

Výhľady epidémie Covidu a vplyv očkovania

Simon Košina, Martin Matějka

12. decembra 2021

1 Úvod

Táto práca sa zaoberá skúmaním vplyvu vakcinácie na šírenie vírusu SARS-CoV-2 a jej vplyve na počte úmrtí dôsledkom tohoto vírusu. Skúmaný je najmä vplyv variantu B.1.617.2 (Delta) [13], ktorého percentuálne zastúpenie v Českej republike ku dňu 23.7.2021 bolo 80-90% [7]. Zmyslom vykonaných experimentov na použitom modeli [11](sl. 7) je ukázať, že očkovanie má nezanedbateľný vplyv na kladný vývoj pandémie – výskyt ochorenia a úmrtnosť.

1.1 Odborní konzultanti a zdroje literatúry

MGR. PETR TRÍSKA, PHD - vedecký pracovník - 2. lekárska fakulta Univerzity Karlovy
ANDREJ KLUKA, M. SC. - programátor modelov - Ministerstvo zdravotníctva Slovenskej republiky

Väčšina literatúry pochádza z vyhľadávача odbornej literatúry scholar.google.com. Medzi konkrétne citované zdroje literatúry patria články z recenzovaných vedeckých časopisov venovaných medicíne ako [The Lancet](#), [Journal of the Royal Society](#) či archívov pre ešte nepublikované lekárske štúdie a články ako [MedRxiv](#). Ďalej všetky číselné fakty ako počty a štatistiky sú prebrané a citované zo stránok ourworldindata.org, opendatalab.cz či dáta [Českého statistického úradu](#).

1.2 Podmienky overovania validity modelu

Overenie validity modelu [11](sl. 37) prebiehalo tak, že boli porovnávané dáta zo štatistík v konkrétnom období s výsledkom simulácie [11](sl. 33) s inicializačnými hodnotami, ktoré odpovedajú štatistikám počiatku skúmaného obdobia. Boli porovnané dáta z roku 2020 bez vakcinácie a dáta z roku 2021 s vakcináciou. (3.3)

2 Rozbor témy a použitých metód/technológií

Vlastnosti a parametre vakcíny – akou je napríklad účinnosť ochrany proti infekcií – sú do veľkej miery ovplyvnené jej typom, preto ako skúmanú krajinu sme vybrali Českú republiku, a to kvôli majoritnému (CZ - 82% [9]) zastúpeniu konkrétneho typu vakcíny – BNT162b2 (Comirnaty) od spoločnosti Pfizer a BioNTech. Všetky konštanty a čísla, ktoré sú v súvislosti s vlastnosťami vakcíny použité, pochádzajú z výskumov týkajúcich sa tejto konkrétnej vakcíny.

Najdôležitejším parametrom vakcíny v našom modeli je jej **efektívnosť**, vyjadrená v percentách. Toto číslo udáva, *o koľko percent menej ľudí sa v populácii nakazí, pri kontakte s danou chorobou* a je počítané z pozorovania ľudí po podaní vakcíny, narozdiel od účinnosti vakcíny, ktorá je meraná v klinických testoch a je to pomer nakazených ľudí medzi skupinou, ktorá dostala placebo a skupinou, ktorá dostala vakcínu. [10]

Efektívnosť vakcín a miera protilátok v krvi časom klesá. Po prvých 4 mesiacoch, môže očkovaný jedinec stratiť až 40% ochrany pred infekciou, ktorú vakcína poskytuje. Táto efektívnosť platí na variant delta, pri ostatných variantoch je rádovo vyššia (okrem najnovšieho variantu omikron, ten ešte nie je dostatočne rozšírený na určovanie efektívnosti vakcíny) [17]. Pre vybraný model sme sa rozhodli použiť strednú hodnotu efektívnosti vakcíny, čo je **73%**, aby sme reflektovali klesajúcu efektívnosť vakcíny.

Dalším dôležitým parametrom je **miera prenosu vírusu**, tú dopočítavame podielom reprodukčného čísla vírusu a počtu obyvateľov. Toto číslo značne ovplyvňuje rýchlosť, akou sa vírus v modele šíri. [4]. Za zmienku stoja aj použité parametre z odborných publikácií ako $\gamma = 5.5 \cdot \text{deň}^{-1}$ (1/Doba inkubácie v dňoch), $\delta = 3.8 \cdot \text{deň}^{-1}$ (1/Trvanie infekčnosti), $\theta = 10 \cdot \text{deň}^{-1}$ (1/Počet dní do zotavenia), $\rho = 15 \cdot \text{deň}^{-1}$ (1/Počet dní do smrti). [5]

Model nezahŕňa niektoré faktory ako napr. počasie, štátne opatrenia, vekové kategórie, ochranu vakcinácie pred ťažkým priebehom, trasovanie ľudí a pod. Predpokladáme, že efekt týchto faktorov sa prejaví v iných vstupných premenných a to hlavne v miere prenosu vírusu a úmrtnosti.

Ostatné parametre – inicializačné počty stavových premenných a konštanty ako prirodzený prírastok obyvateľstva a prirodzený úbytok obyvateľstva, sú dopočítané na základe zverejnených štatistických údajov konkrétneho štátu, doplneného do modelu a popísané v ďalších kapitolách tejto práce.

2.1 Popis použitých postupov pre vytvorenie modelu

Dvomi z najčastejšie používaných typov modelov na ktoré sme narazili, boli rôzne modifikované epidemiologické SIR modely a veľmi komplikované agent-based modely – ako model od amerického Inštitútu pre šírenie infekčných chorôb [8] – ktoré brali v úvahu všetko od aktuálnych opatrení v štáte, vekové rozloženie, miera sociálneho kontaktu, až po očkovanie a premorenosť obyvateľstva. My sme sa rozhodli zvoliť modifikovaný SIR model, pretože v ostatných štúdiách tieto modely zvládli byť s relatívne veľkou mierou presnosti dobrou abstrakciou reality a taktiež kvôli vhodnosti jeho parametrov a zložiek na testovanie našich hypotéz.

