

Česká zemědělská univerzita v Praze

Provozně ekonomická fakulta

Katedra systémového inženýrství



Bakalářská práce

Epidemiologický model SIR - SARS-CoV-2 v České republice

Jiří Brejcha

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jiří Brejcha

Informatika

Název práce

Epidemiologický model SIR – SARS-CoV-2 v České republice

Název anglicky

SIR epidemic model – SARS-CoV-2 in Czechia

Cíle práce

Cílem práce je sestavit epidemiologický model SIR. Za pomoci nástrojů systémové dynamiky vytvořit v programu Vensim model, který bude simulovat průběh coronavirové pandemie v České republice. Simulované chování bude kopírovat průběh epidemie v České republice a umožní identifikaci míst pro dosažení pákového efektu.

Metodika

- Studium odborné literatury z oblasti systémové dynamiky
- Sběr a analýza dat
- Vytvoření smyčkového diagramu
- Vytvoření diagramu stavů a toků
- Simulace scénářů
- Vyhodnocení efektivnosti opatření
- Citlivostní analýza a identifikace míst pro dosažení pákového efektu
- Diskuze

Doporučený rozsah práce

30-40 stran

Klíčová slova

Systémová dynamika, počítačová simulace, SIR, SEIR, zpětnovazební smyčka, epidemiologický model

Doporučené zdroje informací

BRAUER, F., VAN DEN DRIESSCHE, P., WU, J., a ALLEN, L. J. S., *Mathematical epidemiology*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-78911-6

KREJČÍ, I. – KVASNIČKA, R. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. PROVOZNĚ EKONOMICKÁ FAKULTA. *Systémová dynamika I*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2014. ISBN 9788021324787.

MEADOWS, D H. – WRIGHT, D. *Thinking in systems : a primer*. White River Junction, Vt.: Chelsea Green Pub., 2008. ISBN 978-1-60358-055-7.

RAHMANDAD, H., LIM, T. Y., STERMAN, J. Behavioral dynamics of COVID-19: estimating underreporting, multiple waves, and adherence fatigue across 92 nations, *System Dynamics Review*, Vol. 37, No. 1, pp. 5-31. <https://doi.org/10.1002/sdr.1673>

ŠUSTA. M. *Průvodce systémovým myšlením*. Praha: Proverbs, 2016. ISBN 9788026076025

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – PEF

Vedoucí práce

doc. Ing. Igor Krejčí, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra systémového inženýrství

Elektronicky schváleno dne 16. 11. 2022

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 11. 2022

doc. Ing. Tomáš Šubrt, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 27. 01. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci " Epidemiologický model SIR - SARS-CoV-2 v České republice" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 15.3.2022

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Igoru Krejčímu, Ph.D. za všechnu pomoc, kterou mi při psaní práce poskytl. Při konzultacích mi dokázal vždy skvěle a rychle poradit. Projevil velikou dávku trpělivosti a jeho ochota byla bezesporu nadstandartní.

Epidemiologický model SIR - SARS-CoV-2 v České republice

Abstrakt

Tématem bakalářské práce je použití systémové dynamiky pro vytvoření funkčního epidemiologického modelu pandemie SARS-CoV-2 v České republice. V teoretické části se práce zabývá vznikem a vývojem systémového myšlení. Jsou v ní vysvětleny i základy epidemiologie a kompartmentových modelů. Především modelu SIR a jeho variant.

V praktické části práce je popsána konstrukce základní struktury smyčkového diagramu. Z jehož základů vychází posléze vytvořený diagram stavů a toků. Diagramy jsou konstruovány v programu Vensim. Ve kterém jsou i prováděny následné simulace. Podkladem pro model jsou data zveřejněná Ministerstvem zdravotnictví České republiky. Po kalibraci modelu a jeho následné validaci budou simulovány alternativní scénáře za účelem nalezení, co nejefektivnějšího balíku opatření pro jednotlivé vlny epidemie.

Klíčová slova: Systémová dynamika, počítačová simulace, SIR, SEIR, zpětnovazební smyčka, epidemiologický model, diagram stavů a toků, příčinně smyčkový diagram

SIR epidemic model - SARS-CoV-2 in Czechia

Abstract

The topic of the bachelor thesis is the use of system dynamics to create a functional epidemiological model of the SARS-CoV-2 pandemic in the Czech Republic. The theoretical part of the thesis deals with the origin and development of systems thinking. It also explains the basics of epidemiology and compartmental models. Especially the SIR model and its variants.

The practical part of the thesis describes the construction of the basic structure of the loop diagram. From the foundations of which the subsequently created state and flow diagram is based. The diagrams are constructed in the Vensim program. In which the subsequent simulations are performed. The basis for the model is data published by the Ministry of Health of the Czech Republic. After calibration of the model and its subsequent validation, alternative scenarios will be simulated in order to find the most effective package of restrictions for each wave of the epidemic.

Keywords: System dynamics, computer simulation, SIR, SEIR, feedback loop, epidemiological model, stock and flow diagram, causal loop diagram

Obsah

1 Úvod.....	11
2 Cíl práce a metodika	12
2.1 Cíl práce	12
2.2 Metodika	12
3 Teoretická východiska	14
3.1 Systémová dynamika – teorie	14
3.2 Příčinně smyčkový diagram	15
3.2.1 Kladná zpětnovazební smyčka.....	16
3.2.2 Balanční zpětnovazební smyčka	17
3.3 Diagram stavů a toků	18
3.3.1 Pravidla zápisu	18
3.3.2 Výpočty v SFD	19
3.4 Kompartmentové modely v epidemiologii.....	20
3.5 SIR model.....	21
3.6 Kolektivní imunita	23
3.7 Pandemie Covid-19	25
3.8 Varianty opatření.....	25
3.8.1 Průběh bez opatření	26
3.8.2 Jeden lockdown.....	27
3.8.3 Střední lockdown a chytrá karanténa	27
3.8.4 Dva oddělené lockdowny	27
3.8.5 Porovnání počtu úmrtí	28
3.9 Koeficient determinace	30
4 Vlastní práce.....	31
4.1 Podklady pro model	31
4.1.1 Sběr dat pro dosažení do modelu.....	31
4.1.2 Sběr dat pro kalibraci modelu.....	32
4.2 Tvorba modelu	33
4.2.1 Příčinně smyčkový diagram.....	33
4.2.2 Nastavení modelu	42
4.3 Diagram stavů a toků	43
4.4 Kalibrace modelu	49
4.5 Alternativní varianta.....	51

5	Výsledky a diskuse	52
6	Závěr.....	57
7	Seznam použitých zdrojů	58
8	Seznam obrázků a grafů.....	60
8.1	Seznam obrázků	60
8.2	Seznam grafů.....	61

1 Úvod

Systemová dynamika je vědní disciplína, patřící mezi systémové vědy. Zkoumá chování a vývoj komplexních systémů v čase. Systém je vyčlenění určité části světa, která je vnitřně propojená prvky a vazbami. Dynamika přidává do tohoto systému ještě čas. Snaží se přijít na tendence, závislosti, vazby a vzorce chování mezi jednotlivými veličinami systému. Cílem tohoto hledání je vytvoření efektivních politik, kterými je možné systém ovlivnit. Systemovou dynamiku lze aplikovat na jakýkoli dostatečně složitý problém. Nabízí objektivnější pohled na sledované systémy. V teoretické části jsou popsány dva stěžejní nástroje systémové dynamiky, konkrétně příčinně smyčkový diagram a diagram stavů a toků.

Kompartmentové modely jsou hojně využívány při modelování infekčních chorob. Kompartmenty označují stavy, mezi nimiž se jedinci v čase pohybují. Pořadí stavů je poté vzorem pro pohyb mezi oddíly. Náchylný jedinec se nakazí a následně se uzdraví. V teoretické části jsou kompartmentové modely a jejich využití v epidemiologii prozkoumány podrobněji. V praktické části je následně sestaven epidemiologický model, který bude upraven tak, aby co nejlépe odpovídal skutečnému průběhu epidemie Covid-19 v České republice. Po následné kalibraci modelu a jeho zpětné kontrole vůči skutečným datům budou opatření zavedená v tomto modelu optimalizována ve snaze zjistit, zda bylo možné epidemii zvládnout lépe.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem práce je za pomoci nástrojů systémové dynamiky sestavit funkční epidemiologický model SIR, který bude schopný kopírovat skutečný průběh koronavirové pandemie v České republice. Na základě tohoto modelu bude následně provedena simulace alternativních scénářů s cílem identifikovat místa pro dosažení pákového efektu a následné vytvoření nejlepšího možného balíku opatření.

2.2 Metodika

Práce bude zahájena studiem odborné literatury. Důraz bude kladen především na literaturu zaměřenou na systémovou dynamiku a epidemiologii. V odvětví epidemiologie bude zastoupena jak literatura zaměřená přímo na pandemii Covidu-19, tak i díla zabývající se obecným šířením nemocí. Mezi přední zdroje v odvětví systémové dynamiky patří Stermanova kniha *Business Dynamics*, zatímco v oboru epidemiologie zastává tuto roli *Mathematical Epidemiology* od Freda Brauera, Pauliny von Driessche a Jianhong Wu.

Po nastudování odborné literatury bude za pomoci příčinně smyčkového diagramu vytvořen mentální model. Tento model bude popisovat hlavní prvky epidemie a vazby mezi nimi, tak jak jsou vnímány autorem.

Po vytvoření příčinně smyčkového diagramu proběhne sběr dat potřebných k vytvoření diagramu stavů a toků. Důležitá bude volba vhodného časového úseku a zdrojů dat. Důvěryhodnost zdrojů a validita dat jsou významnými parametry, které se při sběru nesmí opomenout.

Následně bude na základě příčinně smyčkového diagramu vytvořen diagram stavů a toků. Pro vazby, které nebude možné zanechat v jejich původní podobě, bude nutné nalézt vhodné číselně ohodnotitelné alternativy.

Za pomoci nástrojů programu Vensim bude provedena kalibrace. Cílem tohoto kroku je nastavit model tak, aby jeho chování odpovídalo skutečnému průběhu pandemie v České republice. Výsledky budou testovány za pomoci metod převzatých ze statistiky.

Po dosažení uspokojivých výsledků bude následovat úprava scénářů, která by měla vést k nalezení efektivnějšího balíčku opatření. Alternativní scénáře budou vytvořeny na základě poznatků získaných v teoretické části práce. Jejich výsledky budou následně zhodnoceny.

3 Teoretická východiska

3.1 Systémová dynamika – teorie

Systémová dynamika je vědní obor zabývající se komplexními systémy. Za otce systémové dynamiky je považován Jay W. Forrester. Mezi další významné osobnosti, které se na rozvoji tohoto oboru podíleli, patří například Donella Meadowsová nebo John Sterman (System dynamics society, 2022).

John Sterman (2000, s. 7) definuje systémovou dynamiku jako *"metodiku a techniku matematického modelování pro formulování, pochopení a diskusi o složitých otázkách a problémech"*.

V systémové dynamice se na systém pohlíží jako na soubor vzájemně propojených prvků, které se v čase vzájemně ovlivňují prostřednictvím zpětnovazebních smyček, které mohou buď zesilovat, nebo tlumit působení jednotlivých prvků. Cílem systémové dynamiky je pochopit, jak tyto zpětnovazební smyčky fungují a jak ovlivňují chování systému jako celku (Sterman, 2000).

Donella Meadowsová v knize Thinking in Systems (2008, s. 11) definuje systém jako *„vzájemně propojenou množinu prvků, která je souvisle uspořádána tak, aby něčeho dosáhla“*.

Systémová dynamika může být mocným nástrojem pro zkoumání složitých systémů, pochopení dynamického chování těchto systémů v čase a vypracování politik a strategií pro jejich efektivní řízení a kontrolu (Meadows, 2008).

3.2 Příčinně smyčkový diagram

Zpětná vazba je jedním ze základních konceptů systémové dynamiky. Přesto naše mentální modely často nezahrnují kritické zpětné vazby, které určují dynamiku našich systémů. V systémové dynamice se používá několik diagramových nástrojů, pomocí nichž lze zachytit strukturu systémů. Tato kapitola se věnuje diagramům kauzálních smyček a obsahuje hlavní zásady a doporučení k jejich tvorbě (Sterman, 2000).

Diagramy příčinných smyček (CLD) jsou důležitým nástrojem pro znázornění zpětné vazby v systémech. CLD umožňují rychlé zachycení hypotéz o příčinách dynamiky v systému. Jsou vynikajícím nástrojem pro zachycení mentálních modelů jednotlivců (Sterman, 2000).

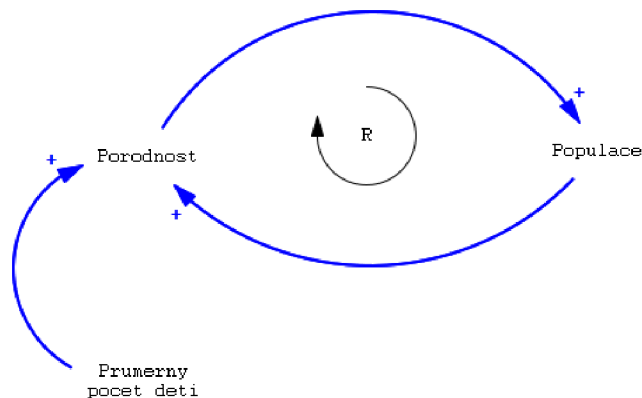
Příčinný diagram se skládá z proměnných spojených šipkami označujícími příčinné vlivy mezi proměnnými. Důležité zpětnovazební smyčky by měly být v diagramu zvýrazněny. Proměnné jsou propojeny příčinnými vazbami, které jsou znázorněny šipkami. Každé šipce je přiřazena buď kladná (+) nebo záporná (-) polarita, která označuje, zda je příčinná souvislost pozitivní nebo negativní (Krejčí a Kvasnička, 2014).

Významné smyčky mají vlastní identifikátor, který ukazuje, zda se jedná o pozitivní (sebepevňující) nebo negativní (balanční) zpětnou vazbu. Identifikátor smyčky obíhá stejným směrem jako smyčka, kterou popisuje (Sterman, 2000).

3.2.1 Kladná zpětnovazební smyčka

Kladná zpětnovazební smyčka se pozná podle počtu záporných vazeb, které se uvnitř smyčky nachází. Pokud se ve smyčce nachází sudý počet záporných vazeb, nebo se v ní nenachází žádná, jedná se o kladnou, sebe-posilující zpětnovazební smyčku. Chování sebeposilující zpětnovazební smyčky v čase odpovídá exponenciálnímu růstu (Krejčí a Kvasnička, 2014).

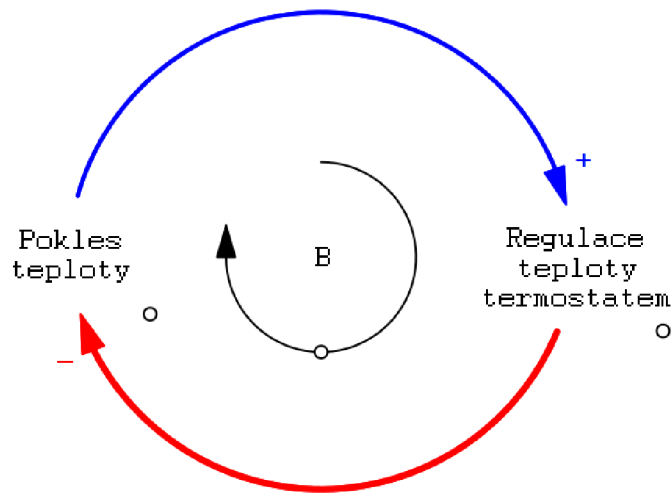
Kladná vazba znamená, že pokud se zvýší příčina, tak se i účinek zvýší nad hodnotu, kterou by jinak měl, a pokud se příčina sníží, účinek se pod tuto hodnotu naopak sníží. V příkladu na obrázku vyústí zvýšení průměrného počtu dětí ve zvýšení porodnosti. Takže porodnost se zvýší nad úroveň, kterou by měla, pokud by se průměrný počet dětí ne zvýšil. Je-li příčinou míra toku, která se kumuluje, pak také platí, že příčina se do zásoby přidává (Sterman, 2000).



Obrázek 1: Sebe posilující zpětnovazební smyčka (Zdroj: autor)

3.2.2 Balanční zpětnovazební smyčka

Tento druh smyčky se vyznačuje lichým počtem záporných vazeb uvnitř smyčky. Chováním balanční zpětnovazební smyčky se může vykazovat například termostat regulující teplotu uvnitř místnosti. Pokud teplota klesne pod požadovanou úroveň, zapne termostat topení, s jehož pomocí teplotu vyrovná zpět. Dalším příkladem může být pocit hladu; když máme hlad, naše tělo vyšle signál do mozku, že je čas jíst. Konzumace jídla hlad utiší. Balanční smyčky se tedy snaží vyrovnávat změnu v jednom směru změnou ve směru opačném. Vyrovnávací procesy udržují věci v požadovaném stavu (Lannon, 2018).



