Modellierung eines verallgemeinterten SEIR-Modells mit prävalenzabhängigen Kontaktraten

Mansur Daschaew, Janina Rastetter, Maren Raus

14. Februar 2022

1. SEIR-Modell
   - ODEs
   - Simulation

2. Simulation eines Lockdowns
   - Auswirkungen auf den Epidemieverlauf
   - mehrstufiger Lockdown
   - Lockdown anhand von Fallzahlen

3. Fallbeispiel Xi'an
   - Vorgehen
   - Daten
   - Parameter
   - Schätzung von δ
   - Anfangswerte
   - Simulationen

SEIR-Modell:

S	susceptible
E	exposed
I	infectious
D	detected
R	recovered

$$\frac{dS}{dt} = -\beta \frac{SI}{N}$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta \frac{SI}{N} - \alpha E$$

$$\frac{dI}{dt} = \alpha E - \gamma I - \delta I$$

$$\frac{dD}{dt} = \delta I - \gamma D$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I + \gamma D$$

Parameter

Übergangsrate α:	Kehrwert der mittlere Latenzzeit
Transmissionsrate β:	Übertragungen pro S-I Kontakt pro Zeit
Erholungsrate γ:	Kehrwert der mittleren infektiösen Zeit
Testrate δ:	Testrate für positive Individuen
	$\times$ Rate der positiven Testergebnisse

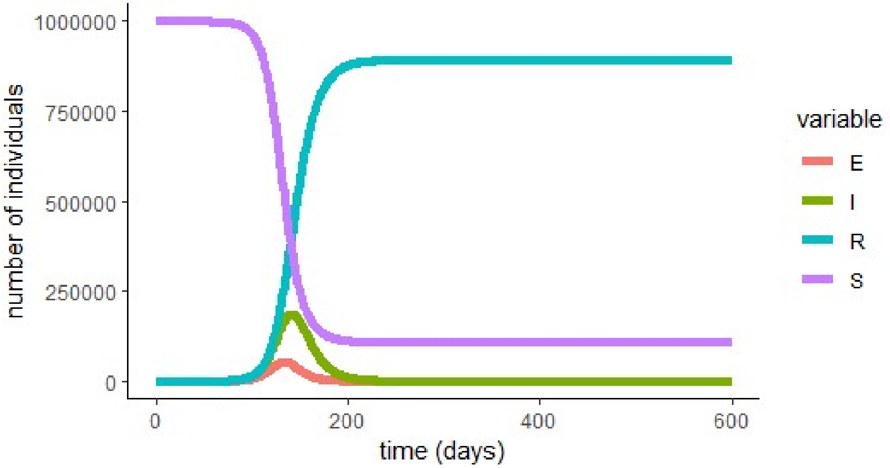
Schätzung für Transmissionsrate (zu Beginn der Epidemie):

$$\beta = \frac{R_0}{\gamma}$$

(R_0 Reproduktionszahl)

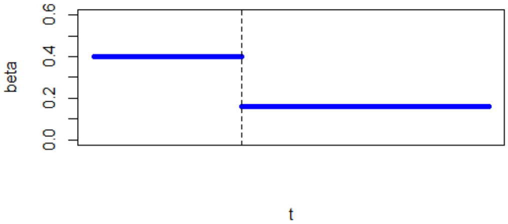
Startwerte:

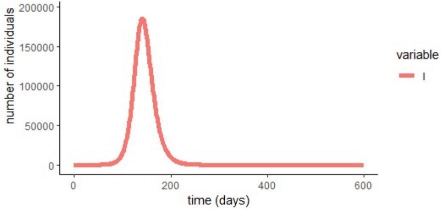
- Populationsgröße N
- S = N-1, I = 1, E = R = 0



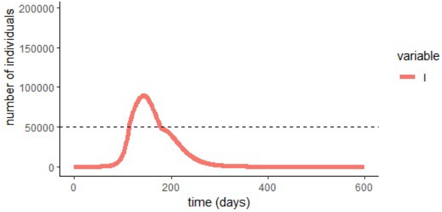
Simulation eines Lockdowns

- Kontaktrate verändert sich nicht kontinuierlich, sondern abrupt
- Zeitpunkt ist von der Inzidenz abhängig
- Bedingung an β: $\beta(t) = \begin{cases} \phi\beta_0 \text{ falls } I(t) > \tau N \\ \beta_0 \quad \text{sonst} \end{cases}$, wobei $\phi \in (0, 1)$ und $\tau \in (0, 1)$