Vybrané riešenie sme implementovali v jazyku C++, kvôli dostupnosti knižnice [SIMLIB](#). Pomocou tejto knižnice sme implementovali diferenciálne rovnice, použité vo vybranom modeli. Na vykresľovanie sme zvolili jazyk Python, pretože poskytuje knižnice na analýzu dát, ktoré sú vhodné pre túto prácu, a to konkrétne knižnice [seaborn](#) (vizualizácia dát) a [pandas](#) (spracovanie dát).

2.2 Popis pôvodu použitých metód

Knižnica SIMLIB bola prebraná z odkazu <https://www.fit.vutbr.cz/peringer/SIMLIB/>. Knižnica seaborn bola prebraná z odkazu <https://seaborn.pydata.org>. Knižnica pandas bola prebraná z odkazu <https://pandas.pydata.org/>. Model [6] bol prebraný z publikácie v časopise [mdpi.com](#).

3 Koncepcia

3.1 Zpôsob vyjadrenie konceptuálneho modelu

Pre modelovanie sme si vybrali kompartmentový systém [11](sl. 50), navrhnutý v článku [6]. Kompartimentové systémy sú vhodné pre simulovanie infekčných chorôb, pretože rozdeľujú populáciu do rôznych kompartmentov (náchylní, nakazení a pod.) a umožňujú ľuďom v populácii prechádzať z jedného kompartmentu do druhého. Takéto modeli môžu byť vyjadrené napríklad sústavou diferenciálnych rovníc, ktoré umožňujú pomerne jednoduchú analýzu.

Vybratý spojitý model [11](sl. 224) obsahuje sedem kompartmentov vhodných pre simuláciu pandémie Covid 19. Model sa skladá zo siedmich stavových premenných $S(t)$, $E(t)$, $I(t)$, $Q(t)$, $R(t)$, $D(t)$ a $V(t)$, predstavujúcich počet S - náchylných, E - vystavených (nakazených, ale ešte nie infekčných), I - infekčných (ešte nie v karanténe), Q - v karanténe (potvrdené prípady), R - prekonaných, D - zomrelých a V - vakcinovaných prípadov.

Rovnica pre stavovú premennú S, teda celkového počtu ľudí náchylných na ochorenie, závisí kladne na príbytku obyvateľov a záporne na počte ľudí, ktorí sa nakazia, sú zaočkovaní alebo zomrú inak ako na ochorenie Covid 19.

Zmena stavovej premennej E , počet ľudí, ktorí sú nakazení, no ešte nie infekční, závisí kladne na počte ľudí z kompartmentu S a V , ktorí sa nakazili. Z kompartmentu V ubúdajú ľudia, ktorí sa už stali infekčnými alebo zomreli prirodzenou smrťou.

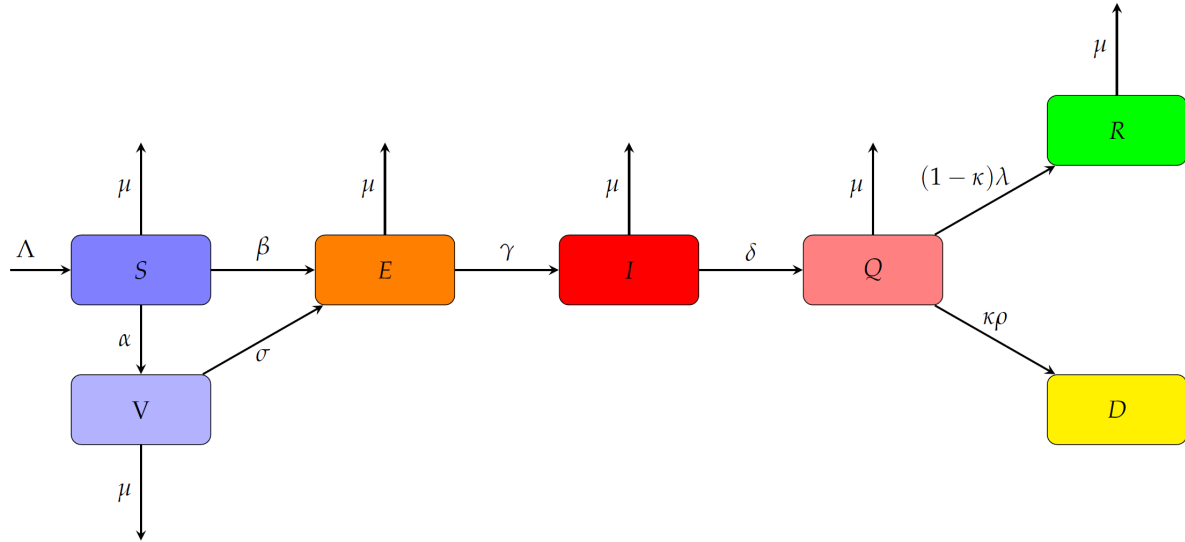
Stavová premenná I (nakazení ľudia) je kladne závislá na počte ľudí z kompartmentu E , u ktorých ubehla inkubačná doba choroby, t.j. stali sa infekčnými. Záporne je závislá na počte ľudí, u ktorých bola choroba zistená a boli presunutí do karantény a taktiež na počte ľudí z kompartmentu I , ktorí umreli prirodzenou smrťou.

Počet ľudí v karanténe Q kladne závisí na počte ľudí z kompartmentu I , u ktorých bola choroba zistená. Záporne potom závisí na počte ľudí z tohto kompartmentu, ktorí zomreli na ochorenie Covid 19, taktiež na počte ľudí, ktorí prežili a vyliečili sa (presúvajú sa do kompartmentu R). Opäť tu ubúdajú ľudia, ktorí zomreli prirodzenou smrťou.

Ako už bolo spomenuté, do kompartmentu R prichádzajú ľudia z kompartmentu Q , ktorí chorobu prežili a sú už vyliečení. Stavová premenná R je záporne závislá na počte ľudí, ktorí v danom kompartmente umrú prirodzenou smrťou.

Počet mŕtvych ľudí D , ktorí zomreli na ochorenie Covid 19, závisí kladne na počte ľudí z kompartmentu Q , ktorí sa nevyliečili a zomreli na chorobu.

Zmena stavovej premennej V je kladne závislá na počte ľudí z kompartmentu S , ktorí sa dali zaočkovať. V závislosti na neefektívnosti vakcíny odchádzajú ľudia z tohto kompartmentu do kompartmentu E . Stavová premenná V , je záporne závislá na počte ľudí, ktorí tu umrú prirodzenou smrťou.



