Matematisk modellering af smittespredning

Af Jan Brønnum Sørensen, Aalborg City Gymnasium

Inden vi går i gang, vil jeg bede dig om at downloade programmet Netlogo, da vi skal bruge det senere. Det kan tage lidt tid at hente, så for at undgå ventetid senere, bedes du gøre det nu.

Matematisk modellering

En matematisk model handler om at simplificere en kompliceret virkelighed ved brug af matematik så meget, at det bliver praktisk muligt at regne på tingene, helst på en overskuelig måde. Hvis modellen er god, kan den forudsige eller forklare noget brugbart om den ellers meget komplicerede virkelighed, selvom modellen er meget simplere end virkeligheden.

Lad os se på nogle eksempler fra skriftlig eksamen, hvor der indgår matematiske modeller:

En funktion f er bestemt ved

$$f(x) = -0{,}16x^2 + 51x + 3185, \quad 0 \leq x \leq 200.$$

a) Tegn grafen for f.

I en model beskriver f sammenhængen mellem kornudbyttet og den tilførte gødningsmængde på en bestemt mark.

Det er klart, at mange andre forhold end blot gødningsmængde faktisk påvirker udbyttet, f.eks. jordbund og nedbør, men i denne model er det kun gødning, som er med. Hvis modellen er god, vil den kunne forudsige noget anvendeligt om effekten af gødning, men den vil næppe kunne forudsige det præcise udbytte, og det vil nok ikke være muligt at opstille en helt præcis model.

I den næste opgave er det måske ikke så tydeligt, er der tale om en model. Læs eksemplet og overvej, hvorfor det er en model, før du læser videre under eksemplet.

Et flyselskab har gennem statistiske undersøgelser fundet ud af, at sandsynligheden er 15 % for, at en passager, der har bestilt plads til en bestemt afgang, ikke møder op. Til en sådan afgang har selskabet accepteret bestillinger til 50 personer, selv om flyet kun har 48 pladser.

Man vil typisk regne opgaven vha. binomialfordelingen, der som model antager uafhængighed mellem gentagelserne. I den model har man bl.a. ikke medtaget, at der kan være grupper af rejsende, som afhænger af hinanden, f.eks. familier. Man har heller ikke medtaget, at lokale vejr-, trafikale eller andre forhold kan betyde, at de enkelte passagerer ikke er uafhængige eller de 15% passende i alle tilfælde. Om det så ofte betyder noget for modellens anvendelse, er en anden sag.

I den virkelige verden bruges de matematiske modeller i stor udstrækning, også i større og mere komplicerede udgaver, f.eks. til vejrudsigter, forsikringsbranchen, nationaløkonomi eller til dimensionering af kloaker.

Det er vigtigt at gøre sig klart, at i alle praktiske situationer er de matematiske modeller *forkerte*, da de ikke indfanger *alle* aspekter – så det handler ikke om at være perfekt korrekt/sand, men om at være *anvendelig*, selvom modellen i praksis *aldrig* er (helt) korrekt.

Med dette forord i mente – lad os se på matematisk modellering af biologisk smittespredning.

novo nordisk fonden

Den første simple model

Lad os starte meget simpelt med en model for spredning af en sygdom i en population.

- 10000 ens individer (ikke noget med alder, køn, bopæl osv., alle er ens), hvoraf 2 er smittede.
- Man kan enten være rask (og kan blive smittet) eller syg (og kan smitte). Kun de 2 tilstande.
- Modellen er diskret i den forstand, at vi regner dag for dag, men kontinuert i den forstand, at der kan være 7,3 syge personer. Det bemærkes, at virkeligheden nærmere er omvendt.
- Der sker ingen tiltag eller ændringer i opførslen i populationen undervejs.

Vi laver nu to funktioner, hvor vi anvender engelske betegnelser

- t er antal dage siden start. Der regnes kun i hele dage.
- S(t) angiver antal raske/modtagelige [engelsk Susceptible], hvor S(0)=9998.
- I(t) angiver antal syge/smittende [engelsk Infectious], hvor I(0)=2.

