

Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
Katedra informačních technologií

**Modelování a simulace vybraných problémů
epidemiologických situací**
Bakalářská práce

Autor: Alžběta Dočekalová

Studijní obor: IM3

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

Prohlášení:

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

vlastnoruční podpis

V Hradci Králové dne 14. 08. 2022

Alžběta Dočekalová

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Vladimíru Burešovi, MBA, Ph.D. za vedení práce, vstřícný přístup a nekonečnou trpělivost.

Anotace

Téma této bakalářské práce, s názvem Modelování a simulace vybraných problémů epidemiologických situací, se zaměřuje na onemocnění COVID-19 a s ním přetrvávající pandemii. V teoretické části je stručně popsána systémová dynamika, systémové řízení a pandemie COVID-19. Dále jsou popsány především různé compartmental models (kompartimentové modely), které jsou využívány v epidemiologii k matematickému modelování infekčních chorob.

V praktické části je vytvořen a popsán model systémové dynamiky, který je zaměřen převážně na samotné onemocnění COVID-19 a s tím se pojící oblasti, na které měla pandemie velký vliv. Jsou popsány různé simulace a výsledky jsou shrnuty v závěru práce.

Annotation

Title: Modelling and simulation of particular problems related to epidemiological situations

This bachelor thesis, entitled Modelling and simulation of particular problems related to epidemiological situations, is mainly focused on the COVID-19 disease and the ongoing pandemic that relates to the disease. In the theoretical part, system dynamics, system thinking, and COVID-19 pandemics are briefly described. Furthermore, different compartmental models, which are used in epidemiology for mathematical modelling of infectious disease, are described.

In the practical part, a model of system dynamics is created and described. The model is mainly focused on the COVID-19 disease and related areas on which the pandemic had an immense impact. Various simulations are described, and the results are summarized at the end of the paper.

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce.....	3
3	Metodika zpracování.....	4
4	Teoretická část	5
4.1	Systémová dynamika a systémové myšlení	5
4.2	COVID-19	6
4.3	Kompartmentové modely v epidemiologii	8
4.3.1	SIR model.....	9
4.3.2	SIS model	10
4.3.3	SEIR model.....	11
4.3.4	SEIS model	11
4.3.5	SIRD model	12
4.3.6	SIRV model	13
4.3.7	MSIR model	13
4.3.8	MSEIR model	14
5	Praktická část	15
5.1	Příčinný smyčkový diagram	15
5.2	Diagram hladin a toků	16
5.2.1	Modul SIQHRD.....	17
5.2.2	Modul Measures.....	22
5.2.3	Modul Finances	26
5.2.4	Modul Education	31
5.2.5	Modul Travelling.....	32
5.3	Testy a analýzy	34
5.3.1	Simulace v normálním stavu	34
5.3.2	Test statistických znaků	43
5.3.3	Test robustnosti.....	43
5.3.4	Citlivostní analýza	44
6	Závěry a doporučení	45
	Seznam použité literatury	47

Seznam obrázků

Obrázek 1 Příčinný smyčkový diagram (Vlastní zpracování)	15
Obrázek 2 Diagram hladin a toků (Vlastní zpracování)	16
Obrázek 3 Modul SIQHRD (Vlastní zpracování)	18
Obrázek 4 Sektor Hospitalization (Vlastní zpracování)	21
Obrázek 5 Sektor Vaccination (Vlastní zpracování)	22
Obrázek 6 Modul Measures (Vlastní zpracování)	23
Obrázek 7 Modul Finances (Vlastní zpracování)	27
Obrázek 8 Sektor Přímá opatření (Vlastní zpracování)	30
Obrázek 9 Sektor Výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb (Vlastní zpracování)	31
Obrázek 10 Modul Education (Vlastní zpracování)	32
Obrázek 11 Modul Travelling (Vlastní zpracování)	34
Obrázek 12 Simulace Počátku pandemie v Modulu SIQHRD sledující Detected Deceased a Detected Recovered (Vlastní zpracování)	36
Obrázek 13 Simulace Počátku pandemie v Modulu SIQHRD sledující Undetected Deceased a Undetected Recovered (Vlastní zpracování)	36
Obrázek 14 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Detected Deceased a Detected Recovered (Vlastní zpracování)	38
Obrázek 15 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Detected Deceased, Detected Recovered a Susceptible (Vlastní zpracování)	39
Obrázek 16 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Undetected Deceased a Undetected Recovered (Vlastní zpracování)	39
Obrázek 17 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Vaccinated With One Dose a Vaccinated With Two Doses (Vlastní zpracování)	39
Obrázek 18 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Measures sledující index rizika (Vlastní zpracování)	40
Obrázek 19 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Measures sledující stupeň PES (Vlastní zpracování)	40
Obrázek 20 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Education sledující nakažené žáky dle věkových kategorií (Vlastní zpracování)	41
Obrázek 21 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Education sledující počet rodičů s nárokem na krizové ošetřovné (Vlastní zpracování)	41
Obrázek 22 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Travelling sledující možnosti cestování v rámci různých území (Vlastní zpracování)	42
Obrázek 23 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Travelling sledující lidi v karanténě po cestování a lidi cestující zpět do země (Vlastní zpracování)	42
Obrázek 24 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Finances sledující příjmy, výdaje a COVID výdaje (Vlastní zpracování)	43
Obrázek 25 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Finances přímá opatření a výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb (Vlastní zpracování)	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 14denní počet pozitivních na COVID-19 (na 100 000 obyvatel) (MZČR, 2021)	23
Tabulka 2 14denní počet pozitivních seniorů na COVID-19 (na 100 000) (MZČR, 2021)	24
Tabulka 3 Zjednodušený výpočet reprodukčního čísla (MZČR, 2021)	24
Tabulka 4 Podíl hospitalizovaných nezachycených v komunitě, za posledních 14 dní (MZČR, 2021) ...	24
Tabulka 5 Index rizika a Stupeň PES (ÚZIS, 2021)	25
Tabulka 6 Přehled hromadných akcí (ÚZIS, 2021)	26
Tabulka 7 Počet osob v jednotlivých zásobárnách při simulaci počátku pandemie (Vlastní zpracování)	35
Tabulka 8 Nastavené hodnoty při simulaci počátku pandemie (Vlastní zpracování)	35
Tabulka 9 Počet osob v jednotlivých zásobárnách při simulaci probíhající pandemie (Vlastní zpracování)	370
Tabulka 10 Nastavené hodnoty při simulaci probíhající pandemie (Vlastní zpracování)	38

1 Úvod

Na konci roku 2019 se začaly šířit zprávy o výskytu nové nemoci COVID-19 ve městě Wuhan v provincii Chu-pej v Číně. Toto onemocnění se jeví jako zápal plic s neznámou etiologií (Sun et. Al., 2020). Tato epidemie vyústila v celosvětovou pandemii. Světová zdravotnická organizace (WHO) uvádí, že k srpnu 2022 bylo celosvětově nahlášeno více než 585 milionů potvrzených pozitivních případů nemoci COVID-19, včetně více než 6 milionů nahlášených úmrtí. Bylo podáno 12 miliard dávek vakcinace (World Health Organization, 2022a).

Pandemie negativně ovlivnila celosvětovou ekonomiku v různých sektorech. V mnoha zemích vedla pandemie k propouštění zaměstnanců (Center on Budget and Policy Priorities, 2022), mnoho malých a středních podniků bylo dočasně a někdy i permanentně uzavřeno (Bartik et al., 2020). World Tourism Organization (UNWTO) uvádí, že jeden z nejvíce zasažených sektorů byl turismus, kde docházelo k největšímu propuštění zaměstnanců. Mezinárodní cestovní ruch se v roce 2020 propadl o 72 %. Jednalo se tak o nejhorší rok v historii cestovního ruchu. Mělo to za následek celosvětově o 1,1 miliardy méně mezinárodních turistů a stav turismu se tak vrátil na stejnou úroveň, na jaké byl před 30 lety. (UNWTO, 2022)

Školy byly uzavírány po celé Evropě a výsledky z některých zemí naznačují, že to mělo za důsledek ztráty ve výuce a zvyšující se nerovnost mezi některými žáky (Donnelly et al., 2021). Ohromný dopad měla pandemie i na mentální zdraví. WHO (2022c) uvádí, že se spousta lidí stala úzkostnějšími, ale u některých COVID-19 vyvolal mnohem závažnější problémy. Dle WHO (2022c) množství lidí uvádí, že mají psychické potíže a příznaky deprese, úzkosti nebo posttraumatického stresu. Navíc byly zaznamenány znepokojivé známky rozšíření sebevražedných myšlenek a chování (World Health Organization, 2022c).

S pandemií COVID-19 byl zmiňován i emergency management, nouzové řízení, které má za cíl zabránit vzniku mimořádných událostí (katastrof). Pokud situaci není zabráněno a k nějaké takové události dojde, měl by být zahájen plán ke zmírnění dopadů dané události. Jednou ze světově známých organizací, která se zabývá emergency managementem, a to ve zdravotnictví, je World Health Organization (2022b). Ta uvádí 4 kroky emergency managementu. Prvním z kroků je Prevention (prevence). Dle WHO může být spouště událostem předejito před tím, než způsobí extrémní škodu. WHO se snaží zabránit takovýmto vypuknutím nebezpečným chorob. Druhým krokem je Preparedness (přípravenost), což v Evropě znamená, že všechny země musí být schopny zvládnout jakýkoliv typ zdravotní nouze. Dalším krokem je Response (reakce). V případě nutnosti budou prováděny život zachraňující zdravotní zásahy, aby měla postižená populace včasný přístup ke kvalitním zdravotnickým službám. Posledním

krokem je Recovery (zotavení). Jakmile nejhorší část krize pomine, WHO zůstává a podporuje ministerstva zdravotnictví.

Tato práce, nazvaná Modelování a simulace vybraných problémů epidemiologických situací, je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je stručně popsána systémová dynamika, systémové myšlení a pandemie COVID-19. Dále jsou detailně popsány různé compartmental models (kompartmentové modely), které se využívají v epidemiologii.

Praktická část pak popisuje konkrétní epidemiologickou situaci, pandemii COVID-19. Model je vytvořen v programu Stella Professional a zaznamenává dynamiku nákazy v rámci dnů. V modelu je 5 modulů. Hlavní z nich popisuje samotný průběh nákazy a klíčové proměnné, které mají následně vliv i na ostatní moduly. Každý další z modulů popisuje některé z výše zmíněných odvětví, které bylo pandemií zasaženo. Například modul Education zobrazuje situaci ve školství během probíhající pandemie. Dalšími moduly jsou Measures, Finances a Travelling.

2 Cíl práce

Tato bakalářská práce se zaměřuje na téma pandemie COVID-19 a s tím se pojící emergency management (nouzové řízení). Hlavním cílem práce je vytvořit model pandemie, určit vliv pandemie na vybrané sektory, které byly zasaženy, a sledovat konkrétní vývoj situace. To bude realizováno pomocí modelu systémové dynamiky, který bude zobrazovat průběh pandemie. Dosažení tohoto cíle je realizováno pomocí dílčích cílů.

Prvním z dílčích cílů je vyhledání vhodných zdrojů týkajících se pandemie pro vytvoření příčinného smyčkového diagramu, ve kterém jsou stanoveny hlavní proměnné. Druhým dílčím cílem je příčinný smyčkový diagram vytvořit na základě hlavních proměnných. Dalším dílčím cílem je podle příčinného smyčkového diagramu sestavit diagram hladin a toků. Po vytvoření diagramu je posledním z dílčích cílů provést vhodné simulace, otestovat dané moduly a porovnat výsledky s reálnými daty.

3 Metodika zpracování

Při tvorbě této práce bylo nejprve nutné vyhledat zdroje k pandemii COVID-19, k pandemickým situacím obecně a k tématu emergency management (nouzové řízení). Následně proběhlo podrobné seznámení s relevantními zdroji a další vyhledávání odborných článků a studií. K vyhledávání byly použity databáze Science Direct, Scopus a ResearchGate. Hlavní klíčová slova při vyhledávání byla „covid-19“, „pandemic“, „dynamics“ a „SIR“. Klíčové spojení „covid-19“ bylo při tvorbě práce nejdůležitější. Pouze databáze Science Direct uvádí k datu 15. 08. 2022 přes 146 tisíc výsledků. Slovo „dynamics“ bylo také podstatné, jelikož se práce zabývá tvorbou dynamických modelů vztahujících se k pandemii COVID-19. V neposlední řadě bylo významné i klíčové slovo „SIR“, které má v databázi Science Direct přes 415 tisíc výsledků (ke dni 15. 08. 2022). Slovo „SIR“ označuje základní z kompartmentových modelů. K vyhledávání dat byly využívány i názvy dalších kompartmentových modelů. Výsledky byly vyhledávány v anglickém jazyce, jelikož anglický jazyk, oproti jazyku českému, nabízí více dostupných zdrojů a výsledků. K vyhledávání konkrétních dat k pandemii byly využívány české zdroje, především stránky jednotlivých českých ministerstev.

Na základě nalezených informací byly sestaveny modely v programu Stella Professional. Byl sestaven příčinný smyčkový diagram, ve kterém byly zobrazeny nejdůležitější proměnné a vztahy mezi nimi. Na základě tohoto diagramu byl vytvořen diagram hladin a toků. Tento diagram byl složen z několika modulů. Jednotlivé moduly byly vytvořeny na základě propojení mezi dříve stanovenými proměnnými. Ve chvíli, kdy byly jednotlivé moduly vytvořeny, bylo možné začít zkoumat existující spojení mezi nimi a vztahy, kterými se navzájem ovlivňují.

Následně byly provedeny simulace, které sledovaly správnost jednotlivých modulů, a dané simulace byly porovnány s reálnými daty. Simulace sledovaly dvouměsíční období. Po provedení simulací byly provedeny analýzy a testy, například citlivostní analýza a test robustnosti. V konečné fázi proběhlo vyhodnocení dat provedených testů.

4 Teoretická část

4.1 Systémová dynamika a systémové myšlení

Počátky systémové dynamiky sahají do 20. století, kdy byla ještě nazývána průmyslovou dynamikou, jelikož původně sloužila za účelem tvorby simulací problémů v průmyslovém dodavatelském řetězci (Brailsford et al., 2014). Průkopníkem v oboru byl Jay W. Forrester, který později vydal knihu *Industrial Dynamics* (Forrester, 2013)

Brailsford et al. (2014) uvádí charakteristiky modelů dynamiky jako:

- Berou v úvahu agregáty, jako jsou produkty a lidé, a nikoliv a nikoli jednotlivé entity nebo jednotlivé agenty.
- Primárně odrážejí dynamiku systému, který má endogenní příčiny.
- Rozlišují mezi toky zdrojů a toky informací, které způsobují, že se tyto toky zdrojů zvyšují nebo snižují.
- Předpokládá se, že jsou toky spojitě a řídí se obyčejnými diferenciálními rovnicemi.
- Modely systémové dynamiky se primárně zabývají chováním zásob nebo akumulací v systému, které jsou popsány integrálními rovnicemi.
- Berou v potaz tzv. měkké proměnné, které mají na systém kauzální vliv.

Pro systémovou dynamiku jsou důležité především dva diagramy (již výše zmíněny): příčinný smyčkový diagram (CLD) a diagram hladin a toků (SFD). CLD diagram reprezentuje problém nebo systém (např. ekosystém). Vytváří jednoduchou mapu systému se všemi jeho složkami a jejich interakcemi. Interakce zachycuje pomocí zpětnovazebných smyček. Diagram obsahuje proměnné, které jsou propojeny konektory, jenž zachycují vazby mezi nimi. Je možné určit polaritu vazeb u konektorů (Meadows & Wright, 2022). CLD diagramy pomáhají při vizualizaci struktury a chování systému (více viz 5.1 Příčinný smyčkový diagram).

Diagram CLD je transformován na SFD diagram, za pomoci kterého je možné provést podrobnější analýzu. Takový diagram je modelován s využitím zásobáren (stocks) a toků (flows). Zásobárna se plní nebo vyčerpává. Tok reguluje rychlost změny v zásobárně a informace v něm jsou zachyceny pomocí rovnic. (více viz. 5.2 Diagram hladin a toků)

Se systémovou dynamikou se úzce pojí systémové myšlení, které je někdy popisováno jako kvalitativní systémová dynamika. Původ systémového myšlení je založen na vytváření diagramů nebo mapovacích technik, především však Influence Diagramů (ID, diagram vlivů) nebo Causal Loop Diagramů (CLD, příčinný smyčkový diagram). CLD diagramy se objevily v 70. letech (Brailsford et al., 2014). Ramage a Shipp (2009) uvádí, že systémové myšlení dává

smysl složitosti světa, jelikož se na něj dívá z hlediska celků a vztahů, spíše než rozdělováním na jeho části.

System Dynamics Society (2020) uvádí 4 hlavní nástroje pro systémovou dynamiku. Jedním z nejstarších je DYNAMO, simulační programovací jazyk, který již není komerčně distribuován. iThink® a STELLA® označují jednu modelovou vývojovou platformu, kterou publikuje isee systems. Software je využíván pod komerční licenci pro počítače Windows a Macintosh. K dispozici je i výuková licence, která byla mimo jiné použita pro tvorbu této práce. Powersim Studio, od Powersim Software, je dostupný v několika konfiguracích. Je dostupný pod komerční i pod výukovou licenci a nyní je k dispozici i nová bezplatná verze Studio Express. Vensim®, od Ventana Systems, Inc., je software, který je dostupný na základě komerčních licencí pro výzkum a akademické použití. Dalším široce používaným nástrojem je Insight Maker. Tato aplikace je zdarma, funguje kompletně ve webovém prohlížeči a je využívána ve vzdělávání i ve vědě (Insight Maker, 2022). V neposlední řadě je využíván program AnyLogic, který podporuje systémovou dynamiku, modelování na základě agentů a diskrétních událostí. Také umožňuje vytvářet hybridní modely (AnyLogic, 2022).

Nejpoužívanější technikou na modelování epidemiologických situací v systémové dynamice jsou kompartmentové modely, které jsou podrobně popsány v kapitole 4.3 Kompartimentové modely v epidemiologii. V epidemiologii i systémové dynamice je možné využití i numerických simulací. Numerické simulace byla využity například při predikci situace COVID-19 v Punjabu (Aggarwal et al., 2022) nebo při simulaci šíření COVID-19 ve vnitřních prostorech (Assankhanov & Li, 2022). Dále je možné využít agent-based models (agentové modely). Tento model využil například Abdulla Alsharhan (2021) ve své práci Survey of Agent-Based Simulations for Modelling COVID-19 Pandemic. Tento přístup využil i Gunaratne et al. (2022) ve své práci Evaluating efficacy of indoor non-pharmaceutical interventions against COVID-19 outbreaks with a coupled spatial-SIR agent-based simulation framework, ve které byl vyvinut operační simulační rámec pro hodnocení rizik, který spojuje prostorový model pohybu založený na agentech s modelem SIR založeným na agentech, aby bylo možné vyhodnotit relativní rizika různých intervenčních strategií. Také je možné využít celulární automaty, což udělali Podolski & Nguyen (2021) za účelem predikce COVID-19.

