

# Modelování epidemií

Radek Pelánek

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

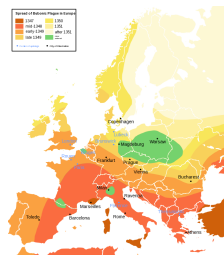
# Motivace: Epidemie jsou zabiják

## černý mor

- 14. století
- zemřelo 30 % až 60 % populace

## španělská chřipka

- 1918-1920
- zemřelo asi 50 miliónů lidí
- (první světová válka – 15 miliónů mrtvých)



# Motivace: Epidemie ovlivňují dějiny

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

# Modelování epidemií je zajímavé

- široké **aplikace**: nemoci, ale i počítačové viry, informace, postoje, módní trendy, ...
- dobré možnosti **abstrakce**:
  - společné prvky různých epidemií
  - stačí parametry (infekčnost, inkubační doba, úmrtnost), nikoliv detaily průběhu nemoci
- **finanční podpora** (AIDS, bio-terorismus, ...)
- ilustrace různých přístupů k modelování

# Epidemie: otázky

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

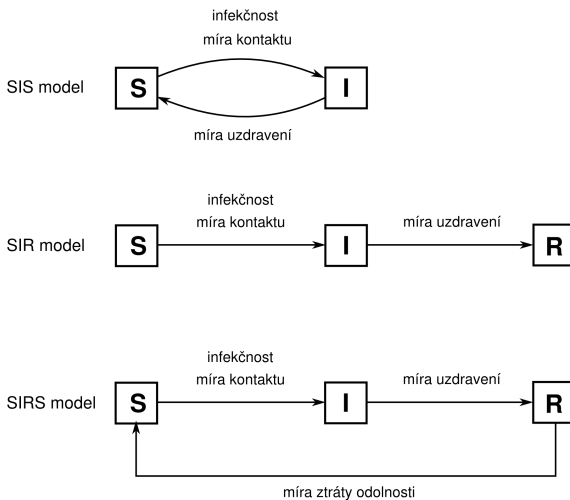
# Základní typy modelů

**SIS** Susceptible – Infected – Susceptible

**SIR** Susceptible – Infected – Recovered/Removed/Resistant

**SIRS** Susceptible – Infected – Resistant – Susceptible

# Základní typy modelů



# SIS model

SIS = Susceptible – Infected – Susceptible

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

úprava:  $\gamma \rightarrow 1$ , S, I nahradíme,  $X + Y = 1$

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

což je rovnice pro **logistický růst**, tj. chování tohoto jednoduchého modelu směřuje vždy k **rovnovážnému** stavu (pro  $Y = K/2$ )



# SIR model

SIR = Susceptible – I – Removed (Resistant)