Vi skal så beslutte os for en model for, hvordan vi beregner, hvor mange der bliver smittet fra dag til dag. Der virker rimeligt at antage, at antallet af nye smittede vil være lavt, hvis der enten er få raske eller få smittede og højere, hvis der både er mange raske og mange smittede.
Vi vælger at modellere dette på følgende vis, hvor a er en konstant, der siger noget om, hvor hurtigt sygdommen smitter.

- $S(t+1) = S(t) - a \cdot S(t) \cdot I(t)$
- $I(t+1) = I(t) + a \cdot S(t) \cdot I(t)$

Lad os sige, at vi forventer, at de 2 smittede i starten hver har 10% chance for at smitte en anden person pr. dag. Det giver ligningen $a \cdot S(0) \cdot I(0) = 0{,}2$, så vi får, at a=0,00001 (ca.). De første par dage vil derfor give denne udvikling:

- $S(1)=S(0) - a \cdot S(0) \cdot I(0) = 9998 - 0{,}00001 \cdot 9998 \cdot 2 = 9997{,}80$
- $I(1) = I(0) + a \cdot S(0) \cdot I(0) = 2 + 0{,}00001 \cdot 9998 \cdot 2 = 2{,}20$
- $S(2)=S(1) - a \cdot S(1) \cdot I(1) = 9997{,}80 - 0{,}00001 \cdot 9997{,}80 \cdot 2{,}20 = 9997{,}58$
- $I(2) = I(1) + a \cdot S(1) \cdot I(1) = 2{,}20 + 0{,}00001 \cdot 9997{,}80 \cdot 2{,}20 = 2{,}42$

Bemærk igen, at vi regner i kommatal i antal personer i modellen, selvom det åbenlyst ikke giver mening i virkeligheden. Det er vist åbenlyst, at vi ikke ønsker manuelt at fortsætte beregningerne, så lad os tage Excel til hjælp.

Du kan finde hjælp og løsning til opgaverne bagerst i dette dokument, men prøv først selv.

Opgave 1

- Lav et regneark med to søjler, én til S(t) og én til I(t).
- Indtast værdierne 9998 og 2 i den første række
- Lav udregningerne af S(1) og I(1) i anden række.
- Kopier udregningerne til de efterfølgende 199 rækker for beregning op til S(200) og I(200).
- Få desuden regnearket til at tegne grafer for S(t) og I(t).

Sammenlign med min løsning, og diskuter, hvad modellen viser.

Den model, vi har lavet, kaldes ikke overraskende for en SI-model. Matematikken kaldes for differensligninger, fordi vi hele tiden ser på forskellen mellem to efterfølgende dage, og differens jo netop betyder forskel. Hvis du har matematik på A-niv vil du desuden kunne bruge differentialligninger til beskrivelsen af modellen, og du vil kunne genkende kurven for I(t) som logistisk vækst.

Udbygning af modellen – SIR

I SI-modellen fortsætter et individ med at smitte andre i ubegrænset tid. For mange typer af smitte, er det næppe en rimelig model, så lad os tilføje endnu en tilstand, som vi vil kalde for R (engelsk Recovered). Det betyder, at personen ikke længere kan smitte andre, men heller ikke selv kan blive smittet (igen). Det kan dække over, at personen er blevet rask og immun eller er død, hvilket effektivt i modellen er det samme, men ikke helt i virkeligheden.

Vi skal så beslutte os for en model for, hvordan individer går fra at være Infectious til at være Recovered (altså enten bliver raske eller dør). Vi vil antage, at en fast procentdel af de syge hver dag bliver raske/dør, hvilket giver disse differensligninger, hvor ligningen for I(t) er ændres på passende vis.

- $R(0)=0$
- $R(t+1) = R(t) + b\cdot I(t)$
- $I(t+1) = I(t) + a\cdot S(t)\cdot I(t) - b\cdot I(t)$

Vi skal så have bestemt os for en værdi af b. Hvis vi siger, at man i gennemsnit er Infectious i 20 dage, vil vi med en vis rimelighed kunne sætte b til 1/20.

