



**Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,  
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

## **Sprawozdanie**

### **Tworzenie aplikacji do symulacji i sterowania procesów dyskretnych**

Autor: Jakub Poręba

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

**Kraków, 2020**

## Ćwiczenie 2: Symulacja epidemii przy pomocy automatów komórkowych.

email kontaktowy: jkbporeba@gmail.com

### 1. Wstęp.

Celem ćwiczenia jest przygotowanie symulacyjnego modelu epidemii z pomocą automatów komórkowych. Punktem zaczepienia była obecna sytuacja epidemiczna na świecie spowodowana rozprzestrzenianiem się koronawirusa COVID-19. Zadanie rozpoczęto od zebrania danych porównawczych, były dane epidemiczne z Niemiec od początku epidemii do 30 kwietnia 2020r. Zbierano statystyki nt. liczby zakażonych, zmarłych, wyzdrowiałych, przeprowadzonych testów oraz ogólnych działań rządu i jednostek lokalnych w ramach ograniczania rozprzestrzeniania się wirusa wśród społeczeństwa. Dane zbierano codziennie o 22:00 +/- 5min na stronie <https://www.worldometers.info/coronavirus/>

### 2. Założenia.

Stany opisujące jednostki i społeczeństwo podzielono na dwie grupy. Stany Q1 odnoszą się do ochrony społeczeństwa, tj. decyzje o wykonywaniu testów, wprowadzenie zakazu zgromadzeń, nakazu noszenia maseczek itp. Wyróżniono tutaj 3 stany:

- Brak odgórnej ochrony społeczeństwa
- Odgórny nakaz ochrony jednostkowej (self protection)
- Odgórny nakaz ochrony społeczności (public protection)
- Odgórny nakaz ochrony jednostkowej jak i społeczności.

W zależności od narzuconego stanu prawdopodobieństwa przejść między poszczególnymi stanami Q2, o których za chwilę, zmieniał się. Dotyczyło to zwłaszcza rozprzestrzeniania się epidemii na nowe osoby. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na śmiertelność jest uwzględnienie liczby respiratorów dostępnych w szpitalach. Oparto się na informacji z niemieckiej służby zdrowia, gdzie deklarowane jest posiadanie 25000 respiratorów dostępnych dla około 82mln populacji Niemiec, co jest wartością wysoką wśród krajów europejskich.

Dostępne stany Q2:

- Healthy – osoba zdrowa
- In quarantine – osoba na kwarantannie
- Infected – osoba zarażona, bez objawów choroby
- Sick – osoba chora na coś innego, niż COVID, ale mająca podobne objawy
- Infected & sick – osoba zarażona, z objawami choroby
- In hospital – osoba z objawami umieszczona w szpitalu
- Recovered – osoba wyzdrowiała, z nabytą odpornością
- Dead – osoba zmarła

Dopuszczalne przejścia między stanami:

- a. Healthy -> in quarantine
- b. Healthy -> sick
- c. Healthy -> infected & sick
- d. In quarantine -> sick
- e. In quarantine -> infected & sick
- f. In quarantine -> healthy
- g. Sick -> infected & sick
- h. Sick -> in quarantine
- i. Sick -> healthy
- j. Infected & sick -> in quarantine
- k. Infected & sick -> in hospital
- l. Infected & sick -> recovered
- m. Infected & sick -> dead
- n. In hospital -> recovered
- o. In hospital -> dead
- p. Recovered -> healthy (nie każdy wyzdrowiały utrzymuje przeciwciała)

Sparametryzowane prawdopodobieństwa różnią się między sobą w zależności od stanu Q1, dlatego też nie zawarto ich w sprawozdaniu. Informacje na ich temat można odczytać na początku załączonego skryptu MATLAB. Wartości prawdopodobieństw dobierano eksperymentalnie.

Stan osoby zdrowej określany jest na podstawie sąsiedztwa Moore'a rozbudowanego do promienia  $r=2$ , zatem brane są pod uwagę komórki z kwadratu  $5 \times 5$ , oprócz oczywiście komórki środkowej. Dodatkowo uzależniono prawdopodobieństwo zachorowania od liczby osób chorych w sąsiedztwie oraz od stopnia ich choroby czy stanu indywidualnej kwarantanny, a także liczby dostępnych respiratorów.

Sterowanie testami, a przez to wykrywaniem zarażonych w społeczeństwie i ich izolowaniu na kwarantannie odbywa się poprzez wybór stanu Q1 – jest więc ono zaimplementowane niejako progowo. Podobnie jest z liczbą respiratorów, która zależy od stopnia ochrony populacji wg stanu Q1, lecz może ona być również ustalona ręcznie na początku symulacji. Założono, że liczba respiratorów w trakcie trwania symulacji jest stała.

### 3. Model.

Model został przygotowany w programie MATLAB. Opiera się on o grę w życie Conway'a, z tym że został znacznie rozbudowany. Wartość populacji, liczba cykli, liczba zarażonych na początku symulacji, stopień ochrony ludności oraz wartości poszczególnych prawdopodobieństw zostały w pełni sparametryzowane. Możliwie dużo działań zostało zautomatyzowane, dzięki czemu po zakończeniu obliczeń użytkownik algorytmu dostaje gotowe wykresy oraz wizualizację stanu końcowego. Wizualizowane są również stany populacji po poszczególnych cyklach tak, by mieć pogląd na kierunki rozprzestrzeniania się wirusa. Każda komórka może przyjąć jeden z ośmiu stanów określonych w założeniach. W każdym cyklu dla każdej komórki losowana jest liczba 1-100, która następnie przyrównywana jest do sparametryzowanych przedziałów prawdopodobieństwa, dzięki czemu zostaje wybrany stan komórki w następnym cyklu. Program został w miarę możliwości zoptymalizowany, na ile pozwala pakiet MATLAB oraz wiedza o jego możliwościach. Problematiczna pod względem czasowym instrukcja switch-case oraz konieczność iterowania po każdej komórce macierzy, mimo że tylko jednokrotnie, sprawia, że algorytm liczy się dość długo – dla populacji 40000 ludzi jeden cykl głównej pętli programu trwa na początku około 30s, a na końcu około 10s. Język MATLAB stworzony jest przede wszystkim do obliczeń macierzowych, stąd też pętla for nigdy nie będzie w nim tak szybka jak mnożenie macierzowe element-wise.

W celu wizualizacji posłużono się pakietem Image Processing, lecz wykorzystane funkcje powinny być dostępne również w „czystym” MATLABie.

#### 4. Wyniki.

Przeprowadzono serię czterech symulacji dla populacji 40000 osób. W każdej próbie zmieniano stopień ochrony społeczeństwa, co wpływało na dobór prawdopodobieństw zarażenia, stopień kwarantanny czy liczbę dostępnych respiratorów. Próby rozpoczynano od trzech zarażonych, będących „pacjentami zero”.

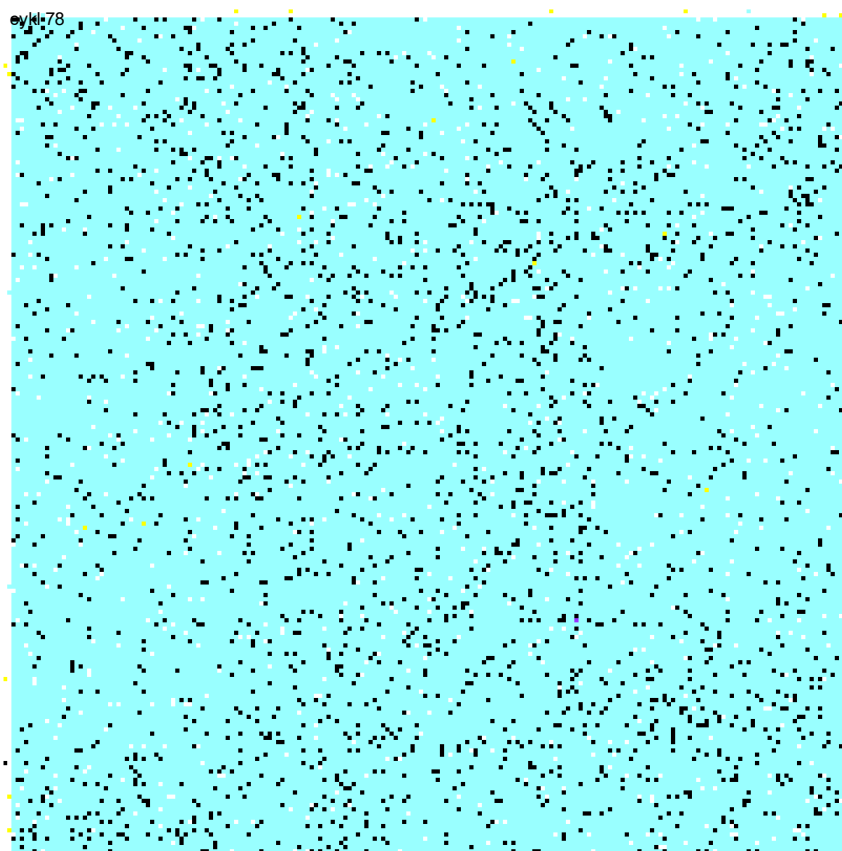
Legenda do wizualizacji populacji:

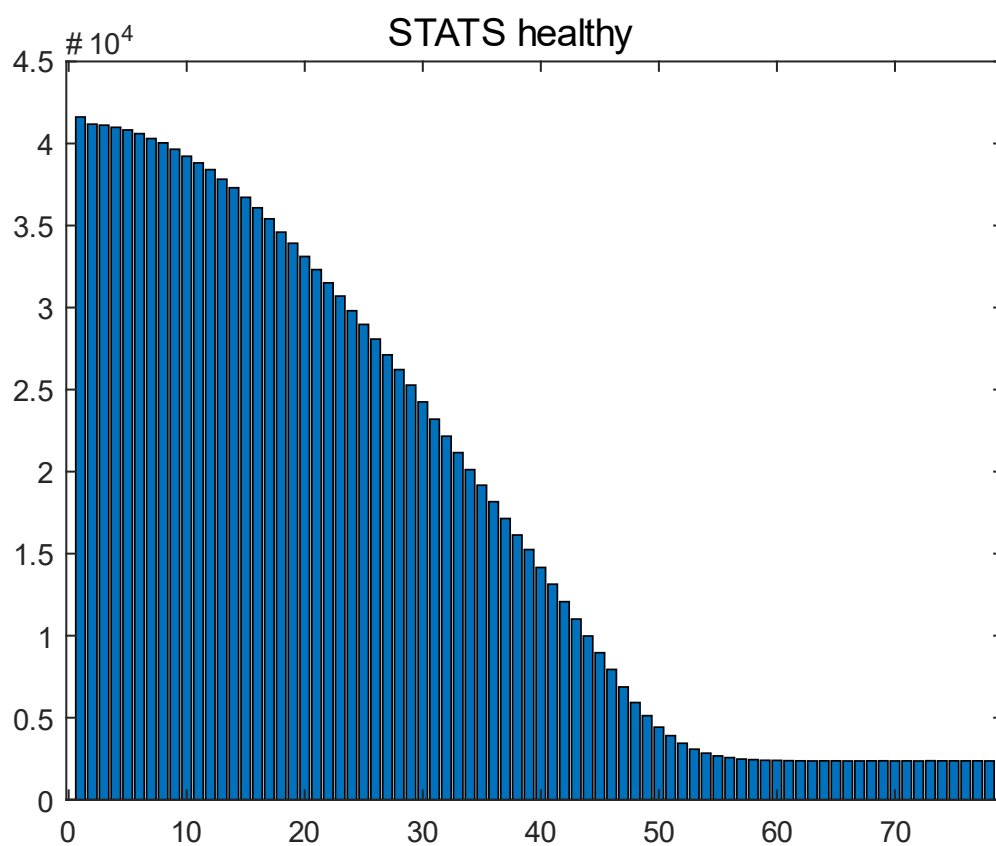
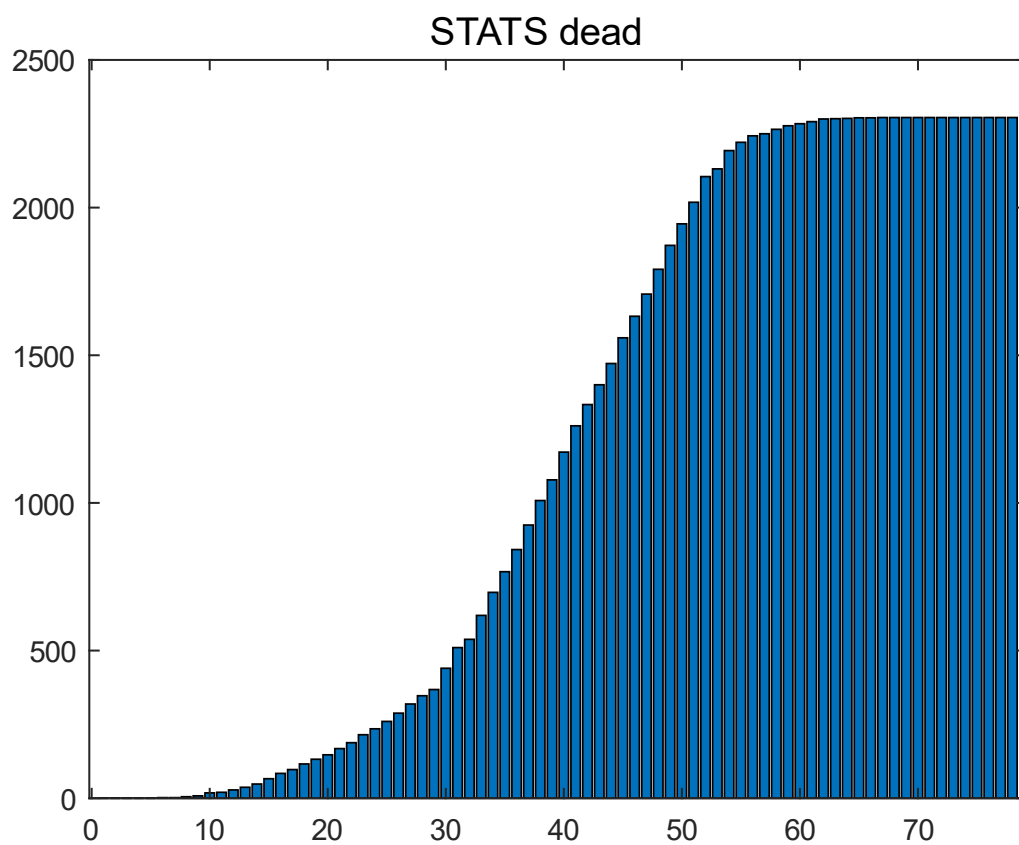
- Kolor biały – osoba zdrowa, bez odporności
- Kolor żółty – osoba mająca objawy COVID, lecz niezarażona
- Kolor pomarańczowy – osoba zarażona
- Kolor czerwony – osoba zarażona i z objawami
- Kolor fioletowy – osoba na kwarantannie
- Kolor niebieski – osoba w szpitalu
- Kolor błękitny – osoba wyzdrowiała, z nabytą odpornością
- Kolor czarny – osoba zmarła