Obr. 1: Znázornenie toku jedincov medzi jednotlivými zložkami modelu [6].

3.2 Konceptuálny model

Model je formálne reprezentovaný nasledujúcou sústavou obyčajných diferenciálnych rovníc [11](sl. 227):

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Lambda - \beta S(t)I(t) - \alpha S(t) - \mu S(t), \quad (\text{S})$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = \beta S(t)I(t) - \gamma E(t) + \sigma \beta V(t)I(t) - \mu E(t), \quad (\text{E})$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \gamma E(t) - \delta I(t) - \mu I(t), \quad (\text{I})$$

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \delta I(t) - (1 - \kappa)\theta Q(t) - \kappa \rho Q(t) - \mu Q(t), \quad (\text{Q})$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = (1 - \kappa)\theta Q(t) - \mu R(t), \quad (\text{R})$$

$$\frac{dD(t)}{dt} = \kappa \rho Q(t), \quad (\text{D})$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \alpha S(t) - \sigma \beta V(t)I(t) - \mu V(t), \quad (\text{V})$$

s nezápornými počiatočnými podmienkami $S(0) = S_0$, $E(0) = E_0$, $I(0) = I_0$, $Q(0) = Q_0$, $R(0) = R_0$, $D(0) = D_0$ a $V(0) = V_0$. Parametre modelu potom sú:

- Λ - počet prírastku obyvateľstva za deň,
- β - miera prenosu vírusu za deň,
- α - miera príbytku zaočkovaných ľudí za deň,
- μ - miera úbytku obyvateľstva za deň,
- γ - 1 / doba inkubácie v dňoch,
- σ - miera neefektívnosti vakcíny,
- δ - 1 / trvanie infekčnosti,
- κ - úmrtnosť (CFR),
- θ - 1 / počet dní do zotavenia,
- ρ - 1 / počet dní do smrti (kvôli ochoreniu Covid 19).

Miera neefektívnosti vakcíny σ leží v intervale $[0, 1]$, efektívnosť vakcíny (2) sa potom jednoducho dopočíta ako $1 - \sigma$. V pôvodnom článku [6] je namiesto efektívnosti vakcíny použitá jej účinnosť. Vzhľadom na to, že už máme k dispozícii dáta z väčších populácií, nie len dáta z klinických testov, sme sa rozhodli namiesto účinnosti vakcíny použiť efektívnosť vakcíny [10].

Miera prenosu vírusu za deň β sa vypočíta ako reprodukčné číslo R / počet obyvateľov. Hodnotu tohoto parametru je pomerne náročné určiť, keďže dostupné dáta nemusia úplne presne odrážať realitu. Preto sme sa po konzultácii s modelárom (1.1) rozhodli túto hodnotu upraviť tak, aby výstup modelu odrážal dostupné dáta.

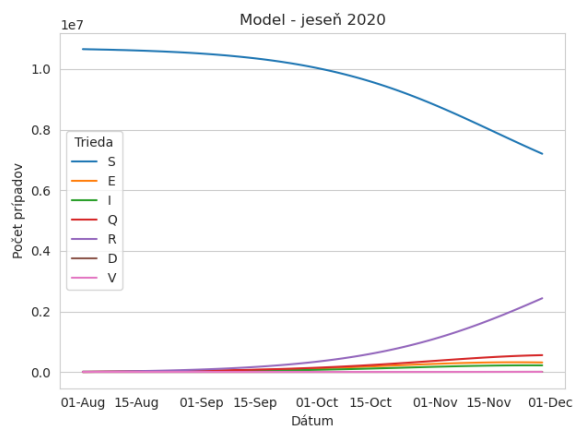
3.3 Testovanie modelu - bez vakcinácie

Navrhnutý model bol porovnaní s dátami z obdobia 1.8.2020 až 31.11.2020 [14], kedy ešte neprebíhala vakcinácia obyvateľov v ČR. Významne sa začalo očkovať až na konci roku 2020 [16]. Použitý bol interval 4 mesiacov, keďže ten približne odpovedal oblasti validity modelu [6][11](sl. 37). Počiatočnú hodnotu kompartmentu **S** bola dopočítaná ako $S_0 = N_0 - E_0 - I_0 - V_0 - D_0 - R_0$. Počet ľudí v karanténe sme určili približne na základe dát z [9] a hodnoty E_0 , I_0 boli nastavené na trojnásobok Q_0 , podobne ako v [6]. Hodnota parametru κ , bola mierne upravená oproti skutočnej hodnote, keďže CFR nie vždy úplne presne odpovedá skutočnému riziku úmrtnia [15].

Parameter	Popis	Hodnota	Zdroj
N_0	Celkový počet obyvateľov	10 699 142	[1]
S_0	Počet ľudí náchylných k ochoreniu	10 659 707	dopočítané
E_0	Počet ľudí vystavených ochoreniu	8 973	dopočítané
I_0	Počet infekčných ľudí	8 973	dopočítané
Q_0	Počet ľudí v karanténe	2 991	[9]
R_0	Počet ľudí, ktorí prekonali ochorenie	13 338	[9]
D_0	Počet úmrtí	382	[9]
V_0	Počet očkovaných ľudí	0	-
Λ	Počet prírastku obyvateľstva za deň	815	[1]
β	Miera prenosu vírusu deň	$3.5 \cdot 10^{-6} \%$	dopočítané
α	Miera príbytku zaočkovaných ľudí za deň	0%	-
μ	Miera úbytku obyvateľstva za deň	$3.3 \cdot 10^{-3} \%$	[1]
γ	1 / Doba inkubácie v dňoch	1/5.5 [deň]	[5]
σ	Miera neefektívnosti vakcíny	100 %	-
δ	1 / Trvanie infekčnosti	1/3.8 [deň]	[5]
κ	Úmrtnosť (CFR)	0.05 %	dopočítané
θ	1 / Počet dní do zotavenia	1/10 [deň]	[5]
ρ	1 / Počet dní do smrti	1/15 [deň]	[5]