Opgave 2

- Tilføj en søjle med R(t), hvor der står 0 i første række.
- Ændr beregningen af I(1) i anden række.
- Tilføj beregningen af R(1) i anden række.
- Kopier udregningerne til de efterfølgende 499 rækker, så du har S(t), I(t) og R(t) op til dag 500.
- Få desuden regnearket til at tegne grafer for S(t), I(t) og R(t).
- Aflæs hvad det maksimalt antal samtidige smittede er, og hvor mange smittede der i alt har været i løbet af de 500 dage.

Sammenlign med min løsning, og diskuter, hvad modellen viser.

Selvom SIR modellen jo er ekstremt simpel sammenlignet med virkeligheden, kan vi måske bruge den til noget. Lad os først se på betydningen af konstanten b for smittens udvikling.

Opgave 3

- Afprøv modellen med forskellige værdier af b, både lidt større og lidt mindre end 1/20. Hvilken betydning har det for, hvor mange der totalt bliver smittet og for det maksimale antal samtidigt smittede?
- Hvad skal b f.eks. være, hvis det maksimale antal samtidigt smittede skal under 500?
- Overvej og diskuter, om og hvad man i virkeligheden kan gøre for at ændre på værdien af b.

Opgave 4

- Sæt b=1/20 igen og afprøv modellen for forskellige værdier af a. Hvilken betydning har det for smittens udbredelse?
- Hvad skal a være, hvis smitten, I(t), skal nå sit højdepunkt efter 50 dage?
- Overvej og diskuter, om og hvad man i virkeligheden kan gøre for at ændre på værdien af a.

Yderligere udbygning af modellen

Indtil videre har vi 3 tilstande i modellen, men den kan uden tvivl gøres mere kompliceret med flere tilstande.

Opgave 5

- Overvej, hvilke andre tilstande end S, I og R, der kan give mening i forhold til smittespredning, og hvordan modellen dermed kan udvides.

Ud over at tilføje flere tilstande til modellen, kan man også ændre, hvordan individerne kan flytte sig mellem de enkelte tilstande. Man kan f.eks. medtage, at immuniteten efter sygdommen er tidsbegrænset fremfor permanent, og personer derfor kan gå fra Recovered til Susceptible igen.

Mere om differensligningsmodeller

Dette materiale fra 2020 handler om differensligninger, så der kan du fortsætte, hvis du gerne vil vide mere om differensligninger.

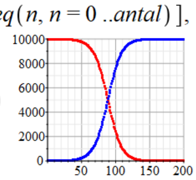
Differensligninger i GeoGebra, Nspire og Maple

I bilagene til det linkede materiale kan du desuden se, hvordan differensligninger kan håndteres i GeoGebra, Nspire og Maple. I GeoGebra og Nspire er metoden stort set den samme med regneark som i Excel, mens det i Maple gøres markant anderledes. Desværre er metoden i materialet kun anvendelig på en enkelt differensligning, og vi har jo et system af flere koblede differensligninger, så vi vil i stedet programmere lidt i Maple selv.

Det kan f.eks. se således ud i Maple for SI-modellen, hvor de fire linjer i det blå felt hører sammen, så de 3 første af disse linjer skal afsluttes med shift+enter i stedet for enter.

```
restart
with(Gym) :
antal := 200 :
a := 0.00001 :
s[0] := 9998 :
i[0] := 2 :
for n from 0 to antal − 1 do;
  s[n + 1] := s[n] − a·s[n]·i[n] :
  i[n + 1] := i[n] + a·s[n]·i[n] :
end do:

with(plots) :
plotS := punktPlot([seq(n, n = 0 ..antal)], [seq(s[n], n = 0 ..antal)], color = red) :
plotI := punktPlot([seq(n, n = 0 ..antal)], [seq(i[n], n = 0 ..antal)], color = blue) :
display([plotS, plotI])
```



Opgave 6

- Implementer SIR modellen i dit CAS-værktøj. Hvis du bruger Maple, skal du tage udgangspunkt i koden for SI modellen ovenfor og tilføje det nødvendige for at få SIR.

