakaženými, o kterých stáť ví díky testování a počtem mrtvých.



Obr. 29 Modul Pandemic dynamics – výsledky 2
Vlastní zpracování

Další z metrik, která je pro nás zajímavá, je graf, který ukazuje poměr nakaženého obyvatelstva k provedeným testům, a tedy poměr, toho kolik nakažení bylo ve skutečnosti a o kolika nakažení víme. Druhý graf pak ukazuje zaplnění zdravotnictví, které kopíruje průběh pandemie.



Obr. 30 Modul Pandemic dynamics – výsledky 3
Vlastní zpracování

5.4 Test robustnosti

Co se testu robustnosti týče, tak hlavní aktéři budou opět prvky v modulu Contacts, a to Contact rate, který pokud bude stanoven moc nízko, tak simulace

vůbec neproběhne a nikdo nikoho nenakazí, protože nikdy nedojde k žádnému kontaktu.

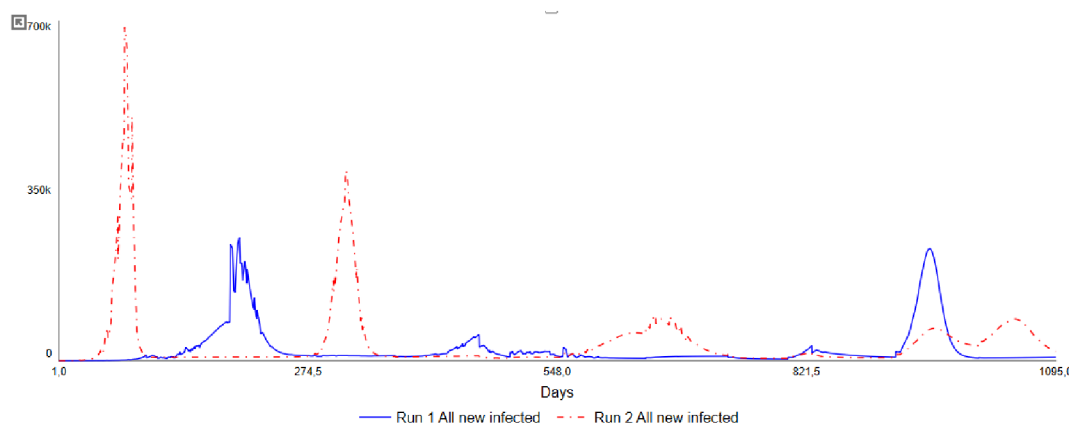
To samé se stane, pokud Transmission likelihood bude nastavený na nula nebo velmi blízko nule, protože pokud se vir nebude schopný přenést na další osobu, tak nikoho nenakazí.

Další varianta, jak by simulace neproběhla, je nastavení moc velkých Government restrictions, což by vedlo k téměř nulovým kontaktům a opakoval by se scénář uvedený výše.

5.5 Citlivostní analýza

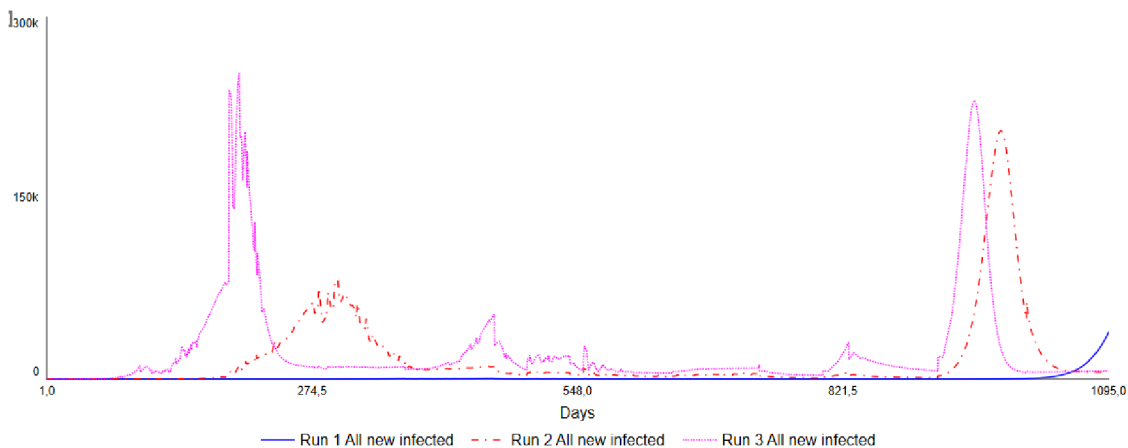
V rámci citlivostní analýzy největší roli hrály prvky v modul Contacts, a to hlavně Contact rate, Contagious modifier a Transmission likelihood.