4.2 COVID-19

COVID-19 je onemocnění, které je způsobeno koronavirem SARS-CoV-2 (Ainsworth et al., 2020). Nemoc se začala šířit na konci roku 2019 ve městě Wuhan v provincii Chu-pej v Číně (Sun et. Al., 2020). COVID-19 je vysoce infekční a přenáší se převážně pomocí aerosolu a kapének (World Health Organization, 2021). Mezi nejčastější symptomy patří bolest hlavy,

únava, bolest v krku, kašel, ztráta čichu a chuti, bolest svalů a mnoho dalších (Kadirvelu et al., 2022). World Health Organization (2021) uvádí inkubační dobu mezi 1 až 14 dny. V dubnu 2020 začala vakcinace proti této nemoci (World Health Organization, 2021) a k srpnu 2022 bylo podáno 12 miliard dávek vakcinace (World Health Organization, 2022a). WHO také uvádí, že k srpnu 2022 bylo celosvětově nahlášeno více než 585 milionů potvrzených pozitivních případů, včetně více než 6 milionů nahlášených úmrtí (World Health Organization, 2022a). Pouze v České republice bylo k srpnu 2022 nahlášeno více než 4 milionů potvrzených případů, skoro 4 miliony vyléčených osob a přes 40 tisíc úmrtí (MZČR, 2022b). Tato epidemie vyústila v celosvětovou pandemii a měla neuvěřitelný dopad na celosvětovou ekonomiku, cestování, školství, a mnohá další odvětví.

United Nations (2022) uvádí mnoho problémů, které zpomalují ekonomiku, mimo jiné nové vlny infekcí COVID-19, přetrvávající problémy na trhu práce, přetrvávající problémy dodavatelského řetězce a rostoucí inflační tlaky. Pandemie vedla k propouštění zaměstnanců, což mnohdy vedlo k neschopnosti platit nájem, splácet hypotéku i pokrýt základní výdaje domácnosti (Center on Budget and Policy Priorities, 2022). Malé a střední podniky byly z důvodu státních nařízení dočasně a někdy i permanentně uzavřeny, větší podniky omezovaly provoz (Bartik et al., 2020). United Nations (2022) očekává, že celosvětová produkce v roce 2022 poroste pouze o 4,0 % a v roce 2023 o 3,5 %. Podrobný stav ekonomické situace popisuje například dokument Global Economic Effects of COVID-19: Overview (Jackson, 2022).

Jeden z nejvíce zasažených sektorů byl turismus. Tam také docházelo k nejmarkantnějšímu propouštění zaměstnanců. Mezinárodní cestovní ruch se v roce 2020 propadl o 72 %. Mělo to za následek celosvětově o 1,1 miliardy méně mezinárodních turistů (UNWTO, 2022). Zpráva Evropské komise podrobněji zkoumá regionální dopady krize COVID-19 na turistický sektor (Böhme et al., 2021).

Byly uzavírány školy po celé Evropě a výsledky z některých zemí naznačují, že to mělo za důsledky ztráty ve výuce a zvyšující se nerovnost mezi některými žáky (Donnelly et al., 2021). V České republice, i v jiných evropských zemích se přecházelo na rotační nebo distanční výuku (viz 5.2.4 Modul Education). Vzdělávání, během pandemie se podrobněji věnovali Parker & Alfaro (2022).

Ohromný dopad měla pandemie samozřejmě na zdravotní stav. Mezi dlouhodobé následky patří poruchy spánku, chronická únava a bolest svalů (HMRI, 2020). Pandemie měla také dopad na psychický stav. Dle WHO (2022c) se spousta lidí stala úzkostnějšími a mnoho lidí uvádí, že mají psychické potíže a příznaky deprese, úzkosti nebo posttraumatického stresu.

Byly zaznamenány i znepokojivé známky rozšíření sebevražedných myšlenek a chování (World Health Organization, 2022c).

4.3 Kompartmentové modely v epidemiologii

Kompartmentové modely (compartmental models) jsou technika, která se využívá při modelování matematických modelů pro nakažlivé nemoci. Modely jsou kompartmentové z toho důvodu, že je populace přiřazována do tzv. kompartmentů (příhrádek). První takový model navrhli Kermack a McKendrick v roce 1927 a skládal se ze 3 základních kompartmentů: S – Susceptible (náchylní), I – Infectious (infekční) a R – Recovered (zotavení) (Kermack & McKendrick, 1927). Tento první model byl pojmenován SIR model na základě hlavních kompartmentů, mezi kterými se přesouvá populace.

Historii modelů lze nalézt na počátku 20. století v práci s názvem *An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry. – Part I* (Aplikace teorie pravděpodobností na studium apriorní patometrie. – Část I), kterou publikoval Ronald Ross v roce 1916. V práci jsou zmíněny první diferenciální rovnice modelu, proměnné jako nativity (porodnost) a mortality (úmrtnost) a tzv. Reversion Element a Happening-Element (Ross, 1916). Dále se Ross věnoval práci ve spolupráci s H. P. Hudson a v roce 1917 publikovali 2. část, která uvádí vyvození jednotlivých konstant v případě hypotetické pandemie s konkrétními hodnotami (Ross & Hudson, 1917a), a 3. část, která mimo jiné zahrnuje i grafické znázornění (Ross & Hudson, 1917b). Práci dále rozšířili v roce 1927 Kermack and McKendrick, jelikož rovnic zakomponovali logaritmické funkce (Kermack & McKendrick, 1927). Z těchto základů vycházel i Kendall v práci *Deterministic and Stochastic Epidemics in Closed Populations*, kterou publikoval v roce 1956 (Kendall, 1956). V průběhu času vznikla spousta dalších modifikací tohoto modelu, například SIS, SEIS, SEIR, MSIR, MSEIR nebo MSEIRS, pro různé nakažlivé nemoci jako Malárie, AIDS a nyní i COVID-19.

U těchto modelů se často objevují dva přístupy. Adak et al. (2021) uvádí, že deterministický přístup pracuje s obyčejnými diferenciálními rovnicemi. Druhým využívaným přístupem je stochastický přístup, který je sice realističtější, ale také složitější na analýzu (Adak et al., 2021). Výstup může predikovat délku pandemie, počet zesnulých, jak rychle se pandemie šíří a další epidemiologické parametry jako reprodukční číslo. Modely můžou dokonce odhalit, jak pandemii ovlivní restriktivní opatření, vakcinace apod.

4.3.1 SIR model

4.3.1.1 Model SIR bez nezbytné dynamiky

Tento model SIR je bez nezbytné dynamiky, kterou jsou myšleny demografické údaje jako nativita a přirozená mortalita. Úmrtí, způsobená epidemií, mohou být zahrnuta v kompartmentu Recovered. Demografické údaje nejsou zahrnuty z toho důvodu, že dynamika epidemie bývá rychlejší než dynamika demografických údajů. Je to vhodný model například pro vývoj chřipky, za účelem zjištění populace náchylné vůči nemoci, doby, za kterou se osoba stane infekční, a dalších. (Beckley et al., 2013)

Část populace, která nikdy nebyla nakažena a může se nakazit, spadá do kompartmentu Susceptible (S) (Rovnice 1). Jakmile je tato populace nakažena, přesouvá se do kompartmentu Infectious (I) (Rovnice 2). Tito nakažení jedinci mohou nemoc dále šířit a ohrožovat zdravou populaci. Předpokládá se, že jedinci, kteří jsou v kategorii Recovered (R) (Rovnice 3) mají celoživotní imunitu. Pravděpodobnost nakažení neovlivňuje věk, pohlaví, rasa ani sociální postavení. Pro model neexistuje žádná dědičná imunita. Lidé v populaci se míchají homogenně. Součet všech tří kategorií, tedy Susceptible + Infectious + Recovered, dává celkovou populaci modelu (T) (Beckley et al., 2013).

Na základě těchto předpokladů lze vytvořit diferenciální rovnice pro epidemii jako:

$$\frac{dS}{dt} = -\alpha SI \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \alpha SI - \beta I \quad (2)$$

$$\frac{dR}{dt} = \beta I \quad (3)$$

K epidemii dochází pokud $\frac{dI}{dt} > 0$, pokud nastane opačná situace $\frac{dI}{dt} < 0$, k epidemii nedojde. Dále také musí platit vztah $S < \frac{\beta}{\alpha}$. α značí míru přenosu a β značí, za jakou dobu se jedinec zotaví (Beckley et al., 2013).

Reprodukční číslo (R_0) (Rovnice 4) je jedním z nejdůležitějších údajů, které může SIR model predikovat. Značí průměrný počet osob, které jsou nakaženy jediným nakaženým. Tento model nebere v potaz restriktivní opatření mířená na kontrolu infekce. Z hodnoty reprodukčního čísla víme, v jaké části se epidemie nachází. Pokud je $R_0 > 1$, epidemie probíhá a počet nakažených osob se zvětšuje. Pokud je $R_0 < 1$, počet nakažených osob klesá. (Beckley et al., 2013)

Reprodukční čísla jsou známá pro mnoho nemocí, například pro španělskou chřipku, pro kterou probíhá přenos kapénkami, je reprodukční číslo $R_0 = 1,4 - 2,0$ (přenos kapénkami) (Ferguson et al., 2006).

Rovnici pro výpočet reprodukčního čísla lze odvodit ze vztahu:

$$I(S) = -S + \frac{1}{R_0} \ln S + 1 \quad (4)$$

4.3.1.2 Model SIR s nezbytnou dynamikou a stálou populací

Jedná se o model SIR, jehož populace je charakterizovaná úmrtností a porodností. Pro tento model se předpokládá, že je smrt přirozená. K vyjádření konstantní míry úmrtnosti a porodnosti se používá konstanta m . (Beckley et al., 2013)

Rovnice jsou upraveny do podoby:

$$\frac{dS}{dt} = m - \alpha I - mS \quad (5)$$

$$\frac{dI}{dt} = \alpha IS - (m + \beta)I \quad (6)$$

Tato soustava rovnic má 2 rovnovážná řešení. Pro rovnováhu bez epidemie:

$$(S_1, I_1) = (1, 0) \quad (7)$$

a pro epidemickou rovnováhu:

$$(S_2, I_2) = \left(\frac{\beta + m}{\alpha}, m\alpha (R_0 - 1) \right) \quad (8)$$

Reprodukční číslo R_0 je nyní dáno vztahem:

$$R_0 = \frac{\alpha}{\beta + m} \quad (9)$$

4.3.2 SIS model

SIS model byl navržen pro nemoci, u kterých nevzniká imunita. Zkratka vzniká ze Susceptible (S), Infectious (I) a opět Susceptible (S). Jakmile se nakažení vyléčí, přesouvají se ihned zpět do náchylných a mohou být nakaženi znovu. Mezi tyto nemoci patří např. nachlazení, chřipka a malárie (Hethcote, 1989). Rovnice jsou stejné jako u modelu SIR s nezbytnou dynamikou a stálou populací, tedy Rovnice 5 a Rovnice 6. Nicméně celkovou populaci tvoří pouze kompartmenty Susceptible a Infectious.

Rovnici pro reprodukční číslo (McLure & Glass, 2020) můžeme vyjádřit jako:

$$R_0 = \frac{1 - \pi}{1 - I} \quad (10)$$

4.3.3 SEIR model

Model SEIR se skládá ze 4 základních kompartmentů: Susceptible (S) (Rovnice 11), Exposed (E) (vystavení) (Rovnice 12), Infectious (I) (Rovnice 13) a Removed (R) (odstranění) (Rovnice 14). Skupina populace Removed v tomto případě znamená jak populaci, která se zotavila, tak i zesnulou populaci. Ve skupině Exposed se nachází jedinci, kteří byli infikováni, aniž by byli infekční. (Canto & Avila-Vales, 2020)

Tuto situaci lze vyjádřit následujícími rovnicemi:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha}{T}SI \quad (11)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\alpha}{T}SI - \sigma E \quad (12)$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma E - \beta I \quad (13)$$

$$\frac{dR}{dt} = \beta I \quad (14)$$

V tomto modelu $\frac{\alpha}{T}$ značí míru, jakou se Susceptible přesouvají do Exposed. Jedinci z kompartmentu Exposed se přesouvají do kompartmentu Infectious rychlostí $\sigma = \frac{1}{\sigma_0}$. σ_0 značí inkubační dobu (počet dnů) pro SARS-CoV-2 (Canto & Avila-Vales, 2020). Tato hodnota je stanovena jako $\sigma_0 = 5,2$ a zůstane nezměněna, jelikož se jedná o biologickou konstantu (Li et al., 2020). β značí míru zotavení.

Reprodukční číslo může být vyjádřeno rovnicí:

$$R_0 = \frac{\alpha}{\beta} \quad (15)$$

4.3.4 SEIS model

SEIS model je podobný modelu SEIR, ale jedinec nezískává imunitu (Wang, 2012). Kompartmenty jsou Susceptible (Rovnice 16), Exposed (Rovnice 17) a Infectious (Rovnice 18). Exposed jsou jedinci, kteří byli nemoci vystaveni, ale zatím nejsou infekční. Jednotlivé kompartmenty lze vyjádřit jako:

$$\frac{dS}{dt} = A - \mu S - \frac{bSI}{1+al} + \beta I \quad (16)$$

$$\frac{dE}{dt} = m \frac{bSI}{1+al} - (\mu + \varepsilon)E \quad (17)$$

$$\frac{dI}{dt} = (1 - m) \frac{bSI}{1+al} + \varepsilon E - (\mu + \beta + \sigma)I \quad (18)$$

A v modelu značí míru nárustu do kompartmentu Susceptible. Míra zahrnuje i novorozence a přistěhovalce. δ v tomto modelu značí míru úmrtnosti spojenou s nemocí. ε je míra, s jakou se jedinci přesouvají z kompartmentu Exposed a stávají se infekčními (přesouvají

se do kompartmentu Infectious). m je míra, jakou se nakažený jedinec přesouvá do kompartmentu Exposed. $(1 - m)$ je míra, jakou se nakažený jedinec stává nakažlivým. Vztah $\frac{bSI}{1+aI}$ značí standardní nelineární četnost výskytu. $A, \mu, \beta, \delta, \varepsilon, m$ jsou normální čísla, pro která platí $0 < m < 1$. (Wang, 2012)

4.3.5 SIRD model

Model SIRD má základní kompartmenty Susceptible (Rovnice 19), Infectious (Rovnice 20), Recovered (Rovnice 21) a je rozšířen o kompartment Deceased (D) (zesnulí) (Rovnice 22). V tomto modelu se rozlišuje mezi zotavenými a zesnulými jedinci. Rovnice pro tento model popisuje ve své knize Norman Bailey (1975). Tento model již může brát v potaz restriktivní opatření k zamezení přenosu, resp. karanténu.

Jedná se o systém těchto diferenciálních rovnic:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha IS}{T} \quad (19)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\alpha IS}{T} - \mu I - \beta I \quad (20)$$

$$\frac{dR}{dt} = \beta I \quad (21)$$

$$\frac{dD}{dt} = \mu I \quad (22)$$

Hodnota μ značí míru úmrtnosti. Parametry α (Rovnice 23), β (Rovnice 25) a μ (Rovnice 24) jsou funkce závislé na čase a nejsou konstantní. Jelikož začátek karantény snižuje kontakt mezi osobami, parametry α a β můžou být vyjádřeny jako exponenciální funkce. Funkce se nezačne snižovat, dokud není zahájen lockdown. Míra μ může být vyjádřena jako logistická funkce. (Canto & Avila-Vales, 2020)

Dynamické parametry α, β, m mohou být vyjádřeny jako:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 & t < t_{lockdown} \\ \alpha_0 e^{-\frac{t-t_{lockdown}}{\tau_\alpha}} + \alpha_1 & t \geq t_{lockdown} \end{cases} \quad (23)$$

$$\mu = \begin{cases} \mu_0 & t < t_{lockdown} \\ \mu_0 e^{-\frac{t-t_{lockdown}}{\tau_\mu}} + \mu_1 & t \geq t_{lockdown} \end{cases} \quad (24)$$

$$\beta = \beta_0 + \frac{\beta_1}{1+e^{-t+\tau_\beta}} \quad (25)$$

Pro tyto rovnice musí být stanoveny hodnoty $\alpha_0, \alpha_1, \tau_\alpha, \mu_0, \mu_1, \tau_\mu, \beta_0, \beta_1, \tau_\beta$, na základě konkrétní pandemie.

4.3.6 SIRV model

Tento model, jako první ze zmíněných modelů, bere v potaz i vakcinovanou populaci (Schlickeiser & Kröger, 2021). Model má hlavní kompartmenty Susceptible (Rovnice 26), Infectious (Rovnice 27), Recovered (Rovnice 28) a Vaccinated (vakcinovaní) (V) (Rovnice 29). Model používá systém diferenciálních rovnic:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\alpha}{T}IS - vS \quad (26)$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{\alpha}{T}IS - \beta I \quad (27)$$

$$\frac{dR}{dt} = \beta I \quad (28)$$

$$\frac{dV}{dt} = vS \quad (29)$$

Parametr v značí míru vakcinace a lze jej můžeme vyjádřit i jako $v = au$. a vyjadřuje úspěšnost vakcinace, resp. poměr mezi počtem jedinců, kteří obdrželi vakcínu a získali plnou imunitu, a celkovým počtem vakcinované populace. u značí denní proočkovanost, resp. počet podaných vakcín v čase t . (Harizi et al., 2021)

Reprodukční číslo může být opět vyjádřeno jako:

$$R_0 = \frac{\alpha}{\beta} \quad (30)$$

4.3.7 MSIR model

Při delším výskytu nemoci se může stát, že se novorozeňata narodí s imunitou, která na ně byla přenesena od matky. Maternally Derived Immunity (pasivní imunita) (M) (Rovnice 31) je jeden z kompartmentů v tomto modelu. Pasivní imunita je typická například pro spalničky. Pokud protilátky zmizí, dítě se přesouvá do kompartmentu Susceptible. Tyto modely také berou v potaz různý počet kmenů patogenů n infekčního onemocnění. Pokud platí $0 \leq q < 1$, tak hodnota qA značí novorozeňata s pasivní imunitou a $(1 - q)A$ jsou novorozeňata bez pasivní imunity. Ostatní kompartmenty jsou Susceptible (Rovnice 32), Infectious (Rovnice 33) a Recovered (Rovnice 34). (Bichara et al., 2013)

Model můžeme vyjádřit rovnicemi:

$$\frac{dM}{dt} = qA - (\mu + \eta)M \quad (31)$$

$$\frac{dS}{dt} = (1 - q)A - \sum_{i=1}^n \alpha_i S I_i + \sum_{i=1}^n (\beta_i - p_i) I_i - \mu S + \eta M \quad (32)$$

$$\frac{dI}{dt} = \alpha_i S I_i - (\mu + \delta_i + v_i + \beta_i - p_i) I_i \quad i = 1, \dots, n \quad (33)$$

$$\frac{dR}{dt} = \sum_{i=1}^n v_i I_i - \mu R \quad (34)$$

V tomto modelu parametr α_i značí koeficient přenosu při i -tém kmenu patogenu, β_i značí dobu zotavení při i -tém kmenu patogenu. p_i vyjadřuje rychlost, při které nakažlivý hostitel vytvoří nového nakaženého hostitele při i -tém kmenu patogenu. δ_i značí další úmrtnost i -tého kmenu (Bichara et al., 2013).

4.3.8 MSEIR model

MSEIR model se skládá z kompartmentů Maternally Derived Immunity (M) (Rovnice 35), Susceptible (Rovnice 36), Exposed (Rovnice 37), Infectious (Rovnice 38) a Recovered (Rovnice 39) (Almeida et al., 2018). U tohoto modelu se jedinci, kteří patří do kompartmentu Recovered, považují za jedince s trvalou imunitou (Bichara et al., 2013).

Jednotlivé kompartmenty lze vyjádřit jako:

$$\frac{dM}{dt} = m(T - S) - (\delta + m)M \quad (35)$$

$$\frac{dS}{dt} = mS + \delta M - \frac{\alpha}{T}SI - mS \quad (36)$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\alpha}{T}SI - (\sigma + m)E \quad (37)$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma E - (\beta + m)I \quad (38)$$

$$\frac{dR}{dt} = \beta I - mR \quad (39)$$

V modelu je nutné brát v potaz, že pouze novorozenci matek, které nemoc prodělaly, mohou vstoupit do kompartmentu Maternally Derived Immunity, budou mít tedy pasivní imunitu. V tomto modelu značí δ míru, jakou se dítě přesouvá z kompartmentu Maternally Derived Immunity do kompartmentu Susceptible, tedy jak ztrácí přirozenou imunitu (Almeida et al., 2018).