Deterministiske kontra stokastiske modeller

Fælles for de modeller, som vi har set på indtil nu, er, at der ikke er noget tilfældighed eller variation i modellen. F.eks. har vi modelleret en periode på 20 dage som smittende ved, at præcis 5% hver dag bliver raske/dør. Dette kaldes for en deterministisk model, da alt er forudbestemt, og en simulering af modellen giver samme resultat hver gang.

Hvis vi i stedet tilføjer noget tilfældighed i modellen, f.eks. at der hver dag tilfældigt er mellem 3% og 7%, der bliver der raske/dør, kaldes modellen i stedet for stokastisk. Det betyder, at gentagne simuleringer af modellen kan give forskellige resultater, og man dermed kan se på variationen i, hvordan smitten kan udbredes afhængigt af tilfældigheder.

Stokastisk model i Excel

I Excel giver kommandoen =Slump() et tilfældigt reelt tal mellem 0 og 1, så =4*Slump()+3 giver et tilfældigt reelt tal mellem 4 og 7. Hvis du har en engelsksproget Excel, hedder kommandoen =Rand(). Afprøv dette i Excel, så du kan se, hvad der sker.

Lad os implementere det i modellen i Excel ved at lave en kopi af Excel arket med SIR og arbejde videre på det.

Opgave 7

- Tilføj en søjle, som giver et tilfældigt tal mellem 0,03 og 0,07 til hver dag.
- Erstat b i udregningerne i de øvrige søljer med den nye, tilfældige værdi.
- Lav en celle i arket, der viser den største værdi af I(t). I Excel gøres dette vha. ”=maks(område)”

- Simuler så modellen 20 gange i Excel ved at trykke på F9 og observer, hvordan maksimum for I(t) er forskelligt fra simulering til simulering.
- Noter både mindste (best case) og største (worst case) værdi af maksimum for I(t), og sammenlign det derefter med de værdier, som de øvrige på holdet har fået.

Man kan naturligvis også tilføje andre elementer af tilfældighed, men i stedet for at gøre det i Excel, vil vi i stedet anvende et program, der hedder NetLogo, som er bedre til den øvelse.

Modellering i NetLogo

NetLogo er et gratis tilgængeligt program, der kan hentes fra denne side. Jeg er på ingen måde ekspert i NetLogo, så hvis du har brugt det før, vil du givet kunne forbedre de simuleringer, som jeg viser her. Men lad os kaste os ud i det.

Lad os starte med en SI-model, men i stedet for at lave en differensligning, vil vi sige, at en rask (S) person, der er indenfor en bestemt radius af en smittet (I) person har 5% chance for at blive smittet hver dag. Bemærk, at vi derved medtager ”placering” i modellen, hvilket vi ikke havde tidligere.

Lad os placere 500 personer, hvoraf de 2 er syge til at starte med, tilfældigt i et rektangel på 100 gange 50, og lad smitteradius være 10. Hvis du selv har brugt NetLogo før, kan du måske allerede godt implementere en sådan model, men ellers kan du få hjælp af denne video.

Opgave 8

- Implementer den omtalte SI-model i NetLogo.
- Afprøv modellen med forskellige værdier af smitteradius.

Opgave 9

- Tilføj skydere til antal personer, antal syge og smitteprocent.
- Få personerne til at flytte sig lidt tilfældigt rundt hver dag, f.eks. med denne kode *right random 360 (drejer i tilfældig retning) og forward 1 (flytter sig 1 frem).*
- Overvej, hvad du mere kan tilføje til SI-modellen.

SI-modellen er nok bare lidt for urealistisk, så udvid dit NetLogo program til at være en SIR model. Tilføj ”recovered” og lad 5% (evt. en skyder) af de infecteous blive recovered hver dag og få en ny farve, så de er synlige. Husk, at de så ikke kan blive syge igen, så det skal du tage højde for i din kode.

Opgave 10

- Implementer SIR-modellen i NetLogo.

Graf i NetLogo

Lad os tilføje grafer for S(t), I(t) og R(t), så vi kan følge udviklingen over tid.