Citlivost modelu na konvertoru Contact rate je dána tím, že čím více kontaktů lidé mají, tím vyšší je šance na přenos infekce. Pokud by se třeba průměrný Contact rate zvedl z 1,14 na 2,28 kontaktu denně, zvedl by se samozřejmě počet nakažených, ale znamenalo by to více jak dvojnásobek mrtvých, protože by v určitém bodě došlo k přetížení zdravotnického systému. Hodnoty odpovídající realitě pro Contact rate je však téměř nemožné najít, neboť ani státem řízený pokus o trasování obyvatel nebyl příliš úspěšný, jelikož lidé nehlásili své kontakty (Pergler, 2021). Na následujícím obrázku je zmíněný vliv změny Contact rate z 1,14 na 2,28 vidět na počtu nově nakažených obyvatel za den, kdy se díky zvýšení kontaktů jednotlivců nejen zvýší počet nakažených, ale posunou se i jednotlivé vlny pandemie a změní se tak celý její průběh.



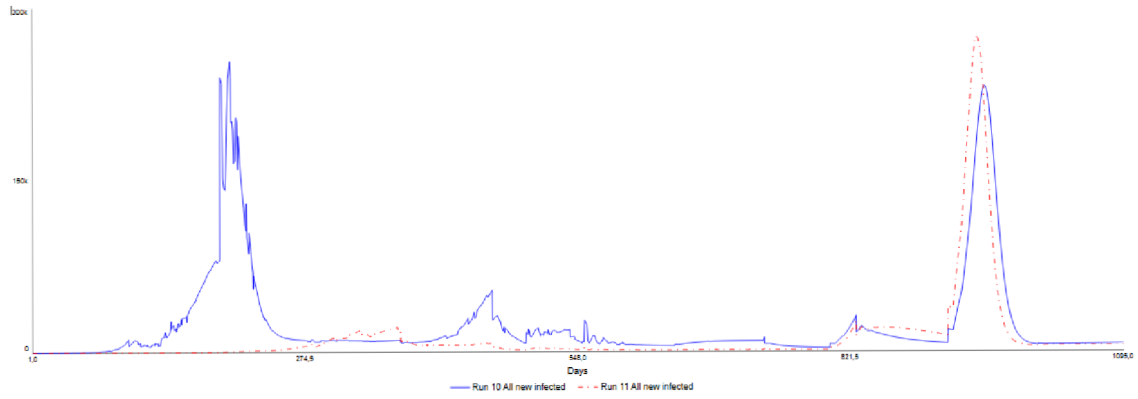
Obr. 31 All new infected – porovnání
Vlastní zpracování

Transmission likelihood pak určuje, jak moc pravděpodobný je přenos viru během interakce. Má tedy výrazný vliv na průběh pandemie. Čím vyšší bude, tím víc lidí bude nakaženo, což je ilustrováno na následujícím obrázku, kdy proběhly tři simulace za sebou, kdy R_0 bylo nejdříve 2,2, poté 3,95 a nakonec 5,7. Podobně jako u Contact Rate, tak i při změně R_0 dojde ke změně průběhu celé pandemie, jak můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obr. 32 All new infected – porovnání 2
Vlastní zpracování

Z modulu Restrictions má pak největší vliv na citlivostní analýzu konvertor Restrictions, který je inspirovaný Protiepidemickým Systémem České republiky, ale vzhledem ke složitosti daného systému je tato verze značně zjednodušená. Government restrictions in practice dělí počet kontaktů za den podle bodového hodnocení předchozích dní, tedy podle toho, jak nastavíme hodnoty při konkrétních bodech, můžeme prakticky celou pandemii ukončit ihned. Ukázáno na následujících dvou simulacích, kdy se při druhé simulaci zdvojnásobil poměr restrikcí v době jejich platnosti, proto ke konci simulovaného období je vliv Restrictions téměř nulový, jelikož už nebyla žádná opatření aktivní.