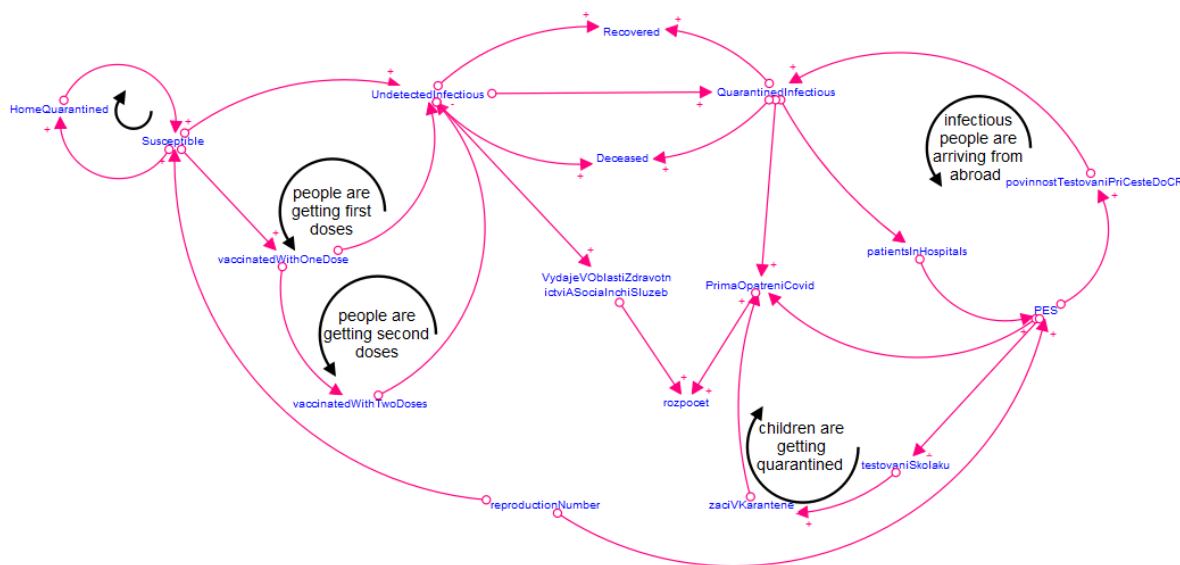
MSEIR model může být rozšířen na model MSEIRS (Maternally Derived Immunity, Susceptible, Exposed, Infectious, Recovered, Susceptible) kde je imunita, kterou získali jedinci v kompartmentu Recovered, pouze dočasná a jakmile imunitu ztratí, přesunou se zpět do kompartmentu Susceptible (Menon et al., 2020).

5 Praktická část

Od začátku pandemie COVID-19 bylo vytvořeno mnoho modelů, které popisují aktuální vývoj a predikují další vývoj (Cakir & Savas, 2020; Zhang et al., 2020). Jako výchozí model byl většinou používán model SEIR. Obecnou analýzu stability tohoto modelu pro onemocnění COVID-19 pomocí matice pozorovatelnosti a Kalmanova filtru provedla ve své případové studii Reza Sameni (2020). Počáteční výzkumy začaly ve Wuhanu, kde měla pandemie počátek (Kucharski et al., 2020). Další výzkumy pokračovaly v Číně (Wang et al., 2020). Hlavním záměrem těchto prací bylo určit reprodukční číslo (R_0), úmrtnost případů (CFR) a vrcholnou fázi infekce. SEIR model, který vytvořil Kucharski et al. (2020), ukázal, že se v lednu 2020 reprodukční číslo ve Wuhanu snížilo z hodnoty 2,35 na 1,05. I za těchto podmínek bylo vysoce pravděpodobné, že se nákaza rozšíří do celé Číny. Když se pandemie rozšířila do západních zemí, Itálie, Španělska, Francie, Spojeného Království a Ameriky, začaly vznikat podobné SIR / SEIR modely pro tyto země (X. Zhang et al., 2020; Barmparis & Tsironis, 2020; Fanelli & Piazza, 2020; Chakraborty & Ghosh, 2020).

5.1 Příčinný smyčkový diagram

Prvním krokem při tvorbě modelu byl Causal loop diagram (CLD). Tento příčinný smyčkový diagram slouží k prvnímu zamyšlení nad danou problematikou a určení prvních proměnných a vztahů, jaké mezi sebou mají. Tento diagram (Obrázek 1) znázorňuje některé z proměnných, které se budou vyskytovat v jednotlivých modulech budoucího diagramu hladin a toků. Jsou to moduly SIQHRD, Measures, Finances, Education a Travelling.

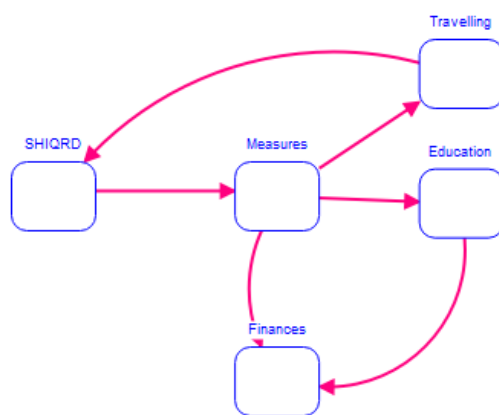


Obrázek 1 Příčinný smyčkový diagram (Vlastní zpracování)

Prvotní úvaha byla taková, že je skupina lidí, kteří jsou náchylní k nákaze. Menší část populace se rozhodne zahájit karanténu na základě podezření z kontaktu s podezřelou osobou, bez oficiálního potvrzení o nemoci, a po uplynutí karantény se opět vrací do skupiny lidí, kteří se opět mohou nakazit. U zbytku populace postupně dochází k nákaze, která je mimo jiné ovlivňována i reprodukčním číslem nemoci. Před tím, než je jedinec nakažený, se může nechat naočkovat jednou nebo dvěma dávkami vakcíny, nicméně i přes vakcinaci může dojít k nákaze. Nakažená populace se přesouvá do karantény, která je potvrzená nákazou, a tato populace se buďto zotaví, nebo zemře. Ne všechny případy jsou ale zachyceny, a proto existuje i část populace, která si projde nákazou bez oficiálního potvrzení. Tato část populace se opět buďto zotaví, nebo zemře. Nakažené osoby se mohou dostat při těžším průběhu do nemocnic, což následně ovlivňuje stupeň PES. Ten je mimo jiné ovlivněn i reprodukčním číslem. Stupeň PES má vliv na modul Travelling, Education a Finances. Při vyšším stupni PES dochází k povinnosti testování osob při příjezdu do ČR a testování žáků na školách. Čím více proběhne testů u osob cestujících do ČR, tím je větší pravděpodobnost, že budou pozitivní na nemoc. Tyto osoby se tak přidají k nakaženým osobám v karanténě. Stejně tak, čím více dochází k testování žáků, tím více bude žáků v karanténách. S částí těchto žáků budou doma muset zůstat jejich rodiče, kteří budou žádat o státní příspěvek, jelikož nebudou moci pracovat. Toto opět ovlivní státní rozpočet.

5.2 Diagram hladin a toků

Diagram hladin a toků (Obrázek 2) zobrazuje jednotlivé moduly a propojení mezi nimi. V této části práce budou detailně popsány jednotlivé moduly, hladiny, toky a proměnné.



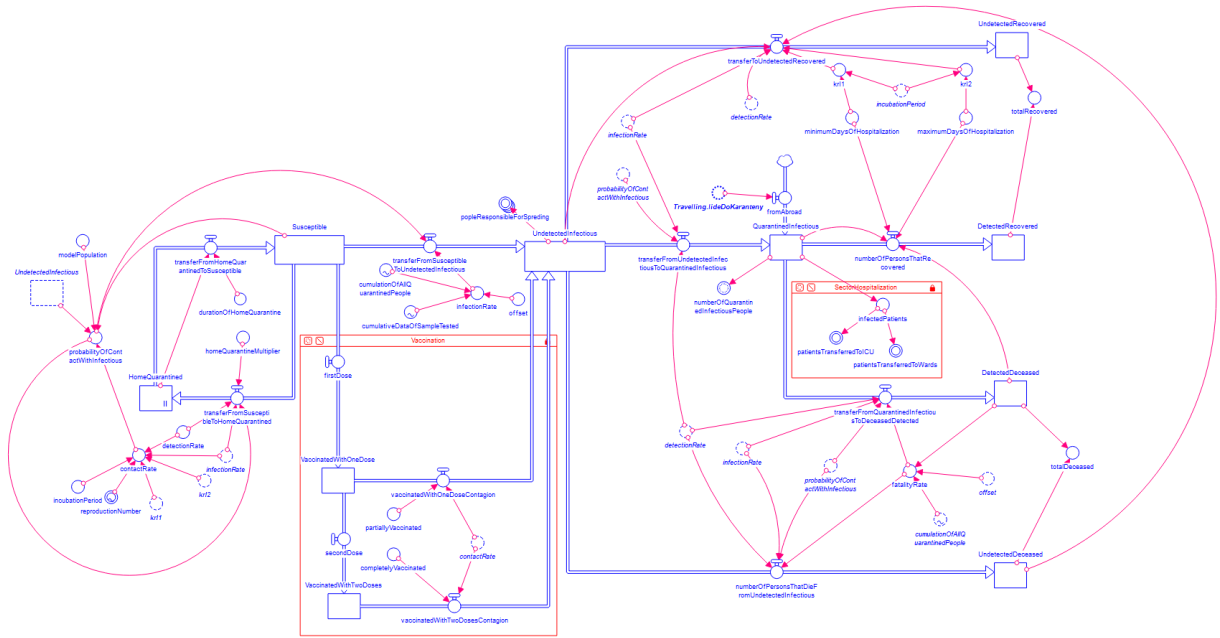
Obrázek 2 Diagram hladin a toků (Vlastní zpracování)

5.2.1 Modul SIQHRD

Tento modul je počátkem celého modelu, protože je v něm vyjádřeno chování pandemie a přesuny lidí do jednotlivých zásobáren. Modul je navržen na základě modelu SHIQRD, který navrhli Avishek Adhikary a Avijit Pal (2022) pro pandemickou situaci v Indii. Skládá se ze šesti hlavních zásobáren, po kterých je i pojmenován. Modul je vztažen na Českou republiku a je možné ho rozšířit o Sektor Hospitalization a Vaccination.

Modul se skládá z 10 zásobáren. Nejdůležitější jsou zásobárny Susceptible, Home-Quarantined, Undetected Infectious, Quarantined Infectious, Recovered (resp. Undetected Recovered a Detected Recovered) a Deceased (resp. Undetected Deceased a Detected Deceased). Z těchto základních zásobáren je odvozena zkratka modulu SHIQRD.

Zásobárna Susceptible (náchylní) zachycuje populaci na začátku pandemie. Jedná se o populaci, která zatím není nakažena. Zásobárna Home-Quarantined zachycuje populaci, která není nakažená, nicméně je v domácí karanténě. Může se například jednat o osoby žijící v domácnosti s infekční osobou. Po uplynutí doby karantény se vrátí zpět do zásobárny Susceptible. Bohužel neexistují statistiky, které by tuto hodnotu vyjadřovaly. V zásobárně Undetected Infectious (nedetekovaní nakažliví) se nachází část populace na začátku pandemie, která je již infekční, ale zatím nebyla zaznamenána. Osoby patřící to tohoto bloku můžou a nemusí být odhaleny v budoucnu. Osoby, které nebudou zaznamenány, se buď uzdraví, nebo zemřou, ale neprojdou procesem karantény infikovaných osob. Tato data nejsou aktuálně dostupná. Zásobárna Quarantined Infectious (infekční nakažliví) zachycuje osoby na začátku pandemie, které byly oficiálně zaznamenány hlášením krajských hygienických stanic a laboratoří. Tato zásobárna zachycuje i hospitalizované osoby. Zásobárna Undetected Recovered (nedetekovaní uzdravení) vyjadřuje populaci, která byla infekční, ale nebyla zaznamenána. Zásobárna Detected Recovered (detekovaní uzdravení), vyjadřuje populaci, která pochází ze zásobárny Quarantined Infectious a byla již uzdravena. Undetected Deceased je část populace, která byla infekční, ale nebyla detekována. Detected Deceased je část populace, která byla zaznamenána jako infekční a prošla si karanténou.



Obrázek 3 Modul SIQHRD (Vlastní zpracování)

Flow Transfer from Susceptible to Home-Quarantined (Rovnice 40) znázorňuje přesun ze zásobárny Susceptible do zásobárny Home-Quarantined a je vyjádřen rovnicí:

$$\begin{aligned} & transferFromSusceptibleToHomeQuarantined = \\ & homeQuarantineMultiplier * detectionRate * infectionRate * \\ & probabilityOfContactWithInfectious \end{aligned} \quad (40)$$

Home quarantine multiplier značí počet nenakažených osob, které jsou v karanténě, protože přišly do styku s infekční osobou. Může se jednat například o členy stejné domácnosti. Hodnota detection rate vyjadřuje zlomek infekčních osob, které jsou detekovány.

Infection rate (Rovnice 41), neboli míra nakažlivosti, vyjadřuje zlomek osob, které přišly do kontaktu s nakaženou osobou a samy se nakazily. Tato hodnota je vyjadřována za den. Je určována následující rovnicí:

$$infectionRate = \frac{cumulationOfAllQuarantinedPeople - offset}{cumulativeDataOfSampleTested} \quad (41)$$

Cumulation of all quarantined people, kumulace všech osob v karanténě k danému dni, je hodnota, která je vyjádřena grafickou funkcí. Tato grafická funkce je vykreslena jednotlivými dny. Data jsou získána z webových stránek Ministerstva zdravotnictví, konkrétně z tabulky Celkový (kumulativní) počet osob s laboratorně prokázaným onemocněním COVID-19 dle hlášení krajských hygienických stanic a laboratoří (MZČR, 2022a). Stejnou funkcí, ze stejného zdroje, jsou získány i hodnoty cumulative data of sample tested, kumulace dat všech

testovaných osob (MZČR, 2022a), která jsou získána z tabulky Celkový (kumulativní) počet provedených PCR a antigenních testů. Mezi těmito hodnotami jsou pouze PCR testy. Offset je vyrovnávací hodnota, která je po celou dobu nastavena na hodnotu 0.

Osoby se přesouvají ze zásobárny Home-Quarantined zpět do zásobárny Susceptible po uplynutí délky doby karantény (Flow Transfer from Home-Quarantined to Susceptible) (Rovnice 42). Tento vztah je vyjádřen:

$$\text{transferFromHomeQuarantinedToSusceptible} = \text{DELAY}(\text{HomeQuarantined}; \text{durationOfHomeQuarantine}) \quad (42)$$

Jedná se o zjednodušenou funkci, kterou se nenakažené osoby v karanténě vrací zpátky do zásobárny Susceptible.

Nakažení osob znázorňuje Flow Transfer from Susceptible to Undetected Infectious. Je vyjádřen rovnicí:

$$\text{transferFromSusceptibleToUndetectedInfectious} = \text{infectionRate} * \text{probabilityOfContactWithInfectious} \quad (43)$$

Probability of contact with infectious (pravděpodobnost kontaktu s infekčním) (Rovnice 44) vyjadřuje pravděpodobnost, s jakou může osoba ze zásobárny Susceptible přijít do kontaktu s infekční osobou. Tato pravděpodobnost se mění každý den. Je možné ji vyjádřit rovnicí:

$$\text{probabilityOfContactWithInfectious} = \frac{\text{contactRate} * \text{Susceptible} * \text{UndetectedInfectious}}{\text{modelPopulation}} \quad (44)$$

Contact rate (míra kontaktu) (Rovnice 45) značí počet osob, které přijdou do kontaktu s nakaženou osobou za den. Funkce je vyjádřena:

$$\text{contactRate} = \frac{\text{reproductionNumber}}{\text{infectionRate} * \left((\text{detectionRate} * \text{incubationPeriod}) + (1 - \text{detectionRate}) * \left(\frac{\text{krI1} + \text{krI2}}{2} \right) \right)} \quad (45)$$

Incubation period (inkubační doba) je období mezi kontaktem s nemocí a prvním nástupem příznaků nemoci. Hodnoty krI1 (Rovnice 46) a krI2 (Rovnice 47) jsou součtové hodnoty incubation period a minimum / maximum days of hospitalization (minimálního / maximálního počtu dnů, které jsou pacienti hospitalizováni).

$$\text{krI1} = \text{minimumDaysOfHospitalization} * \text{incubationPeriod} \quad (46)$$

$$\text{krI2} = \text{maximumDaysOfHospitalization} * \text{incubationPeriod} \quad (47)$$

Částečně se populace ze zásobárny Undetected Infectious přesouvá do zásobárny Undetected Recovered. Je to vyjádřeno Flow Transfer to Undetected Recovered (Rovnice 48). Vyjádřeno:

$$transferToUndetectedRecovered = \left(\frac{1}{krI2 - krI1} \right) * (UndetectedInfectious - UndetectedDeceased) * (detectionRate * infectionRate) \quad (48)$$

Flow Number of Persons that Died from Undetected Infectious (Rovnice 49), počet osob, které zemřely ze zásobárny Undetected Infectious, je daný:

$$numberOfPersonsThatDiedFromUndetectedInfectious = fatalityRate * (1 - detectionRate) * infectionRate * probabilityOfContactWithInfectious \quad (49)$$

Fatality rate (Rovnice 50), míra úmrtnosti, je určena:

$$fatalityRate = \frac{DetectedDeceased - offset}{cumulationOfAllQuarantinedPeople} \quad (50)$$

Do zásobárny Quarantined Infectious je populace přesouvána pomocí Flow Transfer from Undetected Infectious to Quarantined Infectious (Rovnice 51):

$$transferFromUndetectedInfectiousToQuarantinedInfectious = detectionRate * infectionRate * probabilityOfContactWithInfectious \quad (51)$$

Do zásobárny se ještě přesouvá populace z modulu Travelling a jedná se o osoby, které přicestovaly ze zahraničí a jsou COVID-19 pozitivní.