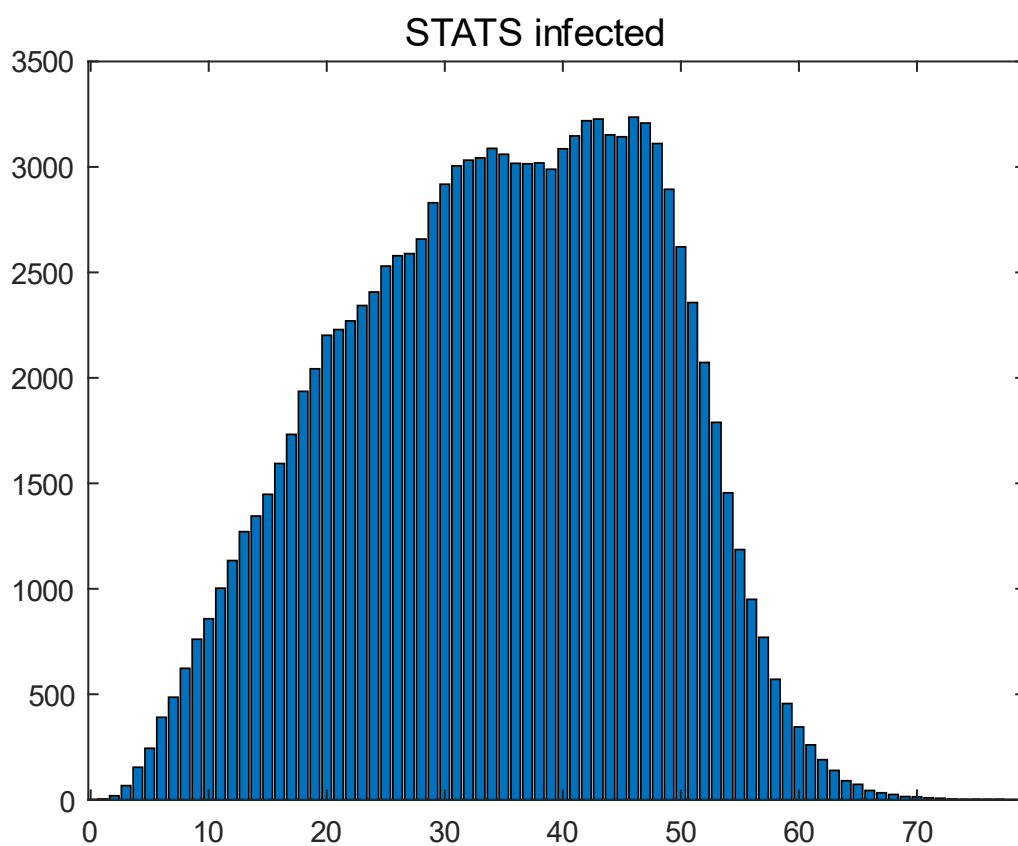
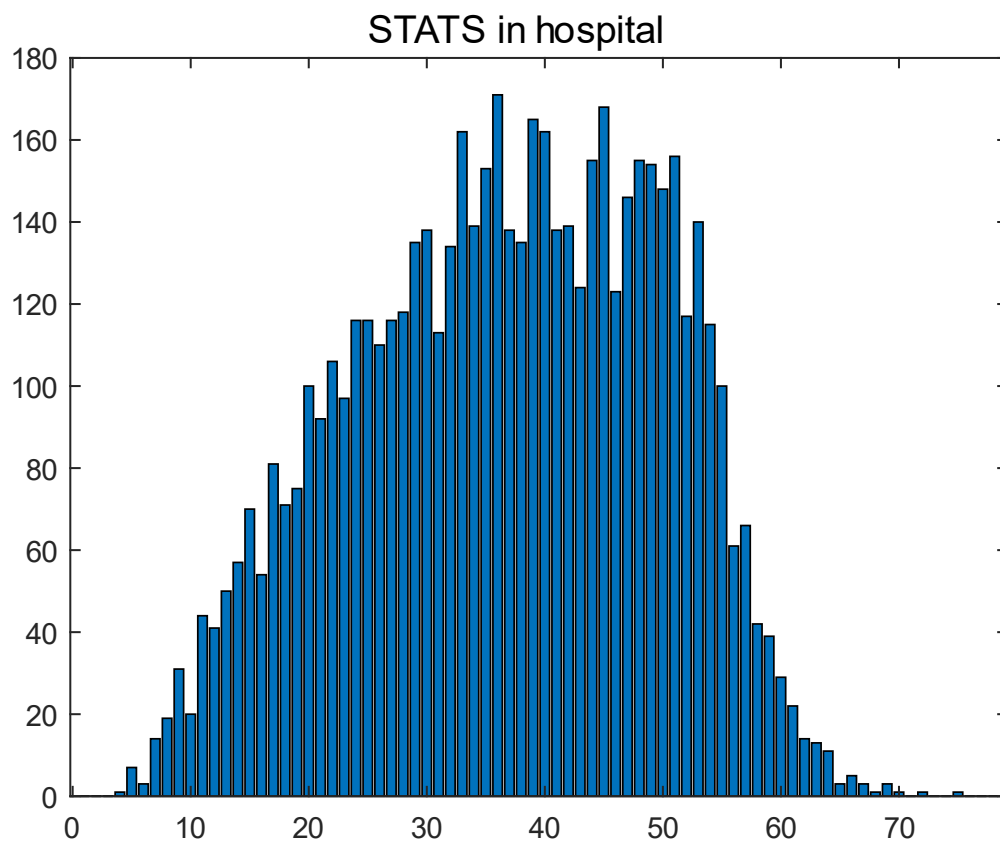
Poniżej zestawiono zebrane dane w formie wykresów i wizualizacji:

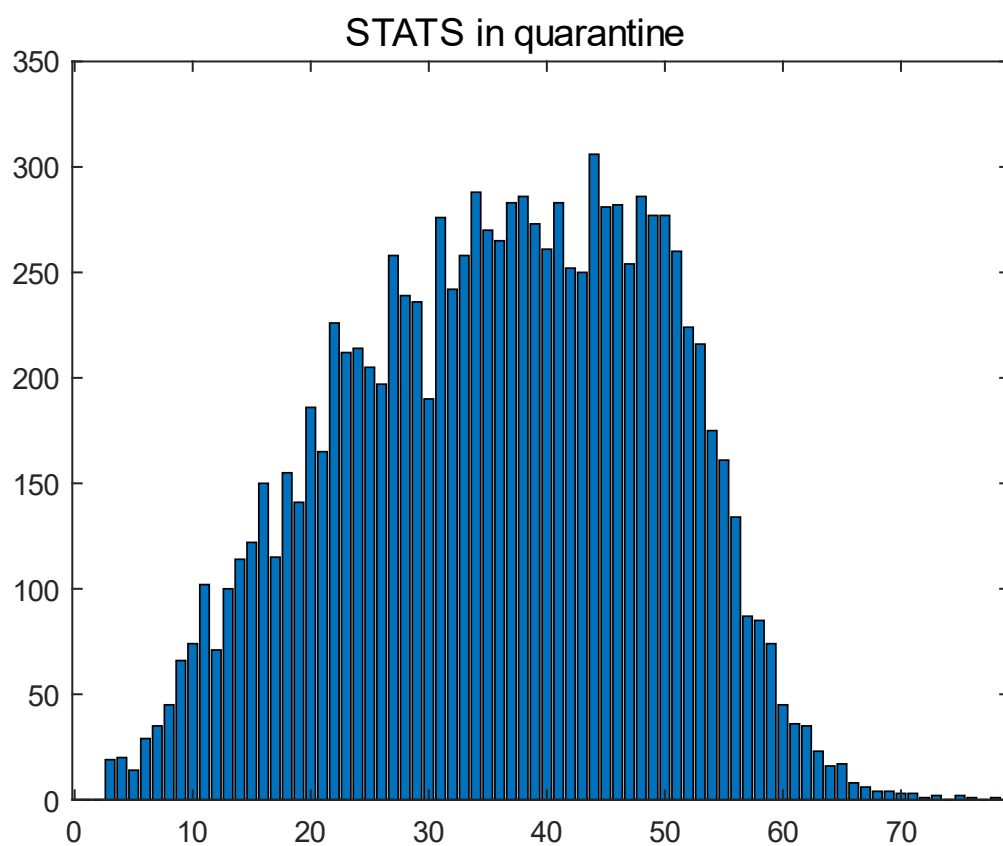
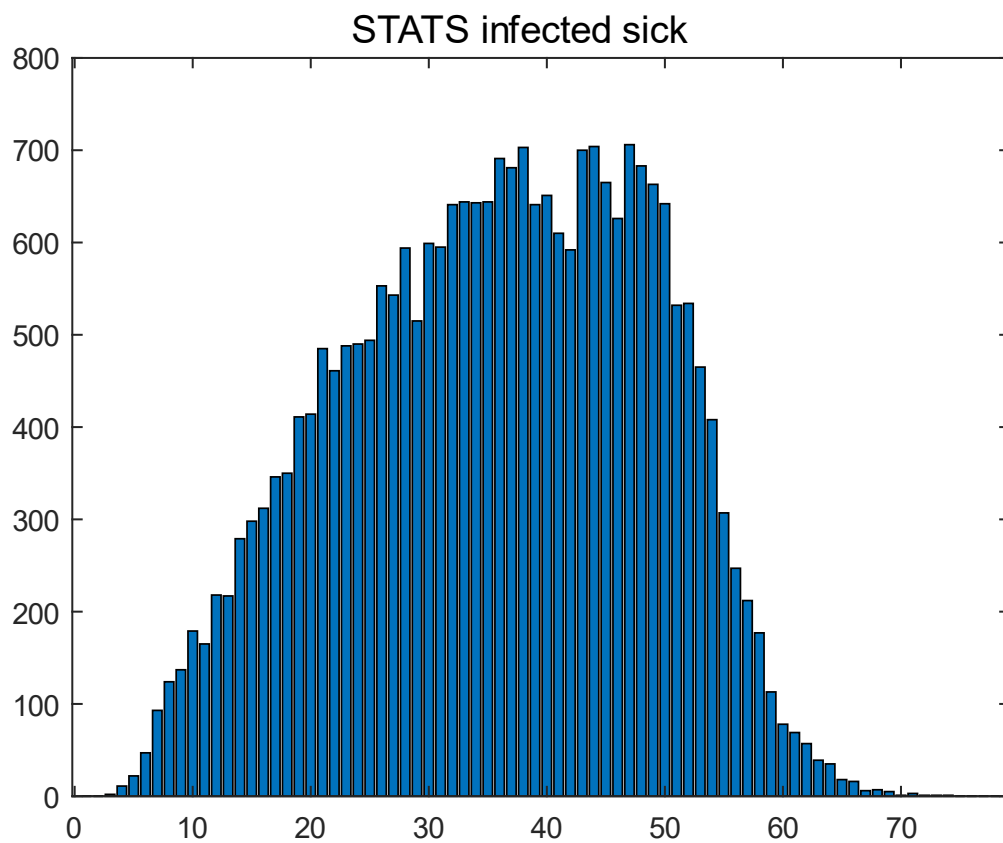
##### 4.1. Brak ochrony osobistej i publicznej:

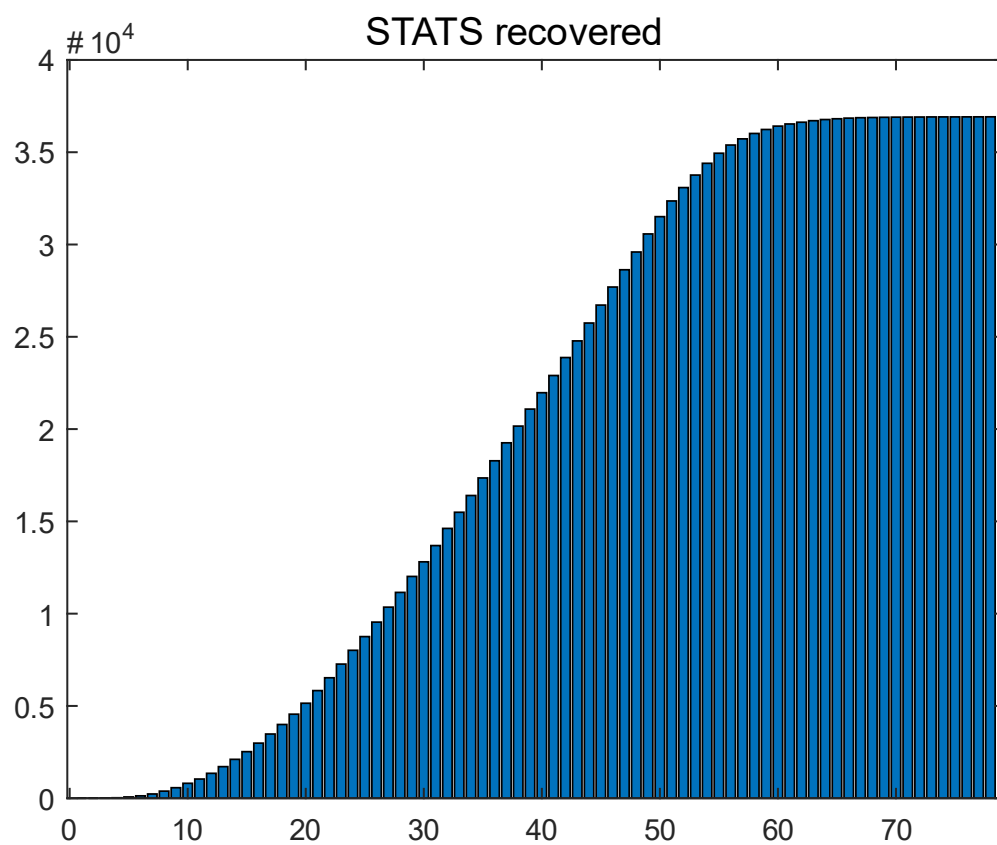
Stan końcowy populacji:









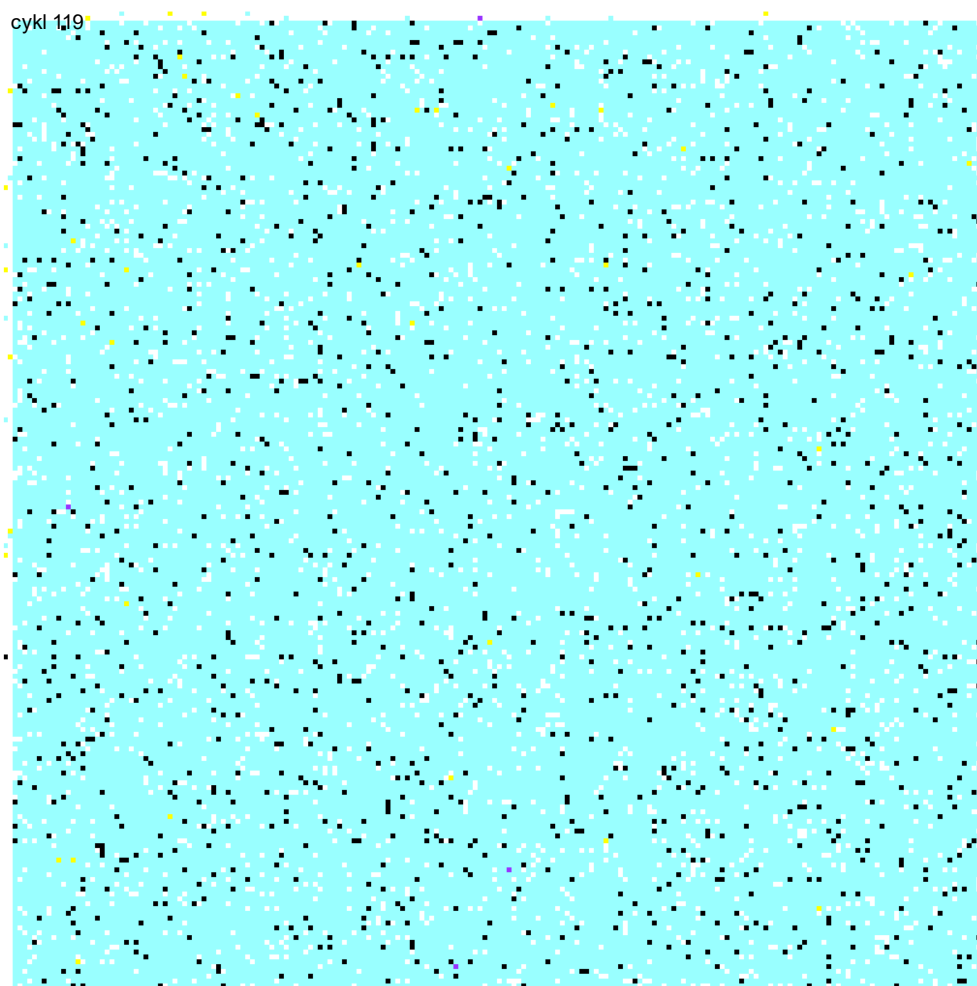


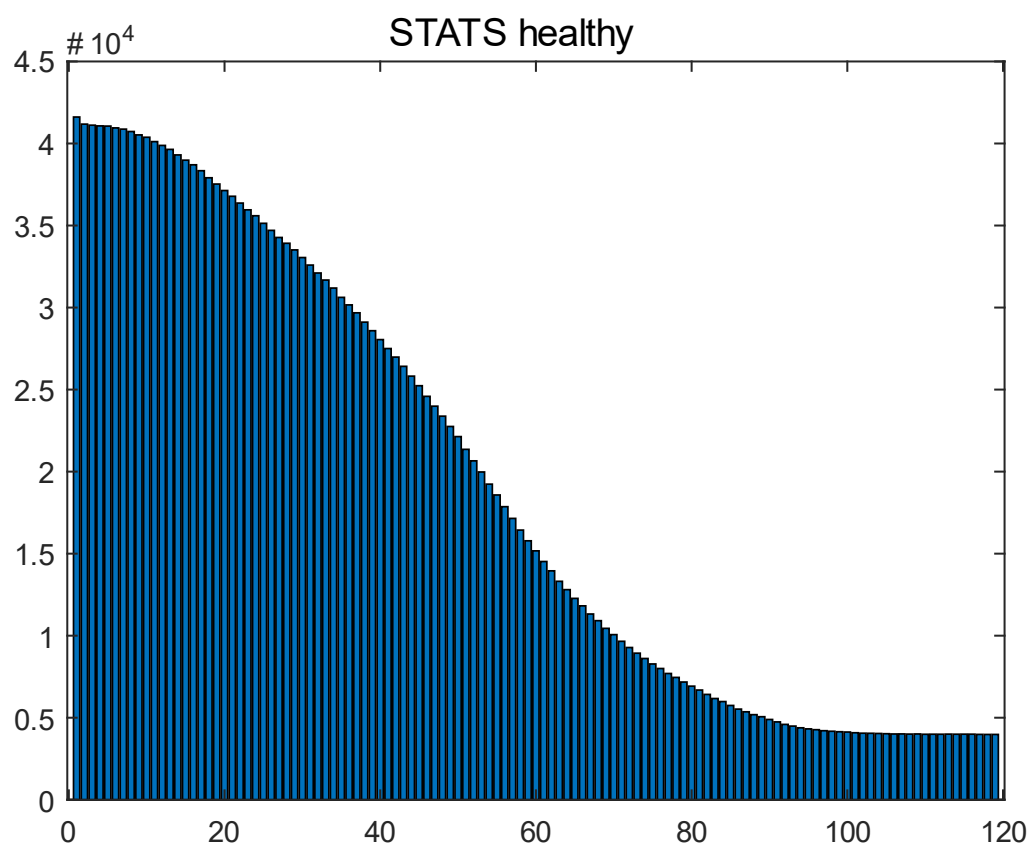
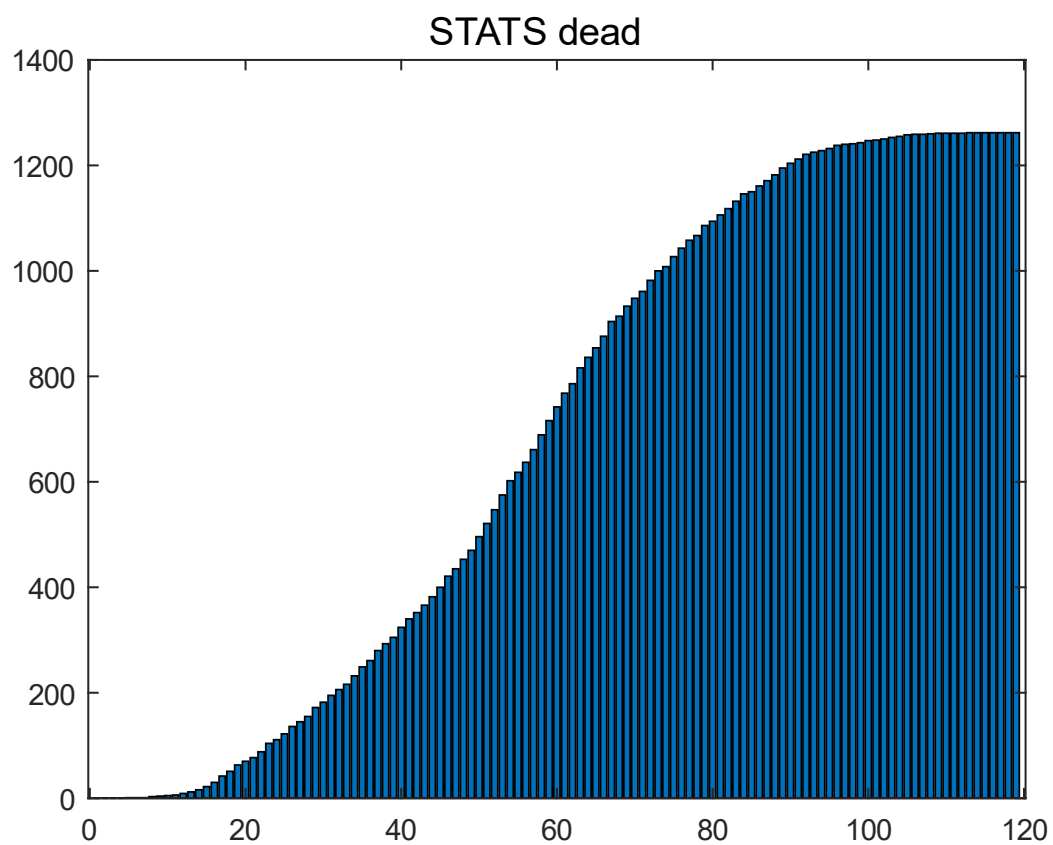