Obr. 33 All new infected – porovnání 3
Vlastní zpracování

6 Závěr

V úvodu teoretické části této bakalářské práce byl podán výklad pandemie Covid-19 a jejího konkrétního dopadu na Českou republiku. Dále se práce věnovala epidemiologickým a matematickým modelům, zejména modelu SIR a jeho variantám jako S(E)IR a S(E)IR(V), které sloužily jako základ pro praktickou část práce, která zahrnovala modelování pandemie. Závěrečná část byla zaměřena na systémovou dynamiku a myšlení.

V praktické části práce bylo dosaženo několika dílčích cílů, včetně vytvoření příčinného smyčkového diagramu a získání relevantních dat. Poslední dílčí cíl byl splněn testováním modelu. Vzhledem k tomu, že pandemie stále probíhá, zůstávají však některé aspekty viru, jako je například jeho sezónnost nebo konkrétní R_0 , neznámé, což může ovlivnit přesnost modelu.

Pokud jde o rozšíření modelu, existuje několik možností, například modelování distribuce pacientů na různých odděleních nemocnice nebo simulace systému tzv. koronavirového semaforu a dalších samostatně aktivních opatření. Kromě toho by se jako přínosné mohlo ukázat i modelování onemocnění se zaměřením na věk pacientů.

Jak byl již řečeno výše, pro simulační modely je rozhodující kvalita dat a vzhledem k probíhající pandemii nemusí být některé hodnoty, které výrazně ovlivňují průběh pandemie, ve všech zdrojích konzistentní, což představuje výrazné omezení přesnosti modelu.

7 Seznam použité literatury

- [1] ANDREJKO, Kristin L., Jake M. PRY, Jennifer F. MYERS, et al. Effectiveness of Face Mask or Respirator Use in Indoor Public Settings for Prevention of SARS-CoV-2 Infection — California, February–December 2021. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report* [online]. 2022, 71(6), 212-216 [cit. 2023-04-03]. ISSN 0149-2195. Dostupné z: doi:10.15585/mmwr.mm7106e1
- [2] ARMSTRONG, R. A., A. D. KANE a T. M. COOK. Outcomes from intensive care in patients with COVID-19: a systematic review and meta-analysis of observational studies. *Anaesthesia* [online]. 2020, 75(10), 1340-1349 [cit. 2023-04-03]. ISSN 0003-2409. Dostupné z: doi:10.1111/anae.15201
- [3] AVČR. Matematikou proti covidu. Jak se modeluje vývoj pandemie. Akademie věd České republiky [online]. 2022 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://www.avcr.cz/cs/veda-a-vyzkum/biologicko-ekologicke-vedy/Matematikou-proti-covidu.-Jak-se-modeluje-vyvoj-pandemie/>
- [4] BUREŠ, Vladimír; Systémové myšlení pro manažery; [Praha]: Professional Publishing; 2011; ISBN 978-80-7431-037-9.
- [5] ČSU. Obyvatelstvo. Český statistický úřad [online]. Česká republika, 2023 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/obyvatelstvo_lide
- [6] DEL RIO, Carlos, Lauren F. COLLINS a Preeti MALANI. Long-term Health Consequences of COVID-19. *JAMA* [online]. 2020, 324(17) [cit. 2022-08-11]. ISSN 0098-7484. Dostupné z: doi:10.1001/jama.2020.19719
- [7] FEEHAN, Dennis M. a Ayesha S. MAHMUD. Quantifying population contact patterns in the United States during the COVID-19 pandemic. *Nature Communications* [online]. 2021, 12(1) [cit. 2023-04-03]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-021-20990-2
- [8] FIALA, Adam a Matěj SVITÁK. V Česku jsou tři lidé nakaženi koronavirem. Předtím byli v Itálii. Česká televize: ČT24 [online]. Praha,