Flow Number of Persons that Recovered (Rovnice 52), počet osob, které se zotaví po karanténě, je vyjádřen vztahem:

$$numberOfPersonsThatRecovered = \left(\frac{1}{maximumDaysOfHospitalization - minimumDaysOfHospitalization} \right) * QuarantinedInfectious - DetctedDeceased \quad (52)$$

Flow Number of Persons that Died from Quarantined Infectious (Rovnice 53), vyjadřuje počet osob, které zemřely ze zásobárny Quarantined Infectious, a je daný:

$$numberOfPersonsThatDiedFromQuarantinedInfectious = fatalityRate * detectionRate * infectionRate * probabilityOfContactWithInfectious \quad (53)$$

Flow Transfer from Quarantined Infectious to Deceased Detected (Rovnice 54) je dán vztahem:

$$transferFromQuarantinedInfectiousToDeceasedDetected = fatalityRate * detectionRate * infectionRate * probabilityOfContactWithInfectious \quad (54)$$

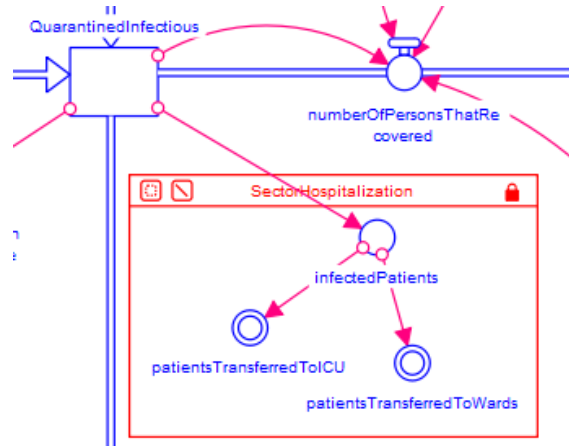
5.2.1.1 Sektor Hospitalization

Auld S.C. et al. (2020) odhaduje, že zhruba 15–20 % pacientů s onemocněním COVID-19 vyžaduje hospitalizaci a 3–5 % všech nemocných pacientů vyžaduje intenzivní péči. Pro tento sektor bylo nastaveno, že 20 % pacientů (infected patients, nakažená populace v karanténě) vyžadovalo hospitalizaci (Rovnice 55) a 4 % procenta vyžadovala intenzivní péči (Rovnice 56). Náleží tomu příslušné rovnice. Pacienti vyžadující hospitalizaci:

$$patientsTransferredToWards = \frac{20}{100} * infectedPatients \quad (55)$$

A pacienti vyžadující intenzivní péči:

$$patientsTransferredToICU = \frac{4}{100} * infectedPatients \quad (56)$$



Obrázek 4 Sektor Hospitalization (Vlastní zpracování)

5.2.1.2 Sektor Vaccination

Sektor Vaccination značí postup Vakcinace populací. Obsahuje 2 hlavní zásobárny: Vaccinated With One Dose a Vaccinated With Two Doses, tedy vakcinovaní jednou dávkou a vakcinovaní dvěma dávkami (Parolini et al., 2022).

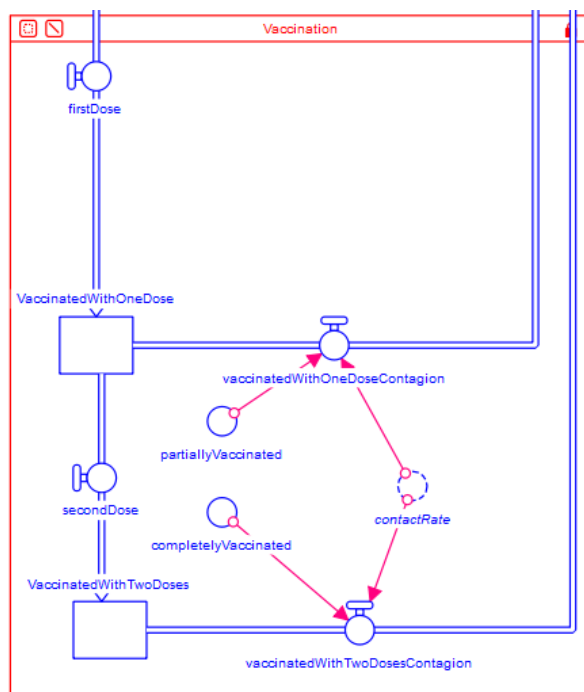
Flow First Dose znázorňuje rychlost, s jakou se populace nechává očkovat první dávkou vakcíny. Flow Second Dose znázorňuje rychlost, s jakou se populace nechává očkovat druhou dávkou vakcíny. Tyto hodnoty jsou pro tento účel zprůměrovány (MZČR, 2022c).

Flow Vaccinated With One Dose Contagion (Rovnice 57) vyjadřuje rychlost, s jakou se vakcinovaná populace jednou dávkou stává nakaženou. Je to dáno vztahem:

$$vaccinatedWithOneDoseContagion = contactRate * partiallyVaccinated \quad (57)$$

Flow Vaccinated With Two Doses Contagion (Rovnice 58) vyjadřuje rychlost, s jakou se vakcinovaná populace dvěma dávkami stává nakaženou. Je to dáno vztahem:

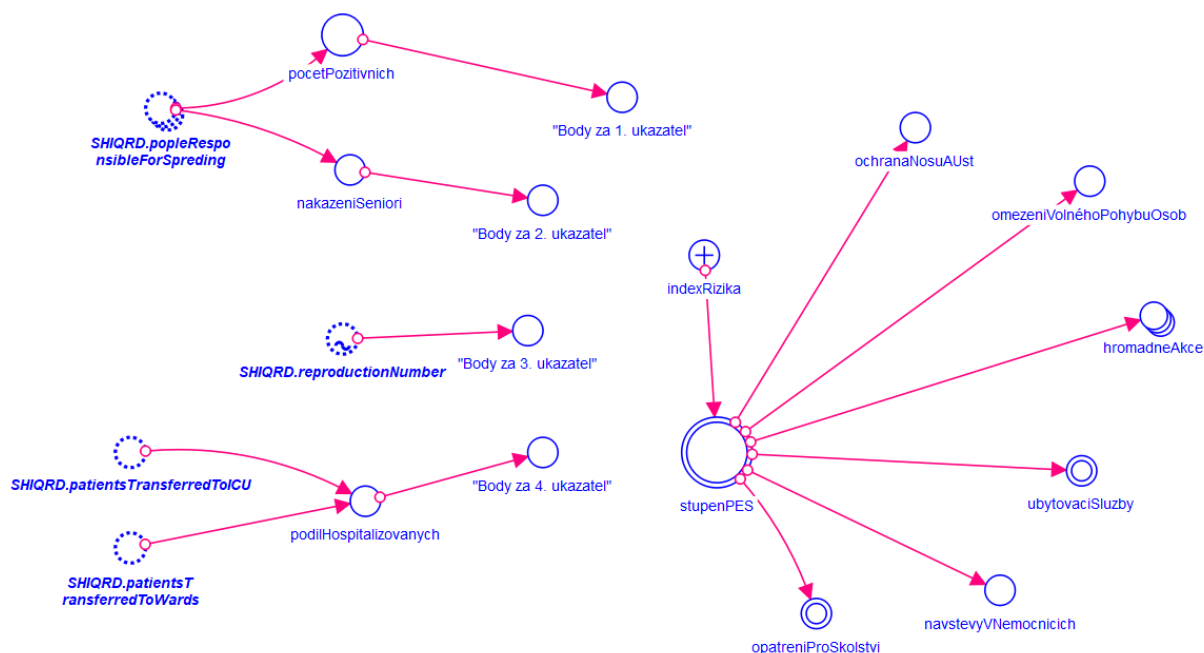
$$vaccinatedWithTwoDosesContagion = contactRate * completelyVaccinated \quad (58)$$



Obrázek 5 Sektor Vaccination (Vlastní zpracování)

5.2.2 Modul Measures

Modul Measures sleduje zavedená vládní opatření v České republice na základě Protiepidemického systému (PES) (MZČR, 2021). Protiepidemická opatření se odvíjí od hodnoty Stupně PES. Tento stupeň určuje Index rizika, který je na stupnici 0–100. Sčítají se body 4 základních ukazatelů: počet pozitivních případů na 100 000 obyvatel za posledních 14 dnů, počet pozitivních případů seniorů (obyvatelé 65+) na 100 000 obyvatel za posledních 14 dnů, reprodukčního čísla a podíl hospitalizovaných nezachycených v komunitě za posledních 14 dnů. (MZČR, 2021)



Obrázek 6 Modul Measures (Vlastní zpracování)

První ukazatel, počet pozitivních (Rovnice 59), který vyjadřuje počet pozitivních případů na 100 000 obyvatel za posledních 14 dnů, je daný funkcí:

$$\begin{aligned}
 & \text{pocetPozitivnich} = IF(TIME > (TIME - 14)) \\
 & \text{THEN } \frac{SHIQRD.peopleResponsibleForSpreading}{100000} \\
 & \text{ELSE } 0
 \end{aligned} \tag{59}$$

Proměnná people responsible for spreading z modulu SHIQRD sčítá veškeré věkové kategorie. Na základě výsledku této funkce je vyhodnoceno v Bodu za 1. ukazatel, kolik je potřeba přičíst bodů (viz Tabulka 1).

Tabulka 1 14denní počet pozitivních na COVID-19 (na 100 000 obyvatel) (MZČR, 2021)

Hodnota ukazatele	<10	10–25	25–50	50–120	120–240	240–480	480–960	>960
Body	0	2	4	7	10	13	16	20

Konvertor people responsible for spreading je přímo odvozen z modulu SHIQRD, konkrétně ze zásobárny Undetected Infectious. Populace je rozdělena do částí dle věkové kategorie. Toho je dosaženo pomocí funkce array a jejích elementů. Element skupina014 zachycuje děti od narození do 14 let, kterých bylo v roce 2021 dle Českého statistického úřadu (ČSÚ) 16,1 % (2022). Největší kategorii tvoří skupina1564, která zachycuje dospělou populaci

ve věku 15–64 let. Této skupině náleží 63,5 % (ČSÚ, 2022). Poslední skupinou je skupina 65+, kterou tvoří senioři (nad 65 let), kterým náleží 20,4 % populace (ČSÚ, 2022).

Další ukazatel, nakažení senioři (Rovnice 60), vyjadřuje 14denní počet pozitivních seniorů na COVID-19 na 100 000 obyvatel. Jako senioři se počítají obyvatelé ve věkové kategorii 65+. Funkce je podobná předchozí, ale je konkretizována na požadovanou věkovou kategorii:

$$\begin{aligned}
 pocetPozitivnich &= IF(TIME > (TIME - 14)) \\
 THEN &\frac{SHIQRD.peopleResponsibleForSpreading[65]}{100000} \\
 ELSE &0
 \end{aligned} \tag{60}$$

Následně je vyhodnoceno bodové vyjádření Body za 2. ukazatel (viz Tabulka 2).

Tabulka 2 14denní počet pozitivních seniorů na COVID-19 (na 100 000) (MZČR, 2021)

Hodnota ukazatele	<10	10–25	25–50	50–120	120–240	240–480	480–960	>960	Týdenní růst
Body	0	2	4	7	10	13	16	20	+2

Tento model bere v potaz pouze reálná data. Model není schopen počítat s reálnými situacemi, kdy senioři nepřichází do kontaktu s infekčními osobami, nebo když mezi seniory vypukne nákaza.

Třetím z ukazatelů je reprodukční číslo. Dle hodnoty reprodukčního čísla se přiřtou příslušné body.

Tabulka 3 Zjednodušený výpočet reprodukčního čísla (MZČR, 2021)

Hodnota ukazatele	<0,8	0,8–0,9	0,9–1,0	1,0–1,1	1,1–1,2	1,2–1,3	1,3–1,4	1,4–1,6	1,6–1,9	≥1,9
Body	0	3	6	9	12	15	18	21	25	30

Posledním z ukazatelů je podíl hospitalizovaných nezachycených v komunitě za posledních 14 dní, kterému patří příslušné body:

Tabulka 4 Podíl hospitalizovaných nezachycených v komunitě, za posledních 14 dní (MZČR, 2021)

Hodnota ukazatele v %	<17	17–20	20–23	23–26	26–29	29–32	32–35	35–40	40–45	≥45	Týdenní růst
Body	0	2	4	7	10	13	16	20	25	30	+2

Ačkoliv je možné dohledat počet hospitalizovaných osob v nemocnicích, již bohužel není pro většinu pandemie možné dohledat podíl zachycených a nezachycených osob v komunitě.

U druhého a čtvrtého ukazatele se připočítají ještě 2 body za tzv. týdenní růst. Ten je získán srovnáním hodnoty ukazatele v daném dni a o sedm dní dříve, pokud je hodnota vyšší, přičtou se 2 body.

Určení počtu příslušných bodů je provedeno na základě jednoduché IF funkce. Součtem všech bodů získáme Index rizika, ze kterého vyplývá stupeň PES. Matice opatření je dostupná ke stažení na webových stránkách Ústavu zdravotnických informací a statistiky ČR (ÚZIS, 2021).

Tabulka 5 Index rizika a Stupeň PES (ÚZIS, 2021)

Index rizika	0–20	21–40	41–60	61–75	76–100
Stupeň PES	1	2	3	4	5

Podle stupně PES se spouští jednotlivá opatření. Oblastí, kterých se opatření týkají, je dohromady 27, nicméně tímto modulu jich je vybráno pouze pár pro ilustraci. Opatření jsou založena na podmínkových funkcích.

Ochrana nosu a úst může ukázat dva výsledky. Pokud vrátí hodnotu 0, znamená to, že není potřeba nosit respirátory a dodržovat bezpečnou vzdálenost. Pokud vrátí hodnotu 1, znamená to, že je nezbytné respirátory nosit a dodržovat bezpečnostní rozestupy. Ve skutečnosti všechny stupně protiepidemických opatření vyžadují nošení ochrany nosu a úst (ÚZIS, 2021). Jednotlivé stupně PES pouze konkretizují, pro jaké prostory je to nezbytné.

Omezení volného pohybu osob může nabývat tři hodnoty. Hodnota 0, která je pro 1., 2. a 3. stupeň PES, znamená, že volný pohyb osob není nijak omezován. Hodnota 1 je pro 4. stupeň PES, kdy je noční zákaz vycházení v době od 23–5 hodin. Hodnota 2 je pro 5. stupeň PES, kdy je noční zákaz vycházení v době od 21–5 hodin (ÚZIS, 2021).

Konvertor hromadné akce popisuje, kolik lidí se může účastnit konkrétních hromadných akcí. Akce jsou rozděleny do tří skupin na venkovní, vnitřní a na svatby, pohřby, bohoslužby. Výslednou hodnotou pro každou skupinu je maximální počet lidí, kteří se akce mohou účastnit.

Tabulka 6 Přehled hromadných akcí (ÚZIS, 2021)

	Stupeň 1	Stupeň 2	Stupeň 3	Stupeň 4	Stupeň 5
Venkovní	500	100	50	6	2
Vnitřní	100	50	10	6	2
Svatby, pohřby, bohoslužby	100	50	30	20	15

Konvertor ubytovací služby je nastaven podobně jako konvertor ochrana nosu a úst. Pro 1., 2. a 3. stupeň neplatí žádná omezení a výsledná hodnota je 0. Pro 4. a 5. stupeň PES platí omezení a výsledná hodnota je 1 (ÚZIS, 2021).

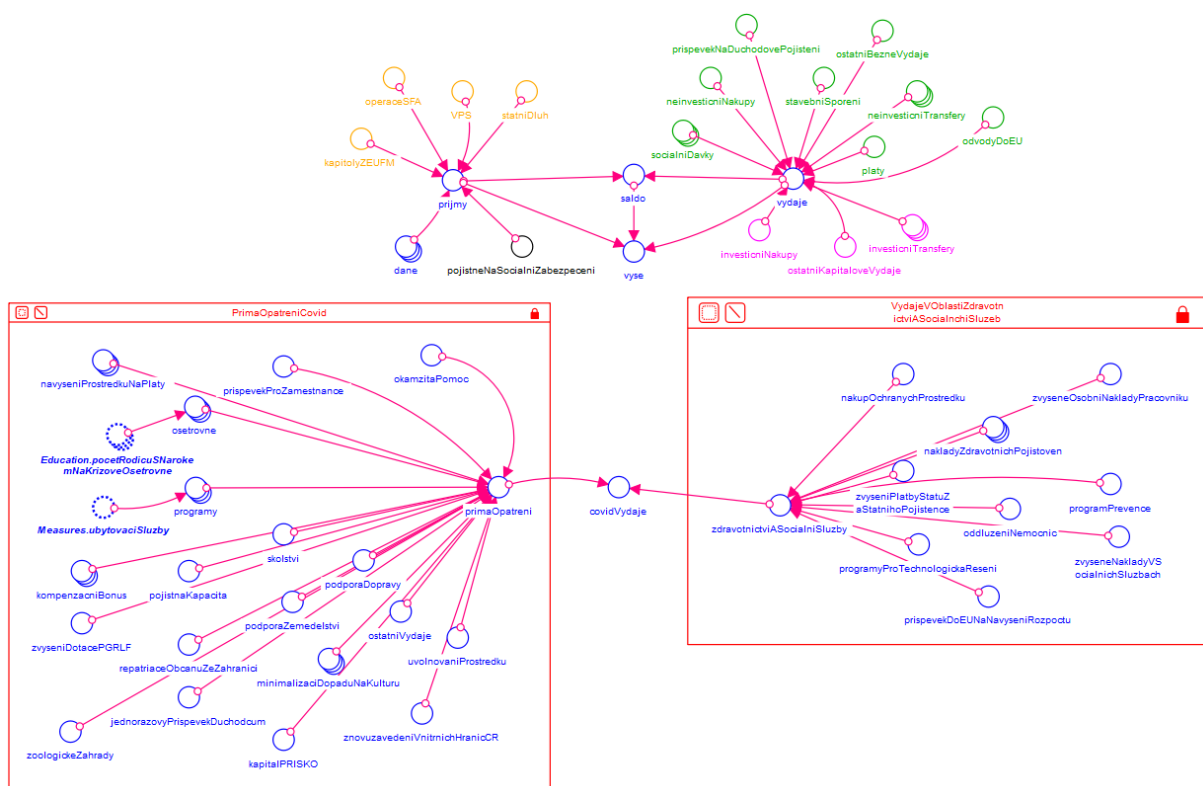
Návštěvy v nemocnicích jsou pro první a druhý stupeň PES povoleny s nutnou ochranou úst a nosu. Výstupní hodnota je 0. Při 3. stupni PES, s výslednou hodnotou 1, jsou zakázány návštěvy sociálních služeb, ale jsou povoleny návštěvy nemocnic. Pro 4. a 5. stupeň PES je výsledná hodnota 3 a platí úplný zákaz návštěv (ÚZIS, 2021).

Pro sektor školství platí při 1. a 2. stupni PES pro MŠ, ZŠ, SŠ, VOŠ a VŠ prezenční výuka, organizační a režimová opatření; a pro univerzity 3. věku platí distanční výuka (ÚZIS, 2021). Výsledná hodnota je 1. Pro stupeň 3. a 4. platí prezenční výuka pro MŠ, speciální školy a pro 1. stupeň ZŠ. Pro 2. stupeň ZŠ, SŠ a VOŠ platí rotační výuka a pro VŠ platí distanční výuka s výjimkou 1. ročníku, který má prezenční výuku (ÚZIS, 2021). Výsledná hodnota je 2. Pro 5. stupeň PES, s výslednou hodnotou 3, platí distanční výuka s výjimkou MŠ, speciálních škol a 1. a 2. očníku ZŠ.

Některá opatření jsou ve všech stupních stejná, například kontrolu dodržování opatření provádí vždy Policie/ORP, a aby bylo možné využít PES, musí být vyhlášen nouzový stav (ÚZIS, 2021).

5.2.3 Modul Finances

Modul Finances sleduje finanční vývoj situace v České republice z hlediska státního rozpočtu. Hlavní model se skládá z kostry konvertorů, kde ty nejdůležitější jsou příjmy, výdaje a COVID výdaje. Tato data jsou dostupná na webových stránkách Ministerstva financí ČR (Weiss, 2022).



Obrázek 7 Modul Finances (Vlastní zpracování)

Dle webu Finance.cz (2018) jsou příjmy rozpočtu tvořeny především daněmi, příjmy ze sociálního zabezpečení, různými poplatky, výnosy spojenými se státními majetky a prostředky, které jsou poskytovány od Evropské unie; a výdaje jsou složeny z největší části z důchodů a dalších sociálních dávek, platů státních zaměstnanců, různých dotací a dalších výdajů. Tyto finanční položky jsou obvykle evidovány ročně či čtvrtletně. Jelikož je model omezen na kratší časový úsek než rok a jelikož sleduje vývoj po jednotlivých dnech, jsou veškeré hodnoty zprůměrovány na den. U některých hodnot je průměr vypočítán za celý rok a u některých hodnot pouze za období, kdy bylo opatření platné. Měna v tomto modulu je Koruna česká.