Obrázek 2: **Balanční zpětnovazební smyčka** (Zdroj: autor)

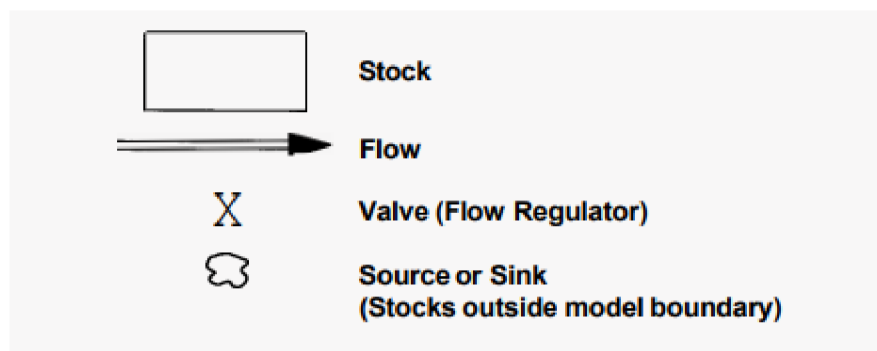
3.3 Diagram stavů a toků

Diagram stavů a toků (SFD) je dalším důležitým nástrojem systémové dynamiky. Na rozdíl od příčinně smyčkového diagramu je SFD schopný zaznamenávat hodnoty stavů a toků. Stav, toky a zpětné vazby jsou základními koncepty systémové dynamiky (Sterman, 2000).

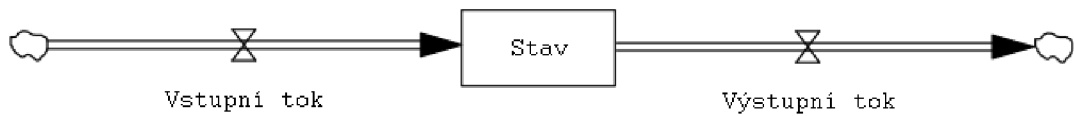
Meadowsová (2008, s. 17-18) ve své knize říká, že „*Základem každého systému je stav. Stav jsou prvky systému, které můžete v daném okamžiku vidět, nahmatat, spočítat nebo změřit. [...] Může to být voda ve vaně, populace, knihy v knihkupectví, dřevo ve stromě, peníze v bance, vaše vlastní sebevědomí. Stav nemusí být jen fyzický. Vaše zásoba dobré vůle pro druhé nebo zásoba naděje, že svět může být lepší, jsou také stavy.*”

3.3.1 Pravidla zápisu

Od příčinně smyčkového diagramu se diagram stavů a toků liší tím, že navíc obsahuje stavové a tokové proměnné. Pro zápis těchto proměnných se používají značky zobrazené na obrázku (3). Stavové proměnné jsou označeny obdélníkem, toky zdvojenou šipkou, kohoutky znaménkem X a mraky označují stavové proměnné, které se nacházejí mimo hranice modelovaného systému (Krejčí a Kvasnička, 2014).



Obrázek 3: **Symbole stavů a toků** (Zdroj: Sterman, 2000, s. 193)



Obrázek 4: **Příklad diagramu stavů a toků** (Zdroj: autor)

3.3.2 Výpočty v SFD

Přestože se diagram stavů a toků může zdát jako jednoduchý nákres, skrývá se v něm ve skutečnosti soustava obyčejných diferenciálních rovnic. Diagram na obrázku (4) lze popsat několika způsoby. V rovnici (1) je zapsán pomocí integrálu a v rovnici (2) diferenciální rovnicí, kde platí, že t_0 je počáteční čas a t je čas aktuální. Proměnná s vyjadřuje časový krok (Sterman, 2000; Krejčí a Kvasnička, 2014).

$$Stav(t) = \int_{t_0}^t [Vstupní\ tok(s) - Výstupní\ tok(s)] ds + Stav(t_0) \quad (1)$$

$$\frac{d(Stav)}{dt} = Vstupní\ tok(t) - Výstupní\ tok(t) \quad (2)$$

Forrester (1961) uvádí, že diferenciální rovnice jsou vhodnější pro popis chování ekonomických systémů než algebraické rovnice, které jsou často používané v ekonomii. Zpoždění, hybnost, elasticita, zásoby a zrychlení jsou veličiny, které diferenciální rovnice popisují nejlépe. Z jakéhokoli systému integrálních nebo diferenciálních rovnic lze zkonstruovat odpovídající diagram stavů a toků. Stejně tak i opačně je možné z jakéhokoli libovolného diagramu stavů a toků vytvořit odpovídající soustavu integrálních nebo diferenciálních rovnic.

Diagramy stavů a toků jsou tvořeny soustavami obyčejných diferenciálních rovnic. Mezi metody používané k jejich výpočtu patří Eulerova metoda a metoda Runge-Kutta. Eulerova metoda je jednodušší, avšak není natolik přesná. Jejím předpokladem je, že hodnota toku zůstává po zvolený časový krok stejná. Až v čase t je k ní naráz přičten rozdíl vstupního

a výstupního toku ve stejném čase. Metoda Runge-Kutta dopočítává i hodnoty uvnitř časového kroku na základě Taylorova rozvoje a rekurentního vzorce (Krejčí a Kvasnička, 2014).

3.4 Kompartmentové modely v epidemiologii

Kompartmentové modely jsou hojně využívány při modelování infekčních chorob. Kompartmenty jsou skupiny, které obsahují určité množství lidí v určitém stavu. Modely mohou být použity jak pro náhlé výskyty chorob, tak i pro endemické situace. Lze je různě modifikovat. O tom, jakým způsobem bude model upravován, rozhoduje do jisté míry také nemoc, pro kterou je tvořen. Nemoci přenášené virovými částicemi, jako jsou například influenza, spalničky, plané neštovice a další, zpravidla poskytují nakaženému po vyléčení imunitu vůči reinfekci. V modelu může být zachycen i přirozený příbytek a úbytek obyvatelstva. V těchto modelech je možné narazit na endemické ekvilibrium. V tomto stavu choroba nikdy zcela nezmizí. Příkladem endemických výskytů choroby mohou být například cholera, spalničky, malárie, influenza a další. Většina těchto chorob je v západním světě považována za vymýcenou a vyskytuje se pouze v chudých zemích Jižní Ameriky, Asie a Afriky (Brauer, Driessche a Wu, 2008).

V modelu SIR jsou tyto stavy následující: $S = Susceptible = náchylný$, $I = Infectious = infekční$, $R = Recovered = uzdravený$. Poslední stav R může být i $Removed = odstraněný$ nebo $Resistant = rezistentní$. V čase se lidé mezi těmito stavy pohybují. Pořadí oddílů je vzorem pro pohyb mezi oddíly. Náchylný člověk se nakazí a následně se uzdraví (Brauer, Driessche a Wu, 2008).

Modely jsou nejčastěji provozovány s diferenciálními rovnicemi (které jsou deterministické), ale mohou být také použity se stochastickým (náhodným) rámcem, který je realističtější, ale mnohem složitější na analýzu (Rahmandad, Lim a Sterman, 2021).

Modely se snaží předvídat věci, jako šíření nemoci, celkový počet infikovaných nebo trvání epidemie, a odhadovat různé epidemiologické parametry, například reprodukční číslo. Takové modely mohou ukázat, jak mohou různé intervence v oblasti veřejného zdraví ovlivnit výsledek epidemie, například jaká je nejučinnější technika pro vydávání omezeného počtu vakcín v dané populaci (Brauer, Driessche a Wu, 2008).

Přítomnost viru SARS-CoV-2 byla poprvé zjištěna v Číně 17. listopadu 2019. Během následujících měsíců vypukla v Číně epidemie. Do března roku 2020 se virus rozšířil do velké

části světa a Covid-19 byl Světovou zdravotnickou organizací prohlášen za pandemii. V České republice byly první případy odhaleny 1. března 2020 (Hu, Guo, Zhou a Shi, 2020).

Již na začátku pandemie vznikly první matematické modely, kterými byla odhadnuta základní reprodukční čísla R_0 a R_e . Rozdíl mezi těmito čísly je následovný. Nula v čísle R_0 znamená, že odhad počítá s nulovou imunitou v populaci. Toto číslo se obvykle počítá jako $R_0 = \frac{\beta S}{\gamma}$, kde β je rychlost přenosu, S je počet náchylných na počátku pandemie a γ je rychlost vyléčení. Pokud tedy nastane epidemie zcela nového viru, tak platí, že čím dříve budou provedena měření, tím více se výsledná hodnota bude blížit skutečné hodnotě R_0 (Aronson, Brassey a Mahtani, 2020).

K přesným výpočtům jsou potřeba kvalitní data. Ty ovšem není snadné získat, a proto se během probíhající epidemie používá číslo R_e , efektivní reprodukční číslo. Efektivní reprodukční číslo odpovídá množství lidí v populaci, kteří jsou v daný moment náchylní k nakažení se. Mění se v závislosti na růstu imunity v populaci. Imunitu populace získává očkováním, nebo proděláním nemoci. R_e se také mění podle počtu úmrtí. Do efektivního reprodukčního čísla se dále promítají epidemiologická opatření. Číslo je nepřímo úměrné rychlosti průběhu nemoci. Čím rychleji se lidé z nemoci vyléčí, nebo zemřou, tím nižší je číslo R_e (Achaiah, Subbarajasetty a Shetty, 2020).

Již během prvních měsíců pandemie byly formulovány matematické modely, které byly použity k proložení epidemické křivky pro odhad základního reprodukčního čísla R_0 . Z dostupných dat lze vyčíst, že toto číslo bylo v počátcích pandemie přibližně na úrovni 2,5 (Yang, Lombardi Junior a Yang, 2020).

3.5 SIR model

V této kapitole je analyzován nejzákladnější model přenosu přímo přenášené infekční choroby způsobené bakteriemi, viry nebo plísněmi. K přímému přenosu dochází prostřednictvím kontaktu mezi jednotlivci: prostřednictvím kýchnutí nebo zakašlání, kontaktem kůže s kůží nebo výměnou tělesných tekutin, které se dostanou do kontaktu s člověkem. Model SIR byl vyvinut na počátku dvacátého století. Autory tohoto modelu jsou Ronald Ross a Hilda Phoebe Hudsonová. Na jejich práci později navázali Anderson Gray McKendrick a William Ogilvy Kermack se svou Kermack-McKendrickovou hypotézou (Weiss, 2013).

SIR model se skládá ze soustavy tří nelineárních diferenciálních rovnic, která nemá konkrétní výsledek. Nicméně jednoduché nástroje z kalkulu umožňují získat mnoho informací o řešeních. V kapitole je ukázáno, jak tento jednoduchý model pomáhá položit teoretický základ pro intervence v oblasti veřejného zdraví. Model přenosu nemoci SIR je založen na několika silných předpokladech (Shapiro a Delgado-Eckert, 2012).

Autoři (Weiss, 2013) tento základní model rozšiřují v mnoha směrech zmírněním některých předpokladů. Model začíná s populací, která se může skládat z lidí, zvířat, nebo rostlin. Populace je rozdělena do tří skupin nebo oddílů: ohrožení jedinci, infikovaní jedince a odstranění jedinci. Tyto skupiny jsou označeny $S(t)$, $I(t)$ a $R(t)$.

V pozadí modelu je mnoho předpokladů, včetně velké a uzavřené populace, vypuknutí epidemie a jejího rozšíření. V populaci nedochází k přirozeným porodům ani k přirozeným úmrtím. Jedinec se stává infekčním, jakmile se nakazí, zotavení z infekce poskytuje celoživotní imunitu a hromadné působení míchání jedinců. Hromadné míchání předpokládá, že míra setkávání mezi vnímavými a nakaženými jedinci je úměrná součinu obou hodnot. Zdvojnásobení velikosti obou populací má za následek dvojnásobný počet nových infekcí za jednotku času. To vyžaduje, aby vnímaví i nakažení členové byli v prostoru rovnoměrně rozmístěni. Prakticky vzato se každý člověk setká s každou další osobou za jednotku času se stejnou pravděpodobností (Weiss, 2013).

Je nutné mít na paměti, že model SIR je deterministický a neexistují v něm žádné pravděpodobnosti. Je předpoklad míchání při hromadném působení rozumný? Většina lidí má kontakty pouze s malou částí jedinců ve svém společenství a mezi nejčastější kontakty patří kontakty s rodinnými příslušníky, sousedy a spolužáky. Děti mají obvykle mnohem více kontaktů než senioři. Pragmatický názor je, že by se mělo začít modelovat s nejjednodušším modelem, a až v případě potřeby přidávat další složitosti (Shapiro a Delgado-Eckert, 2012).

Dalším krokem může být použití více tříd vnímavých a nakažených jedinců a předpokládat dobré promíchávání mezi těmito podtřídami s různou mírou. Hypotéza wellmixing znamená, že pravděpodobnost kontaktu jedince s každým jiným jedincem je stejná a pravděpodobnost přenosu je také stejná. Díky ní je možné použít obyčejné diferenciální rovnice namísto parciálních diferenciálních rovnic nebo modelů založených na agentech, které mohou být podstatně náročnější na parametrizaci, simulaci a analýzu (Shapiro a Delgado-Eckert, 2012).

Model SIR je tvořen následující soustavou kvadratických diferenciálních rovnic,

$$\frac{dS}{dt} = -\beta S I \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta S I - \nu I \quad (2)$$

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

kde míra přenosu nemoci $\beta > 0$ a míra uzdravení $\nu > 0$ (jinými slovy doba trvání infekce $D = 1/\nu$). Člen výskytu $\beta S I$ pro počet nově nakažených jedinců za jednotku času odpovídá homogennímu míšení nakažených a nenakažených jedinců. Celková velikost populace by měla zůstat konstantní, což vyplývá z předpokladů modelu SIR. Celková velikost populace je označena jako N , takže $R(t) = N - S(t) - I(t)$. Předpokladem je, že každý nakažený jedinec má κ kontaktů za jednotku času a κ nezávisí na velikosti populace. Pak $\kappa S/N$ těchto kontaktů je s náchylnými jedinci. Parametr τ je podíl úspěšných kontaktů, které vedly k přenosu nákazy. Pak platí, že každý infikovaný jedinec nakazí $\kappa \tau S/N$ vnímavých jedinců za jednotku času. Tedy $\beta = b/N$, kde $b = \kappa \tau$. Parametr τ se nazývá přenositelnost infekčního onemocnění (Weiss, 2013; Yang, Lombardi Junior a Yang, 2020).

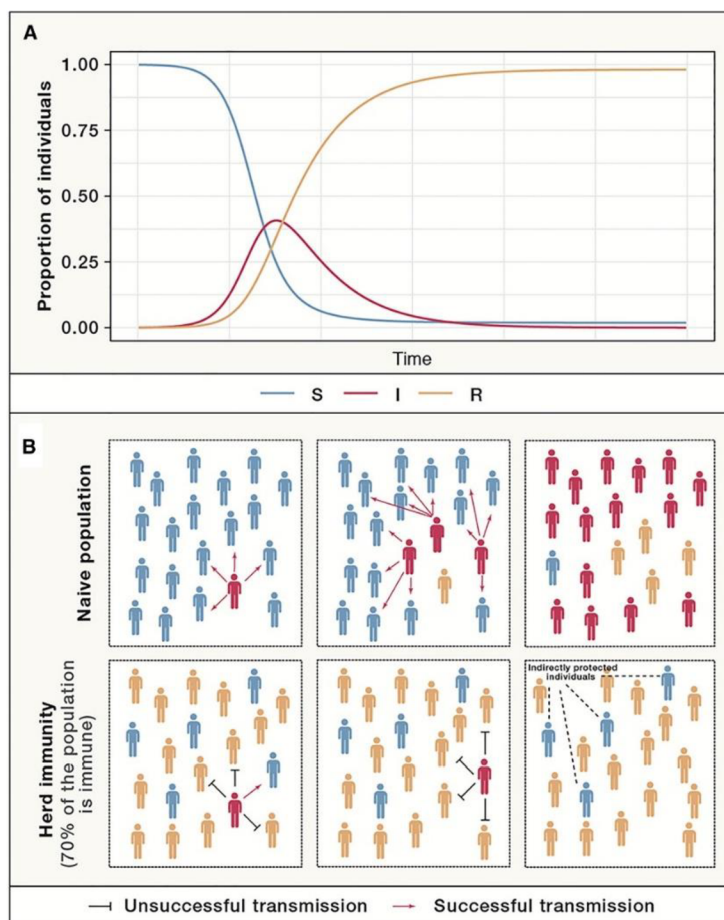
3.6 Kolektivní imunita

Imunita na úrovni jedince vzniká buď přirozenou infekcí patogenem, nebo očkováním vakcínou. Stádová imunita je důsledkem účinků individuální imunity na úrovni populace. Odkazuje na zprostředkovanou ochranu před infekcí, která je poskytována náchylným jedincům, pokud v populaci existuje dostatečně velký podíl imunních jedinců (Randolph a Barreiro, 2020).

Při prvním výskytu viru, kdy je k nákaze náchylná celá populace, dojde k nekontrolovatelnému šíření viru. Pokud však má část populace imunitu vůči témuž patogenu, pravděpodobnost účinného kontaktu mezi infikovanými a náchylnými hostiteli se snižuje, protože mnoho hostitelů je imunních, a proto nemohou patogen přenést. Pokud je v populaci příliš malý podíl vnímavých jedinců, patogen se nemůže úspěšně šířit a jeho prevalence klesá. Bod, kdy podíl

vnímavých jedinců klesne pod hranici potřebnou pro přenos, je znám jako práh stádové imunity. Nad touto úrovní imunity začíná působit stádová imunita a náchylní jedinci využívají nepřímou ochranu před infekcí (Aronson, Brassey a Mahtani, 2020).