Opgave 11

- Tilføj kommandoen tick til sidst i koden for Ny-dag.
- Tilføj et plot (samme sted, som du tilføjede knapper og skydere)
- Tilføj denne kode til den første pen ”plot (count personer with [infected = 1])” for I(t)
- Tilføj tilsvarende for S(t) og R(t).
- Lav plottet pænt med overskrift osv.

Et festligt indslag i modellen

Lad os tilføje noget helt andet til modellen, nemlig at der holdes en fest.

Tilføj 3 nye knapper ”TilFest”, ”HoldFest” og ”SlutFest” i NetLogo og lav tilhørende kode, der gør følgende:

- Lad 20 tilfældige personer midlertidigt flytte tæt sammen i midten af området på TilFest.
- Lad hver allerede smittet til festen smitte hver af de øvrige med 50% sandsynlighed (evt. en skyder til værdien) på HoldFest.
- Lad til sidst de 20 personer flytte tilbage, hvor de kom fra på SlutFest.

Opgave 12

- Overvej, hvilke variable du får brug for i personer.
- Overvej, hvordan du får personerne flyttet til festen og tilbage igen.
- Implementer det hele i NetLogo.

En større model i NetLogo

Der kan naturligvis tilføjes mange flere elementer til modellen. F.eks:

- Dødsfald, hvor personer, der går fra I til R dør i stedet for at blive raske og immune.
- Alvorlig sygdom. En procentdel af dem, der bliver smittet kan blive alvorligt syge, hvilket gør det mere sandsynligt, at de dør.
- Hospitalskapicitet. Alvorligt syge skal på hospitalet, men der er kun plads til et begrænset antal. Alvorligt syge, der ikke kommer på hospitalet, har større risiko for at dø.
- Man kan ikke blive rask/dø umiddelbart efter man er blevet syg. Der skal gå et antal dage, før man tidligst kan blive rask/dø.
- Skoler. Et udvalgt antal elever ”går i skole”. Der ligner en Fest, men sker dagligt og med de samme personer. Eleverne kan så smitte hinanden på skolen. Der skal være mulighed for at lukke skolen ned undervejs (virtuel undervisning).
- Jobs. Som skoler, blot for nogle andre personer. Der skal være mulighed for at lukke jobs ned (hjemmearbejde).

Opgave 13

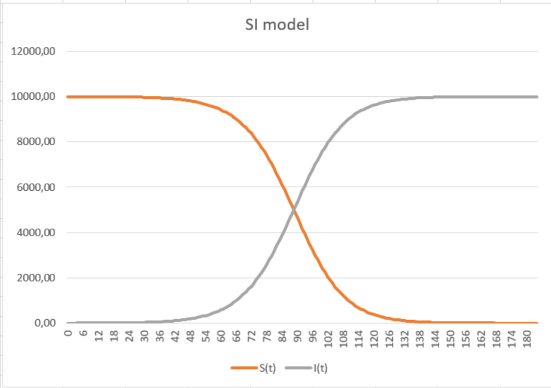
Hvis du har mod på det, så prøv helt selv at udvide din model i Netlogo med en eller flere af de nævnte elementer, eller find selv på andre. God fornøjelse 😊

Du finder et link til mit forslag i facitlisten, så du har også mulighed for at se, hvordan jeg har gjort det, og rette i den kode.

Løsninger

Opgave 1

t	S(t)	I(t)
0	9998,00	2,00
1	9997,80	2,20
2	9997,58	2,42
3	9997,34	2,66
4	9997,07	2,93
5	9996,78	3,22
6	9996,46	3,54
7	9996,10	3,90
8	9995,71	4,29
9	9995,29	4,71
10	9994,81	5,19
11	9994,30	5,70
12	9993,73	6,27
13	9993,10	6,90
14	9992,41	7,59
15	9991,65	8,35
16	9990,82	9,18
17	9989,90	10,10
18	9988,89	11,11
19	9987,78	12,22

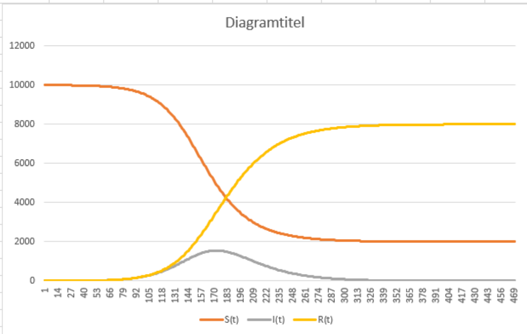


Link til Excel fil.

Opgave 2

N	I0	a	b
10000	2	0,00001	0,05

t	S(t)	I(t)	R(t)
0	9998	2	0
1	9998	2	0
2	9998	2	0
3	9997	2	0
4	9997	2	0
5	9997	3	1
6	9997	3	1
7	9996	3	1
8	9996	3	1
9	9996	3	1
10	9995	3	1
11	9995	3	1
12	9995	4	2
13	9994	4	2
14	9994	4	2
15	9994	4	2
16	9993	4	2
17	9993	5	3
18	9992	5	3

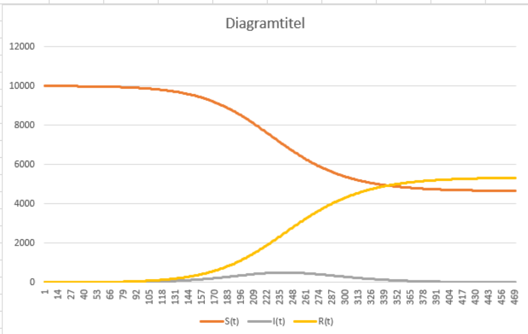


Ca. 8000 af de 10000 har været smittet i løbet af de 500 dage.
Det maksimal antal samtidigt smittede er ca. 1500.
Link til Excel fil.

Opgave 3

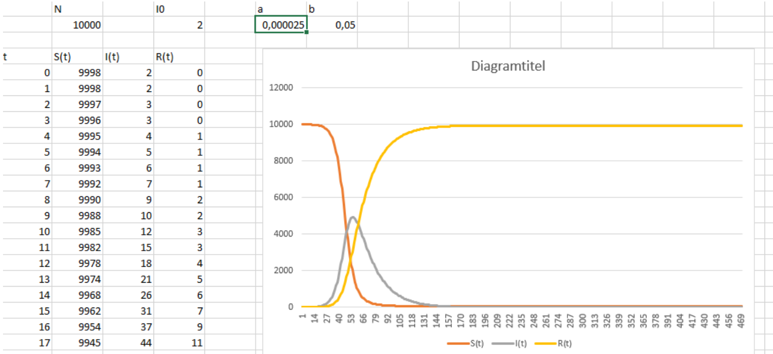
N	I0	a	b
10000	2	0,00001	0,07

t	S(t)	I(t)	R(t)
0	9998	2	0
1	9998	2	0
2	9998	2	0
3	9997	2	0
4	9997	2	1
5	9997	2	1
6	9997	2	1
7	9996	2	1
8	9996	3	1
9	9996	3	1
10	9996	3	2
11	9995	3	2
12	9995	3	2
13	9995	3	2
14	9995	3	2
15	9994	3	3
16	9994	3	3
17	9994	3	3
18	9993	3	3



Højere b hæmmer smitten, lavere b forstærker den.
b=0,07 reducerer det maksimal antal samtidigt smittede til ca. 500.
Man kan måske ændre b ved at isolere personer med symptomer, så de ikke kan smitte andre, eller give dem medicin, så de hurtigere bliver raske.

Opgave 4



N		I0		a	b
10000		2		0,000025	0,05

t	S(t)	I(t)	R(t)
0	9998	2	0
1	9998	2	0
2	9997	3	0
3	9996	3	0
4	9995	4	1
5	9994	5	1
6	9993	6	1
7	9992	7	1
8	9990	9	2
9	9988	10	2
10	9985	12	3
11	9982	15	3
12	9978	18	4
13	9974	21	5
14	9968	26	6
15	9962	31	7
16	9954	37	9
17	9945	44	11

En højere værdi af a giver en hurtigere smittespredning. Det betyder, at toppen af smitten kommer før og er større og at flere totalt bliver smittet. Men det betyder også, at smitten brænder hurtigere ud.
a=0,00025 giver et maksimum efter ca. 50 dage.
Man vil kunne gøre a lavere ved at arbejde hjemme, bruge mundbind, holde afstand og i det hele taget have mindre fysisk kontakt og med færre personer.

Opgave 5

Det er en ret åben opgave, men f.eks.

- E for Exposed til personer, som er smittet, men ikke endnu selv kan smitte andre.
- D for Diseased til personer, som er døde, så man adskiller døde fra raskmeldte.
- C for Carrier til personer, som har haft sygdommen og som ikke pt. er syge, men som har sygdommen i dvale, så den kan bryde ud igen.

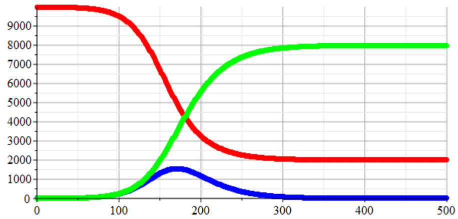
Opgave 6

Her vises blot en løsning i Maple, da løsninger i GeoGebra og Nspire ligner Excel meget.

```
restart
with(Gym) :
antal := 500 :
a := 0.00001 : b := 0.05 :
s[0] := 9998 : i[0] := 2 : r[0] := 0 :

for n from 0 to antal − 1 do;
  s[n + 1] := s[n] − a·s[n]·i[n] :
  i[n + 1] := i[n] + a·s[n]·i[n] − b·i[n] :
  r[n + 1] := r[n] + b·i[n] :
end do:

with(plots) :
plotS := punktPlot([seq(n, n = 0 ..antal)], [seq(s[n], n = 0 ..antal)], color = red) :
plotI := punktPlot([seq(n, n = 0 ..antal)], [seq(i[n], n = 0 ..antal)], color = blue) :
plotR := punktPlot([seq(n, n = 0 ..antal)], [seq(r[n], n = 0 ..antal)], color = green) :
display([plotS, plotI, plotR], size = [600, 300])
```



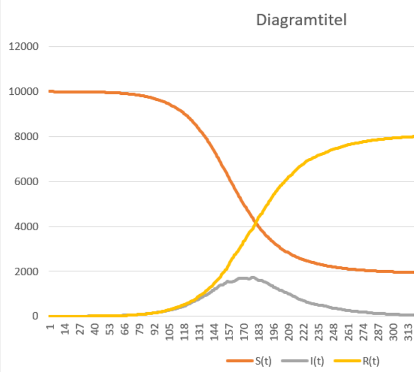
Link til Maple dokument.

novo nordisk fonden

Opgave 7

	N		I0	a
	10000		2	0,00001

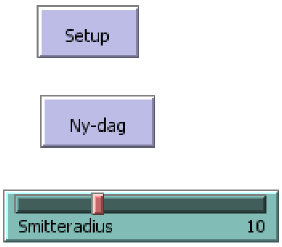
t	S(t)	I(t)	R(t)	b 3%-7%
0	9998	2	0	
1	9998	2	0	0,06165
2	9998	2	0	0,06299
3	9997	2	0	0,05543
4	9997	2	1	0,06645
5	9997	2	1	0,06741
6	9997	2	1	0,06937
7	9996	3	1	0,04867
8	9996	3	1	0,04472
9	9996	3	1	0,04523
10	9996	3	1	0,06271
11	9995	3	2	0,05917
12	9995	3	2	0,05802
13	9995	3	2	0,06706
14	9994	3	2	0,06296
15	9994	4	2	0,04741
16	9994	4	3	0,06622
17	9993	4	3	0,037
18	9993	4	3	0,0491
19	9992	4	3	0,05595
20	9992	5	3	0,06522
21	9992	5	4	0,06535



Max I(t) 1738

Den største værdi af I(t) lå fra 1513 til 1789 over 20 simuleringer for mig. Så der er en vis variation, men dog alligevel nogenlunde samme resultat, selvom der er tilføjet noget tilfældighed til modellen.
Link til Excel fil.