základní model Kermack a McKendrick

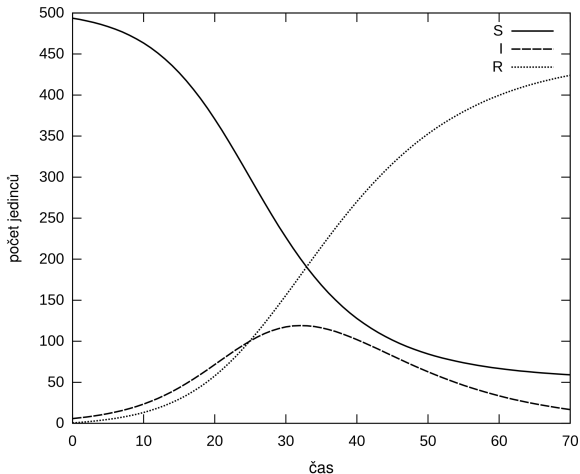
$$dS/dt = -\beta SI$$

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

$$dR/dt = \gamma I$$

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

# SIR: Výsledky simulace



# SIR: Srovnání s realitou

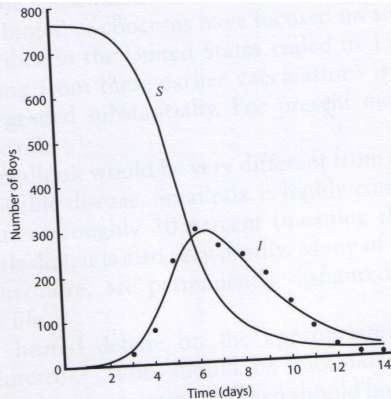
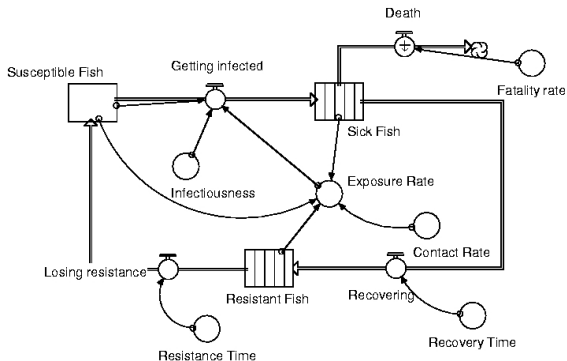


Figure 12.P.3. Influenza epidemic data, 1978, English boarding school. Of 763 boys, 512 were confined to bed, 22 January–February 1978. (Source: *British Medical Journal*, 4 March 1978.)

# SIRS model

SIRS = Susceptible - Ill - Resistant - Susceptible

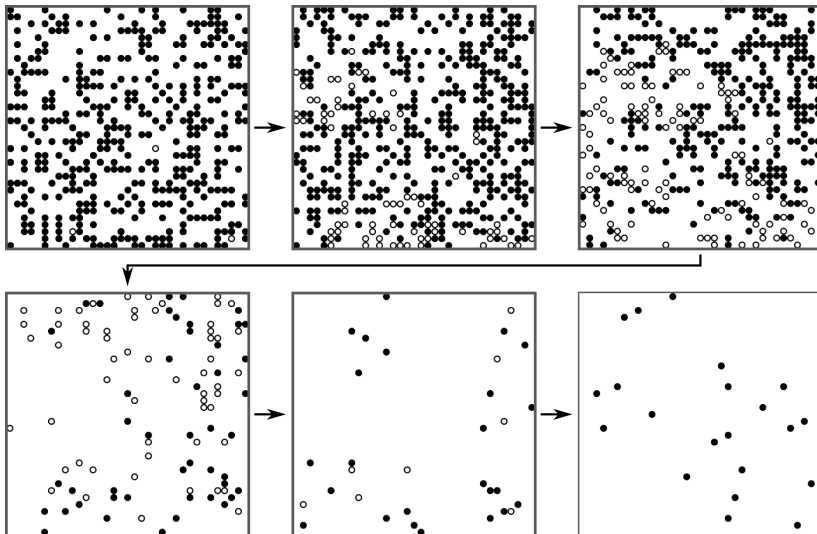


# Modely s agenty

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

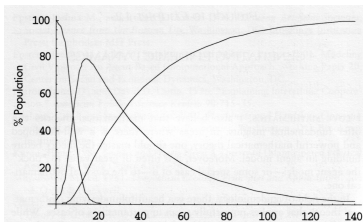


Figure 12.P.1. Illustrative time series solution. Note:  $S(t)$  is monotonically decreasing,  $R(t)$  monotonically increasing, and  $I(t)$  rises and then falls.