Efekt kolektivní imunity je často spojován s očkovacími programy. Pomocí kolektivní imunity je totiž možné ochránit i tu část populace, která očkování nemůže podstoupit, nebo má poškozené přirozené obranné mechanismy, čili je imunokompromitovaná. Kolektivní imunita tedy chrání především lidi starší 65 let, novorozence a ženy v pozdním stádiu těhotenství (Randolph a Barreiro, 2020; Aronson, Brassey a Mahtani, 2020).



Obrázek 5: **Princip kolektivní imunity** (Zdroj: Randolph a Barreiro, 2020, s. 739)

Na obrázku (5) je vidět průběh epidemie po zavedení jednoho infikovaného jedince. Podíl infikovaných (červená čára) rychle roste, až dosáhne svého vrcholu, který odpovídá prahu stádové imunity. Po tomto bodě nově nakažení jedinci infikují méně než jednoho vnímavého jedince, protože dostatečný podíl populace se stal odolným, což brání dalšímu šíření patogenu (oranžová linie). Princip stádové imunity je vidět na schématu ve spodní polovině obrázku, kde

je zobrazený postup šíření viru v populaci, která se s virem ještě nesečkala a postup šíření v populaci, která stádovou imunitou disponuje (Randolph a Barreiro, 2020).

3.7 Pandemie Covid-19

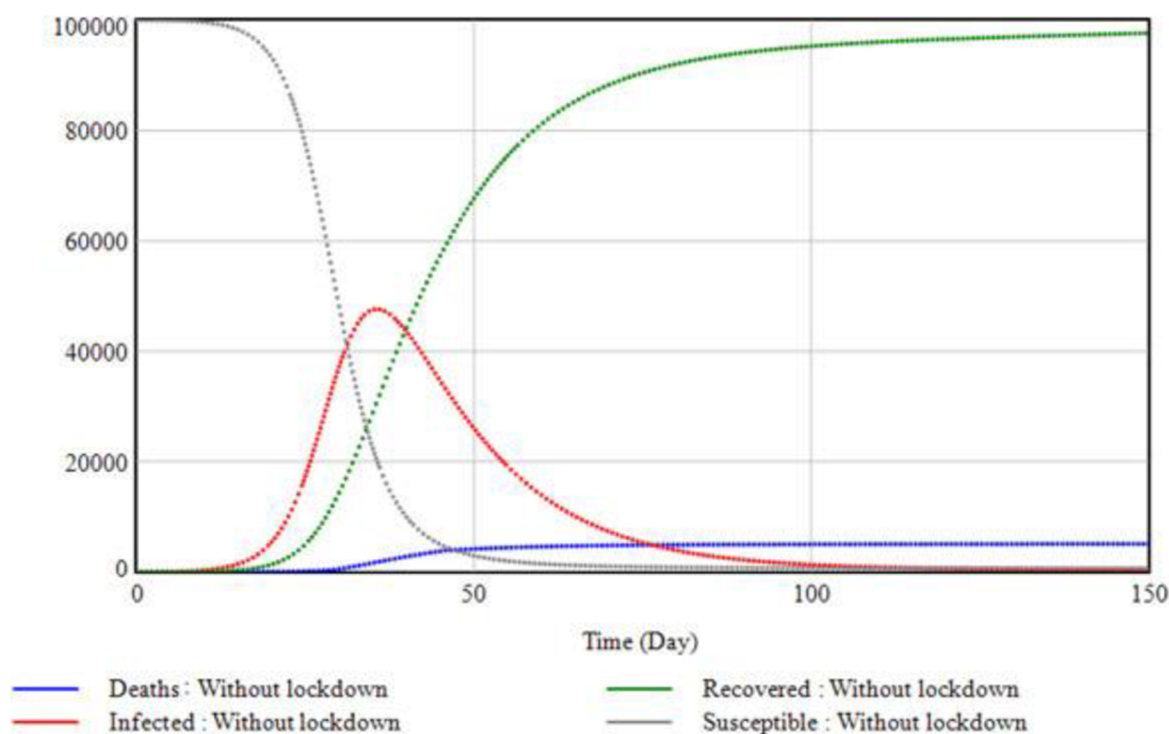
SARS-CoV-2 spadá do rodiny jednovláknových RNA virů, které jsou schopny infikovat zvířata i člověka a způsobovat respirační, gastrointestinální, jaterní a neurologická onemocnění. Tyto viry mají vysoký pandemický potenciál. Dosud bylo identifikováno devět lidských koronavirů. Z tohoto počtu jich bylo sedm objeveno v posledních dvaceti letech. Zdá se, že nové koronaviry se u člověka objevují pravidelně, a to zejména v důsledku vysoké prevalence a širokého rozšíření koronavirů, velké genetické rozmanitosti a časté rekombinace jejich genomů a nárůstu interakcí mezi lidmi a zvířaty (Ibarra-Vega, 2020).

3.8 Varianty opatření

Způsoby boje proti šíření viru jasně ukazují, proč je důležité situaci simulovat. Řešení, která se navenek mohou zdát jako nejlepší, se totiž mohou ukázat jako řešení špatná. Pro účely práce bude pro všechny druhy opatření použito slovo lockdown. V lockdownu tedy budou obsažena nejen opatření omezující svobodu pohybu, ale i opatření hygienická. Tato kapitola není zaměřena na specifická opatření, ale bude se zabývat dlouhodobými výsledky jednotlivých přístupů. Účelem následujících podkapitol je vysvětlit rozdíly v průběhu pandemie za použití různých variant zavedení lockdownů. Při hledání dlouhodobě optimálního balíčku opatření je nutné si uvědomit, že k zastavení šíření viru opatření samotná nestačí. Je třeba brát v potaz i promořenost populace práh kolektivní imunity. Jak se v následujících příkladech ukáže, tak intenzita a forma opatření mají přímý dopad na promořenost (Moll, 2020).

3.8.1 Průběh bez opatření

Nejprve je vhodné ukázat, jak by průběh epidemie vypadal, pokud by žádná opatření nebyla zavedena. Z grafu (1) lze vyčíst, že se epidemie skládá pouze z jedné velké vlny. Počet infikovaných rychle naroste a jediné, co nárůst infikovaných zastaví, je nedostatek vhodných hostitelů pro přenos viru. Během tohoto průběhu dojde velmi brzy k přehlcení zdravotního systému, což povede ke zvýšenému počtu úmrtí. Na druhou stranu dojde i k velmi rychlému promoření populace. Z grafu je patrné, že počet nakažených dosáhne svého maxima přibližně ve 35. dnu epidemie a okolo dne 80 je již počet nakažených téměř zanedbatelný (Ibarra-Vega, 2020). V poslední den epidemie lze konstatovat, že každý člen populace se nemocí nakazil a následně se vyléčil, nebo zemřel (Moll, 2020).



Graf 1: Průběh pandemie bez lockdownu (Zdroj: Ibarra-Vega, 2020, s. 4)

3.8.2 Jeden lockdown

První možností boje proti epidemii je pomocí jedné vlny opatření, jednoho silného lockdownu, jehož předpokladem je snížení počtu kontaktů o 90 % v porovnání s běžnou situací (Ibarra-Vega, 2020). V případě jednoho lockdownu a následného rozvolnění se epidemie bude skládat ze dvou vln. Okamžitě po skončení lockdownu nastoupí druhá vlna zvýšeného počtu nakažených. Na rozdíl od prvního scénáře lze z grafu (2) vyčíst, že epidemie bude trvat déle. Zatímco při jednom 60denním lockdownu je ve 150. den počet nakažených roven přibližně 10 000, tak v případě nezavedení opatření se blíží nule. Toto je zapříčiněno nižším procentem promořenosti. V populaci je po skončení lockdownu stále příliš mnoho náchylných lidí. Nemoc se proto šíří dál, dokud počet vhodných hostitelů neklesne (Moll, 2020).

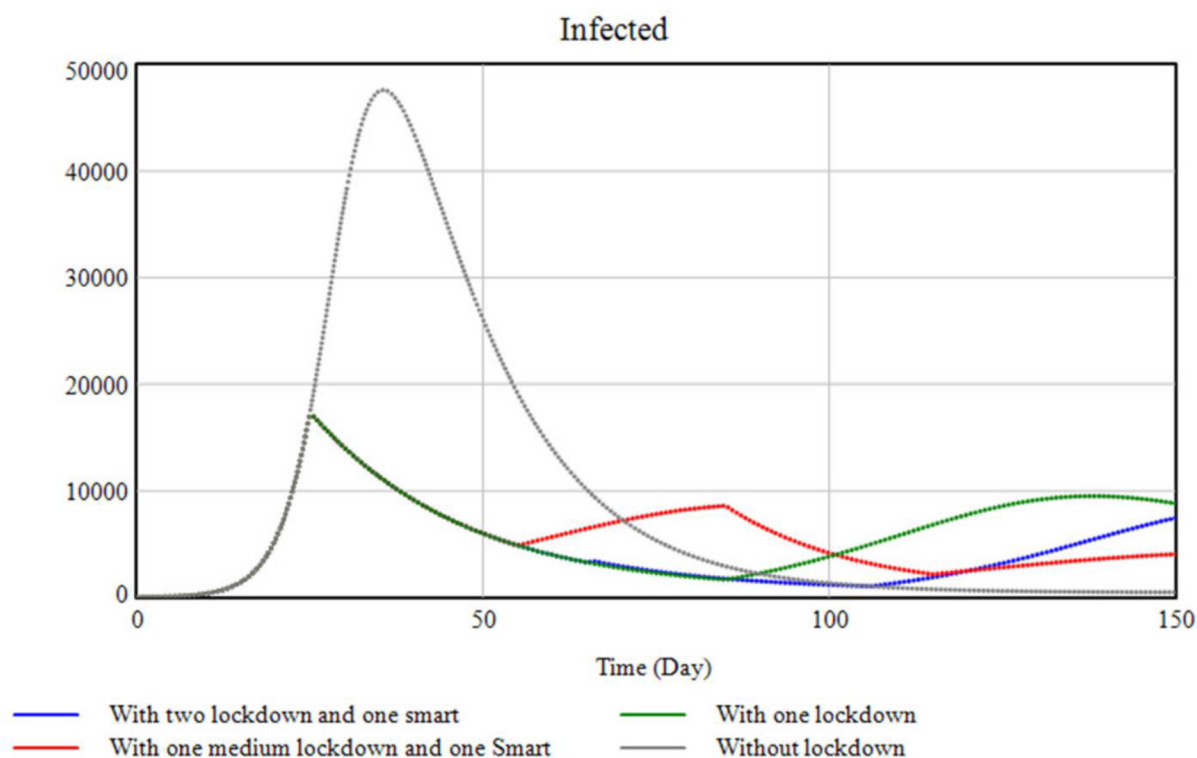
3.8.3 Střední lockdown a chytrá karanténa

Další variantou je zavedení kratšího lockdownu než v minulém scénáři. Místo 60 dní bude tvrdý lockdown s 90% úbytkem kontaktů trvat pouze 40 dní. Poté následuje 40denní období volnějších opatření, která omezí počet kontaktů o 40 %, ale umožní lepší fungování ekonomiky (Ibarra-Vega, 2020). Z grafu (2) lze vyčíst, že i v tomto scénáři dojde k druhé vlně nárůstu infikovaných. K nárůstu ale dojde později a nebude tak prudký, jako v případě jednoho lockdownu. Lze ovšem předpokládat, že epidemie bude trvat ještě déle než v předchozích případech z důvodu nízké promořenosti na konci lockdownů (Moll, 2020).

3.8.4 Dva oddělené lockdowny

Poslední popsanou variantou je scénář, při kterém dojde ke dvěma 30denním lockdownům a jednomu 30dennímu období s volnějšími opatřeními mezi nimi. Stejně jako v minulém případě lockdowny snižují počet kontaktů o 90 %, zatímco období s volnějšími opatřeními pouze o 40 % (Ibarra-Vega, 2020).

V tomto případě dojde ke třem vlnám nárůstu infikovaných. Jedná se o nejvyrovnanější průběh epidemie. Minimum křivky je větší než minimum ostatních křivek obsahujících nějaký druh opatření. Maximum druhé vlny je menší než u prvního scénáře popisujícího průběh pandemie s jedním dlouhým lockdownem. Rozdíl mezi maximem a minimem je v tomto scénáři nejmenší. V praxi bude tento scénář znamenat, že zdravotnický systém bude vytěžován s nejmenšími možnými výkyvy ze všech zkoumaných variant (Moll, 2020).



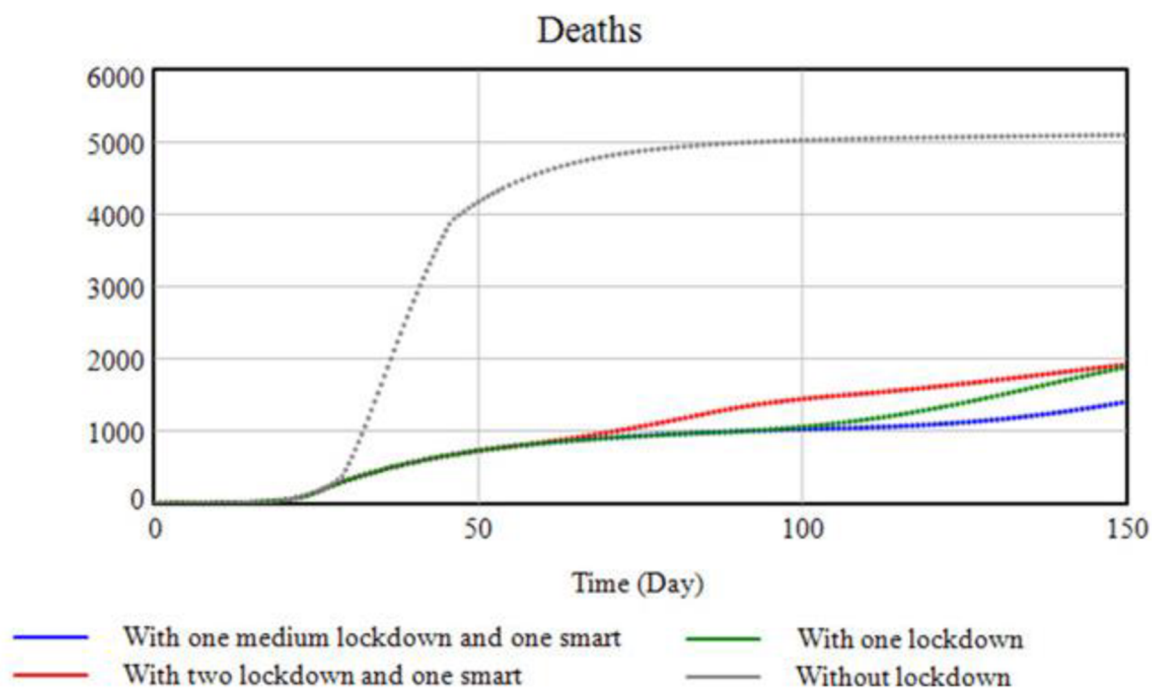
Graf 2: **Porovnání počtu nakažených** (Zdroj: Ibarra-Vega, 2020, s. 4)

3.8.5 Porovnání počtu úmrtí

V předchozích grafech byl zkoumán počet nakažených. Následující graf (3) je zaměřen na počet úmrtí. Není velkým překvapením, že nejvyšší počet úmrtí nastane v moment, kdy nejsou aplikována žádná opatření a dojde k přehlcení nemocnic. V ten moment totiž začnou umírat i ti, kteří by nákazu přežili, dostalo-li by se jim včasné pomoci. Tato skutečnost jde ruku v ruce s tím, že průběh epidemie bez opatření je nejrychlejší. Ve sledovaném úseku se nakazí více než 95 % populace (Ibarra-Vega, 2020).

Pokud by model nepracoval s kapacitou zdravotnických zařízení, ale smrtnost by byla statická, tak by to znamenalo, že ve všech případech by došlo ke stejnému počtu úmrtí. Jediným rozdílem by byla doba, za jakou by k úmrtím došlo (Moll, 2020). Kapacita nemocnic v modelu ale zahrnuta je, a proto lze z grafu (3) vyčíst, že scénář, který zabránil nejvíce úmrtím, je scénář se dvěma po sobě jdoucími lockdowny (modrá křivka). Je třeba si ale uvědomit, že epidemie v tomto scénáři ve 150. den simulace nabírala na síle. Mezi opatřeními spočívajícími v jednom velkém lockdownu a dvěma oddělenými kratšími lockdowny je rozdíl minimální. Rozdíl mezi

těmito dvěma scénáři a nejlepším možným scénářem je přibližně 500 úmrtí (0,5 % celkové populace), zatímco rozdíl mezi scénářem s volným průběhem a nejlepším možným je přes 3500 mrtvých (3,5 % celkové populace).