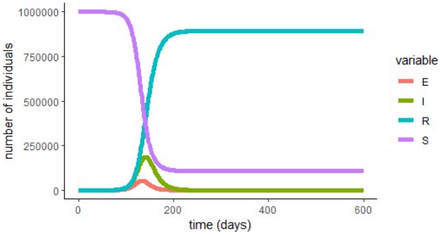




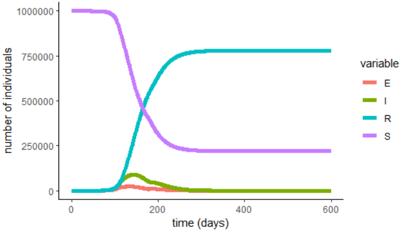
(a) Infizierte



(b) Infizierte bei Lockdown für $I(t) > 0.05N$

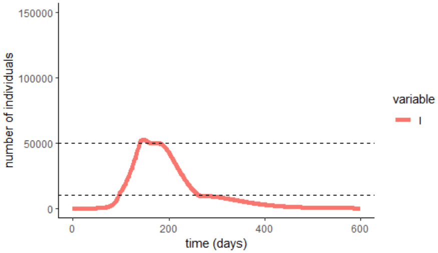


(c) Pandemieverlauf

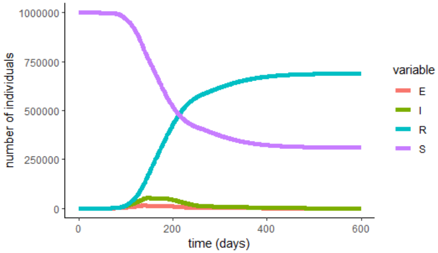


(d) Epidemieverlauf bei Lockdown für $I(t) > 0.05N$

mehrstufiger Lockdown



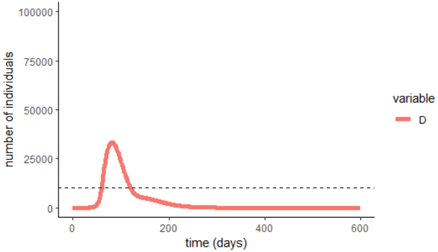
(a) Infizierte



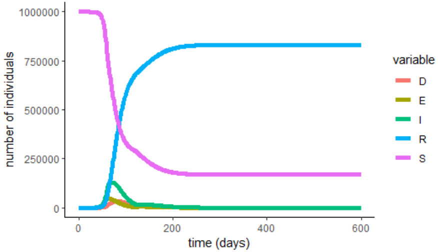
(b) Epidemieverlauf

Lockdown anhand von tatsächlichen Fallzahlen

- Einsetzen der Reduktion der Kontaktrate nach Werten von $D(t)$ (detected)
- niedrigere Werte, kleinere Schranke

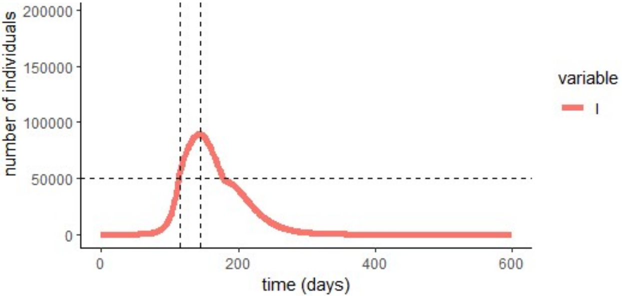


(a) Fallzahlen (detected cases D) mit Schranke $D(t) > 0.01N$



(b) Epidemieverlauf

Diskussion

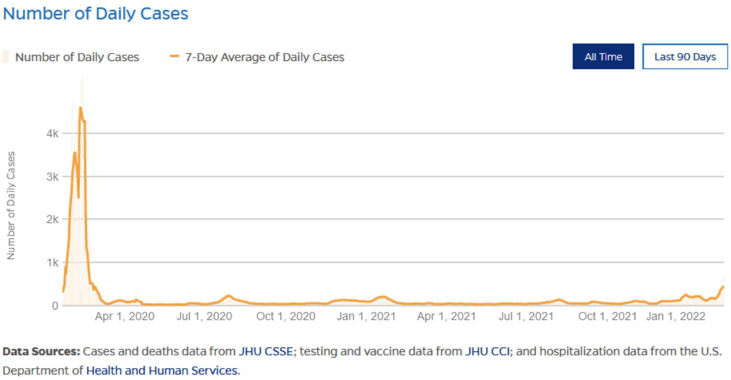


- Schranke τN muss passend gewählt werden
- Zeitspanne zwischen Beginn des Lockdown und Peak