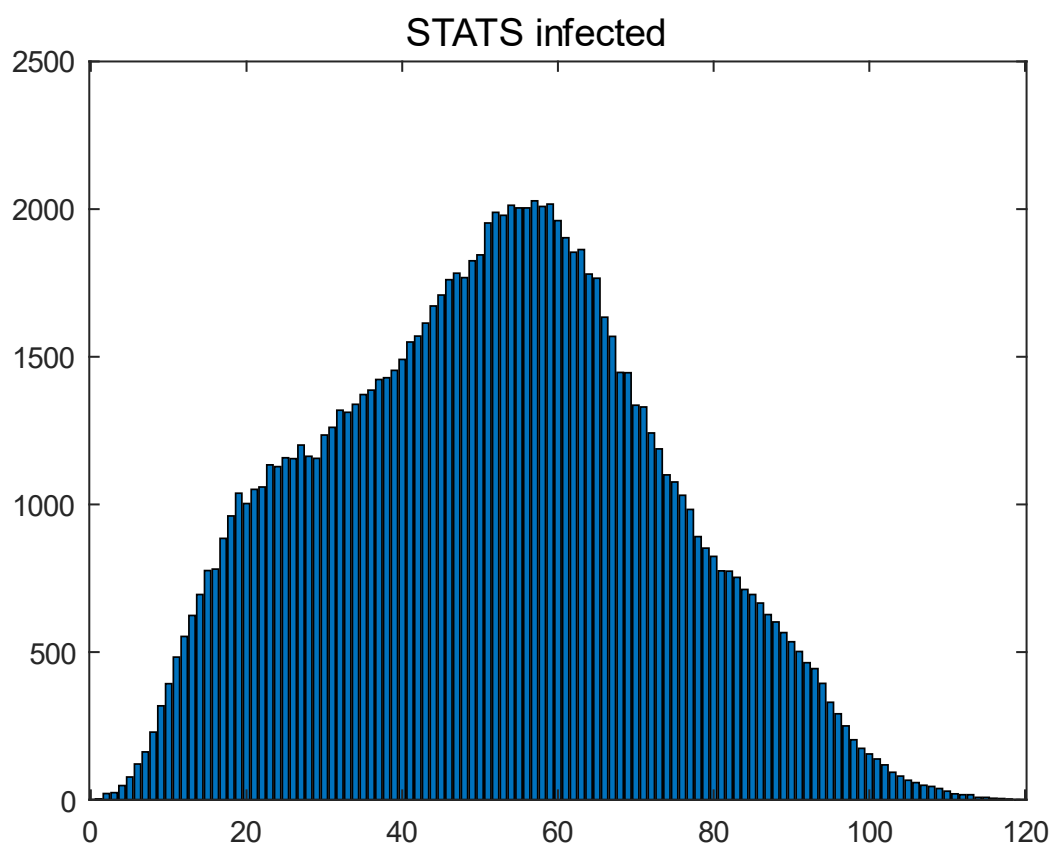
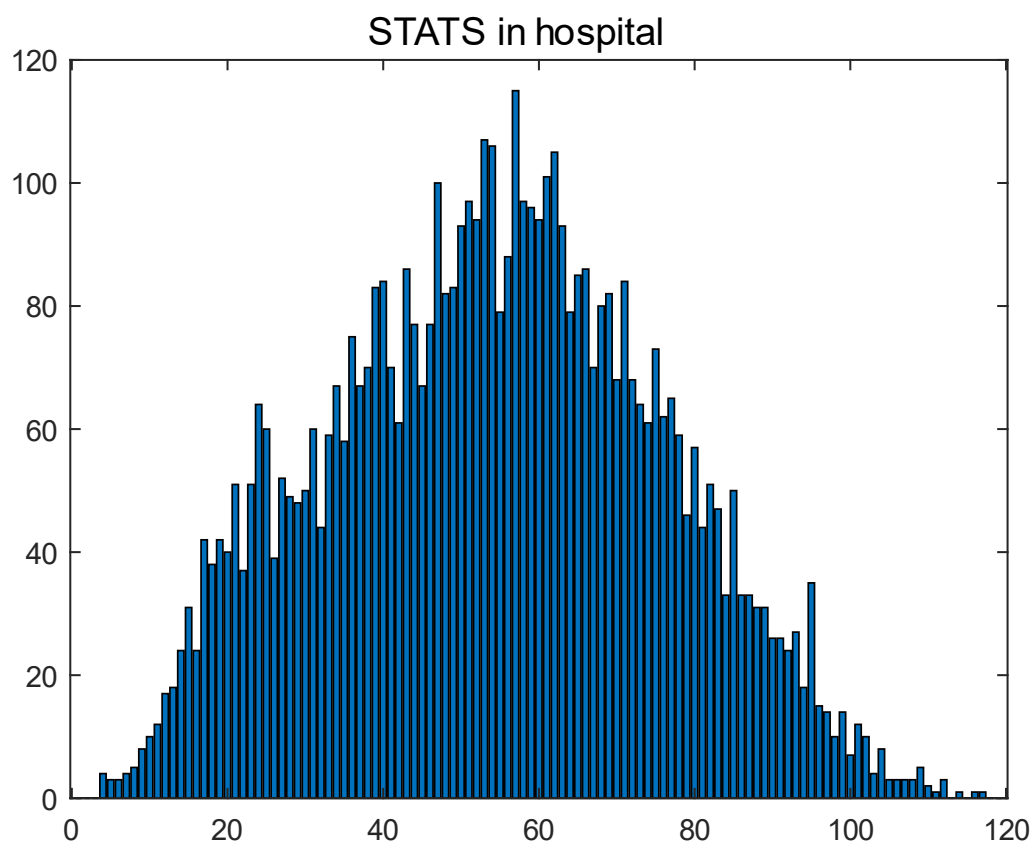
#### 4.2. Tylko ochrona osobista:

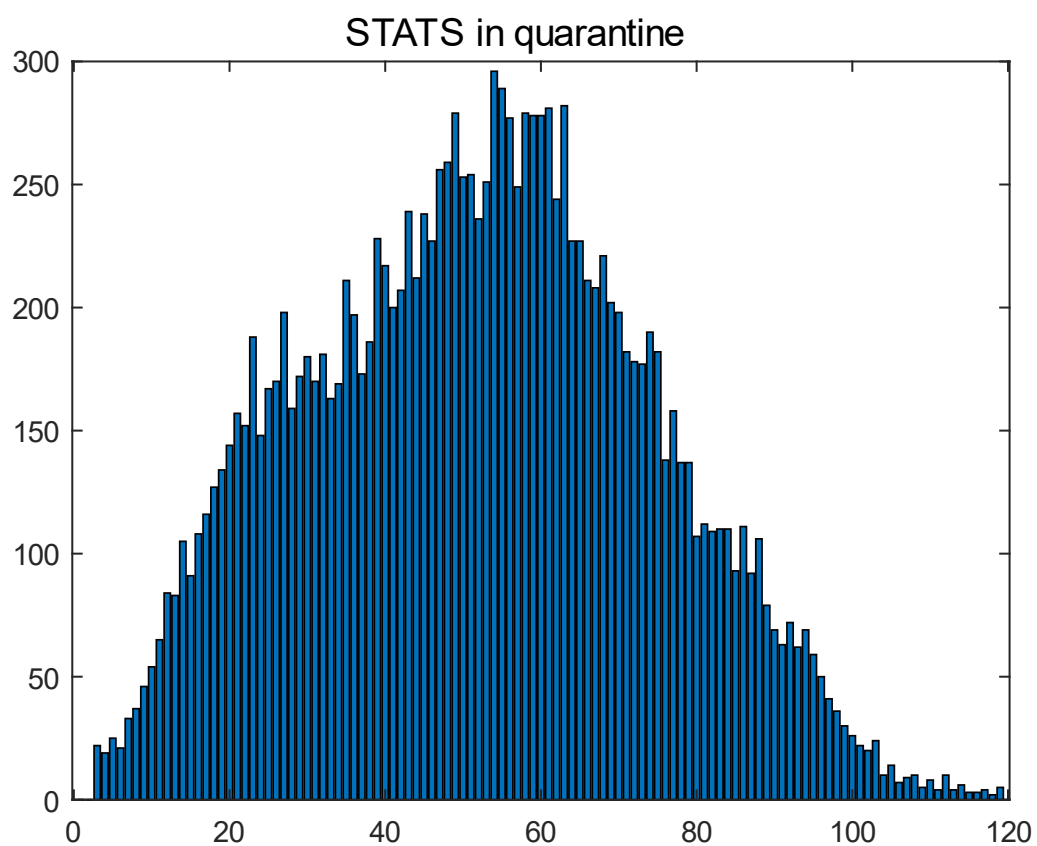
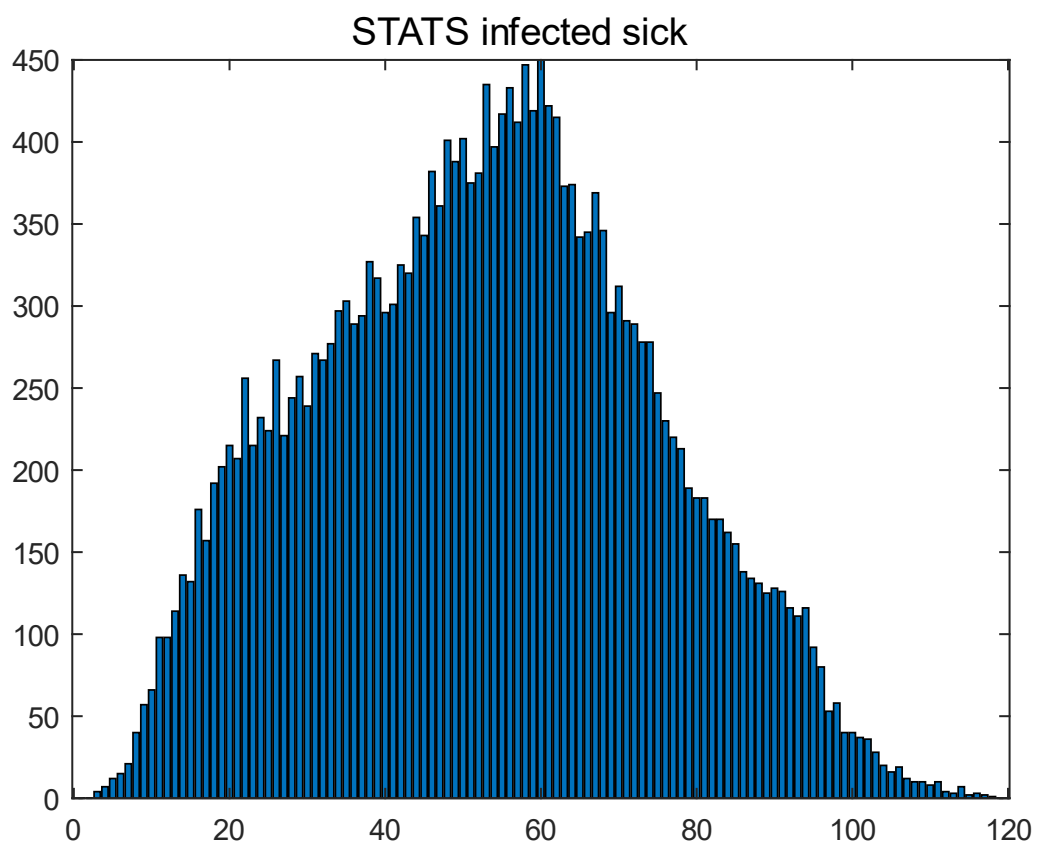
Na wykresach można zauważyć znaczne wydłużenie trwania epidemii, ale również znaczny spadek śmiertelności. Szczyt epidemii wystąpił o wiele później i był łagodniejszy w liczbach niż w przypadku braku jakiejkolwiek ochrony. Wszystkie te wnioski są zgodne z obserwacjami rzeczywistej epidemii oraz opiniami ekspertów. Co ciekawe, udało się te efekty osiągnąć jedynie dzięki ochronie osobistej, nie kierując nawet większej liczby osób na kwarantannę.