Graf 3: Lockdowny a jejich vliv na počet úmrtí (Zdroj: Ibarra-Vega, 2020, s. 5)

Nyní je již zcela zřejmé, že nezavedení žádných opatření má katastrofální následky. Jakákoli forma opatření povede k rapidnímu poklesu úmrtí. Ve zkoumaném časovém úseku je nejlepší variantou zavedení dvou po sobě jdoucích lockdownů. I přesto, že počet úmrtí je v konečném důsledku hlavním parametrem, podle kterého se protiepidemická opatření nastavují, je třeba si uvědomit, že v tomto modelu nejsou zavedeny všechny vazby, se kterými se politici potýkají. Finanční stránka věci je v tomto modelu zcela vynechána. Ta přitom hraje ve skutečném světě naprosto klíčovou roli (Ibarra-Vega, 2020).

3.9 Koeficient determinace

Koeficient determinace neboli r-kvadrát je statistický ukazatel, který říká z kolika procent je v regresním modelu rozptyl v závislé proměnné vysvětlen proměnnou nezávislou. Je to hodnota mezi 0 a 1, přičemž 1 znamená, že veškerý rozptyl v závislé proměnné je vysvětlen nezávislou proměnnou, a 0 znamená, že žádný z rozptylů není vysvětlen. R^2 se často používá jako měřítko vhodnosti regresního modelu. Vysoká hodnota R^2 znamená, že model dobře zapadá do dat, zatímco nízká hodnota může upozornit na případné chyby v modelu (Yin a Fan, 2001).

R^2 se vypočítá tak, že se bere poměr vysvětleného rozptylu k celkovému rozptylu. Vysvětlený rozptyl je rozptyl závislé proměnné, který je zohledněn nezávislou proměnnou v modelu. Celkový rozptyl je rozptyl závislé proměnné bez ohledu na jakékoli nezávislé proměnné (Matematická biologie, 2023).

4 Vlastní práce

4.1 Podklady pro model

Jak již bylo napsáno, tak cílem práce je vytvořit model, který bude chováním reflektovat skutečný průběh koronavirové pandemie v České republice. Autorem zkoumané a modelované období je období od 1. března 2020 po 31. května 2022. Celkem se jedná o 821 dní. Modelování pandemie covidu má nespornou výhodu v široké dostupnosti přesných dat. Autor data obdržel po podání žádosti na webu Ministerstva zdravotnictví České republiky. Různé datové soubory je možné získat i jinde na internetu bez žádosti. Data od ministerstva zdravotnictví byla vyhodnocena jako nejdůvěryhodnější, a proto byla použita jako podklad pro tvorbu modelu.

4.1.1 Sběr dat pro dosažení do modelu

Po stažení souboru s daty bylo nutné vyselektovat ta data, která jsou pro potřeby modelu důležitá. Csv soubor obsahoval všechna data v jednom sloupci. Na obrázku 4 je vidět, jak vypadal soubor po stažení a na obrázku 5 jak soubor vypadá po rozdělení textu do sloupců. Z dat obsažených v tomto souboru byla důležitá pouze data a počty nakažených osob v zahraničí během prvních 14 dnů. Celkový počet importovaných případů byl v prvních 14 dnech roven číslu 112. Dvoutýdenní období bylo vybráno, protože odpovídá průměrné době trvání infekce. Další informací získanou ze souboru byl průměrný denní přírůstek importovaných případů, který je v tomto období roven přibližně 27,1 případu denně. V modelu je použit parametr *Importované případy*, do kterého byly získané hodnoty dosazeny.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	id,datum,vek,pohlavi,kraj_nuts_kod,okres_lau_kod,nakaza_v_zahranici,nakaza_zeme_cs_u_kod,reportovano_khs										
2	ac1d936a-de78-4189-8ebc-24a4c8dfaa13,2020-03-01,21,Z,CZ010,CZ0100,1,IT,1										
3	4749b0f7-1c65-45ec-b53a-739a5c4fe24a,2020-03-01,43,M,CZ042,CZ0421,1,IT,1										
4	fe3cd705-328f-4bfc-b562-0a864d703252,2020-03-01,67,M,CZ010,CZ0100,1,IT,1										
5	b90dfe14-80a6-46b4-881e-d25eb3b415f7,2020-03-03,21,Z,CZ010,CZ0100,,,										
6	ebb2b487-027c-40fb-8399-84bd742d9fa2,2020-03-03,53,Z,CZ042,CZ0421,1,IT,1										
7	c01922d8-aefd-4e80-ad3e-92e357d61216,2020-03-04,21,Z,CZ010,CZ0100,,,										
8	37a8376c-23f9-426d-a39b-621373cab011,2020-03-05,66,Z,CZ042,CZ0421,,1										
9	0f64344b-e3da-45ca-b443-46a1df69c49e,2020-03-05,49,M,CZ042,CZ0421,1,IT,1										
10	dee87b95-0690-456a-baaa-87ea32c48a7a,2020-03-05,18,Z,CZ042,CZ0421,1,IT,1										

Obrázek 6: Datový soubor před úpravami (Zdroj: autor)

	B	C	D	E	F	G	H	I
	datum	vek	pohlavi	kraj_nuts_kod	okres_lau_kod	nakaza_v_zahranici	nakaza_zeme_cs_u_kod	reportovano_khs
	01.03.2020	21	Z	CZ010	CZ0100	1 IT		1
	01.03.2020	43	M	CZ042	CZ0421	1 IT		1
	01.03.2020	67	M	CZ010	CZ0100	1 IT		1
	03.03.2020	21	Z	CZ010	CZ0100			
	03.03.2020	53	Z	CZ042	CZ0421	1 IT		1
	04.03.2020	31	Z	CZ010	CZ0100			

Obrázek 7: Datový soubor po úpravách (Zdroj: autor)

id	datum	nakaza_v_zahranici	Suma importovaných případů od 1.3.2020 - 14.3.2020
ac1d936a-	01.03.2020	1	112
4749b0f7-	01.03.2020	1	Průměrný denní přírůstek importovaných případů za celé období
fe3cd705-	01.03.2020	1	27,08605341
b90dfe14-	03.03.2020		

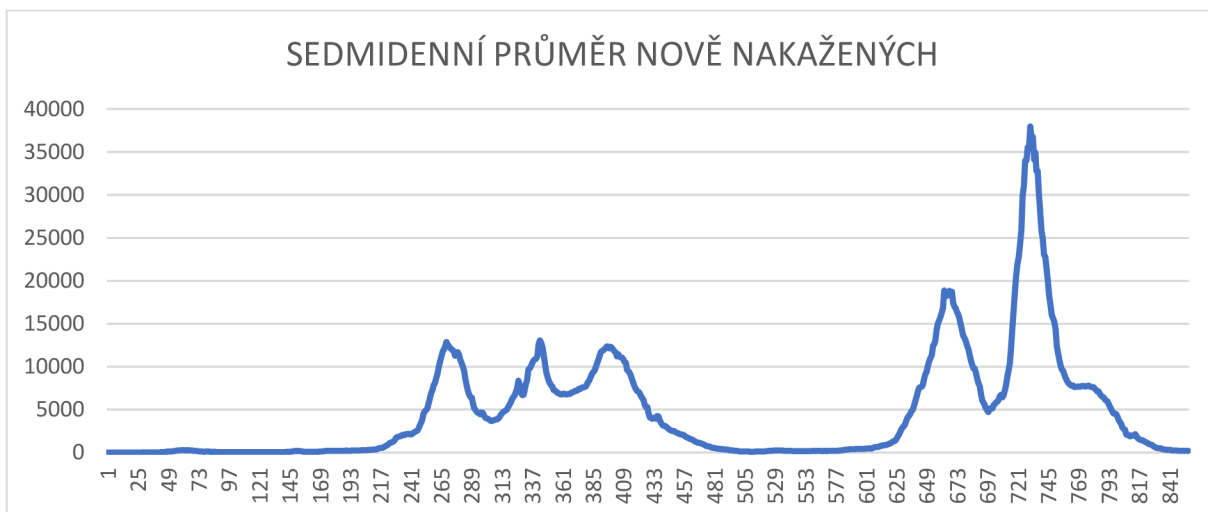
Obrázek 8: Data pro dosažení do modelu (Zdroj: autor)

4.1.2 Sběr dat pro kalibraci modelu

Data získána v předchozím kroku byla do modelu dosazena. Tato podkapitola je zaměřena na data, se kterými bude model porovnáván a na základě kterých bude provedena kalibrace. Druhý datový soubor obsahuje informace o přírůstkovém počtu infikovaných. Denní přírůstky je možné vidět na grafu (4). Z důvodu výrazně nižšího počtu testů o víkendech tento graf silně osciluje a porovnání výsledků by bylo velmi obtížné. Autorem vytvořený model testování neobsahuje. Je úmyslně zjednodušený a pracovní dny v něm nejsou rozlišeny. Denní přírůstky proto byly převedeny na sedmidenní průměr nově nakažených (graf 5). Pro určení přesnosti modelu tedy bude použit právě sedmidenní průměrný přírůstek.



Graf 4: Přírůstkový počet nakažených (Zdroj: autor)



Graf 5: Sedmidenní průměr nově nakažených (Zdroj: autor)

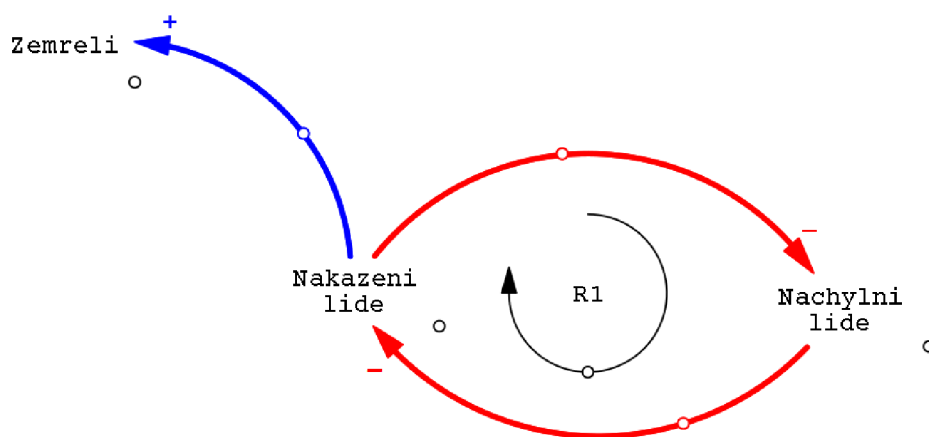
4.2 Tvorba modelu

4.2.1 Příčinně smyčkový diagram

Před vytvořením diagramu stavu a toků, byl nejprve vytvořen příčinně smyčkový diagram (anglicky Causal loop diagram – CLD). V tomto diagramu se jednotlivým proměnným nepřisuzují číselné hodnoty. Tento graf slouží k lepšímu pochopení vztahů zkoumaného systému a identifikaci klíčových zpětnovazebních smyček.

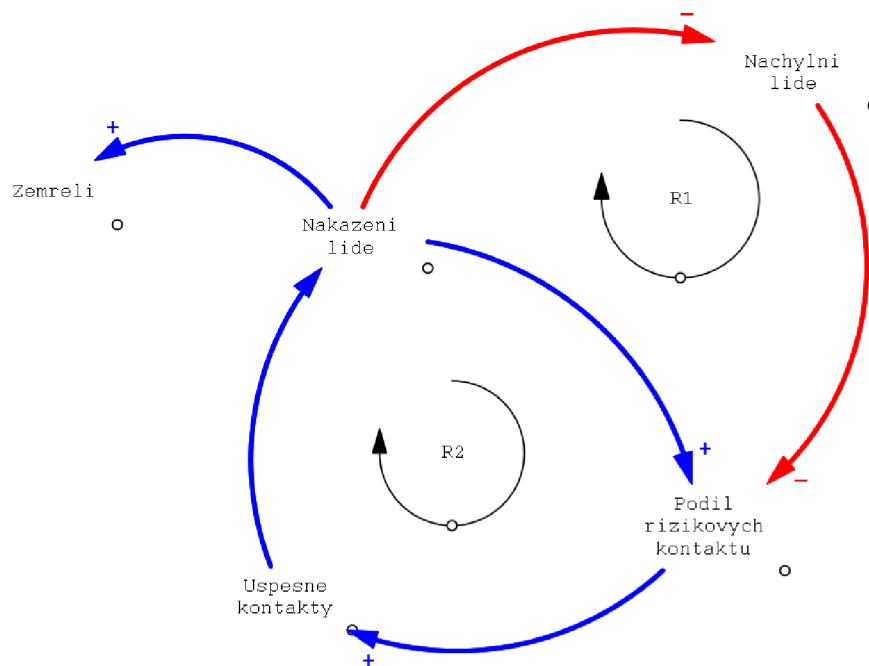
První tři proměnné zakreslené v diagramu jsou proměnné: „Nakažení“, „Ohrožení“ a „Zemřeli“. Dá se říci, že jsou to skupiny převzaté z modelu SIR. *Susceptible* – *Ohrožení/Náchylní*, *Infected* – *Nakažení*, *Removed* – *Zemřeli*. V diagramu stavu a toků budou tyto skupiny ještě doplněny o skupiny *Exposed* a *Recovered*. Pro příčinně smyčkový diagram, ale tyto skupiny nejsou v tomto případě důležité.

Mezi prvními třemi proměnnými panují následující vztahy. Počet nakažených lidí snižuje počet ohrožených lidí. Stejně tak počet ohrožených snižuje počet nakažených. A finálně počet nakažených zvyšuje počet zemřelých. Je zde také první zpětnovazební smyčka R1. Jelikož se ve smyčce nachází sudý počet negativních vazeb, tak se jedná o smyčku sebe-posilující.



Obrázek 9: **Základ CLD** (Zdroj: autor)

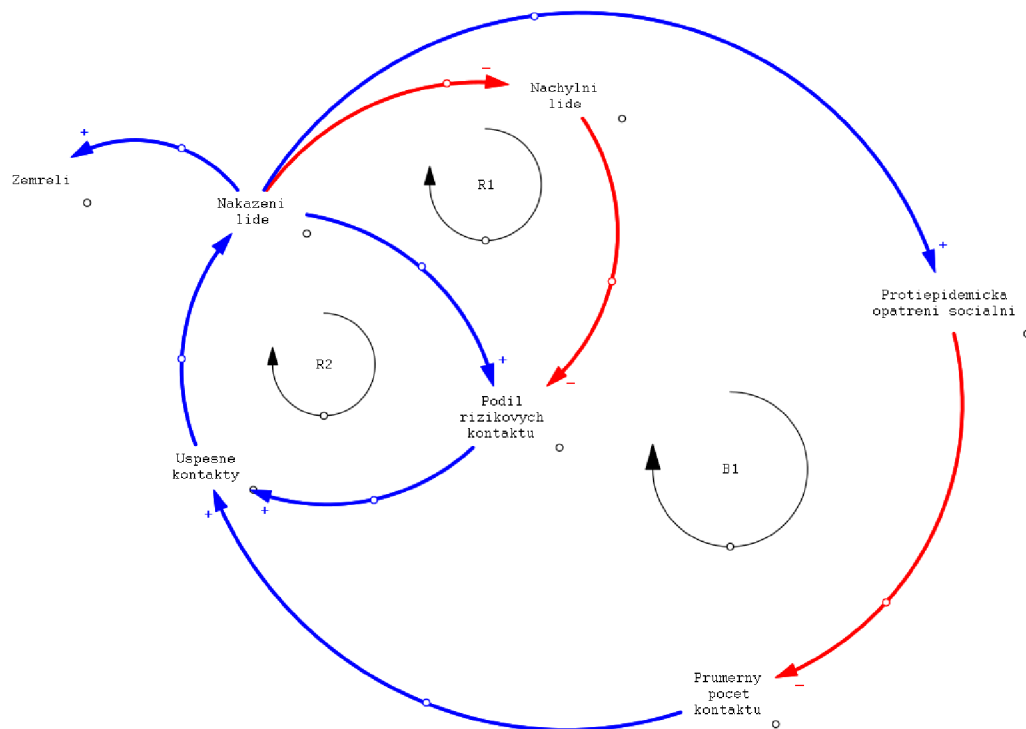
Následně byly přidány další proměnné, kterými jsou „*Podíl rizikových kontaktů*“ a „*Přenos viru*“. Podíl rizikových kontaktů reprezentuje podíl nakažených a ohrožených lidí. Proměnná přenos viru vyjadřuje počet kontaktů, které skončí úspěšným předáním viru. Vazby v modelu tedy nyní budou vypadat následovně. Nakažení lidé snižují počet náchylných lidí. Náchylní lidé snižují podíl rizikových kontaktů. S růstem podílu rizikových kontaktů poroste počet kontaktů, při kterých dojde k přenosu viru, který vyústí v nárůstu nakažených lidí. A konečně s růstem nakažených poroste i podíl rizikových kontaktů. V modelu se nyní nachází dvě sebe posilující zpětnovazební smyčky. Smyčka R1 – Nakažení, Náchylní, Podíl rizikových kontaktů, Přenos viru. A R2 – Nakažení, Podíl rizikových kontaktů, Přenos viru. Nyní je třeba zakomponovat do diagramu protiepidemická opatření. Tato opatření budou rozdělena na dva typy – sociální opatření a hygienická opatření.