Fallbeispiel Xi’an

China…

- strikte Null-Covid-Strategie in der Coronapandemie



China…

- strikte Null-Covid-Strategie in der Coronapandemie
  $\Rightarrow$ aktuelles Beispiel: Lockdown in der chinesischen Stadt Xi’an

SPIEGEL Ausland Abonnement Anmelden

Menü Startseite > Ausland > Volksrepublik China > Corona: China verordnet strikte Ausgangssperre für Millionenstadt

»Dynamische Null-Covid-Strategie«

China verhängt Lockdown für Millionenstadt Xi'an

In der zentralchinesischen Metropole Xi'an hat es Dutzende Coronafälle gegeben. Die Folge ist ein maximal strenger Regelkatalog: Nur ein Familienmitglied darf jeden zweiten Tag einkaufen gehen.

23.12.2021, 10.02 Uhr

Kontext und Begründung der Auswahl

China...

- strikte Null-Covid-Strategie in der Coronapandemie
  $\Rightarrow$ aktuelles Beispiel: Lockdown in der chinesischen Stadt Xi'an
  $\Rightarrow$ reale Daten

China...

- strikte Null-Covid-Strategie in der Coronapandemie
  $\Rightarrow$ aktuelles Beispiel: Lockdown in der chinesischen Stadt Xi'an
  $\Rightarrow$ reale Daten
- Impfquote von 87.88%, aber bei verwendeter Vakzine kaum Schutz vor Delta
  $\Rightarrow$ Annahme: nicht immunisierte Bevölkerung

Vorgehen

1. Recherche (Daten zur Infektionslage in Xi'an und zur Deltavariante)
2. Berechnung der Parameter
3. Schätzung des Parameters δ (verantwortlich für die Identifikation infizierter Individuen)
4. Berechnung der Anfangswerte
5. Simulation verschiedener Szenerien mit dem Ziel, die Epidemie möglichst schnell ohne Durchseuchung stoppen

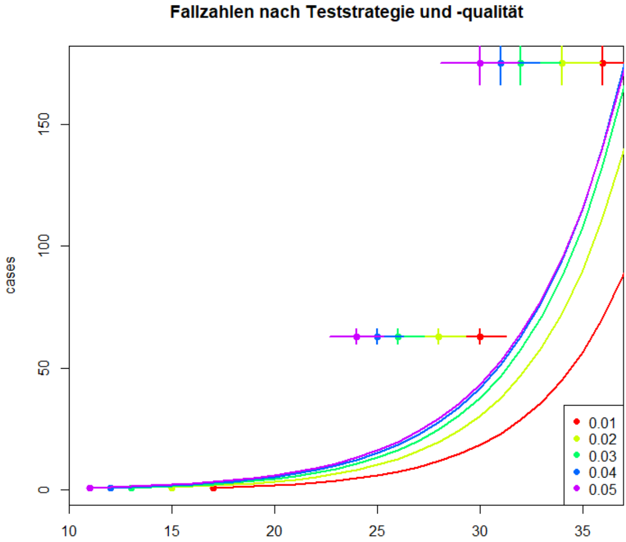
Dünne Datenlage

- 9. Dezember 2021: erster Fall
- In den Folgetagen: steigende Infektionszahlen
- 22. Dezember 2021 (+ 13 Tage): 63 Fälle
- 23. Dezember 2021: Lockdown
- 28. Dezember 2021 (+ 19 Tage): 175 Fälle
- 24. Januar 2022: Ende des Lockdowns (nach 32 Tagen), insgesamt ca. 2000 Fälle