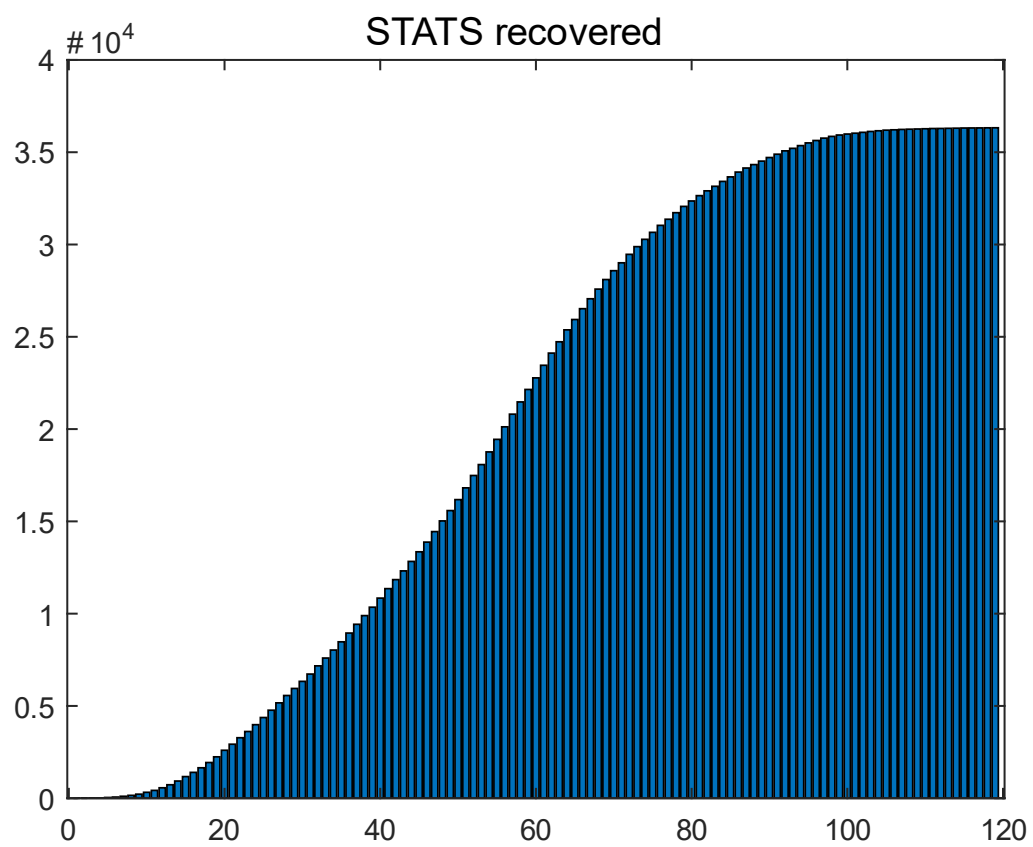
Stan końcowy populacji:





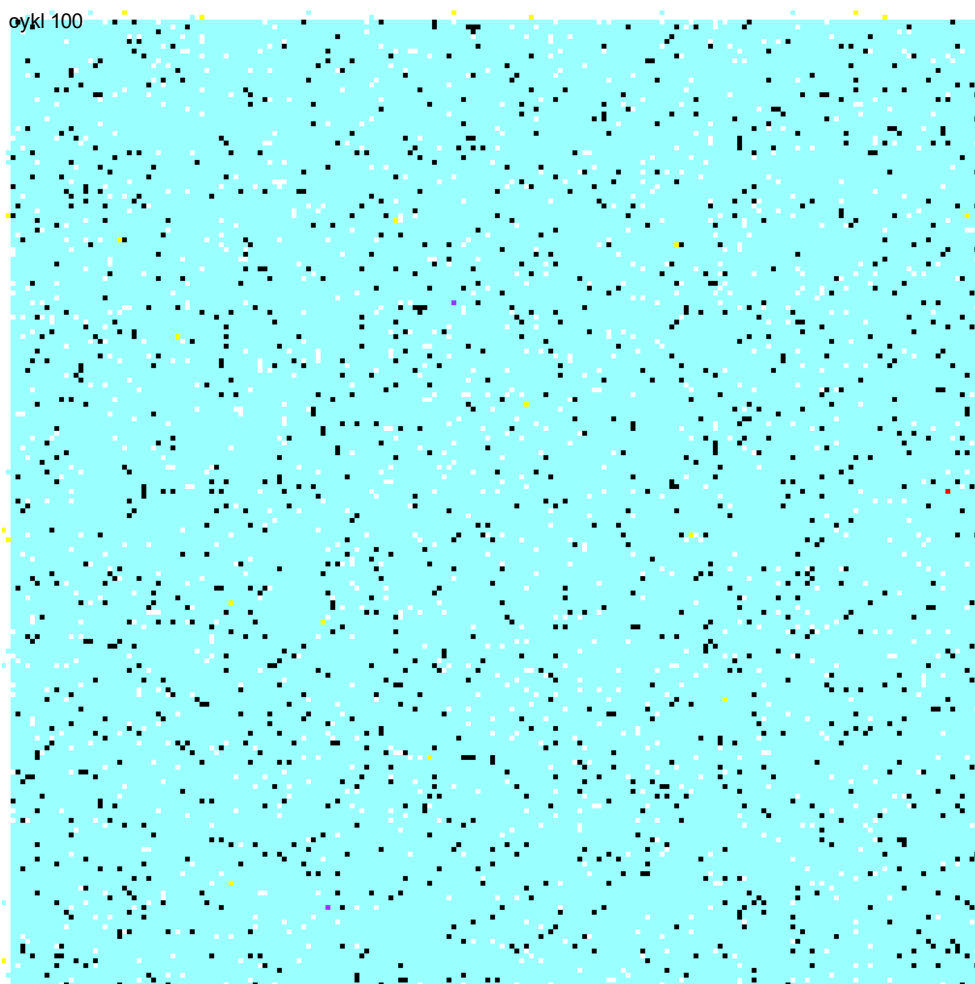


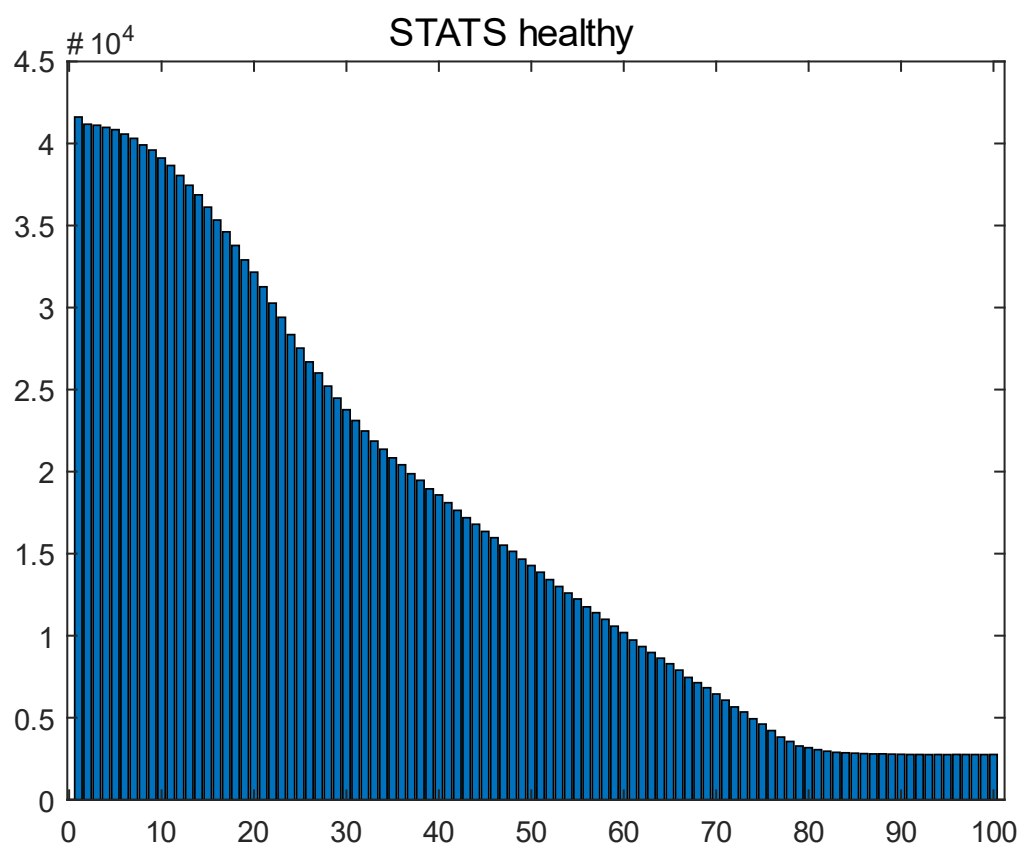
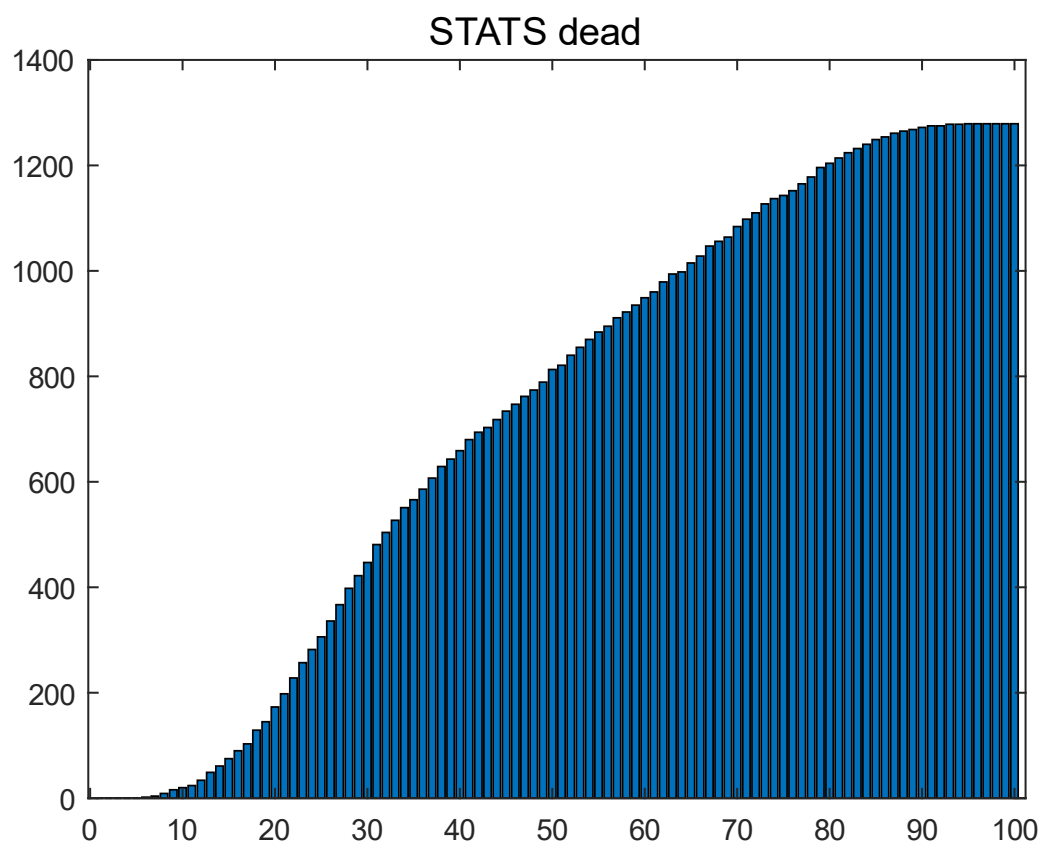


