

Modelování epidemií

Radek Pelánek

Epidemie ovlivňují dějiny a ekonomiku

- černý mor $\Rightarrow$ sociální nepokoje
- zámořská expanze Evropy
 - až 95 % domorodých obyvatel vymřelo na evropské nemoci, nikoliv na evropské zbraně
 - Evropané většinou neonemocněli (proč?)
- Covid

Epidemie lze interpretovat mnoha způsoby

- nemoci
- počítačové viry
- šíření (dez)informací
- názory, postoje
- módní trendy, technologické novinky
- „virální marketing“

Epidemie: společné vlastnosti, rozdíly

Co mají společné? V čem se liší?

- nemoci: Covid, AIDS, malárie
- počítačový virus
- šíření hoaxu
- šíření nové módní značky
- názory na kandidáty na prezidenta

Shnutí motivace

- široké **aplikace**
- **významné téma**, finanční podpora (např. Covid, AIDS, bio-terorismus)
- relativně snadné **modelování**
- ilustrace různých přístupů k modelování

Epidemie: otázky

- Proč mají epidemie **různou dynamiku** (stabilní stav, mírné oscilace, nepravidelné velké epidemie)?
- Jak ovlivňuje **struktura kontaktů** dynamiku epidemie?
- Jaká jsou vhodná **preventivní** opatření? Kdy a jak zavádět karanténu?
- Jak cílit **imunizaci**?

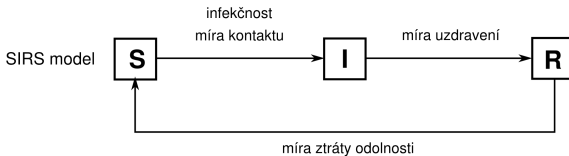
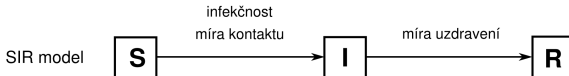
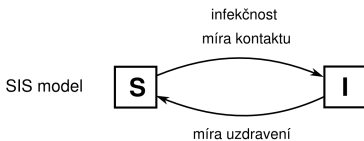
Základní typy modelů

SIS Susceptible – Infected – Susceptible

SIR Susceptible – Infected – Recovered/Removed/Resistant

SIRS Susceptible – Infected – Resistant – Susceptible

Základní typy modelů



SIS model

SIS = Susceptible – Infected – Susceptible

$$\begin{aligned}dS/dt &= -\beta SI + \gamma I \\dI/dt &= \beta SI - \gamma I\end{aligned}$$

po algebraických úpravách ekvivalentní:

$$dY/dt = rY(1 - Y/K)$$

což je rovnice pro **logistický růst**, tj. chování tohoto jednoduchého modelu směřuje vždy k **rovnovážnému** stavu

SIR model

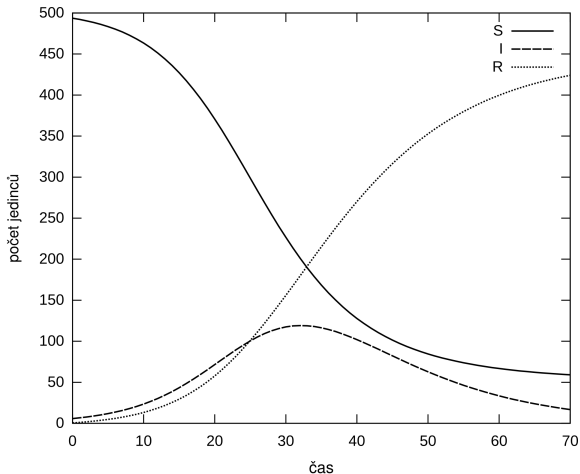
SIR = Susceptible – I – Removed (Resistant)

základní „Kermack-McKendrick model“

$$\begin{aligned}dS/dt &= -\beta SI \\dI/dt &= \beta SI - \gamma I \\dR/dt &= \gamma I\end{aligned}$$

epidemie propukne pouze pokud $\beta S/\gamma > 1$ (threshold)