Parameter

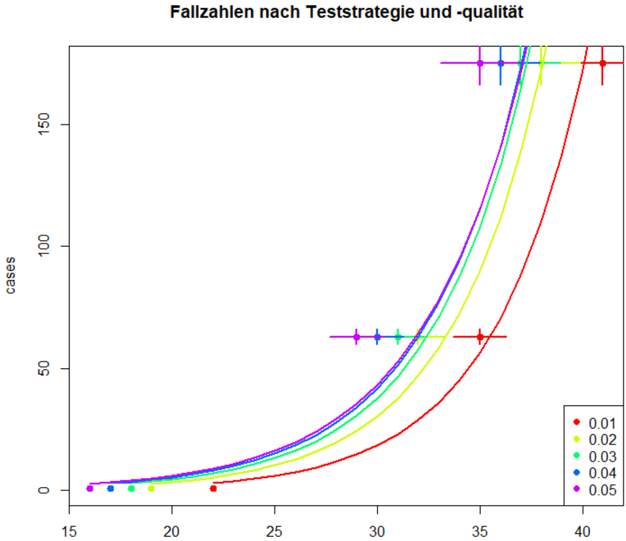
- R-Wert ≈ 5.5
- $\alpha = 1/2$ (mittlere Inkubationszeit ≈ 4, ansteckend etwa zwei Tag vor Auftreten von Symptomen)
- $\gamma = 1/12$
- $\beta \approx \gamma \cdot R = 5.5/12 = 0.468$
- $\phi \approx \gamma/\beta = 1/5.5$
- $\beta \cdot \phi = 1/12$

Beobachtung: Schlechter Fit mit recherchierten Werten



Schätzung von δ

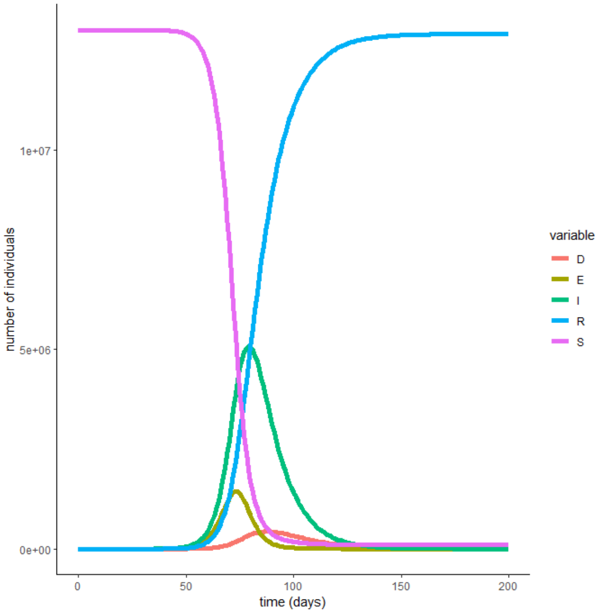
Konsequenz: Erlaube Abweichungen $\Rightarrow \delta = 0.01$



Anfangswerte (gerundet)

- $t = 36$
- $S = 12996450$
- $E = 1097$
- $I = 1731$
- $D = 56$
- $R = 666$

Verlauf ohne Intervention



Verlauf ohne Intervention

Abbildung: Verlauf ohne Intervention

Kompartment	Maximum	Zeitpunkt des Maximums
I	5076922	80
E	1437318	74
D	433135.2	89

- Verbleibende S: 99439.98 (0.7649229%)
  $\Rightarrow$ Durchseuchung
- Schritte, bis E und I kleiner 1: 260 (ca. 9 Monate)

Erhöhung der Testungen

Abbildung: Verlauf mit verstärktem Testen

δ	Verbleibende S (in %)	I und E kleiner 1, ab
$\delta_{ur} \cdot 2^1$	1.252596	212 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^2$	2.687945	196 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^3$	7.447852	186 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^4$	23.80182	211 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^5$	76.87228	589 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^6$	99.93514	60 (+ 36)

$\Rightarrow$ Erst ab einer Steigerung der Testeffizienz um Faktor 2^5 ist eine Eindämmung der Epidemie möglich

$\Rightarrow$ Bei einer Steigerung der Testeffizienz um Faktor 2^6 müssten „nur“ zwei Monate lang vermehrt getestet werden