- 1.3.2020 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z:
<https://ct24.ceskatelevize.cz/domaci/3056228-v-cesku-jsou-tri-lide-nakazeni-koronavirem>
- [9] HŘEBÍČEK, Jiří a Michal ŠKRDLA. Úvod do matematického modelování [online]. 2006 [cit. 2022-08-18]. Dostupné z:
<https://is.muni.cz/el/1431/podzim2007/Bi3101/um/skripta.pdf>
- [10] ISEESYSTEMS. Chicken and egg sfd example [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z:
<https://exchange.iseesystems.com/models/player/psh/chicken-and-egg-sfd-example>
- [11] ISEESYSTEMS. Overview: Causal Loop Diagrams (CLDs) [online]. [cit. 2022-08-14]. Dostupné z:
https://www.iseesystems.com/resources/help/v2/Content/03-BuildingModels/Causal_Loop_Diagrams/Overview_Causal_Loop_Diagrams.htm
- [12] KIRK, David. Hard and soft systems. *International Journal of Contemporary Hospitality Management* [online]. 1995, 7(5), 13-16 [cit. 2022-08-14]. ISSN 0959-6119. Dostupné z:
[doi:10.1108/09596119510090708](https://doi.org/10.1108/09596119510090708)
- [13] LI, Yunxuan, Jing TAN, Suoyi TAN, Yilong ZHOU, Bin SAI, Bitao DAI a Xin LU. Infection rate and factors affecting close contacts of COVID-19 cases: A systematic review. *Journal of Evidence-Based Medicine* [online]. 2022, 15(4), 385-397 [cit. 2023-04-03]. ISSN 1756-5383. Dostupné z: [doi:10.1111/jebm.12508](https://doi.org/10.1111/jebm.12508)
- [14] MACEDO, Ana, Nilza GONÇALVES a Cláudia FEBRA. COVID-19 fatality rates in hospitalized patients: systematic review and meta-analysis. *Annals of Epidemiology* [online]. 2021, 57, 14-21 [cit. 2023-04-03]. ISSN 10472797. Dostupné z: [doi: 10.1016/j.annepidem.2021.02.012](https://doi.org/10.1016/j.annepidem.2021.02.012)
- [15] MÁJEK, Ondřej, Ondřej NGO, Renata CHLOUPKOVÁ, et al. Dokumentace k epidemiologickému modelu ÚZIS ČR pro krátkodobé simulace. 2021. Dostupné také z: <https://share.uzis.cz/s/cmFHjc4jbqPBAER>

- [16] MÁJEK, Ondřej, Ondřej NGO, Renata CHLOUPKOVÁ, et al. Dokumentace k epidemiologickému modelu ÚZIS ČR pro dlouhodobé simulace [online]. 2021 [cit. 2022-08-12]. Dostupné z: <https://share.uzis.cz/s/cmFHjc4jbbqPBAER>
- [17] MCALOON, Conor, Áine COLLINS, Kevin HUNT, et al. Incubation period of COVID-19: a rapid systematic review and meta-analysis of observational research. *BMJ Open* [online]. 2020, 10(8) [cit. 2023-04-03]. ISSN 2044-6055. Dostupné z: doi:10.1136/bmjopen-2020-039652
- [18] MZČR. COVID-19: Přehled aktuální situace v ČR. Ministerstvo zdravotnictví České republiky [online]. Česká republika [cit. 2022-08-01]. Dostupné z: <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/covid-19>
- [19] MZČR. COVID-19: Stupně pohotovosti [online]. [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/covid-19/stupne-pohotovosti>
- [20] MZČR. Protiepidemický systém ČR [online]. [cit. 2022-08-13]. Dostupné z: <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/pes>
- [21] MZČR. Stručný návod pro výpočet indexu rizika, verze 2. Ministerstvo zdravotnictví České republiky: MZČR [online]. Česká republika, 2021, 5.1.2021 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://www.mzcr.cz/wp-content/uploads/2021/01/Priloha01_Stru%C4%8Dn%C3%BD-n%C3%A1vod-pro-v%C3%BDpo%C4%8Det-indexu-rizika-v2.pdf
- [22] NCIRD. Basics of COVID_19. CDC [online]. [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/your-health/about-covid-19/basics-covid-19.html>
- [23] NCIRD. Ending Isolation and Precautions for People with COVID-19: Interim Guidance. Centers for Disease Control and Prevention: CDC [online]. USA [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/your-health/isolation.html?CDC_AA_refVal=https%3A%2F%2Fwww.cdc.gov%2Fcoronavirus%2F2019-ncov%2Fyour-health%2Fquarantine-isolation.html