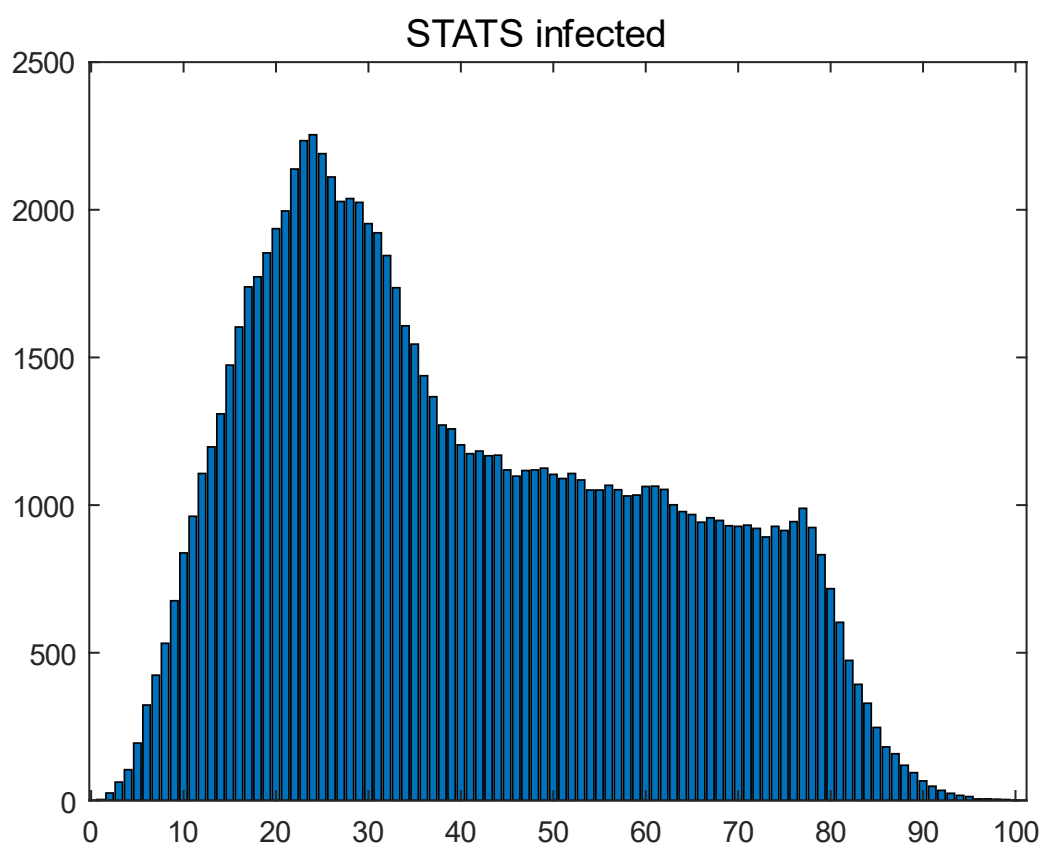
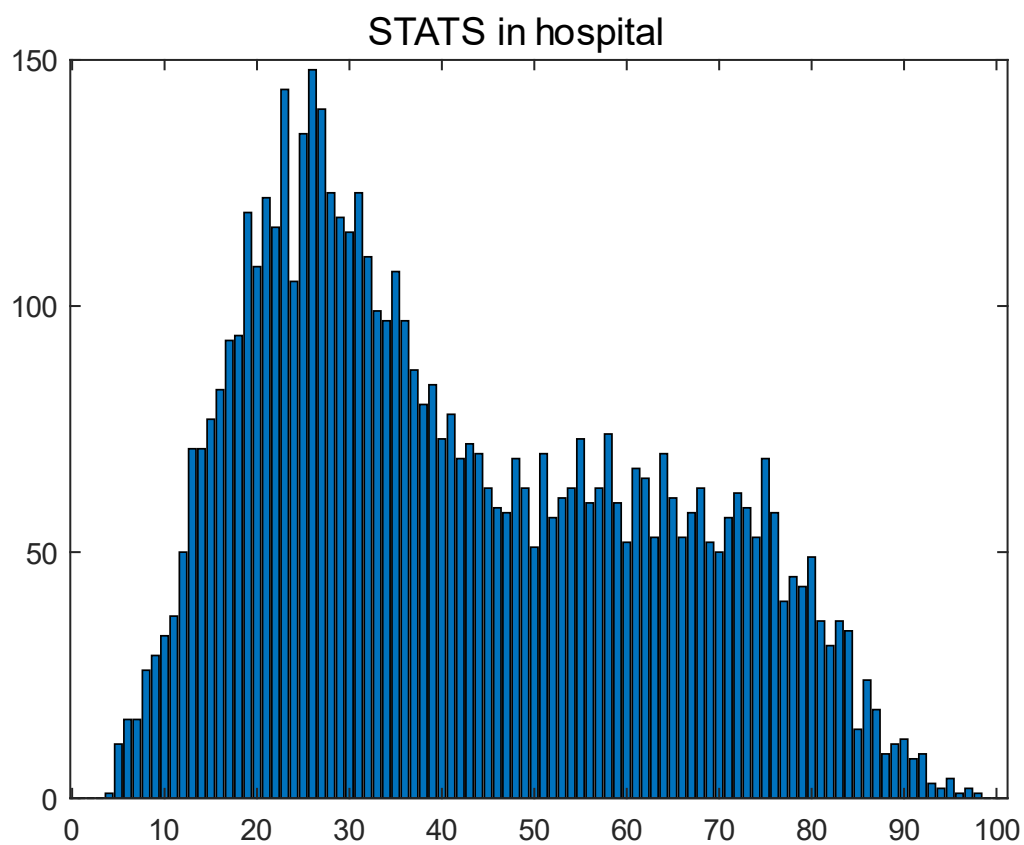


#### 4.3. Tylko ochrona publiczna:

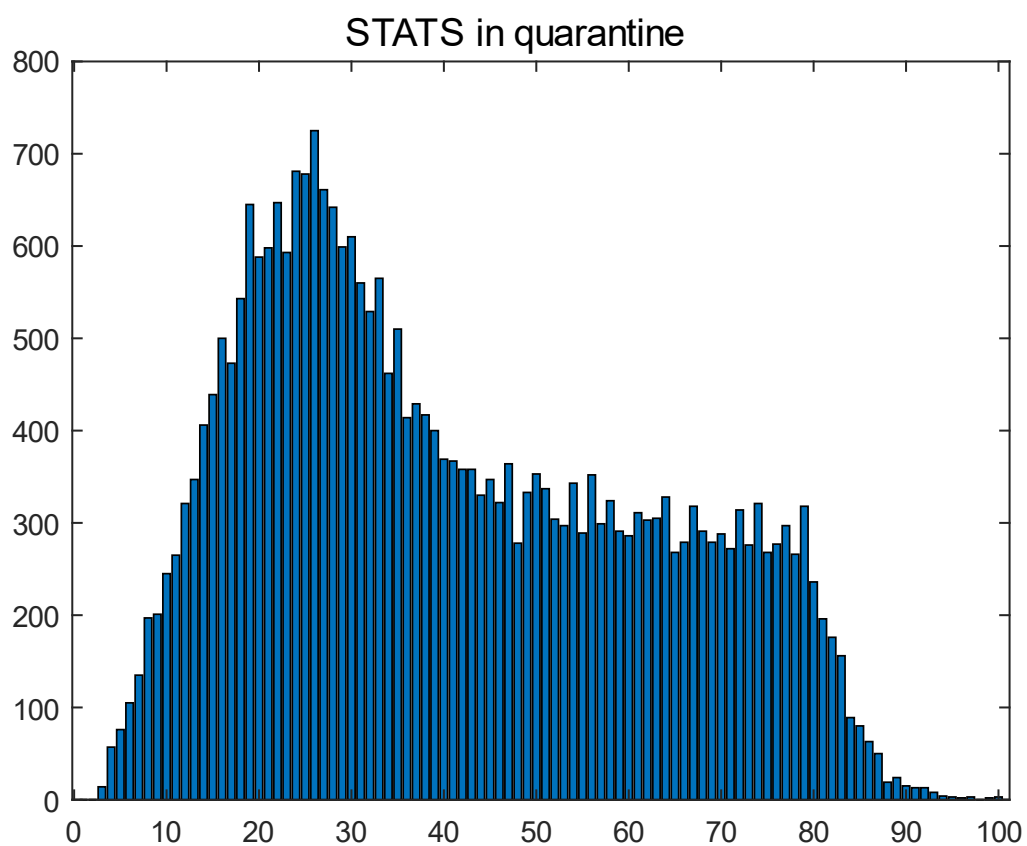
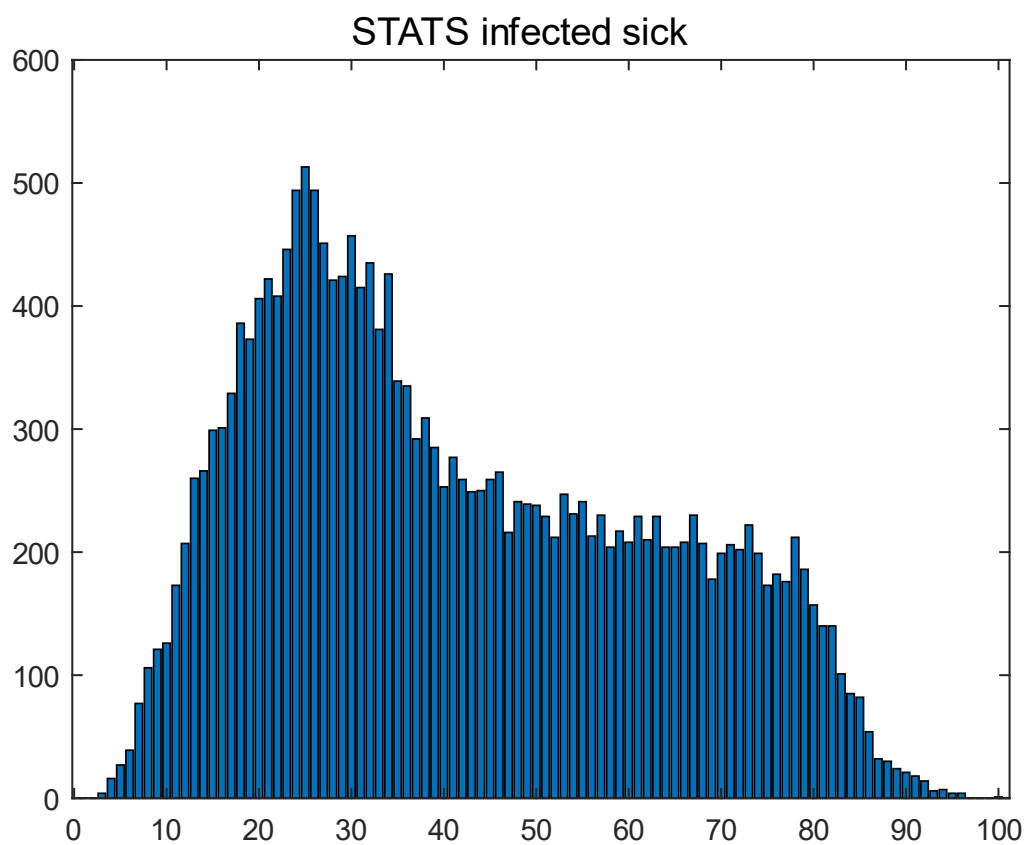
Efekt końcowy jest podobny jak dla punktu 4.2., lecz sam przebieg epidemii znacząco się różni. Sama ochrona publiczna nie radziła sobie w początkowej fazie symulacji. Szczyt epidemii nastąpił w mniej więcej podobnym czasie, jak dla przypadku 4.1. bez żadnej ochrony. Liczba zarażonych wówczas była jednak mniejsza o około 26%, więc ochrona publiczna w kontekście tej symulacji przynosi pewne skutki. Ciekawie zaczęło działać się natomiast tuż po szczycie zachorowań – liczba zakażonych gwałtownie spadła dzięki wzmożonej kwarantannie, co pozwoliło również na duży spadek liczby osób ciężko chorych i w szpitalach. Dzięki temu, po około 40 cyklach, kąt nachylenia linii trendu dla wykresu śmiertelności znacząco zmniejszył się, gdyż pacjentów w szpitalach znów było mniej, niż respiratorów – każdy otrzymał odpowiednią pomoc. Kolejny skok nastąpił w okolicach 80 cyklu, kiedy to epidemia zaczęła gwałtownie wygasać.