Obrázek 10: CLD bez opatření (Zdroj: autor)

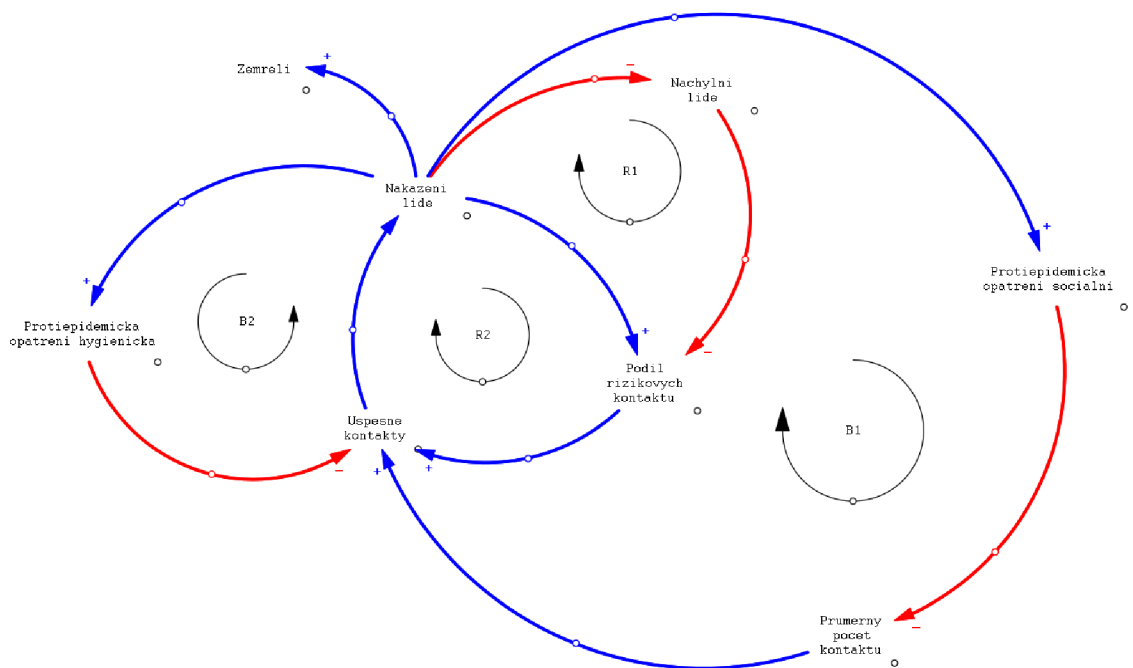
Sociální protipandemická opatření jsou opatření, která omezují svobodu pohybu a redukuje počet kontaktů. V praxi se jedná o opatření typu – uzavření kin, posiloven, nákupních center, rušení koncertů a podobně. Přímým dopadem je snížení průměrného počtu kontaktů. Do modelu tedy bylo nutné přidat dvě proměnné. První z nich je proměnná „*Protiepidemická opatření – sociální*“ a druhou je „*Průměrný počet kontaktů*“.

Vazby u nově přidaných proměnných vypadají následovně, se zvýšením počtu nakažených lidí se zpřísní protiepidemická opatření. S rostoucím počtem opatření omezujících pohyb dojde ke snížení průměrného počtu kontaktů. Vazba mezi průměrným počtem kontaktů a přenosem viru bude kladná. Další kladná vazba mezi přenosem viru a nakaženými lidmi uzavírá první balanční smyčku, která se v tomto modelu nachází, smyčku B1.



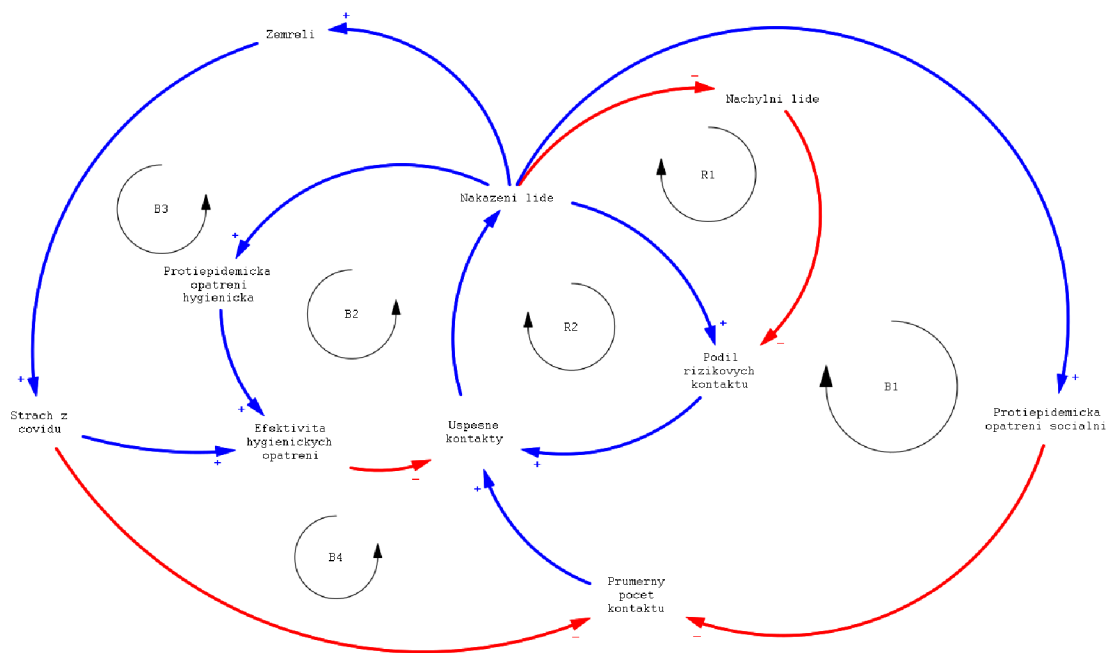
Obrázek 11: CLD po přidání sociálních opatření (Zdroj: autor)

Nyní budou do modelu zavedena protiepidemická opatření hygienického druhu. To jsou taková opatření, která snižují pravděpodobnost úspěšného přenosu. V praxi se může jednat o povinnost nosit roušku, zvýšení frekvence dezinfikování povrchů v místech s vysokou koncentrací lidí, nebo i používání antibakteriálních mýdel jednotlivci, které je důsledkem informační kampaně. Do modelu tedy přibude proměnná „*Protiepidemická opatření – hygienická*“. Vazba mezi nakaženými lidmi a hygienickými opatřeními je kladná. Stejně jako u sociálních se dá předpokládat, že s rostoucím počtem nakažených bude zavedeno více opatření. Nová opatření potom budou snižovat pravděpodobnost přenosu. V modelu tedy budou hygienická opatření spojena negativní vazbou s úspěšnými kontakty. Tímto vznikne druhá balanční křivka B2.



Obrázek 12: CLD po přidání hygienických opatření (Zdroj: autor)

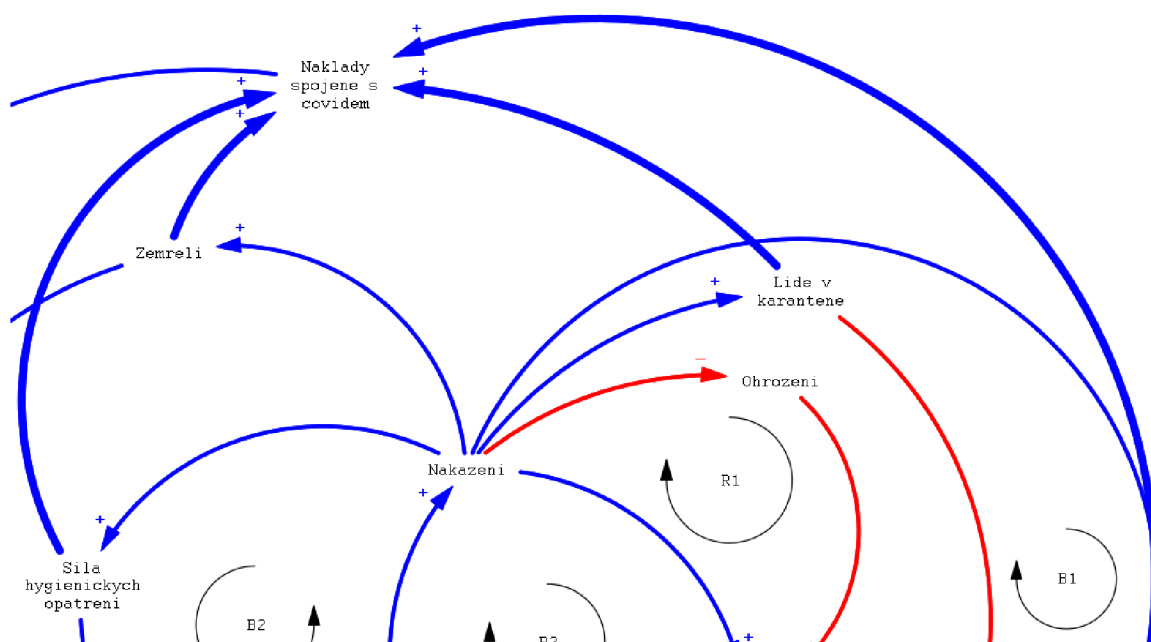
Až doposud byla proměnná „Zemřeli“ slepá (nevedla z ní žádná vazba). Nyní bude do modelu zakomponována proměnná „Strach z covidu“. Proměnná „Zemřeli“ bude mít s se strachem kladnou vazbu. Strach z covidu bude následně ovlivňovat to, s jakým úsilím lidé dodržují protiepidemická opatření. S rostoucím strachem bude více lidí zůstat doma a setkávání omezí na minimum. U opatření sociálního druhu, tak bude s růstem strachu z covidu klesat průměrný počet kontaktů, není třeba zde přidávat žádnou další proměnnou, stačí spojit „Strach z covidu“ negativní vazbou s průměrným počtem kontaktů. V případě opatření hygienického druhu bude muset být přidána ještě jedna proměnná, která bude vyjadřovat účinnost těchto opatření. S rostoucím strachem budou lidé více nosit roušky a dbát na osobní hygienu. Ale, pokud strach opadne, tak se jejich vůle k dodržování těchto opatření sníží. Nově zavedená proměnná „Efektivita hygienických opatření“ bude vložena mezi „Protiepidemická opatření hygienická“ a „Úspěšné kontakty“. Po vložení těchto dvou proměnných a přidání výše zmíněných vazeb vzniknou další dvě balanční smyčky B3 a B4.



Obrázek 13: CLD bez ekonomických vazeb (Zdroj: autor)

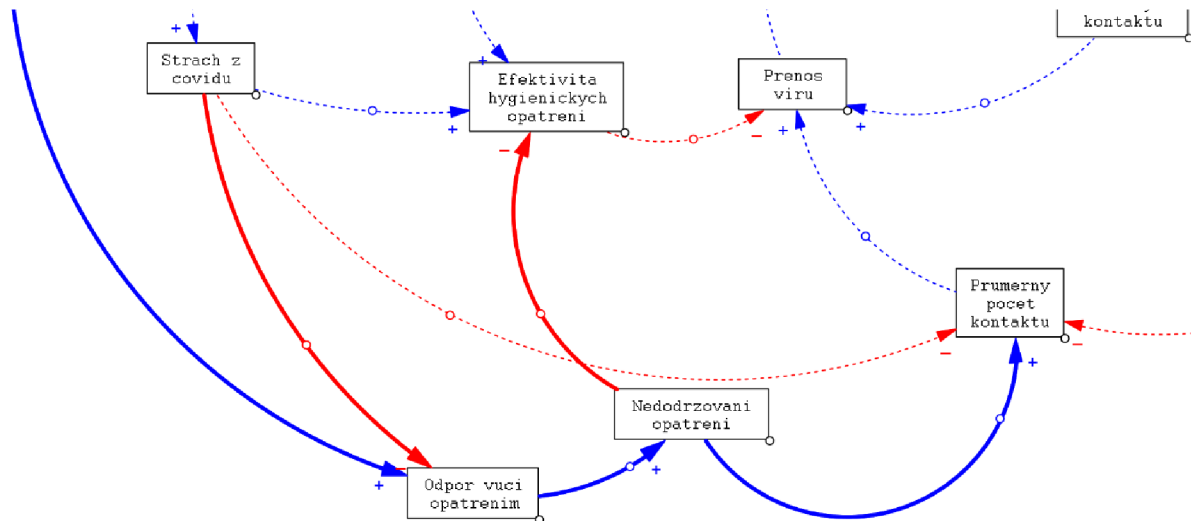
K tomu, aby diagram obsahoval všechny potřebné vazby je třeba ještě zohlednit ekonomická hlediska. V následujícím kroku byla proto do modelu přidána proměnná „Náklady spojené s pandemií“. V této proměnné se skrývají kompenzace pro podnikatele, příspěvek pro lidi v karanténě, výdaje na zdravotnictví, ale třeba také ušlý ekonomický výkon. Pro účely modelu není nutné tyto výdaje více specifikovat.

Pro snadnější implementaci nákladů do diagramu byla ještě přidána proměnná „Lidé v karanténě“. Do té bude směřovat kladná vazba z proměnné „Nakažení lidé“. Vztah nakažených lidí k nákladům totiž není tak zřejmý, jako vztah nákladů a lidí v karanténě. Přidáním negativní vazby mezi lidmi v karanténě a průměrným počtem kontaktů vznikne další balanční smyčka B5. Poté mohou být do modelu přidány již zmíněné „Náklady spojené s covidem“. Do nákladů povedou kladné vazby z následujících proměnných – „Lidé v karanténě“, „Zemřeli“, „Protiepidemická opatření – sociální“ a „Protiepidemická opatření – hygienická“.



Obrázek 14 : Náklady v CLD (Zdroj: autor)

Dalšími proměnnými, které je třeba do diagramu zakomponovat jsou „*Odpor vůči opatřením*“ a „*Nedodržování opatření*“. S rostoucími náklady se totiž bude ve společnosti zvyšovat odpor vůči opatřením. Proto bude vazba mezi těmito proměnnými kladná. Odpor vůči opatřením postupem času povede k jejich nedodržování. Jejich nedodržování se propíše do snížení účinku hygienických opatření a k nárůstu průměrného počtu kontaktů. Tímto vzniknou dvě nové sebe posilující smyčky R3 a R4.



Obrázek 15: **Detail CLD** (Zdroj: autor)

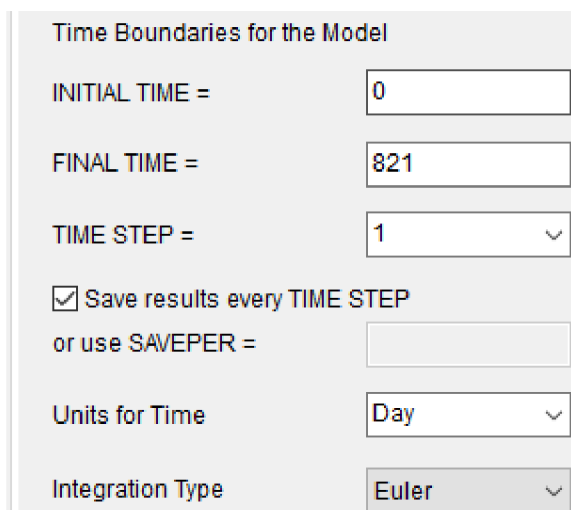
Ve finálním modelu (obrázek 16) jsou pro lepší přehlednost vazby vedoucí do nákladů vyznačeny přerušovaně.

4.2.2 Nastavení modelu

Při vytváření modelu se autor rozhodl pro následující nastavení „Time Bounds“, česky časových hranic. Pro „INITIAL TIME“ byla ponechána předem připravená hodnota 0. „FINAL TIME“ byl nastaven na základě dostupných dat na již dříve zmíněných 821. „Units for time“ neboli časové jednotky byly přenastaveny z měsíců na dny. „TIME STEP“ určuje po jak velkých časových krocích bude model postupovat. Zde byla nastavena hodnota 1, protože data vydávaná ministerstvem zdravotnictví používají stejný časový rozestup.

Posledním bodem nastavení je „Integration Type“ neboli metoda integrace. Vensim ve verzi PLE nabízí dvě možnosti. Eulerovu metodu a metodu RK4 Auto. Eulerova metoda je metoda prvního řádu. Je to přímočará metoda, která odhaduje další bod na základě rychlosti změny v aktuálním bodě. Rungeova-Kuttova metoda 4. řádu, metoda RK4, je vícestupňová metoda, protože zahrnuje výpočty sklonu ve více krocích, v aktuálních a následujících diskrétních časových hodnotách nebo mezi nimi. Další hodnota závislé proměnné se vypočítá tak, že se vezme vážený průměr těchto více stupňů na základě Taylorovy řady aproximace řešení. Tato metoda je přesnější, ale její výpočet využívá více prostředků. Nejoblíbenějším stupněm RK metody je 4. stupeň (RK4). Nabízí nejlepší rovnováhu mezi přesností a náročností výpočtu. Z důvodu lepší optimalizace a zjednodušení se autor rozhodl pro Eulerovu metodu integrace.

Model tedy bude mít nastavenou dobu trvání 821 dní, časový krok 1 den a Eulerovu metodu integrace.