- [24] NSOESIE, Elaine Okanyene, Benjamin RADER, Yiyao L. BARNOON a John S. BROWNSTEIN. Analysis of hospital traffic and search engine data in Wuhan China indicates early disease activity in the Fall of 2019 [online]. Harvard, 2020 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <http://nrs.harvard.edu/urn-3:HUL.InstRepos:42669767>
- [25] NZIP. Epidemiologický model. Národní zdravotnický informační portál [online]. 2022 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://www.nzip.cz/rejstrikovy-pojem/1112>
- [26] ÖZÜDOĞRU, Osman, Yasemin Genç BAHÇE a Ömer ACER. SARS CoV-2 reinfection rate is higher in the Omicron variant than in the Alpha and Delta variants. Irish Journal of Medical Science (1971 -) [online]. 2023, 192(2), 751-756 [cit. 2023-04-03]. ISSN 0021-1265. Dostupné z: [doi:10.1007/s11845-022-03060-4](https://doi.org/10.1007/s11845-022-03060-4)
- [27] PERGLER, Tomáš. Náhrady nezabraly, lidé kontakty nehlasí. Prodloužíme opatření, hrozí Blatný. Seznam zprávy [online]. Praha, 1.4.2021 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/odmeny-nezabraly-lide-kontakty-nehlasi-prodlouzime-opatreni-hrozi-blatny-149202>
- [28] PLATTO, Sara, Yanqing WANG, Jinfeng ZHOU a Ernesto CARAFOLI. History of the COVID-19 pandemic: Origin, explosion, worldwide spreading. Biochemical and Biophysical Research Communications [online]. 2021, 538, 19-23 [cit. 2022-08-12]. ISSN 0006291X. Dostupné z: [doi: 10.1016/j.bbrc.2020.10.087](https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2020.10.087)
- [29] PROKOP, Daniel, Lucie MARKOVÁ, Michaela KUDRNÁČOVÁ, Jana CAHLÍKOVÁ, Vojtěch BARTOŠ, Michal BAUER a Julie CHYTILOVÁ. Kontakt s lidmi. Život během pandemie [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://zivotbehempandemie.cz/kontakty>
- [30] SAH, Pratha, Meagan C. FITZPATRICK, Charlotte F. ZIMMER, Elaheh ABDOLLAHI, Lyndon JUDEN-KELLY, Seyed M. MOGHADAS, Burton H. SINGER a Alison P. GALVANI. Asymptomatic SARS-CoV-2 infection: A systematic review and meta-analysis. Proceedings of the National