Konvertor příjmy je součtem daňových příjmů (značeny modře), pojistném na sociálním zabezpečení a příspěvku na státní politické zaměstnance (značeno černě) a nedaňovém a kapitálovém příjmu a přijatých transferů (značeno žlutě).

Daňové příjmy můžeme dělit na daň z přidané hodnoty, spotřební daně (včetně energetických daní a daně z digitálních služeb), daň z příjmů právnických osob, daň z příjmů fyzických osob, daň z nabytí nemovitých věcí včetně daně z převodu nemovitosti, poplatky za uložení odpadů, odvod za odnětí půdy ze zemědělského půdního fondu, daň z hazardních her včetně zrušených odvodů z loterií a VHP a ostatní daňové příjmy (dopočet do celku) (Weiss,

2022). Nedaňové a kapitálové příjmy a přijaté transfery můžeme dále rozlišovat na kapitoly (příjmy z EU/FM, příjmy sdílené s EU), kapitolu operace SFA, kapitolu státní dluh a kapitolu VPS (Weiss, 2022).

Konvertor výdaje je součtem běžných výdajů (značeno zeleně) a kapitálových výdajů (značeno růžově).

V běžných výdajích státu nalezneme sociální dávky, neinvestiční nákupy, státní příspěvek na důchodové připojištění, neinvestiční transfery, odvody vlastních zdrojů EU do rozpočtu EU, platy a podobné a související výdaje, stavební spoření, a ostatní běžné výdaje (dopočet do celku) (Weiss, 2022). Mezi neinvestiční transfery řadíme neinvestiční transfery podnikatelským subjektům, neinvestiční transfery neziskovým a podobným organizacím, neinvestiční transfery státním fondům, neinvestiční transfery fondům sociálního a veřejného zdravotního pojištění, neinvestiční transfery veřejným rozpočtům územní úrovně a neinvestiční transfery příspěvkovým a podobným organizacím. V sociálních dávkách jsou zahrnuty důchody, prostředky na podpory v nezaměstnanosti, ostatní sociální dávky a státní sociální podpora (Weiss, 2022).

Z celkových příjmů a celkových výdajů můžeme zjistit saldo. Pokud je saldo kladné, znamená to přebytek rozpočtu, a pokud je záporné, znamená to schodek nebo deficit (Finance.cz, 2018).

Zda je saldo kladné či záporné, je určeno podmínkovou funkcí:

$$\begin{aligned} &saldo = IF((prijmy - vydaje) > 0) \\ &THEN 1 \\ &ELSE 0 \end{aligned} \tag{61}$$

Výsledná hodnota 1 znamená, že se jedná o přebytek rozpočtu, a výsledná hodnota 0 znamená, že se jedná o schodek či deficit. Výši rozpočtu, schodku nebo deficitu určuje podmínková funkce:

$$\begin{aligned} &IF(saldo = 0) \\ &THEN ABS(prijmy - vydaje) \\ &ELSE IF(saldo = 1) \\ &THEN (prijmy - vydaje) \\ &ELSE 0 \end{aligned} \tag{62}$$

(V případě, že by se jednalo o záporné saldo, převrátí absolutní hodnota číslo záporné na číslo kladné.)

Do tohoto základního modelu je možné ještě napojit sektory s výdaji, které byly spojeny s pandemií COVIDu-19. Jedná se celkem o 3 kategorie: Přímá opatření, Výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb, a Poskytnuté úvěry (výše úvěrů/zaručené úvěry). V modulu jsou uvedeny pouze výdaje ze státního rozpočtu, a proto v modelu není sektor Poskytnuté úvěry, jelikož tyto zdroje byly čerpány z veřejných rozpočtů. (Weiss, 2022)

5.2.3.1 Sektor *Přímá opatření*

Mezi přímá opatření patří kompenzační bonusy, zvýšení dotace PGRLF, a.s. na zajištění potravinové soběstačnosti, různé programy, ošetrovné, mimořádný příspěvek pro zaměstnance v karanténě/izolaci, mimořádná okamžitá pomoc v souvislosti s COVID-19, uvolnění prostředků krajům z rezervy na řešení krizových stavů, navýšení základního kapitálu spol. PRSKO, a.s. v souvislosti s OKD, výdaje v oblasti školství v souvislosti s COVID-19, navýšení prostředků na platy, výdaje na programy na podporu dopravy (COVID-letišť, COVID-vodní doprava aj.), navýšení pojistné kapacity a základního kapitálu EGAP, navýšení prostředků na podporu zemědělství, provedení dočasného znovuzavedení ochrany vnitřních hranic ČR, opatření k minimalizaci dopadů na sektor kultury (rozděleno na neziskové subjekty a příspěvkové organizace), repatriace občanů ze zahraničí, podpora financování zoologických zahrad, zpřístupnění národní digitální knihovny, jednorázový příspěvek důchodcům a ostatní výdaje (podpora provozu potravinových bank a dalších subjektů s humanitárním zaměřením v souvislosti s COVID-19, komunikační kampaň MPO) (Weiss, 2022).

Mezi kompenzační bonusy patří bonus pro OSVČ, bonus pro společníky malých s.r.o., bonus pro osoby na DPČ/DPP, bonus udělen během podzimních bonusových období, nový kompenzační bonus pro rok 2021, kompenzace výpadku příjmů pro obce a města (Weiss, 2022).

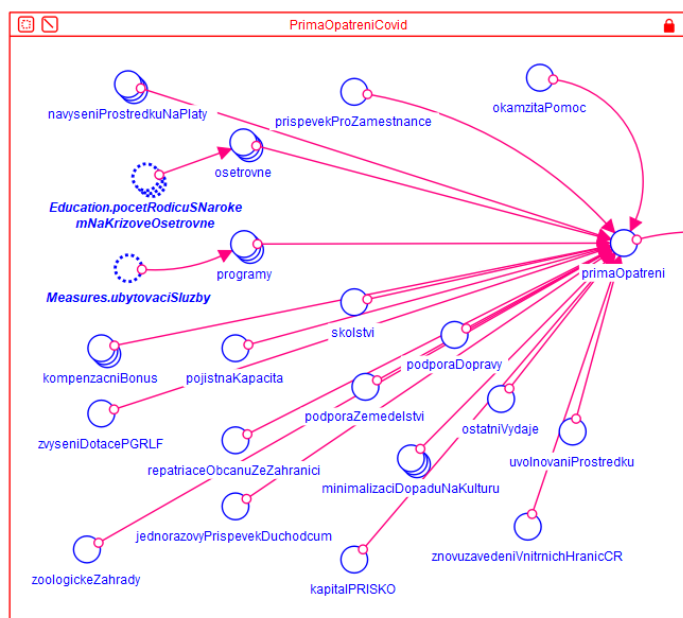
Navýšení prostředků na platy bylo provedeno ve 4 odvětvích. Platy byly navýšeny pracovníkům vězeňské služby ČR, pracovníkům celní správy, vojákům z povolání a zaměstnancům bezpečnostních sborů (Weiss, 2022). Krizové ošetrovné bylo zavedeno pro zaměstnance a pro Osoby samostatně výdělečně činné (Weiss, 2022).

Mezi veškeré programy patří program Antivirus (A, A Plus, B); programy COVID-Sport, COVID-Sport II, Sport III Lyžařská střediska a Restart sportu; program MPO "Country for the Future"; programy Technologických agentur "Trend" a "Éta"; programy COVID-Kultura I, II, III, IV; programy COVID-Bus (včetně programu COVID-Bus linka); programy COVID-Gastro-Uzavřené provozovny; programy COVID-Veletrhy/kongresy; program COVID 2021; program COVID - Nepokryté náklady; program AgricoVID – Potravinářství I, II; program COVID-Nájemné I, II, III; program COVID-Lázně

a COVID-Lázně 2021; program COVID-Podpora cestovního ruchu; program COVID-Školy v přírodě; program COVID-Ubytování I, II a program Letní kempy 2021 (Weiss, 2022).

Na tento sektor jsou ještě napojeny moduly Education a Measures. Konkrétně, výše krizového ošetřovného je vypočítána na základě toho, kolik rodičů na něj bude mít nárok. Výše ošetřovného je stanovena na 400 Kč denně, což je minimální výše ošetřovného dle České správy sociálního zabezpečení (ČSSZ, 2021). ČSSZ také uvádí, program krizového ošetřovného končil 30. 6. 2021. Program dále platil v období od 01. 11. 2021 do 28. 02. 2022 (MPSV, 2021). Pro následné simulace bude opatření platit během celého roku.

Za pomoci proměnné z modulu Measures je pouze naznačené možné využití. Je stanoveno, že nárok na čerpání programu Ubytování vznikne pouze tehdy, pokud jsou ubytovací služby omezeny (4. a 5. stupeň PES, viz Modul Measures).



Obrázek 8 Sektor Přímá opatření (Vlastní zpracování)

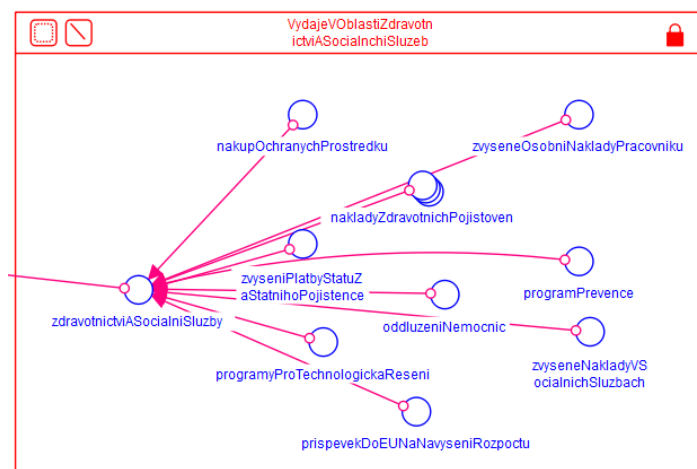
5.2.3.2 Sektor Výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb

Do tohoto sektoru patří nákup ochranných prostředků a jiné výdaje v souvislosti s COVID-19 (vakcína aj.), náklady zdravotních pojišťoven na testování (PCR, antigen) a náklady zdravotních pojišťoven na hospitalizace (bonifikace), příspěvek do EU na navýšení rozpočtu, nástroje pro mimořádnou podporu pro zajištění vakcíny proti COVID-19, programy pro technologická řešení boje proti COVID-19, zvýšené osobní náklady pracovníků ve zdravotnictví a sociálních službách, zvýšené provozní náklady v sociálních službách, program prevence negativních dopadů psychické a fyzické zátěže pro pracovníky

ve zdravotnictví v důsledku COVID-19, zvýšení platby státu za státního pojištěnce a oddlužení vybraných nemocnic (Weiss, 2022).

Programy a opatření kompenzační bonus pro OSVČ, kompenzační bonus pro společníky malých s.r.o., kompenzační bonus pro osoby na DPČ/DPP, jednorázový příspěvek důchodcům, zvýšení dotace PGRLF, a.s. na zajištění potravinové soběstačnosti, navýšení pojistné kapacity a základního kapitálu EGAP, navýšení základního kapitálu spol. PRISKO, a.s. v souvislosti s OKD, provedení dočasného znovuzavedení ochrany vnitřních hranic ČR, repatriace občanů ze zahraničí a příspěvek do EU na navýšení rozpočtu nástroje pro mimořádnou podporu pro zajištění vakcíny proti COVID-19 skončily v roce 2020 a pro rok 2021 již nebyly aktuální. Nicméně v modelu jsou stále uvedeny s nulovou hodnotou pro případné testovací účely (Weiss, 2022).

V době tvorby práce ještě nebyly k dispozici údaje o nákladech zdravotních pojišťoven na testování (PCR, antigen) a o nákladech zdravotních pojišťoven na hospitalizace (bonifikace). Tyto údaje jsou v modelu proto také uvedeny s nulovou hodnotou.



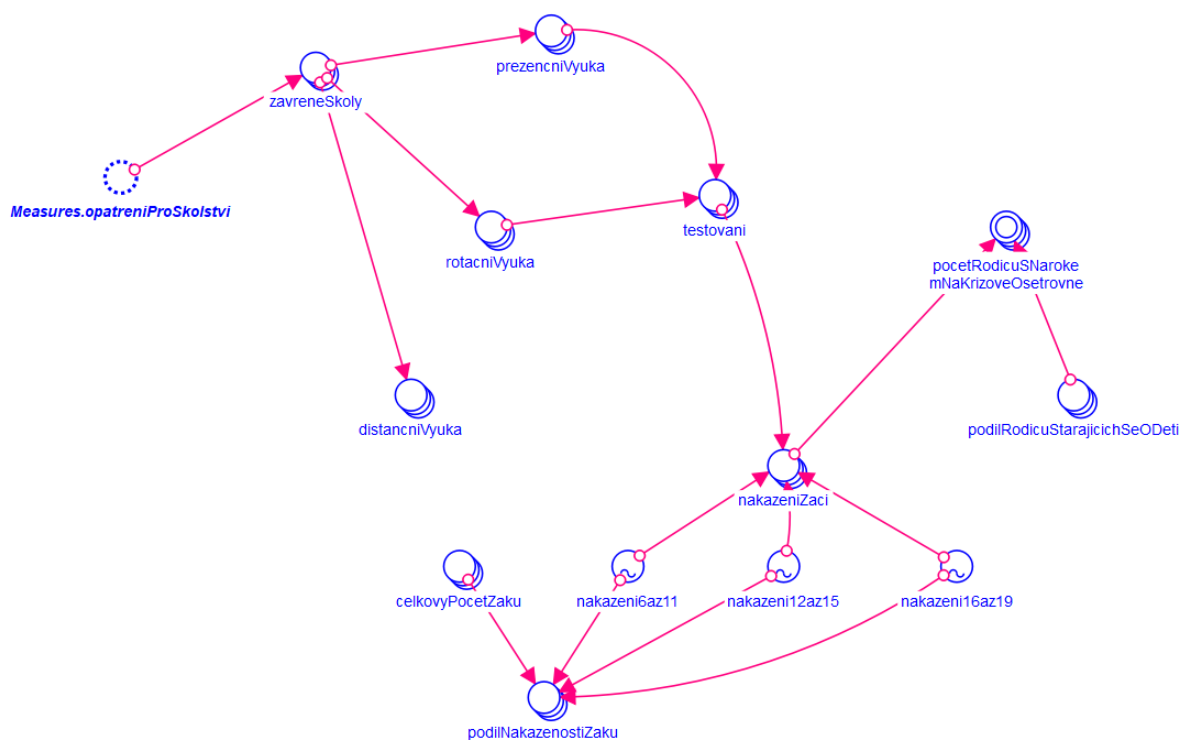
Obrázek 9 Sektor Výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb (Vlastní zpracování)

5.2.4 Modul Education

Modul Education, Školství, vychází z Protiepidemiologického systému a opatření, která se týkají školství. Vstupní hodnotou je konvertor opatření pro školy z modulu Measures. Školy jsou rozděleny na mateřské školy, na 1. a 2. stupeň základních škol, na první ročník středních škol, na zbylé ročníky středních škol a na školy vysoké. Následně je určeno, zda budou mít konkrétní typy škol prezenční výuku, rotační výuku nebo distanční výuku. Pokud mají žáci prezenční nebo rotační výuku, může docházet k testování žáků. Nakažení vychází z testování a z počtu nakažených žáků dle věkové kategorie na základě podmínkové funkce. V tomto

modulu je předpokládáno, že pokud nedojde k testování, nebude nákaza odhalena. Věkové kategorie jsou 6–11 let (odpovídá žákům 1. stupni ZŠ), 12–15 (odpovídá žákům 2. stupni ZŠ) a 16–19 (odpovídá žákům SŠ). Magazín Českého statistického úřadu Statistika & My uvádí, že ve školním roce 2020/2021 bylo evidováno 555,1 tisíc žáků na prvních stupních ZŠ a 407,3 tisíc žáků na druhých stupních ZŠ (Hykyšová, 2021). Pedagogická komora (2022) uvádí, že na středních školách bylo ve školním roce 2020/2021 evidováno 446 254 žáků. Počty nakažených žáků dle daných věkových kategorií odpovídají číslům za reálné situace dle přehledu Marka Lutonského (2022).

Pokud se nastaví podíl rodičů, kteří se starají o své děti, které z důvodu karantény nebo nákazy nemohou do školy, je možné určit počet rodičů s nárokem na krizové ošetřovné. To může být výstupním údajem, který může být vstupní hodnotou do modulu Finances. V modulu je nastaveno, že péči vyžadují pouze děti na prvních stupních základních škol.



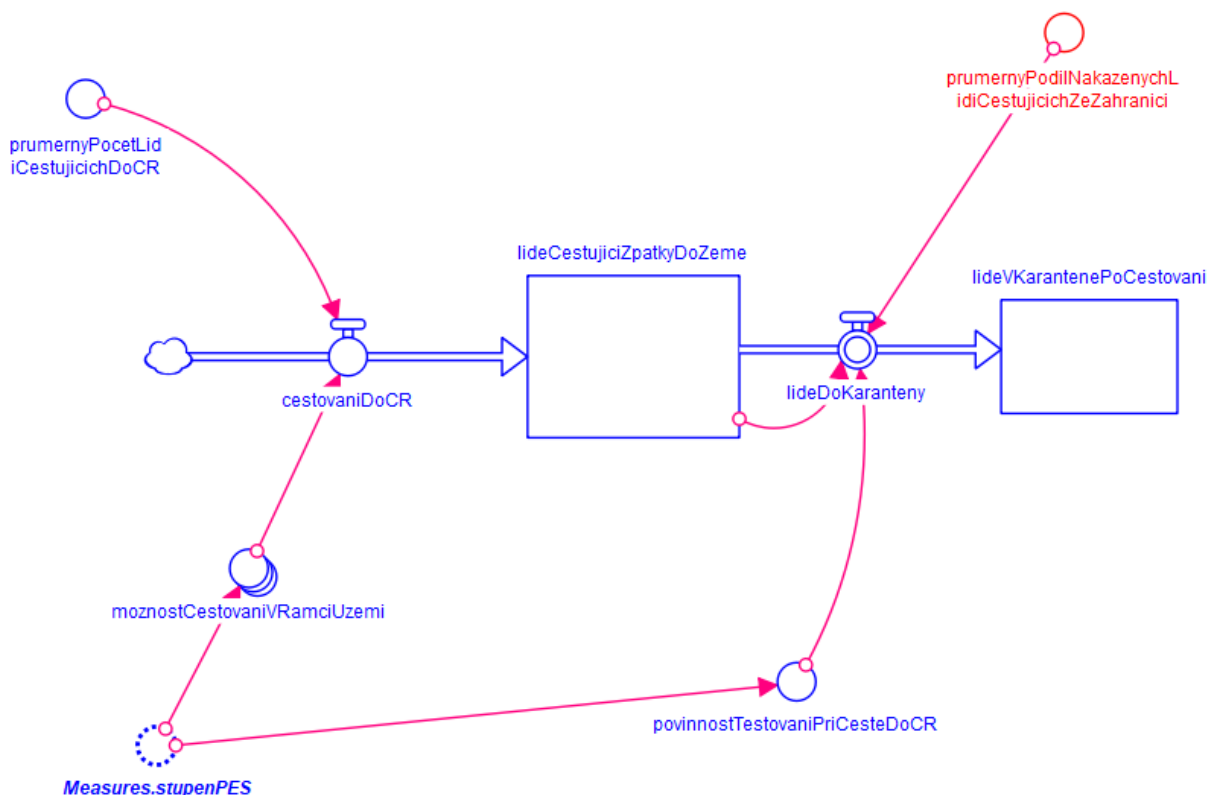
Obrázek 10 Modul Education (Vlastní zpracování)

5.2.5 Modul Travelling

Cestování se v roce 2021 řídilo převážně podle tzv. Cestovatelského semaforu, který se řídil podle míry nákazy v jednotlivých zemích. Dle webu Kurzy.cz (2022) se podle situace v zahraničí odvíjely jednotlivé podmínky cestování a návratu do ČR, nutnost testu či karantény a omezení překročení hranice. Například pravidla vstupu do České republiky platná

od 9. listopadu 2020 zobrazuje infografika dostupná na webových stránkách Ministerstva vnitra České republiky (MVČR, 2020). Dle Ministerstva zahraničních věcí (MZV, 2021) byla Veškerá protiepidemiologická opatření při návratu ze zahraničí do ČR zrušena 9. 4. 2022. Není nutné vyplňovat Příjezdový formulář ani předkládat doklad o bezinfekčnosti (MZV, 2021). Matice PES neobsahuje žádná opatření, která by se týkala cestování.