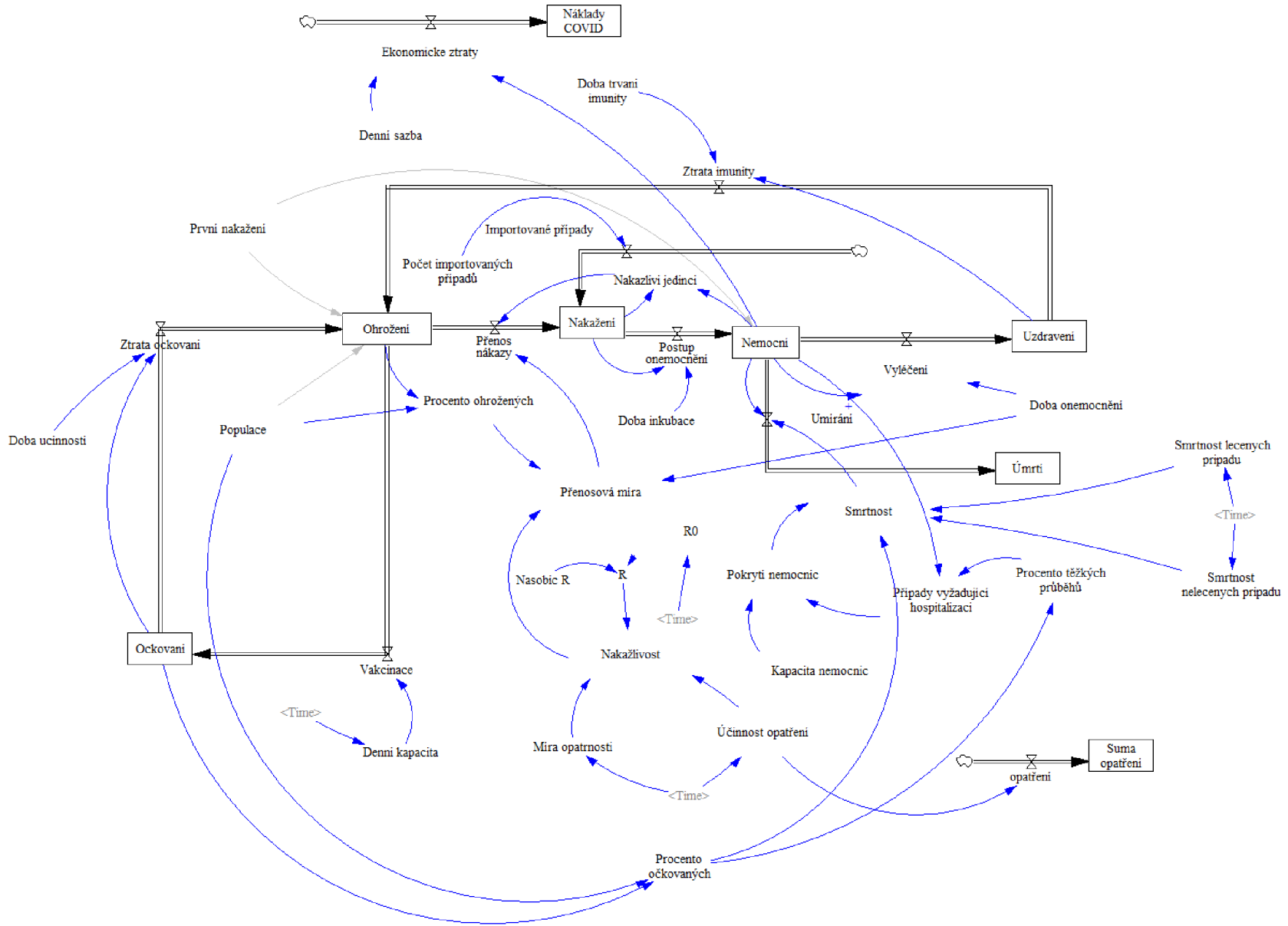


Time Boundaries for the Model	
INITIAL TIME =	0
FINAL TIME =	821
TIME STEP =	1
<input checked="" type="checkbox"/> Save results every TIME STEP	
or use SAVEPER =	
Units for Time	Day
Integration Type	Euler

Obrázek 17: Nastavení modelu (Zdroj :autor)

4.3 Diagram stavů a toků

Na základě příčinně smyčkového diagramu byl vytvořen epidemiologický model SIR, některé proměnné musely být pro vytvoření diagramu stavů a toků upraveny. Některé proměnné v CLD totiž nejsou číselně ohodnotitelné. Smyčky vyjadřují pouze v jakém směru nastane změna. Při přihlídnutí k této skutečnosti byl autor nucen, některé vazby a proměnné upravit, aby mohl vytvořit následující model. Důležité změny budou v průběhu následujících kapitol popsány a zdůvodněny.



Obrázek 18: Celý diagram stavů a toků (Zdroj: autor)

Základem modelu je struktura SEIR. Jedná se o variantu modelu SIR, která je rozšířena o skupinu *Exposed*. Tato skupina reprezentuje ty nakažené, u kterých ještě nedošlo k propuknutí symptomů nemoci. Zavedení této skupiny je nutné, pokud by model měl v budoucnu obsahovat i testování. Nyní plní pouze funkci prodlevy mezi přechodem ze stavu *Ohrožení* do stavu *Nemocní*. Dalšími skupinami, které byly přidány jsou *Úmrtí* a *Očkování*. Skupina *Úmrtí* je další výskyt skupiny *Removed* v modelu SIR. Vytvořený model by bylo možné popsat jako model SVEIRR (Susceptible, Vaccinated, Exposed, Infected, Removed, Recovered).

Významným rozdílem od smyčkového diagramu je zakomponování očkování do modelu. Počet ohrožených je snižován za pomoci vakcinace. Počet denně vakcinovaných obyvatel je nastaven podle dat dostupných z webu ministerstva zdravotnictví. Prvním dnem, kdy byla vakcína dostupná byl 28. prosinec 2020. Od tohoto data bylo k 31. květnu 2022 vydáno přibližně 17 600 000 dávek vakcíny. Denní počet očkovaných tedy odpovídá skutečnosti.

Pro tok *Ztráta účinnosti očkování*, bylo použito zpoždění prvního řádu, které lépe popisuje skutečnou situaci. Při vakcinaci totiž nevzniká 100% imunita. I čerstvě nakažený člověk může být zranitelný vůči nákaze virem. V rovnici (4) použitá doba účinnosti byla nastavena na 180 dní. Tato hodnota byla opět převzata z informací vydávaných ministerstvem zdravotnictví a odpovídá době platnosti certifikátu v aplikaci Tečka.

$$\frac{\text{Očkování}}{\text{Doba účinnosti}} \quad (4)$$

Klíčovým tokem modelu, popsaným v rovnici (5), je tok pojmenovaný *Přenos viru*, který spojuje skupinu ohrožených a nakažených. Rovnice uvnitř tohoto toku je *Přenosová míra * Nakažliví jedinci*. Pod nakažlivými jedinci se skrývají dvě skupiny, a to *nakažení* a *nemocní*. *Přenosová míra* reprezentuje míru přenosu a je popsána v rovnici (6). *Přenosovou míru* lze popsat jako počet lidí, které úspěšně nakazí každý nakažlivý jedinec.

$$\text{Přenosová míra} * \text{Nakažliví jedinci} \quad (5)$$

$$\text{Procento ohrožených} * \text{Doba onemocnění} * \text{Nakažlivost} \quad (6)$$

Společně s proměnnou *Nakažlivost* je hlavní proměnnou, která ovlivňuje přenos nákazy. *Nakažlivost* je ovlivňována několika faktory. Celý vzorec je k nahlédnutí na následujícím je zobrazen v rovnici (7). V proměnné *R* se skrývá reprodukční číslo, které se mění v závislosti na čase. Vzorec je k vidění v rovnici (8). *Účinnost opatření* je vyjádřena v procentech. *Míra opatrnosti* byla zavedena pro usnadnění kalibrace. Je to proměnná, která souvisí s opatřeními, ale není závislá na jejich zavedení. V praxi se jedná o „opatření“, které na sebe jednotlivec aplikuje bez ohledu na to, zda jsou vyhlášena, nebo ne. Příkladem může být dobrovolné nošení roušky, nebo redukce kontaktů.

$$R * (1 - \text{Účinnost opatření}) * \text{Míra opatrnosti} \quad (7)$$

Faktorem, který není ovlivňován vnější politikou je číslo R . Hodnoty, které se v této proměnné skrývají jsou převzaty z oficiálních zdrojů a v průběhu pandemie se různě měnily. To bylo dáno přechodem mezi variantami viru. První varianta Alfa se například vyznačovala relativně vysokou smrtností, ale hůře se přenášela. U pozdějších variant smrtnost významně klesla, zatímco nakažlivost prudce stoupala. Číslo R_0 je tedy nastaveno jako auxiliary with lookup a v průběhu času mění svou hodnotu. Pro účely kalibrace je tato proměnná ovlivněna násobičem, který upravuje její hodnoty, aby model lépe reflektoval skutečný průběh pandemie.

$$R_0 * \text{Násobič} \quad (8)$$

Účinnost opatření vyjadřuje, jak moc opatření snižují pravděpodobnost nákazy. Jedná se o proměnnou, která reprezentuje sílu protiepidemických opatření. Tato proměnná v modelu zpomaluje průběh pandemie. Existuje několik způsobů, jak s touto proměnnou pracovat. V některých pracích ji autoři využívají v kombinaci s několika vlnami opatření. V ten moment je nutné do modelu přidat ještě další proměnné, které budou řídit začátek a dobu trvání opatření. V České republice, ale byla opatření měněna relativně často, a proto se autor rozhodl pro vytvoření lookupu pro tuto proměnnou. Účinnost opatření je tedy nastavena podle v té době platných opatření.

Smrtnost určuje pravděpodobnost úmrtí při nakažení virem. Její hodnota je určena několika faktory. Faktory, které jsou odvozeny od vlastností viru jsou *Smrtnost neléčených případů (SNP)* a *Smrtnost léčených případů (SLP)*. Autor do modelu ovšem zakomponoval i proměnnou, kterou nazývá *Pokrytí nemocnic (PN)*. Díky tomu model dokáže reagovat na situaci, kdy dojde k přeplnění zdravotnických zařízení. V moment, kdy nastane nedostatek nemocničních lůžek se smrtnost zvedne na předem určenou hodnotu. Smrtnost je také snižována proočkovaností. Vzorec je popsán v rovnici (9).

$$(SNP + (SLP - SNP)/(1 + PN^2)) * (1 - \text{Procento očkovaných}) \quad (9)$$

Proměnná *Pokrytí nemocnic* představuje dostupnost nemocniční péče. Kapacita nemocnic byla nastavena podle aktuálně dostupných informací. U tohoto údaje nebylo možné dohledat historické hodnoty, proto byla kapacita nastavena pevně na 23 000 lůžek. *Procento těžkých průběhů* se mění v závislosti na proočkovanosti.

$$PN = \text{Případy vyžadující hospitalizaci} / \text{Kapacita nemocnic} \quad (10)$$

$$\text{Procento těžkých průběhů} = 0.05 * (1 - \text{Procento očkovaných}) \quad (11)$$

Toky *Ztráta očkování*, *Postup onemocnění*, *Vyléčení a Ztráta imunity* nepoužívají fixní zpoždění. Autor se rozhodl využít zpoždění prvního řádu, které lépe reflektuje skutečný průběh nákazy virem. Ve skutečnosti totiž virus fixní zpoždění nerespektoval. U některých jedinců nemoc trvala klidně jen několik dní, u jiných mohla trvat i déle než dva týdny. Obdobné to je i s imunitou získanou proděláním nemoci, nebo dobou účinku očkování. Vzorce jsou popsány v rovnicích (12 – 15).

$$\text{Ztráta očkování} = \text{Očkování} / \text{Doba účinnosti} \quad (12)$$

$$\text{Postup onemocnění} = \text{Nakažení} / \text{Doba inkubace} \quad (13)$$

$$\text{Vyléčení} = \text{Nemocní} / \text{Doba onemocnění} \quad (14)$$

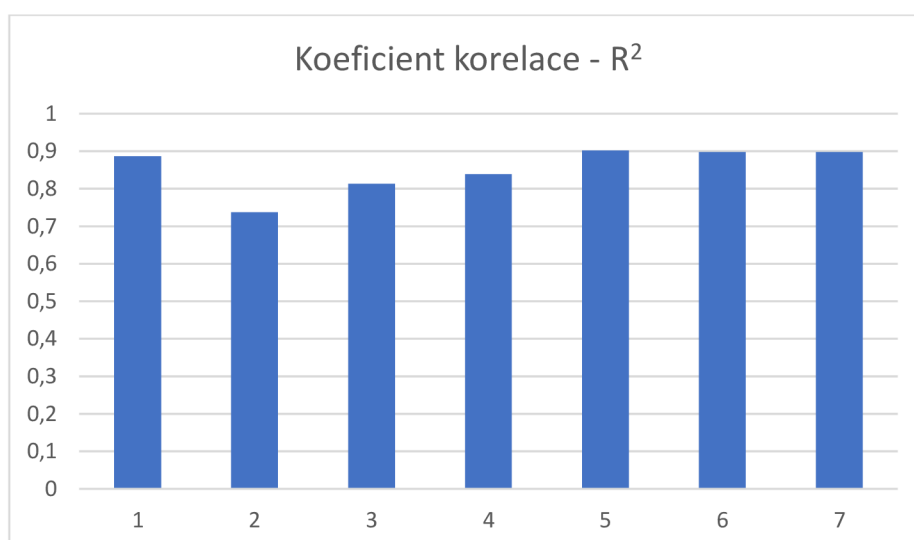
$$\text{Ztráta imunity} = \text{Uzdravení} / \text{Doba trvání imunity} \quad (15)$$

Stav *Náklady COVID* je jediný prvek zohledňující finanční dopady pandemie v modelu. Nejedná se o proměnnou, která by reflektovala skutečnou situaci. Proměnná byla vytvořena za účelem porovnávání efektivity scénářů. Je plněna za pomoci toku *Ekonomické ztráty*, které jsou popsány v rovnici (16). Jsou počítány jako ušlý ekonomický výkon jednotlivce po dobu jeho nemoci. Denní sazba byla nastavena na 3241 Kč. Za předpokladu, že zůstane během všech simulací stejná, není její výše důležitá. V aktuální verzi modelu slouží pouze k porovnávání.

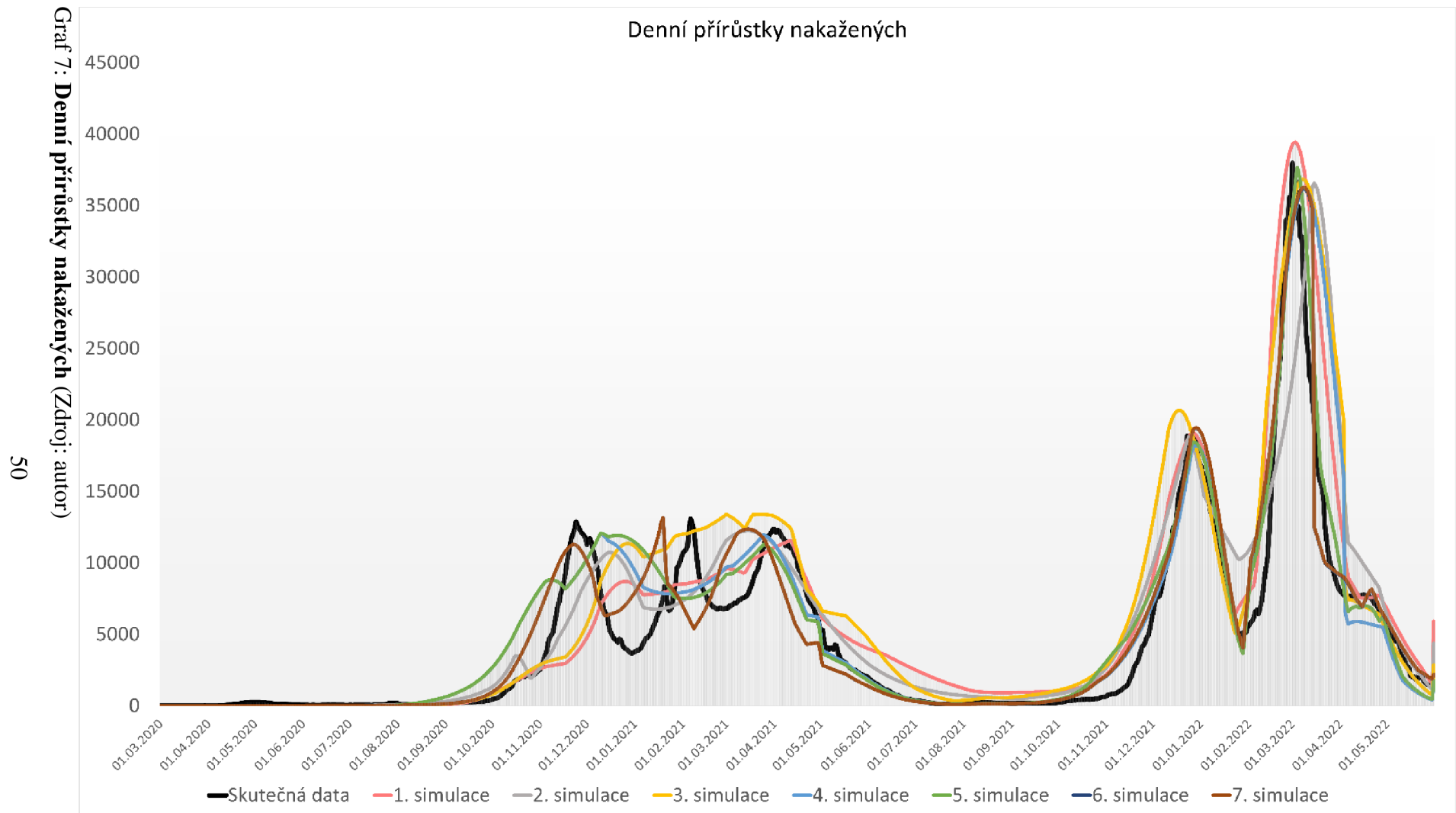
$$\text{Ekonomické ztráty} = \text{Nemocní} * \text{Denní sazba} \quad (16)$$

4.4 Kalibrace modelu

K ověření schopností modelu simulovat průběh epidemie bylo nutné zjistit, zda model dokáže vyprodukovat data, která by se nejvíce blížila k datům v oficiálních statistikách. Data produkovaná modelem bylo potřeba ověřit za pomoci koeficientu determinace. U výsledků simulací byly porovnávány denní přírůstky nakažených a zemřelých. U prvních datových souborů se koeficient korelace pohyboval v hodnotách okolo 0,2. Tyto hodnoty nebyly akceptovatelné, a proto bylo nutné model dále kalibrovat. Za akceptovatelnou hodnotu R^2 se autor rozhodl stanovit 0,8. Po kalibraci bylo této hodnoty dosaženo v 6 ze 7 případů. Při páté simulaci se hodnota R^2 přehoupla i přes hranici 0,9. Výsledné průběhy je možné vidět na grafu (7).