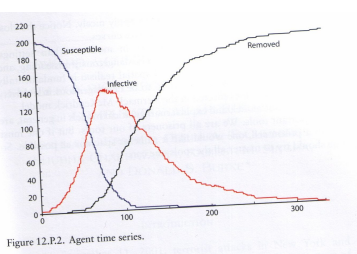


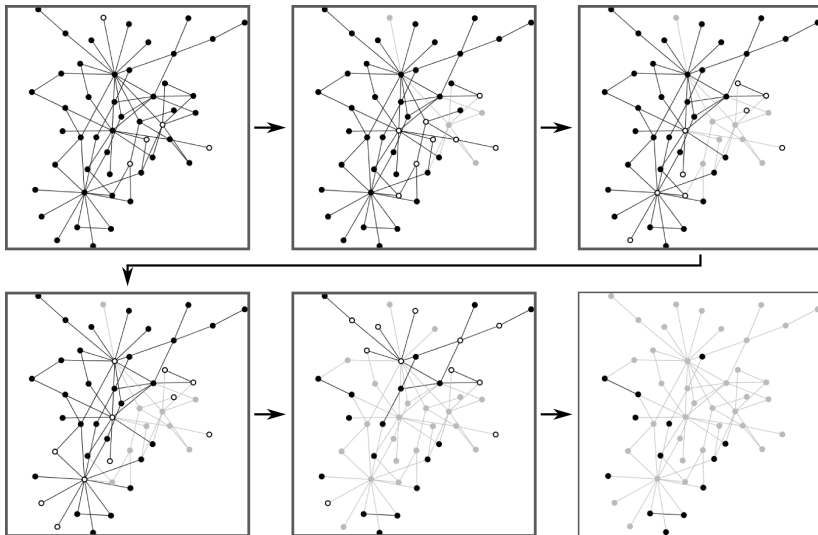
Figure 12.P.2. Agent time series.

# Vliv topologie sítě

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



# SIR: Simulace

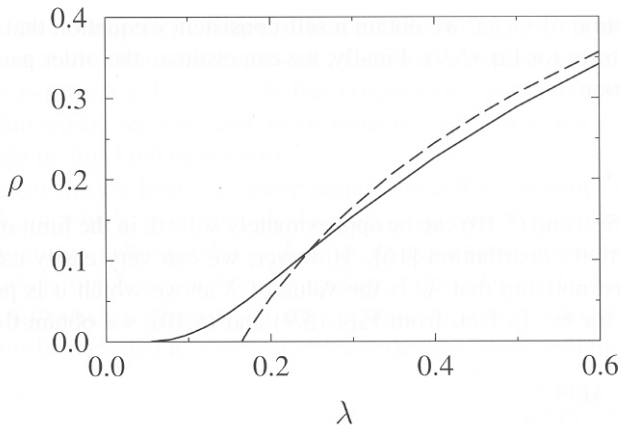


# Epidemie v bezškálovitých sítích

- **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)



# Mutace nemocí

- nové varianty nemocí (např. chřipka)
- rozlišení mezi stavem „náchylný“ a „odolný“ nemusí být dostatečné
- koevoluce mezi populací (lékem) a virem  
(sexuální rozmnožování jako obrana proti virům?)
- využití genetických algoritmů

# Příklady aplikací

- neštovice – středně složitý model
- rozsáhlý systém EpiSimS

# Model neštovic

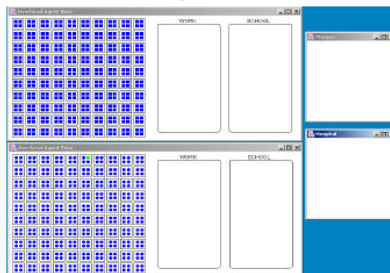
*Toward a containment strategy for smallpox bioterror: An individual-based computational approach*