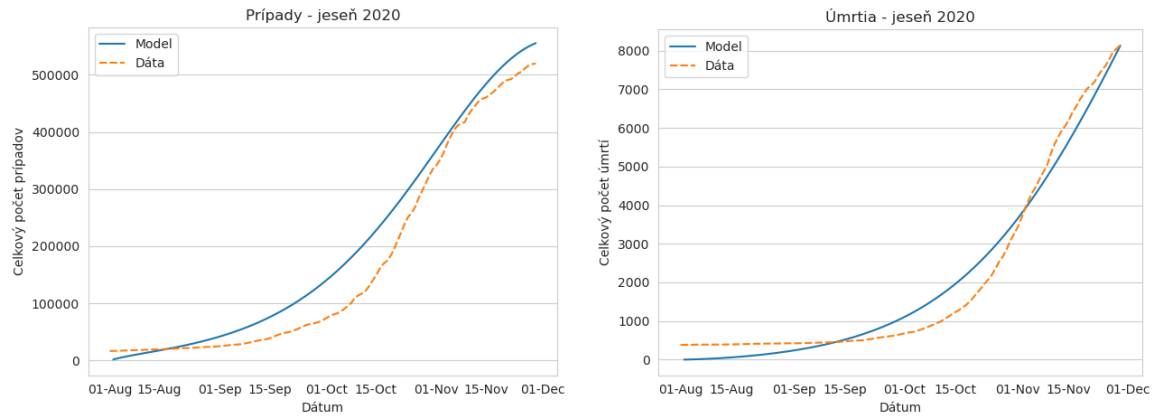
Tabuľka 1: Vstupné parametre modelu pre obdobie 1.8.2020 až 30.11.2020.

Výstupom simulácie, bližšie popísanej v (4), sú nasledovné výsledky:



Obr. 2: Výstup modelu pre obdobie 1.8.2020 až 30.11.2020, bez vakcinácie obyvateľstva.

Z týchto hodnôt boli ďalej vypočítané celkové počty prípadov, úmrtí a tie sme porovnali so skutočnými dátami [14].



Obr. 3: Porovnanie výsledkov simulácie so skutočnými dátami pre obdobie 1.8.2020 až 30.11.2020, bez vakcinácie obyvateľstva.

3.4 Testovanie modelu - s vakcináciou

Podobne ako v (3.3) je náš model porovnaný so skutočnými dátami, teraz už v relatívne vakcínovanej populácii ČR. Úmrtnosť je oproti predošlému modelu znížená, kvôli vplyvu vakcíny [17]. Časový interval je posunutý o približne mesiac, keďže tohtoročná vlna Covidu 19 začala neskôr [9]. Vzhľadom na to, že naposledy máme k dispozícii dáta z 10.12.2021 bol interval skrátený na 100 dní.

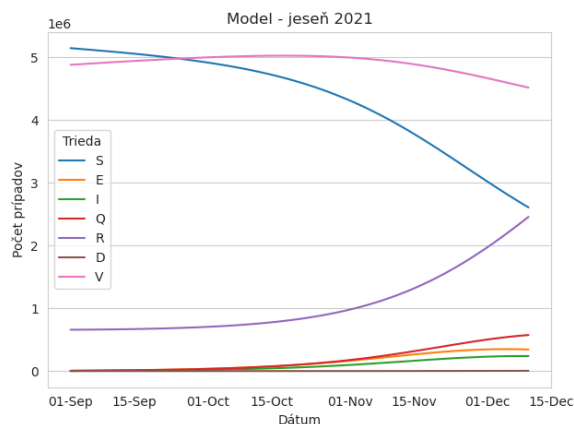
Väčšina pacientov prekonala koronavírus v období medzi októbrom 2020 a májom 2021 [9], čo znamená, že ich odolnosť voči vírusu už klesla [3] preto z pôvodných 1 647 761 [9] bolo do kompartmentu **R** zahrnutých len 40 %, teda 659 104, a do kompartmentu **S** je zahrnutých zvyšných 60 %, teda 988 656. Tento podiel sme zistili experimentálne na pokusoch s modelom.

Počet úmrtí je 0, keďže skúmame len úmrtia za dané obdobie. Aby sme reflektovali účinnosť vakcíny je E_0, I_0 nastavené len na dvojnásobok hodnoty Q_0 . Ľudí sme brali ako zaočkovaných, len ak podstúpili obe 2 dávky vakcíny.

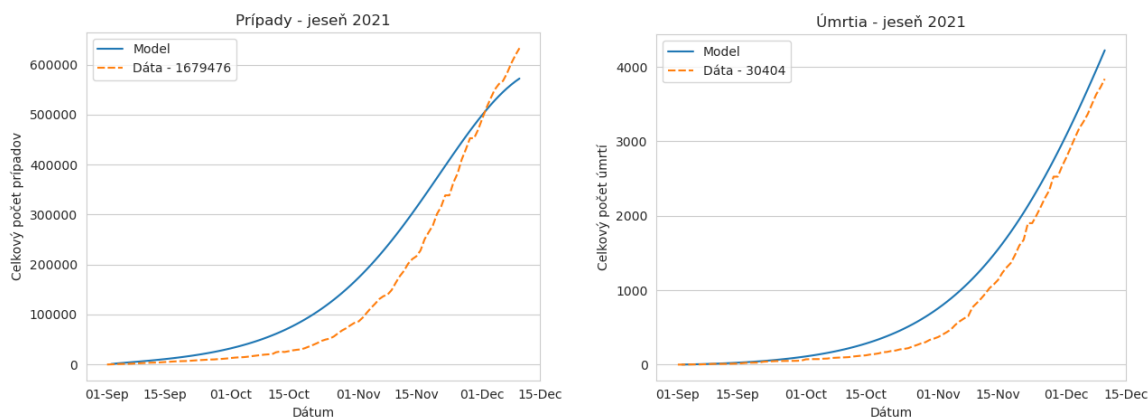
Efektívnosť vakcíny je braná na základe údajov z rozboru (2).