Verlauf mit verstärktem Testen: $\delta = 0.64$

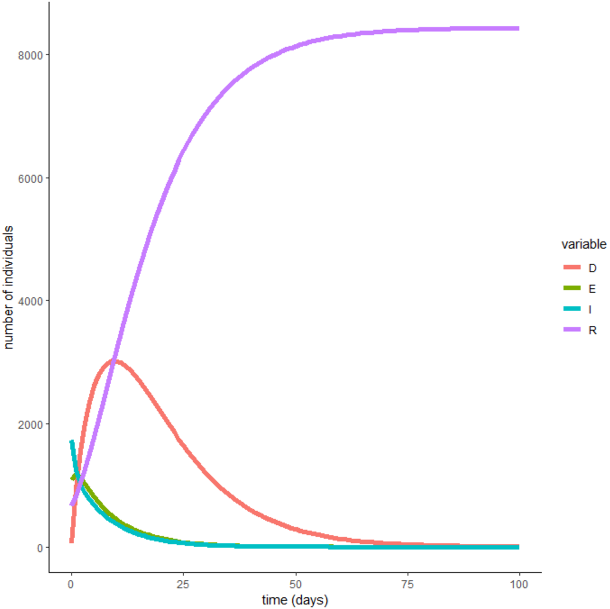


Abbildung: Verlauf mit verstärktem Testen: $\delta = 0.64$

Kompartment	Maximum	Zeitpunkt des Maximums
I	1731	0
E	1185.318	1
D	3016.812	9

Abbildung: Verlauf mit Kontaktreduktion

β	Verbleibende S (in %)	I und E kleiner 1, ab
$\beta_{ur} * 2^{-1}$	11.3365	338 (+ 36)
$\beta_{ur} * 2^{-2}$	65.28979	1184 (+ 36)
$1/12$	99.79345	898 (+ 36)

$\Rightarrow$ Kontaktreduktion verhindert Infektionen, zieht die Epidemie aber in die Länge

$\Rightarrow$ Um eine Durchseuchung zu verhindern, müssten die Kontakte etwa 2.5 Jahre lang reduziert werden

Verlauf mit Kontaktreduktion: $\beta = 1/12$

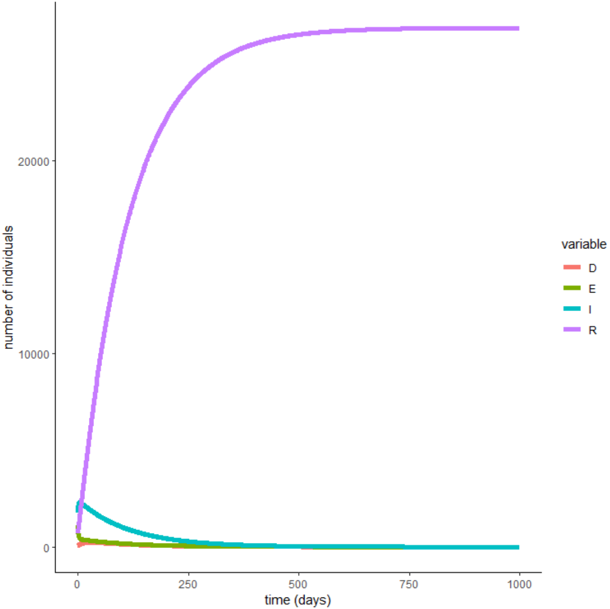


Abbildung: Verlauf mit Kontaktreduktion: $\beta = 1/12$

Kompartment	Maximum	Zeitpunkt des Maximums
I	2288.959	5 (+36)
E	1097	0 (+36)
D	228.0604	29 (+36)

Erhöhung der Testungen und Kontaktreduktion: $\beta = 1/12$

Abbildung: Verlauf mit verstärktem Testen und Kontaktreduktion

δ	Verbleibende S (in %)	I und E kleiner 1, ab
$\delta_{ur} \cdot 2^1$	99.88242	456 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^2$	99.92746	230 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^3$	99.95006	117 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^4$	99.96137	60 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^5$	99.96703	33 (+ 36)
$\delta_{ur} \cdot 2^6$	99.96986	20 (+ 36)

$\Rightarrow$ Testeffizienz wirkt sich kaum auf die Anzahl der Infektionen aus, dafür aber sehr stark auf die erforderliche Dauer der Beschränkungen

$\Rightarrow$ Testeffizienz müsste mindestens um Faktor 2^4 gesteigert werden, um Einschränkungen auf ein bis zwei Monate zu beschränken

Verlauf mit Kontaktreduktion und verstärktem Testen: $\beta = {}^1\!/_{12}$ und $\delta = 0.32$