Opgave 8



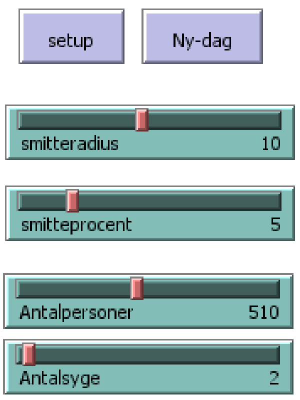

```
breed [personer person]

personer-own [infected]

to setup
  clear-all
  create-personer 500 [setxy random-xcor random-ycor]
  ask personer [set shape "person" set color blue]
  ask n-of 2 personer [set infected 1 set color orange]
  reset-ticks
end

to ny-dag
  ask personer with [infected = 1]
  [
    ask personer in-radius Smitteradius
    [
      if infected = 0 and random 100 < 5 [set infected 1 set color orange]
    ]
  ]
end
```

Opgave 9




```
breed [personer person]
personer-own [infected]

to setup
  clear-all
  create-personer Antalpersoner [setxy random-xcor random-ycor]
  ask personer [set shape "person" set color blue]
  ask n-of Antalsyge personer [set infected 1 set color orange]
  reset-ticks
end

to ny-dag
  ask personer with [infected = 1]
  [
    ask personer in-radius smitteradius
    [
      if random 100 < smitteprocent
      [
        set infected 1
        set color orange
      ]
    ]
  ]
  ask personer [right random 360 forward 1]
end
```

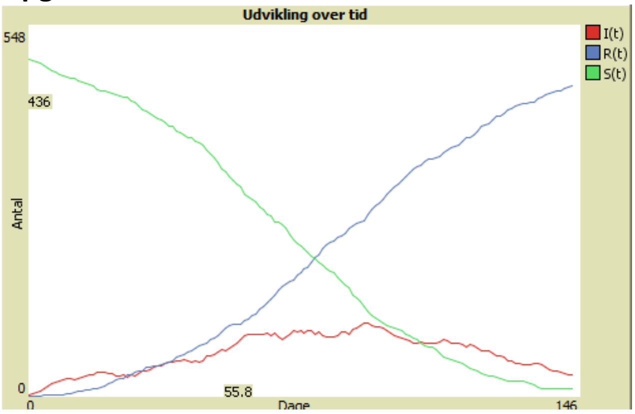
Opgave 10

```
breed [personer person]
personer-own [infected recovered]

to setup
  clear-all
  create-personer Antalpersoner [setxy random-xcor random-ycor]
  ask personer [set shape "person" set color blue]
  ask n-of Antalsyge personer [set infected 1 set color orange]
  reset-ticks
end

to ny-dag
  ask personer with [infected = 1]
  [
    ask personer in-radius smitteradius
    [
      if recovered = 0 and random 100 < smitteprocent
      [
        set infected 1
        set color orange
      ]
    ]
    if random 100 < Raskprocent
    [
      set infected 0
      set recovered 1
      set color green
    ]
  ]
  ask personer [right random 360 forward 1]
end
```

Opgave 11



Color	Pen name	Pen update commands
	I(t)	plot (count personer with [infected = 1])
	R(t)	plot (count personer with [recovered = 1])
	S(t)	plot (count personer with [infected = 0 and r

Pen update commands

```
plot ( count personer with [infected = 0 and recovered = 0] )
```

Opgave 12

```
personer-own [infected recovered hjemx hjemy tilfest]
```

```
to StartFest
  ask n-of 20 personer
  [
    set tilfest 1
    set hjemx xcor
    set hjemy ycor
    setxy 50 25
    right random 360
    forward 1
  ]
end

to HoldFest
  ask personer with [infected = 1 and tilfest = 1]
  [
    ask personer with [infected = 0 and recovered = 0 and tilfest = 1]
    [
      if random 100 < festsmitteprocent
      [
        set infected 1
        set color orange
      ]
    ]
  ]
end

to SlutFest
  ask personer with [tilfest = 1]
  [
    set tilfest 0
    setxy hjemx hjemy
  ]
end
```

Den samlede model i NetLogo til og med opgave 12 kan findes [her](#).

Opgave 13

[Netlogo kode]