- Academy of Sciences [online]. 2021, 118(34) [cit. 2023-04-03]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.2109229118
- [31] SANCHE, Steven, Yen Ting LIN, Chonggang XU, Ethan ROMERO-SEVERSON, Nick HENGARTNER a Ruian KE. High Contagiousness and Rapid Spread of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2. *Emerging Infectious Diseases* [online]. 2020, 26(7), 1470-1477 [cit. 2023-04-06]. ISSN 1080-6040. Dostupné z: doi:10.3201/eid2607.200282
- [32] VENSIM. Stock and Flow Diagrams [online]. [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: <https://www.vensim.com/documentation/usr05.html>
- [33] Vládní usnesení související s bojem proti epidemii koronaviru. Vláda České republiky [online]. Česká republika [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://www.vlada.cz/cz/epidemie-koronaviru/dulezite-informace/vladni-usneseni-souvisejici-s-bojem-proti-epidemii-koronaviru-rok-2020-186999/>
- [34] What is Stock and Flow Diagram? [online]. [cit. 2022-08-14]. Dostupné z: <https://online.visual-paradigm.com/knowledge/business-design/what-is-stock-and-flow-diagram/>
- [35] WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard [online]. 2022 [cit. 2022-08-10]. Dostupné z: <https://covid19.who.int/>
- [36] WHO. Tracking SARS-CoV-2 variants [online]. 2021 [cit. 2022-08-11]. Dostupné z: <https://www.who.int/activities/tracking-SARS-CoV-2-variants>
- [37] WRIGHT, Bill J, Samuel TIDEMAN, George A DIAZ, Thomas FRENCH, Guilford T PARSONS a Ari ROBICSEK. Comparative vaccine effectiveness against severe COVID-19 over time in US hospital administrative data: a case-control study. *The Lancet Respiratory Medicine* [online]. 2022, 10(6), 557-565 [cit. 2023-04-06]. ISSN 22132600. Dostupné z: doi:10.1016/S2213-2600(22)00042-X
- [38] WU, Nana, Keven JOYAL-DESMARIS, Paula A B RIBEIRO, Ariany Marques VIEIRA, Jovana STOJANOVIC, Comfort SANUADE, Doro YIP a Simon L BACON. Long-term effectiveness of COVID-19 vaccines against

infections, hospitalisations, and mortality in adults: findings from a rapid living systematic evidence synthesis and meta-analysis up to December, 2022. *The Lancet Respiratory Medicine* [online]. 2023 [cit. 2023-04-06]. ISSN 22132600. Dostupné z: doi:10.1016/S2213-2600(23)00015-2

- [39] ZAJAC, Lada. Kapacita odběrů PCR testů je 160 tisíc denně. Laboratoře ale mají své limity. *Idnes* [online]. 22.1.2022 [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/zpravy/domaci/testovaci-kapacity-cesko-omikron-koronavirus-pcr-testy-kraje-ministerstvo-zdravotnictvi.A220119_105906_domaci_lre
- [40] ZAREI, Mohammad, Deepanwita BOSE, Masoud NOURI-VASKEH, Vida TAJIKNIA, Ramin ZAND a Mehdi GHASEMI. Long-term side effects and lingering symptoms post COVID-19 recovery. *Reviews in Medical Virology* [online]. 2022, 32(3) [cit. 2022-08-11]. ISSN 1052-9276. Dostupné z: doi:10.1002/rmv.2289
- [41] ZHIEN, Ma; *Dynamical Modeling and Analysis of Epidemics*; [Singapore]: World Scientific, 2009; ISBN-10 981-279-749-1

8 Přílohy

- 1) Dotazník k modelu dynamiky pandemie Covid-19

Zadání bakalářské práce

Autor:	Bořek Hnyk
Studium:	I1900587
Studijní program:	B0688A140001 Informační management
Studijní obor:	Informační management
Název bakalářské práce:	Modelování a simulace dynamiky pandemie SarsCov-2 v České republice
Název bakalářské práce AJ:	Modelling and Simulation of Dynamics of the SarsCov-2 Pandemics in the Czech Republic

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Tato práce se bude věnovat dynamickému chování pandemie SarsCov-2 od jejího počátku do blízké budoucnosti.

V práci bude vysvětlena základní problematika pandemie a související epidemiologické modely. Bude vytvořen dynamický simulační model pomocí nástrojů mapování v oblasti systémové dynamiky.

Celentano, D.D. and Szklo, M. (2019). Gordis epidemiology. 6th ed. Philadelphia, Pa: Elsevier.

BUREŠ, Vladimír; Systémové myšlení pro manažery; [Praha]: Professional Publishing; 2011; ISBN 978-80-7431-037-9

Zadávací pracoviště: Katedra informačních technologií,
Fakulta informatiky a managementu

Vedoucí práce: prof. Ing. Vladimír Bureš, Ph.D., MBA

Datum zadání závěrečné práce: 15.10.2021