Parameter	Popis	Hodnota	Zdroj
N_0	Celkový počet obyvateľov	10 702 942	[2]
S_0	Počet ľudí náchylných k ochoreniu	5 148 580	dopočítané
E_0	Počet ľudí vystavených ochoreniu	4 934	dopočítané
I_0	Počet infekčných ľudí	4 934	dopočítané
Q_0	Počet ľudí v karanténe	2 467	[9]
R_0	Počet ľudí, ktorí prekonali ochorenie	656 830	dopočítané
D_0	Počet úmrtí	0	-
V_0	Počet očkovaných ľudí	4 882 923	[16]
Λ	Počet prírastku obyvateľstva za deň	899	[2]
β	Miera prenosu vírusu deň	$6.6 * 10^{-6}$ %	dopočítané
α	Miera prírastku zaočkovaných ľudí za deň	0.1 %	[16]
μ	Miera úbytku obyvateľstva za deň	$3.96 * 10^{-5}$ %	[2]
γ	1 / Doba inkubácie v dňoch	1/5.5 [deň]	[5]
σ	Miera neefektívnosti vakcíny	27 %	[12]
δ	1 / Trvanie infekčnosti	1/3.8 [deň]	[5]
κ	Úmrtnosť (CFR)	0.035 %	dopočítané
θ	1 / Počet dní do zotavenia	1/10 [deň]	[5]
ρ	1 / Počet dní do smrti	1/15 [deň]	[5]

Tabuľka 2: Vstupné parametre modelu pre obdobie 10.9.2021 až 10.12.2021.



Obr. 4: Výstup modelu pre obdobie 1.9.2021 až 10.12.2021.



Obr. 5: Porovnanie výsledkov simulácie so skutočnými dátami pre obdobie 1.9.2021 až 10.12.2021. Skutočné dáta boli zarovnané a teda nezahŕňajú údaje z minulosti.

4 Architektúra simulačného modelu

Konceptuálny model je implementovaný v jazyku C++ za pomoci knižnice SIMLIB. Model je reprezentovaný štruktúrou, ktorá obsahuje integrátor [11](sl. 267) pre každú z diferenciálnych rovníc. Priebeh hodnôt týchto stavových premenných v čase je následne numericky [11](sl. 236) vypočítaný pomocou metódy Runge-Kutta 4. rádu [11](sl. 244). Počas simulácie sú hodnoty jednotlivých premenných a modelového času [11](sl. 21) vypisované do .csv súboru s časovým krokom 1 deň. Dáta sú následne spracované a vizualizované skriptom v Pythone.

5 Podstata simulačných experimentov a ich priebeh

V tejto kapitole budeme simulačnými experimentami ukazovať, aký vplyv má efektívnosť vakcíny na výskyt ochorenia a aký vplyv má percento zaočkovaných ľudí na výskyt a úmrtnosť ochorenia.

5.1 Postup experimentovania

Pri prvej sade experimentov je skúmaný vplyv efektívnosti vakcíny na počet prípadov a úmrtí. V druhej sade experimentov sa skúma vplyv miery zaočkovania populácie na rovnaké metriky. V poslednej sade sa skúmajú prípady rôznej efektívnosti vakcín pri rôznych mierach zaočkovanosť populácie.

5.2 Dokumentácia jednotlivých experimentov

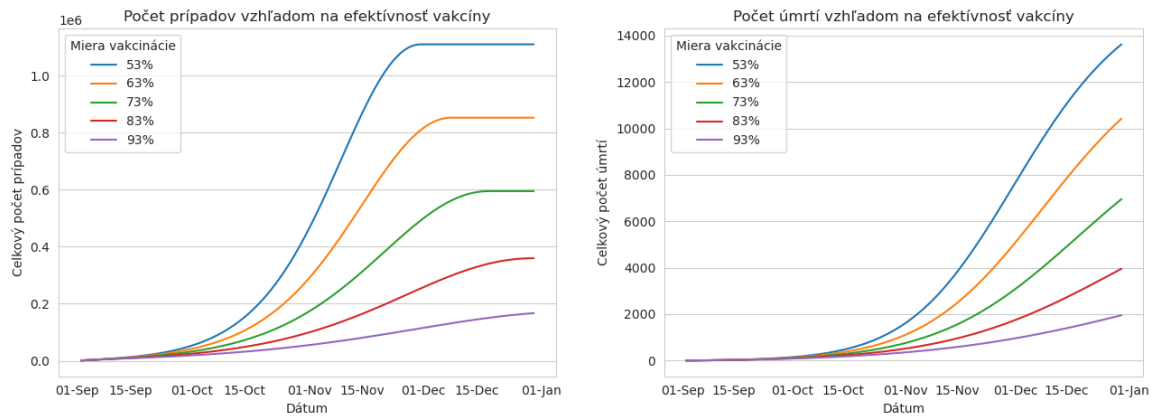
5.2.1 Experimenty s efektívnosťou vakcín

Zdroje tvrdia, že efektívnosť vakcín sa pohybuje v rozmedzí 53% až 93% [17] v závislosti napríklad na uplynulej dobe od podania vakcíny. Samozrejme očakávame, že zvýšená efektívnosť bude mať kladný vplyv na počet prípadov a úmrtí, no chceme tento vplyv kvantifikovať.

Simulácie trvali 120 dní modelového času. Menená bola len efektívnosť, resp. neefektívnosť vakcíny, ostatné parametre sú zhodné s modelom v (3.4). Pre skúmanie sme vybrali 5 rôznych hodnôt efektívnosti vakcíny rovnomerne rozložených v spomínanom intervale 53% až 93% a to 53%, 63%, 73%, 83% a 93%.

Parameter	Popis	Hodnota	Zdroj
σ	Miera neefektívnosti vakcíny	7, 17, 27, 37 a 47 %	[12]

Tabuľka 3: Modifikácia vstupných parametrov pre experiment s efektívnosťou vakcíny.



Obr. 6: Z výsledkov experimentov je vidno, že efektívnosť vakcíny má približne lineárny vzťah s celkovým počtom prípadov a úmrtí.