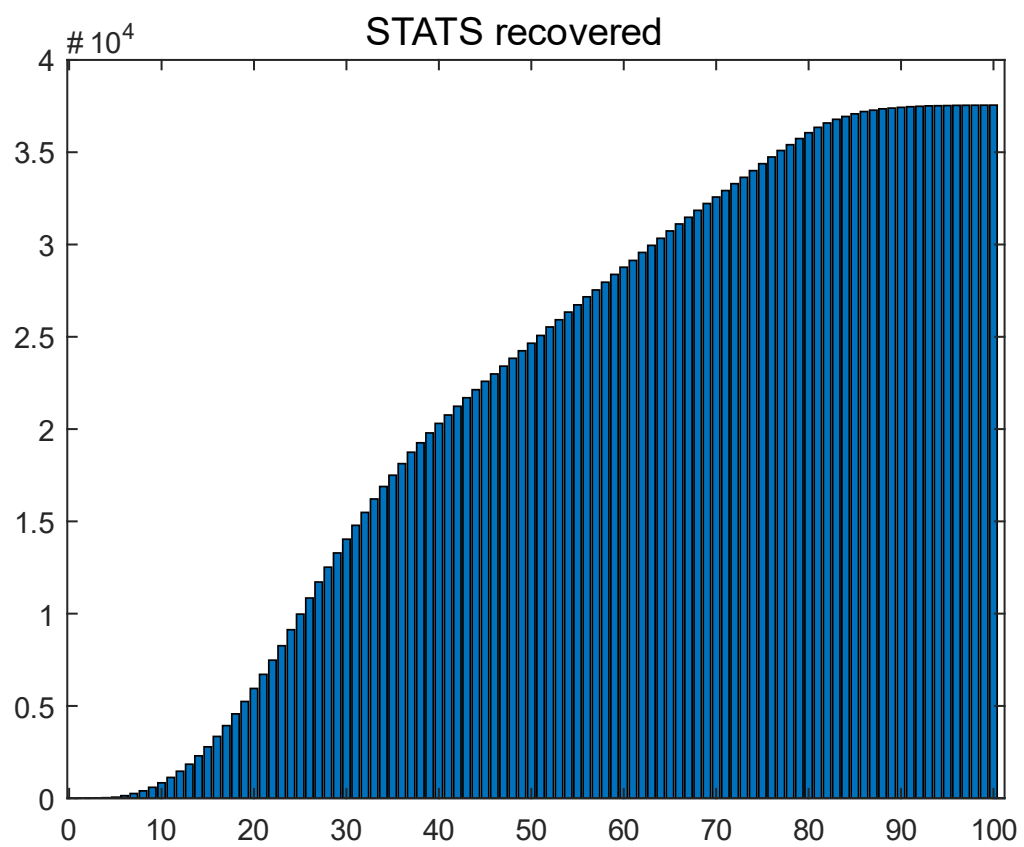






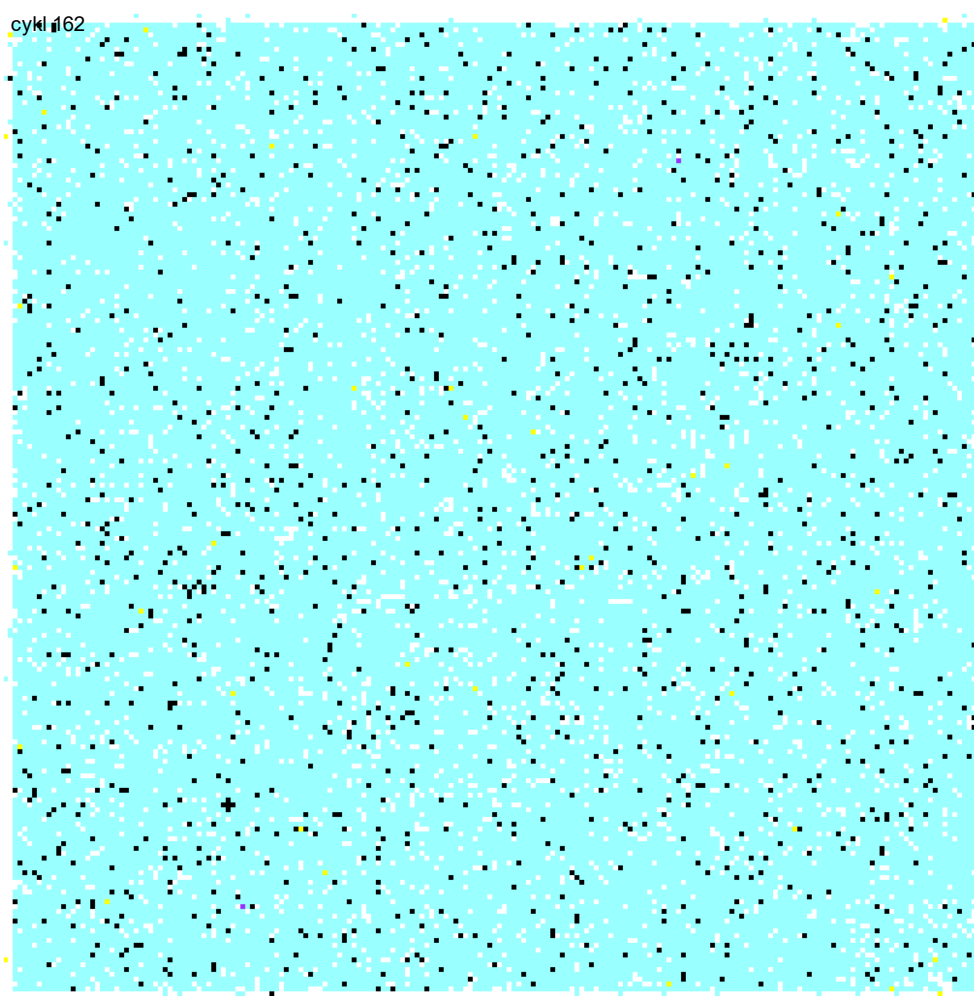


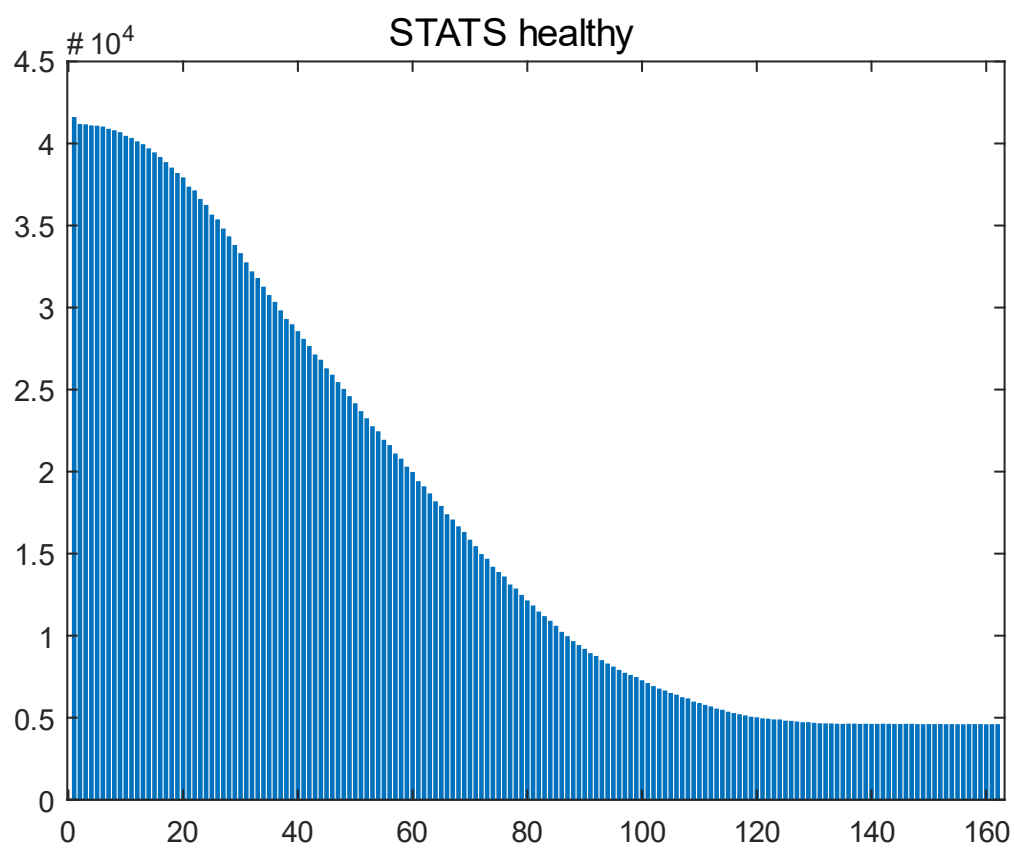
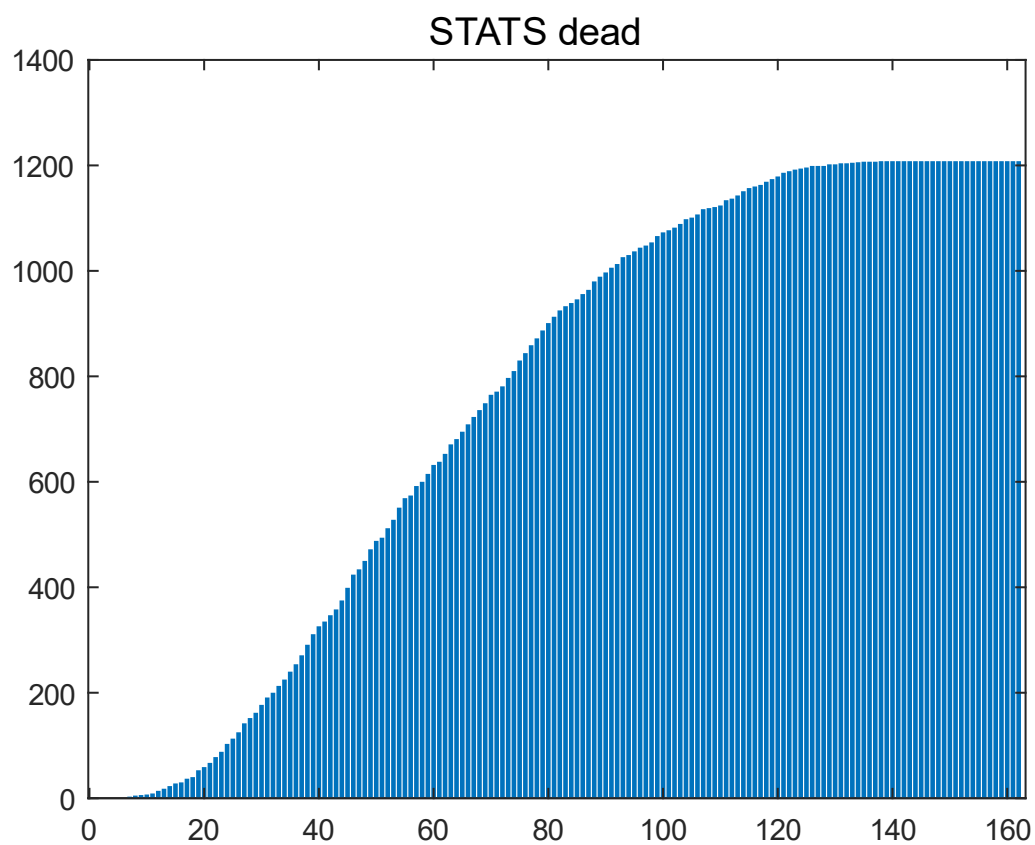


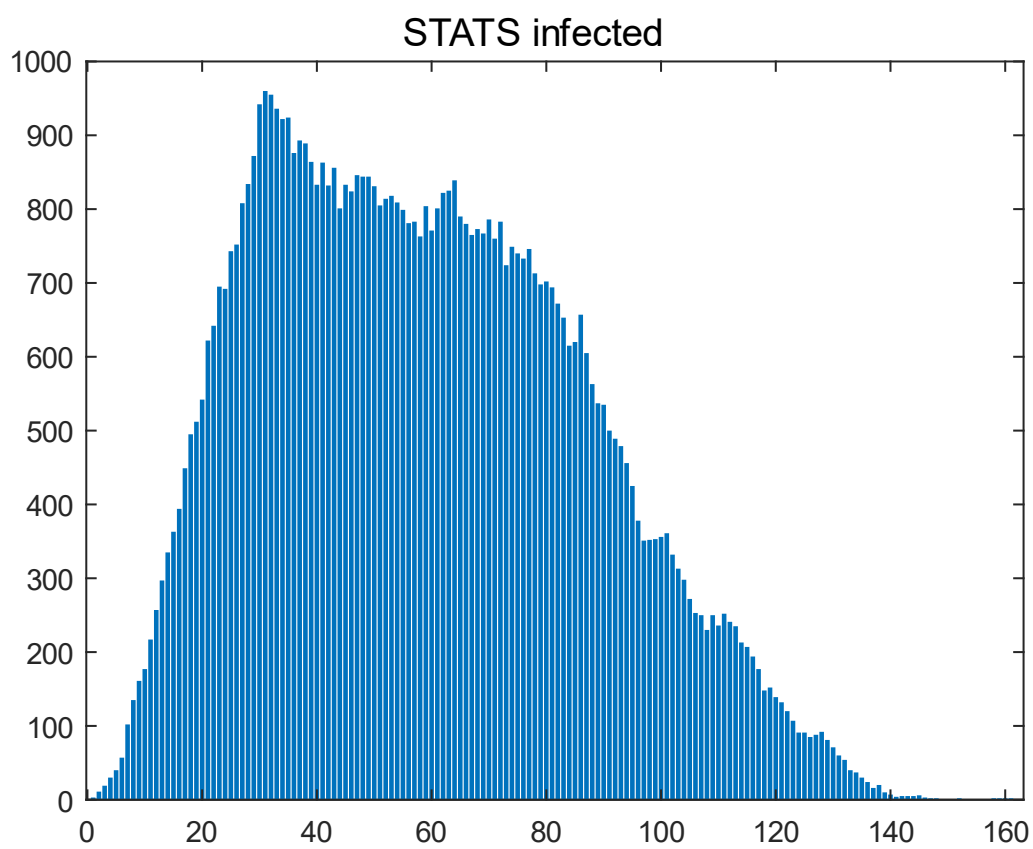
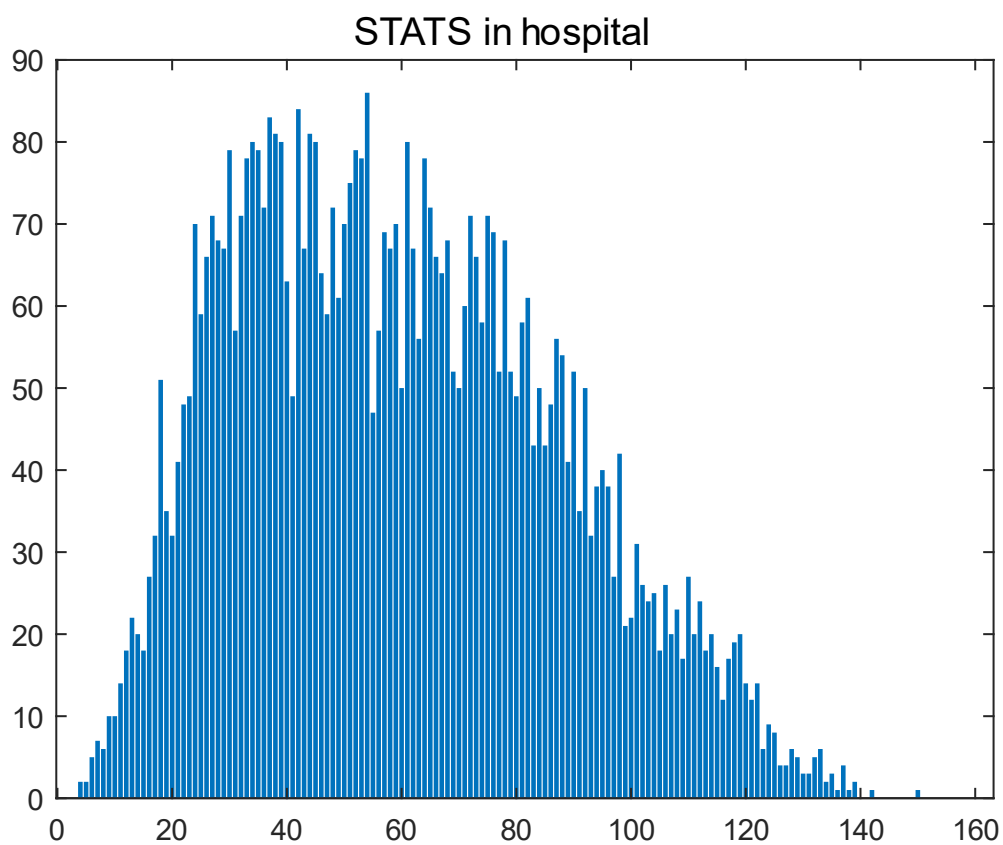