Modul Travelling navrhuje, jak by se mohla odvíjet opatření spojená s cestováním, pokud by tato položka byla přidána do matice PES. V případě, že by nastal 5. stupeň PES, byly by uzavřeny hranice státu a vznikla by povinnost testování při cestě do ČR. Při 5. stupni PES budou uzavřeny hranice krajů. Uzavření hranic okresů a měst není v modelu aktuálně nastaveno. Možné cestování je vyjádřeno hodnotou 1. Pokud to možné není, je zobrazena hodnota 0. Flow Cestování do ČR je spuštěn, pokud je povoleno cestování týkající se státu, a vyjadřuje průměrný počet lidí cestujících do ČR. Tyto osoby nevychází z celkové populace, která je daná v modulu SIQHRD. Jedná se tedy o případnou nadbytečnou populaci nebo cizince. Z osob cestujících zpátky do ČR je vyjádřen počet lidí v karanténě po cestování. Flow Lidé do karantény vyjadřuje přechod mezi dvěma zásobárnami. Pokud je povinné se podrobit testování, určí se počet lidí v karanténě na základě počtu osob cestujících zpátky do země a průměrného podílu nakažených osob cestujících ze zahraničí. Pro tento modul není nastaveno opouštění karantény. Proměnná lidé do karantény je výstupní hodnotou modulu a vstupní hodnotou zpět do modulu SIQHRD, kde jsou lidé v karanténě přičteny k osobám v zásobárně Quarantined Infectious.



Obrázek 11 Modul Travelling (Vlastní zpracování)

5.3 Testy a analýzy

5.3.1 Simulace v normálním stavu

5.3.1.1 Počátek pandemie

Tato simulace sleduje vývoj pandemie v jejím relativním počátku, v období od 01.09.2020 do 31.10.2020, kdy pandemie začala stoupat na tehdy rekordní čísla. Zároveň ještě nebyla dostupná vakcinace a začal nový školní rok 2020/2021. První den se zaznamenanými případy v České republice byl 01.03.2020. V té době byly 3 potvrzené případy a jedná se o počáteční den v grafu Denní přehled celkového počtu osob s aktuálně probíhajícím onemocněním COVID-19 (aktivní případy) na stránkách MZČR (2022b). Tento den je v této práci považován za 1. den pandemie. Den 01.09.2020 je tedy 185. den pandemie (Start Time). Simulace bude končit 245. den pandemie (31. 10. 2020). Pro tuto simulaci bude spuštěn pouze modul SHIQRD, jelikož má tato simulace ukazovat relativní počátek pandemie a počítá se s tím, že protiepidemická opatření nebudou systematická. Sektor Vaccination bude také vypnut, jelikož vakcinace ještě není vyvinuta.

Zásobárna Susceptible zachycuje populaci na začátku 185. dne pandemie. Dle grafu, který je dostupný na webové stránce Českého statistického úřadu, bylo na konci 3. čtvrtletí v roce 2020 v České republice 10,7 milionů obyvatel (ČSÚ, 2021). Orientačně bude použita tato hodnota a od ní se budou odečítat osoby, které se nachází v jiných zásobárnách.

Dle denního přehledu celkového počtu osob s aktuálně probíhajícím onemocněním COVID-19 se k 01.09.2020 jednalo o 4,7 tisíc osob (MZČR, 2022b). Tyto osoby jsou v zásobárně Quarantined Infectious. Public Health England (2021) vyhodnotilo, že přirozeně získaná imunita poskytuje 83% ochranu proti opětovnému nakažení v porovnání s lidmi, kteří nemoc zatím neprodělali. Doba imunity se se zdá být alespoň 5 měsíců (Public Health England, 2021). Jelikož je simulace nastavena na 2 měsíce, je od celkové populace odečtena i vyléčená část populace z důvodu pravděpodobné imunity (Zásobárna Detected Recovered). Ke dni 01.09.2020 se jednalo o 19,9 tisíc osob (MZČR, 2022b). MZČR (2022b) zaznamenalo ke dni 01.09.2020 428 úmrtí spojených s COVID-19. 400 je počáteční hodnota zásobárny Detected Deceased. V zásobárně Undetected Infectious je nastaveno 10 tisíc osob. V zásobárnách Home Quarantined, Undetected Recovered a Undetected Deceased nejsou žádné osoby. Přehled počtu osob je uveden v Tabulce 7.

Tabulka 7 Počet osob v jednotlivých zásobárnách při simulaci počátku pandemie (Vlastní zpracování)

Zásobárna	Počet osob
Susceptible	10,7 milionů
Home-quarantined, Undetected Recovered a Undetected Deceased	0
Undetected Infectious	10 tisíc
Quarantined Infectious	4,7 tisíc
Detected Recovered	19,9 tisíc
Detected Deceased	400

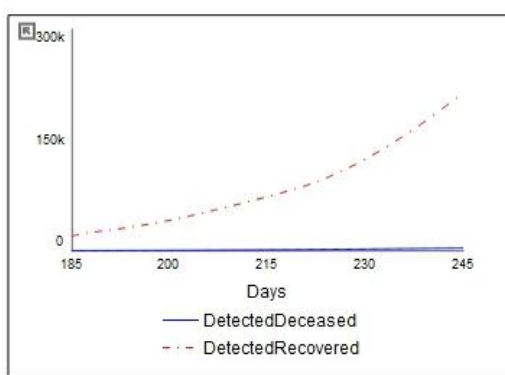
Dle webu lékárnici.cz (2020), trvala povinná doba karantény v září 2020 10 dnů. Minimum days o hospitalization, minimální počet dnů hospitalizace, je uváděn na 9 dnů a maximum days of hospitalization, maximální počet dnů, je uváděn na 23 dnů (Adhikary & Pal, 2022). Přehled nastavených hodnot pro tuto simulaci je uveden v Tabulce 8.

Tabulka 8 Nastavené hodnoty při simulaci počátku pandemie (Vlastní zpracování)

detection rate	0,7
duration of home quarantine	10
home quarantine multiplier	10
offset	0
min days of hospitalization	9
max days of hospitalization	23

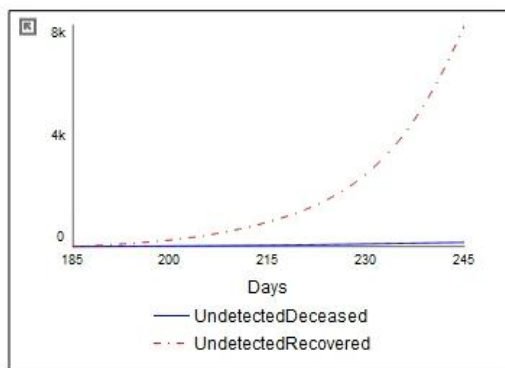
Grafické funkce cumulation of all quarantined people a cumulative data of sample tested jsou údaje, které odpovídají aktuální situaci (MZČR, 2022a). Grafická funkce reproduction number také odpovídá aktuální situaci (Seznam Zprávy, 2021a).

K modulu existují zaznamenané statistiky, týkající se vyléčených osob, zesnulých i osob s aktuálně probíhajícím onemocněním. Simulace ukazuje, že se zotavilo 214 tisíc osob (viz Obrázek 12), což přibližně odpovídá reálným hodnotám, dle kterých bylo ke 31.10.2020 zotaveno 212 tisíc osob (MZČR, 2022b). Simulace ukazuje, že zesnulo 3,87 tisíc osob. Dle reálných dat víme, že ke 31.10.2020 zemřelo 3,6 tisíc osob v souvislosti s COVID-19 (MZČR, 2022b).



Obrázek 12 Simulace Počátku pandemie v Modulu SIQHRD sledující Detected Deceased a Detected Recovered (Vlastní zpracování)

Simulace také ukazuje, kolik osob bylo vyléčeno a zemřelo bez detekce nemoci. Jedná se o 7,68 tisíc vyléčených osob a o 130 zesnulých osob (viz Obrázek 13). Tyto hodnoty bohužel není možné ověřit, jelikož neexistují příslušné statistiky.



Obrázek 13 Simulace Počátku pandemie v Modulu SIQHRD sledující Undetected Deceased a Undetected Recovered (Vlastní zpracování)

5.3.1.2 Probíhající pandemie

Tato simulace sleduje vývoj pandemie o rok později, v jejím průběhu, v období od 01.09.2021 do 31.10.2021. Pandemické hodnoty tehdy opět začaly stoupat. Simulace začíná 01.09.2021, což je 550. den pandemie (Start Time). Simulace bude končit 610. den pandemie (31.10.2021).

Zásobárna Susceptible zachycuje populaci na začátku 550. dne pandemie. Dle předběžných údajů dostupných na webové stránce Českého statistického úřadu (2021), bylo na konci 3. čtvrtletí v roce 2021 v České republice 10,55 milionů obyvatel. Orientačně bude použita tato hodnota a od ní se budou odečítat osoby, které se nachází v jiných zásobárnách.

Dle denního přehledu celkového počtu osob s aktuálně probíhajícím onemocněním COVID-19 se k 01.09.2021 jednalo o 8,7 tisíc osob (MZČR, 2022b). Tyto osoby jsou v zásobárně Quarantined Infectious. Dle předpokladu, že je doba imunity 5 měsíců, je od celkové populace odečtena i vyléčená část populace z důvodu pravděpodobné imunity (Zásobárna Detected Recovered). Tato hodnota je získána tak, že od kumulativního počtu vyléčených osob ke dni 01.09.2021 je odečten kumulativní počet vyléčených osob ke dni 01.04.2021. Předpokládá se, že lidé, vyléčení před 01.04.2021, nemají imunitu. Jedná se o 220 tisíc osob. MZČR (2022b) zaznamenalo ke dni 01.09.2021 30 tisíc úmrtí spojených s COVID-19. 400 je počáteční hodnota zásobárny Detected Deceased. V zásobárně Undetected Infectious je 10000 osob. V zásobárnách Home-Quarantined, Undetected Recovered a Undetected Deceased nejsou žádné osoby.

Tabulka 9 Počet osob v jednotlivých zásobárnách při simulaci probíhající pandemie (Vlastní zpracování)

Zásobárna	Počet osob
Susceptible	10,5 milionů
Home-quarantined, Undetected Recovered, Undetected Deceased, Vaccinated With One Dose a Vaccinated With Two Doses	0
Undetected Infectious	10 tisíc
Quarantined Infectious	8,7 tisíc
Detected Recovered	220 tisíc
Detected Deceased	30 tisíc

Na začátku září 2021 byla délka karantény 14 dnů, nicméně na základě nových opatření byla doba délky karantény 25.10.2021 zkrácena na 7 dnů (Seznam Zprávy, 2021b). Minimum days o hospitalization a maximum days of hospitalization jsou ponechány na stejné hodnotě jako během první simulace (viz Počátek pandemie). V období od 01. září 2021 do 31. října 2021

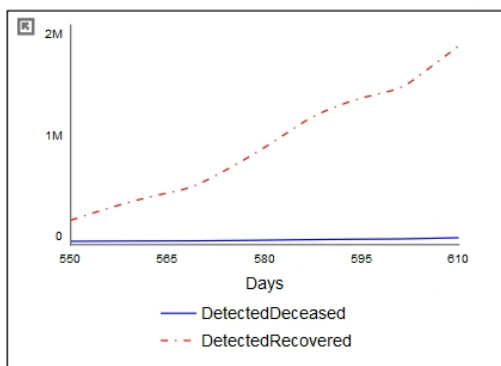
bylo podáno 495 tisíc prvních dávek a 274 tisíc druhých dávek (MZČR, 2022c). Tyto hodnoty jsou zprůměrovány do Flow First Dose a do Flow Second Dose.

Tabulka 10 Nastavené hodnoty při simulaci probíhající pandemie (Vlastní zpracování)

detection rate	0,7
duration of home quarantine	14/7
home quarantine multiplier	20
offset	0
min days of hospitalization	9
max days of hospitalization	23

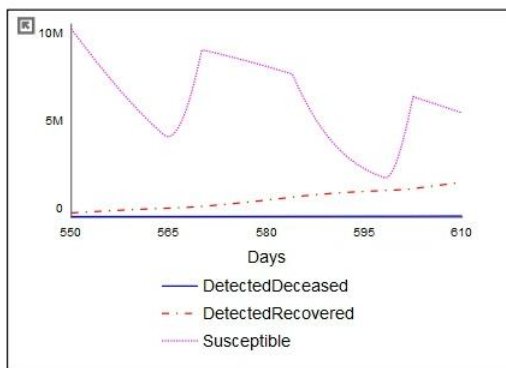
Grafické funkce cumulation of all quarantined people a cumulative data of sample tested jsou údaje, které odpovídají aktuální situaci. Data jsou získána z webových stránek Ministerstva zdravotnictví (2022b). Grafická funkce reproduction number také odpovídá aktuální situaci. Data jsou získána ze serveru Novinky.cz (2020).

K modulu existují zaznamenané statistiky, týkající se vyléčených osob, zesnulých i osob s aktuálně probíhajícím onemocněním. Simulace ukazuje, že se zotavilo 1,79 milionů osob, což přibližně odpovídá reálným datům, dle kterých bylo ke 31.10.2021 zotaveno 1,6 milionů osob (MZČR, 2022b). Simulace ukazuje, že zesnulých osob bylo 78,9 tisíc osob, což výrazně neodpovídá reálným hodnotám. Dle reálných hodnot bylo ke dni 31.10.2021 30,8 tisíc zesnulých (MZČR, 2022b). Naměřená hodnota je tedy zhruba 2x větší než reálná hodnota.



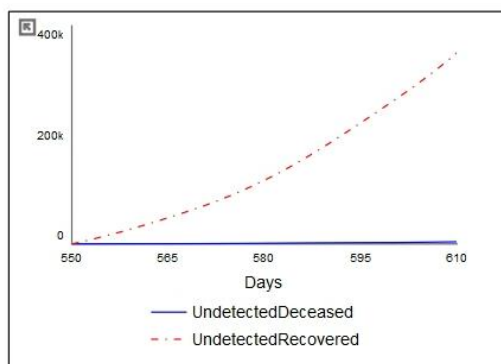
Obrázek 14 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Detected Deceased a Detected Recovered (Vlastní zpracování)

Pokud je pozorována i zásobárna Susceptible, můžeme vidět, že dochází k výrazným výkyvům, ty jsou způsobeny zjednodušeným vyjádřením karantény osob, které jsou v karanténě, ale nejsou pozitivní. Zvýraznění výkyvů je způsobeno i zvýšením hodnoty home quarantine multiplier.



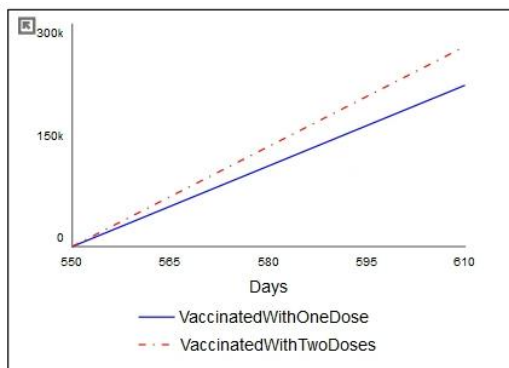
Obrázek 15 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Detected Deceased, Detected Recovered a Susceptible (Vlastní zpracování)

Ze simulace vyplývá, že bylo 350 tisíc osob vyléčeno a 3,98 tisíc osob zemřelo bez detekce nemoci.



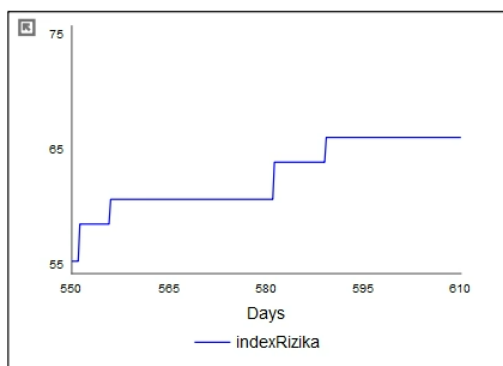
Obrázek 16 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Undetected Deceased a Undetected Recovered (Vlastní zpracování)

Z hodnot vakcinovaných osob vyplývá, že ve vyšší míře probíhá vakcinace druhou dávkou, což dle grafu, který je dostupný na serveru Novinky.cz (2021), odpovídá i reálným údajům v tomto období pandemie.

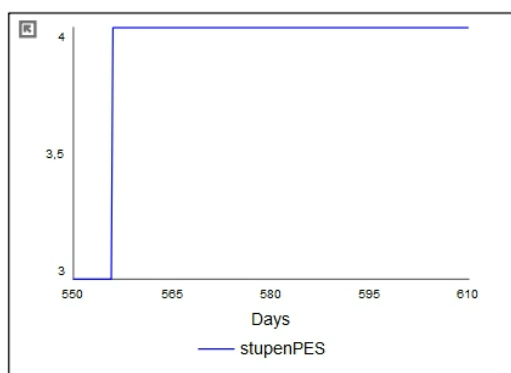


Obrázek 17 Simulace Probíhající pandemie v Modulu SIQHRD sledující Vaccinated With One Dose a Vaccinated With Two Doses (Vlastní zpracování)

Na začátku simulace byl stupeň PES 3, a poté se zvedl na stupeň 4. Z reálných dat víme, že se stupeň PES během daných měsíců pohyboval mezi stupni 2–4 (MZČR, 2022d). Vyšší stupně v simulaci jsou dané vyšším počtem hospitalizovaných osob. Nicméně pokud by situace odpovídala 4. stupni PES, vyplývá se simulace, že by bylo povinné nosit ochranu nosu a úst, byl by zákaz vycházení mezi 23–5 hodinou. Venkovních a vnitřních akcí by se mohlo účastnit 6 osob a svateb, pohřbů a bohoslužeb by se mohlo účastnit maximálně 20 osob. Ubytovací služby by byly omezené. Návštěvy ve zdravotnických zařízeních a zařízeních sociálních služeb by byly zakázány všude kromě vymezených výjimek. Mateřské školy, speciální školy a první stupně ZŠ by měly prezenční výuku, 2. stupně ZŠ by měly rotační výuku, a střední školy, vyšší odborné školy a školy vysoké by měly distanční výuku. Tyto výsledky, týkající se školství, detailně vyjadřuje modul Education.