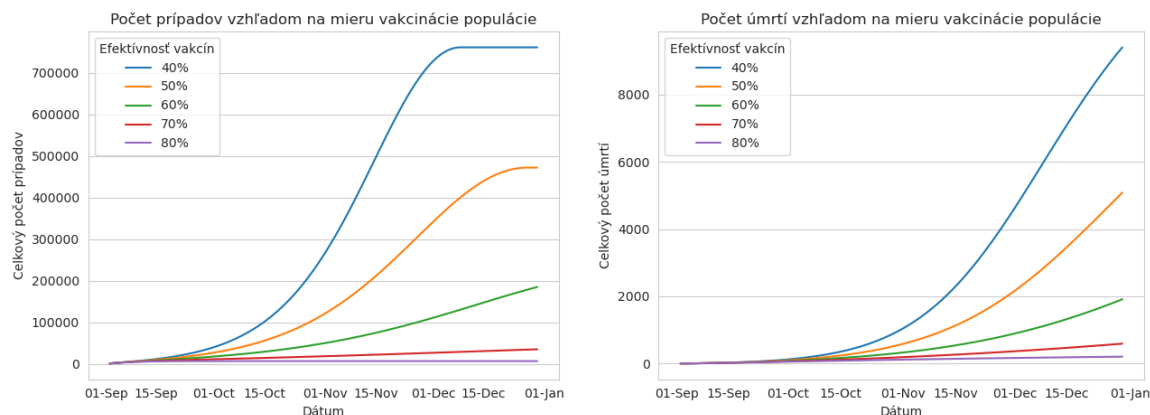
5.2.2 Experimenty s percentom zaočkovanosti populácie

Ďalším často spomínaným údajom v súvislosti s vírusom Covid 19 je miera zaočkovanosti populácie. Rozhodli sme sa zistiť vplyv tejto veličiny na vývoj situácie. Aktuálna miera zaočkovanosti populácie v Českej republike je približne 60% [16], iné krajiny ako napr. Portugalsko dosahujú až necelých 90% [14], zatiaľ čo Slovensko malo donedávna len 40% [14]. Pre skúmanie boli teda vybrané miery zaočkovania populácie 40%, 50%, 60%, 70% a 80%.

Ostatné vstupné parametre modelu boli opäť rovnaké ako v simulácii (3.4) a simulácia taktiež trvala 120 dní modelového času. Efektívnosť vakcíny bola ponechaná na strednej hodnote 27% [17] a miera príbytku zaočkovaných ľudí je tiež rovnaká a to 0.1 % [16].

Parameter	Popis	Hodnota	Zdroj
N_0	Celkový počet obyvateľov	10 702 942	[2]
V_0	Počet očkovaných ľudí	$N_0 * \{0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8\}$	[16]

Tabuľka 4: Modifikácia vstupných parametrov pre experiment s mierou zaočkovania populácie.



Obr. 7: Vidno, že miera zaočkovania populácie drasticky ovplyvňuje celkový počet prípadov a úmrtí. Pri hodnotách 70% a 80% je zrejmé, že kladný efekt miery zaočkovania populácie postupne klesá.

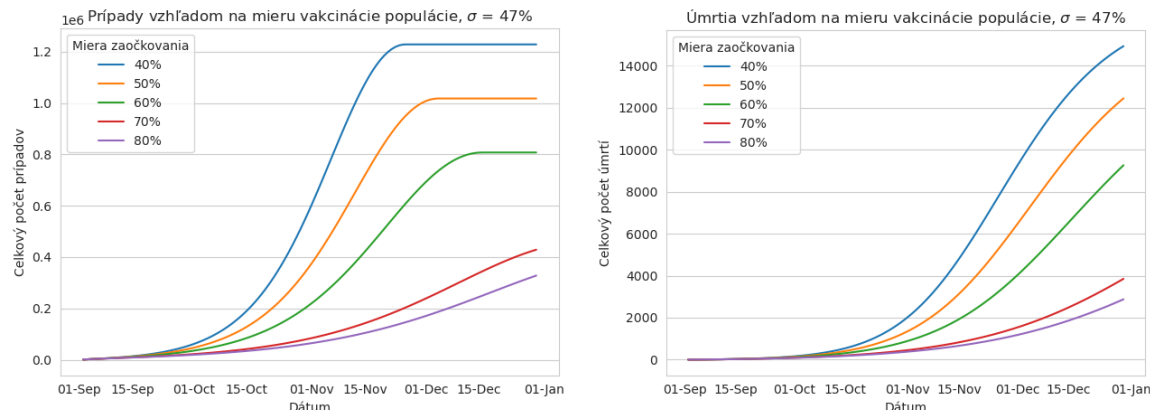
5.2.3 Experiment s kombináciami parametrov efektívnosti vakcín a zaočkovanosť populácie

Z predchádzajúcich experimentov je zrejmé, že miera zaočkovania populácie má pomerne vysoký dopad na vývoj pandémie. Ďalej sme chceli zistiť, aký bude mať miera zaočkovania populácie vplyv na vývoj počtu prípadov a úmrtí pri rôznych hodnotách efektívnosti, resp. neefektívnosti vakcín.

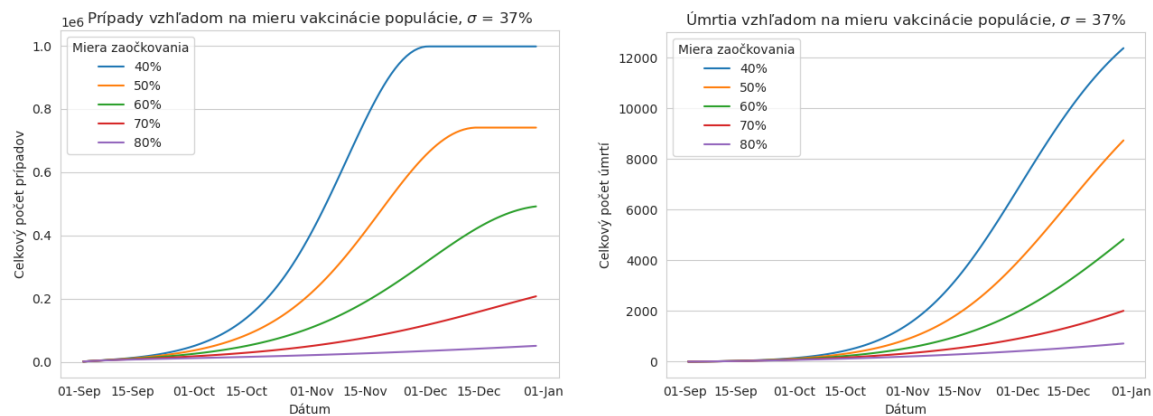
Parameter	Popis	Hodnota	Zdroj
N_0	Celkový počet obyvateľov	10 702 942	[2]
V_0	Počet očkovaných ľudí	$N_0 * \{0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8\}$	Experimentálne
σ_0	Miera neefektívnosti vakcíny	$\{7, 17, 27, 37, 47\}\%$	Experimentálne

Tabuľka 5: Modifikácia vstupných parametrov. Experimenty boli vykonané pre každú kombináciu parametrov.