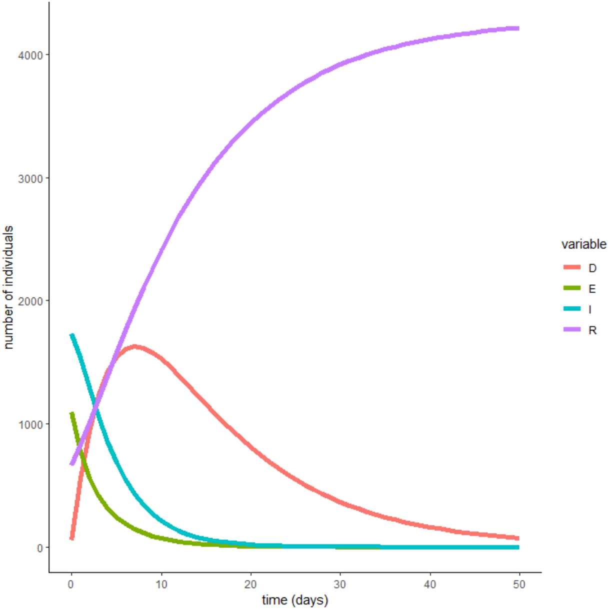
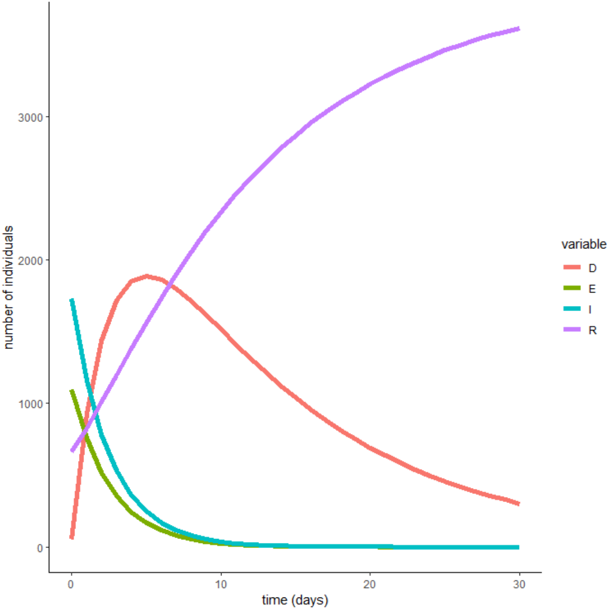


Abbildung: Verlauf mit Kontaktreduktion und verstärktem Testen: $\beta = 1/12, \delta = 0.32$

Kompartment	Maximum	Zeitpunkt des Maximums
I	1731	0
E	1097	0
D	1627.685	7

Verlauf mit Kontaktreduktion und verstärktem Testen: $\beta = 1/12$ und $\delta = 0.64$



Verlauf mit Kontaktreduktion und verstärktem Testen: $\beta = 1/12, \delta = 0.64$

Abbildung: Verlauf mit Kontaktreduktion und verstärktem Testen: $\beta = 1/12, \delta = 0.64$

Kompartment	Maximum	Zeitpunkt des Maximums
I	1731	0
E	1097	0
D	1886.614	5

Erhöhung der Testungen und Kontaktreduktion: $\delta = {}^1/_{12}$

Abbildung: Verlauf mit verstärktem Testen und Kontaktreduktion

δ	Fälle (gesamt)
$\delta_{ur} \cdot 2^1$	34473.27 (+ 348.5105)
$\delta_{ur} \cdot 2^2$	34566.07 (+ 348.5105)
$\delta_{ur} \cdot 2^3$	34596.05 (+ 348.5105)
$\delta_{ur} \cdot 2^4$	34584.94 (+ 348.5105)
$\delta_{ur} \cdot 2^5$	33786.95 (+ 348.5105)
$\delta_{ur} \cdot 2^6$	31079.05 (+ 348.5105)

$\Rightarrow$ In Xi'an gab es insgesamt nur etwa 2000 Fälle... Fehler bei der Parameterwahl?

$\Rightarrow$ Vermutung zur Fehlerquelle: Mangel an Daten

Abbildung: Zusammenfassung

Strategie	δ	β	Dauer	Verbleibende S (in %)
–	0.01	$5.5/12$	8.5 Monate	0.7649229
T	0.64	$5.5/12$	2 Monate	99.93514
K	0.01	$1/12$	2.5 Jahre	99.79345
K + T	0.32	$1/12$	1 Monat	99.96703
K + T	0.64	$1/12$	3 Wochen	99.96986