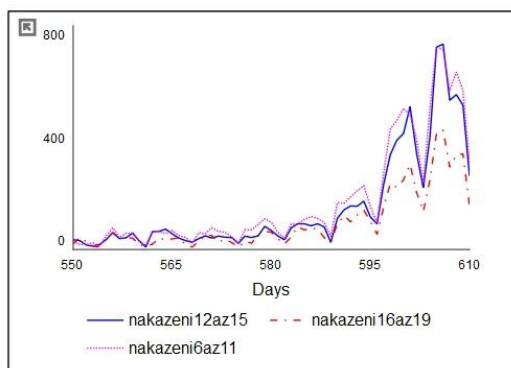
Obrázek 18 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Measures sledující index rizika (Vlastní zpracování)



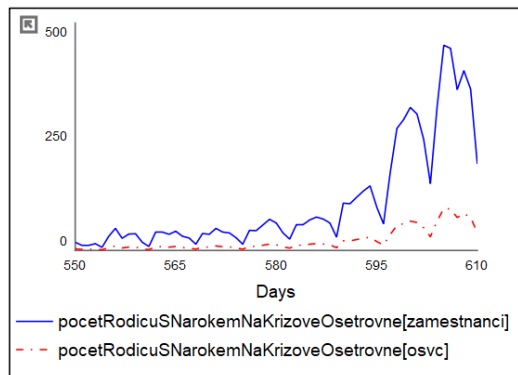
Obrázek 19 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Measures sledující stupeň PES (Vlastní zpracování)

V modulu Education je znázorněn detail situace. Počty nakažených žáků dle daných věkových kategorií odpovídají číslům za reálné situace (Lutonský, 2022). Podíl rodičů starajících se o nakažené děti je nastaven na 75 %. Nárok na krizové ošetřovné by měli v této simulaci rodiče dětí 1. stupně. Jsou to rodiče dětí, kteří budou muset přestat pracovat, aby se mohli postarat o nemocné dítě. Nebere se v potaz, že pokud by bylo nemocných více dětí,

uzavřela by se do karantény celá třída. Rodiče jsou ještě rozděleni na 83 % zaměstnaných a 23 % OSVČ (ČSÚ, 2019).

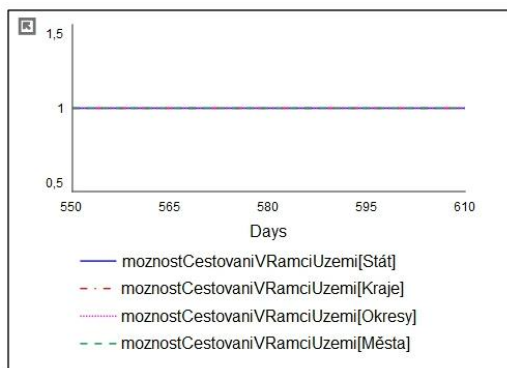


Obrázek 20 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Education sledující nakažené žáky dle věkových kategorií (Vlastní zpracování)

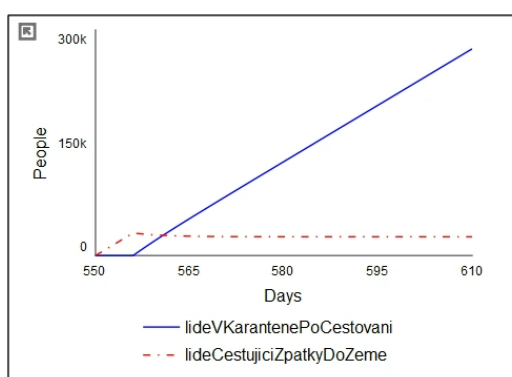


Obrázek 21 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Education sledující počet rodičů s nárokem na krizové ošetřovné (Vlastní zpracování)

Pro simulaci v modulu Travelling bylo nastaveno, že do ČR průměrně přijede během září 2021 tisíc lidí denně a během října 2021 osm set lidí denně. Po celou dobu simulace je možné cestování v rámci všech území. Cestování do ČR by bylo stále možné. V tomto modulu je nastaveno, že je pozitivních 20 % lidí, kteří přicestují zpět do ČR.



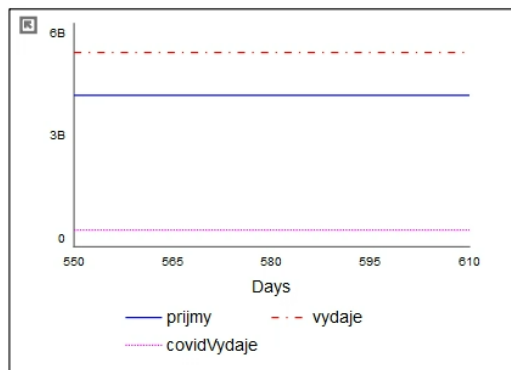
Obrázek 22 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Travelling sledující možnosti cestování v rámci různých území (Vlastní zpracování)



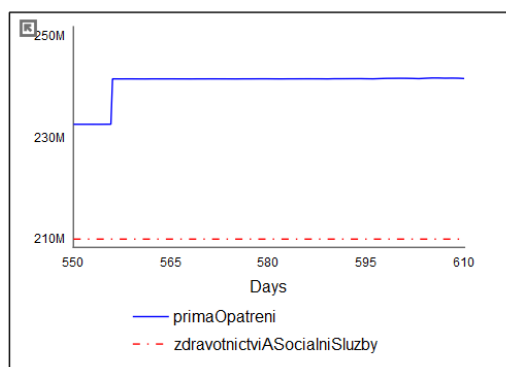
Obrázek 23 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Travelling sledující lidi v karanténě po cestování a lidi cestující zpět do země (Vlastní zpracování)

Modul Finances je při této situaci poměrně statický, jelikož jsou denní hodnoty vyjádřeny pomocí průměrů za delší období. Jedinou dynamickou hodnotou, která se v modulu nachází, je konvektor ošetřovné. I když krizové ošetřovné v období průběhu simulace reálně neplatilo, v této simulaci je pro ilustraci aktivní. Finanční hodnota závisí na počtu rodičů, kteří mají na ošetřovné nárok, a na výši ošetřovného. Minimální denní výše ošetřovného je stanovena na 400 Kč. V tomto modulu není možné zajistit přesnou dynamickou simulaci, jelikož jsou různé programy aktivní v různých obdobích a jelikož se výše jednotlivých příspěvků odvíjí od různých kritérií a je velmi individuální.

Jak víme i z reálných výsledků za minulý rok, statní rozpočet byl v deficitu. Výdaje spojené s COVID-19 byly nižší ve zdravotnictví a sociálních službách než výdaje, které se týkaly přímých opatření proti COVID-19 (Weiss, 2022).



Obrázek 24 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Finances sledující příjmy, výdaje a COVID výdaje (Vlastní zpracování)



Obrázek 25 Simulace Probíhající pandemie v Modulu Finances přímá opatření a výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb (Vlastní zpracování)

5.3.2 Test statistických znaků

Test statistických znaků testuje, zda mají výstupy modelu stejné statistické charakteristiky jako reálný systém. V tomto testu jsou výstupy modelu porovnány s daty z pandemie, které jsou dostupné na stránkách MZČR (2022b). Hodnoty vyléčených osob z modulu SIQHRD odpovídají hodnotám reálné situace během simulace Probíhající pandemie, nicméně hodnoty zesnulých osob jsou zhruba 2x větší. To může být způsobeno tím, že byl v simulaci vyšší death rate než ve skutečné pandemii. Simulace také ukazuje vyšší počet pacientů v nemocnicích. Jelikož je počet pacientů, kteří budou vyžadovat lékařskou péči, nastaven procentuálně, je možné vyvodit závěr, že prvotní předpoklad je příliš vysoký a reálné procento pacientů vyžadujících hospitalizaci je menší. Počet pacientů ovlivňuje hodnotu stupně PES. Jelikož je počet pacientů vyšší, je vyšší i stupeň PES, což následně ovlivňuje moduly Finances, Education a Travelling.

5.3.3 Test robustnosti

Test robustnosti určuje, do kdy může model správně fungovat, pokud budou vloženy neplatné nebo extrémní vstupy. Vhodné proměnné pro tento test se budou vyskytovat hlavně

v modulu SHIQRD. Simulace vůbec neproběhne například v případě, pokud budou hodnoty cumulative data of sample tested a cumulation of all quarantined people nulové. Jelikož se tyto hodnoty vyskytují v čitateli a jmenovateli v konvertoru infection rate, simulace by se vůbec nespustila. Simulace nebude fungovat, pokud bude mít reprodukční číslo a infection rate hodnotu 0. Znamenalo by to, že se nákaza vůbec nešíří. Stupeň PES by byl 0, žádná opatření by nebyla aktivní, školství i cestování by bylo bez omezení a nebyly by žádné výdaje spojené s pandemickou situací.

5.3.4 Citlivostní analýza

Citlivostní analýza zkoumá dopad změny ve vstupní hodnotě na výstupní hodnotu. Nejvýznamnější prvky pro tuto analýzu se nachází opět v modulu SHIQRD, jelikož ovlivňuje ostatní moduly. Pokud se například zvýší hodnota reproduction number, zvýší se tím i hodnoty contact rate, probability of contact with infectious, a zvýší se tím i míra přesunu osob ze zásobárny Susceptible do zásobárny Undetected Infectious, tudíž se zvýší počty veškerých vyléčených i zemřelých osob. Hodnota reproduction number hraje také důležitou roli v modulu Measures, tudíž při zvýšení dojde i k připočtení více bodů.

Dalším prvkem pro citlivostní analýzu je hodnota detection rate. Pokud se tato hodnota zvýší, sníží se rostoucí počet osob v zásobárně Undetected Infectious a od určité hodnoty dokonce začne počet osob v zásobárně úplně klesat. Například při zvýšení hodnoty z 0,45 na 1 začne docházet k vyčerpávání zásobárny z 500 tisíc osob na polovinu počtu (při zachování ostatních hodnot jako v simulaci Probíhající pandemie).

Další zkoumanou hodnotou byla hodnota incubation period, jejímž snížením dojde ke zvýšení počtu osob v zásobárně Undetected Infectious. Mezi citlivé hodnoty může být zahrnuta i hodnota podíl rodičů starajících se o děti v modulu Education. Při jejím zvýšení by se zvýšily s tím spojené výdaje.

6 Závěry a doporučení

Bakalářská práce se v první části zaměřovala na popsání systémové dynamiky a systémového managementu, které jsou nezbytné pro tvorbu modelu. Byl zmíněn také emergency management, a to konkrétně ve spojení s emergency managementem podle World Health Organization (2022b). Na základě emergency managementu je možné tvořit různé simulační modely. Takový model byl vytvořen v praktické části práce. K jeho vytvoření bylo zapotřebí popsat pandemii COVID-19, které se model týkal, a různé kompartmentové modely, které jsou využívány k tvorbě modelů v epidemiologii.

Daný model byl vytvořen ve druhé, praktické, části práce. Skládal se z 5 hlavních modulů, které mezi sebou byly propojeny. Moduly byly detailně popsány a byla provedena simulace, která znázorňovala pandemii na jejím relativním počátku, a simulace, která znázorňovala již probíhající pandemii. Obě simulace za normálních podmínek odpovídaly skutečným datům, které byly dostupné z reálné situace především na stránkách MZČR (2022b). Bylo možné usoudit, že model funguje správně. Jelikož hlavním cílem práce bylo vytvořit daný model, došlo dle autora práce ke splnění cíle. Vliv pandemie na jednotlivé moduly byl také určen. Vyhledané zdroje sloužily jako podklad pro modelování.

V závěru práce proběhlo testování modelu. Test robustnosti odhalil, že reproduction number a infection rate jsou jedny z nejdůležitějších proměnných, bez kterých simulace nebude probíhat. Pokud totiž tyto hodnoty budou nulové, pandemie nebude existovat. Analýza citlivosti ukázala, že model nejvíce reaguje na změny v proměnných reproduction number a detection rate. Obě hodnoty mají vliv na to, kolik osob bude nakaženo.

Model je možné dále rozvíjet, a to například propojením modulu Finances na modul SIQHRD za předpokladu, že čím více peněz bychom investovali, tím méně osob by bylo nakaženo, nebo by byly rychleji uzdraveny. Je také možné přímo spojit Sektor Výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb v modulu Finances se Sektorem Vaccination v modulu SIQHRD, jelikož do výdajů v Sektoru Výdaje v oblasti zdravotnictví a sociálních služeb patří mimo jiné výdaje v souvislosti s COVID-19, jako je vakcína. Dále je také možné zpětně propojit modul Measures na modul SIQHRD a ukázat, jakým způsobem mají protiepidemická opatření vliv na zpomalení šíření nákazy. Nicméně pro tuto souvislost nejsou dostupná přesná data, jelikož je tento vliv závislý hlavně na ochotě obyvatel tato doporučení/nařízení dodržovat.

Jak již bylo zmíněno výše, pandemie ovlivnila mnoho různých sektorů, a proto může být model rozšířen o úplně nové moduly, jako je například Hospital Emergency Management, který se věnuje kapacitě nemocnic při krizovém stavu, alokaci lůžek a jiného vybavení. Tento modul byl pro práci také původně zvažován, ale po vyhledání nezbytných informací se ukázalo,

že je tato modelace pro tuto práci příliš komplexní. Stav nemocnic ovlivňuje agresivita konkrétních mutací nemoci a opět hlavně individuální přístup osob k pandemii. Jedno ze schémat, které by bylo možné využít k tvorbě tohoto modulu, uvádí, ve své práci A retrospective evaluation of three ethical triage tools for the allocation of ICU resources during the first wave of the COVID-19 pandemic, Michielsen et al. (2022).

Dalším z možných modulů by mohl být modul, který by sledoval finanční stránku domácností či podniků. Ta se nicméně opět odvíjí různě dle individuální situace. Každá rodina má jiný počet finančně aktivních členů domácnosti, jiný počet členů, kteří by dosahovali na finanční podpory, rodiny také dosahují na různé výše státní podpory. Členové domácnosti, či celé domácnosti, jsou v karanténě a izolaci různě dlouhou dobu atd. Toto bylo vyzorováno i u aktuálního modulu financí a z toho důvodu jsou veškeré hodnoty pouze průměrné a modul je tak poměrně jednoduše predikovatelný.

Jedním z dalších modulů by mohl být vliv pandemie na ekologii a klimatickou změnu. Jak bylo uvedeno výše, pandemická situace ovlivnila cestování a byla tak výrazně ovlivněna letecká doprava. Spoustě zaměstnancům bylo umožněno pracovat z domu, výuka ve školách byla omezena, a tak se snížilo i množství obyčejných cest za prací a do školy, čímž se snížil provoz na silnicích, ale byla omezena i železniční doprava. Jeff Tollefson (2021) pro stránku Nature uvedl, že poté, co globální emise oxidu uhličitého po desetiletí stabilně rostly, v roce 2020 poklesly o 6,4 %, (2,3 miliardy tun) tím, že pandemie COVID-19 utlumila ekonomické a sociální aktivity po celém světě. Je tedy možné detailně sledovat, jak se tento jev vyvíjí v čase.

Jak již bylo zmíněno, jako nedostatek v modelu by mohlo být považováno to, že některé z hodnot nejsou přesně stanoveny a jsou pouze odvozeny či zprůměrovány. Nicméně je nutné brát v potaz, že je tomu tak z důvodu lidského faktoru. Každý jedinec se chová velmi individuálně a k dané situaci přistupuje velmi individuálně. Nelze tak konkrétně matematicky vyjádřit chování všech osob. Dobrým případem této skutečnosti je dodržování pandemických opatření, která byla poměrně důsledně dodržována na počátku roku 2020, nicméně v roce 2021 začalo mírně docházet k jejich porušování, ačkoliv dle výzkumu agentury STEM (2021), který proběhl v únoru 2021, dodržovalo protiepidemická opatření okolo 90 % lidí.

Celkově model zobrazuje vliv pandemie na nejdůležitější oblasti života, které byly zasaženy. Mohl by se tak stát pomocným nástrojem při řešení podobné krizové situace. Přesněji by mohl být nápomocný při plánování protiepidemických opatření, státní finanční podpory či řízení výuky ve školách.

Seznam použité literatury

Adak, D., Majumder, A., & Bairagi, N. (2021). Mathematical perspective of Covid-19 pandemic: Disease extinction criteria in deterministic and stochastic models. *Chaos, Solitons & Fractals*, 142, 110381. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110381>

Adhikary, A., & Pal, A. (2022). A six compartments with time-delay model SHIQRD for the COVID-19 pandemic in India: During lockdown and beyond. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 1403–1412. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.027>

Aggarwal, V., Arora, G., Emadifar, H., Hamasalh, F. K., & Khademi, M. (2022). Numerical Simulation to Predict COVID-19 Cases in Punjab. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2022, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/7546393>

Ainsworth, M., Andersson, M., Auckland, K., Baillie, J. K., Barnes, E., Beer, S., Beveridge, A., Bibi, S., Blackwell, L., Borak, M., Bown, A., Brooks, T., Burgess-Brown, N. A., Camara, S., Catton, M., Chau, K. K., Christott, T., Clutterbuck, E., Coker, J., . . . Young, R. K. (2020). Performance characteristics of five immunoassays for SARS-CoV-2: a head-to-head benchmark comparison. *The Lancet Infectious Diseases*, 20(12), 1390–1400. [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(20\)30634-4](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(20)30634-4)

Almeida, R., Brito Da Cruz, A. M. C., Martins, N., & Monteiro, M. T. T. (2018). An epidemiological MSEIR model described by the Caputo fractional derivative. *International Journal of Dynamics and Control*, 7(2), 776–784. <https://doi.org/10.1007/s40435-018-0492-1>

Alsharhan, A. M. (2021). Survey of Agent-Based Simulations for Modelling COVID-19 Pandemic. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(2), 439–447. <https://doi.org/10.25046/aj060250>

AnyLogic. (2022). AnyLogic: Simulation Modeling Software Tools & Solutions for Business. Retrieved August 3, 2022, from <https://www.anylogic.com/>

Assankhanov, A., & Li, K. J. (2022). Simulating COVID-19 Spreads in Indoor Space. *Web and Wireless Geographical Information Systems*, 131–140. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06245-2_12

Auld, S. C., Caridi-Scheible, M., Blum, J. M., Robichaux, C., Kraft, C., Jacob, J. T., Jabaley, C. S., Carpenter, D., Kaplow, R., Hernandez-Romieu, A. C., Adelman, M. W., Martin, G. S., Coopersmith, C. M., & Murphy, D. J. (2020). ICU and Ventilator Mortality Among Critically Ill Adults With Coronavirus Disease 2019*. *Critical Care Medicine*, 48(9), e799–e804. <https://doi.org/10.1097/ccm.0000000000004457>

Bailey, Norman T. J. (1975). *The mathematical theory of infectious diseases and its applications* (2nd ed.). London: Griffin. ISBN 0-85264-231-8

Barmparis, G., & Tsironis, G. (2020). Estimating the infection horizon of COVID-19 in eight countries with a data-driven approach. *Chaos, Solitons & Fractals*, 135, 109842. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109842>

Bartik, A. W., Bertrand, M., Cullen, Z., Glaeser, E. L., Luca, M., & Stanton, C. (2020). The impact of COVID-19 on small business outcomes and expectations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(30), 17656–17666. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006991117>

Beckley, R., Weatherspoon1, C., Alexander, M., Chandler, M., Johnson, A., & Bhatt, G. S. (2013, June). *Modeling epidemics with differential equations*. Tennessee State University & Philander Smith College. <https://www.tnstate.edu/mathematics/mathreu/filesreu/GroupProjectSIR.pdf>

Bichara, D., Iggidr, A., & Sallet, G. (2013). Global analysis of multi-strains SIS, SIR and MSIR epidemic models. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 44(1–2), 273–292. <https://doi.org/10.1007/s12190-013-0693-x>

Böhme, K., Haarich, S., Toptsidou, M., Besana, F., Corbineau, C., Hans, S., & Holstein, F. (2021, August). *Regional impacts of the COVID-19 crisis on the tourist sector* (CCI 2020CE16BAT074). European Commission. https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docgener/studies/pdf/reg_%20impacts_covid_tourism_en.pdf