SIR: Výsledky simulace



SIR: Srovnání s realitou

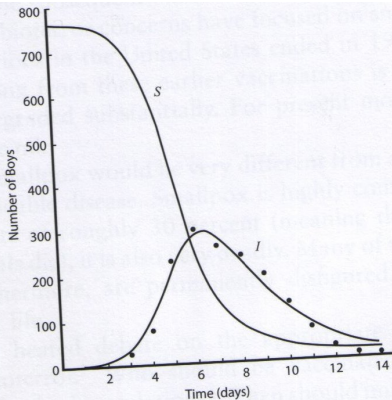
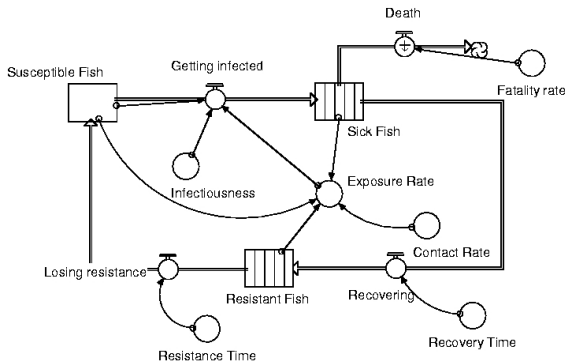


Figure 12.P.3. Influenza epidemic data, 1978, English boarding school. Of 763 boys, 512 were confined to bed, 22 January–February 1978. (Source: *British Medical Journal*, 4 March 1978.)

SIRS model

SIRS = Susceptible - Ill - Resistant - Susceptible

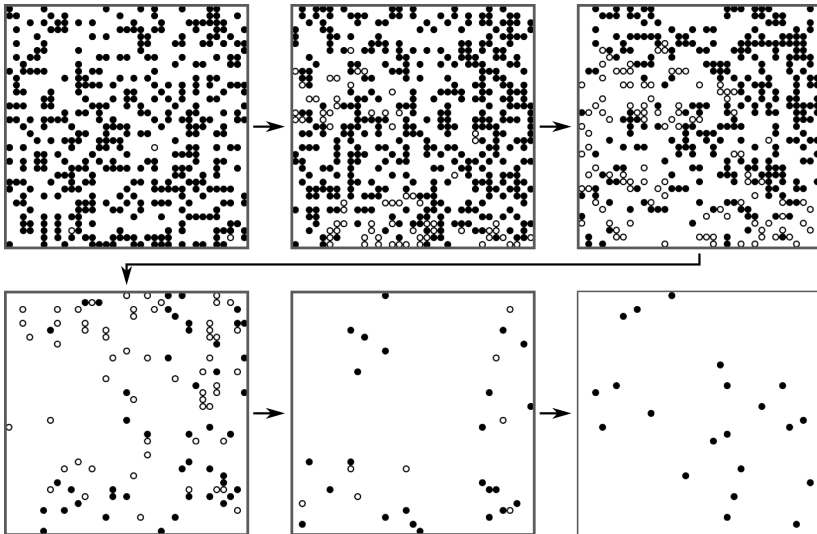


Modely s agenty

základní model:

- agenti se pohybují po prostoru
- každý má svůj stav (S, I, R)
- při kontaktu možnost přenosu nemoci

SIR: Simulace



SIR: Výsledky simulace, srovnání

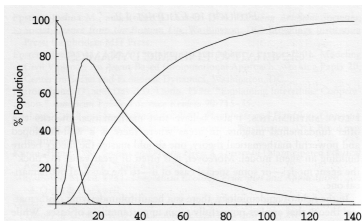


Figure 12.P.1. Illustrative time series solution. Note: $S(t)$ is monotonically decreasing, $R(t)$ monotonically increasing, and $I(t)$ rises and then falls.

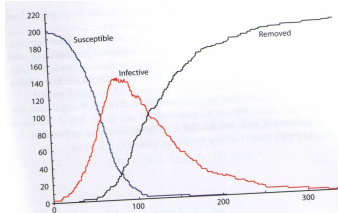
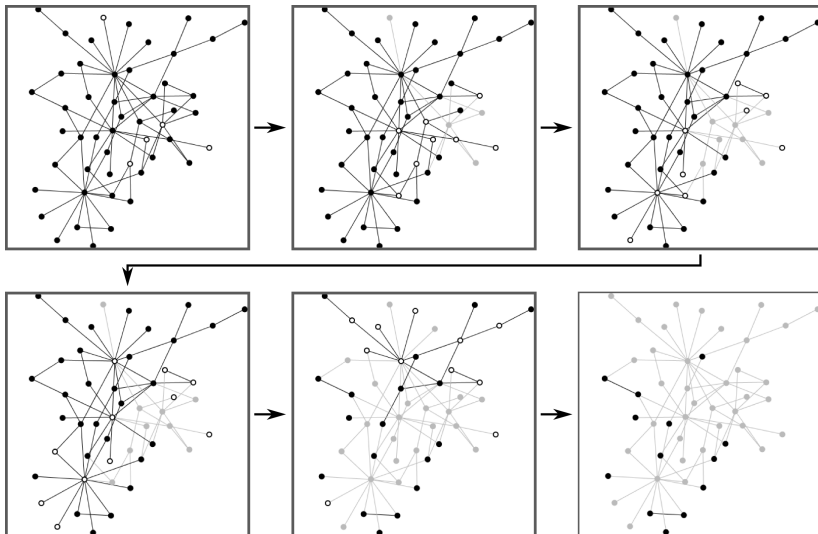


Figure 12.P.2. Agent time series.

Vliv topologie sítě

- standardní model – homogenní prostředí
- jaký vliv má topologie sítě, po které se epidemie šíří?

SIR: Simulace

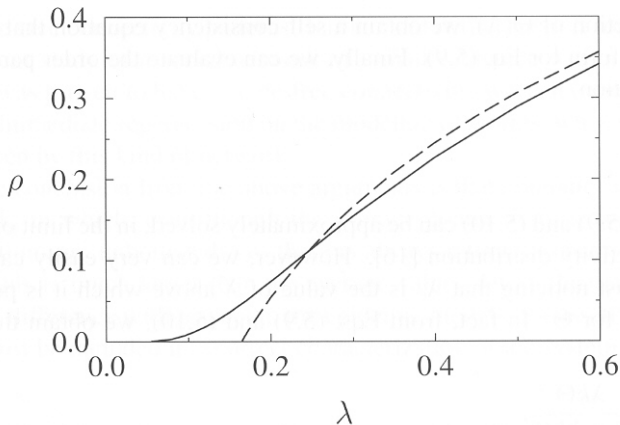


Epidemie v bezškálovitých sítích

- **neexistuje kritická hranice** – i viry s velmi malou nakažlivostí se mohou rozšířit (díky uzlům s vysokým stupněm)
- uniformní imunizace je poměrně neúčinná
- **cílená imunizace** (zasahující hlavně uzly s vysokým stupněm) však může být velmi účinná

Praktické poučení: např. pro boj s AIDS.

Epidemie v bezškálovitých sítích



Rozšíření základních modelů

- kontakty v rámci populace
- heterogenita populace
- populační dynamika, čas
- zásahy proti epidemii
- mutace

Kontakty v rámci populace

seřazeno podle míry abstrakce:

- homogenní
- subpopulace (ostrovy, sociální skupiny)
- abstraktní model společenského života
- sociální síť
- konkrétní data

Heterogenita populace

- věk
- imunita
- množství kontaktů

Populační dynamika, čas

- důležité u nemocí s trvalou imunitou (SIR)
- populační dynamika – trvalý přísun nových obětí
- další časové hledisko: např. roční období (viz chřipka)

Zásahy proti epidemii

- vakcinace
 - preventivní
 - plošná
 - cílená (subpopulace, sledování kontaktů)
- snížení množství kontaktů (karanténa, izolace)
- vybití nemocných (příp. i zdravých)

„povzbuzení“ epidemie v případě marketingu, šíření informací
(např. reklama plošná vs cílená)

Mutace nemocí

- nové varianty nemocí (např. chřipka)
- rozlišení mezi stavem „náchylný“ a „odolný“ nemusí být dostatečné
- koevoluce mezi populací (lékem) a virem
(Sexual reproduction as an adaptation to resist parasites, resistance vůči antibiotikům)
- využití genetických algoritmů

Příklady aplikací

- jednoduché modely: cvičení, Netlogo models library
- středně složitý model: neštovice
- rozsáhlý systém: EpiSimS

Netlogo models library

- Biology / HIV
 - model s agenty v prostoru
 - vytváření párů (nastavitelná „stálost“)
 - preventivní opatření (kondomy, testy)
- Biology / Virus
 - variace na SIRS
 - kombinace s populační dynamikou
- Networks / Virus on a Network
 - model na síti
 - kombinace SIS/SIR

Netlogo models library

Curricular Models / epiDEM

- Basic
 - základní SIR model (variace na Kermack-McKendrick)
- Basic, Travel and Control
 - rozšířená práce s prostorem
 - subpopulace

Covid: jednoduché ilustrační modely

březen 2020, začátek epidemie, modely osvětlující základní principy šíření epidemie

- 3Blue1Brown: Exponential growth and epidemics

<https://www.youtube.com/watch?v=KasOtIxDvrg>

- 3Blue1Brown: Simulating an epidemic

<https://www.youtube.com/watch?v=gxAa02rsdIs>

- Why outbreaks like coronavirus spread exponentially, and how to “flatten the curve”

<https://www.washingtonpost.com/graphics/2020/world/corona-simulator/>

- Tomas Pueyo: Coronavirus: Why You Must Act Now

<https://tomaspueyo.medium.com/coronavirus-act-today-or-people-will-die-f4d3d9cd99ca>

- Tomas Pueyo: Coronavirus: The Hammer and the Dance

<https://tomaspueyo.medium.com/coronavirus-the-hammer-and-the-dance-be9337092b56>

Model neštovic

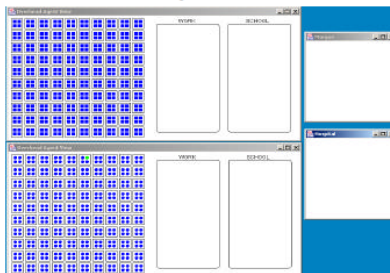
Toward a containment strategy for smallpox bioterror: An individual-based computational approach

- středně složitý model
- reálné parametry nemoci – neštovice
- model vztahů mezi lidmi – rodiny, práce, škola
- abstraktní „města“
- motivace (financování): bio-terorismus

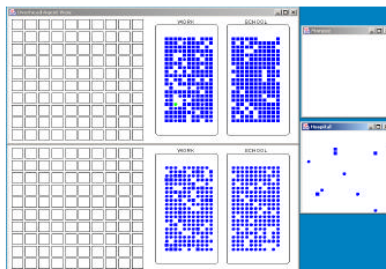
Základ modelu

- **neštovice** – vyladěno dle historických dat
- **prostředí**: 2 města, domov, škola, práce, nemocnice
- agenti přesuny: v noci doma, přes den ve škole/práci
- na začátku 1 nemocný agent, přenos při kontaktu
- různé způsoby **intervence**

Nighttime



Daytime



Neštovice: parametry

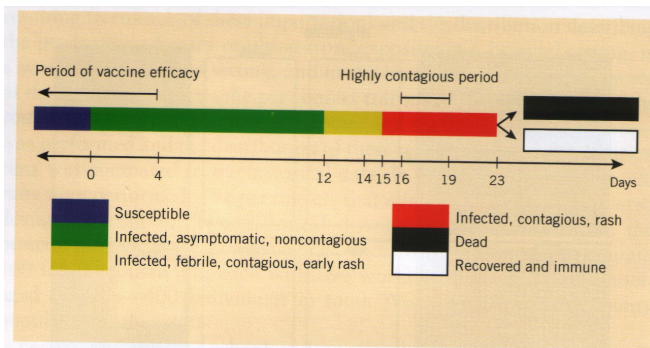
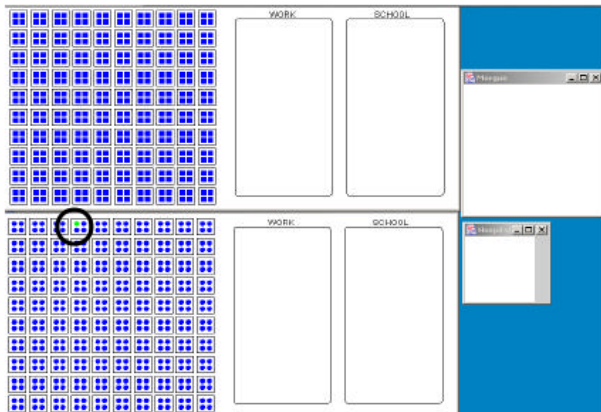


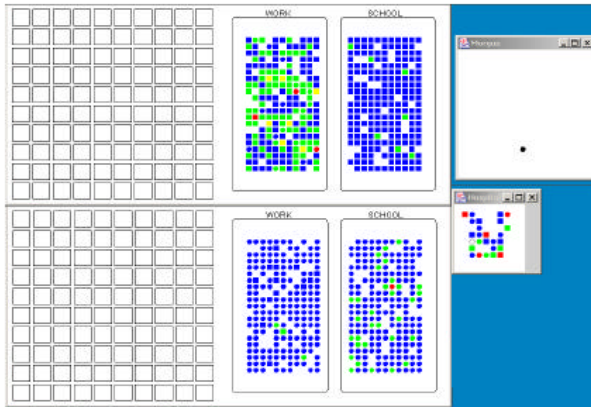
Figure 12.2. Progression of smallpox. (Source: Fenner *et al.* 1988)

1
Day 1



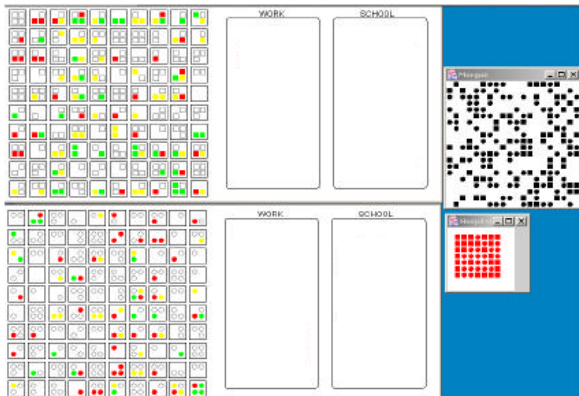
6

Day 42



8

Day 62



Výsledky simulace

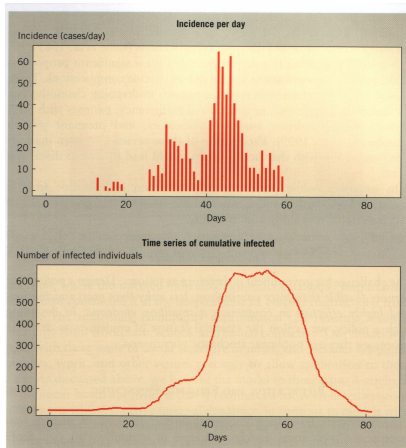


Figure 12.4. Typical results for base case run.

Očkování

Strategie očkování: preventivně zaměstnanci nemocnice, rodinní příslušníci zpětně.

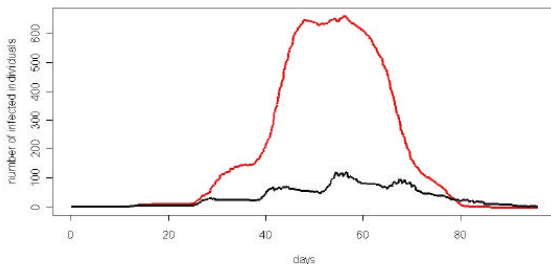


Figure 6. Results of Interventions. The black time series shows a typical run that implements our suggested intervention. The red time series is the original curve from Figure 4 which shows the no intervention case.

Sumární zpracování běhů

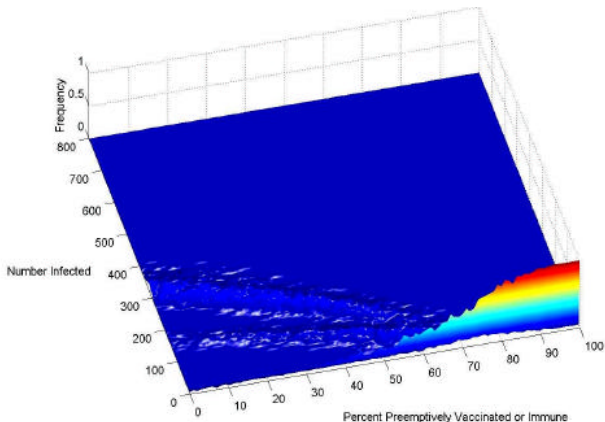


Figure 8. Probability Surface of the 75% Family Contact Tracing Case.

Systém EpiSimS

- Epidemiological Simulation System
- reálná geografická data
- individuální heterogenní agenti
- předpřipravené metody zásahu (vakcinace, apd.)

https://www.youtube.com/watch?v=pGftX_56X8g

Agenti

- denní aktivity, doprava (externí simulační balíky)
- věk, sociální status (zohledněno při přenosu nemoci)
- nemoc ovlivňuje chování

Chřipka v Los Angeles

- pandemie chřipky – parametry dle španělské chřipky z 1918
- okolí Los Angeles
 - 16 miliónů agentů
 - 0,5 miliónu míst (domy, školy, pracoviště, ...)
- studium efektivity různých zásahů

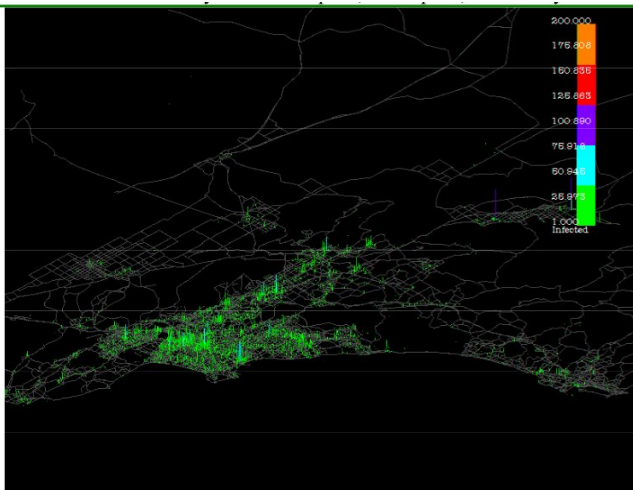


Fig. 6.3-1. The geospatial distribution of infected locations, on day 64 of the epidemic, for the base scenario, from EpiSimS simulation try30, at 10 a.m.

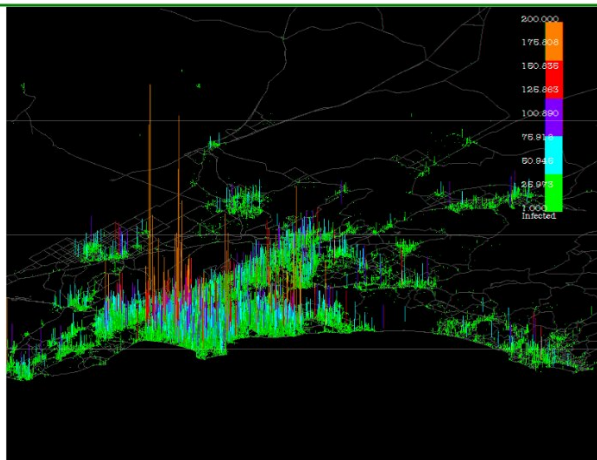


Fig. 6.3-2. The density of infected locations on day 128 of the base case epidemic, when the epidemic is at its peak, for 10 a.m.

Covid: modelování pro rozhodování

- účely modelů: odhad účinnosti opatření, predikce budoucího vývoje (zátěž nemocnic), dopad/plánování očkování, ...
- rozšíření základních matematických modelů
- stručný přehled: Epidemiological models are important tools for guiding COVID-19 interventions
- Google Scholar: “covid epidemiology model”