Graf 6: **Koeficient korelace** (Zdroj: autor)



4.5 Alternativní varianta

V České republice došlo k aplikování tvrdých protiepidemických opatření již začátkem března 2020. Díky tomuto balíčku opatření se podařilo epidemii zpomalit a Česká republika prošla první vlnou, která dosáhla svého vrcholu v polovině dubna, s minimálními počty nakažených. Již v květnu začala být opatření rozvolňována, což nahrálo příchodu druhé vlny epidemie.

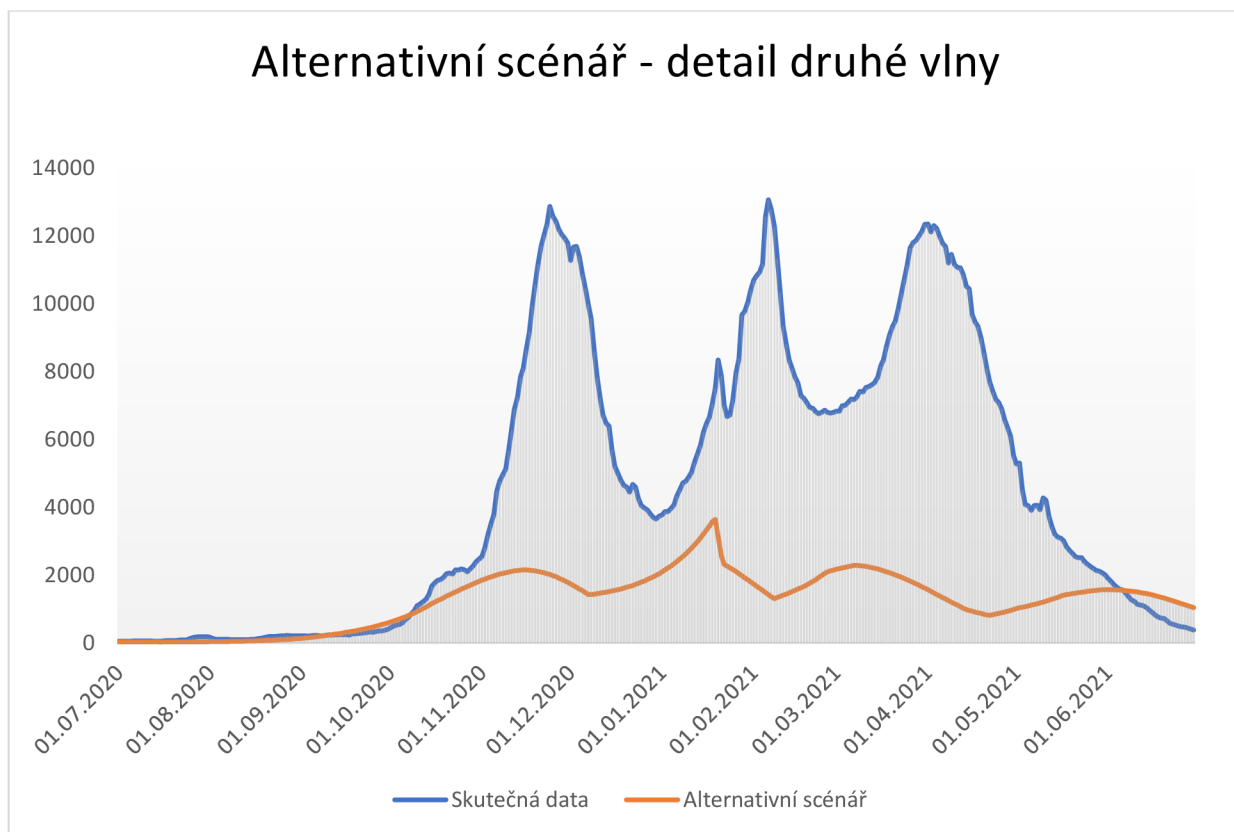
Druhá vlna začala nabírat na síle již v průběhu prázdnin. V reakci na tuto skutečnost došlo k opětovnému zavádění některých opatření. Spočítaná účinnost opatření byla v prvních měsících mezi 80–90 %. Vlna rozvolnění tuto hodnotu snížila na přibližně 25 %.

V teoretické části práce bylo popsáno několik možností průběhů epidemie. Variantou, která zabránila nejvíce úmrtím byla varianta se dvěma po sobě jdoucími lockdowny. První lockdown byl nastavený, tak aby snížil průměrný počet kontaktů o 90 %. Druhý lockdown byl již mírnější a znamenal pouze 40% úbytek kontaktů.

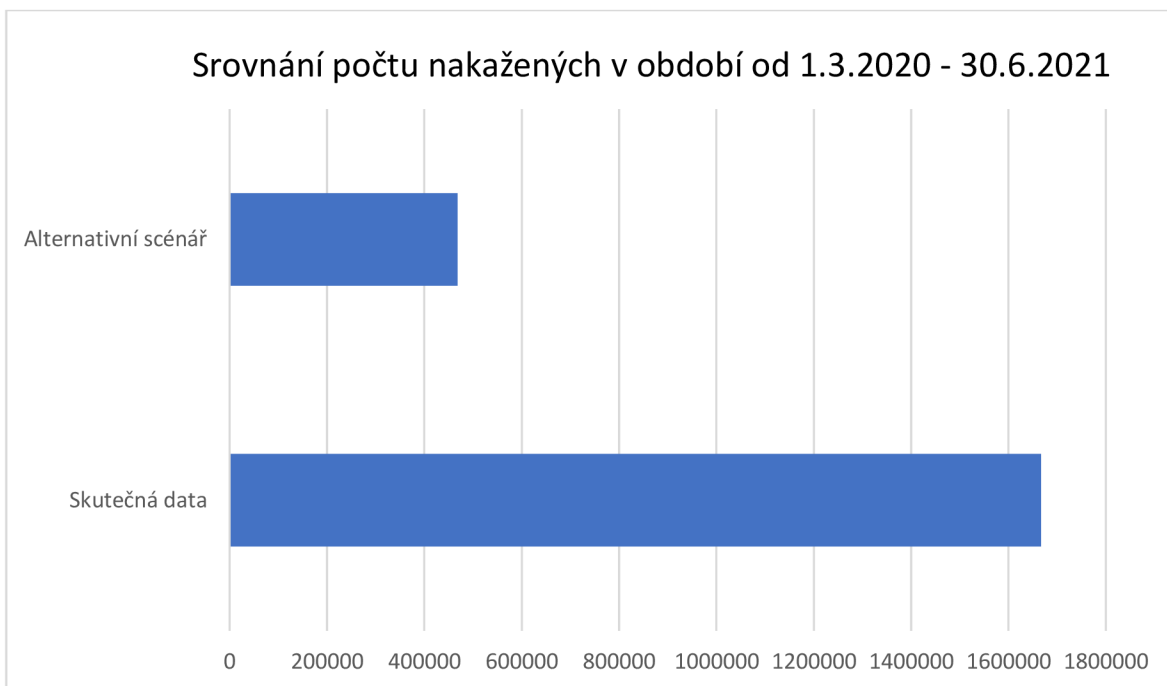
V praxi by tato varianta znamenala, že po skončení první vlny v květnu 2020 by došlo pouze k částečnému rozvolnění opatření. K dalšímu rozvolnění na úroveň přibližně 25% účinnosti by došlo až o rok později v červnu 2021. Tou dobou již naplno běžela vakcinační kampaň, která významně snížila pravděpodobnost těžkého průběhu nemoci a smrti.

5 Výsledky a diskuse

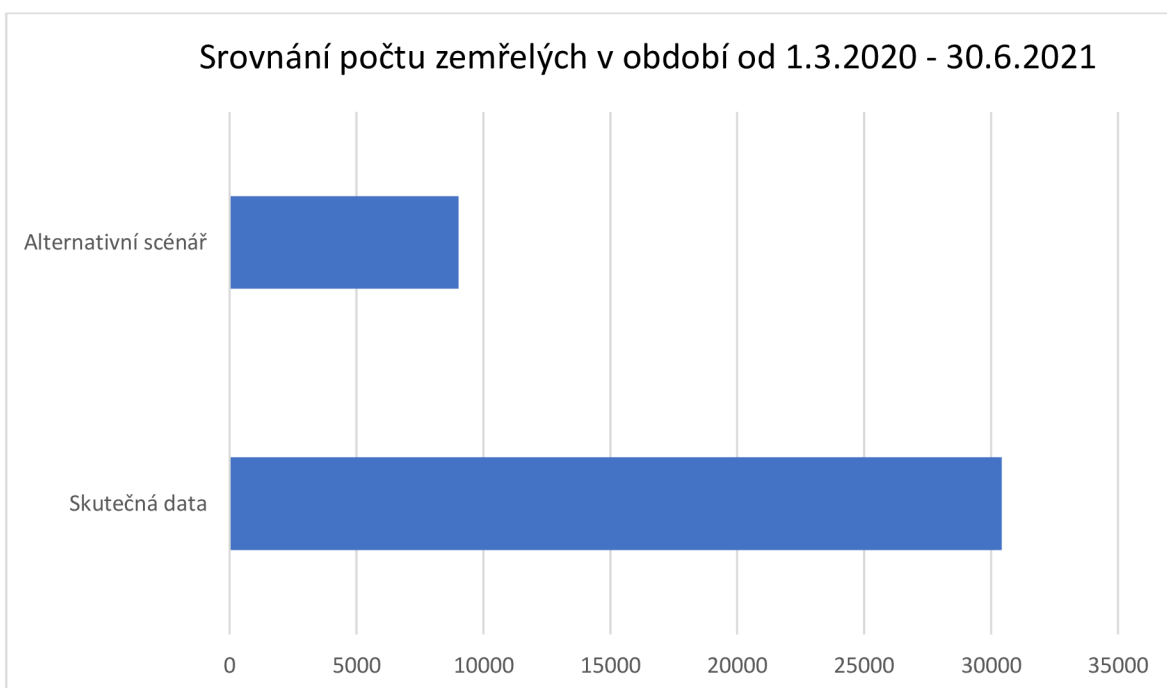
Výsledky alternativní varianty vykazují velmi zajímavá čísla především během druhé vlny pandemie. Jak je možné vyčíst z grafů 8 až 11, tak zpřísnění opatření během prázdnin roku 2020 o přibližně 13 % vedlo ke snížení počtu nakažených o 72 % a počtu zemřelých o 70 %. Lze tedy konstatovat, že se dostavilo silného pákového efektu, kdy relativně malé zpřísnění opatření zachránilo život více než 20 000 lidí.



Graf 8: **Detail druhé vlny** (Zdroj: autor)



Graf 9: Srovnání počtu nakažených – druhá vlna (Zdroj: autor)

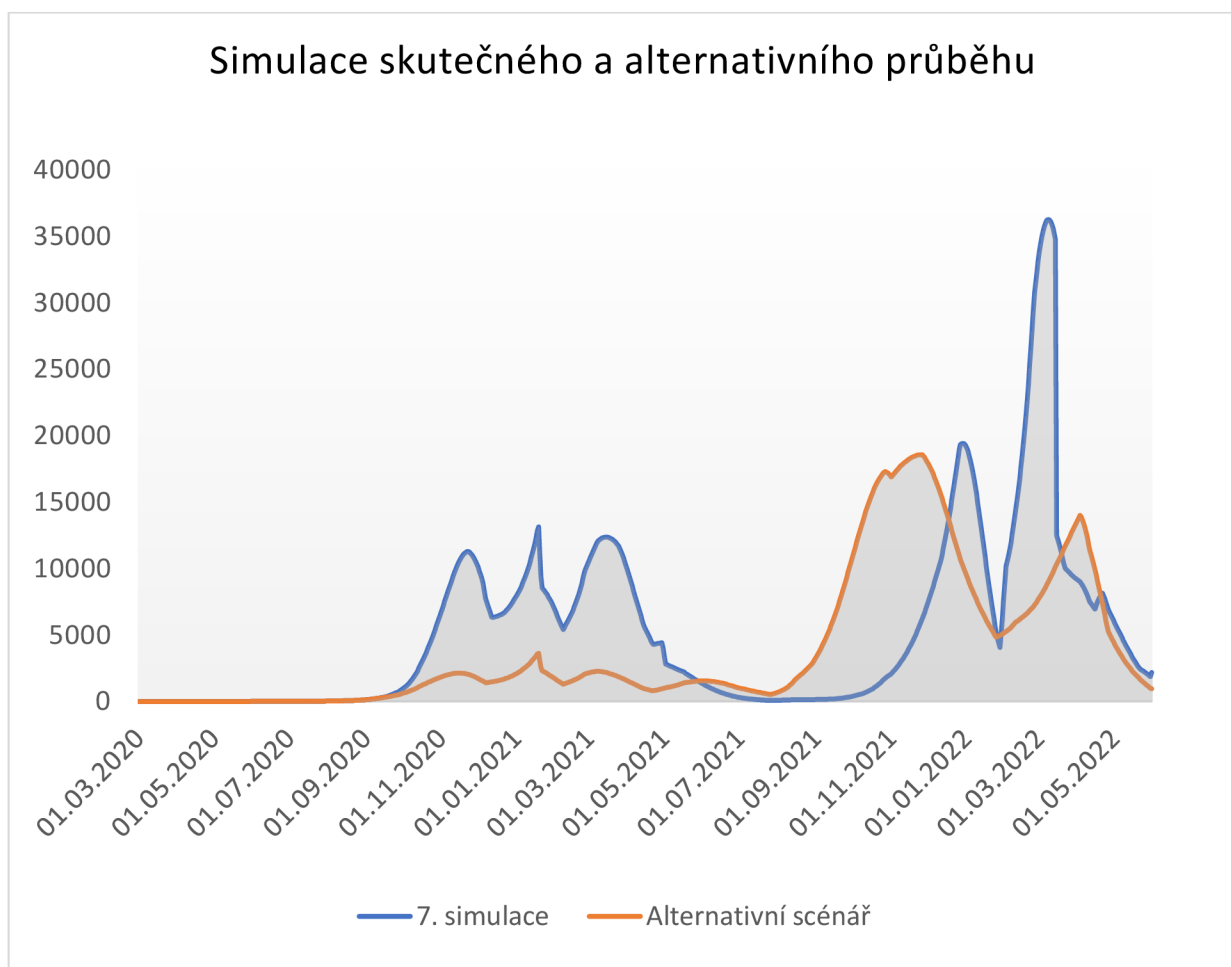


Graf 10: Srovnání počtu zemřelých – druhá vlna (Zdroj: autor)

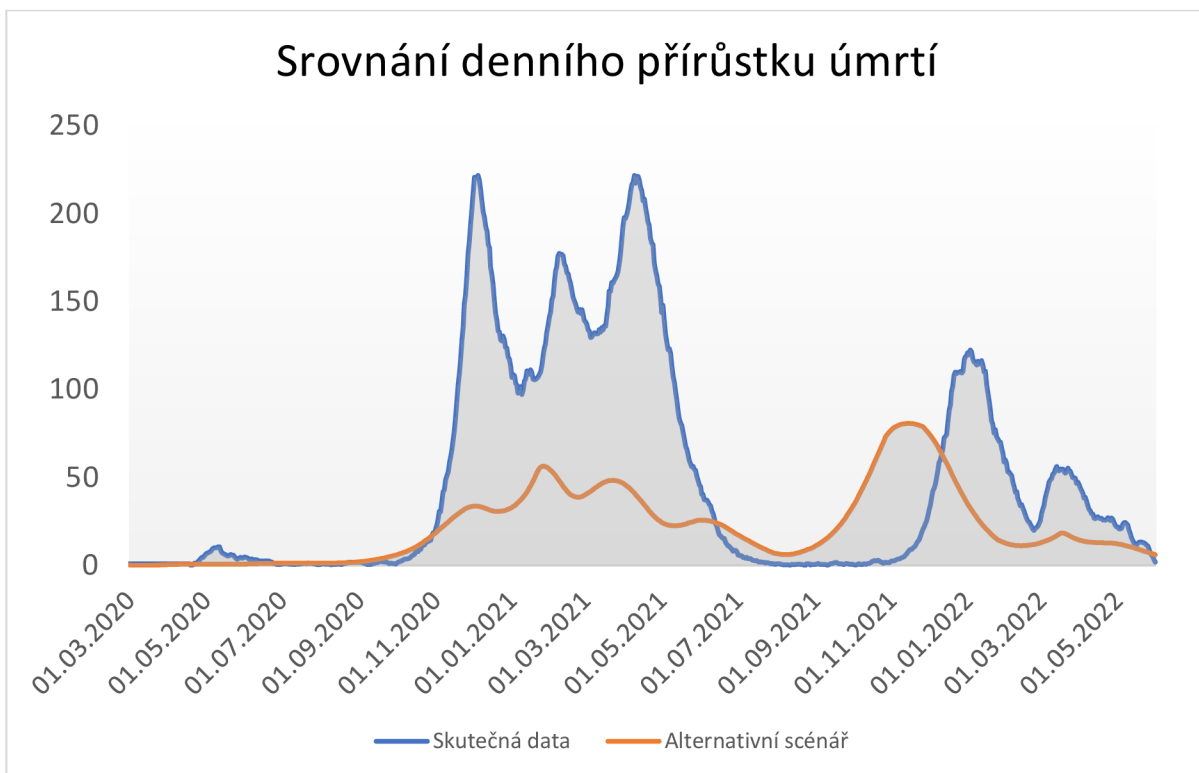
Stejně jako ve skutečnosti, tak třetí vlna Covidu-19 má i v alternativním scénáři dva vrcholy. Na rozdíl od skutečnosti se, ale třetí vlna z důvodu nižší promořenosti populace dostaví o přibližně 3 měsíce dříve. Stojí za povšimnutí, že se dostaví přibližně měsíc poté, kdy očkovací kapacity dosáhly svého maxima. V populaci je v ten moment vysoké procento očkovaných.