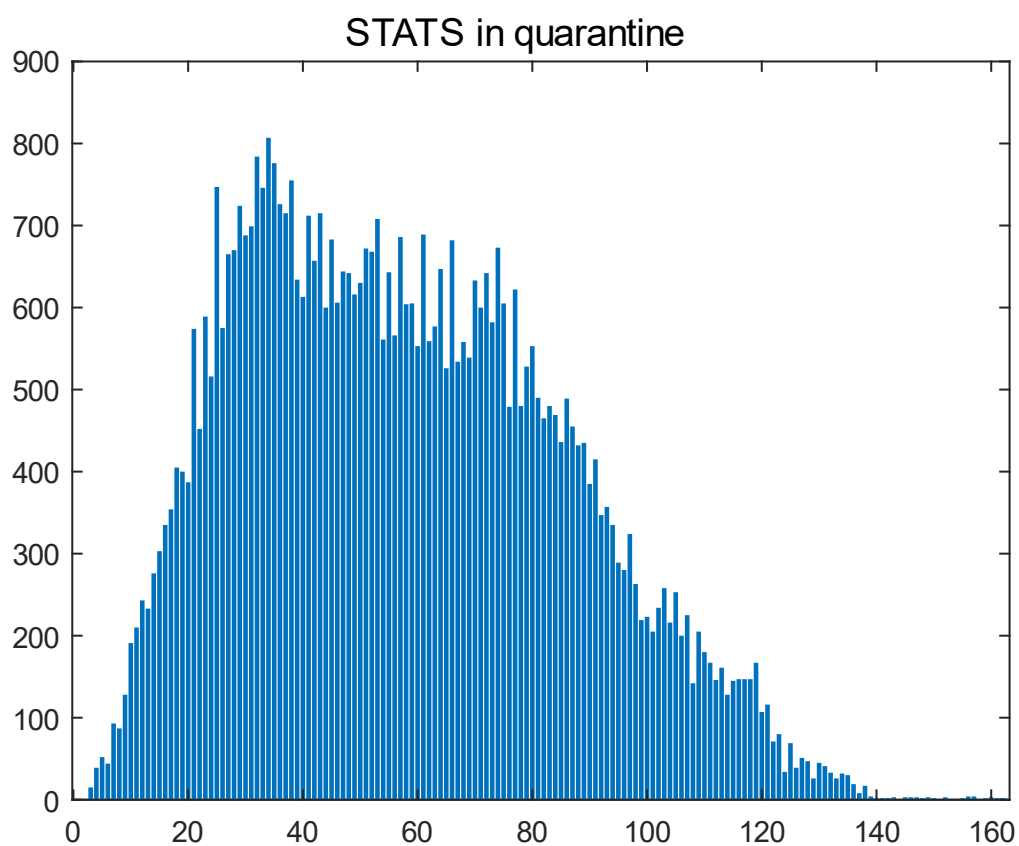
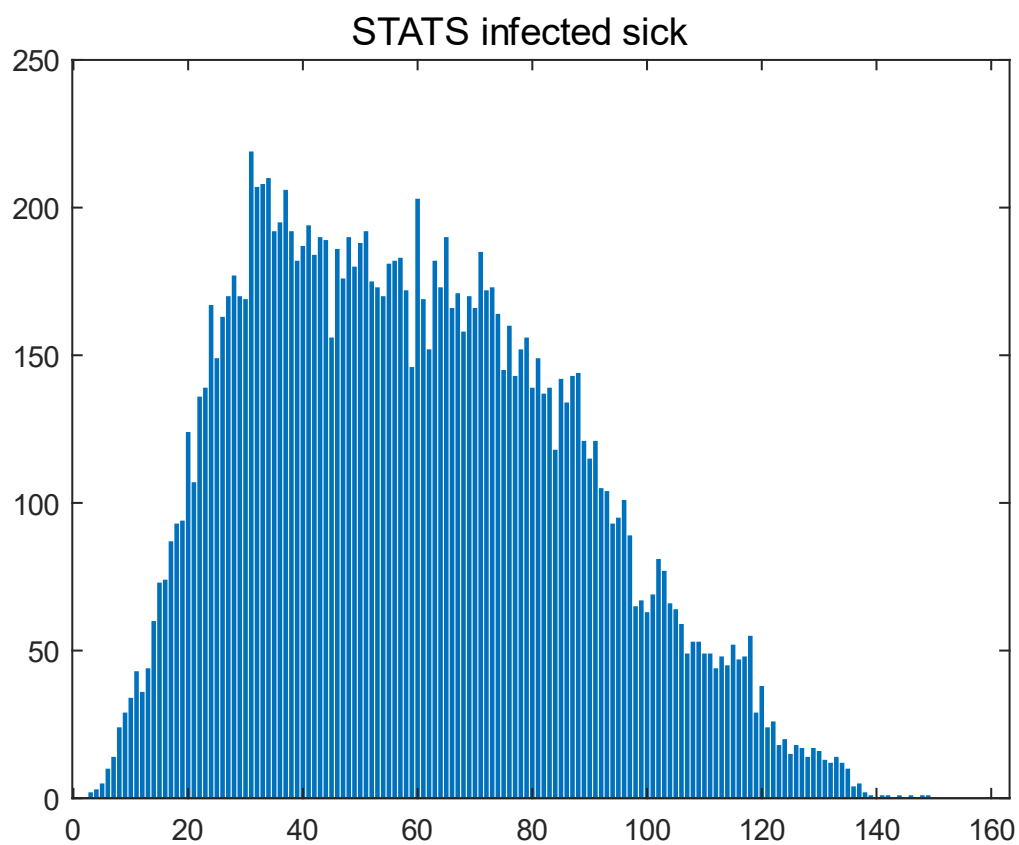
#### 4.4. Pełna ochrona społeczeństwa:

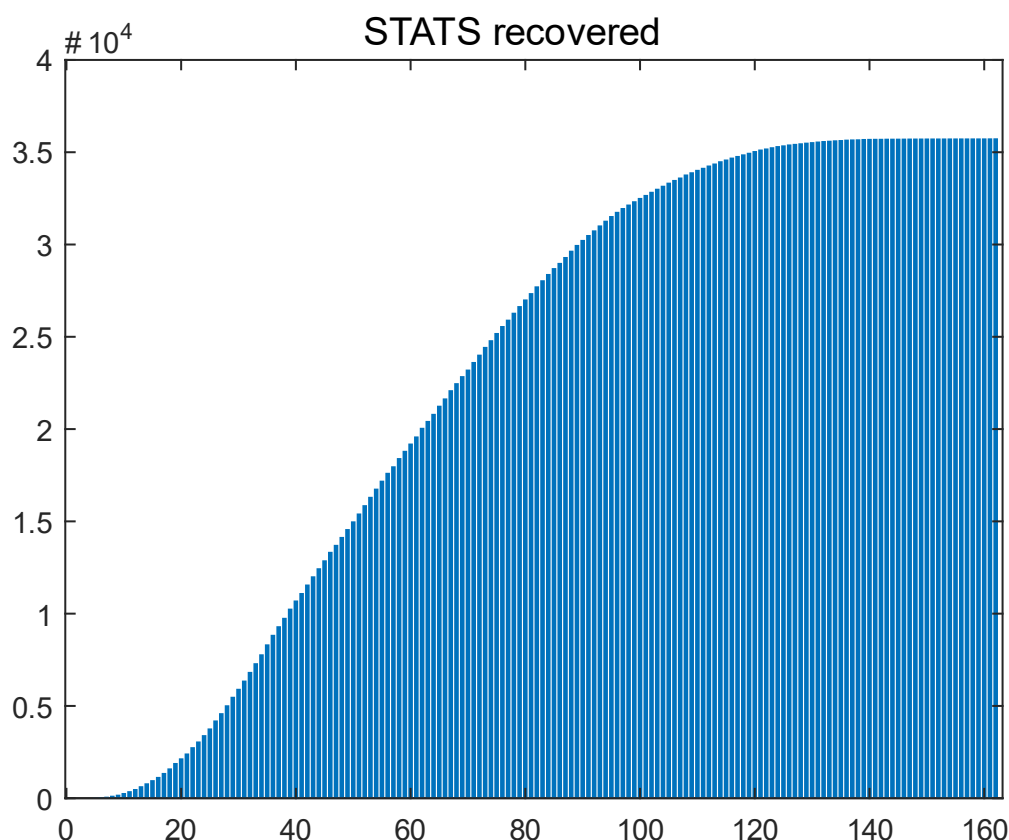
W tym wypadku nastąpiła – zgodnie z przypuszczeniami i oczekiwaniami – kumulacja korzyści płynących z obu typów ochrony społeczności. Zastosowanie ochrony osobistej od samego początku symulacji pozwoliło złagodzić narastanie liczby zarażonych w pierwszej fazie. W szczycie epidemii zarażonych było około 1000 osób, co jest wartością dwukrotnie mniejszą niż dla przypadków zastosowania tylko jednego typu ochrony oraz 3,5-krotnie mniejszą niż dla symulacji z brakiem ochrony. Z kolei ochrona ogólna oraz zatrzymywanie na kwarantannie większej liczby ludzi zarażonych zahamowało wzrost liczby zarażeń w drugiej fazie symulacji. Wskutek tych działań liczba chorych w szpitalu nigdy nie przekroczyła liczby dostępnych respiratorów, pozostawiając wręcz duży margines (200 dostępnych respiratorów vs maksymalnie 80 zachorowań). Epidemia w tym przypadku trwała najdłużej, lecz jednocześnie miała najłagodniejszy przebieg (nie licząc skutków gospodarczych, które nie są uwzględnione w symulacji). Liczba osób zmarłych była mniejsza niż dla poprzednich przypadków, lecz spadek ten nie jest tutaj tak wyraźny, jak między brakiem ochrony a zastosowaniem jakiejkolwiek.











## 5. Podsumowanie.

Bardziej szczegółowe wnioski zamieszczono przy poszczególnych próbach w punkcie czwartym. Symulacja ogólnie daje wrażenie dość poprawnej i realnej. Kształty wykresów w dużym stopniu pokrywają się z rzeczywistym przebiegiem – mamy zatem wykres wykładniczy w pierwszej fazie, później szczyt epidemii i stopniowe jej wygaszanie. Śmiertelność końcowa otrzymana przy pełnej ochronie społeczności wyniosła około 3%, co jest wartością większą niż w rzeczywistości. Opierając się jedynie na oficjalnych potwierdzonych przypadkach wirusa COVID-19 oraz liczby potwierdzonych zmarłych z jego powodu dla Niemiec na dzień 30.04.2020r. uzyskano śmiertelność na poziomie 4%. Jak jednak wiadomo zdecydowana większość osób przechodzi chorobę wywołaną wirusem COVID-19 bezobjawowo i pomimo wykonania ponad 2,5mln testów w Niemczech (stan na 29.04.2020r.) wciąż wiele zarażeń pozostaje niewykryta. Realną śmiertelność wirusa przyjdzie nam ocenić zapewne dopiero po kilku latach. Opierając się natomiast na dostępnych obecnie danych i szacowaniach, wyniki symulacji można uznać za poprawne.

## Bibliografia

- [1] Ćw. 2 Instrukcja do ćwiczenia
- [2] <https://berlinspectator.com/2020/03/26/chronology-germany-and-the-coronavirus-1/>
- [3] Dokumentacja pakietu MATLAB