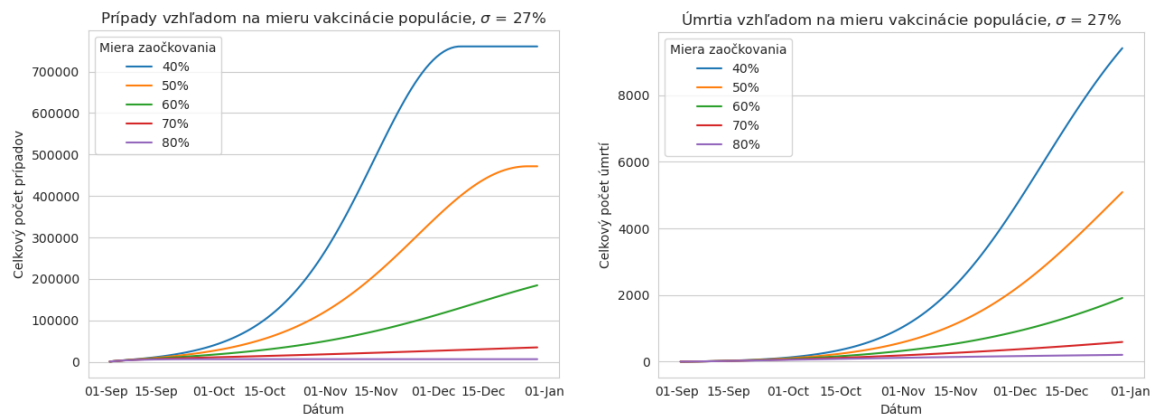
Následujúce grafy predstavujú výstupy experimentov pri jednotlivých kombináciách parametrov z tabuľky 5.



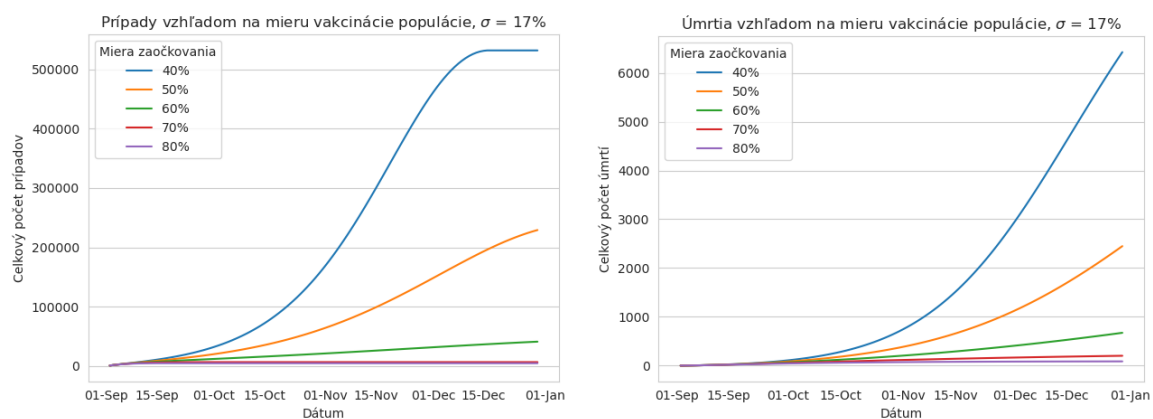
Obr. 8: Oproti ostatným experimentom s mierou zaočkovania neklesá počet prípadov, až tak výrazne.



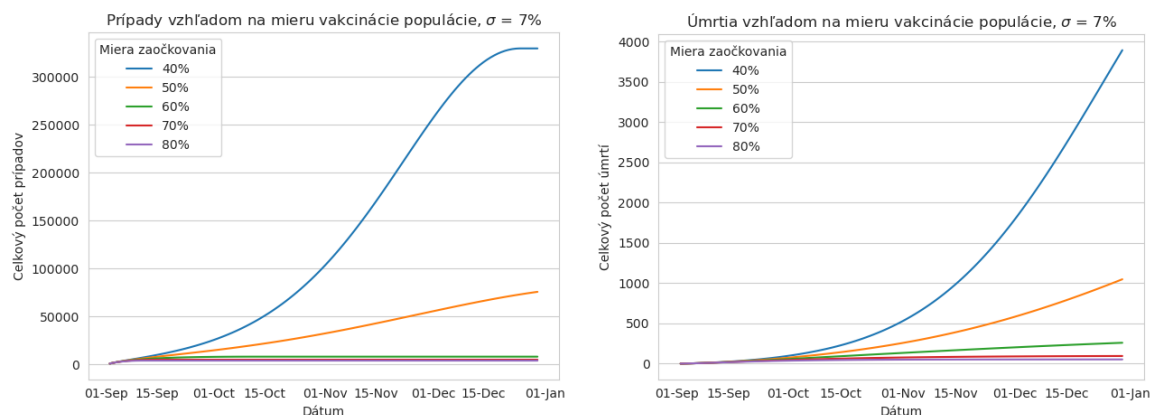
Obr. 9: Zvýšená miera vakcinácie populácie sa začína výrazne prejavovať.



Obr. 10: Zvýšená miera vakcinácie má opäť väčší efekt.



Obr. 11: Pomaly sa začínajú strácať rozdiely medzi vyššími mierami zaočkovania.



Obr. 12: Takmer žiaden rozdiel pre miery zaočkovania nad 60%.

Z výsledkov experimentov vyplýva, že aj pri nižšej efektívnosti vakcíny má očkovanie veľký vplyv na šírenie vírusu, ak je vakcínovaná pomerne veľká časť populácie.

6 Zhrnutie výsledkov a záver

Z výsledkov experimentov vychádza, že zaočkovanosť výrazne **znižuje** riziko vzniku infekcie a tým **znižuje** úmrtnosť a to aj pri menšej efektívnosti vakcíny. Samozrejme, že výsledky sú platné, len za predpokladu, že model je validný. Validitu modelu sme sa pokúsili ukázať v kapitole 3.3 a 3.4. Model však vychádza z aktuálnych znalostí o víruse Covid 19 a výsledky preto nemusia odpovedať v prípade nových variánt vírusu.

6.1 Recenzia konzultanta

Z mojich skúseností v modelovaní Covidu som s prácou veľmi spokojný. Rovnako ako oni, sme na MZ (Ministerstve zdravotníctva) začínali s kompartmentovými modelmi, vďaka ich časovej nenáročnosti. Tieto modely dokonca ešte jednoduchšie, ako ten prezentovaný v tejto práci. Sú však veľmi limitované z pohľadu nastavovania verejných politík. Preto sme boli aj my v praxi nútení prejsť na agent-based simuláciu. Kompartmentálne modely vedia dobre predpovedať ako by sa situácia vyvíjala, keby nedochádzalo k zmenám v epidemiologických opatreniach – tie sú aspoň na Slovensku veľmi nestabilné.

- Andrej Kluka, M. Sc.

Literatúra

- [1] *Pohyb obyvateľov*. Český statistický úrad. Prebrané: 2021-12-8. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/stav-a-pohyb-obyvatelstva-v-cr-1-pololeti-2020>.
- [2] *Pohyb obyvateľov*. Český statistický úrad. Prebrané: 2021-12-8. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/stav-a-pohyb-obyvatelstva-v-cr-1-pololeti-2021>.
- [3] CHEN, J., LIU, X., ZHANG, X., LIN, Y., LIU, D. et al. Decline in neutralising antibody responses, but sustained T-cell immunity, in COVID-19 patients at 7 months post-infection. *Clinical & Translational Immunology*. 2021, zv. 10, č. 7, s. e1319. DOI: <https://doi.org/10.1002/cti2.1319>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cti2.1319>.
- [4] COBURN, B., WAGNER, B. a BLOWER, S. *Modeling influenza epidemics and pandemics: insights into the future of swine flu (H1N1)*. 2009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/1741-7015-7-30>.

- [5] EVENSEN, G., AMEZCUA, J., BOCQUET, M., CARRASSI, A., FARCHI, A. et al. An international assessment of the COVID-19 pandemic using ensemble data assimilation. *MedRxiv*. Cold Spring Harbor Laboratory Press. 2020. DOI: 10.1101/2020.06.11.20128777. Dostupné z: <https://www.medrxiv.org/content/early/2020/06/12/2020.06.11.20128777>.
- [6] GHOSTINE, R., GHARAMTI, M., HASSROUNY, S. a HOTEIT, I. An Extended SEIR Model with Vaccination for Forecasting the COVID-19 Pandemic in Saudi Arabia Using an Ensemble Kalman Filter. *Mathematics*. 2021, zv. 9, č. 6. DOI: 10.3390/math9060636. ISSN 2227-7390. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2227-7390/9/6/636>.
- [7] JIŘINCOVÁ, H. Výsledky sledování variant SARS-CoV-2 celogenomovou sekvencí a diskriminačními PCR v ČR 2021 – k 23.7.2021. 2021. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/szu/aktual/tiskova_zprava/Pravidelna_zprava_NRL_k_mutacim_SARS-CoV_2_26.7..pdf.
- [8] KERR, C. C., STUART, R. M., MISTRY, D., ABEYSURIYA, R. G., ROSENFELD, K. et al. Covasim: An agent-based model of COVID-19 dynamics and interventions. *PLOS Computational Biology*. Public Library of Science. Júl 2021, zv. 17, č. 7, s. 1–32. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1009149. Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1009149>.
- [9] KOMENDA, M., PANOŠKA, P., BULHART, V., ŽOFKA, J., BRAUNER, T. et al. *COVID-19: Přehled aktuální situace v ČR: Onemocnění aktuálně* [online]. Praha: Ministerstvo zdravotnictví ČR: [b.n.], 2020 [cit. 2021-12-8]. Dostupné z: <https://onemocneni-aktualne.mzcr.cz/covid-19>.
- [10] ORGANIZATION, W. H. *Vaccine efficacy, effectiveness and protection*. 2021. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/vaccine-efficacy-effectiveness-and-protection>.
- [11] PERINGER, P. AND HRUBÝ, M.. *Prezentace: Modelování a simulace* [<https://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IMS/public/prednasky/IMS.pdf>]. 2021 [cit. 2021-12-11].
- [12] POLACK, F. P., THOMAS, S. J., KITCHIN, N., ABSALON, J., GURTMAN, A. et al. Safety and Efficacy of the BNT162b2 mRNA Covid-19 Vaccine. *New England Journal of Medicine*. 2020, zv. 383, č. 27, s. 2603–2615. DOI: 10.1056/NEJMoa2034577. PMID: 33301246. Dostupné z: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2034577>.
- [13] RIO, C. del, MALANI, P. N. a OMER, S. B. Confronting the Delta Variant of SARS-CoV-2, Summer 2021. *JAMA*. September 2021, zv. 326, č. 11, s. 1001–1002. DOI: 10.1001/jama.2021.14811. ISSN 0098-7484. Dostupné z: <https://doi.org/10.1001/jama.2021.14811>.
- [14] RITCHIE, H., MATHIEU, E., RODÉS GUIRAO, L., APPEL, C., GIATTINO, C. et al. Coronavirus Pandemic (COVID-19). *Our World in Data* [online]. 2020, [cit. 2021-12-9]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/coronavirus>.
- [15] RITCHIE, H., MATHIEU, L., APPEL, C., GIATTINO, C., ORTIZ OSPINA, E. et al. Coronavirus Pandemic (COVID-19). *Our World in Data* [online]. 2020, [cit. 2021-12-9]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/covid-mortality-risk>.
- [16] SUŠICKÝ, M. a STANĚK, J. *COVID-19 očkování* [online]. Praha: ČVUT, Fakulta informačních technologií: [b.n.], 2021 [cit. 2021-12-11]. ISSN 2787-9925. Dostupné z: <https://ockovani.opendatalab.cz>.
- [17] TARTOF, S. Y. Effectiveness of mRNA BNT162b2 COVID-19 vaccine up to 6 months in a large integrated health system in the USA: a retrospective cohort study. *The Lancet*. October 2021, zv. 398, č. 10309, s. 1407–1416. Dostupné z: [https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736\(21\)02183-8.pdf](https://www.thelancet.com/pdfs/journals/lancet/PIIS0140-6736(21)02183-8.pdf).