Nemají však úplnou imunitu, a tak v mnoha případech dojde k jejich nakažení. Díky vakcinaci je však pravděpodobnost těžkého průběhu nemoci výrazně nižší.

Jak je vidět v grafu (11), tak maximum denních přírůstků během třetí vlny nedosáhne ani 20 000. Nedojde k nárazovému zahlcení nemocnic, protože nápor pacientů bude rovnoměrnější. To se kladně podepíše na smrtelnosti, protože všem pacientům se dostane zdravotnické péče zavčas. Srovnání denního přírůstku úmrtí je vidět v grafu (12).

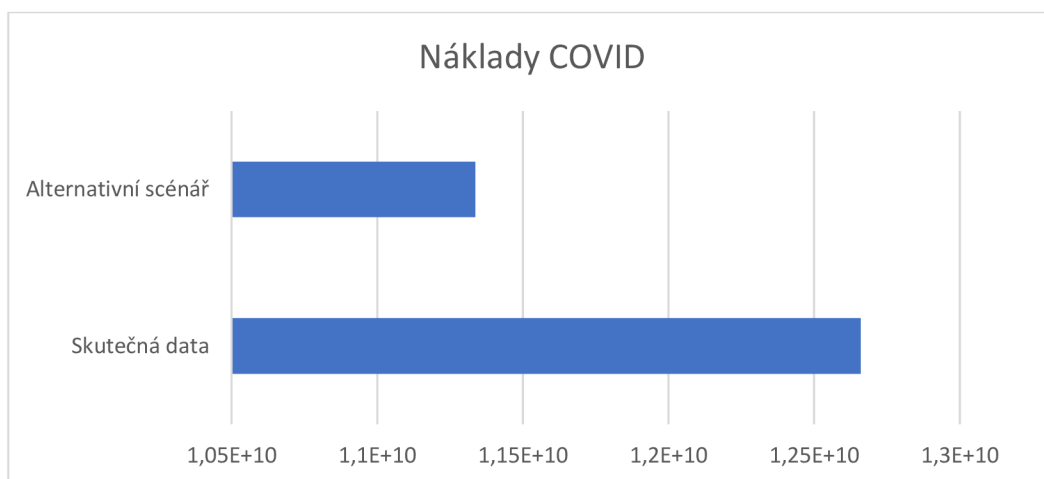


Graf 11: **Simulace skutečného a alternativního průběhu** (Zdroj: autor)



Graf 12: **Srovnání denního přírůstku úmrtí** (Zdroj: autor)

I ze srovnání finančních nákladů vychází alternativní scénář lépe. Náklady spojené s ušlým ekonomickým výkonem byly v alternativním scénáři přibližně o 10 % nižší, než spočítané náklady na základě skutečných dat. Srovnání je vidět na grafu

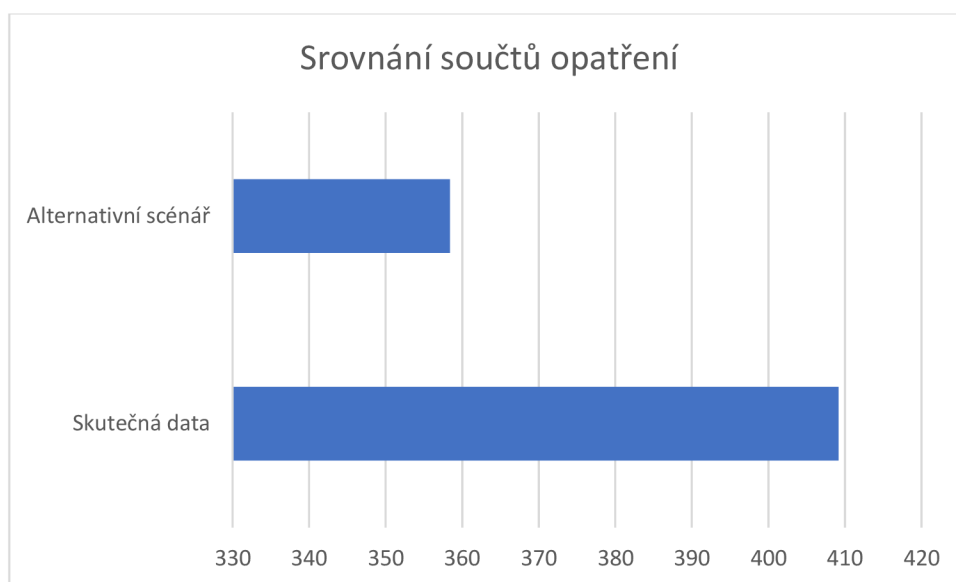


Graf 13: **Srovnání nákladů** (Zdroj: autor)

Dostat se k lepším výsledkům v počtech nakažených a zemřelých by bylo jednoduché, pokud by k žádnému rozvolnění nikdy nedošlo. Jaký vliv na celkový součet všech opatření bude mít alternativní scénář?

Někoho by mohlo napadnout, že opatření v celkovém součtu muselo být více. Vždyť přece nižší počet nakažených musel ruku v ruce jít s přísnějšími opatřeními. Není tomu tak. Síla opatření ve skutečnosti úzce souvisí s dobou, kdy jsou opatření zavedena. V alternativním scénáři došlo po první vlně k rozvolnění na 40 % účinnosti opatření. Při nástupu třetí vlny byla opatření zvednuta na úroveň 50 % účinnosti. Nad tuto hodnotu následně opatření nikdy nebyla zvednuta. A po třetí vlně došlo k jejich rozvolnění k přibližně 25 % ze kterých postupně klesala až k hodnotám okolo 17 %.

Ve skutečném světě však došlo k rozvolnění a následnému zpřísnění opatření několikrát. V grafu (14) je možné vidět srovnání součtů aplikovaných opatření. I přesto, že alternativní scénář dosáhl nižších počtů nakažených a zemřelých, tak se ukázalo, že k dosažení tohoto výsledku „spotřeboval“ méně opatření. V alternativním scénáři došlo k finálnímu rozvolnění až po proočkování značné části populace. Což se ukázalo jako optimálnější řešení.



Graf 14: Srovnání součtu opatření (Zdroj: autor)

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvoření modelu, který je schopný simulovat chování odpovídající průběhu epidemie Covidu-19 v České republice a v tomto modelu následně optimalizovat vládou aplikovaná opatření.

Po nastudování odborné literatury a sesbírání potřebných dat byl vytvořen příčinně smyčkový diagram, na kterém byly popsány vazby, které se v systému nachází. Následně byla v programu Vensim vytvořena variace modelu SIR. Po kalibraci tento model dokázal produkovat data, která v dostatečné míře odpovídala skutečné situaci v České republice. Po validaci modelu došlo k úpravě epidemických opatření. Aplikovaná opatření byla pozměněna na základě informací získaných v teoretické části práce. Po změně opatření došlo k výraznému poklesu zemřelých i celkovému počtu nakažených.

Při pohlednutí na data, produkovaná modelem tedy lze konstatovat, že epidemie se dala zvládnout lépe a udržovat dlouhodobě nižší opatření může být účinnější, než opatření výrazně snižovat a následně zvyšovat. Model ukazuje, že epidemii je třeba zabrzdit především v jejích počátcích, a tím si zajistit čas, který je potřeba k proočkování co největší části populace. Teprve poté je možné bez větších rizik opatření rozvolňovat.

Je nutno mít na paměti, že data použitá pro tvorbu modelu nebyla v počátcích pandemie, tak přesná a dostupná, jako jsou nyní. Nicméně literatura, ze které bylo čerpáno je v některých případech dostupná již desítky let a návody v literatuře popsané fungují s menšími, nebo většími úpravami stále stejně.

V budoucnu by do to modelu mohlo být přidáno testování. Již zakomponovaná inkubační doba by zavedení testování velmi usnadnila. Dále by model mohl obsahovat rozdělení věkových skupin. Rozdílné věkové skupiny na virus reagují jinak, zároveň budou existovat i rozdíly v chování jednotlivých skupin, které povedou například k rozdílnému počtu kontaktů a podobně. V neposlední řadě by mohla být více rozpracována ekonomická část modelu.

7 Seznam použitých zdrojů

ACHAIAH, Nithya C., Sindhu B. SUBBARAJASETTY a Rajesh M. SHETTY. *R0 and Re of COVID-19: Can We Predict When the Pandemic Outbreak will be Contained?*. In: National Library of Medicine [online]. Bethesda: Indian Journal of Critical Care Medicine, 2020, 2020-11-24 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7751056/>

ARONSON, Jeffrey K., Jon BRASSEY a Kamal R. MAHTANI. “When will it be over?": An introduction to viral reproduction numbers, R0 and Re. In: The Centre for Evidence-Based Medicine [online]. Oxford: The Centre for Evidence-Based Medicine, 2020, 2020-4-14 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.cebm.net/covid-19/when-will-it-be-over-an-introduction-to-viral-reproduction-numbers-r0-and-re/>

BRAUER, Fred, Pauline van den DRIESSCHE a Jianhong WU. *Mathematical Epidemiology* [online]. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-78911-6.

FORRESTER, Jay W., 1961. *Industrial Dynamics*. New York: John Wiley & Sons. ISBN 9780262560016.

HARALDSSON, H. V. *Introduction to System Thinking and Causal Loop Diagrams*. 1. Lund: KFS AB, 2004. ISSN 1104-2877.

IBARRA-VEGA, D. *Lockdown, one, two, none, or smart. Modeling containing covid-19 infection. A conceptual model*. Science of The Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138917> , 2020(730), 5. ISSN 0048-9697.

KREJČÍ, I – KVASNIČKA R., 2014. *Systémová dynamika I*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta. ISBN 978-802-1324-787.

LANNON, Colleen. *Causal loop construction: The Basics*. The Systems Thinker [online]. 2018 [cit. 2023-01-20]. Dostupné z: <https://thesystemsthinker.com/causal-loop-construction-the-basics/>.

MATEMATICKÁ BIOLOGIE, 2023. *Koeficient determinace* [online]. Brno: Institut biostatistiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analiza-a-hodnoceni-biologickych-dat-->

regresni-modelovani--linearni-regresni-model--jak-definujeme-linearni-regresni-model--koeficient-determinace

MOLL, B. *Lockdowns in SIR Models*. In: Simon Fraser University [online]. Vancouver: sfu, 2020 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: http://www.sfu.ca/~kkasa/Moll_SIR_notes.pdf.

RAHMANDAD, H., LIM, T. Y., STERMAN, J. *Behavioral dynamics of COVID-19: estimating underreporting, multiple waves, and adherence fatigue across 92 nations*, System Dynamics Review, Vol. 37, No. 1, pp. 5-31. <https://doi.org/10.1002/sdr.1673>

RANDOLPH, Haley E. a Luis B. BARREIRO. *Herd Immunity: Understanding COVID-19. Immunity* [online]. 2020, 737-741 [cit. 2022-11-21]. ISSN 1074-7613. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1074761320301709>

SHAPIRO, Michael a Edgar DELGADO-ECKERT. *Finding the probability of infection in an SIR network is NP-Hard* [online]. 2012 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3478503/>

STERMAN, John D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. 1. Massachusetts: McGraw-Hill Higher Education, 2000. ISBN 0-07-231135-5.

SYSTEM DYNAMICS SOCIETY, *Origin of system dynamics* [online]. Littleton:, 2022 [cit. 2022-11-21]. Dostupné z: <https://systemdynamics.org/origin-of-system-dynamics/>

WEISS, Howard. *The SIR model and the Foundations of Public Health*. 3. Barcelona: MATerials MATemàtics, 2013. ISSN: 1887-1097.

YANG, Hyun M., Luis P. LOMBARDI JUNIOR a Ariana C. YANG. *Are the SIR and SEIR models suitable to estimate the basic reproduction number for the CoViD-19 epidemic?*. In: MedRxiv.org [online]. New Haven: medRxiv, 2020 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.10.11.20210831v3>

YIN, Ping; FAN, Xitao. *Estimating R2 Shrinkage in Multiple Regression: A Comparison of Different Analytical Methods*. The Journal of Experimental Education [online]. 2001-01. Roč. 69, čís. 2, s. 203–224. DOI 10.1080/00220970109600656.

8 Seznam obrázků a grafů

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1: Sebe posilující zpětnovazební smyčka (Zdroj: autor)	16
Obrázek 2: Balanční zpětnovazební smyčka (Zdroj: autor)	17
Obrázek 3: Symboly stavů a toků (Zdroj: Sterman, 2000, s. 193)	18
Obrázek 4: Příklad diagramu stavů a toků (Zdroj: autor)	19
Obrázek 5: Princip kolektivní imunity (Zdroj: Randolph a Barreiro, 2020, s. 739).....	24
Obrázek 6: Datový soubor před úpravami (Zdroj: autor)	31
Obrázek 7: Datový soubor po úpravách (Zdroj: autor)	32
Obrázek 8: Data pro dosažení do modelu (Zdroj: autor)	32
Obrázek 9: Základ CLD (Zdroj: autor)	34
Obrázek 10: CLD bez opatření (Zdroj: autor)	35
Obrázek 11: CLD po přidání sociálních opatření (Zdroj: autor)	36
Obrázek 12: CLD po přidání hygienických opatření (Zdroj: autor).....	37
Obrázek 13: CLD bez ekonomických vazeb (Zdroj: autor)	38
Obrázek 14 : Náklady v CLD (Zdroj: autor)	39
Obrázek 15: Detail CLD (Zdroj: autor)	40
Obrázek 16: Konečná verze příčinně smyčkového diagramu (Zdroj: autor).....	41
Obrázek 17: Nastavení modelu (Zdroj :autor)	42
Obrázek 18: Celý diagram stavů a toků (Zdroj: autor).....	44

8.2 Seznam grafů

Graf 1: Průběh pandemie bez lockdownu (Zdroj: Ibarra-Vega, 2020, s. 4)	26
Graf 2: Porovnání počtu nakažených (Zdroj: Ibarra-Vega, 2020, s. 4).....	28
Graf 3: Lockdowny a jejich vliv na počet úmrtí (Zdroj: Ibarra-Vega, 2020, s. 5).....	29
Graf 4: Přírůstkový počet nakažených (Zdroj: autor)	32
Graf 5: Sedmidenní průměr nově nakažených (Zdroj: autor).....	33
Graf 6: Koeficient korelace (Zdroj: autor)	49
Graf 7: Denní přírůstky nakažených (Zdroj: autor)	50
Graf 8: Detail druhé vlny (Zdroj: autor)	52
Graf 9: Srovnání počtu nakažených – druhá vlna (Zdroj: autor).....	53
Graf 10: Srovnání počtu zemřelých – druhá vlna (Zdroj: autor).....	53
Graf 11: Simulace skutečného a alternativního průběhu (Zdroj: autor).....	54
Graf 12: Srovnání denního přírůstku úmrtí (Zdroj: autor).....	55
Graf 13: Srovnání nákladů (Zdroj: autor).....	55
Graf 14: Srovnání součtu opatření (Zdroj: autor)	56