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

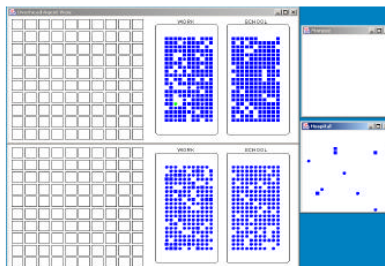
# Základ modelu

- **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

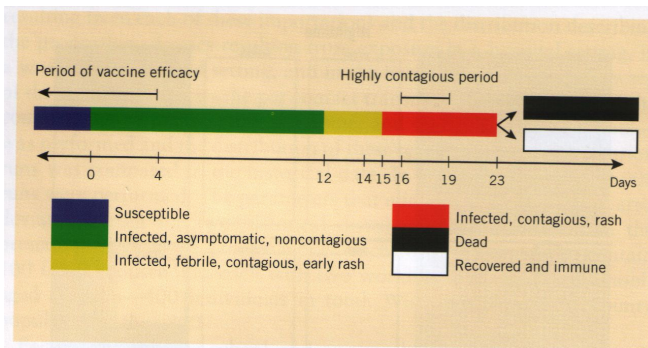
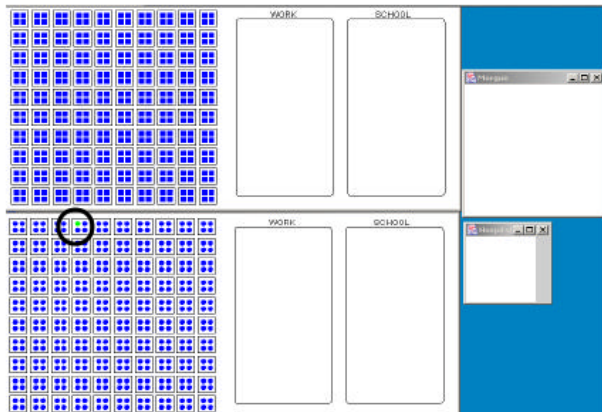


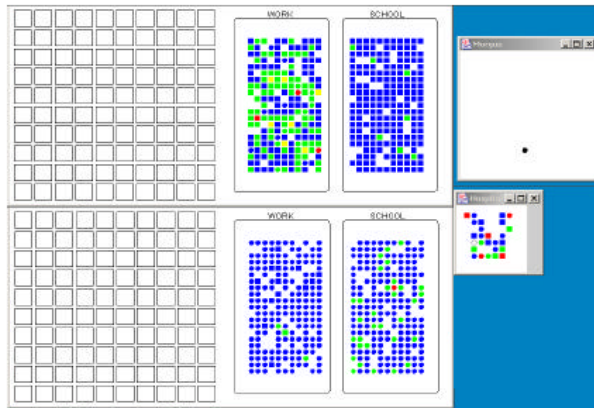
Figure 12.2. Progression of smallpox. (Source: Fenner *et al.* 1988)

**1**  
Day 1



# 6

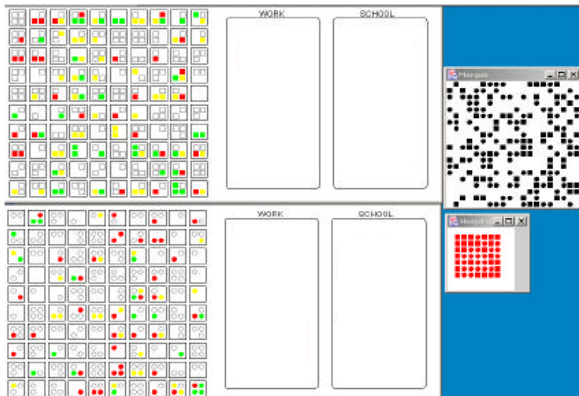
Day 42





8

Day 62



# Výsledky simulace

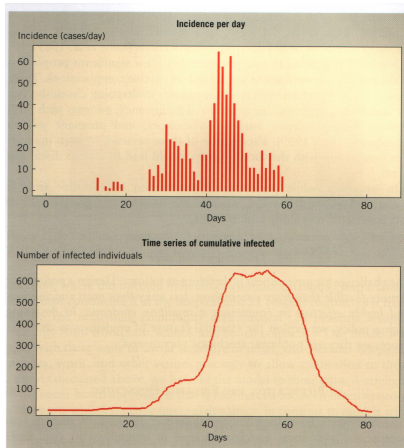


Figure 12.4. Typical results for base case run.

# Očkování

Strategie očkování: preventivně zaměstnanci nemocnice, rodinný příslušníci zpětně.

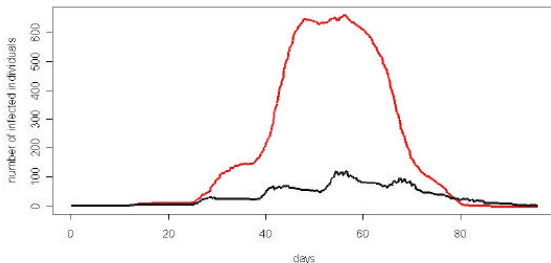


Figure 6. Results of Interventions. The black time series shows a typical run that implements our suggested intervention. The red time series is the original curve from Figure 4 which shows the no intervention case.

# Sumární zpracování běhů

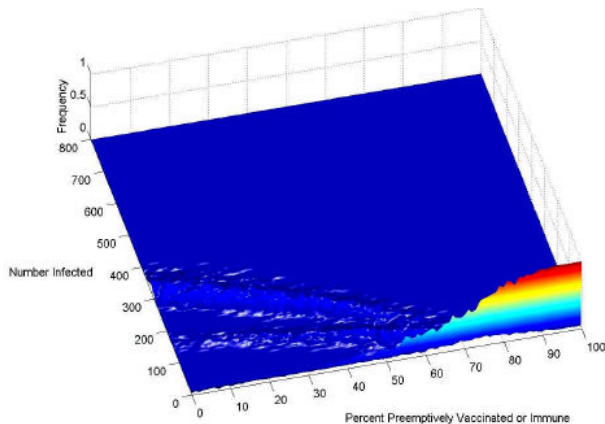


Figure 8. Probability Surface of the 75% Family Contact Tracing Case.

# System EpiSimS

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

# 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

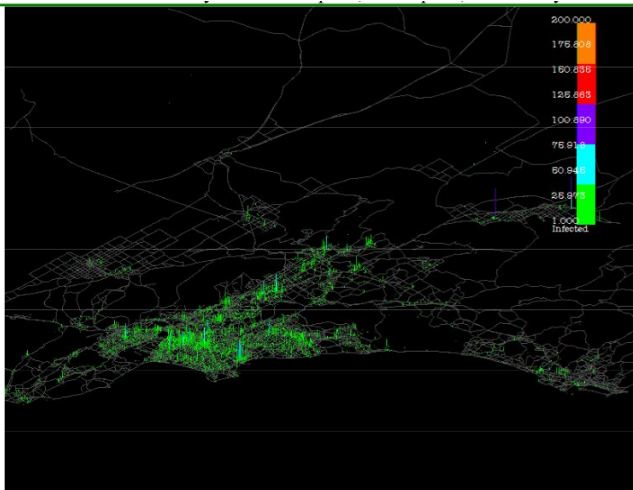


Fig. 6.3-1. The geospatial distribution of infected locations, on day 64 of the epidemic, for the base scenario, from EpiSimS simulation try30, at 10 a.m.



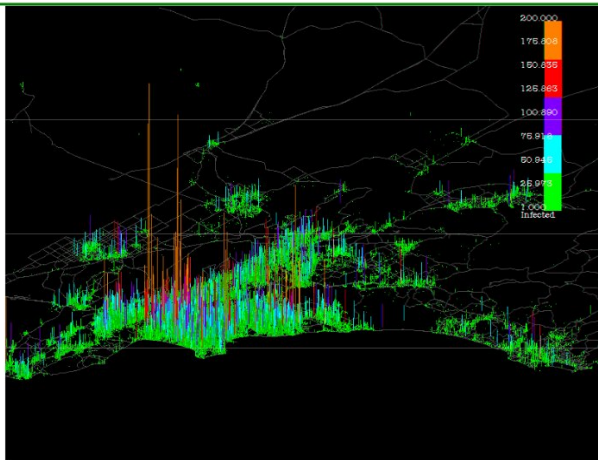


Fig. 6.3-2. The density of infected locations on day 128 of the base case epidemic, when the epidemic is at its peak, for 10 a.m.

# Shrnutí

- epidemie se dobře modelují
- využití různých přístupů k modelování: matematické modely, agenti, sítě, ...
- rozsáhlé reálné aplikace