Brailsford, S., Churilov, L., & Dangerfield, B. (2014). *Systems Thinking and System Dynamics: a primer*. In *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making* (Wiley Series in Operations Research and Management Science) (1st ed., pp. 29–51). Wiley. ISBN: 9781118349021

Cakir, Z., & Savas, H. B. (2020). A Mathematical Modelling Approach in the Spread of the Novel 2019 Coronavirus SARS-CoV-2 (COVID-19) Pandemic. *Electronic Journal of General Medicine*, 17(4), em205. <https://doi.org/10.29333/ejgm/7861>

Canto, F. J. A., & Avila-Vales, E. J. (2020, April). *Fitting parameters of SEIR and SIRD models of COVID-19 pandemic in Mexico*. Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán. https://www.researchgate.net/publication/341165247_Fitting_parameters_of_SEIR_and_SIR

[D models of COVID-19 pandemic in Mexico?enrichId=rgreq-be3fe89866028e0e764ce97072b4c351-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM0MTE2NTI0NztBUzo4ODc5NDM4MjQ2OTkzOTJAMTU4ODcxMzcwMzcwMQ%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/353151351-D_models_of_COVID-19_pandemic_in_Mexico?enrichId=rgreq-be3fe89866028e0e764ce97072b4c351-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzM0MTE2NTI0NztBUzo4ODc5NDM4MjQ2OTkzOTJAMTU4ODcxMzcwMzcwMQ%3D%3D&el=1_x_2&_esc=publicationCoverPdf)

Center on Budget and Policy Priorities. (2022). Tracking the COVID-19 Economy's Effects on Food, Housing, and Employment Hardships. Retrieved August 10, 2022, from <https://www.cbpp.org/research/poverty-and-inequality/tracking-the-covid-19-economy-effects-on-food-housing-and#:~:text=The%20majority%20of%20jobs%20lost,to%20Labor%20Department%20employment%20data>

ČSSZ. (2021). Aktuální informace k ošetrovnému - Česká správa sociálního zabezpečení. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.cssz.cz/aktualni-informace-k-osetrovnemu>

ČSÚ. (2019). Počty Zaměstnanců a Podnikatelů v letech 2010 a 2019 Podle Pohlaví. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.czso.cz/documents/10180/151439704/30000420k04.pdf>

ČSÚ. (2021, March 22). Pohyb obyvatelstva - rok 2020. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.czso.cz/csu/czso/ci/pohyb-obyvatelstva-rok-2020>

ČSÚ. (2022). Věková struktura. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.czso.cz/csu/scitani2021/vekova-struktura>

Donnelly, R., Patrinos, H. A., & Gresham, J. (2021, April 2). *World Bank*. The Impact of COVID-19 on Education – Recommendations and Opportunities for Ukraine. Retrieved August 12, 2022, from <https://www.worldbank.org/en/news/opinion/2021/04/02/the-impact-of-covid-19-on-education-recommendations-and-opportunities-for-ukraine#:~:text=School%20closures%20due%20to%20COVID,losses%20and%20increases%20in%20inequality>

Fanelli, D., & Piazza, F. (2020). Analysis and forecast of COVID-19 spreading in China, Italy and France. *Chaos, Solitons & Fractals*, 134, 109761. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109761>

Ferguson, N. M., Cummings, D. A. T., Fraser, C., Cajka, J. C., Cooley, P. C., & Burke, D. S. (2006). Strategies for mitigating an influenza pandemic. *Nature*, 442(7101), 448–452. <https://doi.org/10.1038/nature04795>

Finance.cz. (2018). Příjmy a výdaje státního rozpočtu. Retrieved July 29, 2022, from <https://www.finance.cz/makrodata-eu/statni-rozpocet/statistiky/prijmy-vydaje/>

Forrester, J. W. (2013). *Industrial Dynamics* (2013 Reprint ed.). Martino Fine Books. ISBN: 1614275335

Gunaratne, C., Reyes, R., Hemberg, E., & O'Reilly, U. M. (2022). Evaluating efficacy of indoor non-pharmaceutical interventions against COVID-19 outbreaks with a coupled spatial-SIR agent-based simulation framework. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09942-y>

Harizi, I., Berkane, S., & Tayebi, A. (2021, February). *Modeling the Effect of Population-Wide Vaccination on the Evolution of COVID-19 Epidemic in Canada*. Department of Chemical and Biochemical Engineering, University of Western Ontario; Department of Computer Science and Engineering, University of Quebec in Outaouais; Department of Electrical Engineering, Lakehead University; Department of Electrical and Computer Engineering, University of Western Quebec. <https://doi.org/10.1101/2021.02.05.21250572>

Hethcote, H. W. (1989). Three Basic Epidemiological Models. *Applied Mathematical Ecology*, 18, 119–144. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61317-3_5

HMRI. (2020, August 4). What Are the Long-Term Symptoms of COVID? Retrieved August 3, 2022, from <https://hmri.org.au/news-article/what-are-long-term-symptoms-covid>

Hykyšová, A. (2021, September 21). *Statistika & My*. Statistika & My. Retrieved August 2, 2022, from <https://www.statistikaamy.cz/2021/09/21/zakladni-prehled-o-zakladnich-skolach>

Chakraborty, T., & Ghosh, I. (2020). Real-time forecasts and risk assessment of novel coronavirus (COVID-19) cases: A data-driven analysis. *Chaos, Solitons & Fractals*, 135, 109850. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109850>

Insight Maker. (2022). Log In. Retrieved August 10, 2022, from <https://insightmaker.com/user>

Jackson, J. K. (2022, February). *Global Economic Effects of COVID-19: Overview* (No. R46270). Congressional Research Service. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46270>

Kadirvelu, B., Burcea, G., Quint, J. K., Costelloe, C. E., & Faisal, A. A. (2022). Variation in global COVID-19 symptoms by geography and by chronic disease: A global survey

using the COVID-19 Symptom Mapper. *eClinicalMedicine*, 45, 101317. <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2022.101317>

Kendall, D. G. (1956). Deterministic and Stochastic Epidemics in Closed Populations. *Contributions to Biology and Problems of Health*, 149–166. <https://doi.org/10.1525/9780520350717-011>

Kermack, W. O., & McKendrick, A. G. (1927). A contribution to the mathematical theory of epidemics. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 115(772), 700–721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>

Kucharski, A. J., Russell, T. W., Diamond, C., Liu, Y., Edmunds, J., Funk, S., Eggo, R. M., Sun, F., Jit, M., Munday, J. D., Davies, N., Gimma, A., van Zandvoort, K., Gibbs, H., Hellewell, J., Jarvis, C. I., Clifford, S., Quilty, B. J., Bosse, N. I., . . . Flasche, S. (2020). Early dynamics of transmission and control of COVID-19: a mathematical modelling study. *The Lancet Infectious Diseases*, 20(5), 553–558. [https://doi.org/10.1016/s1473-3099\(20\)30144-4](https://doi.org/10.1016/s1473-3099(20)30144-4)

Kurzy.cz. (2022). COVID semafor - cestovatelský semafor. Retrieved August 2, 2022, from <https://www.kurzy.cz/koronavirus/cestovani-podle-semaforu/>

lékárníci.cz. (2020, August 31). Karanténní opatření od 1. 9. 2020 | Česká lékárnická komora. Retrieved August 1, 2022, from [https://www.lekarnici.cz/Pro-verejnost/CORONAVIRUS-\(1\)/Karantenni-opatreni-od-1-9-2020.aspx](https://www.lekarnici.cz/Pro-verejnost/CORONAVIRUS-(1)/Karantenni-opatreni-od-1-9-2020.aspx)

Li Y, Wang B, Peng R, Zhou C, Zhan Y, Liu Z, et al. Mathematical Modeling and Epidemic Prediction of COVID-19 and Its Significance to Epidemic Prevention and Control Measures. *Ann Infect Dis Epidemiol*. 2020; 5(1): 1052. ISSN: 2475-5664 <https://www.remedypublications.com/open-access/mathematical-modeling-and-epidemic-prediction-of-covid-19-and-its-significance-5755.pdf>

Li, Q., Guan, X., Wu, P., Wang, X., Zhou, L., Tong, Y., Ren, R., Leung, K. S., Lau, E. H., Wong, J. Y., Xing, X., Xiang, N., Wu, Y., Li, C., Chen, Q., Li, D., Liu, T., Zhao, J., Liu, M., . . . Feng, Z. (2020). Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus–Infected Pneumonia. *New England Journal of Medicine*, 382(13), 1199–1207. <https://doi.org/10.1056/nejmoa2001316>

Lutonský, M. (2022). *Tableau.com*. Věkové Skupiny a Podíl Nakažených Na 100 Tisíc Obyvatel Po Týdnech. Retrieved August 2, 2022, from

<https://public.tableau.com/app/profile/marek.lutonsk./viz/Vkovskupiny/Confirmedbyagegroupweeks>

M. Parker & P. Alfaro. (2022) “Education during the COVID-19 pandemic: access, inclusion and psychosocial support” Studies and Perspectives series-ECLAC Subregional Headquarters for the Caribbean, No. 104 (LC/TS.2021/211-LC/CAR/TS.2021/6), Santiago, Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC). https://www.cepal.org/sites/default/files/events/files/series_104_lcarts2021_6_education_during_the_covid-19_pandemic_0.pdf

McLure, A., & Glass, K. (2020). Some simple rules for estimating reproduction numbers in the presence of reservoir exposure or imported cases. *Theoretical Population Biology*, 134, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.tpb.2020.04.002>

Meadows, D. H., & Wright, D. (2022). Thinking in Systems. Earthscan Ltd. ISBN: 978-1-84407-726-7

Menon, A., Rajendran, N. K., Chandrachud, A., & Setlur, G. (2020). Modelling and simulation of COVID-19 propagation in a large population with specific reference to India. <https://doi.org/10.1101/2020.04.30.20086306>

Michielsens, H., de Laet, I., van Bastelaere, J., Huygh, J., Bervoets, K., & van Regenmortel, N. (2022). A retrospective evaluation of three ethical triage tools for the allocation of ICU resources during the first wave of the COVID-19 pandemic. *Journal of Critical Care*, 67, 200–206. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2021.09.022>

MPSV. (2021, December). *Poslanci schválili krizové ošetřovné ve výši 80 procent. Rodiče ho budou moci čerpat například při uzavření škol.* https://www.mpsv.cz/documents/20142/2061970/01_12_2021_TZ+_Krizove_osetrovne.pdf/64ab638f-2269-badd-e3ac-62465e1cff45

MVČR. (2020, November). Pravidla vstupu do České republiky platná od 9. listopadu 2020. Retrieved August 2, 2022, from <https://www.mvcr.cz/clanek/pravidla-vstupu-do-ceske-republiky-platna-od-9-listopadu-2020.aspx>

MZČR. (2021, January). Stručný Návod pro Výpočet Indexu Rizika, Verze 2. Retrieved August 2, 2022, from 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

MZČR. (2022a). COVID-19: Kumulativní přehledy | Onemocnění Aktuálně MZČR. Retrieved August 1, 2022, from <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/covid-19/kumulativni-prehledy>

MZČR. (2022b). COVID-19 | Onemocnění Aktuálně. Retrieved August 1, 2022, from <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/covid-19>

MZČR. (2022c). COVID-19: Přehled vykázaných očkování v ČR. Retrieved August 1, 2022, from <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/vakcinace-cr>

MZČR. (2022d). Protiepidemický systém ČR. <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/pes>

MZV. (2021, October 8). Pravidla Návratu Do ČR. Retrieved August 2, 2022, from https://www.mzv.cz/jnp/cz/cestujeme/aktualni_doporuceni_a_varovani/nova_pravidla_navratu_do_cr_od_9_7_2021a.html

Novinky.cz. (2020, October 29). Něco Muselo Zabrát. Reprodukční Číslo Kleslo Na 1,1. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.novinky.cz/domaci/clanek/neco-muselo-zabrat-reprodukcni-cislo-kleslo-na-11-40340665>

Novinky.cz. (2021, November 18). Očkování: Jak Je Na Tom ČR? Podíly Hospitalizovaných a Vývoj ve Světě. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.novinky.cz/koronavirus/clanek/ockovani-proti-covid-19-v-cr-a-ve-svete-40347810>

Parolini, N., Dede', L., Ardenghi, G., & Quarteroni, A. (2022). Modelling the COVID-19 epidemic and the vaccination campaign in Italy by the SUIHTER model. *Infectious Disease Modelling*, 7(2), 45–63. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2022.03.002>

Pedagogická komora. (2022, March 12). Průměrné Počty Děti a Žáků ve Třídách (2021/2022). Retrieved August 2, 2022, from <https://www.pedagogicka-komora.cz/2022/03/msmt-prumerne-pocty-deti-zaku-ve.html>

Podolski, P., & Nguyen, H. S. (2021). Cellular Automata in Covid-19 prediction. *Procedia Computer Science*, 192, 3370–3379. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.110>

Public Health England. (2021, January 14). GOV.UK. Past COVID-19 Infection Provides Some Immunity but People May Still Carry and Transmit Virus. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.gov.uk/government/news/past-covid-19-infection-provides-some-immunity-but-people-may-still-carry-and-transmit-virus>

R. Sameni, Mathematical Modeling of Epidemic Diseases; A Case Study of the COVID-19 Coronavirus, Cornell University, 2020, Ch. Quantitative Biology, pp. 1–17. URL arXiv:2003.11371 [q-bio.PE]. <https://arxiv.org/pdf/2003.11371.pdf>

Ramage, M., & Shipp, K. (2009). Systems Thinkers (2009th ed.). Springer. ISBN: 978-1-84882-525-3

Ross, R. (1916). An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry.—Part I. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 92(638), 204–230. <https://doi.org/10.1098/rspa.1916.0007>

Ross, R., & Hudson, H. P. (1917a). An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry.—Part II. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 93(650), 212–225. <https://doi.org/10.1098/rspa.1917.0014>

Ross, R., & Hudson, H. P. (1917b). An application of the theory of probabilities to the study of a priori pathometry.—Part III. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 93(650), 225–240. <https://doi.org/10.1098/rspa.1917.0015>

Seznam Zprávy. (2021a, February 2). Jaký Je Vývoj Reprodukčního Čísla R. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/reprodukzni-cislo-r-145111>

Seznam Zprávy. (2021b, October 24). Jak Dlouho Trvá Karanténa a Jak Se Liší Od Izolace. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/karantena-info-131501>

Schlickeiser, R., & Kröger, M. (2021). Analytical Modeling of the Temporal Evolution of Epidemics Outbreaks Accounting for Vaccinations. *Physics*, 3(2), 386–426. <https://doi.org/10.3390/physics3020028>

STEM. (2021, March 11). Dodržování a hodnocení protipandemických opatření a důvěra ve schopnost vlády zvládat pandemii covid-19 | Stem.cz. Retrieved August 3, 2022, from <https://www.stem.cz/dodrzovani-a-hodnoceni-protipandemickych-opatreni-a-duvera-ve-schopnost-vlady-zvladat-pandemii-covid-19/>

Sun, J., He, W. T., Wang, L., Lai, A., Ji, X., Zhai, X., Li, G., Suchard, M. A., Tian, J., Zhou, J., Veit, M., & Su, S. (2020). COVID-19: Epidemiology, Evolution, and Cross-

Disciplinary Perspectives. *Trends in Molecular Medicine*, 26(5), 483–495.
<https://doi.org/10.1016/j.molmed.2020.02.008>

System Dynamics Society. (2020, October 29). *System Dynamics Society*. Core Software. Retrieved August 3, 2022, from <https://systemdynamics.org/tools/core-software/>

Tollefson, J. (2021, January 15). Nature. Nature. Retrieved August 5, 2022, from https://www.nature.com/articles/d41586-021-00090-3?error=cookies_not_supported&code=91b693f8-23dd-46bc-8df7-d44c2212e328#:~:text=After%20rising%20steadily%20for%20decades,on%20daily%20fuel%20emissions.

United Nations. (2022, January 17). COVID-19 Pandemic Stalls Global Economic Recovery: UN Report. Retrieved August 5, 2022, from <https://news.un.org/en/story/2022/01/1109702>

UNWTO. (2022). Impact Assessment of the COVID-19 Outbreak on International Tourism. Retrieved August 12, 2022, from <https://www.unwto.org/impact-assessment-of-the-covid-19-outbreak-on-international-tourism>

ÚZIS. (2021, January). Matice Opatření PES. Retrieved August 2, 2022, from <https://share.uzis.cz/s/tRiJL53BLWQjCGC>

Wang, J. (2012). Analysis of an SEIS Epidemic Model with a Changing Delitescence. *Abstract and Applied Analysis*, 2012, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2012/318150>

Weiss, T. (2022, January 6). MFČR. Plnění státního rozpočtu ČR za prosinec 2021. Retrieved August 1, 2022, from <https://www.mfcr.cz/cs/aktualne/tiskove-zpravy/2022/pokladni-plneni-sr-44160>

World Health Organization. (2021, May 13). Coronavirus Disease (COVID-19). Retrieved August 3, 2020, from <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/question-and-answers-hub/q-a-detail/coronavirus-disease-covid-19>

World Health Organization. (2022a). COVID-19 Overview. Retrieved August 12, 2022, from <https://covid19.who.int/>

World Health Organization. (2022b). Emergency Cycle. Retrieved August 3, 2022, from <https://www.who.int/europe/emergencies/emergency-cycle>

World Health Organization. (2022c, June 17). The Impact of COVID-19 on Mental Health Cannot Be Made Light Of. Retrieved August 12, 2022, from <https://www.who.int/news->

[room/feature-stories/detail/the-impact-of-covid-19-on-mental-health-cannot-be-made-light-of#:~:text=Plenty%20of%20us%20became%20more,anxiety%20or%20post%2Dtraumatic%20stress](#)

Zhang, S., Diao, M., Yu, W., Pei, L., Lin, Z., & Chen, D. (2020). Estimation of the reproductive number of novel coronavirus (COVID-19) and the probable outbreak size on the Diamond Princess cruise ship: A data-driven analysis. *International Journal of Infectious Diseases*, 93, 201–204. <https://doi.org/10.1016/j.ijid.2020.02.033>

Zhang, X., Ma, R., & Wang, L. (2020). Predicting turning point, duration and attack rate of COVID-19 outbreaks in major Western countries. *Chaos, Solitons & Fractals*, 135, 109829. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109829>

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

Studijní program: Informační management
Forma studia: Prezenční
Specializace/kombinace: Informační management (im3-p)

Podklad pro zadání BAKALÁŘSKÉ práce studenta

Jméno a příjmení: Alžběta Dočekalová
Osobní číslo: I1900573
Adresa: Na Rybárně 1532 1532/20, Hradec Králové, 50002 Hradec Králové 2, Česká republika
Téma práce: Modelování a simulace vybraných problémů epidemiologických situací
Téma práce anglicky: Modelling and simulation of particular problems related to epidemiological situations
Vedoucí práce: prof. Ing. Vladimír Bureš, Ph.D., MBA
Katedra informačních technologií

Zásady pro vypracování:

Popis současných přístupů k tvorbě a simulaci epidemiologických problémů. Vytvoření vlastního modelu systémové dynamiky zaměřeného na vybrané téma.
Cíl: Seznámit se s problematikou vybraných epidemiologických situací, vytvořit příslušné modely a vyhodnotit účinnost vybraných scénářů vývoje.

Osnova:

1. Úvod, stanovení problému
2. Shrnutí literatury
3. Epidemiologický model
4. Testování scénářů
5. Závěry a doporučení

Seznam doporučené literatury:

Dle domluvy s vyučujícím.

Arun Kumar, P. M. et al. (2021). Time-series forecasting and analysis of COVID-19 outbreak in highly populated countries: A data-driven approach, International Journal of E-Health and Medical Communications 13(2), 17

Podpis studenta:



Datum:

19.08.2022

Podpis vedoucího práce:

Datum: