

Oversvømmelser i Aalborg Kommune - modeller i planlægningen



Titel:

Oversvømmelser i Aalborg Kommune
- modeller i planlægningen

Faggruppe:

Integrativ geografi

Projektperiode:

1/2 2011 - 9/6 2011

Vejleder:

Henning Sten Hansen

Sideantal: 118

Oplagsantal: 4

Bilagsantal: 1 cd

Udarbejdet af:

Heidi Højriis Poulsen

Mette Christiansen

Synopsis

Denne rapport undersøger, hvordan oversvømmelsesmodeller for Aalborg Kommune kan udarbejdes vha. GIS. Desuden undersøges det, hvordan sådanne modeller kan anvendes i Aalborg Kommunes planlægning af fremtidige bolig- og erhvervsområder.

Der udarbejdes GIS-modeller for oversvømmelser i Aalborg Kommune ved en vandstandsstigning på 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m ved hjælp af bathtub, cellular automata med rook's og queen's rule samt cost distance. Det vurderes, at cellular automata med rook's og queen's rule er de mest egnede metoder til modellering af oversvømmelser, da forbindelse til vand inddrages som kriterium, og det er muligt at definere, hvilket naboområde der anvendes. Endvidere udarbejdes scenarier for den fremtidige arealanvendelse i Aalborg Kommune ved hjælp af simuleringsprogrammet Land Use Change Impact Analysis (LUCIA). Disse udarbejdes bl.a. på baggrund af kommunens planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder for at vurdere, om nye bolig- og erhvervsområder opført i perioden 2000-2040 er i fare for fremtidig oversvømmelse. Ingen nye erhvervsområder vil blive opført i oversvømmelses-truede områder som følge af Aalborg Kommunes planer, mens 11-14 ha nye boligområder kan være i fare for oversvømmelse ved en vandstandsstigning på 1,5 m. Det vurderes slutteligt, at oversvømmelsesmodeller og arealanvendelsesscenarier er anvendelige planlægningsværktøjer i tilpasningen til vandstandsstigninger.

Forord

Denne rapport er udarbejdet som speciale på kandidatuddannelsen Integrativ Geografi ved Aalborg Universitet. Perioden for projektarbejdet er forløbet fra 1. februar til 9. juni 2011.

Rapporten henvender sig primært til vejleder, censor, Teknik- og Miljøforvaltningen i Aalborg Kommune samt planlæggere og enkeltpersoner med interesse i undersøgelsesfeltet.

Kildehenvisninger er i denne rapport opsat efter Harvard-metoden, hvor forfatterens efternavn og årstal er angivet som følger: (Hansen, 2008). Yderligere information om kilden findes i litteraturlisten bagerst i rapporten. Figurer og tabeller uden kildeangivelse er udarbejdet af projektgruppen. Dette ses af tabel- og figurlisten, som findes bagerst i rapporten.

I forbindelse med udarbejdelsen af denne rapport skal der rettes en tak til Ragnhild la Cour Bennedsen og Morten Hauge Rokkjær, Teknik- og Miljøforvaltningen i Aalborg Kommune, som har været behjælpelig med data og information. Slutteligt vil vi gerne rette en særlig tak til vores vejleder, Henning Sten Hansen, for god og konstruktiv vejledning samt et godt og inspirerende samarbejde gennem projektforsløbet.



Foto: Vaun Egede Jensen, Aalborg Kommune

Summary

Climate change is a fact. Europe's annual average temperature has increased more than the global annual average, and Europe's annual average is expected to increase by 1.0-5.5 °C by 2080-2100 compared to the annual average temperature in the period 1961-1990 (European Environment Agency, 2008: 41 ff.).

Climate change comes with various consequences some of which are drought, heat waves, heavy rain, melting of the polar ice caps, increasing sea temperatures and rising sea level. The rising sea level is the focus of the report at hand, specifically modelling of flooding to facilitate adaption to climate change and rising sea levels. Rising sea levels can induce flooding of coastal areas and more extreme weather can increase the risk of surges in such areas, which has large human and economic costs.

To reduce the consequences of climate change it is necessary to reduce the emission of greenhouse gases but at the same time it is important for society to adapt to the changing climate. The Danish government has devised "*A strategy for adaption to climate change in Denmark*" (Energistyrelsen, 2008), whose objective it is to ensure that climate change is incorporated in planning and development to a greater extent. The EU's directive on the assessment and management of flood risks (Europa-parlamentet og Rådet, 2007) ensures that the member states are prepared for rising sea levels. It is important that local government in the member states (municipalities etc.) integrate climate change and rising sea levels in their planning efforts.

In this report flood models for Aalborg Municipality are devised. These models help identify areas that are at risk of being flooded. Four different methods for flood modelling in GIS are utilised, which are: the bathtub method, cellular automata (using rook's rule and queen's rule) and cost distance. These methods are then compared. The four methods of flood modelling each have pros and cons. The bathtub method is the simplest of the four methods, but also the least accurate. The results are unreliable, since connection to water is not a criterion. The most complex methods are cellular automata – rook's rule and queen's rule. A python script is necessary to aid in executing the thousands of needed iterations. Nevertheless cellular automata are the most applicable in planning. Connection to water is a criterion and it is possible to define the neighbourhood used (rook's rule or queen's rule). Rook's rule underestimates the flooding whereas Queen's rule overestimates. Use of both rook's rule and queen's rule could be beneficial. Trough testing it is found that the choice of neighbourhood has a greater influence on the results than choosing between cell sizes of 2 m or 5 m. The cost distance method is relatively simple and quick but it is not possible to define which neighbourhood should be used.

The flood models composed by means of cellular automata (rook's and queen's rule) and cost distance are compared to the flood model applied in Aalborg Municipality's actual climate strategy.

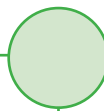
In all three models a larger area is flooded than in Aalborg Municipality's model. It can have consequences if a larger area is flooded and the municipality is not prepared for it.

The flood models can be very useful in planning, but it can also be useful to know the land use in potentially flooded areas. It can be hard, however, to know about the land use at the time of flooding, due to the long time frame. The land use can change in the potentially flooded areas before the flooding occurs. The simulation program Land Use Change Impact Analysis (LUCIA) makes modelling of the future land use possible and by means of LUCIA a land use scenario based on Aalborg Municipality's plan for future residential and industrial areas is modelled. No new industrial areas, developed in the period 2000-2040, will be flooded as a consequence of Aalborg Municipality's plans but as much as 14 hectares of new residential areas, developed in that period are at risk of flooding. Aalborg Municipality is recommended to refrain from new residential developments in these areas.

Indholdsfortegnelse

Forord	5
Summary	7
1. Indledning	13
1.1 Problemformulering og forskningsspørgsmål	15
1.2 Rapportens opbygning	16
1.3 Litteratur	17
2. Introduktion til Aalborg Kommune	19
2.1 Aalborg Kommunes arealer	19
2.2 Aalborg Kommunes klimastrategi	21
3. Klimaforandringer og vandstandsstigninger	25
3.1 Vandstandsstigninger	26
4. Scenarier og modeller i tilpasningen til klimaændringer	29
4.1 IPCC's scenarier for klimaforandringer	29
4.2 Scenarier for vandstandsstigninger i denne rapport	32
4.3 Scenarier som planlægningsværktøj	33
4.3.1 Hvorfor anvende scenarier?	34
4.4 Modeller som planlægningsværktøj	35
5. Strategier og direktiver for klimaforandringer og vandstandsstigninger i Danmark	37
5.1 Energistrategi 2050 – fra kul, olie og gas til grøn energi	38
5.2 Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark	38
5.3 Strategier og direktiver for tilpasning til vandstandsstigninger	40
5.3.1 EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser	40
5.3.2 Tilpasning til vandstandsstigninger i Danmark	40
6. Metoder til modellering af potentielle oversvømmelsesområder	45
6.1 Landhævning og oversvømmelsesmodeller	45
6.2 Oversigt over data	42
6.2.1 Den Digitale Terrænmodel	46
6.2.2 Kyst- og digedata fra Kort10	46
6.3 "Bathtub" som metode til oversvømmelsesmodellering	46
6.3.1 Introduktion til bathtub-metoden	46
6.3.2 Anvendelse af bathtub-metoden	47
6.3.3 Modellering af oversvømmelsesscenarier	47
6.4 Cellular automata som metode til oversvømmelsesmodellering	48
6.4.1 Introduktion til cellular automata	48
6.4.2 Anvendelse af cellular automata	51
6.4.3. Modellering af oversvømmelsesscenarier	51
6.5 Cost distance som metode til oversvømmelsesmodellering	54

6.5.1 Introduktion til cost distance	54
6.5.2 Anvendelse af cost distance-metoden	55
6.5.3 Modellering af oversvømmelsesscenarier	57
7. Resultater af oversvømmelsesmodellering	59
7.1 Bathtub	59
7.2 Cellular automata – rook’s rule	60
7.3 Cellular automata – queen’s rule	62
7.4 Cost distance	63
8. Vurdering af resultater, metoder og planlægningsværktøjer	65
8.1 Diskussion af oversvømmelsesmodellernes resultater	65
8.2 Evaluering af modelleringsmetoder	70
8.2.1 Bathtub	70
8.2.2 Cellular automata – rook’s og queen’s rule	71
8.2.3 Cost distance	76
8.3 Vurdering af planlægningsværktøjerne	77
8.4 Aalborg Kommunes oversvømmelsesscreening	79
9. Arealplanlægning og vandstandsstigninger	83
9.1 Land Use Change Impact Analysis (LUCIA)	83
9.2 Modellering af fremtidig arealanvendelse i Aalborg Kommune	86
9.2.1 Data	87
9.2.2 Scenarie A: Basisscenarie	87
9.2.3 Scenarie B: Planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder	89
10. Vurdering af den fremtidige arealanvendelse i Aalborg Kommune	91
10.1 Oversvømmelse af fremtidige bolig- og erhvervsområder	94
10.2 Vurdering af planlægningsværktøjerne	101
11. Konklusion	103
12. Perspektivering	105
Litteraturliste	107
Figurliste	113
Tabelliste	117



1. Indledning

Klimaændringer er et faktum (IPCC, 2007). Europas gennemsnitstemperatur for land og hav er steget med 1 °C i forhold til det førindustrielle niveau, mens den for land alene er steget med 1,2 °C. Det forventes, at Europas årlige gennemsnitstemperatur vil være steget 1,0-5,5 °C i perioden 2080-2100 i forhold til gennemsnittet for 1961-1990 (European Environment Agency, 2008: 41 ff.).

Temperaturstigningerne kan medføre forskellige konsekvenser som fx flere og mere ekstreme vejr-situationer som tørke, hedebølge og kraftig regn, stigende havtemperaturer, ændrede nedbørsmønstre, smeltning af is og sne og stigende gennemsnitlig havvandsstand (IPCC, 2007). En af de mest åbenlyse og omfangsrige konsekvenser af klimaforandringer anses for at være vandstandsstigninger (Hansen, 2008a), og dette er fokus for denne rapport.

I løbet af det 20. århundrede er havvandstanden gradvist steget, og the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) forventer, at den vil stige endnu hurtigere i dette århundrede. Ændringerne i vandstanden forårsages af den stigende temperatur, som medfører termisk udvidelse af vandmasserne samt gletsjerafsmeltning (IPCC, 2007). Øget havvandstand kan føre til oversvømmelser af kystnære områder, og de mere ekstreme vejr-situationer, som forventes i fremtiden, kan forøge risikoen for stormflod i disse områder (Hansen, 2008a). Dette kan have store konsekvenser, eftersom 43 % af Danmarks befolkning er bosiddende i en kystnærhedszone på 3 km. Desuden er store dele af den danske industri, offentlige og private erhverv samt størstedelen af Danmarks campingpladser og ca. 213.000 sommerhuse lokaliseret i denne zone (Klimatilpasning.dk, 2011a).

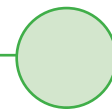
For at mindske konsekvenserne af klimaændringer er det nødvendigt at reducere udledningen af drivhusgasser, men samtidig at tilpasse samfundet til de konsekvenser, som uvægerligt vil forekomme. I marts 2008 fremlagde den danske regering ”Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark” (Energistyrelsen, 2008), som er en strategi for, hvordan Danmark skal tilpasses det fremtidige klima. Der fokuseres på, at der nødvendigvis må ske en tilpasning til klimaændringer på nationalt plan, og formålet med denne strategi er, at klimaændringer i stigende grad integreres i planlægning og udvikling ”på den mest hensigtsmæssige måde” (Energistyrelsen, 2008: 7). Således må kommunerne tage hensyn til klimaforandringerne i deres planlægning.

Nærværende rapport omhandler kommuners tilpasning til klimaforandringer med fokus på vandstandsstigninger og oversvømmelser. Det er vigtigt at inddrage klimaforandringer i den planlægning, som udføres i dag, idet planlægning ofte indebærer en lang tidshorisont. Eksempelvis indebærer byggerier tidshorisonter på minimum 50-100 år, og dermed vil disse berøres af klimaforandringernes konsekvenser (Klimatilpasning.dk, 2011a).

I rapporten udarbejdes oversvømmelsesmodeller for Aalborg Kommune, som viser, hvilke områder i kommunen der potentielt vil oversvømmes. Der anvendes fire forskellige metoder til modellering af fremtidige oversvømmelser ved hjælp af GIS. De fire metoder, der anvendes, er bathtub, cellular automata ved henholdsvis rook's rule og queen's rule samt cost distance. Dette projekt vil bidrage til forskningsfeltet med ny viden ved sammenligningen af disse fire metoder til oversvømmelsesmodellering. Projektet har bl.a. til hensigt at påvise forskellige modelleringsmetoder og celledørrelers indvirke på modelleringsresultatet, og samtidig foretages en vurdering af de forskellige metoders brugervenlighed i form af bl.a. de nødvendige tekniske kompetencer og tidsforbrug. Projektet har en teoretisk tilgangsvinkel, og fokus ligger således ikke på praktisk planlægning. Tidligere har det kun været muligt at foretage oversvømmelsesmodelleringer med en grov celledørrelse, idet terrænmodeller over Danmark ikke har været fremstillet med en høj detaljeringsgrad. I 2009 er der udarbejdet en dansk terrænmodel med en horisontal opløsning på 1,6 m x 1,6 m, og modellens nøjagtighed er 0,67 meter på den horisontale akse og 0,06 meter på den vertikale akse. Dette muliggør modelleringer med endnu højere detaljeringsgrad og nøjagtighed end hidtil (Kort- og Matrikelstyrelsen, 2011).

Oversvømmelsesmodellerne giver et overblik over de potentielle oversvømmelsesområder, men det er endvidere relevant at kende arealanvendelsen i disse områder. Det kan dog være vanskeligt umiddelbart at få kendskab til arealanvendelsen, eftersom oversvømmelserne har en lang tidshorisont, og arealanvendelsen i områderne kan ændres, inden oversvømmelserne indtræffer. Simuleringsprogrammet Land Use Change Impact Analysis (LUCIA) muliggør simulering af den fremtidige arealanvendelse. Ved hjælp af dette program udarbejdes bl.a. et scenarie for den fremtidige arealanvendelse på baggrund af Aalborg Kommunes planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder, som kan sammenlignes med de udarbejdede oversvømmelsesmodeller. Dette er relevant, eftersom bolig- og erhvervsbygninger har en lang levetid, og disse bygninger kan således påvirkes af fremtidige oversvømmelser.

Modeller og geografisk data udarbejdet i GIS anvendes bl.a. af konsulentvirksomheder og kommuner. Kommuner ansætter ofte konsulentvirksomheder til at udarbejde disse modeller og data, idet de ikke nødvendigvis besidder de tekniske kompetencer og arbejdsressourcer, det kræver at udarbejde modellerne. Dette kan blive en kostbar investering. Eksempelvis har Aalborg Kommune i 2011 betalt 120.000 kr. for en oversvømmellesscreening, udviklet af COWI, som dog også inkluderer vandets strømningsveje og lavninger i terrænet (Rokkjær, 2011). I denne rapport sammenlignes COWI's screening med de fire undersøgte og udviklede modeller. Det har stor relevans at foretage en vurdering af den oversvømmelsesmodel, som anvendes af Aalborg Kommune til planlægning af kommunens arealer mv. Kommunen er begrænset af økonomi og arbejdsressourcer, og derfor vil en sådan vurdering og sammenligning sandsynligvis ikke ellers finde sted.



1.1 Problemformulering og forskningsspørgsmål

På baggrund af det ovenstående er følgende problemformulering udarbejdet:

Hvordan kan oversvømmelsesmodeller for Aalborg Kommune udarbejdes ved hjælp af GIS, og hvordan kan sådanne modeller anvendes i planlægningen af kommunens fremtidige bolig- og erhvervsområder?

Som uddybning til problemformuleringen opstilles følgende forskningsspørgsmål:

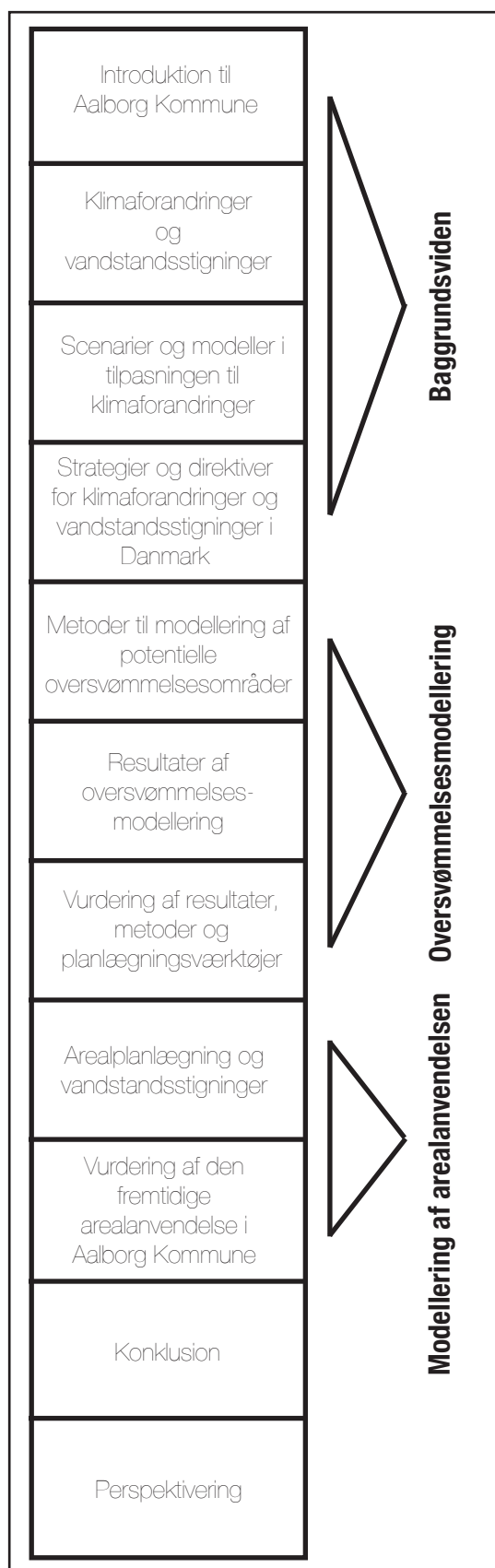
- Hvilken strategi har den danske regering for tilpasning til fremtidig vandstandsstigning, og hvilken betydning har EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser for denne tilpasning?
- Hvordan kan potentielle oversvømmelsesområder modelleres ved hjælp af GIS?
- Hvilke styrker og svagheder kan forbindes med de undersøgte modelleringsmetoder?
- Hvilke resultater opnås ved de undersøgte modelleringsmetoder sammenlignet med den oversvømmelsesscreening, som anvendes i Aalborg Kommunes klimastrategi?
- Hvordan kan oversvømmelsesmodellerne anvendes til vurdering af Aalborg Kommunes planer for udvikling af bolig- og erhvervsområder?

Vandstandsstigning og *oversvømmelse* forstås i dette projekt som:

»Vandstandsstigning«: forårsages af stigende temperatur, som medfører termisk udvidelse af vandmasser samt gletsjerafsmeltning (Hansen, 2008a). Vandstandsstigninger kan medføre oversvømmelse af arealer.

»Oversvømmelse«: vanddækning af arealer som følge af vandstandsstigninger i hav og fjord. Der inddrages ikke oversvømmelser som følge af øget nedbør eller øget grundvandsstand.

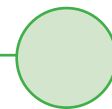
For at kunne undersøge og besvare problemformuleringen og de ovenstående forskningsspørgsmål er rapporten opbygget beskrevet i det følgende.



Figur 1.1 Oversigt over rapportens opbygning.

1.2 Rapportens opbygning

Dette projekt tager udgangspunkt i en caseundersøgelse, hvor Aalborg Kommune udgør den geografiske ramme. Rapporten indledes med en præsentation af Aalborg Kommune, hvor fokus ligger på kommunens arealer og kommunens klimastrategi. I kapitel 3 gives en introduktion til klimaforandringer og deraf følgende vandstandsstigninger. Herefter introduceres IPCC's scenarier for klimaforandringer, og scenarier og modeller præsenteres som værktøjer til modellering af potentielle oversvømmelser. Det undersøges, hvilke politikker og strategier for klimatilpasning der skal tages højde for i planlægning i kommuner. I rapporten udvikles forskellige oversvømmelsesmodeller, og disse præsenteres i kapitel 6. Ved hjælp af de udviklede oversvømmelsesmodeller udarbejdes tre oversvømmellesscenarier (0,5 m, 1,0 m og 1,5 m), hvis resultater præsenteres og diskuteres. Resultaterne sammenholdes med Aalborg Kommunes klimatilpasningsstrategi, hvori COWI har foretaget en screening af kommunens arealer mht. oversvømmelsesrisici. I Aalborg Kommunes Kommuneplan 2009-2013 er der lagt planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder, og for at kunne vurdere disse planer med henblik på bolig- og erhvervsområdernes geografiske lokalisering og risiko for oversvømmelse foretages modellering af kommunens arealanvendelse i år 2040 vha. programmet LUCIA. LUCIA præsenteres i kapitel 9, og resultaterne præsenteres og diskuteres i kapitel 10. Rapportens problemformulering og forskningsspørgsmål besvares i kapitel 11, og slutte-ligt sættes oversvømmelsesmodeller i perspektiv mht. videre arbejde i kapitel 12.



1.3 Litteratur

Der er anvendt forskellige litterære data til afdækning af projektets problemstilling. Der er så vidt muligt anvendt artikler fra fagfællebedømte tidsskrifter (peer reviewed). Fagfællebedømte artikler sikrer videnskabelighed og kvalitet og er anvendt til en videnskabelig introduktion og behandling af problemfelter inden for bl.a. oversvømmelsesmodellering og modellering af arealanvendelse. Derudover er der anvendt klimastrategier og handlingsplaner mv. fra regeringen, Kommunernes Landsforening, kommuner osv. Det er vigtigt at være opmærksom på, at disse tekster er udviklet og opbygget på baggrund af politiske holdninger. Ved regerings- og kommunalbestyrelsesskifte vil sådanne holdninger således kunne påvirkes eller ændres. Internetportalen www.klimatilpasning.dk er anvendt som kilde til viden om lokale klimaændringer og klimatilpasning, idet portalen indeholder den nyeste forskning og udvikling inden for klimatilpasning. Portalen henvender sig til privatpersoner, virksomheder og kommuner. Den er udviklet af Videncenter for klimatilpasning og Klima- og Energiministeriet i samarbejde med en række institutioner (Videncenter for Klimatilpasning et al. (u.d)). Der er anvendt forskellige lovtekster for at få indsigt i love og regler inden for planlægning og klimatilpasning.

Som supplement til litteraturstudiet og for uddybende viden om Aalborg Kommunes tilpasning til vandstandsstigninger er der foretaget samtaler med Morten Rokkjær og Ragnhild la Cour Bennedsen fra Teknik- og Miljøforvaltningen, Aalborg Kommune. Slutteligt har projektgruppen deltaget i et dialogmøde om Aalborg Kommunes klimastrategi.

2. Introduktion til Aalborg Kommune

I dette kapitel redegøres for valget af Aalborg Kommune som case i denne rapport, og der opstilles fakta om Aalborg Kommunes arealer, som er relevante i forbindelse med tilpasning til vandstandsstigninger. Endvidere gennemgås Aalborg Kommunes udkast til en klimastrategi, som var i høring i perioden 6. maj – 6. juni 2011 blandt kommunens interessenter som eksempelvis erhvervslivet og interesseorganisationer.

Dette projekt omhandler vandstandsstigninger som følge af klimaforandringer. Til denne undersøgelse er det fundet hensigtsmæssigt at tage udgangspunkt i et caseområde, og Aalborg Kommune er valgt som case. Casestudiet er anvendeligt i forbindelse med denne rapport, da der tages udgangspunkt i et arealmæssigt afgrænset område, og det vil således være muligt at indsamle og udarbejde relevant viden om, hvilke arealer i Aalborg Kommune der kan blive udsat for fremtidige oversvømmelser. Dette er en undersøgelse, som er relevant i alle danske kommuner, men en undersøgelse for alle landets kommuner vil være for omfattende inden for den tidsperiode, som er til rådighed for dette projekt, idet der er et ønske om en detaljeret undersøgelse. På baggrund af undersøgelserne i denne rapport vil det være muligt for blandt andet planlæggere at udvikle metoder til forebyggelse af og tilpasning til oversvømmelser, hvormed konsekvenser af vandstandsstigning kan reduceres.

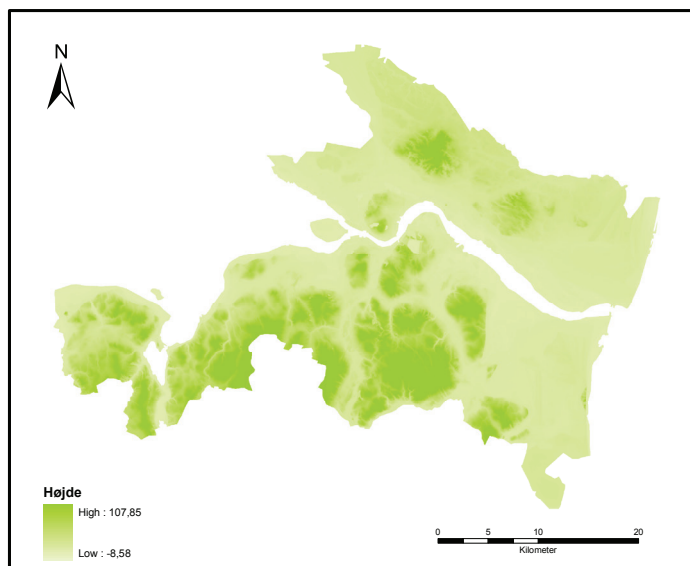
2.1 Aalborg Kommunes arealer

Aalborg Kommune har et areal på 1137,20 km² (Danmarks Statistik, 2011a) og har et indbyggertal på 199.437 pr. 1. april 2011. Aalborg Kommune er således Region Nordjylland største kommune og Danmarks tredje største kommune baseret på befolkningstallet (Danmarks Statistik, 2011b).

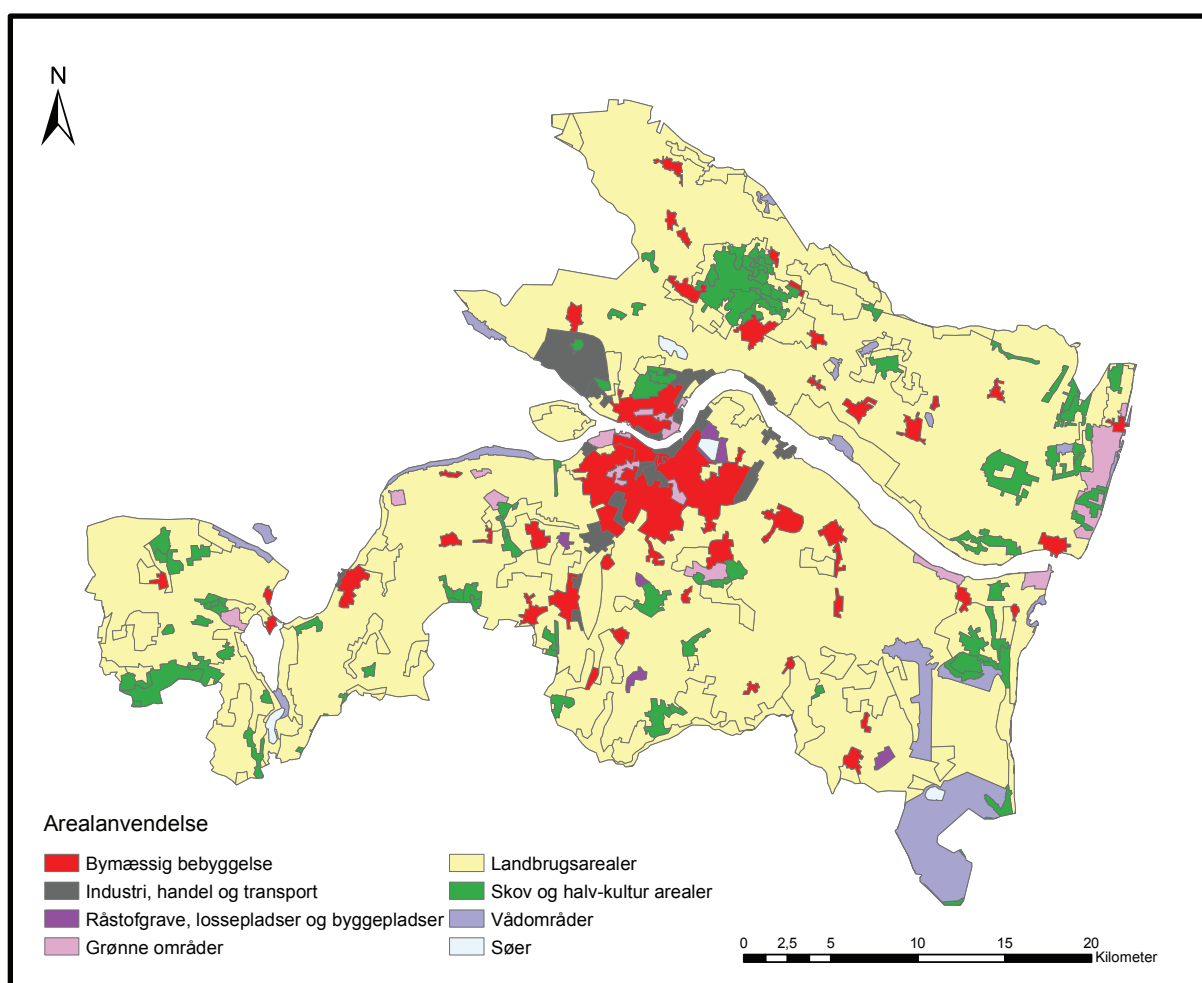
Aalborg Kommune er valgt som udgangspunkt for casestudiet, eftersom gruppemedlemmerne har lokalt kendskab til kommunens arealer, og endvidere medvirker valget af en lokal kommune til et projektsamarbejde på tværs af Aalborg Kommune og Aalborg Universitet. Det er relevant at undersøge scenarier for fremtidig vandstandsstigning i Aalborg Kommune, idet væsentlige dele af kommunens arealer grænser op til både Limfjorden og Kattegat.

Af figur 2.1 ses det, at en stor del af de kyst- og fjordnære arealer ligger i lavt terræn. Ved fremtidige vandstandsstigninger vil sådanne lavtliggende områder være de første områder, som oversvømmes, og hermed må Aalborg Kommune nødvendigvis indstille sig på vandstandsstigninger og tage stilling til, hvordan disse skal og kan håndteres i planlægningen nu og i fremtiden.

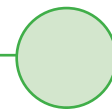
På figur 2.2 er det muligt at se, hvilken arealanvendelse der er i de områder, som grænser op til Limfjorden og Kattegat og potentielt set er udsatte i forbindelse med fremtidige vandstandsstigninger og oversvømmelser. Store dele af de områder, som grænser op til Limfjorden eller Kattegat, anvendes som forskellige typer af landbrugsområder, men også by- og industriområder m.m. findes i områderne.



Figur 2.1 Terrænmodel over Aalborg Kommune (Copyright, Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).



Figur 2.2 Oversigt over arealanvendelsen i Aalborg Kommune.
(Copyright: European Environment Agency og Danmarks Miljøundersøgelser).



2.2 Aalborg Kommunes klimastrategi

På lige fod med alle andre danske kommuner skal Aalborg Kommune således også forholde sig til klimaændringer, og de konsekvenser klimaændringerne vil have. Derfor er de i gang med at udarbejde en klimastrategi for perioden 2011-2015. Klimastrategien skal afdække de konsekvenser herunder vandstandsstigninger og oversvømmelser, der vil opstå som følge af klimaforandringerne. Tilpasning til klimaændringer er en langsigtet proces, eftersom konsekvenserne vil forekomme over en længere periode, og beslutninger, som tages i dag om fx byudvikling og infrastruktur, har betydning over længere tid. Aalborg Kommunes klimastrategi vil derfor blive revideret i takt med det stigende vidensniveau omkring klimaændringerne og deres konsekvenser (Aalborg Kommune, 2011a).

Aalborg Kommunes klimastrategi er inddelt i to dele – en del som omhandler forebyggelse af klimaændringer, og en del som omhandler tilpasning til klimaændringer. De handlinger og initiativer, som opstilles i klimastrategien er opdelt i retningslinjer, nye tiltag og undersøgelse. Retningslinjerne gør rede for, hvordan den eksisterende planlægning og opgaveløsning skal tilpasses. Nye tiltag gør rede for, hvilke nye tiltag der må gøres i forbindelse med klimaændringerne, mens undersøgelse gør rede for de områder, hvor mere viden og information er nødvendigt (Aalborg Kommune, 2011a). Den del af Aalborg Kommunes klimastrategi, der omhandler forebyggelse af klimaændringer (Aalborg Kommune, 2011a), skal medvirke til, at Aalborg Kommune bliver uafhængig af fossile brændsler senest i år 2050. Dette er en vision, som Aalborg Kommune har fastlagt i forbindelse med udarbejdelsen af en Energivision 2050 og en Energistrategi for Aalborg Kommune frem til år 2030. Klimastrategien skal medvirke til udarbejdelse af strategier, målsætninger og handlingsforslag for udvalgte indsatsområder til opfyldelse af kommunens vision om at være uafhængig af fossile brændsler i år 2050 og desuden at blive en drivhusgasneutral kommune. De indsatsområder, som er inddraget i klimastrategien, er områder, hvor Aalborg Kommune via initiativer og handlinger har mulighed for direkte eller indirekte at influere på udviklingen. Målsætningerne, strategierne og handlingsforslagene skal inddrages i kommuneplanlægningen, energiplanlægningen, miljøplanlægningen, trafikplanlægningen mv. De skal således inddrages i sektorplanlægningen. Klimastrategien opstiller konkrete mål for CO₂-reduktion for alle sektorer, som skal medvirke til at stoppe kommunens udledning af CO₂. I dag er Aalborg Kommunes samlede CO₂-udledning fra fossile brændsler 1,32 mio. tons CO₂ (Aalborg Kommune, 2011a).

Den del af Aalborg Kommunes klimastrategi, som omhandler tilpasning (Aalborg Kommune, 2011b), er den mest relevante i forbindelse med dette projekt. Tilpasning til klimaændringer nødvendiggør, at Aalborg Kommune afdækker konsekvenserne af klimaændringerne inden for en række områder. Dette kan gøres på baggrund af eksisterende viden, eller det kan være nødvendigt at lave dybdegående undersøgelser.

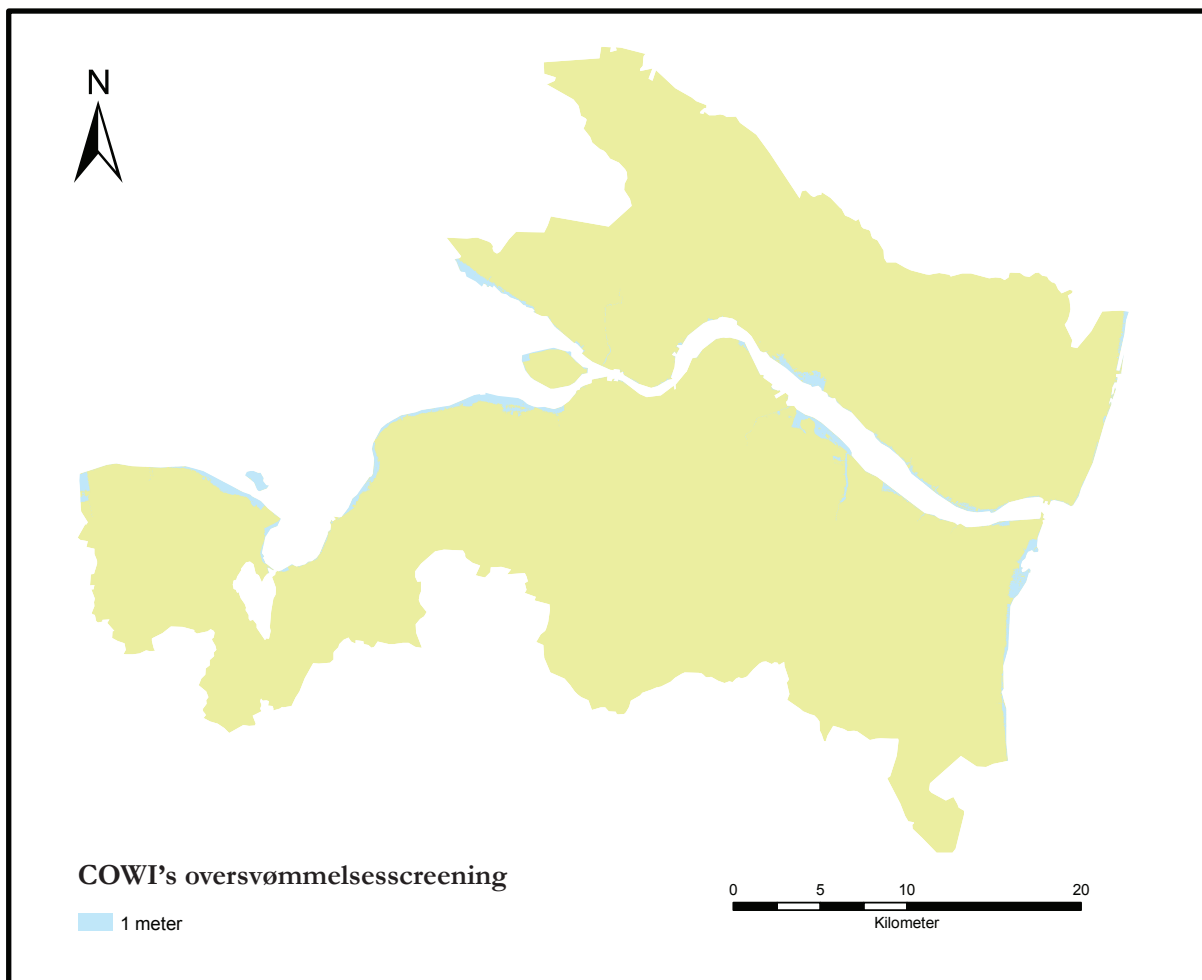
I tilpasningen til klimaændringer har Aalborg Kommune taget udgangspunkt i The Intergovernmental Panel on Climate Changes (IPCC) scenarier for klimaændringer (se afsnit 4.1 for en beskrivelse af disse). Klima- og Energiministeriet har anbefalet, at kommunerne tager udgangspunkt i

klimascenariet A1B (Klima- og Energiministeriet, 2011a), og denne anbefaling har Aalborg Kommune fulgt i arbejdet med klimastrategien. Det vil sige, at Aalborg Kommune i klimastrategien forventer en temperaturstigning på 2-3 °C og en vandstandsstigning på 0,1 – 1,2 m. I forbindelse med havvandsstigninger vurderer Aalborg Kommune, at de væsentligste udfordringer er:

- ”Oversvømmelse af infrastruktur som bygninger, elinstallationer, broer og veje.
- *Oversvømmelse af naturarealer som f.eks. strandenge.*
- *Oversvømmelse af værdifulde landbrugsarealer.*
- *Tilbagestuvning i vandløb med saltvandspåvirkning til følge.*
- *Tab af biodiversitet”.*

(Aalborg Kommune, 2011b)

Aalborg Kommune understreger, at det er nødvendigt at inddrage vandstandsstigninger i den langsigtede planlægning af arealanvendelsen i de kystnære arealer. Konsulentvirksomheden COWI har udarbejdet en oversvømmelsesscreening og kortlægning for Aalborg Kommune, som muliggør inddragelse af vandstandsstigninger i den langsigtede planlægning. Screeningen viser, hvilke områder der er i fare for oversvømmelse i Aalborg Kommune, og hvor i landskabet vandet vil samle sig i lavninger. Der er udarbejdet tre forskellige scenarier for vandstandsstigninger ud fra IPCC's scenarie A1B. Som repræsentation for den permanente vandstandsstigning har Aalborg Kommune valgt et scenarie for en vandstandsstigning på 1 m (se figur 2.3). Derudover er der udarbejdet et scenarie for en vandstandsstigning på 1,42 m, som repræsenterer en 100 års hændelse for stormflod i 2010, og et scenarie for en vandstandsstigning på 2,42 m, som repræsenterer en 100 års hændelse for stormflod i år 2100. Aalborg Kommune gør opmærksom på, at resultaterne af screeningen er vejledende, og at yderligere undersøgelser kan være nødvendige i visse problemfyldte områder (Aalborg Kommune, 2011b). På baggrund af den udarbejdede screening har Aalborg Kommune udpeget seks områder, hvor der er særlig risiko for oversvømmelse. Også andre områder i kommunen kan på sigt være i fare for oversvømmelse, men Aalborg Kommune fokuserer indsatsen for klimatilpasningen på de seks fokusområder, og det skal identificeres, hvilke tiltag der er nødvendige i tilpasningen til klimaændringer. Et mål for Aalborg Kommune i forbindelse med havvandsstigninger og sikring af kystnære områder er, at der ikke foretages store investeringer i områder, som på sigt må opgives på grund af vandstandsstigninger og eksempelvis overgå til naturområder. Oversvømmelsesrisikoen skal således tænkes ind i alle nye aktiviteter, som planlægges i de kystnære områder. Det skal endvidere undersøges, hvilke arealer det samfundsøkonomisk er hensigtsmæssigt at sikre. I forbindelse med byplanlægning skal klimaændringerne tænkes ind, så det undgås, at der planlægges byudvikling i områder, hvor der på sigt kan være risiko for oversvømmelser.



Figur 2.3 Oversvømmelsesscreening ved 1,0 m vandstandsstigning udarbejdet af COWI for Aalborg Kommune i forbindelse med udarbejdelse med kommunens klimastrategi (COWI og Aalborg Kommune).

Som ovenfor nævnt var Aalborg Kommunes klimastrategi i høring i perioden 6. maj – 6. juni 2011 blandt kommunens interessenter med det formål at få oplysninger om interessenters vurdering af klimastrategien, inden den skal godkendes i byrådet. I skrivende stund er det således ikke klarlagt, om strategien bliver endeligt vedtaget.

3. Klimaforandringer og vandstandsstigninger

Global opvarmning og klimaforandringer er komplekse forskningsområder, og at afdække hele forskningsområdet er for omfangsrigt til denne rapport. Dette kapitel vil derfor give en kort introduktion til klimaforandringer. Kapitlet vil primært omhandle vandstandsstigninger.

Ifølge the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)(2007) er den globale atmosfæriske koncentration af drivhusgasserne kuldioxid, metan og nitrogenoxid steget markant siden 1750. Disse stigninger er et resultat af menneskelige aktiviteter. Kuldioxid er den vigtigste af de menneskeskabte drivhusgasser, og den globale atmosfæriske koncentration er ifølge IPCC (2007) steget fra ca. 280 ppm før industrialiseringen til 379 ppm i 2005 (se tabel 3.1). Gennem de sidste 650.000 år har den globale atmosfæriske koncentration af kuldioxid været mellem 180 og 300 ppm. Stigningen i koncentrationen af kuldioxid er hovedsageligt et resultat af afbrænding af fossile brændsler, men også ændringer i arealanvendelsen har en betydelig indflydelse på stigningen. Stigningen i den atmosfæriske koncentration af metan og nitrogenoxid skyldes hovedsageligt landbrug. Før industrialiseringen var den globale atmosfæriske koncentration af metan ca. 715 ppb og var først i 1990'erne steget til 1732 ppb for i 2005 at ligge på 1774 ppb (se tabel 3.1). I løbet af de sidste 650.000 år har den atmosfæriske koncentration af metan ligget mellem 320 ppb og 790 ppb. Der er ifølge IPCC (2007) over 90 % sandsynlighed for, at stigningen i den atmosfæriske koncentration af metan skyldes menneskelige aktiviteter som landbrug og afbrænding af fossile brændsler. Den globale koncentration af nitrogenoxid var før industrialiseringen ca. 270 ppb, mens den i 2005 var 319 ppb (se tabel 3.1). Mere end 33 % af udledningen af alt nitrogenoxid skyldes ifølge IPCC menneskelige aktiviteter, primært landbrug (IPCC, 2007).

Den globale gennemsnitstemperatur er steget, og frem til 2007 var temperaturen over land og hav således 0,8 °C højere end det før-industrielle niveau, som er gennemsnittet i perioden 1850-1899. Den gennemsnitlige globale temperatur for land var 1 °C højere. For Europa har stigningen i gennemsnitstemperaturen været højere end den globale stigning, og frem til år 2007 var den årlige gennemsnitlige temperatur for land og hav 1 °C højere end før industrialiseringen, mens den for land alene var 1,2 °C højere. Ifølge European Environment Agency (2008) vil Europas årlige gennemsnitlige temperatur stige 1,0-5,5 °C i 2080-2100 i for-

Tabel 3.1 Sammenligning af udledning af drivhusgasser før industrialiseringen og i år 2005.

	Før industrialiseringen	År 2005
Kuldioxid	280 ppm	379 ppm
Methan	715 ppb	1774 ppb
Nitrogenoxid	270 ppb	319 ppb

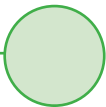
Kilde: IPCC, 2007.

hold til gennemsnittet for 1961-1990 (European Environment Agency, 2008: 41 ff.). Opvarmningen af klimaet viser sig bl.a. gennem stigninger i globale gennemsnitlige luft- og havtemperaturer, ændrede nedbørsmønstre, ændret salinitet i havene, ekstreme vejr-situationer som tørke, kraftig regn, hedeølger og kraftige tropiske cykloner, smeltning af is og sne og forøgelse af den gennemsnitlige havvandstand (IPCC, 2007).

3.1 Vandstandsstigninger

Vandstandsstigninger er fokus for denne rapport, og IPCC konkluderer, at klimaændringerne fører til øget vandstand i havene. I løbet af det 20. århundrede er havvandsstanden gradvist steget, idet den gennemsnitlige globale havvandstand steg ca. $1,7 \pm 0,5$ mm om året i perioden, og i perioden 1961-2003 vurderer IPCC, at vandstanden er steget med $1,8 \pm 0,5$ mm om året. IPCC forventer, at havvandsstanden vil stige hurtigere i dette århundrede. Observationer har vist, at havvandsstanden siden 1993 er steget med ca. 3 mm om året (Bindoff et al., 2007). Ifølge IPCC er mere end 80 % af den varme, som i forbindelse med den globale opvarmning er tilført klimasystemet, absorberet i havene, og siden 1961 er gennemsnitstemperaturen i havene således forøget ned til en dybde af 3000 m eller mere. Når vandet opvarmes, udvides det, og dermed bidrager opvarmningen af havvandet til vandstandsstigninger. En anden årsag til, at vandstanden i havene stiger som følge af den globale opvarmning, er smeltevand fra sne, is og gletsjere. Sne-dække og gletsjere har således trukket sig tilbage på begge halvkugler som følge af den globale opvarmning. Også iskapperne på Grønland og Antarktis bidrager til vandstandsstigninger, idet der ifølge IPCC er mere end 90 % sandsynlighed for, at tab af is fra iskapperne på Grønland og Antarktis i perioden 1993-2003 har bidraget til vandstandsstigninger (IPCC, 2007).

Også ændrede nedbørsmønstre kan få betydning i forbindelse med oversvømmelser som følge af klimaforandringer. Når atmosfærens temperatur øges, kan den indeholde større mængder vanddamp, og den gennemsnitlige mængde vanddamp i atmosfæren og den øvre troposfære er steget siden 1980'erne. I den forbindelse er kraftig nedbør blevet mere hyppig over de fleste landområder. I perioden 1900-2005 er mængden af nedbør steget i de østlige dele af Nord- og Sydamerika, Nordeuropa og det nordlige og centrale Asien (IPCC, 2007). I det 20. århundrede steg den årlige nedbørsmængde med 10-40 % i det nordlige Europa, mens den i nogle dele af Sydeuropa faldt med op til 20 %. Klimamodeller forudsiger en generel stigning i mængden af nedbør i Nordeuropa med en stor stigning i vinter nedbør, mens der i Sydeuropa vil være et fald i mængden af nedbør (European Environment Agency, 2008: 45 f.). Også i forbindelse med hændelser med ekstrem nedbør er der sket ændringer over de seneste 50 år. Over store dele af Europas landarealer er antallet af ekstreme nedbørshændelser steget, og for hele Europa gælder det, at intensiteten af sådan ekstrem nedbør er steget over de seneste 30 år, således også i de områder, hvor der har været et fald i den gennemsnitlige mængde nedbør. Det forventes, at



ekstrem nedbør vil forekomme stadigt oftere i hele Europa (European Environment Agency, 2008: 50 f.).

Der er således klare tegn på, at klimaet har ændret sig i perioden fra før industrialiseringen indtil i dag. I det følgende kapitel vil der blive redegjort for IPCC's scenarier for, hvordan klimaet kan udvikle sig i fremtiden. Desuden vil der blive gjort rede for scenariers og modellers anvendelighed i planlægning.

4. Scenarier og modeller i tilpasningen til klimaændringer

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) har udarbejdet scenarier for fremtidens klima, som bygger på antagelser om samfundets udvikling (Klimatilpasning.dk, 2011b). Ud fra sådanne scenarier har Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) udarbejdet scenarier for klimaændringer i Danmark. IPCC's og DMI's scenarier vil fremgå af dette kapitel. På baggrund af anvendelsen af scenarier og modeller i klimaforskningen, og idet sådanne opstilles for vandstandsstigninger og arealanvendelse i denne rapport, gives en introduktion til begreberne scenarier og modeller.

4.1 IPCC's scenarier for klimaforandringer

IPCC har udarbejdet forskellige scenarier for, hvordan klimaforandringerne kan udvikle sig i fremtiden, og hvor stor udledningen af drivhusgasser vil være. Scenarierne bygger på en række forskellige drivkræfter, som kan være bestemmende for mængden af udledte drivhusgasser. Disse drivkræfter er bl.a. den demografiske udvikling, den teknologiske udvikling og den økonomiske udvikling. I scenarierne indgår ikke fremtidige politiske tiltag, som direkte skal medvirke til at nedsætte udledningen af drivhusgasser, men der indgår formodede fremtidige politikker, som indirekte kan have indflydelse på udledningen af drivhusgasser (Nakicenovic & Swart, 2000). Ifølge IPCC's scenarierapport er der en række faktorer, som har betydning for den fremtidige udledning af drivhusgasser, idet de fremtidige udledninger *"are the products of a very complex, ill-understood dynamic system, driven by forces such as population growth, socio-economic development, and technological progress"* (Nakicenovic & Swart, 2000). Det er således ikke muligt med sikkerhed at forudsige størrelsen af den fremtidige udledning af drivhusgasser. Trods dette kan scenarier for den fremtidige udledning være anvendelige til at give et overblik over den viden, der er om mulige fremtidige udledninger, og om de usikkerheder der er inden for området. Dermed kan scenarier være værdifulde for politikere og beslutningstagere, hvis beslutninger og handlinger kan have indflydelse på udledningen af drivhusgasser på længere sigt. IPCC's scenarier er deskriptive scenarier, hvilket vil sige, at de viser mulige udviklinger ud i fremtiden. De viser således ikke ønskelige eller ikke-ønskelige udviklinger, og der er ikke udarbejdet et scenarie, som skal anses for at være mest sandsynligt (Nakicenovic & Swart, 2000).

IPCC's scenarier er baseret på fire "storylines": A1, A2, B1, B2, hvortil der er knyttet 40 scenarier. De udarbejdede storylines er en beskrivelse af et scenarie eller en "scenariefamilie", som fremsætter de primære karakteristika for scenarierne og sammenhængene mellem de forskellige drivkræfter i scenarierne. Scenarierne er selve beskrivelsen af en mulig fremtid. Scenarier, som har den samme

demografiske, samfundsmæssige, økonomiske og teknologiske storyline, knyttes sammen i en scenariefamilie. De enkelte scenarier har enten et regionalt eller et globalt fokus, og de strækker sig fra at have en hurtig økonomisk og teknologisk udvikling til i højere grad at have fokus på miljøbeskyttelse. Desuden strækker de sig fra at have lave til høje globale befolkningstal og fra lave til høje udledninger af drivhusgasser. Alle fire storylines viser en udvikling, hvor der generelt er en højere velstand end i dag, og de ser ud som følger:

Storyline A1

I storyline A1 er der en fremtidig udvikling med hurtig økonomisk vækst og lav befolkningsvækst. Nye og mere effektive teknologier indføres hurtigt. De regionale forskelle i indkomst pr. indbygger reduceres. Gruppen af scenarier i denne storyline inddeles i fire grupper med forskellige teknologiske ændringer i energisystemet (Nakicenovic & Swart, 2000). A1 underinddeles på baggrund af tre forskellige forandringer i energiteknologier: A1FI, som primært baseres på fossile energikilder; A1T, som baseres på ikke-fossile energikilder; A1B, som baseres på forskellige energikilder. A1FI udgør det mest pessimistiske scenarie (IPCC, 2007).

Storyline A2

I storyline A2 er udviklingen meget heterogen. Der er fokus på lokale løsninger og lokal identitet, og den økonomiske udvikling er regionalt orienteret. Væksten i indkomsten pr. indbygger er fragmenteret og langsom i forhold til de andre storylines, og dette er også gældende for den teknologiske udvikling. Befolkningstilvæksten er stor i denne storyline (Nakicenovic & Swart, 2000). A2 repræsenterer en mellemhøj udledning af drivhusgasser (IPCC, 2007).

Storyline B1

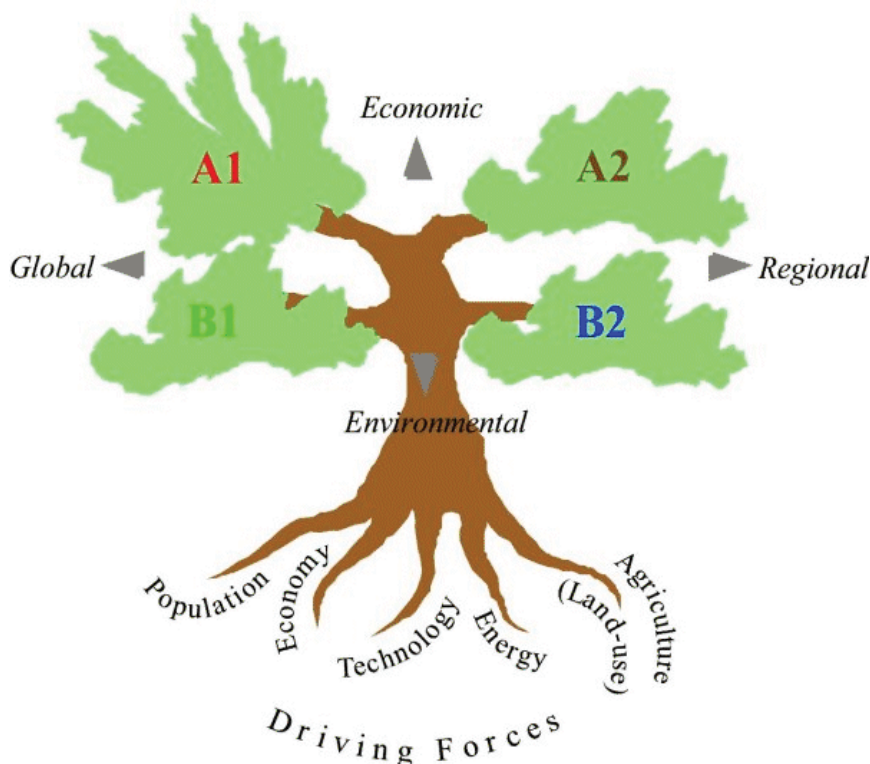
I storyline B1 er der en lav befolkningstilvækst. Der fokuseres på globale løsninger for at opnå økonomisk, social og miljømæssig bæredygtighed. Der indføres rene og effektive teknologier, og der sker en hurtig økonomisk omstilling til et service- og informationssamfund (Nakicenovic & Swart, 2000). B1 repræsenterer en lav udledning af drivhusgasser (IPCC, 2007).

Storyline B2

I storyline B2 er der en moderat befolkningstilvækst. Der er fokus på lokale løsninger for at opnå økonomisk, social og miljømæssig bæredygtighed. Der er ligeledes fokus på beskyttelse af miljøet og social lighed. Der er en middelstor økonomisk udvikling, og den teknologiske udvikling er langsommere end i storyline B1 og A1 (Nakicenovic & Swart, 2000). B2 repræsenterer en mellemlav udledning af drivhusgasser (IPCC, 2007).

En oversigt over de fire storylines ses af figur 4.1 Inden for disse storylines er der således udviklet forskellige scenarier. Den nuværende danske regering (2011) har i dens klimatilpasningsstrategi (Energistyrelsen, 2008) jf. afsnit 5.2 valgt at tage udgangspunkt i to af IPCC's scenarier,

SRES Scenarios



Figur 4.1 Oversigt over IPCC's fire storylines (Nakicenovic & Swart, 2000).

nemlig A2 som er et middelhøjt scenarie, og B2 som er et middellavt scenarie. Derudover opererer regeringen med EU's målsætning om, at den globale temperatur ikke må stige mere end 2 °C i forhold til det førindustrielle samfund (Energistyrelsen, 2008). Klimaændringerne for Danmark på baggrund af disse tre scenarier kan ses af tabel 4.1.

DMI har udført beregninger for klimaændringer i Danmark på baggrund af A2- og B2-scenarierne i år 2100 i forhold til 1990. Disse beregninger viser, at den årlige middeltemperatur vil stige mellem 0,7 °C og 4,6 °C. Vinternedbøren vil stige moderat og vil svare til 120 – 140 % af den nuværende nedbør, mens der vil forekomme et mindre fald i sommernedbøren, som vil svare til 85-90 % af den nuværende nedbør. Antallet af episoder med meget kraftig nedbør vil stige, hvilket især vil være gældende i efteråret, og intensiteten af den kraftigste dagednbør vil stige med 20 % eller derover. Stormaktiviteten over Danmark vil stige moderat, og den maksimale vandstandsstigning i A2-scenariet vil være 0,7 – 1,05 m ved Vestkysten. Vandstandsstigningen skyldes 0,3 m som følge af ændringer i vindretning og stormstyrke og 0,4-0,75 m som følge af global og regional havvandsstigning (DMI, 2010).

Som det fremgik af kapitel 2 har regeringen anbefalet, at kommuner tager udgangspunkt i scenarie A1B i kommuneplanlægningen (Klima- og Energiministeriet, 2011a). Beregningen af A1B-scenariet for 2021-2050 kan repræsentere A2, B2 og EU2C for perioden, idet der ikke er stor forskel mellem disse i denne periode (Klimatilpasning.dk, 2009a; Klimatilpasning.dk, 2011c).

Tabel 4.1 Klimaændring i Danmark frem til år 2100 udtrykt som ændring i forhold til perioden 1961-90 for tre klimascenarier.

Klimaændringer frem til 2100	A2	B2	EU2C
Årsmiddeltemperatur	+3,1	+2,2	+1,4
Vintertemperatur	+3,1	+2,1	+2,0
Sommertemperatur	+2,8	+2,0	+1,3
Årsnedbør	+9%	+8%	0 %
Vinternedbør	+43%	+18%	+1%
Sommernedbør	-15%	-7%	-3%
Maximum døgnnedbør	+21%	+20%	+22%
Vind			
Middelvind over hav	+4%	+2%	+1%
Maximal stormstyrke	+10%	+1%	+1%

Kilde: Klimatilpasning, 2011.

I A1B-scenariet tages der udgangspunkt i, at drivhusgasudledningen topper omkring 2050 og herefter er aftagende. Der er en hurtigt økonomisk vækst, og det globale befolkningstal topper midt i det 2100 århundrede. Effektive teknologier introduceres hurtigt, og energiforsyningen består af en blanding af ikke-fossile og fossile energikilder (Klimatilpasning.dk, 2011c). Tabel 4.2 viser klimaændringerne i Danmark frem til år 2050 som følge af A1B-scenariet.

Tabel 4.2: Klimaændringer i Danmark frem til 2050 ifølge A1B-scenariet.

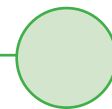
Årsmiddeltemperatur	+0.8 grader
Vinter	+1.0 grader
Sommer	+0.4 grader
Årsmiddelnedbør	+11%
Vinter	+7%
Sommer	+8%
Hav	
Middelvind	+1%
Hav + land	
Middelvind	+3%

Kilde: Klimatilpasning.dk, 2011.

Der er dog en række usikkerheder i forbindelse med de udarbejdede scenarier, og det er ikke muligt med sikkerhed at forudsige, hvordan klimaet vil udvikle sig.

4.2 Scenarier for vandstandsstigninger i denne rapport

Som følge af de store usikkerheder og eftersom det kan være vanskeligt at udvælge ét eller få scenarier at tage udgangspunkt i, er der i denne rapport ikke taget udgangspunkt i IPCC's scenarier. Det er i stedet valgt, at der udarbejdes tre forskellige scenarier for oversvømmelser ved henholdsvis 0,5 m, 1 m og 1,5 m vandstandsstigninger. Disse scenarier er ikke valgt, fordi det er de mest sandsynlige, men er udelukkende valgt som eksempler på, hvad der vil ske, hvis vandet stiger 0,5 m, 1 m eller 1,5 m. Dog er vandstandsstigningerne inspireret af mulige fremtidige vandstandsstigninger, eftersom DMI forudsiger 0,3 – 1,0 m vandstandsstigning, og Arktisk Råd har i en rapport fra 2011 forudsagt vandstandsstigninger i år 2100 på 0,9 – 1,6 m i forhold til 1990-niveauet (Arctic Council, 2011).



Der inddrages ikke et tidsperspektiv i oversvømmelsesmodellerne, og det fastsættes ikke, hvornår vandstandsstigningerne vil indtræffe. Udover de tre scenarier for vandstandsstigninger udarbejdes scenarier for arealanvendelsen i år 2040 ved hjælp af simuleringsprogrammet Land Use Change Impact Assessment (LUCIA). Der opstilles således både scenarier for den fremtidige vandstandsstigning og for den fremtidige arealanvendelse.

4.3 Scenarier som planlægningsværktøj

Begrebet scenarier kan dække over en række forskellige fremtidsstudier. Dette kan eksempelvis være trendanalyser, prognoser, forudsigelser eller øjebliksbilleder af, hvad der måske vil forekomme. En mere snæver definition af scenarier ses fx hos Van den Berg and Veeneklaas (1995) (Gengivet i Tress & Tress, 2003: 162) som en beskrivelse af den nuværende situation, den fremtidige situation, som er mulig eller ønsket, og vejen til at nå den fremtidige situation. Scenarier er ifølge Van den Berg & Veeneklaas stiliserede billeder af, hvordan fremtiden muligvis vil udvikle sig. Dette kan fx være i form af ekstreme scenarier som stereotyper, arketyper, optimale udviklinger eller dommedagssituationer. Scenarier viser således ikke nødvendigvis det mest realistiske billede af fremtiden, og sådanne scenarier fokuserer således ikke på ”Hvad vil ske?”, men derimod ”Hvad vil ske, hvis...?” (Tress & Tress, 2003: 162 f.) (Bach et al., 2005). Ivner et al. (2010) definerer scenarier som *“narrative of a future state including a description of the principal driving forces involved in the transition from the present to the future”*. Denne definition ligner Van den Berg & Veeneklass og stemmer overens med IPCC’s scenarier for klimaændringer, som beskriver forskellige mulige udviklinger i klimaet, og hvilke drivkræfter der bevirker de pågældende udviklinger. Også de arealanvendelsesscenarier, som i denne rapport opstilles vha. Land Use Change Impact Analysis (LUCIA) stemmer overens med ovenstående definition, idet der udvikles fremtidige scenarier for arealanvendelsen på baggrund af socioøkonomiske faktorer m.m. (se kapitel 9).

Xiang og Clarke (2003) definerer arealanvendelsesscenarier som:

“(...) composed images of an area’s land-use patterns that would result from particular land-use plans, policies, and regulations if they were actually adopted and implemented at a certain point of time” (Xiang & Clarke, 2003: 886).

Ifølge Xiang og Clarke (2003) indgår planer og politikker således som element i scenarier for arealanvendelse, hvilket stemmer overens med udviklingen af arealanvendelsesscenarier i denne rapport, som udarbejdes på baggrund af Aalborg Kommunes planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder (se afsnit 9.2).

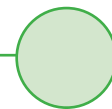
Der er forskellige metoder til at udvikle scenarier. Ivner et al. (2010) henviser til to forskellige me-

toder: (1) *backcasting* og (2) *scenario planning using external scenarios*. Backcasting er den proces, hvor der udvikles billeder af den ønskede fremtid, hvorefter det vurderes, hvilke mulige politikker det kræver at nå denne ønskede fremtid. Den anden metode bruger eksterne scenarier i scenarieudviklingen. Eksterne scenarier er scenarier for vigtige faktorer eller drivkræfter, som ikke er under planlæggernes kontrol, men som har en vigtig indflydelse på forskellige udviklinger i et scenarie. Målet er at udvælge de handlinger, som er egnede under så mange eksterne udviklinger som muligt, og forskellige alternativer vurderes derfor i forhold til de eksterne scenarier (Ivner et al., 2010). IPCC's scenarier stemmer bedst overens med den 2. metode, idet der ikke er udpeget nogen ønsket fremtid, men udelukkende *mulige* fremtidige udviklinger, og det er eksterne udviklinger som fx befolkningsudvikling, der ligger til grund for scenarierne. De arealanvendelsesscenarier, som opstilles i denne rapport, er ligeledes udarbejdet på baggrund af metode 2, eftersom det anvendte program (LUCIA) baserer beregningerne på eksterne drivkræfter, mens det er vanskeligere klart at definere en metode for scenarieudviklingen for oversvømmelses-scenarierne.

4.3.1 Hvorfor anvende scenarier?

Scenarier kan anvendes i beslutningstagning og udformning af politikker. Scenarierne kan eksempelvis give klarhed omkring de politiske instrumenter, som planlægges anvendt, og om disse instrumenter giver den ønskede udvikling (Bach, 2005: 13). Scenarier tager udgangspunkt i en bestemt situation, og resultaterne af scenarierne anvendes ofte til sammenligning af eksempelvis startåret og slutåret eller alternative udviklingsforløb. Når forskellige udviklingsforløb sammenlignes, tages der udgangspunkt i et basisscenarie, som er et scenarie baseret på kendte elementer og anerkendte forventninger som fx politisk vedtagne handlingsplaner. Basisscenariet kan således sammenlignes med andre scenarier og udviklingsforløb, og derved kan nye forslag undersøges (Bach, 2005: 27 f.)

Scenarier er et bindeled mellem, hvad Xiang & Clarke (2003) kalder "modeling" og "planning", nemlig henholdsvis scenarieudviklerens videnskabelige undersøgelse af fremtiden og scenariebrugerens virkelige planlægning af fremtiden. Ifølge Xiang & Clarke (2003) har scenarier to funktioner, som de kalder "bridging" og "cognitive stretching". Bridging består netop i bindeledet mellem modeling og planning. Scenarieudvikleren, som ofte er specialist på et givet område, videreformidler viden og overbevisninger til scenariebruger, som ofte ikke er specialist inden for området, men derimod ofte er stakeholder, beslutningstager, borger mv. Scenariebruger bringer relevans til modelleringen af scenarierne ved at anvende dem til planlægning af den virkelige verden og ved at opstille kvalitetskrav til scenarierne. Cognitive stretching henviser til at "strække" overvejelserne og tanker om fremtiden og forøge mængden af overvejede fremtidige alternativer. Endvidere skal scenarier bidrage til en effektiv beslutningsproces, og egnetheden og brugbarheden af et scenarie vurderes således på baggrund af, hvor effektiv scenariet er i beslutningsprocessen (Xiang & Clarke, 2003). Ifølge Ivner et al. (2010) medvirker brugen af scenarier til en øget chance for at nå de mål, der



er i en given planlægningssituation, fordi de åbner op for en lang række forskellige udfordringer og udviklinger, som ikke nødvendigvis ville blive overvejet i en planlægningssituation uden anvendelse af scenarier.

4.4 Modeller som planlægningsværktøj

Et værktøj til at udarbejde, beregne og visualisere scenarier er modeller. I dette afsnit gøres rede for, hvad modeller kan bidrage med i en planlægningssituation, og det understreges, at modeller ikke er virkeligheden men udelukkende *repræsentationer* af virkeligheden.

Giere (2004) opstiller følgende ligning for repræsentationel praksis i videnskaben:

"S uses X to represent W for purposes P" (Giere, 2004)

S henviser til en forsker, en forskergruppe eller lignende. W repræsenterer et aspekt af den virkelige verden, X kan være et udtryk for forskellige modeller. Det vil altså sige, at udtrykket kan lyde således:

"Scientists use models to represent aspects of the world for various purposes" (Giere, 2004).

Ifølge Giere (2004) er modeller videnskabens primære værktøj til at repræsentere dele af virkeligheden. Modeller kan anvendes til at repræsentere virkeligheden ved at udnytte de ligheder, der er mellem modellen og den del af virkeligheden, som modellen skal repræsentere. Ifølge Gudmundsson (2011) indgår modeller under begrebet *knowledge technology*, som han definerer som metoder, der kan medvirke til at producere, transformere eller overføre viden. Modeller kan anvendes til at skabe resultater, som kan danne grundlag for forskellige handlinger eller for problemløsning. Modeller kan også anvendes som værktøjer i beslutningstagning, hvor modeller kan ses som en platform, hvorudfra aktører kan få adgang til viden og diskutere forskellige informationer (Gudmundsson, 2011). Modeller, som viser sårbarhed over for klimaændringer, kan anvendes til at tydeliggøre vigtigheden af klimatilpasning over for beslutningstagere. Anvendelse af sådanne modeller kan mindske usikkerheden i planlægningen bl.a. ved at give en øget forståelse af komplekse sammenhænge i miljø- og planlægningsproblemer. Modeller for en fremtidig arealanvendelse kan således være vigtige planlægningsværktøjer, der kan anvendes som grundlag i en beslutningsproces og give værdifuld information til bl.a. politikere og borgere (Hansen, 2009).

Olsson & Anderson (2007) behandler anvendelsen af modeller i forbindelse med vandressourceforvaltning. Modeller kan anvendes som udgangspunkt for at diskutere løsninger på miljømæssige problemer eller som et udgangspunkt for at diskutere forskellige tilpasningsstrategier til fremtidige ændringer. En sådan anvendelse af modeller er også relevant i forbindelse med fremtidige

oversvømmelser. De modeller, som udvikles i forbindelse med denne rapport, kan anvendes til at diskutere, om det er muligt at forhindre oversvømmelse i nogle områder, fx ved hjælp af diger, eller om det vil være fordelagtigt i stedet at tilpasse samfundet til klimaændringer og oversvømmelser, fx gennem planlægning af arealanvendelse. En kvalitet ved at anvende modeller i planlægningen er, at de kan vise komplekse sammenhænge, som kan være vanskelige at overskue uden anvendelse af modeller, og desuden kan der indgå store mængder data i modeller. Det kan dog i mange tilfælde være vanskeligt at få adgang til alt relevant data, og et vilkår i forbindelse med udarbejdelse af modeller er således at *"We will never have access to landscape information with a spatial solution needed for a 'perfect' description of reality"* (Olsson & Anderson, 2007). Det vil således sige, at modeller alene er repræsentationer og udsnit af virkeligheden og altså ikke udtryk for et perfekt, objektivt og fuldkomment billede af virkeligheden. Modeludvikleren og den model, der vælges, kan have indflydelse på, hvordan repræsentationen af virkeligheden bliver – det vil sige, at outputtet af modellen kan være afhængig af disse valg. Hvilken model, der udarbejdes til et givet formål, er således ikke objektivt, men afhænger bl.a. af modeludviklerens præferencer, tidligere erfaringer, brugerens behov og tilgængeligt data, samt hvilke omkostninger der er forbundet med udarbejdelsen af modellen. Afhængigt af hvilken model, der udarbejdes, kan det give anledning til forskellige anbefalinger (Olsson & Anderson, 2007). Dette kan eksempelvis være i forbindelse med planlægning af arealanvendelse og tilpasning til klimaændringer. Det kan være vigtigt, at modellerne er gennemsikkelige for brugerne af dem, og at der gøres rede for de valg der er truffet i forbindelse med udarbejdelsen af modellerne, så brugerne eksempelvis kan vurdere, om modellen er repræsentativ for de lokale forhold (Olsson & Anderson, 2007).

Modeludviklerens indflydelse på den færdige model og de resultater, som modellen viser, er interessant i forbindelse med undersøgelsen i denne rapport. Eftersom fire forskellige metoder til oversvømmelsesmodellering testes, er det interessant at undersøge forskellene på disse modeller og således undersøge, om disse forskelle er store eller små, og hvilken indflydelse modeludviklerens valg af metode har på de endelige resultater.

Dette kapitel har således omhandlet værktøjerne scenarier og modeller, som kan anvendes i planlægning og tilpasning til klimaændringer. Det følgende kapitel vil give en introduktion til nogle strategier og politikker, der er væsentlige i forbindelse med planlægningen af tilpasning til klimaændringer. Fokus vil ligge på den danske regerings *Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark* (Energistyrelsen, 2008) og *EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser* (Europaparlamentet og Rådet, 2007). Den danske regerings *Energistrategi 2050 – fra kul, olie og gas til grøn energi* (Klima- og Energiministeriet, 2011b) vil kort blive introduceret.

5. Strategier og direktiver for klimaændringer og vandstandsstigninger i Danmark

Som nævnt i kapitel 1 er det vigtigt at arbejde for at nedsætte udledningen af drivhusgasser til atmosfæren for at reducere den globale opvarmning, men det er samtidig vigtigt, at samfundet også tilpasser sig de klimaændringer, som er et resultat af udledning af drivhusgasser i forbindelse med menneskelige aktiviteter (jf. kapitel 3).

For at mindske klimaændringerne og konsekvenserne deraf har EU opstillet et mål om, at den globale temperatur maksimalt må stige 2 °C over det før-industrielle niveau. For at nå et sådant mål må stigningen i udledningen af drivhusgasser stoppe i løbet af 10-15 år (fra 2008), og i 2050 skal udledningerne være reduceret til 50 % af niveauet i 1990 (European Environment Agency, 2008: 21). I alle klimascenarierne fra the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (se afsnit 4.1) overstiges denne temperatur dog mellem år 2040 og 2060 (European Environment Agency, 2008: 42). En nedsættelse af udledningen af drivhusgasser er vigtig i forbindelse med at reducere klimaændringer. Dog vil temperaturstigningen og følgerne deraf fortsætte i flere årtier selv efter udledningen af drivhusgasser bliver stabiliseret. Verdens lande er således nødsaget til at tilpasse sig klimaændringerne (European Environment Agency, 2008: 21)

"Society needs to avoid the unmanageable – through the reduction of greenhouse gas emissions – and manage the unavoidable – through adaption measures" (Scientific Expert Group on Climate Change i European Environment Agency, 2008: 34)

Den danske regering har udarbejdet strategier for både energiforsyningen, som i stedet for fossile brændsler skal baseres på grøn energi, og for tilpasning til det fremtidige klima. Fokus for denne rapport er som nævnt i kapitel 1 tilpasning til klimaændringer, men da nedsættelse af drivhusgasudledningen og tilpasning begge er to vigtige tilgange i forbindelse med klimaændringer, vil dette kapitel give et overblik over den nuværende regerings politikker og strategier inden for både nedsættelse af drivhusgasser og tilpasning til klimaændringer, dog med størst fokus på strategier inden for tilpasning.

5.1 Energistrategi 2050 – fra kul, olie og gas til grøn energi

I februar 2011 fremlagde regeringen en strategi for den fremtidige danske energiforsyning: ”*Energistrategi 2050 - fra kul, olie og gas til grøn energi*” (Klima- og Energiministeriet, 2011b). Af denne energistrategi fremgår det, at regeringens mål er, at Danmark skal være uafhængig af fossile brændsler i år 2050. Uafhængigheden af fossile brændsler skal øge forsyningssikkerheden, frigøre Danmark fra afhængighed af de olieproducerende lande, styrke innovation og virksomheders konkurrencemuligheder og bidrage til at nedsætte udledningen af drivhusgasser til atmosfæren. EU har en målsætning om at reducere udledningen af drivhusgasser med 80-95 % i år 2050 i forhold til 1990-niveau, og energistrategien skal medvirke til, at Danmark yder en indsats for at nå dette mål (Klima- og Energiministeriet, 2011b: 7). Regeringen henviser til, at en omlægning af energiforsyningen skal være så omkostningseffektiv som mulig, så der opnås størst forsyningssikkerhed og reduktion af anvendelsen af fossile brændsler for pengene. Det vil sige, at regeringen ikke mener, at udviklingen skal presses, så det vil medføre unødvendigt store omkostninger her og nu, men værdien af mindre afhængighed af fossile brændsler og nedsat drivhusgasudledning frem til år 2050 skal samtidig tages i betragtning. Energistrategiens primære indsatsområder er energieffektivisering og vedvarende energi. I år 2050 kan Danmarks energiforbrug ifølge regeringen være effektiviseret med over 50 %. Af vedvarende energi satses der med energistrategien især på vindkraft, biomasse, solceller og bølgekraft. Ifølge regeringen fremlægges der med energistrategien en række energi- og klimapolitiske initiativer, der sigter mod både at skabe initiativer, som har en øjeblikkelig virkning, initiativer som fastlægger de langsigtede rammer, og initiativer som medvirker til øget teknologiudvikling (Klima- og Energiministeriet, 2011b: 29).

Den danske regering har således et mål om at gøre Danmark uafhængigt af fossile brændsler og på den måde nedsætte udledningen af drivhusgasser. Samfundet må dog nødvendigvis tilpasse sig de klimaændringer, som allerede finder sted, og som uundgåeligt vil forekomme i fremtiden som følge af de allerede udledte drivhusgasser, og de drivhusgasser som vil udledes til atmosfæren i fremtiden. Regeringen har derfor udarbejdet en klimatilpasningsstrategi.

5.2 Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark

I marts 2008 udarbejdede den danske regering ”*Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark*” (Energistyrelsen, 2008). Målet med denne strategi er at tilskynde, at klimaændringer integreres i planlægning og udvikling ”på den mest hensigtsmæssige måde” (Energistyrelsen, 2008). Dette sker med et udgangspunkt i, at klimatilpasning er et langsigtet forløb, og at det er usikkert, hvilke konsekvenser klimaændringerne vil medføre, og hvornår disse konsekvenser vil indfinde sig. Der lægges i klimatilpasningsstrategien vægt på, at myndigheder, virksomheder og borgere rettidigt reagerer på

og tilpasser sig konsekvenser af klimaændringer inden for de lovgivningsmæssige, økonomiske og teknologiske rammer, der er til stede (*"ad hoc tilpasning"*). Der opstilles tre tiltag i strategien:

1. "En målrettet informationsindsats herunder etablering af en klimatilpasningsportal drevet af et videncenter.
2. En forskningsfaglig strategi, der bl.a. omfatter etablering af en koordineringsenhed, der skal sikre, at den danske klimaforskning i større omfang fokuserer på tilpasningsspørgsmålet.
3. Etablering af en organisering, der omfatter nedsættelse af et tværgående Koordinationsforum for Klimatilpasning, der skal sikre en koordineret indsats mellem de offentlige myndigheder."

(Energistyrelsen, 2008: 8)

Klimatilpasningsportalen (1), som regeringen har oprettet, er en internetportal (www.klimatilpasning.dk) for klimatilpasning, som giver myndigheder, erhvervsliv, specialister og privatpersoner adgang til den nyeste viden inden for klimatilpasning. Portalen skal medvirke til, at samfundet løbende tilpasser sig klimaændringerne. Den forskningsfaglige strategi (2) skal medvirke til, at der bliver fokuseret på klimatilpasning i klimaforskningen. Størstedelen af den hidtidige forskning har fokuseret på at forklare og beskrive klimaændringer og på at reducere menneskets udledninger af drivhusgasser, men med klimatilpasningsstrategien vil regeringen sikre, at tilpasning til klimaændringer indgår som en væsentlig del af den samlede klimaforskning (Energistyrelsen, 2008). Det tværgående koordinationsforum for klimatilpasning (3) skal sikre implementering af regeringens klimatilpasningsstrategi. Desuden skal det sikre samarbejde og koordination mellem forskellige sektorer og myndigheder.

Klimatilpasningen inddeles i klimatilpasningsstrategien i to typer. Den første type er den tilpasning, der sker spontant, og den anden type er den tilpasning, som er planlagt og sker som et resultat af nye politiske beslutninger. I Klimatilpasningsstrategien vurderes det, om der sker en løbende tilpasning på eget initiativ inden for forskellige sektorer, og hvilke tiltag der vil kunne fremme denne proces. Strategien fokuserer på, hvilke tiltag der vil være realiserbare inden for en periode på 10 år. "Realiserbart" henviser til, at *"et tiltag skal være både videnskabeligt, teknisk og samfundsøkonomisk relevant at igangsætte inden for denne periode"* (Energistyrelsen, 2008: 9). Det vil således sige, at hvor regeringens energistrategi har et langsigtet fokus for iværksættelse af tiltag (til 2050), fokuserer klimatilpasningsstrategien på en periode på 10 år i forbindelse med realiseringen af tiltag. Dog tages der højde for udviklinger på længere sigt i klimatilpasningsstrategien, og klimaudviklingen på længere sigt er væsentlig i denne strategi.

Efter således at have givet et generelt overblik over regeringens energistrategi og klimatilpasningsstrategi vil det følgende afsnit fokusere på oversvømmelser som følge af klimaændringer. Inden for tilpasning til vandstandsstigninger er regeringen bl.a. underlagt *EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser*.

5.3 Strategier og direktiver for tilpasning til vandstandsstigninger

5.3.1 EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser

EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser ("EU's oversvømmelsesdirektiv") (Europaparlamentet og Rådet, 2007) trådte i kraft i oktober 2007 og har til formål, at:

"fastlægge en ramme for vurdering og styring af oversvømmelsesrisici med henblik på at mindske de negative følger for menneskers sundhed, miljø, kulturarv og økonomiske aktivitet som følge af oversvømmelser i Fællesskabet" (Europaparlamentet og Rådet, 2007: kapitel 1, artikel 1).

Ifølge dette direktiv skal medlemslandene senest den 22. december 2011 have foretaget en foreløbig vurdering af oversvømmelsesrisikoen. I denne vurdering skal bl.a. indgå topografiske kort med information om arealanvendelse, en beskrivelse af tidligere oversvømmelser, og de skader der er sket i forbindelse med disse. Ud fra denne vurdering skal medlemslandene udpege områder, som de anser for at være i væsentlig fare for oversvømmelse (Europaparlamentet og Rådet, 2007: Kapitel 2, Artikel 4 f.). Denne opgave løses i Danmark af Miljøministeriet og Kystdirektoratet (Miljøministeriet, 2011). Dernæst skal medlemslandene senest den 22. december 2013 have udarbejdet kort, der viser faren for oversvømmelse i de områder, hvor der er vurderet at være en væsentlig fare for oversvømmelse. Kortene skal informere om de negative konsekvenser af oversvømmelser og skal bl.a. anslå, hvor stort et antal indbyggere, der forventes at blive påvirket, og hvilken økonomisk aktivitet der findes i de oversvømmelsestruede områder (Europaparlamentet og Rådet, 2007: Kapitel 3, Artikel 6). Denne opgave løses i Danmark af Miljøministeriet og Kystdirektoratet (Miljøministeriet, 2011). Endelig skal medlemslandene på baggrund af kortene over de oversvømmelsestruede områder senest den 22. december 2015 have udarbejdet risikostyringsplaner for oversvømmelser. Der skal fastsættes mål for styring af oversvømmelsesrisiciene i de områder, hvor der er vurderet at være væsentlig fare for oversvømmelse. Der skal være fokus på at reducere de negative konsekvenser af oversvømmelser i forbindelse med menneskers sundhed, miljø, økonomiske aktiviteter og kulturarv, og i planerne skal indgå foranstaltninger til at opnå disse mål. Risikostyringsplanerne skal særligt lægge vægt på forebyggelse, sikring og beredskab (Europaparlamentet og Rådet, 2007: Kapitel IV, artikel 7). Denne opgave løses i Danmark af de kommunale myndigheder (Miljøministeriet, 2011).

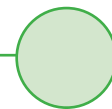
5.3.2. Tilpasning til vandstandsstigninger i Danmark

EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser er således også styrende for en del af den danske regerings arbejde med tilpasning til klimaændringer, og tilpasning til vandstandsstigninger indgår således også i den danske regerings klimatilpasningsstrategi (Energistyrelsen, 2008).

I forbindelse med *Kystforvaltning, diger, havne og kystnær bebyggelse*, som er en særskilt sektor i klimatilpasningsstrategien, beskrives det bl.a., at denne vil påvirkes af stigende vandstand og højere stormflodsvandstande som følge af kraftigere storme, hvilket medfører øget risiko for oversvømmelse og erosion på en række kyststrækninger. I klimatilpasningsstrategien vurderes det, at der generelt er gode muligheder for løbende tilpasning til klimaændringer inden for denne sektor, og på nogle områder finder tilpasning allerede sted. Der er ingen love eller regulativer, der afgør, om en lodsejer skal beskytte sig mod stigende vandstande og til hvilket niveau. Det er den enkelte lodsejer, der afgør om han/hun vil lave beskyttelsestiltag mod oversvømmelse og kysttilbagetrækning. Dog har Kystdirektoratet lavet anbefalinger om minimumshøjder på bygningers sokkel og minimumshøjder på diger. Disse anbefalinger tager højde for fremtidige vandstandsstigninger. Diger, kystbeskyttelse og havneværker har en holdbarhed på 50-100 år. Derfor skal der ved nybygning eller renovering af sådanne anlæg tages højde for klimaændringer. I forbindelse med diger råder klimastrategien til, at det overvejes, om en lavere sikkerhed som følge af klimaændringer kan accepteres, og det bør ligeledes overvejes, om kystbeskyttelsen skal opgives, så kyststrækningen vil blive præget af hyppigere oversvømmelser og kysttilbagetrækning. Stormflodsberedskaber skal tilpasses forholdene og den løsning, der vælges. Også sektoren "*Natur og naturbeskyttelse*" påvirkes af øgede vandstande, øget nedbør og ændret nedbørmønstre. Der kan ifølge klimatilpasningsstrategien forekomme øget erosion, og lavvandede kyster, strandenge og ådale kan være i fare for oversvømmelse. Disse effekter blandt andre kan føre til, at naturtyper og arter svækkes, forsvinder fra Danmark eller uddør. Ifølge strategien har naturen gode muligheder for at tilpasse sig, hvis der er tilstrækkeligt med tid, plads og mangfoldighed. En planlagt indsats kan forbedre naturens rammer for tilpasning. Dette kan eksempelvis være i forbindelse med forvaltning af naturen, den fysiske planlægning eller indsatser i andre sektorer, der influerer på naturen. Inden for sektoren "*Planlægning af den fremtidige arealanvendelse*" kan der i forbindelse med klimaændringer opstå problemer med afvanding af lavtliggende områder som fx kystnærhedszonen. Oversvømmelse af kystnære områder kan medføre problemer for den del af Danmarks befolkning, som bor eller har sommerhus i disse områder. Også en række campingpladser er beliggende i nærheden af kysten. Sådanne problemer løses ifølge klimatilpasningsstrategien bedst ved en "*hensigtsmæssig planlægning af arealanvendelsen*", som fx kan betyde, at udsatte områder friholdes for beboelse og andre anlæg (Energistyrelsen, 2008: 30). Det er således vigtigt, at kommuneplanlægningen løbende tilpasses de konsekvenser, der kan forekomme i forbindelse med klimaændringer, da kommuneplanlægningen er en vigtig kilde til information for kommunens borgere og private og offentlige bygherrer. Kommunernes arbejde skal ifølge klimastrategien støttes fra centralt hold for at sikre, at kommunerne har adgang til og kan fortolke relevant materiale om klimaændringer. Kommunerne skal have adgang til opdateret information om udviklingen i klimaet og til diverse risikoanalyser. Hvis de statslige myndigheder vurderer, at der kan blive behov for at udforme forudsætninger for kommuneplanlægningen og lave statslige tiltag, kan disse fx fremgå af "*Oversigt over statslige interesser i kommuneplanlægningen*". I "*Oversigt over statslige interesser i kommuneplanlægningen 2013*" (Miljøministeriet, 2011) er der til forskel fra "*Oversigt over statslige interesser i kommuneplanlægningen 2009*" (Miljøministeriet, 2006) tilføjet et afsnit om oversvømmelse, hvori der gives udtryk for de statslige mål og krav til den kommunale planlægning i den forbindelse. Disse baseres på kravene, som opstilles i EU's oversvømmelsesdirektiv. Der er således et statsligt mål om, at oversvømmelsesrisikoen for

ekstreme oversvømmelser skal vurderes. Dette gælder både vandløb, søer, havet og fjorde, og oversvømmelsesrisikoen henviser som i EU's oversvømmelsesdirektiv til sandsynligheden for oversvømmelse samt de negative følger, oversvømmelser kan have for sundhed, miljø, kulturarv og økonomi. Sådanne vurderinger af oversvømmelsesrisikoen skal danne grundlag for en udpegning af risikoområder, hvor oversvømmelse kan være sandsynlig. I kommuneplanerne skal der indgå retningslinjer, som tager højde for oversvømmelsesrisiko. Der skal således være en retningslinje, som friholder områder, der er i væsentlig risiko for oversvømmelse, for opførelse af ny bebyggelse, og retningslinjer for etablering af foranstaltninger der sikrer sådanne områder mod oversvømmelse (Miljøministeriet, 2011).

Klimatilpasning er således i høj grad en kommunal opgave, og Kommunernes Landsforening (KL) arbejder også med dette område. KL henviser til, at regeringens klimatilpasningsstrategi, som ovenfor nævnt, fokuserer på, at tilpasningen til klimaændringerne for en stor dels vedkommende skal ske ad hoc, og uden der gives penge til kommunerne. Dette er efter KL's mening ikke optimalt, idet der henvises til, at undersøgelser har vist, at der kan opnås økonomiske fordele, når der sættes tidligt ind med en klimatilpasningsindsats (Kommunernes Landsforening, u.d.). Kommunernes Landsforening offentliggjorde i april 2009 *Kommunernes Klimaudspil* (Kommunernes Landsforening, 2009a) (Kommunernes Landsforening, 2009b). I dette udspil giver KL bl.a. et bud på, hvordan kommunerne kan tilpasse sig klimaændringer. KL henviser til, at en klimainsats vil kræve store investeringer, og at kommunerne ikke har så store økonomiske ressourcer til rådighed, og KL giver et forslag til, hvordan de klimarelaterede opgaver skal fordeles mellem staten og kommunerne (Kommunernes Landsforening, 2009a: 3). KL foreslår i klimaudspillet, at der skal være en sammenhængende vandplanlægning, som tager højde for forskellige problematikker omkring vand og klimaændringer, så som kloakkers manglende evne til at rumme vandmængder som følge af ekstrem regn og oversvømmelse af vandløb. Kunstige søer og kanaler til opsamling af regnvand og vådområder, søer og våde enge omkring vandløb kan medvirke til at forhindre oversvømmelser i byerne (Kommunernes Landsforening, 2009b: 12). I forbindelse med kystsikring henviser KL til, at det er den enkelte grundejers ansvar at beskytte kysterne, bortset fra Vesterhavskysten, der er udpeget som risikoområde, hvor staten har hovedansvaret. KL mener, at der skal være et offentligt medansvar for sikring af kyster i flere områder end Vesterhavskysten, som eksempelvis kan finansieres gennem en statslig kystsikringspulje. KL foreslår således, at staten udpeger kyststrækninger som særlige risikoområder, hvor kystsikringspuljen i så fald vil kunne anvendes. KL understreger, at kommuneplanlægningsprocessen giver god mulighed for at kommunikere kommunens politikker på klimaområdet ud til borgerne og derigennem opfordre grundejere og private investorer til at tage hensyn til klimaændringer. Planlægning af arealanvendelse er vigtig i klimasammenhæng, og kommuner skal eksempelvis planlægge for vedvarende energianlæg, og udpege arealer som skal udlægges til vådområder. KL ønsker, at kommunerne får mulighed for at planlægge arealanvendelsen ud fra et klimaperspektiv og mener, at håndtering af vand skal indgå som et fast tema i lokalplanen (Kommunernes Landsforening, 2009b: 14ff.). Efterfølgende har en arbejdsgruppe med KL og regeringen dog vurderet, at Planloven er ændret til at tage højde for EU's oversvømmelsesdirektiv, og kom-



munerne forpligtes til at sikre arealer, der er i væsentlig fare for oversvømmelse (Kommunernes Landsforening & regeringen, 2010: 5 f.). I forbindelse med tilpasning til klimaændringer er det fordelagtigt for kommunerne at have forskellige modeller og værktøjer til rådighed. Ifølge arbejdsgruppen med KL og regeringen vil det være fordelagtigt at anvende nogle modeller centralt for at skabe et fælles nationalt udgangspunkt, mens mere detaljerede analyser må udføres af de enkelte kommuner, så der tages højde for lokale forhold. Kommunerne har ifølge arbejdsgruppen bl.a. brug for, at der udvikles screeningsværktøjer og modeller, der dækker hele landet, og som kommunerne kan få adgang til. Sådanne screeningsværktøjer skal eksempelvis kunne udpege områder, der er i fare for oversvømmelse som følge af vandstandsstigninger. Arbejdsgruppen gør opmærksom på, at Danmarks Højdemodel er et vigtigt redskab til udarbejdelse af modeller og værktøjer og understreger, at det er vigtigt, der sker en løbende opdatering af højdemodellen (Kommunernes Landsforening & regeringen, 2010: 7 f.).

Gennem kapitel 2, 3, 4 og 5 er der opbygget en baggrundsviden om Aalborg Kommune, klimaforandringer nu og i fremtiden, væsentlige planlægningsværktøjer og strategier og direktiver inden for klimatilpasning. Dette er anvendelig viden i planlægningen af klimatilpasning og vil i de følgende kapitler danne grundlag for udarbejdelse af modeller og scenarier, som kan anvendes i klimatilpasningen.

6. Metoder til modellering af potentielle oversvømmelsesområder

I dette projekt undersøges fire forskellige metoder til modellering af scenarier for vandstandsstigning i Aalborg Kommune. Scenarierne bygger på vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m (se afsnit 4.2). I dette kapitel redegøres for de valgte metoder samt teorierne bag disse. Modelleringsmetoderne bygger på henholdsvis en bathtub-analyse, to cellular automata-analyser samt en cost distance-analyse. Formålet med at teste forskellige metoder til modellering af vandstandsstigninger er at opnå kendskab til de styrker og svagheder, som er forbundet med de fire forskellige metoder.

Metoderne er udvalgt på baggrund af et litteraturstudie af oversvømmelsesmodeller. Litteraturstudiet har vist, at der findes en række forskellige metoder til at modellere oversvømmelser som følge af klimaforandringer. Nogle modeller fremstår som simple og lettilgængelige, hvorimod andre fremstår som mere komplicerede og teknisk krævende.

6.1 Landhævning og oversvømmelsesmodeller

Når der udarbejdes oversvømmelsesmodeller, er det relevant at undersøge landhævning, idet en sådan kan have betydning for, hvilke og hvor store områder der påvirkes af vandstandsstigninger. Landhævning skyldes isens forsvinden som følge af afslutningen på sidste istid. I Nordjylland estimeres landhævningen til ca. 15 - 20 cm i dette århundrede (Klimatilpasning.dk, 2009b). Vigtigheden i at inddrage landhævning i de udarbejdede oversvømmelsesmodeller kan diskuteres, idet der er store usikkerheder om vandstandsstigningernes størrelse, og det således ikke vil være muligt at udarbejde et nøjagtigt billede af fremtidige oversvømmelser, selv hvis landhævningen blev inddraget. Derfor er det valgt at undlade at inddrage landhævning i oversvømmelsesmodellerne, men det er vigtigt at have dette for øje, hvis resultaterne skal anvendes i planlægning.

6.2 Oversigt over data

Til at udarbejde de fire oversvømmelsesmodeller er der anvendt geografisk data. Det anvendte data præsenteres i det følgende.

6.2.1 Den Digitale Terrænmodel

I de fire modeller anvendes Den Digitale Terrænmodel (DTM) fra Danmarks Højdemodel (DHM), som er udarbejdet af BlomInfo A/S og Scankort A/S (Kort og Matrikelstyrelsen, 2011: 7). Modellen er en digitalisering af det danske terræn. Det vil sige, at bygninger mv. ikke indgår i datasættet. Terrænet er sat i forhold til det gennemsnitlige havniveau, og havoverflader er sat til kote 0. Dataet er lagret i et rastergrid med en celledimension på 1,6 m, og det er den mest detaljerede terrænmodel, som er mulig at få adgang til (Kort og Matrikelstyrelsen, 2011: 3). Modellen er udarbejdet på baggrund af laserskanning fra fly i perioden foråret 2005 til foråret 2007. Modellens nøjagtighed er 0,67 m på den horisontale akse og 0,06 m på den vertikale akse (Kort og Matrikelstyrelsen, 2011: 6). Copyright: Kort- og Matrikelstyrelsen.

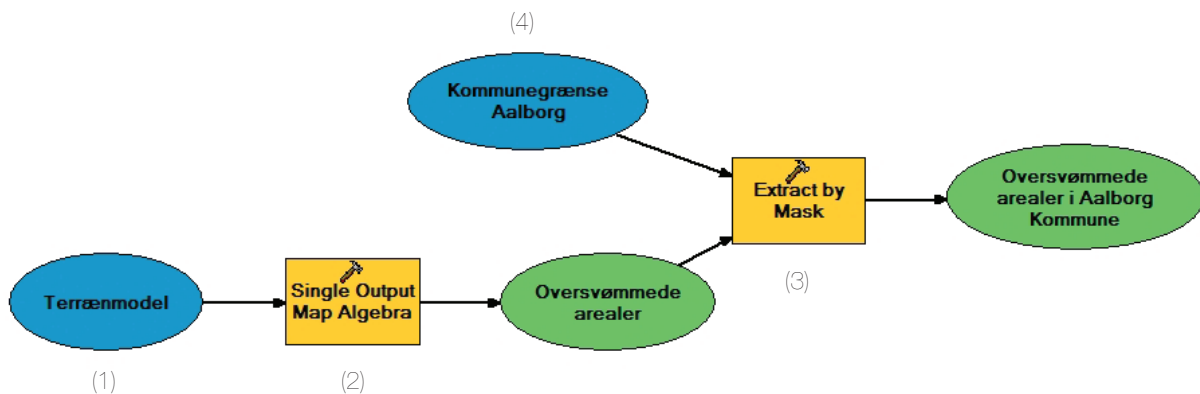
6.2.2 Kyst- og digedata fra Kort10

Kyst- og digedata er fra Kort10 og er fra 2007. Data over den danske kyststrækning er anvendt til information om hav- og fjordområder, og digedataet indeholder information om digers placeringer. Dataet over diger anvendes ud fra den antagelse, at digerne enten er tilstrækkeligt høje til at modvirke vandstandsstigning, eller at digerne udbygges, hvis det er nødvendigt. Data fra Kort10 er vurderet egnet, da kyststrækningen i Den Digitale Terrænmodel er optegnet på baggrund af Kort10 (Kort og Matrikelstyrelsen, 2011: 4). Data fra Kort10 er med en nøjagtighed på cirka 1 m (Kort og Matrikelstyrelsen, 2006: 3). Copyright: Kort- og Matrikelstyrelsen.

6.3 "Bathtub" som metode til oversvømmelsesmodellering

6.3.1 Introduktion til bathtub-metoden

Bathtub-metoden, også kendt som zero side-metoden, fremstår som en forholdsvis simpel metode til oversvømmelsesmodellering. Modellen er bl.a. blevet anvendt af Poulter og Halpin (2007).



Figur 6.1 Model for bathtub-metoden.

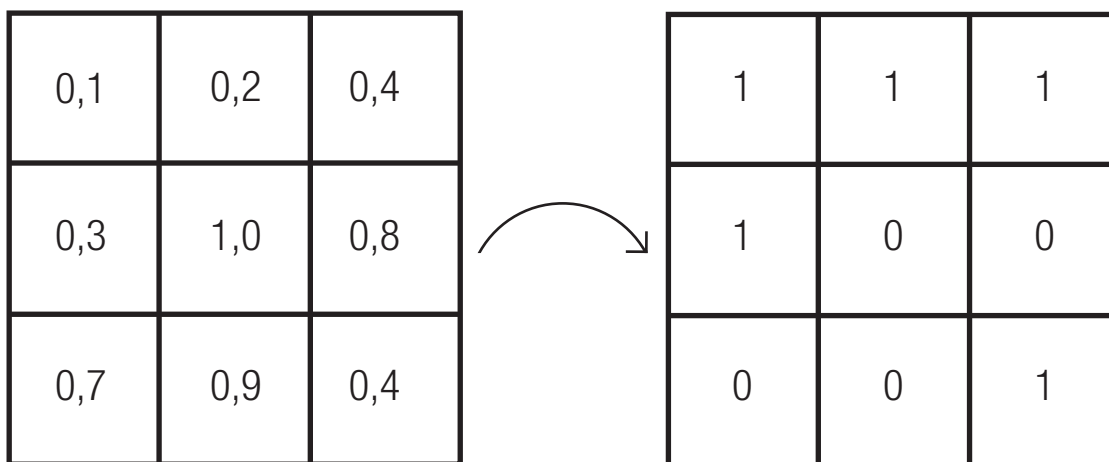
6.3.2 Anvendelse af bathtub-metoden

Modellen identificerer alle celler, som ligger under en defineret højdekote. Højdekoten angiver højden på vandstandsstigningen. Skal en vandstandsstigning på 1 m modelleres, udvælges alle celler med en maksimal højdekote på 1 m. Denne metode tager ikke højde for, om celler, der oversvømmes, er forbundet til havområder eller allerede oversvømmede naboceller (Poulter & Halpin, 2007: 171).

6.3.3 Modellering af oversvømmelsesscenarier

Bathtub-modellen er udarbejdet i Modelbuilder i ArcGIS 9.3, og figur 6.1 viser modellens opbygning. De blå cirkler illustrerer datainput, og de grønne cirkler illustrerer datainput samt dataoutput. De gule kasser illustrerer værktøjer i ArcGIS.

For at modellere vandstandsstigninger anvendes Den Digitale Terrænmodel med en cellestørrelse på 1,6 m (se figur 6.1 (1)). Ved hjælp af con-funktionen i værktøjet Single Output Map Algebra udvælges i scenariet med 0,5 m vandstandsstigning alle celler med en højdekote, som er under



Figur 6.2 Værdier lavere end 0,5 reklassificeres til værdien 1, og værdier højere eller lig med 0,5 reklassificeres til værdien 0 (Efter ESRI, 2009).

0,5 m over havets overflade (se figur 6.1 (2)), og disse tildeles værdien 1, mens alle andre celler tildeles værdien 0 (figur 6.2). I de øvrige scenarier udvælges områder under 1 m og 1,5 m, og disse reklassificeres ligeledes.

Single Output Map Algebra-udtrykkene for de tre scenarier ses her:

0,5 m: $\text{Con}(\text{terrænmodel}) < 0.5, 1, 0$

1,0 m: $\text{Con}(\text{terrænmodel}) < 1.0, 1, 0$

1,5 m: $\text{Con}(\text{terrænmodel}) < 1.5, 1, 0$

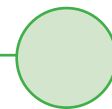
Con-funktionen angiver en HVIS-forespørgsel, dvs. hvis en eller flere betingelser er opfyldt i en celle, får cellen værdien 1, og hvis ikke tildeles den værdien 0. Herefter anvendes funktionen Extract by mask for at udvælge de oversvømmede celler, som har værdien 1 og ikke i forvejen var en vandcelle (figur 6.1 (3)). Resultaterne af oversvømmelsesmodellen udarbejdet efter bathtub-metoden fremgår af afsnit 7.1.

6.4 Cellular automata som metode til oversvømmelsesmodelling

6.4.1 Introduktion til cellular automata

Cellular automata betragtes af nogle forskere som en af de vigtigste metoder til rumlig modellering (White et al., 1997). Cellular automata er en diskret dynamisk cellebaseret geosimuleringsmodel (Smith et al., 2007: 390). Geosimuleringsmodeller beskrives af Smith et al. (2007) som mikrosimuleringsmodeller, som kan behandle geografisk-rumlige problemer. Disse problemer er defineret ved at dække et afgrænset område i en dynamisk kontekst (Smith et al., 2007: 390). Helt unikt for cellular automata er, at det er muligt at skabe komplekse strukturer og mønstre ved hjælp af simple regler, som ellers fremstår som uforudsigelige. Med andre ord kan man sige, at der ved en helhed opstår egenskaber, som ikke kan forklares ud fra de enkelte deles egenskaber (Benenson & Torrens, 2004: 18). Et eksempel på dette er en dråbe. Alene har den ikke egenskab til at strømme, men sammensættes flere dråber, opnås denne egenskab.

I slut 1940'erne blev princippet om cellular automata udviklet og introduceret af bl.a. John von Neumann og Stanislaw Ulam. Von Neumann var med i udviklingen af de første computere og står også bag princippet om cellular automata (Langlois, 2008: 278). Stanislaw Ulam gav Von Neumann ideen til at udvikle cellular automata. De var optaget af ideen om at udvikle et matematisk princip



af simple regler til at modellere og styre reproduktion (Benenson & Torrens, 2004: 95).

Cellular automata er forbundet med tunge beregninger, og derfor blev cellular automata først færdigudviklet, da der blev øget tilgængelighed til computere (Smith et al., 2007: 393). I 1970'erne udviklede John Conway *Game of Life*, som byggede på brug af cellular automata. Dette havde til formål at studere rumlige og mikroskopiske populationsdynamikker, og det ses som værende en milepæl for cellular automata. *Game of Life* demonstrerede cellular automata som et tværfagligt værktøj til at repræsentere og studere rumlige og komplekse systemer (Benenson & Torrens: 100f). Endvidere var *Game of Life* det første eksempel på brug af cellular automata i 2D (Smith et al., 2007: 390). I 1979 foreslog Tobler brugen af cellular automata i forbindelse med geografiske analyser, og siden da er det blevet anvendt som et af geografens mange værktøjer (White et. al. 1997). Anvendelsen af cellular automata strækker sig fra teoretisk brug til modellering af konkrete eksempler som byudvikling, arealplanlægning mv. (Benenson & Torrens: 92).

Cellular automatas univers

En automaton er en "processing mechanism", som besidder egenskaber, der kan ændres over tid. Denne ændring forekommer på baggrund af den pågældende automats karakteristika samt regler og udefrakommende inputs (Benenson & Torrens, 2004: 4):

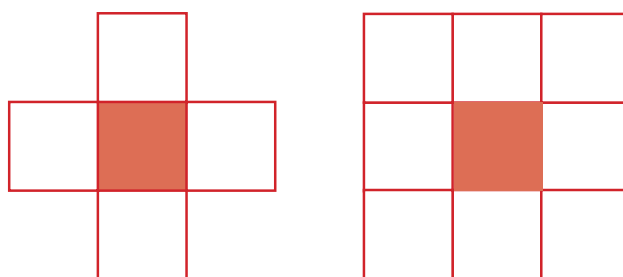
"An automaton is a machine that processes information, proceeding logically, inexorably performing its next action after applying data recieved from outside itself in light of instructions programmed within itself" (Levy, 1992 citeret i Benenson & Torrens, 2004: 4).

Cellular automata henviser til et system af forbundne automatas, som er rumligt arrangerede (Benenson & Torrens, 2004: 5).

I forbindelse med cellular automata kan der tales om cellular automatas univers. Universet omfatter en række forskellige elementer:

State variables: Et sæt af attributter som beskriver en celledes tilstand for et givent tidspunkt. Dette beskrives ved hjælp af et sæt binære værdier eksempelvis 0 eller 1; død eller levende; hvid eller sort.

Spatial framework: Den rumlige udstrækning i et rastergrid, hvor cellular automata eksisterer og kan udvikles. Dette kan dække over hvilken som helst udstrækning, men i geografiske analyser er



Figur 6.3 Oversigt over rook's naboområde (tv.) og queen's naboområde (th.). Et rook's naboområde er begrænset til fire celler, mens et queen's naboområde er udvidet til de otte omgivende celler.

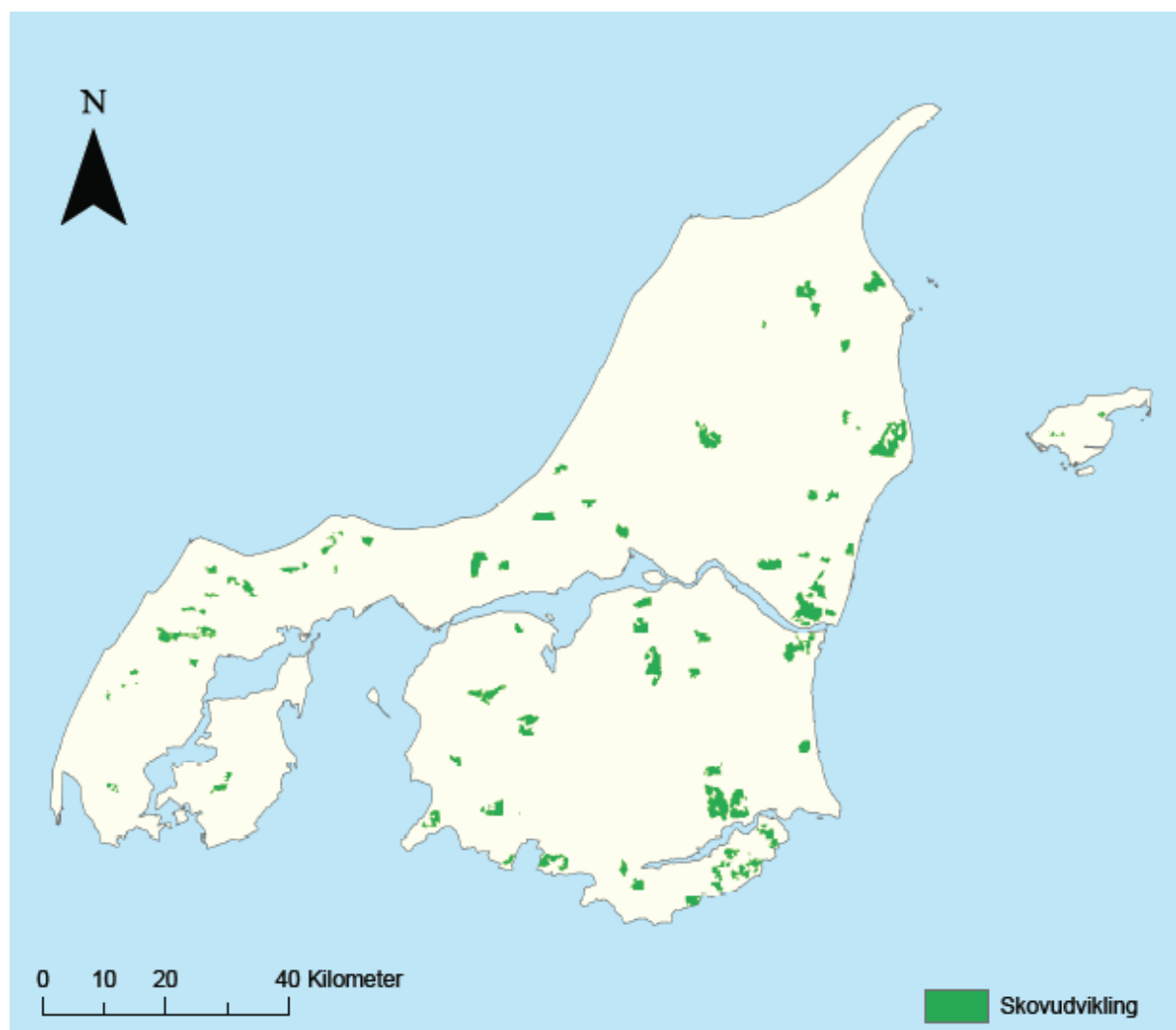
det oftest en 2D-struktur.

Neighbourhood: En celles naboceller. Det er muligt at specificere et naboområde til hver celle, og typisk er naboområderne identiske for alle celler. Naboområdet specificerer, hvor en celle får sit input fra. Der anvendes ofte et "rook's" eller et "queen's" naboområde (se figur 6.3).

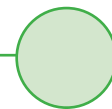
Transition rules: Overgangsregler der definerer, hvordan hver celles tilstand kan ændres over tidsskridt. Overgangsregler indeholder ofte HVIS, SÅ og ELLERS-udtryk, og det er muligt at anvende et specifikt naboområde fx rook's naboområde, som bidrager med input til evalueringen.

Time: Antal gange som overgangsreglerne skal gentages. Gentagelserne defineres ved hjælp af et antal diskrete tidsskridt, hvor tiden kan omtales som antal generationer. (Smith et al, 2007: 392 f.) (White et al. 1997)

Som supplement til ovenstående er det muligt at udvide traditionel cellular automata til begrænset (constraint) cellular automata. Begrænset cellular automata er udviklet med henblik på at udforme



Figur 6.4 Scenarie for skovudvikling modelleret på baggrund af cellular automata - queen's rule (Christiansen og Poulsen, 2010a)



en mere repræsentativ model. Dette sker ved, at der defineres et antal celler, som kan udvikles pr. generation (White et al., 2000).

Et eksempel på, hvordan cellular automata kan anvendes, ses af figur 6.4. Eksemplet viser modellering af et scenarie for skovudvikling i Nordjylland.

I eksemplet i figur 6.4 er der tale om en todimensionel struktur, og tidshorisonten er 25 generationer. I eksemplet anvendes et queen's naboområde. Overgangsreglerne i dette eksempel medfører, at der kun ønskes skovudvikling, *HVIS* en celle ligger i et område, som kommuner har udpeget til skovrejsning, *OG* der ligger en skovcelle i naboområdet, *OG* cellen ikke i forvejen er en skovcelle.

6.4.2 Anvendelse af cellular automata

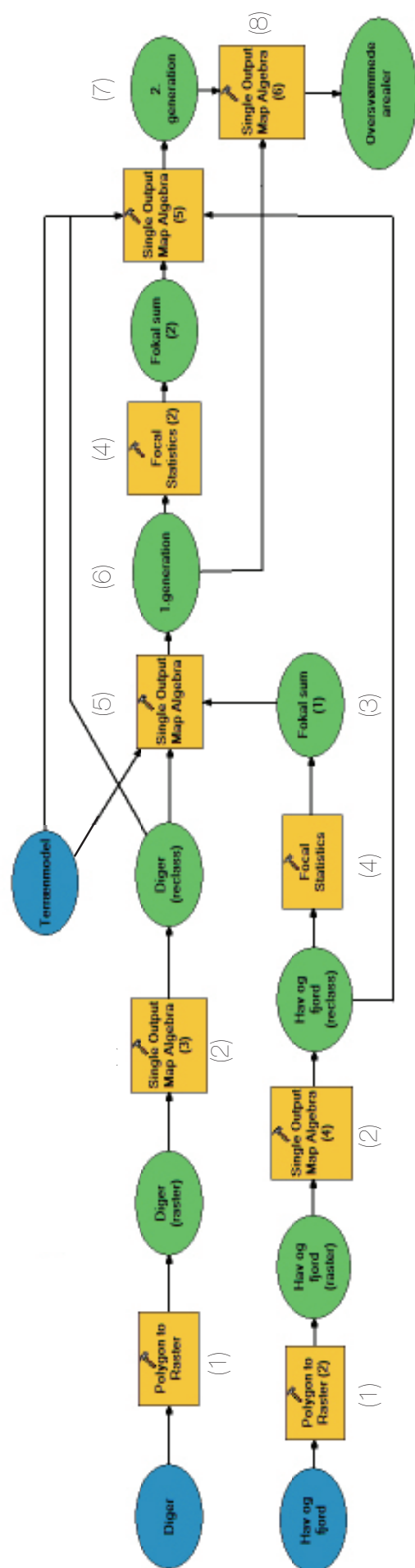
I dette afsnit redegøres for den metodiske brug af cellular automata i forbindelse med oversvømmelsesmodellering samt de betragtninger, som er fælles for de tre scenarier for vandstandsstigninger i Aalborg Kommune (se afsnit 4.2). Cellular automata anvendes som én af de valgte modelleringsmetoder, idet metoden muliggør modellering af komplekse mønstre og strukturer ud fra valgte kriterier. Mønstre og strukturer modelleret vha. cellular automata ville ellers være vanskelige at gennemskue uden denne analyse. Til trods for at cellular automatens univers inddrager tidsperspektivet, kan dette ikke overføres direkte til oversvømmelsesmodellerne, idet én generation ikke kan sammenholdes med ét års vandstandsstigning.

Modellering med cellular automata foregår ved hjælp af Modelbuilder i ArcGIS 9.3. Da der skal foretages mere end 100 gentagende processer, anvendes et Python script til at køre modellen. Python er et programmeringssprog, som kan håndtere de mange gentagende processer til forskel fra ArcGIS 9.3. Som nævnt udarbejdes en GIS-model i Modelbuilder (figur 6.5), og denne eksporteres til Python, hvori modellen køres. Et eksempel på pythonscript for rook's rule ses af bilag 1.

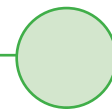
6.4.3. Modellering af oversvømmelsesscenarier

Der udarbejdes to oversvømmelsesmodeller ved hjælp af cellular automata. Modellerne er opbygget omkring et rook's naboområde samt et queen's naboområde for vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m.

Figur 6.5 viser opbygningen af oversvømmelsesmodellerne for cellular automata i Modelbuilder. Da cellular automata er en cellebaseret analysemetode konverteres al vektordata til rasterdata (figur 6.5 (1)). Den Digitale Terrænmodel er som nævnt udarbejdet med en cellestørrelse på 1,6 m x 1,6 m. Cellular automata modellen er forsøgt opbygget på baggrund af data med denne cellestørrelse, men dette medførte en beregningstung og tidskrævende model, som ikke kunne anvendes med den computerkraft, der var til rådighed. Derfor blev cellestørrelsen ændret til 5 m x 5 m, hvilket stadig



Figur 6.5 Model udarbejdet i Modelbuilder vha. cellular automata med rook's rule og queen's rule. I værktøjet Focal Statistics vælges naboområdet, alt efter om modellen er baseret på rook's rule eller queen's rule.



medfører en høj detaljeringsgrad. Single Output Map Algebra fra Spatial Analyst anvendes til at reklassificere forskellige datasæt (figur 6.5 (2)).

Data med information om diger reklassificeres således, at celler med diger værdisættes til 1, og alle andre celler tildeles værdien 0. Data med hav- og fjordområder reklassificeres således, at hav- og fjordceller tildeles værdien 1, og alle andre celler får værdien 0.

I den ene model beregnes potentielle oversvømmelsesområder ud fra rook's rule, og i den anden model anvendes queen's rule (se figur 6.3). Det anvendte naboområde defineres i værktøjet Focal Statistics (figur 6.5 (4)).

En kernelfil anvendes til at definere naboområdet, og kernelfilen til de to naboområder ses af figur 6.6.

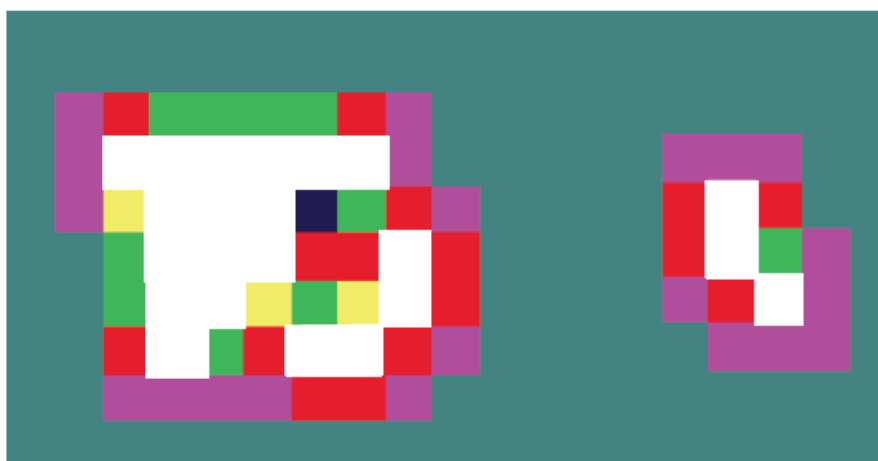
Focal Statistics fra Spatial Analyst anvendes til at beregne den fokale sum, hvilket vil sige den samlede sum af værdierne for en given celledes naboceller (figur 6.5 (3)). Figur 6.7 viser to eksempler på beregninger af den fokale sum. Her er queen's rule anvendt til beregning af et naboområdes værdi. Eksemplet til venstre viser et område med højere fokale summer end eksemplet til højre. Dette begrundes i, at objektet til venstre er større, og dermed bidrager flere celler med en værdi til den fokale sum.

Den fokale sum beregnes i første generation ud fra datasættet over hav- og fjordområder. Derved vil vandstandsstigning udvikles ud fra disse "vandområder". De efterfølgende beregninger af den fokale sum beregnes på baggrund af den seneste generation af oversvømmelse (figur 6.5 (4)).

Kernelfil for rook's rule:		
0	1	0
1	0	1
0	1	0
Kernelfil for queen's rule:		
1	1	1
1	0	1
1	1	1

Figur 6.6 Kernelfiler for rook's og queen's rule.

Fokale sum



Figur 6.7 Eksempler på celleværdier ved udregning af den fokale sum med queen's rule. Hvide celler bidrager med værdien 1 til den fokale sum (Christiansen og Poulsen, 2010b).

Til udviklingen af oversvømmelse anvendes følgende Single Output Map Algebra-udtryk for de tre scenarier for vandstandsstigning:

0,5 m: $Con(hav) == 0 \ \& \ (dige) == 0 \ \& \ (terrænmodel) < 0.5 \ \& \ FocalSum \geq 1, 1, 0$

1 m: $Con(hav) == 0 \ \& \ (dige) == 0 \ \& \ (terrænmodel) < 1.0 \ \& \ FocalSum \geq 1, 1, 0$

1,5 m: $Con(hav) == 0 \ \& \ (dige) == 0 \ \& \ (terrænmodel) < 1.5 \ \& \ FocalSum \geq 1, 1, 0$

”&” angiver en OG-forespørgsel, dvs. at et andet forhold skal være opfyldt, for at en celle kan udvikles og få værdien 1. Udtrykket ved 0,5 m vandstandsstigning skal læses således, at *HVIS* data med hav og fjord har værdien 0 (dvs. at vandstandsstigning ikke sker i områder, som allerede er oversvømmede), *OG* dige-data er lig med 0 (dvs. områder uden diger), *OG* terrænmodellen er under 0,5 m (dvs. højdekoten er under 0,5 m over havets overflade), *OG* den fokale sum af hav- og fjorddata er større eller lig med 1 (dvs. at en nabocelle er vand), *SÅ* kan en celle oversvømmes (figur 6.5 (5)). Ved udregning af anden generation og fremefter erstattes hav- og fjorddata med den seneste generation af oversvømmelse (figur 6.5 (6)(7)). Når alle celler, som opfylder overgangsreglerne, er udviklet, sammenlægges alle oversvømmelsesgenerationerne ((figur 6.5 (6)(7))) vha. Single Output Map Algebra ((figur 6.5 (8))).

Resultaterne af modelleringen af de tre scenarier for vandstandsstigning præsenteres i afsnit 7.2 og 7.3.

6.5 Cost distance som metode til oversvømmelsesmodellering

6.5.1 Introduktion til cost distance

Cost distance i ArcGIS kan anvendes til at modellere, hvilke områder der kan være i fare for oversvømmelse ved forskellige vandstandsstigninger. Cost distance er en metode til undersøgelse af, hvor store omkostninger der er ved at bevæge sig gennem de enkelte celler i et rasterdatasæt (Chang et al., 2011). Det vil sige, at det undersøges, hvor stor en friktion der er i det landskab, som datasættet repræsenterer. Når cost distance anvendes som metode, findes den mest optimale rute fra en celle til en anden celle. Det vil sige, at det beregnes, hvilken rute der skal vælges, for at de samlede omkostninger ved at bevæge sig fra den ene celle til den anden celle bliver mindst (Greenberg et al., 2011). Omkostningerne kan beregnes i tid, penge eller lignende (Balstrøm et al., 2006).

6.5.2 Anvendelse af cost distance-metoden

Ved udførelse af en cost distance-analyse skal der som det første udarbejdes et omkostningsgrid (cost grid), som tildeler forskellige værdier til de enkelte celler i et rasterdatasæt afhængigt af friktionen i de enkelte celler - det vil sige afhængigt af de omkostninger, der er ved at passere den enkelte celle. Den enkelte celledes værdi er således en repræsentation af de omkostninger pr. enhed afstand (cost per unit distance), der er ved at bevæge sig gennem cellen. Da den afstandsenhed, der anvendes, er lig med celledens størrelse, svarer cellens værdi til de omkostninger, der er i en given celle ved at bevæge sig den afstand, som svarer til cellens størrelse (Chang et al., 2011). Jo højere værdi en celle har, desto større er omkostningerne ved at passere cellen. Der kan indføres barrierer i omkostningsgriddet, som er celler, der ikke kan passeres. I cost distance-funktionen anvendes et queen's naboområde, og den mindst omkostningsfyldte rute kan således udelukkende udvikles fra én celle til dens otte naboceller. Det vil sige, at ruten skal være sammenhængende (Greenberg et al., 2011). Der kan opstilles forskellige ligninger for omkostningerne ved at bevæge sig gennem en celle. Omkostninger ved at bevæge sig fra en celle til en af de fire celler, som er direkte forbundet med cellen (rook's naboområde), er:

$$L_1 = (C_1 + C_2) / 2$$

Hvor C_1 er omkostningerne i celle 1, C_2 er omkostningerne i celle 2, og L_1 er de totale omkostninger ved at bevæge sig mellem celle 1 og celle 2. Omkostningerne ved at bevæge sig fra en celle til en af de fire diagonale naboceller er:

$$L_1 = (C_1 + C_2) / \sqrt{2}$$

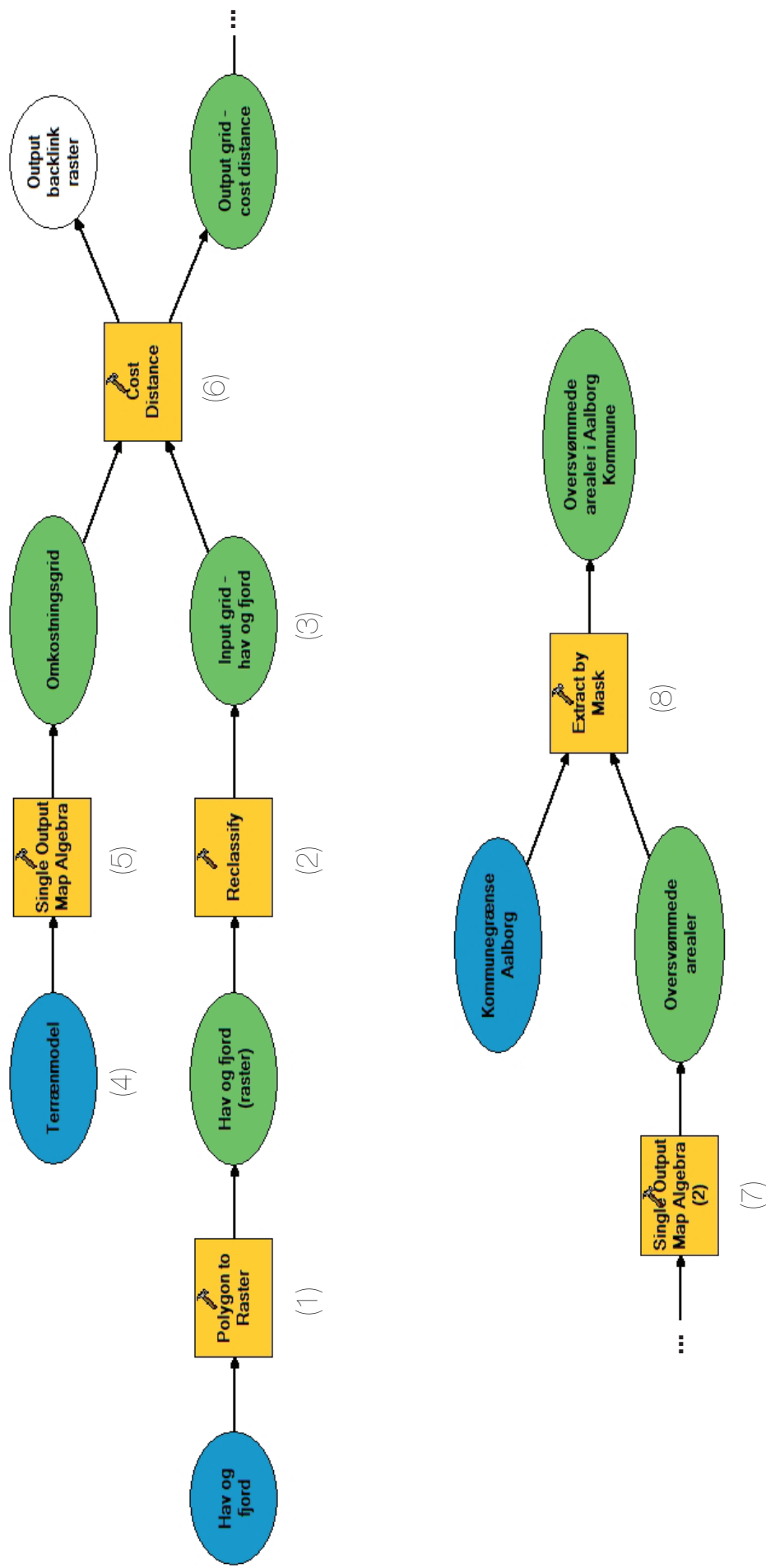
De samlede omkostninger er:

$$AC = L_1 + L_2 = L_1 + (C_1 + C_2) / 2$$

Hvor C_2 er omkostningerne i celle 2, C_3 er omkostningerne i celle 3, og AC er de samlede omkostninger ved at bevæge sig fra celle 1 til celle 3, for celler der er direkte forbundet (dvs. ikke diagonalt forbundet). Hvis cellerne er diagonalt forbundet, vil omkostningerne ved at bevæge sig gennem cellerne være:

$$AC = L_1 + L_2 = L_1 + (C_2 + C_3) / \sqrt{2}$$

(Chang et al., 2011).



Figur 6.8 Cost distance-model illustreret vha. Modelbuilder

6.5.3 Modellering af oversvømmelsesscenarier

En cost distance-analyse kan som ovenfor nævnt anvendes til at modellere, hvilke områder der kan være i fare for oversvømmelse ved forskellige vandstandsstigninger. Formålet er ikke, som det ofte er, når en cost distance-analyse anvendes, at finde den mindst omkostningsfyldte rute fra en celle til en anden i forbindelse med ruteplanlægning, men derimod at undersøge en udvikling i antallet af celler der kan blive udsat for oversvømmelse. De egenskaber i en cost distance-analyse, at nogle celler vil indgå i den mindst omkostningsfyldte rute, mens andre celler ikke vil, og at cellerne skal være sammenhængende for at kunne indgå i den mindst omkostningsfyldte rute, gør en cost distance-analyse til et anvendeligt værktøj i forbindelse med oversvømmelsesmodellering.

Cost distance-metoden anvendes ved alle tre scenarier for vandstandsstigning, og analysen udføres i tre trin. Trin 1 består i at udarbejde et input grid, hvor det angives, hvilke celler der danner udgangspunkt for oversvømmelsen. I trin 2 udarbejdes et omkostningsgrid, der som ovenfor nævnt angiver omkostningerne ved at passere de enkelte celler. Endelig udføres trin 3, som består i selve cost distance-analysen. De tre trin i analysen udføres ved hjælp af Modelbuilder i ArcGIS, og nedenfor gennemgås disse trin. En oversigt over udarbejdelsen af cost distance-analysen ses af figur 6.8.

Input grid

Input griddet er det samme i alle tre scenarier, da udgangspunktet i alle tilfældene er hav og fjord. Til input griddet anvendes fjord- og kystdata (jf. afsnit 6.2). Vektordataet konverteres til raster med en cellestørrelse på 1,6 m (figur 6.8 (1)), som derefter reklassificeres (figur 6.8 (2)). Datasættet reklassificeres således, at hav- eller fjordceller får værdien 1, da disse celler er udgangspunktet for cost distance-analysen og udviklingen af oversvømmelse. Eftersom datasættet udelukkende skal angive de celler, som er udgangspunktet for analysen, tildeles de celler, som ikke er hav- eller fjordceller, værdien NODATA, og der sker således ikke en udvikling ud fra sådanne celler. Således er input griddet færdiggjort til at kunne indgå i cost distance-analysen (figur 6.8 (3)).

Omkostningsgrid

Omkostningsgriddet skal, som det fremgår af det ovenstående, angive, hvor store omkostningerne er ved at bevæge sig gennem de enkelte celler. Til omkostningsgriddet anvendes Den Digitale Terænrænmodel med en cellestørrelse på 1,6 m (se afsnit 6.2.1) (se figur 6.8 (4)). Princippet for analysen er, at de celler, som har værdien 0, kan oversvømmes, mens de resterende celler har værdien 1, og derved fungerer som barrierer der ikke kan oversvømmes. Ved hjælp af funktionen Single Output Map Algebra udvælges de celler, hvis højde er under den pågældende vandstandsstigning (se figur 6.8 (5)).

Udtrykkene for de tre scenarier lyder som følger:

0,5 m:

Con(terrænmodel < 0.5, 0, 1)

1,0 m:

Con (terrænmodel < 1, 0, 1)

1,5 m:

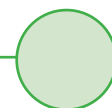
Con (terrænmodel < 1.5, 0, 1)

Ved 0,5 m kan en celle tildeles værdien 0, *HVIS* højdekoten er under 0,5 *ELLERS* tildeles den værdien 1.

Cost distance-analyse

Det udarbejdede input grid og omkostningsgrid indgår i cost distance-analysen (se figur 6.8 (6)). Eftersom alle hav- og fjordceller i input griddet har værdien 1, mens alle andre celler, som nævnt, har værdien NODATA, vil oversvømmelsen begynde ud fra hav- og fjordcellerne og simulere vandets udbredelse. Da oversvømmelsen vil bevæge sig gennem celler med de laveste omkostninger og undlade de celler, som udgør en barriere for oversvømmelse, vil vandet brede sig ud i alle de celler, som ligger under den højde, der er defineret i omkostningsgriddet. Det vil sige, at vandet vil brede sig fra hav- og fjordceller ud i de celler, som har en 0-værdi. Celler, som har en højde over den, der er defineret i omkostningsgriddet, vil således ikke blive påvirket af vandstandsstigningerne. Alle oversvømmede celler udvælges ved hjælp af Single Output Map Algebra (se figur 6.8 (7)), og Extract by mask anvendes til at udvælge alle oversvømmede celler i Aalborg Kommune (se figur 6.8 (8)). Efter at have gentaget processen for alle tre scenarier er der udarbejdet tre rasterlag, som viser de områder, der er i fare for oversvømmelse ved en vandstandsstigning på 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m.

Resultaterne af oversvømmelsesmodelleringen vha. cost distance-metoden fremgår af det følgende kapitel.

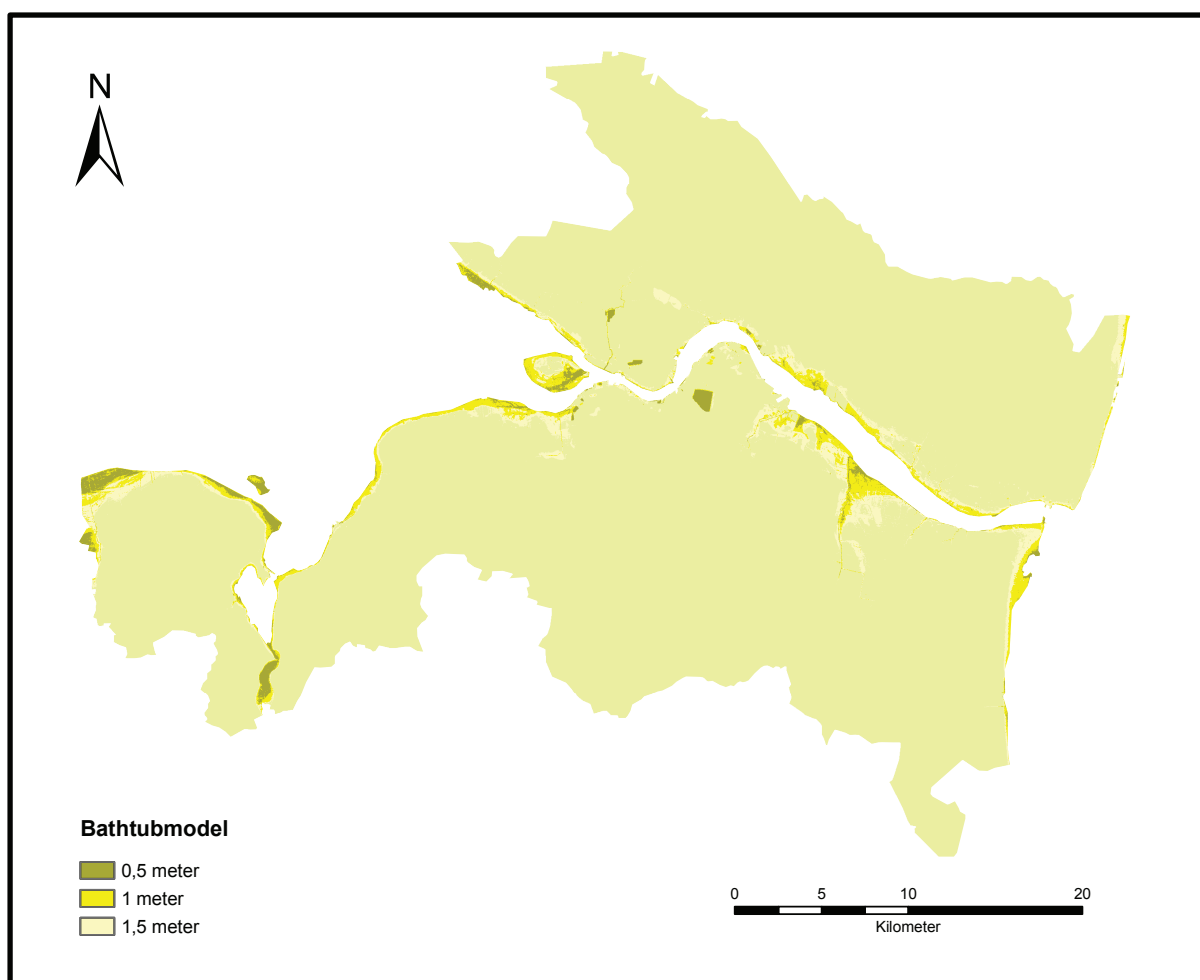


7. Resultater af oversvømmelsesmodellering

I dette kapitel præsenteres de resultater, som er udarbejdet på baggrund af de i kapitel 6 beskrevne oversvømmelsesmodeller. Resultaterne præsenteres ud fra de fire anvendte modelleringsmetoder – bathtub, cellular automata med rook's og queen's rule samt cost distance, og består af grafiske kort, som illustrerer de potentielle oversvømmelsesområder samt statistiske oplysninger, som redegør for størrelsen af de arealer, som er i fare for oversvømmelse.

7.1 Bathtub

Figur 7.1 viser potentielle oversvømmelsesområder ved vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m i Aalborg Kommune beregnet på baggrund af bathtub-metoden. Tabel 7.1 viser, at en vandstandsstigning på 0,5 m oversvømmer 1366,2 ha af Aalborg Kommunes arealer, hvilket svarer til 1,2 % af kommunens samlede arealer. Ved 1,0 m vandstandsstigning vil de områder, som er i



Figur 7.1 Potentielle oversvømmelsesområder ved 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m vandstandsstigning beregnet ud fra bathtub-metoden. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).

Tabel 7.1 Statistiske oplysninger for vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m ved brug af bathtub-metoden.

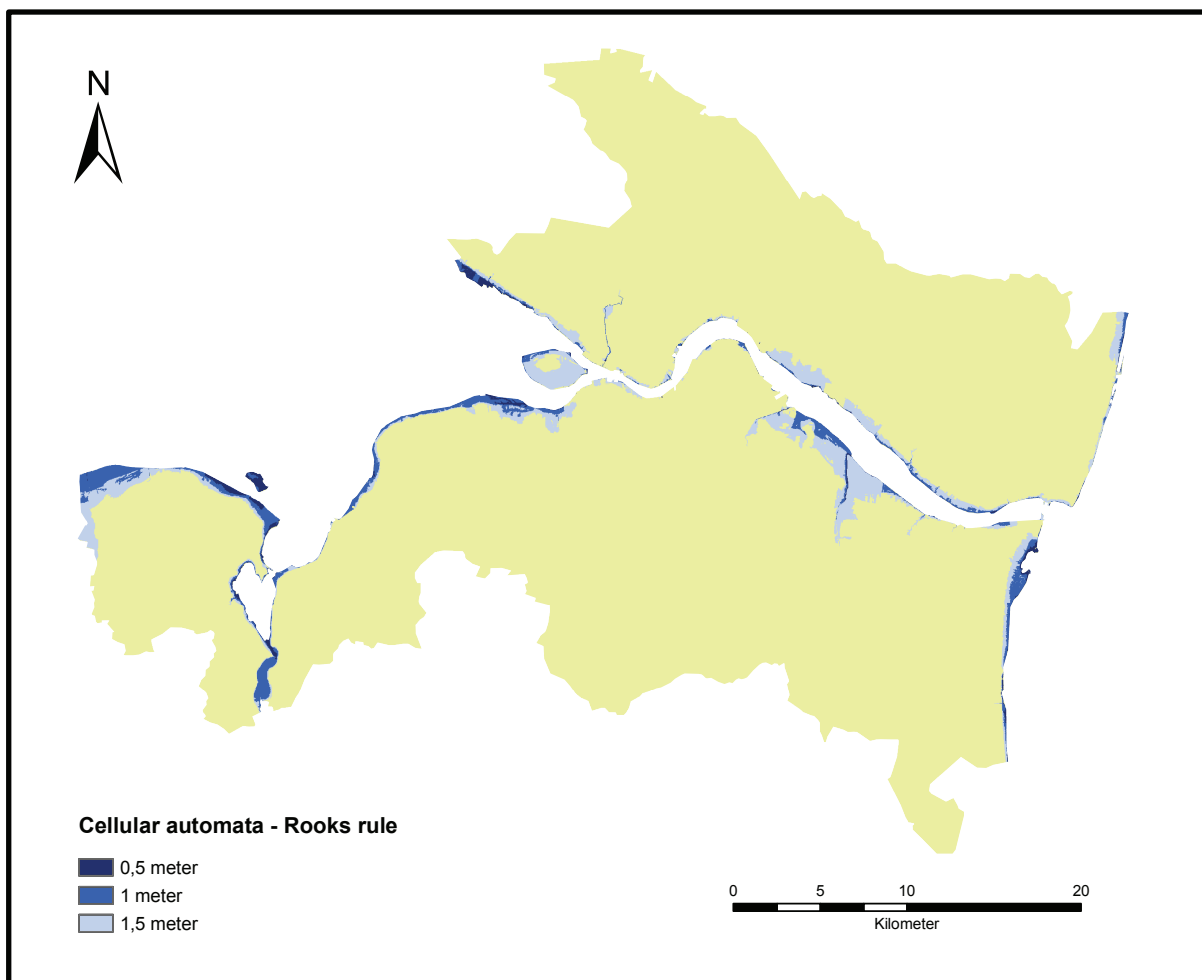
Bathtub-metode			
Vandstandsstigning:	0,5 m	1,0 m	1,5 m
Antal celler:			
Oversvømmede områder:	5.336.865	15.599.252	29.225.995
Områder som ikke oversvømmes:	438.687.762	428.425.375	414.798.632
Antal hektar:			
Oversvømmede områder:	1.366,2	3.993,4	7.481,9
Områder som ikke oversvømmes:	112.304,1	109.676,9	106.188,4
Procentvis fordeling i forhold til Aalborg Kommunes arealer:			
Oversvømmede områder:	1,2	3,5	6,6
Områder som ikke oversvømmes:	98,8	96,5	93,4

fare for oversvømmelse, udgøre 3993,4 ha svarende til 3,5 % af kommunens arealer. Ved 1,5 m vandstandsstigning oversvømmes 7481,9 ha svarende til 6,6 % af arealerne i Aalborg Kommune (se tabel 7.1). Ved bathtub-metoden er der mulighed for, at de oversvømmede landområder kan ligge isoleret fra havet eller fjorden. Sådanne områder ses flere steder på figur 7.1.

7.2 Cellular automata – rook's rule

Figur 7.2 viser vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m modelleret ved hjælp af cellular automata, hvor rook's rule er anvendt.

Ved anvendelse af cellular automata med rook's rule er der kun mulighed for oversvømmelse af områder, som grænser op til fjord, hav eller områder, som er blevet oversvømmet. Ved 0,5 m vandstandsstigning kan der potentielt oversvømmes 367,8 ha svarende til 0,3 % af Aalborg Kommunes arealer. Ved 1,0 m vandstandsstigning udgør de potentielle oversvømmelsesområder 2406,9 ha svarende til 2,1 % af kommunens arealer. Det potentielle oversvømmelsesområde ved 1,5 m vandstandsstigning dækker 6206,0 ha svarende til 5,5 % af Aalborg Kommunes arealer (se tabel 7.2).



Figur 7.2 Potentielle oversvømmelsesområder ved 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m vandstandsstigning beregnet ud fra cellular automata, hvor rook's rule er anvendt. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).

Tabel 7.2 Statistiske oplysninger for vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m ved brug af cellular automata med rook's rule.

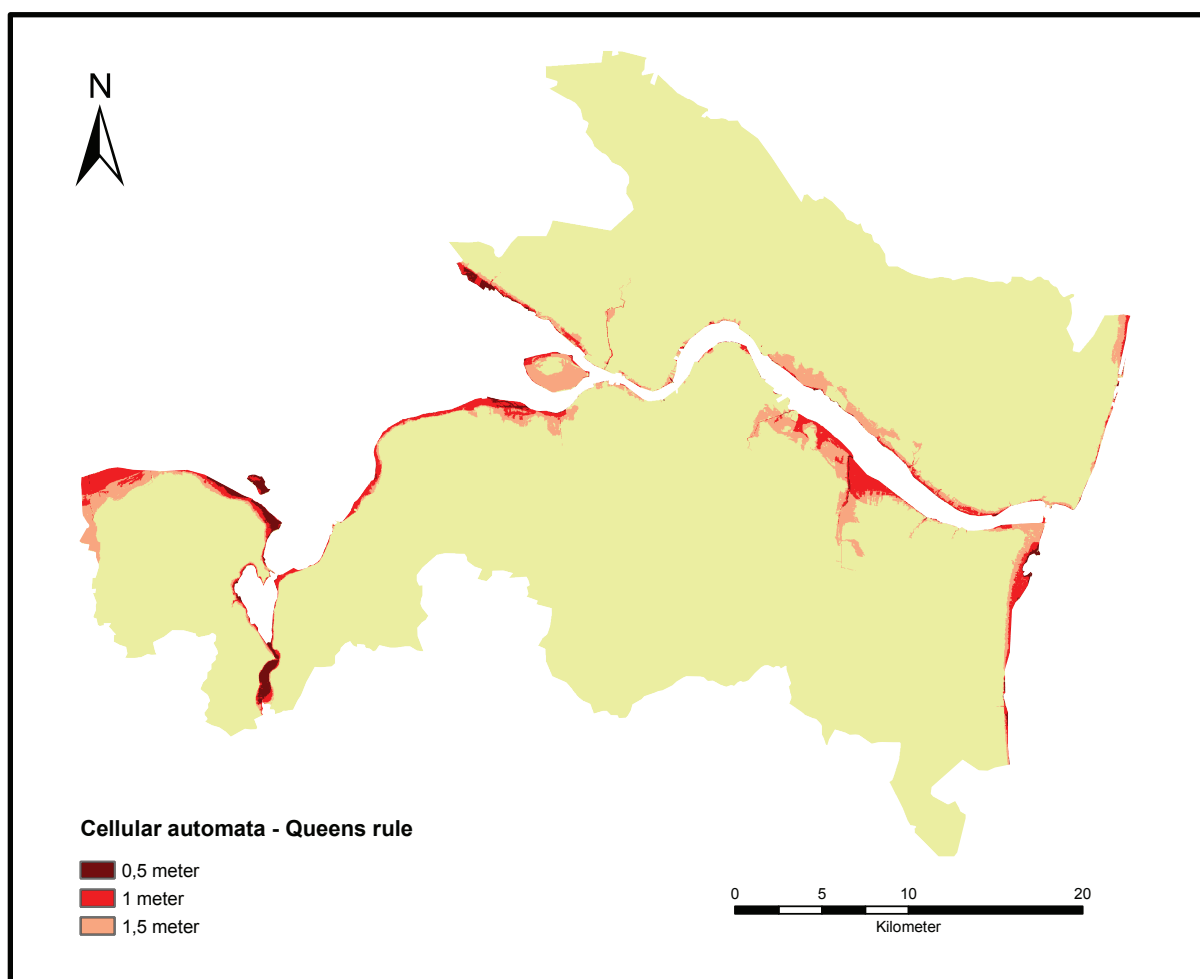
Cellular automata – rook's rule			
Vandstandsstigning:	0,5 m	1,0 m	1,5 m
Antal celler:			
Oversvømmede områder:	147.114	962.750	2.482.409
Områder som ikke oversvømmes:	45.320.925	44.505.289	42.985.630
Antal hektar:			
Oversvømmede områder:	367,8	2406,9	6206,0
Områder som ikke oversvømmes:	113.302,3	111.263,2	107.464,1
Procentvis fordeling i forhold til Aalborg Kommunes arealer:			
Oversvømmede områder:	0,3	2,1	5,5
Områder som ikke oversvømmes:	99,7	97,7	94,5

7.3 Cellular automata – queen's rule

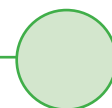
Figur 7.3 viser potentielle oversvømmelsesområder ved 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m vandstandsstigning modelleret ud fra cellular automata på baggrund af queen's rule.

Ved anvendelse af queen's rule er der udelukkende mulighed for oversvømmelse i områder, som grænser op til fjord, kyst eller områder, som er blevet oversvømmet.

Ved en vandstandsstigning på 0,5 m vil de potentielle oversvømmelsesområder udgøre et areal på 562,8 ha svarende til 0,5 % af Aalborg Kommunes arealer. Ved 1,0 m vandstandsstigning er 2762,6 ha svarende til 2,4 % af kommunens arealer i fare for oversvømmelse. Det potentielt oversvømmede areal dækker ved 1,5 m vandstandsstigning 6535,7 ha svarende til 5,7 % af Aalborg Kommunes arealer (se tabel 7.3).



Figur 7.3 Potentielle oversvømmelsesområder ved 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m vandstandsstigning beregnet ud fra cellular automata, hvor queen's rule er anvendt. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).



Tabel 7.3 Statistiske oplysninger for vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m ved brug af cellular automata og queen's rule.

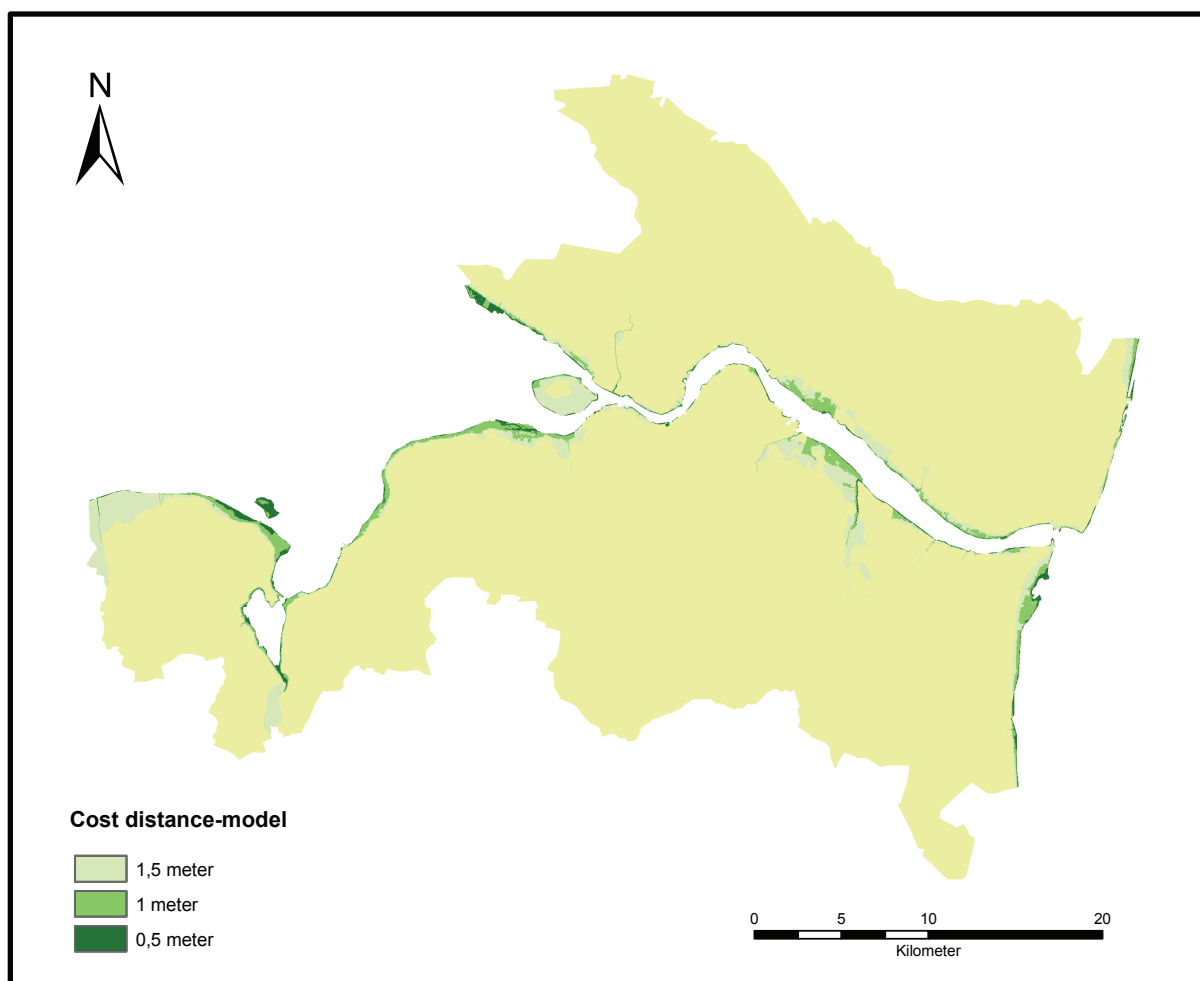
Cellular automata – queen's rule			
Vandstandsstigning:	0,5 m	1,0 m	1,5 m
Antal celler:			
Oversvømmede områder:	225127	1.105.054	2.614.287
Områder som ikke oversvømmes:	452.42.912	44.362.985	42.853.752
Antal hektar:			
Oversvømmede områder:	562,8	2.762,6	6.535,7
Områder som ikke oversvømmes:	113.107,3	110.907,5	107.134,4
Procentvis fordeling i forhold til Aalborg Kommunes arealer:			
Oversvømmede områder:	562,8	2.762,6	6.535,7
Områder som ikke oversvømmes:	113.107,3	110.907,5	107.134,4

7.4 Cost distance

Figur 7.4 viser potentielt oversvømmede områder ved 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m vandstandsstigning udregnet på baggrund af cost distance-metoden. Ved anvendelse af cost distance-metoden vil de potentielt oversvømmede områder ligge i forbindelse med kyst, hav eller oversvømmede områder. Ved 0,5 m vandstandsstigning kan et areal på 496,7 ha svarende til 0,4 % af Aalborg Kommune oversvømmes. Ved 1,0 m vandstandsstigning kan et areal på 2214,8 ha oversvømmes, svarende til 2 % af

Tabel 7.4: Statistiske oplysninger for vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m ved brug af cost distance

Cellular automata – cost distance			
Vandstandsstigning:	0,5 m	1,0 m	1,5 m
Antal celler:			
Oversvømmede områder:	1.940.155	8.651.665	24.000.307
Områder som ikke oversvømmes:	442.084.352	431.491.699	416.143.057
Antal hektar:			
Oversvømmede områder:	496,7	2214,8	6144,1
Områder som ikke oversvømmes:	113.173,6	110.461,9	106.532,6
Procentvis fordeling i forhold til Aalborg Kommunes arealer:			
Oversvømmede områder:	0,4	2	5,5
Områder som ikke oversvømmes:	99,6	98	94,5



Figur 7.4: Potentielle oversvømmelsesområder ved 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m vandstandsstigning beregnet ud fra cost distance. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).

Aalborg Kommunes arealer, og ved 1,5 m vandstandsstigning udgør arealet 6144,1 ha svarende til 5,5 % af kommunens arealer (tabel 7.4).

I dette kapitel er resultaterne af de anvendte modelleringsmetoder præsenteret. I det følgende kapitel vil der være en diskussion og vurdering af de anvendte metoder.

8. Vurdering af resultater, metoder og planlægningsværktøjer

I dette kapitel sammenholdes og diskuteres resultaterne (jf. kapitel 7), som er opnået vha. hjælp af de fire metoder, der er gennemgået i kapitel 6. De forskellige modelleringsmetoder vurderes, og styrker og svagheder ved de enkelte metoder opstilles. Der gøres opmærksom på, at det kan være vanskeligt at foretage en fuldstændig objektiv vurdering af metoderne. Udpegning af områder, der er i fare for oversvømmelse som følge af klimaændringer, er en væsentlig opgave for landets kommuner, og det er vigtigt for at kunne tilpasse samfundet til de vandstandsstigninger, som vil forekomme. I den forbindelse er det væsentligt at gøre sig overvejelser om de forskellige modelleringsmetoder, som kan anvendes til udpegning af de potentielle oversvømmelsesområder. Modeller er som nævnt i afsnit 4.4 repræsentationer af virkeligheden, og den anvendte metode kan have betydning for resultaterne, som kan vise forskellige udsnit af virkeligheden. I forbindelse med kommuneplanlægning er det væsentligt, at modellerne bliver så virkelighedstro som muligt.

8.1 Diskussion af oversvømmelsesmodellernes resultater

Der er anvendt fire forskellige metoder til modellering af potentielle oversvømmelsesområder i tre forskellige scenarier for vandstandsstigninger. Tabel 8.1 viser en sammenligning af størrelsen af de potentielt oversvømmede områder.

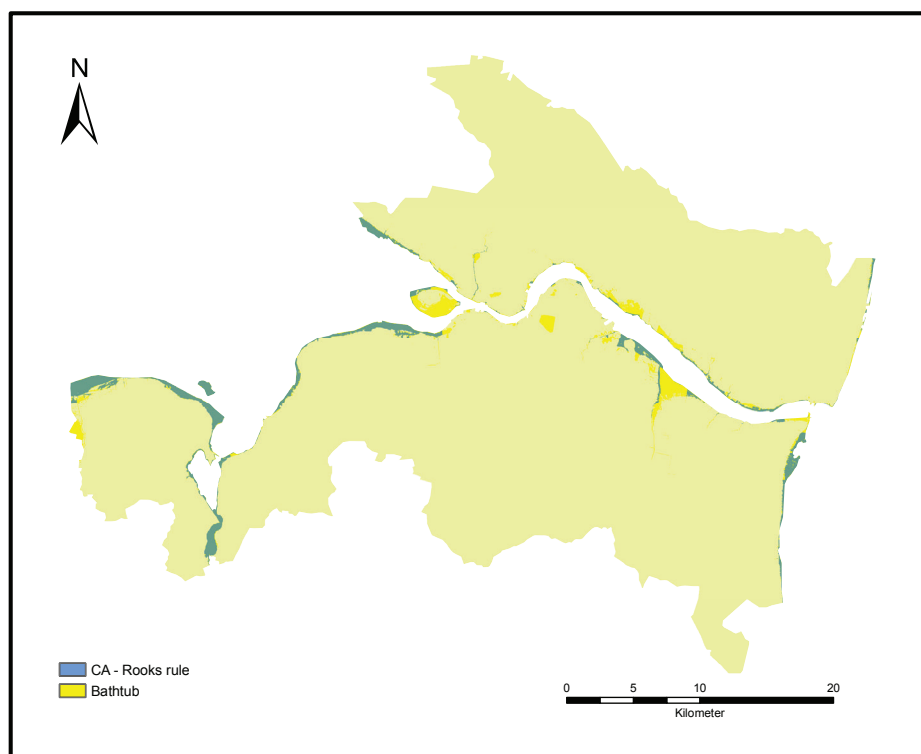
Det fremgår således af resultaterne, at bathtub-metoden er den metode, der oversvømmer det største areal. Dette kan forklares ved, at det eneste anvendte kriterium i modellen er, at højdekoten skal være under den pågældende vandstandsstigning (0,5 m, 1,0 m og 1,5 m). Det er således forståeligt, at det oversvømmede areal vil være mindre, når der tilføjes yderligere kriterier for, hvornår områder oversvømmes, som tilfældet er ved cellular automata og cost distance. En sammenligning af

Tabel 8.1 Sammenligning af størrelsen af de potentielle oversvømmelsesområder ved de anvendte modelleringsmetoder og vandstandsstigninger på hhv. 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m.

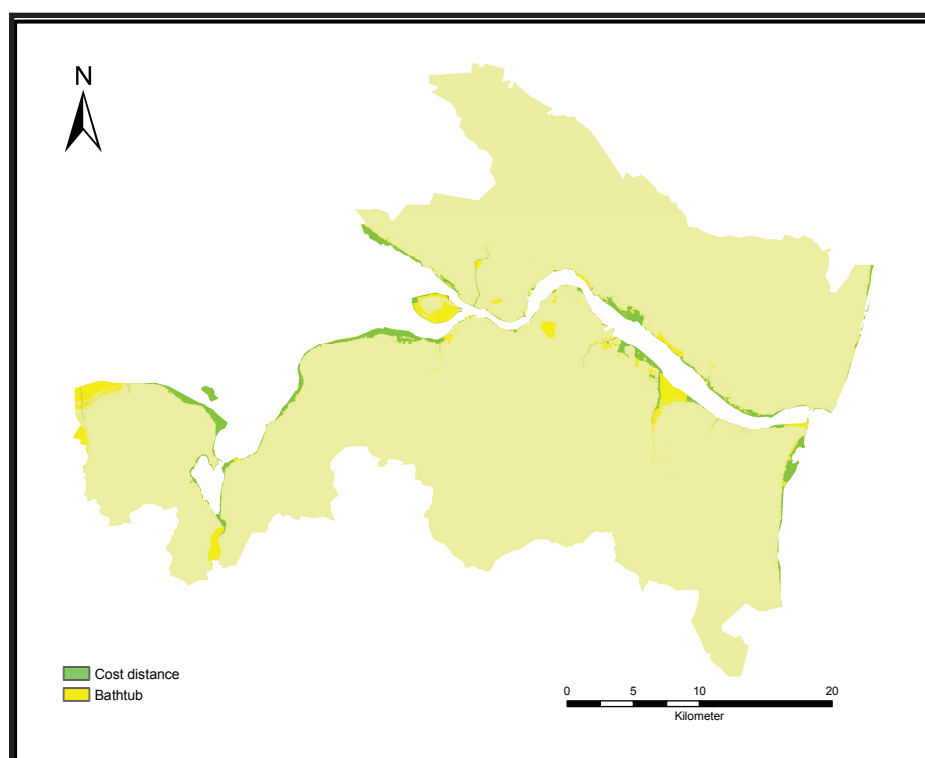
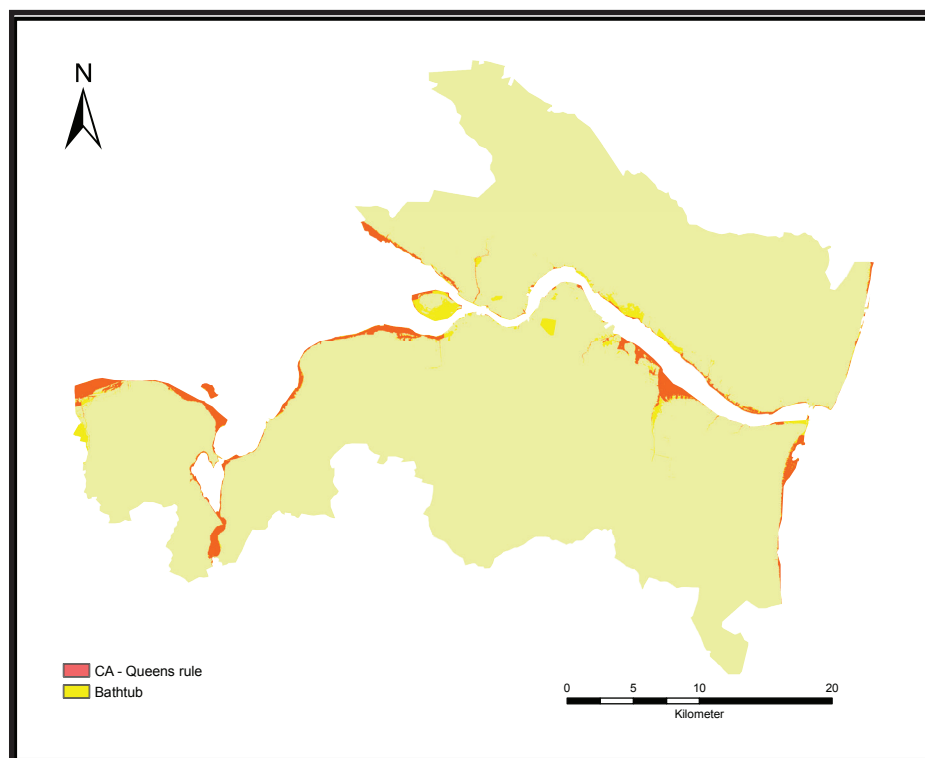
Oversvømmelsesmodel:	Oversvømmet areal:
Bathtub:	
0,5 meter	1366,2 ha
1,0 meter	3993,4 ha
1,5 meter	7481,9 ha
Cellular automata – rook's rule:	
0,5 meter	367,8 ha
1,0 meter	2406,9 ha
1,5 meter	6206,0 ha
Cellular automata – queen's rule:	
0,5 meter	562,8 ha
1,0 meter	2762,6 ha
1,5 meter	6535,7 ha
Cost distance:	
0,5 meter	467,7 ha
1,0 meter	2214,8 ha
1,5 meter	6144,1 ha

oversvømmede arealer som følge af bathtub-metoden med de tre andre metoder for en vandstandsstigning på 1,0 m ses af figurene 8.1, 8.2 og 8.3.

Modellering med Queen's rule oversvømmer det næststørste areal ved alle tre vandstandsstigninger (tabel 8.1).

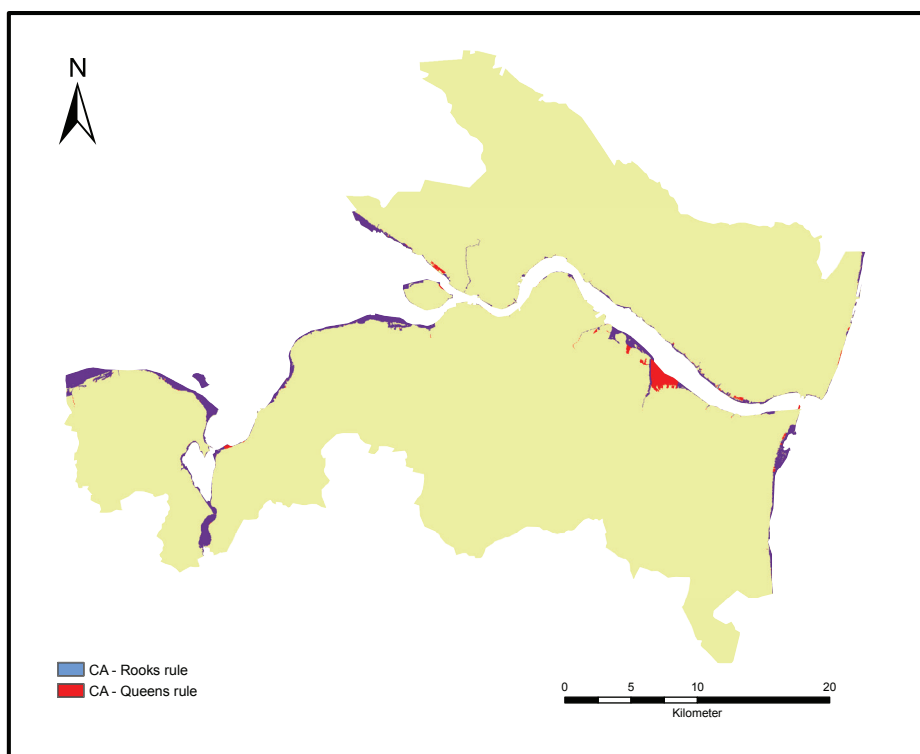


Figur 8.1 Sammenligning af bathtub-metoden med cellular automata (CA) – rook's rule ved en vandstandsstigning på 1,0 m. Farven der afviger fra signaturforklaringen repræsenterer overlap mellem rook's rule og bathtub. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).



Figur 8.2 (ø.) og 8.3 (n.) Sammenligning af bathtub-metoden med hhv. cellular automata (CA) – queen's rule (ø.) og cost distance (n.) ved en vandstandsstigning på 1,0 m. Farven der afviger fra signaturforklaringen repræsenterer overlap mellem queen's rule og bathtub samt cost distance og bathtub. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).

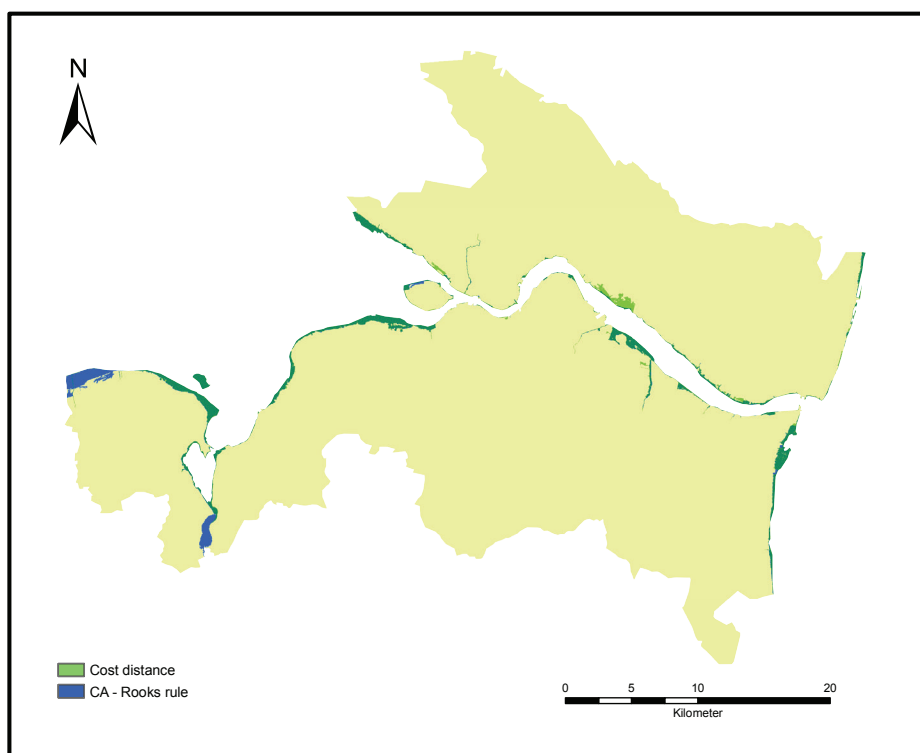
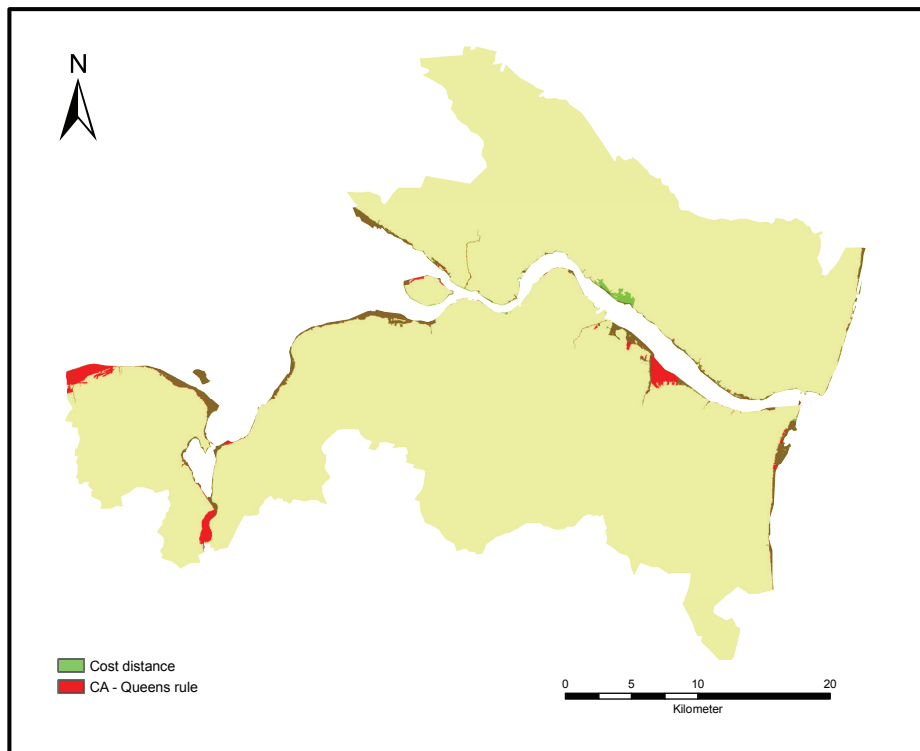
En sammenligning af queen's rule med rook's rule og cost distance ved en vandstandsstigning på 1,0 m ses af figur 8.4 og 8.5.



Figur 8.4 Sammenligning af cellular automata (CA) – rook's rule og queen's ved en vandstandsstigning på 1,0 m. Farven der afviger fra signaturforklaringen repræsenterer overlap mellem rook's rule og queen's rule. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).

Anvendelse af rook's rule oversvømmer det mindste område ved en vandstandsstigning på 0,5 m, mens det ved en vandstandsstigning på 1,0 m og 1,5 m er cost distance, som oversvømmer det mindste areal (se tabel 8.1). En sammenligning af rook's rule og cost distance ses af figur 8.6.

Forskellen i de resultater, der er opnået ved anvendelse af cellular automata og cost distance, kan, som det vil fremgå af afsnit 8.2, bl.a. skyldes cellestørrelse og anvendte naboområder.



Figur 8.5 (ø.) og 8.6 (n.) Sammenligning af cellular automata (CA) – queen’s rule og cost distance (ø.) samt rook’s rule og cost distance (n.) ved en vandstandsstigning på 1,0 m. Farven der afviger fra signaturforklaringen repræsenterer overlap mellem cost distance og queen’s rule samt cost distance og rook’s rule. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).

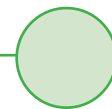
8.2 Evaluering af modelleringsmetoder

I denne rapport er der anvendt fire forskellige metoder til modellering af oversvømmelse. Disse er anvendt for at kunne vurdere metodernes anvendelighed i forbindelse med udpegning af områder, der er i risiko for oversvømmelse som følge af klimaændringer. Aalborg Kommune har som nævnt i kapitel 2.2 fået konsulentvirksomheden COWI til at udarbejde en screening af oversvømmelser. Det kan være interessant at undersøge, hvorvidt nogen af de i denne rapport testede metoder kan anvendes af kommunerne selv, så de i højere grad kan udarbejde, teste og vurdere oversvømmelsesmodeller. I den forbindelse kan der opstilles kriterier for, hvor egnet forskellige metoder er til anvendelse i kommuners planlægning. En af årsagerne til, at kommuner vælger at få konsulentvirksomheder til at udarbejde GIS-modeller, kan være, at medarbejderne hos kommunerne ikke har de fornødne kompetencer til selv at udarbejde modellerne, og det kan desuden kræve store ressourcer, hvis det er komplicerede modeller, som skal udarbejdes – ressourcer, som kommunerne i mange tilfælde ikke har. Derfor vurderes modellerne og metoderne i denne rapport bl.a. på, hvor komplicerede de er, hvormed menes, hvilke data der indgår i modellerne, hvilke GIS-kompetencer der kræves for at kunne udarbejde modellen, samt hvor beregningstunge modellerne er. Derudover vurderes modellerne og metoderne i denne rapport på, hvor virkelighedstro de er. Dette skyldes, at det er særdeles væsentligt, at modellerne så præcist som muligt kan udpege de områder, hvor der er fare for oversvømmelse, idet en sådan risiko bl.a. skal inddrages i hele den fysiske planlægning i en kommune og tænkes ind i de forskellige udpegninger i kommuneplanen. Derudover kan det have væsentlige konsekvenser, at et område udpeges som risikoområde for oversvømmelse, som det vil fremgå af afsnit 8.4.

8.2.1 Bathtub

Bathtub er en simpel metode til modellering af oversvømmelse, der ikke kræver et højt kompetenceniveau inden for GIS. For at kunne udføre analysen er det eneste data, der er nødvendigt, en terrænmodel for det pågældende undersøgelsesområde, og ved hjælp af funktionen Single Output Map Algebra udføres analysen. Udførelse af analysen kræver således kun ét datasæt og ét værktøj i ArcMap. Værktøjet Extract by Mask kan efter udførsel af analysen anvendes til at klippe datasættet efter kommunegrænsen. Det vanskeligste ved metoden er opstilling af det udtryk, som skal indgå i Single Output Map Algebra (fx $\text{con}([\text{terrænmodel}] > 0.5, 1, 0)$), men hvis der er kendskab til con-funktionen, er det et simpelt udtryk, som anvendes. Metoden er således ganske simpel og vil kunne udføres af de fleste personer med nogen kendskab til GIS.

Nøjagtigheden af bathtub-modellen kan bl.a. vurderes ud fra det data, der er anvendt til at udføre analysen. Som nævnt i afsnit 6.2.1 anvendes Den Digitale Terrænmodel med en cellestørrelse på 1,6 m, hvilket er den mest detaljerede cellestørrelse for en dansk terrænmodel. Endvidere er terrænmodellen fremstillet med stor vertikal og horisontal nøjagtighed. I mange tilfælde gælder det, at jo mere detaljeret data og jo mindre cellestørrelse desto mere nøjagtig vil resultatet af en



analyse på dataet være. Det er således fordelagtigt for nøjagtigheden, at en oversvømmelsesmodellering vha. bathtub-metoden ikke er beregningstung, så en detaljeret cellestørrelse på 1,6 m kan anvendes, uden at analysen bliver for krævende mht. tid og computerkraft. Denne nøjagtighed i det anvendte data kan dog ikke opveje en anden og væsentlig ulempe ved anvendelse af bathtub-metoden. Bathtub-metoden tager som nævnt i afsnit 6.3 ikke højde for, om der er forbindelse mellem oversvømmede celler og vand. Det vil sige, at celler kan oversvømmes, selvom de ikke har forbindelse til hav- eller fjordceller eller andre oversvømmede celler, idet det eneste kriterium er, at en celledåbning er under den pågældende vandstandsstigning (0,5 m, 1,0 m eller 1,5 m). Denne karakteristika gør bathtub-metoden unøjagtig, og modelleringer vha. denne metode er dermed ikke virkelighedstro. Det ses af figur 7.1 i afsnit 7.1, at områder inde i landet, som ikke har forbindelse til vand, ”oversvømmes” i modellen.

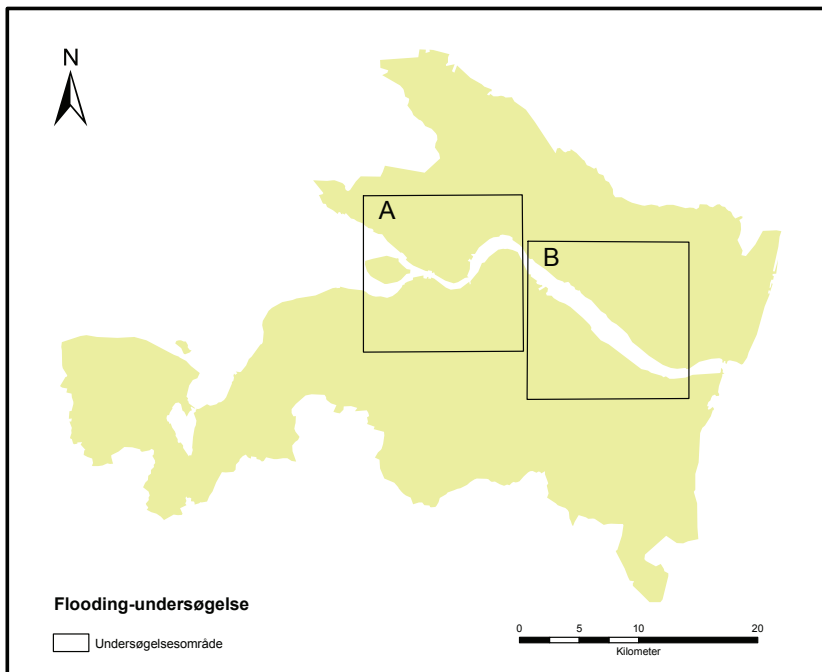
8.2.2 Cellular automata – rook’s og queen’s rule

Cellular automata er en anden metode, som kan anvendes til at modellere oversvømmelse. Cellular automata som metode til oversvømmelsesmodellering er mere kompliceret end bathtub-metoden. Til udarbejdelse af analysen anvendes, som nævnt i afsnit 6.2.1, Den Digitale Terrænmodel med en cellestørrelse på 5 m. Desuden anvendes data over fjord- og havområder samt digedata fra Kort10. Terrænmodellen er som nævnt udarbejdet med en stor horisontal og vertikal nøjagtighed, hvilket medvirker til, at der kan opnås nøjagtige resultater. Som det vil fremgå af det nedenstående, har det ikke været muligt at anvende en cellestørrelse mindre end 5 m, hvilket betyder, at diger ikke fremgår af terrænmodellen, som tilfældet ellers er ved en cellestørrelse på 1,6 m. Af denne årsag er det nødvendigt at tilføje data med diger til modellen. Det er dog stadig en overskuelig data-mængde, som skal indgå i analysen. Selve arbejdsprocessen er mere kompliceret. Som det første findes den fokale sum af alle celler ved hjælp af værktøjet Focal Statistics. Dernæst findes alle de celler, hvis fokale sum er større end 1, og som har en højdekote under den pågældende vandstandsstigning. Dette gøres ved hjælp af Single Output Map Algebra ($fx \text{ con}([Hav] == 0 \ \&\& \ [Dige] == 0 \ \&\& \ [Terrænmodel] < 0.5 \ \&\& \ [FocalSum] \geq 1, 1, 0)$). En årsag til, at cellular automata-metoden ikke er let tilgængelig, er, at det kan være vanskeligt at gennemskue, hvordan overgangsreglerne (Single Output Map Algebra-udtrykket) skal udformes. At kunne gennemskue, hvilken betydning de enkelte dele af overgangsreglerne har for det endelige resultat, kan være udfordrende, hvis der ikke er erfaring med dette. Selv med erfaring kan det kræve flere forsøg, før modellen virker hensigtsmæssigt. En anden væsentlig årsag til, at cellular automata er en kompliceret metode til oversvømmelsesmodellering, er, at disse to trin skal gentages, indtil alle celler, som opfylder kriterierne i Single Output Map Algebra-udtrykket, er udviklet og derved oversvømmet i modellen. Det kan kræve en lang række gentagelser (op til 1268 gentagelser ved rook’s rule samt 1466 gentagelser ved queen’s rule i de udviklede modeller), før alle mulige celler er udviklet, og det kan derfor være uoverskueligt og en tidskrævende proces at skulle udføre disse gentagelser manuelt. For at undgå det manuelle arbejde kan analysen udføres ved hjælp af et Python script, og gentagelserne laves derved automatisk, hvilket er særdeles fordelagtigt. Dette kræver dog kompetencer inden for Python. Det kan ikke forventes, at medarbejdere i en kommune nødvendigvis har kompetencer

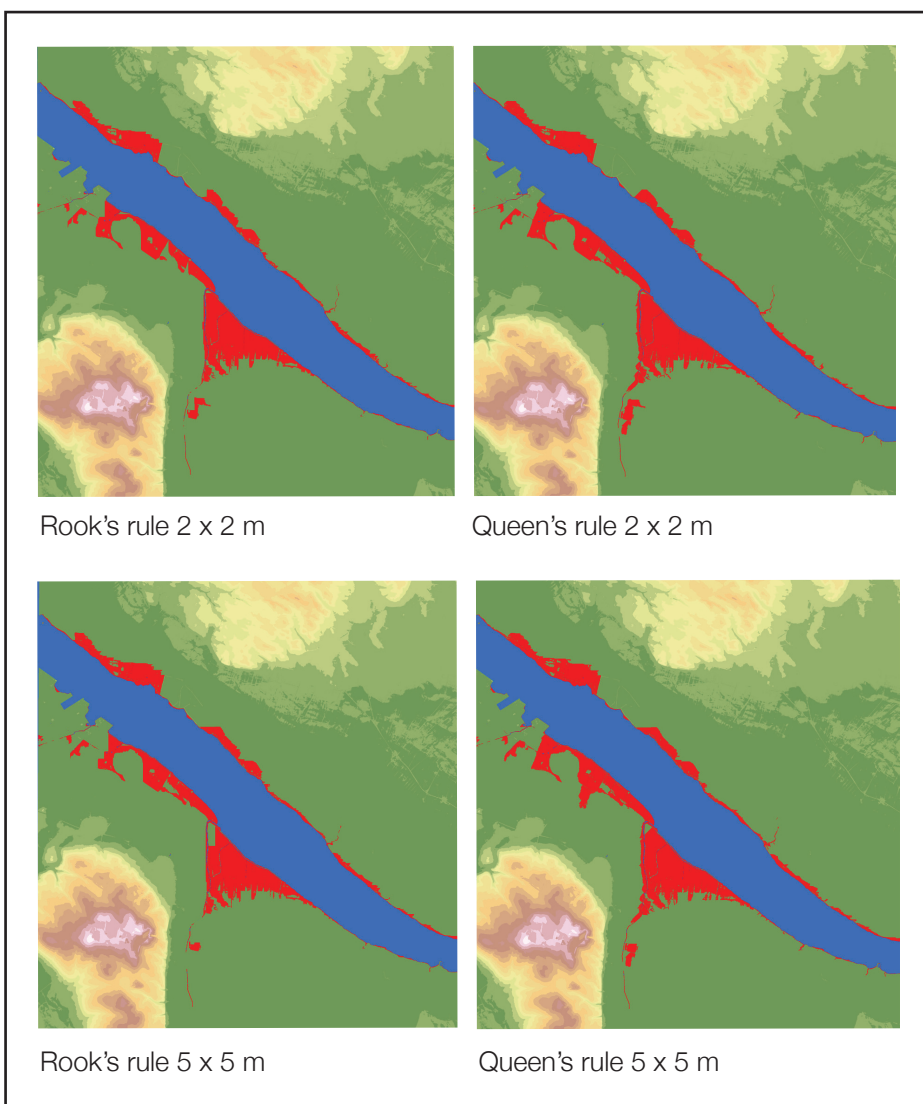
inden for Python, hvilket vanskeliggør processen, hvis medarbejderne selv skal kunne udarbejde analysen. Oversvømmelsesmodellering ved hjælp af cellular automata er således en beregningstung metode, og til trods for anvendelsen af Python tager det lang tid at udarbejde analyserne. Der er brugt 1,5-2 døgn (dette er dog afhængig af computerkraft) til at modellere hvert oversvømmelsscenario i denne rapport, hvilket også er væsentligt for at vurdere metodens anvendelighed. Beregningstiden har indflydelse på nøjagtigheden af de resultater, der opnås ved hjælp af cellular automata. Cellular automata-modellerne i denne rapport er udarbejdet med en cellestørrelse på 5 m. Som det fremgik af afsnit 6.2.1 er Den Digitale Terrænmodel tilgængelig med en cellestørrelse på 1,6 m. Med den computerkraft og tidshorisont, der har været til rådighed for udarbejdelse af modellerne i denne rapport, har det ikke været muligt at anvende en cellestørrelse på 1,6 m til udarbejdelsen af oversvømmelsesmodellerne vha. cellular automata. At denne metode er beregningstung kan således påvirke detaljeringsgraden af de resultater, der opnås ved analyserne. En cellestørrelse på 5 m er dog ikke nogen stor cellestørrelse og giver derved også en god nøjagtighed.

Poulter og Halpin (2007) har beskæftiget sig med oversvømmelsesmodellering, og de har sammenlignet metoderne bathtub (omtales som zero-side rule) og cellular automata ved både rook's rule og queen's rule. Disse metoder er anvendt med to forskellige cellestørrelser (6 m og 15 m), og deres studie viser, at valget af modelleringsmetode samt cellestørrelse har en betydning for resultatet. Det kan diskuteres, hvilken af disse to faktorer, der har størst indflydelse på modellernes resultater. Et argument for, at cellestørrelsen kan have væsentlig betydning for et resultat, ses hos Greenberg et al. (2011), der påpeger, at forbindelsen mellem celler kan ændres ved en ændret cellestørrelse. Eksempelvis kan celler, som ikke er forbundet ved små og detaljerede cellestørrelser, blive forbundet, hvis cellestørrelsen forstørres, idet cellerne ved en større cellestørrelse sammenlægges til store celler. På denne måde kan en ændret cellestørrelse påvirke resultatet.

Da de udarbejdede cellular automata-modeller ikke kan udarbejdes med en cellestørrelse på 1,6 m, anvendes simuleringsprogrammet "Flooding", som er udarbejdet af Henning Sten Hansen, professor i Geoinformatik ved Aalborg Universitet, til at undersøge cellestørrelsens og naboområdets betydning. Dette program kan udarbejde oversvømmelsscenerier for områder på 10.000 x 10.000 celler eller derunder, og programmet muliggør anvendelse af forskellige cellestørrelser og naboområder. Der er udvalgt to områder langs Limfjorden (se figur 8.7), hvor der foretages undersøgelser med rook's rule og queen's rule og med en cellestørrelse på 2 x 2 m samt 5 x 5 m. Der anvendes en cellestørrelse på 2 x 2 m, idet programmet ikke kan behandle decimaltal.



Figur 8.7 Oversigt over undersøgelsesområdernes geografiske placering i Aalborg Kommune.



Figur 8.8 Sammenligning af oversvømmelsesområder ved 1,0 m vandstandsstigning ved celledørrelserne 2 m og 5 m samt naboområderne rook's og queen's rule i undersøgelsesområde B. Oversvømmelseskortene er udarbejdet i "Flooding".

Undersøgelsesområde A	2 x 2 m celler (ha)	5 x 5 m celler (ha)
Rook's rule	2434,8	2465,9
Queen's rule	2512,9	2517,9
Undersøgelsesområde B	2 x 2 m celler (ha)	5 x 5 m celler (ha)
Rook's rule	2758,3	2749,3
Queen's rule	2820,9	2835,0

Tabel 8.2 Areal af potentielle oversvømmelsesområder ved celledimensionerne 2 m og 5 m samt nabo-områderne rook's rule og queen's rule i undersøgelsesområderne A og B.

Tabel 8.2 viser antallet af ha, som oversvømmes ved en vandstandsstigning på 1,0 m i områderne, og figur 8.8 viser undersøgelsesområde B ved anvendelse af de to celledimensioner og nabo-områder.

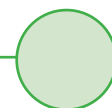
Af tabellerne 8.3 og 8.4 ses det, at den største forskel i antal oversvømmede ha forekommer, når anvendelse af rook's rule og queen's rule sammenlignes. Dette mønster forekommer både i undersøgelsesområde A og B. Det vil således sige, at det har større betydning for resultatet, hvorvidt rook's rule eller queen's rule anvendes, end om der anvendes en celledimension på 2 m eller 5 m. En væsentlig kvalitet ved cellular automata som metode til oversvømmelsesmodellering er derfor, at det er muligt bl.a. at vælge mellem rook's rule og queen's rule.

Tabel 8.3 Undersøgelsesområde A. Difference ved modellering med celledimensionerne 2 m x 2 m og 5 m x 5 m samt nabo-områderne rook's rule og queen's rule.

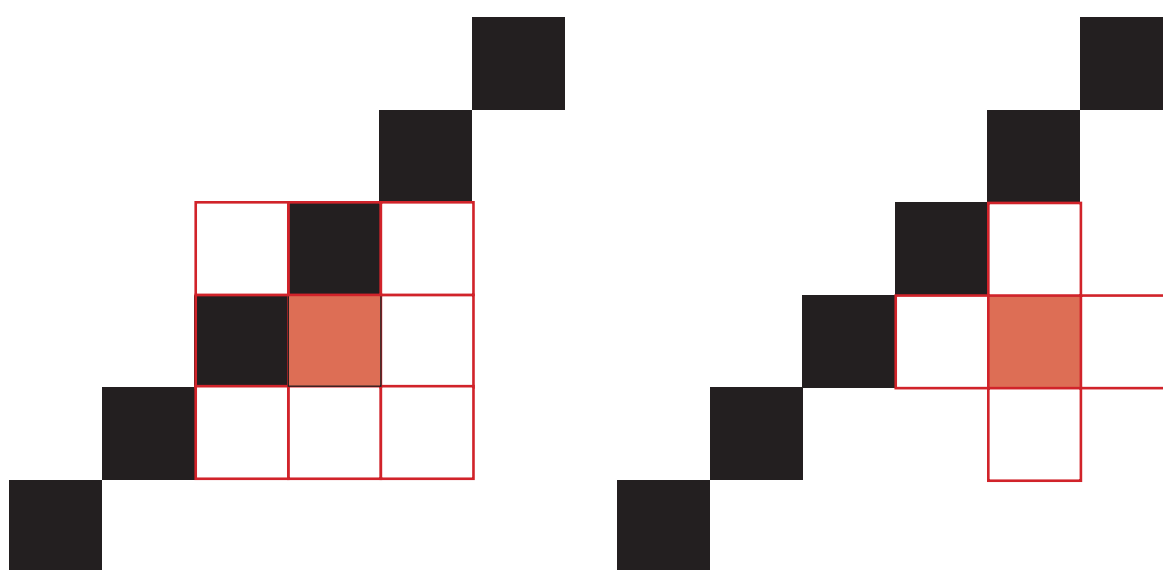
Undersøgelsesområde A		
	Ved celledimension 2 x 2 m:	Ved celledimension 5 x 5 m:
Difference mellem rook's rule og queen's rule:	78,1 ha	51,9 ha
	Ved Rook's rule:	Ved Queen's rule:
Difference mellem 2 x 2 m og 5 x 5 m:	31,1 ha	5,0 ha

Tabel 8.4 Undersøgelsesområde B. Difference ved modellering med celledimensionerne 2 m x 2 m og 5 m x 5 m samt nabo-områderne rook's rule og queen's rule.

Undersøgelsesområde B		
	Ved celledimension 2 x 2 m:	Ved celledimension 5 x 5 m:
Difference mellem rook's rule og queen's rule:	62,6 ha	85,7 ha
	Ved Rook's rule:	Ved Queen's rule:
Difference mellem 2 x 2 m og 5 x 5 m:	9,0 ha	14,1 ha



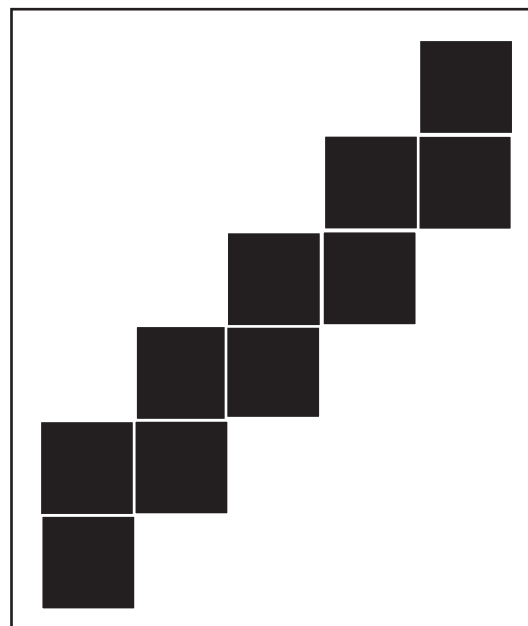
Det kan dog være vanskeligt at vurdere, om rook's rule eller queen's rule egner sig bedst til oversvømmelsesmodellering, og eftersom betydningen af disse regler blev påvist ovenfor, er det en usikkerhed i anvendelsen af cellular automata, at det ikke er påvist, hvilken af de to regler, der egner sig bedst til oversvømmelsesmodellering. Ifølge Poulter & Halpin (2007) og Hansen (2010) vil anvendelse af rook's rule underestimere forbindelsen mellem cellerne og dermed flowet i og størrelsen af oversvømmelsen, mens anvendelse af queen's rule vil overestimere størrelsen af oversvømmelsen. Der er således ikke noget endeligt svar på, hvilken af de to regler der er bedst egnet. Der kan argumenteres for, at vælges queen's rule til oversvømmelsesmodellering, vil der være sikkerhed for, at alle områder, som kan være i fare for oversvømmelse, indgår i modellen som følge af overestimeringen. Dette vil ikke være tilfældet ved anvendelse af rook's rule. Anvendelse af queen's rule vil således medføre et worst case scenario ved sammenligning af queen's og rook's rule. Ved at anvende queen's rule kan der pga. overestimeringen derimod være en risiko for, at for store områder udpeges som oversvømmelsestruede. Som det vil fremgå af afsnit 8.3, kan der være konsekvenser forbundet med at inddrage for store områder i modellen, men også ved at inddrage for små områder. Et væsentligt element i diskussionen om rook's rule og queen's rule er diger. I forbindelse med oversvømmelsesmodellering er diger særdeles relevante, eftersom det ikke er et tilstrækkeligt billede af virkeligheden, hvis der ikke tages højde for diger, og hvis store områder derfor oversvømmes i en model, til trods for at der er opstillet diger. Der kan dog i nogle tilfælde opstå u hensigtsmæssige flows i forbindelse med diger, hvis queen's rule anvendes. Hvis digedata eksempelvis ser ud som vist på figur 8.9, vil flowet ved anvendelse af queen's rule kunne passere diget, og der vil således forekomme oversvømmelse på den modsatte side af diget, hvilket ikke er virkelighedstro. Dette vil ikke kunne forekomme, hvis rook's rule benyttes, eftersom flowet alene vil ske ud fra celsider og ikke diagonalt ud fra de enkelte celler. Digerne vil således bremse oversvømmelsen ved anvendelse af rook's rule, og der vil opnås en mere virkelighedsnær model. Det digedata, der er anvendt i denne rapport, vil dog kunne bremse oversvømmelsen både ved benyttelse



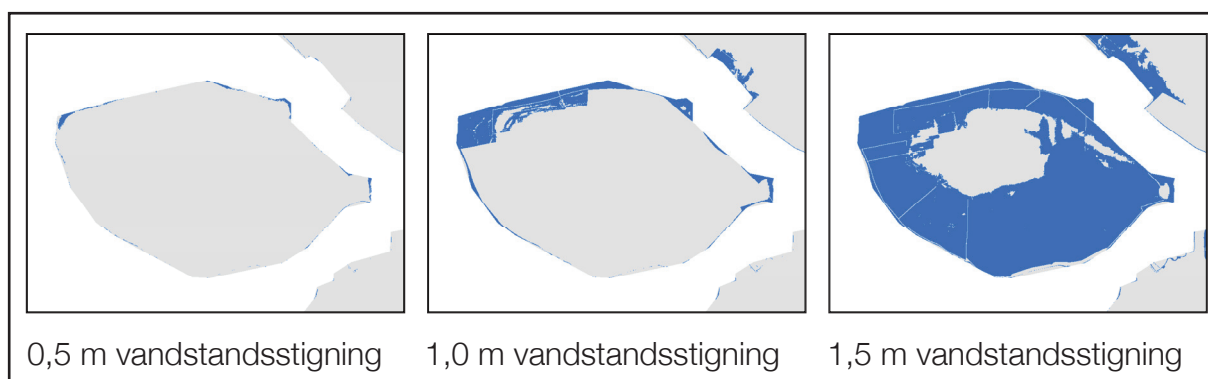
Figur 8.9 Figuren til venstre viser queen's rule, hvor vandet kan strømme igennem et dige, mens figuren til højre viser rook's rule, hvor diget vil standse oversvømmelsen.

af rook's rule og queen's rule, idet dataet er opbygget som vist i figur 8.10.

Det ses dog af figur 8.11, at digernes betydning omkring øen Egholm i Limfjorden forsvinder ved vandstandsstigninger på 1,5 m. Dette skyldes, at vandstanden er så høj, at vandet kan løbe bagom digerne og dermed oversvømme store dele af øen.



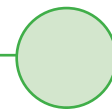
Figur 8.10 Opbygning af anvendt digedata i modellerne, hvor cellular automata anvendes.



Figur 8.11 Vandstandsstigninger på 0,5, 1,0 m og 1,5 m på øen Egholm modelleret vha. cellular automata med queen's rule.. Digers effekt forsvinder ved vandstandsstigninger på 1,5 m. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98).

8.2.3 Cost distance

Cost distance er den fjerde metode til oversvømmelsesmodellering, som er undersøgt i denne rapport. Metoden er forholdsvis tilgængelig, hvis der er kendskab til cost distance-funktionen i ArcGIS. Der skal anvendes to datasæt i analysen, et datasæt med hav- og fjorddata fra Kort10 og Den Digitale Terrænmodel med en celledørrelse på 1,6 m. Da diger fremgår af Den Digitale Terrænmodel, når celledørrelsen er 1,6 m, er et særskilt datasæt over diger ikke nødvendigt for analysen. Der skal således anvendes en overskuelig mængde data i analysen. Arbejdsprocessen er ligeledes overskuelig, når der opøves kendskab til cost distance-funktionen. Input griddet til cost distance-analysen består af hav- og fjorddata, som konverteres til raster og reklassificeres, så hav- og fjordceller har værdien 1, og resten af cellerne har værdien NODATA. Et omkostningsgrid udarbejdes ved hjælp af Single Output Map Algebra, hvor alle celler med en højde under den pågældende vandstands-



stigning tildeles værdien 0, mens alle andre celler tildeles værdien 1. Inputtet og omkostningsgridet indgår derefter i cost distance-analysen. Beregningstiden for de enkelte cost distance-analyser udført til denne rapport var ca. 6-8 timer. Beregningstiden muliggør, at analysen kan udføres med en celledimension på 1,6 m, hvilket er fordelagtigt for at opnå en nøjagtig model. Som det fremgik af afsnit 6.4 har valget af rook's rule eller queen's rule dog større betydning for resultatet, end om celledimensionen er 1,6 m eller 5 m. Cost distance tager ligesom cellular automata, men i modsætning til bathtub, højde for forbindelse til hav- fjord- eller oversvømmede celler. Dette er en kvalitet ved cost distance, men ved anvendelse af denne metode er det dog ikke muligt at vælge mellem rook's rule og queen's rule. Cost distance benytter udelukkende queen's rule. Eftersom valget af rook's rule eller queen's rule har væsentlig betydning for resultatet, er det en svaghed ved cost distance, at det ikke er muligt at vælge mellem disse to typer naboområder og evt. afprøve dem begge for at kunne vurdere deres resultater. I forbindelse med cost distance er det således en styrke, at den ikke er for beregningstung til, at der kan anvendes en celledimension på 1,6 m, men det er en svaghed, at der ikke er mulighed for at anvende forskellige regler for naboområder, hvilket umiddelbart har en større betydning for resultatet end celledimensionen.

8.3 Vurdering af planlægningsværktøjerne

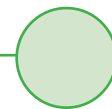
Der er således både styrker og svagheder forbundet med de enkelte metoder, og disse er opsummeret i tabel 8.5.

Bathtub er den simpleste metode, men også den mindst nøjagtige metode. Den kan ikke anvendes som en endelig model for oversvømmelse i planlægningen, da den er for unøjagtig. Den kan til nød anvendes til at skabe et hurtigt overblik over områder, som muligvis kan være oversvømmelses-truede, men der skal anvendes mere detaljerede og nøjagtige analyser i den endelige planlægning. Cost distance er mere kompliceret, mens cellular automata er den mest komplicerede og beregningstunge af de metoder til modellering af oversvømmelse, der er undersøgt i denne rapport. Ud fra undersøgelserne i afsnit 8.2.2 ses det, at valget af regler for naboskab i modellen har større betydning for resultaterne i denne rapport end celledimensionen, og derved vurderes det, at cellular automata er den mest anvendelige model til oversvømmelsesmodelleringen. Det kan være muligt at anvende en mindre celledimension ved cellular automata, hvis computerkraften er tilstrækkelig eller analysen foretages for et begrænset geografisk område, og der er en tilstrækkelig tidsperiode til rådighed. Som nævnt i afsnit 8.2.2 kan det være vanskeligt at afgøre, om rook's rule eller queen's rule giver de bedste resultater og modeller for oversvømmelse. Trods dette vurderes det at være en kvalitet, at naboskabet kan varieres i cellular automata, da dette giver mulighed for at vælge om modellen skal udforme et worst case scenario. Fordelen ved at anvende queen's rule er, at der er større sikkerhed for, at alle områder, der er oversvømmelsestruede, vil fremgå af modellen, og derved vil der ikke opstå uventede oversvømmelser, som tilfældet kan være, hvis det oversvømmede

areal underestimeres. Svagheden ved queen's rule og en årsag til, at det kan være fordelagtigt at anvende rook's rule, kan, som det fremgår af afsnit 8.2.2, være problematikken omkring diger, hvor områder bag digerne kan oversvømmes afhængigt af, hvordan digedataet er opbygget. Derudover kan det have konsekvenser at overestimere det areal, som er i risiko for oversvømmelse. Det vil muligvis kunne få konsekvenser for grundejere i områder, der er udpeget som potentielle oversvømmelsesområder. Eksempelvis kan forsikringspræmier muligvis forhøjes i disse risikoområder, og endvidere kan det have konsekvenser for den fysiske planlægning, hvilke områder der udpeges som oversvømmelsestruede (Hansen, 2010). Der er kamp om arealerne i det åbne land, idet der er en lang række forskellige og modstridende interesser tilknyttet. Hvis de områder, der er i fare for

Tabel 8.5 Styrker og svagheder ved de fire oversvømmelsesmodeller.

	Styrker:	Svagheder:
Bathtub:	- Simpel at anvende - Ikke beregningstung mht. tid og computerkraft - Begrænset datamængde - Detaljeret terrænmodel kan anvendes	- Unøjagtig - Forbindelse til vand er ikke et kriterium - Resultatet overestimeres - Ikke egnet som planlægningsværktøj
Cellular automata – rook's rule:	- Overskuelig datamængde - Egnet planlægningsværktøj - Det er muligt at vælge naboområde - Nøjagtig - Forbindelse til vand er et kriterium	- Kompliceret at anvende - Komplicerede overgangsregler - Scripting i Python - Beregningstung mht. tid og computerkraft - Vanskeligt at anvende en detaljeret terrænmodel - Nødvendigt at inddrage digedata - Resultatet overestimeres
Cellular automata – queen's rule:	- Overskuelig datamængde - Det er muligt at vælge naboområde - Nøjagtig - Forbindelse til vand er et kriterium - Egnet planlægningsværktøj	- Kompliceret at anvende - Komplicerede overgangsregler - Scripting i Python - Beregningstung mht. tid og computerkraft - Vanskeligt at anvende en detaljeret terrænmodel - Nødvendigt at inddrage digedata - Risiko for at diger gennemtrænges pga. diagonalt naboområde - Resultatet underestimeres
Cost distance:	- Forholdsvis simpel at anvende - Overskuelig datamængde - Detaljeret terrænmodel kan anvendes - Nærhed til vand er et kriterium	- Ikke muligt at vælge naboområde - Lidt beregningstung mht. tid og computerkraft



oversvømmelse, friholdes for nye tiltag som fx planlægning af boligområder, kan det skabe yderligere kamp om arealerne, hvis arealet af de oversvømmelsestruede områder overestimeres. Endvidere kan det have en økonomisk betydning, om områder eksempelvis kan udstykkes til byggegrunde. Dette kan således være årsager til at anvende rook's rule frem for queen's rule.

Cellular automata som metode til oversvømmelsesmodellering kan anvendes således, at både rook's rule og queen's rule afprøves og sammenlignes. Derved kan det vurderes, hvilke områder som oversvømmes i begge modeller, og hvor der således er høj risiko for oversvømmelse. I de områder, som kun oversvømmes i den ene af modellerne, kan der være en større usikkerhed, men det er værdifuld viden, som kan medvirke til at skabe opmærksomhed om disse områder, som muligvis vil oversvømmes.

Når kommuner vælger at ansætte konsulentvirksomheder til at udføre oversvømmelsesmodellering, er det vigtigt at være opmærksom på, hvilken metoden der anvendes, idet forskellige modeller kan give forskellige resultater. Når den anvendte metode ikke oplyses, kan det således være vanskeligt for medarbejderne at vurdere resultaternes egnethed og kvalitet, og om der evt. er tale om en overestimering eller underestimering, så der kan tages højde for dette i planlægningen.

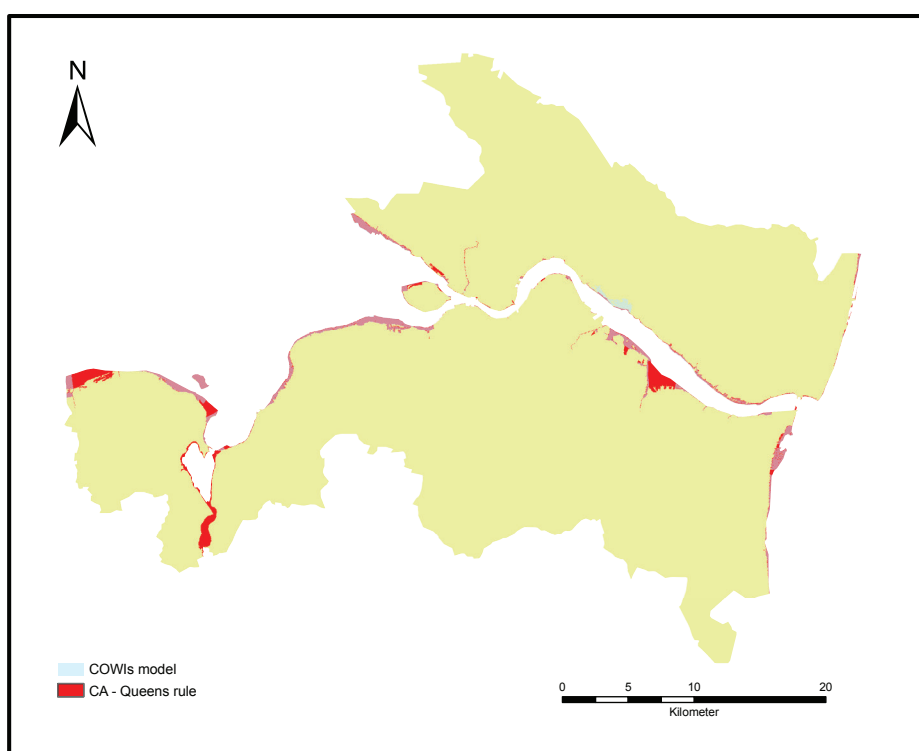
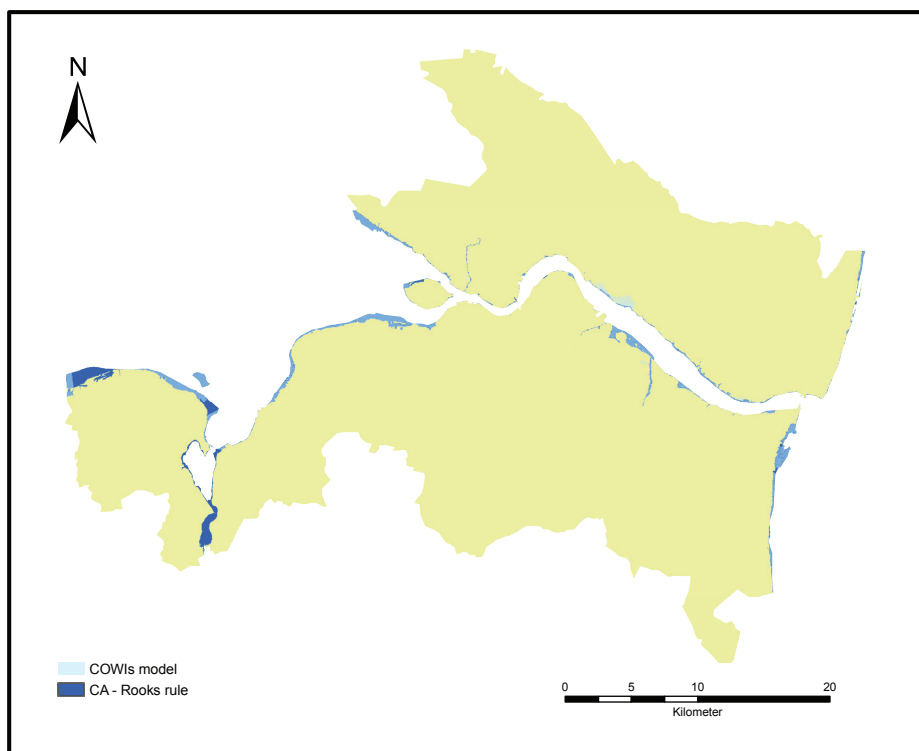
8.4 Aalborg Kommunes oversvømmelsesscreening

Aalborg Kommune har fået konsulentvirksomheden COWI til at udarbejde en screening over de områder, som kan være i fare for oversvømmelse. Det har ikke været muligt at få informationer om, hvilken metode COWI har anvendt til oversvømmelsesscreeningen, men selve screeningen er tilvejebragt gennem Aalborg Kommune. COWI's oversvømmelsesscreening ses af figur 2.3 i kapitel 2.2.

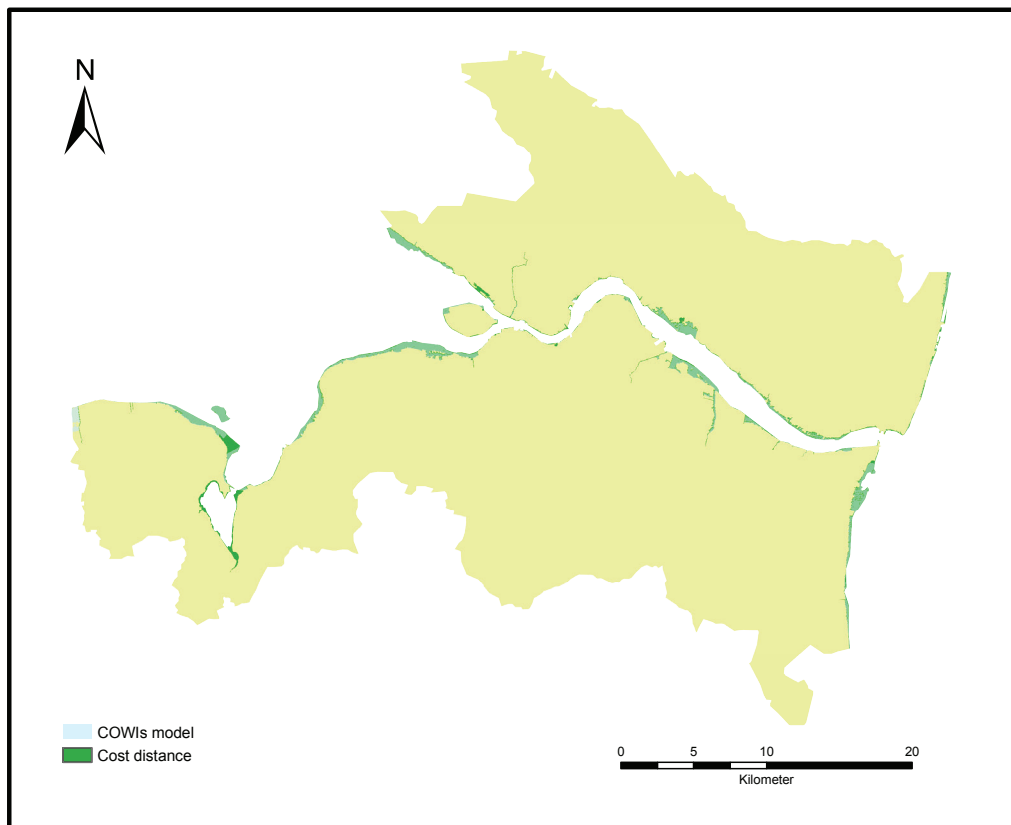
Denne model spiller således en væsentlig rolle for planlægningen i Aalborg Kommune, og den danner udgangspunkt for tilpasning til vandstandsstigninger som følge af klimaændringer i kommunen. Det er derfor interessant at sammenligne resultaterne af Aalborg Kommunes screening med de modeller, som er udarbejdet til denne rapport på baggrund af forskellige metoder. Figur 8.12, 8.13 og 8.14 sammenligner Aalborg Kommunes screening med henholdsvis en model udarbejdet ved hjælp af rook's rule, queen's rule og cost distance-metoden.

Modellerne er sammenlignet for en vandstandsstigning på 1 m. En sammenligning med bathtub-metoden undlades, da denne metode som nævnt i afsnit 8.2 ikke er velegnet til oversvømmelsesmodellering i forbindelse med planlægning.

Af figur 8.12 ses det, at hovedparten af de oversvømmelsestruede områder overlapper mellem Aalborg Kommunes oversvømmelsesscreening og modellen for rook's rule. Dog oversvømmes store områder i den vestlige del af Aalborg Kommune ved anvendelse af rook's rule, men disse oversvømmes



Figur 8.12 (ø.) og 8.13 (n.) Sammenligning af COWI's oversvømmelsesscreening og modellerne udviklet hhv. cellular automata – rook's rule og queen's rule. Farven der afviger fra signaturforklaringen repræsenterer overlap mellem COWIs model og rook's rule samt COWIs model og queen's rule. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98, oversvømmelsesscreening udarbejdet af COWI).



Figur 8.14 Sammenligning af COWI's oversvømmelsesscreening og model udviklet vha. cost distance. Farven der afviger fra signaturforklaringen repræsenterer overlap mellem COWIs model og cost distance. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98, oversvømmelsesscreening udarbejdet af COWI).

ikke i Aalborg Kommunes screening. Der er ganske få områder, som oversvømmes i Aalborg Kommunes screening, men ikke af modellen hvor rook's rule er anvendt. Der er således nogle væsentlige forskelle på de to modellers resultater.

Figur 8.13 sammenligner resultaterne i Aalborg Kommunes oversvømmelsesscreening med resultaterne af modellen udarbejdet ved hjælp af queen's rule. Det ses, at flere områder overlapper mellem de to modeller, men der ses også her store områder i den vestlige del af Aalborg Kommune, som oversvømmes ved anvendelse af queen's rule, men ikke i Aalborg Kommunes screening. Der ses endvidere et større område i den østlige del af kommunen, som oversvømmes af queen's rule, men ikke i Aalborg Kommunes screening. Små områder oversvømmes af Aalborg Kommunes screening, men ikke ved anvendelse af queen's rule.

Figur 8.14 sammenligner Aalborg Kommunes oversvømmelsesscreening med cost distance-modellen.

Af de fire modeller er det cost distance, der giver de resultater, som ligner screeningen fra Aalborg Kommune mest. Størstedelen af de oversvømmede områder overlapper mellem de to modeller. Der ses dog mindre områder langs det meste af Limfjorden, som oversvømmes af cost distance-modellen men ikke af Aalborg Kommunes model, mens der er ganske få områder,

som oversvømmes af Aalborg Kommunes model, men ikke af cost distance-modellen.

Der ses således væsentlige forskelle mellem cellular automata og Aalborg Kommunes screening, mens cost distance-modellen stemmer bedst overens med Aalborg Kommunes screeningmodel. En væsentlig faktor for de forskelle, som er mellem de udarbejdede modeller og COWI's oversvømmelsesscreening, kan dog også være et resultat af de data, der er anvendt. I oversvømmelsesscreeningen er der for eksempel ikke kendskab til, hvorvidt der er inddraget data med bygninger, diger m.m., som udgør forhindringer for oversvømmelser. Det er vanskeligt at foretage en vurdering af kvaliteten af COWI's oversvømmelsesscreening, da der ikke er kendskab til, hvordan denne er udarbejdet.

Aalborg Kommunes beslutning om at anvende COWI's model i planlægningen har indflydelse på, hvilke områder der udpeges som oversvømmelsestruede, og der udpeges således mindre områder, end tilfældet ville have været, hvis Aalborg Kommune havde anvendt de modeller i planlægningen, som er udarbejdet i denne rapport. Dette kan få konsekvenser, hvis større områder oversvømmes, end hvad Aalborg Kommune er forberedt på, og planlægningen ikke er tilpasset en større oversvømmelse.

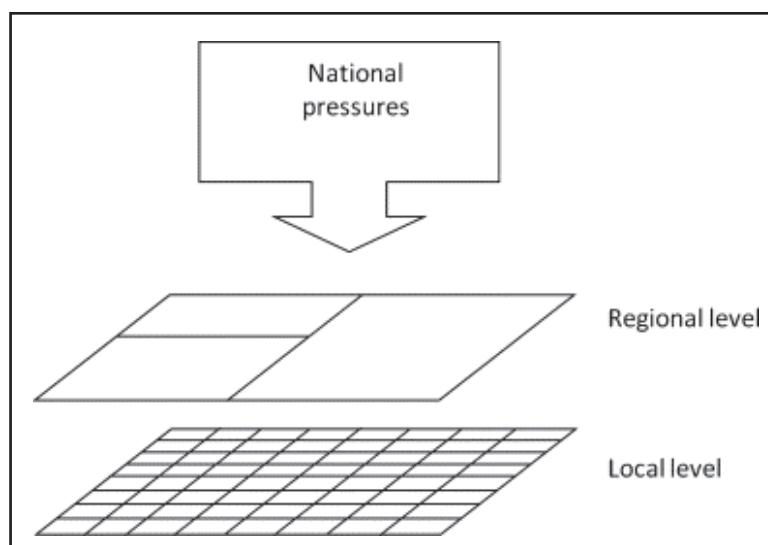
I det følgende opstilles eksempler på, hvordan disse oversvømmelsesmodeller kan anvendes i en planlægningssituation, og Aalborg Kommunes planer for kommende bolig- og erhvervsområder sammenholdes med oversvømmelsesmodellerne. Denne analyse foretages ved hjælp af simuleringsprogrammet Land Use Change Impact Analysis (LUCIA).

9. Arealplanlægning og vandstandsstigninger

En øget opmærksomhed fra bl.a. politikere har været rettet mod arealanvendelse og klimatilpasning inden for det seneste årti, idet klimaforandringer er blevet en realitet, og der er opnået højere vidensniveau om kystområdernes sårbarhed over for vandstandsstigninger (Hansen, 2008)(Hansen, 2010). Det er interessant at undersøge, hvorledes kommuners nuværende planer for fysisk planlægning påvirker fremtidig arealanvendelse, og hvordan forskellige arealanvendelsestyper kan blive berørt af fremtidige oversvømmelser. Udlægges der eksempelvis områder til byudvikling i områder, som har risiko for at blive oversvømmet, medfører dette økonomiske og planlægningsmæssige udfordringer. Henning Sten Hansen, professor i Geoinformatik ved Aalborg Universitet, har udviklet simuleringsprogrammet Land Use Chance Impact Analysis (LUCIA), som kan anvendes til at modellere den fremtidige arealanvendelse. Denne program anvendes til at modellere arealanvendelsen i Aalborg Kommune på baggrund af planer for udlægning af bolig- og erhvervsområder. Metoden for LUCIA beskrives i det følgende.

9.1 Land Use Change Impact Analysis (LUCIA)

Som nævnt er det muligt at modellere fremtidig arealanvendelse ved hjælp af programmet LUCIA, som er baseret på komplekse dynamikker, der inkluderer samfundsmæssige og fysiske forhold. Overordnet set er det muligt at modellere fremtidig arealanvendelse på baggrund af datainput med nuværende arealanvendelse, planer, politikker og lovgivning samt socioøkonomiske forhold (Hansen, 2008b).



Figur 9.1 Lagstruktur for LUCIA (Hansen, 2010)

LUCIA er opdelt i to niveauer - et lokalt og et regionalt. Det lokale niveau udgør arealanvendelse opdelt i gridceller, og det regionale niveau kan eksempelvis repræsentere kommuner (se figur 9.1). På regionalt niveau findes modellens makrodrivkræfter, som er baseret på socioøkonomiske faktorer såsom befolkningsudvikling og økonomisk udvikling. Makrodrivkræfterne er bestemmende for antallet af gridceller, som kan omdannes

til en ny arealanvendelse.

På mikroniveau håndteres drivkræfter, som udgør forudsætningerne for, hvorvidt en celle kan tilpasses en given arealanvendelse. Disse kan eksempelvis være:

Proximity - neighbouring effect (naboeffekt): Henviser til cellers evne til at tiltrække eller frastøde elementer i et naboområde. Eksempelvis frastøder industriområder og rekreative områder ofte hinanden. Proximity udgør cellular automata-elementet i LUCIA.

Suitability (transitionspotentiale): Henviser til en celledes potentiale for at overgå til en anden arealanvendelse.

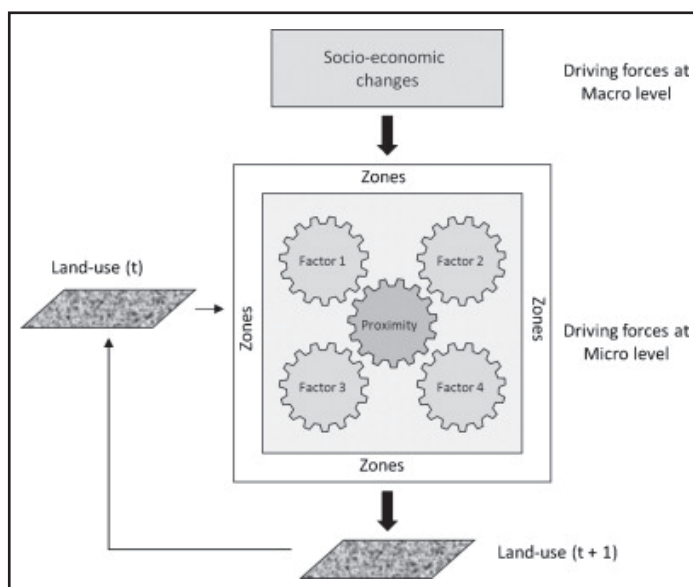
Accessibility (tilgængelighed): Henviser til en celledes tilgængelighed til infrastruktur. Eksempelvis kræver indkøbsmuligheder høj tilgængelighed, hvorimod områder med lav tilgængelighed er mindre støjende områder og derfor er attraktiv for rekreation mv.

(Hansen, 2010).

Foruden de ovennævnte drivkræfter indgår også zoning. Zoning repræsenterer det, at planlægning i høj grad er påvirket af eksempelvis politiske beslutninger og lovgivning inden for arealplanlægning (Hansen, 2010). Eksempelvis kan der være regler for, hvor der må bygges nye boligområder, og dermed udgør disse begrænsninger for udvidelse af boligområder (Miljøministeriet, 2009).

I LUCIA indgår tre forskellige arealanvendelseskategorier: aktive, passive og statiske. Eksempler på aktive arealanvendelser er sommerhus-, industri- samt service- og handelsområder. Aktive

arealanvendelsestyper påvirkes af eksterne faktorer, og denne arealanvendelseskategori er den vigtigste. Passive arealanvendelsestyper påvirkes ikke af eksterne kræfter, men disse typer kan på sigt transformeres til aktive arealanvendelsestyper. Eksempler er skov- og vådområder. Statiske arealanvendelsestyper kan ikke transformeres, men de har dog betydning for udviklingen af arealanvendelsen i form af enten at tiltrække eller frastøde. Statiske arealanvendelser er eksempelvis lufthavne samt områder med hav (Hansen, 2010).



Figur 9.2 Principper for simulering af fremtidig arealanvendelse med LUCIA (Hansen, 2010).

Figur 9.2 illustrerer principperne for simulering af fremtidig arealanvendelse med LUCIA (Hansen, 2008b).

LUCIA er opbygget på baggrund af en traditionel multikriterieanalyse med kriterier, som udgør faktorer eller begrænsninger, samt cellular automata som muliggør rumlig interaktion. En multikriterieanalyse er et analyseværktøj, som kan anvendes i beslutningstagning, hvor flere (ofte modstridende) kriterier har betydning for afgørelsen. Værktøjet muliggør inddragelse af kriterier, som enten udgør vægtede faktorer eller begrænsninger. En definition af multikriterieanalyse findes hos Roy (1996) citeret i Chakhar & Jea-Marc (2003):

"A decision-aid and a mathematical tool allowing the comparison of different alternatives or scenarios according to many criteria, often contradictory, in order to guide the decision maker(s) towards a judicious choice."

En multikriterieanalyse er opbygget omkring fem trin: udvælgelse af kriterier, standardisering af begrænsninger og faktorer, fastsættelse af vægte for hver enkelt faktor, evaluering vha. en MCE-algoritme samt vurdering af resultatet (Eastman et al., 1995)(Hansen, 2005).

Multi Criteria Evaluation (MCE)-algoritmen anvendes til at undersøge egnetheden (S) af de enkelte celler i griddet:

$$S = (w_1 \times x_1 + w_2 \times x_2 + \dots + w_n \times x_n) \times c_1 \times c_2 \times \dots \times c_n$$

hvor x er værdien af faktorerne, w er vægtene som tildeles hver faktor, og c udgør begrænsningerne (Eastman, et al., 1995).

I den multikriterieanalyse, som udføres i LUCIA, indgår faktorer (suitability, proximity og accessibility) og begrænsninger (zoning). Faktorer har værdier mellem 0,0 og 1,0 og begrænsninger har værdien 0 eller 1. Når faktorer og begrænsninger kombineres i en multikriterieanalyse for aktive arealanvendelsestyper, er det muligt at beregne potentialet for, at en celle, som repræsenterer én arealanvendelsestype, ændres til en anden type (Hansen, 2008b).

Transitions potentialet kan udregnes ved hjælp af følgende ligning:

$$P^L(t+1) = C_1^L(t) \times C_2^L \times \dots \times C_n^L \times \sum(w_i^L \times F_i^L)$$

P : Transitions potentiale

C : Begrænsning (0 eller 1)

L : Arealanvendelsestype

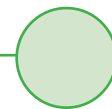
F: Faktor (mellem 0 og 1)

W: Individuelt vægtet faktor (mellem 0 og 1)

Ligningen for transitionspotentialer er opdelt i to. Den ene del kombinerer faktorer ved hjælp af en vægtet lineær kombination, $\sum(w_i^L \times F_i^L)$, og i den anden del multipliceres begrænsninger (booleske kort, som illustrerer tilladte og udelukkede områder). Transitionspotentialer for aktive arealkategorier beregnes for alle celler. De celler, der får det højeste transitionspotentialer for en given arealanvendelse, bliver ved hjælp af cellular automata omdannet til den pågældende arealanvendelse. For at foretage en dynamisk udvikling af arealanvendelse anvendes begrænset cellular automata, idet der angives et maksimalt antal celler, som kan udvikles pr. generation. Makrodrivkræfterne er som nævnt bestemmende for antallet af celler, der ændres til en anden arealanvendelse pr. generation, og det vil eksempelvis sige, at i forbindelse med de arealanvendelsestyper, der er drevet af befolkningsudviklingen (bymæssig bebyggelse, industri og serviceerhverv), definerer denne udvikling antallet af celler, der skal udvikles (Hansen, 2008b). Outputtet fra LUCIA har en cellestørrelse på 100 x 100 m (Hansen, 2010).

9.2 Modellerings af fremtidig arealanvendelse i Aalborg Kommune

I det følgende redegøres der for den metodiske anvendelse af LUCIA i dette projekt. For at modellere den fremtidige arealanvendelse ved hjælp af LUCIA forudsætter det bl.a. databehandling samt overvejelser omkring vægtning af de forskellige faktorer og indstilling af aktive, passive og statiske arealkategorier. Der skal således skabes en forståelse for opbygningen og processerne i LUCIA. Alt dette er tidskrævende arbejde, og pga. projektets forholdsvist korte tidsperiode er LUCIA kalibreret som angivet i Hansen (2010). Således har det været muligt at inddrage LUCIA i projektet og inddrage fremtidsperspektivet i problemstillingen vedrørende vandstandsstigninger. Der udarbejdes to scenarier for den fremtidige arealanvendelse i Aalborg Kommune. Det ene scenarie (scenarie A) udgør et basisscenarie, hvor arealanvendelsen modelleres på baggrund af by- og sommerhuszoner i år 2000. Dette kan anvendes til sammenligning med scenarie B. Scenarie B udarbejdes på baggrund af by- og sommerhuszoner (år 2000) samt Aalborg Kommunes planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder. Dette scenarie udarbejdes for at undersøge, om fremtidige bolig- og erhvervsområder vil være beliggende i potentielle oversvømmelsesområder. Der fokuseres på fremtidige planer for bolig- og erhvervsområder, idet udførsel af sådanne planer vil medføre permanente installationer i form af bolig- og erhvervsbyggeri. Hvis disse bliver udsat for fremtidige oversvømmelser, kan det medføre økonomiske og planlægningsmæssige udfordringer.



9.2.1 Data

Der er anvendt følgende data til simulering af scenarier for den fremtidige arealanvendelse i Aalborg Kommune ved hjælp af LUCIA.

Befolkningsfremskrivning

Data med information om befolkningsfremskrivning for Aalborg Kommune indtil år 2040 er anvendt fra Danmarks Statistik.

Arealanvendelse

Corine Land Cover (Corine) anvendes som kilde til information omkring typer og beliggenhed af arealanvendelser i Aalborg Kommune. Der anvendes Corine Land Cover 2000, idet det ikke har været muligt at anvende nyere versioner af Corine-datasættet. Corine Landcover 2000 giver informationer om arealanvendelsen i 32 lande (European Environment Agency, u.d.a). Corine er udarbejdet på baggrund af satellitfotos, som i Danmark er taget i perioden 1999-2001 (European Environment Agency, 2007). De mindste kortlagte enheder er 25 ha (Stjernholm, 2009 8f.), og nøjagtigheden i Corine-datasættet er bedre end 100 m (European Environment Agency, u.d.b).

Bygnings- og boligdata

Idet CORINE ikke indeholder tilstrækkelige informationer om bebyggelsesområder, anvendes data fra Bygnings- og Boligregisteret (BBR). BBR-data bidrager med datataljeret information om alle danske bygninger (Hansen, 2010).

Aalborg Kommuneplan 2009-2013

Aalborg Kommunes kommuneplan 2001-2005 og 2009-2013 indeholder information om fremtidige planer for bolig- og erhvervsområder. I Kommuneplan 2009-2013 er planer for boligområder og erhvervsområder opdelt i planlagte områder samt perspektivområder. De planlagte bolig- og erhvervsområder er ledige områder, som endnu ikke er udnyttet. Perspektivområder er rammelaugte områder til by- og erhvervsudvikling og er således områder, som på sigt ved revision af kommuneplanen kan ændres til bolig- og erhvervsområder (Aalborg Kommune, 2009).

9.2.2 Scenarie A: Basisscenarie

Basisscenariet tager udgangspunkt i byzonekort og sommerhuszokort fra år 2000.

I LUCIA anvendes funktionen Calculate Land Use Simulation. Her indstilles startåret for simuleringen til år 2000, og slutåret angives til 2040. År 2000 er valgt som startår, idet CORINE-data er

Tabel 9.1 Oversigt over arealanvendelsers celletilstand og arealanvendelsestyper der påvirkes af befolkningsudviklingen.

Land use code	Arealanvendelse	Celletilstand	Drevet af befolkningsudv.
1100	Bymæssig bebyggelse	1	1
1211	Industri	1	1
1212	Serviceerhverv	1	1
1213	Landbrugsbygninger	5	0
1230	Havneområder	5	0
1240	Lufthavne	5	0
1300	Råstofgrave, lossepladser og byggepladser	5	0
1410	Byparker og kirkegårde	4	0
1420	Sports- og fritidsanlæg	5	0
1430	Sommerhuse	1	0
2100	Dyrkede landbrugsarealer	4	0
2200	Permanente afgrøder	4	0
2300	Græsmarker	4	0
2400	Blandet landbrugsområder	4	0
3100	Skov	4	0
3200	Krat og/eller urtevegetatione	4	0
3300	Åbne arealer med ringe/ingen vegetation	4	0
4000	Vådområder	4	0
5100	Ferskvand	5	0
5200	Salt- og brakvand	5	0

Kilde: Hansen, 2010.

fra dette år. Aalborg Kommunes planer for boligområder (CORINE land use code 1100) vælges som begrænsning i modellen.

De enkelte cellers tilstand defineres ud fra deres egnethed til at overgå til en anden arealanvendelsestype. Tabel 9.1 viser en oversigt over cellernes tilstand på baggrund af arealanvendelsen. Celletilstanden er defineret ud fra en skala fra 1-5, hvor 1 angiver de primære ekspanderende arealanvendelser, 2 angiver de sekundære arealanvendelser og 3 angiver de tertiære arealanvendelser. 4 angiver arealanvendelser, hvis udbredelse kan reduceres, og dermed kan eksempelvis landbrugsområder inddrages til nye boligområder. 5 angiver stationære arealanvendelser som fx bjerge og søer. Endvidere ses det af tabel 9.1, hvilke arealanvendelsestyper der påvirkes af befolkningsudviklingen. Disse er bymæssig bebyggelse, industri og serviceerhverv.

Alle cellers transitionspotentiale til at ændres til en boligcelle beregnes. Ved denne beregning vægtes alle faktorer med værdien 1. Makrodrivkræfterne, som i dette tilfælde er befolkningsudviklingen, er bestemmende for, hvor antal celler der skal overgå til nye boligområder pr. år. De celler, som har det største transitionspotentiale, ændres først til boligceller. Dette sker ved hjælp af cellular automata. Herefter gentages processen for de andre aktive arealanvendelser, industri-, service- og sommerhusområder.

9.2.3 Scenarie B: Planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder

For at modellere arealanvendelsen i dette scenarie antages det, at planer for bolig- og erhvervsområder er gældende fra 2009, idet planerne fremgår af Kommuneplan 2009. Perspektivområder for bolig- og erhvervsområder kan inddrages på sigt, og der er dermed ikke viden om, hvornår områderne vil blive taget i brug. Det er valgt, at inddrage perspektivområderne i simuleringen fra år 2015.

I ArcGIS udarbejdes to grids med boligområder. Den ene fil udgør data med boligområder (land use code 1100) fra CORINE samt planlagte boligområder i Aalborg Kommune. Den anden fil udgør data med boligområder fra CORINE, planlagte boligområder samt perspektivområder for boligområder. Endvidere udarbejdes to gridfiler med erhvervsområder, hvoraf den ene fil indeholder data med erhvervsområder (land use code 1211 og 1212) fra CORINE samt planlagte erhvervsområder i Aalborg Kommune. Den anden fil indeholder erhvervsområder fra CORINE, planlagte erhvervsområder og perspektivområder for erhvervsområder. Gridfilerne konverteres herefter til ascii-filer ved hjælp af værktøjet Conversion Tool i ArcGIS.

I LUCIA anvendes funktionen Calculate Land Use Simulation, og simuleringens startår indstilles til 2000, mens slutåret indstilles til 2040. Aalborg Kommunes planer for bolig- og erhvervsområder vælges som begrænsninger.

Celletilstand er defineret som i basisscenariet (se tabel 9.1).

Processen for simuleringen af arealanvendelsen foregår som i scenarie A. Transitionspotentialet beregnes for alle celler. Makrodrivkræfterne er bestemmende for, hvor mange celler der skal overgå til en aktiv arealanvendelse pr. år. Celler med det største transitionspotentialt ændres først.

Resultaterne af de to modellerede arealanvendelsesscenarier præsenteres og diskuteres i det følgende kapitel.

10. Vurdering af den fremtidige arealanvendelse i Aalborg Kommune

De to scenarier for arealanvendelse i Aalborg Kommune i år 2040 præsenteres og vurderes i dette kapitel. Vurderingen bygger på en undersøgelse af Aalborg Kommunes planer for nye bolig- og erhvervsområder (scenarie B) sammenholdt med et basisscenarie (scenarie A) for arealanvendelsesudviklingen i 2040. Scenarierne sammenholdes endvidere med de udviklede oversvømmelsesmodeller. På baggrund af de upræcise resultater, som bathtub-metoden medfører, sammenlignes disse ikke med scenarie A og B. Som nævnt i kapitel 8 kan bathtub-metoden kun anvendes til oversvømmelsesscreening, hvor nøjagtige resultater ikke er nødvendige, og da der er interesse i så præcise forudsigelser vedrørende oversvømmelser som muligt, er denne metode fravalgt.

Tabel 10.1 viser udviklingen i arealanvendelsen fra år 2000- 2040 for scenarie A og B. Det ses, at nogle arealanvendelsestyper er ekspanderet og andre er reduceret. Disse udviklinger i arealanvendelsen sammenholdes med oversvømmelsesmodellerne.

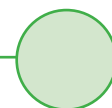
Tabel 10.1 Oversigt over udviklingen i arealanvendelse i perioden 2000-2040 for scenarie A og B. Udviklingerne er opgjort i ha.

	Scenarie A:		Scenarie B:	
	2000	2040	2000	2040
Arealanvendelse				
Bymæssig bebyggelse	7553	7987	7553	7987
Industri	1128	1264	1128	1264
Serviceerhverv	887	957	887	957
Landbrugsbygninger	1560	1548	1560	1546
Havneområder	152	148	152	145
Lufthavne	960	960	960	960
Råstofgrave, lossepladser og byggepladser	681	681	681	681
Byparker og kirkegårde	213	115	213	113
Sports- og fritidsanlæg	281	230	281	232
Sommerhuse	767	777	767	777
Dyrkede landbrugsarealer	58696	58403	58696	58441
Permanente afgrøder	35	35	35	35
Græsmarker	2603	2603	2603	2603
Blandet landbrugsområder	27025	26861	27025	26833
Skov	5268	5268	5268	5268
Krat og/eller urtevegetation	1903	1891	1903	1886
Åbne arealer med ringe/ingen vegetation	15	15	15	15
Vådområder	6314	6314	6314	6314
Ferskvand	687	671	687	671
Salt- og brakvand	37431	37431	37431	37431

Tabel 10.2 Scenarie A. Potentielle oversvømmelsesområder ved en vandstandsstigning på 1,0 m fordelt efter arealanvendelsestype i 2040. Arealerne er opgjort i ha.

<i>Arealanvendelsestype:</i>	<i>Rook's rule (ha):</i>	<i>Queen's rule (ha):</i>	<i>Cost distance (ha):</i>
Bymæssig bebyggelse	19	28	21
Erhvervsområder	10	11	10
Landbrugsbygninger	4	4	0
Havneområder	1	1	5
Lufthavne	15	36	35
Råstofgrave, lossepladser og byggepladser	0	0	2
Byparker og kirkegårde	5	5	6
Sports- og fritidsanlæg	2	2	6
Sommerhuse	2	2	1
Dyrkede landbrugsområder	818	1094	547
Græsmarker	185	185	97
Blandede landbrugsområder	616	649	720
Skov	9	9	8
Vådområder	538	538	620
Salt- og brakvand	174	186	126
I alt	2398	2750	2204

Tabel 10.2 giver indsigt i den arealanvendelse, der i år 2040 vil være i de potentielle oversvømmelsesområder på baggrund af basisscenariet. Vandstandsstigninger på 1 m er beregnet vha. cellular automata – rook's rule og queen's rule samt cost distance-metoden. Af tabellen ses, at de arealanvendelsestyper, som i år 2040 i største omfang kan berøres af oversvømmelser, er dyrkede og blandede landbrugsområder, vådområder, salt- og brakvand samt græsmarker. Arealanvendelsestyper, som berøres mindst af oversvømmelser er råstofgrave, lossepladser og byggepladser, sommerhuse, sports- og fritidsanlæg samt havneområder og landbrugsbygninger. Det ses af tabel 10.2, at anvendelse af queen's rule medfører den største oversvømmelse af forskellige arealanvendelsestyper, herefter følger rook's rule, mens cost distance-metoden oversvømmer det mindste areal.



Tabel 10.3 Scenarie B. Potentielle oversvømmelsesområder ved en vandstandsstigning på 1,0 m fordelt efter arealanvendelsestype i 2040. Arealerne er opgjort i ha.

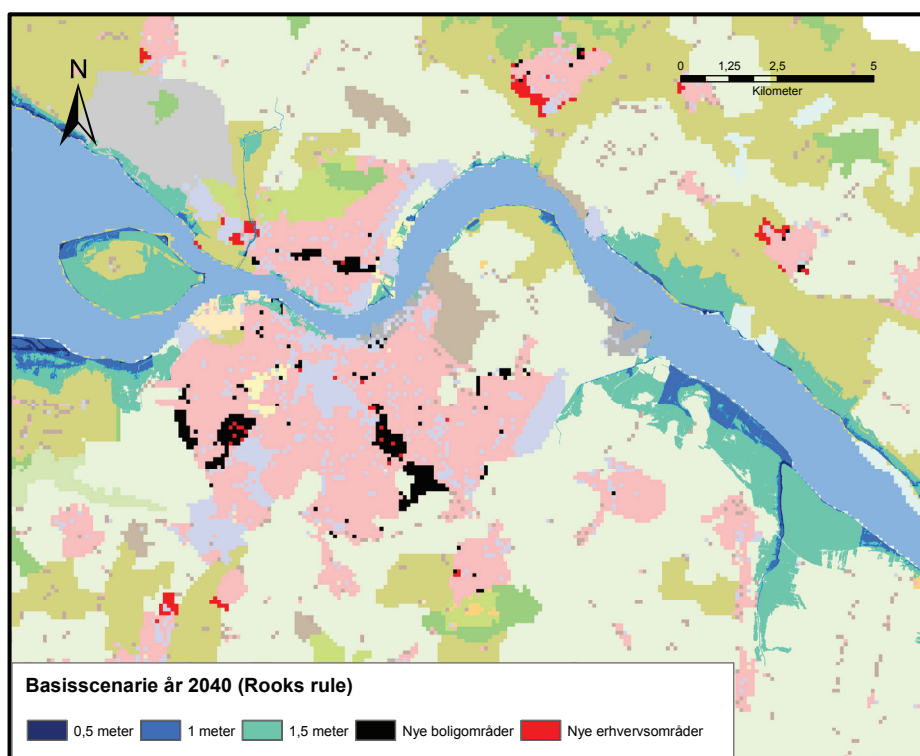
<i>Arealanvendelsestype:</i>	<i>Rook's rule</i> <i>(ha):</i>	<i>Queen's rule</i> <i>(ha):</i>	<i>Cost distance</i> <i>(ha):</i>
Bymæssig bebyggelse	22	31	25
Erhvervsområder	8	9	9
Landbrugsbygninger	4	4	0
Havneområder	1	1	5
Lufthavne	15	36	35
Råstofgrave, lossepladser og byggepladser	0	0	2
Byparker og kirkegårde	5	5	6
Sports- og fritidsanlæg	2	2	6
Sommerhuse	2	2	1
Dyrkede landbrugsområder	818	1094	547
Græsmarker	185	185	97
Blandede landbrugsområder	615	648	717
Skov	9	9	8
Vådområder	538	538	620
Salt- og brakvand	174	186	126
<i>I alt</i>	<i>2398</i>	<i>2750</i>	<i>2204</i>

Tabel 10.3 viser arealanvendelsen i de potentielle oversvømmelsesområder på baggrund af scenarie B. I dette scenarie er de arealanvendelsestyper, som vil være udsat for den største og mindste påvirkning forårsaget af vandstandsstigninger på 1 m, de samme som i basisscenariet. Det ses således, at der ikke er nogen umiddelbar forskel på hvilke arealanvendelsestyper, som påvirkes ved 1 m vandstandsstigning.

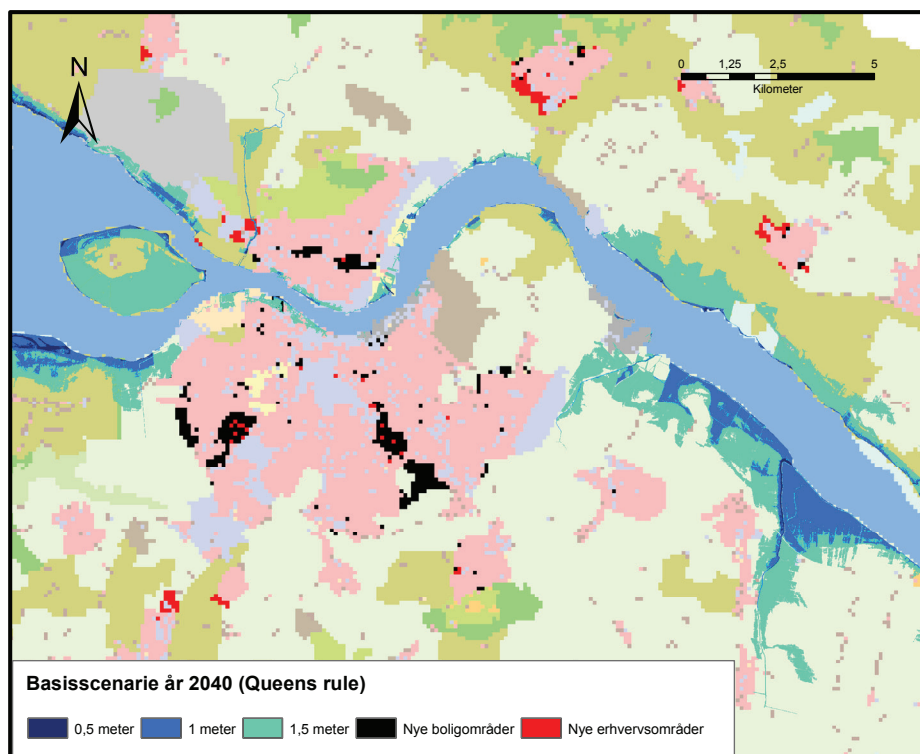
10.1 Oversvømmelse af fremtidige bolig- og erhvervsområder

For at undersøge om opførte bolig- og erhvervsområder i perioden 2000-2040 påvirkes af fremtidige oversvømmelser, sammenlignes bolig- og erhvervsområder fra denne periode i scenarie A og B med oversvømmelsesmodeller udarbejdet ved hjælp af cellular automata (rook's rule og queen's rule) samt cost distance.

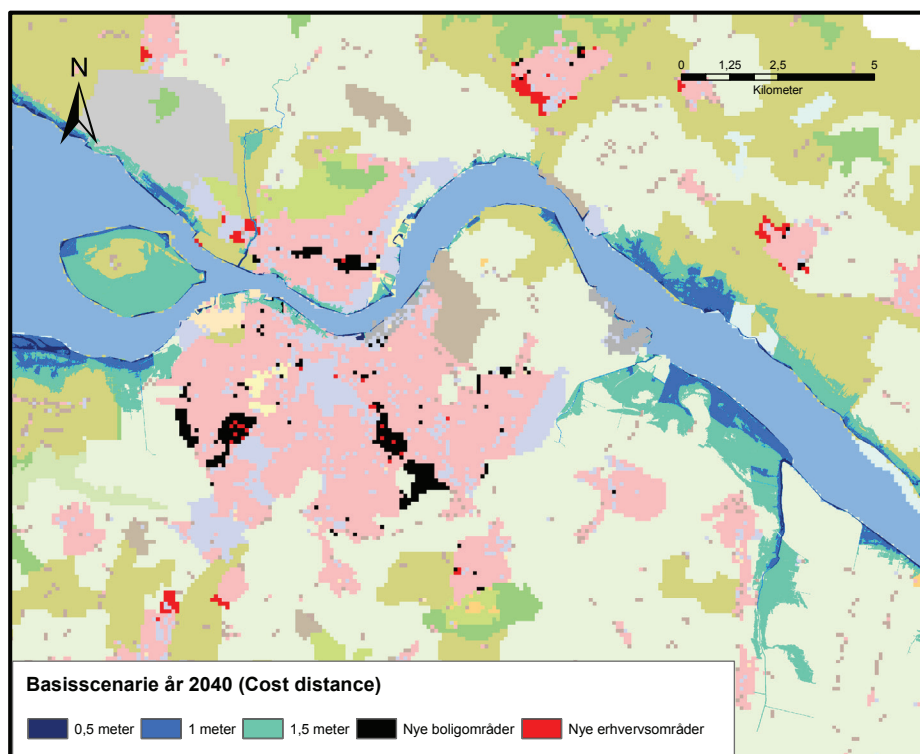
Figur 10.1, 10.2 og 10.3 er grafiske fremstillinger af scenarie A for arealanvendelsen i 2040 omkring Aalborg by samt de tre oversvømmelsesmodeller. På figurerne er nye bolig- og erhvervsområder, udviklet i perioden 2000-2040, markeret med hhv. sort og rødt.



Figur 10.1 Scenarie A. Arealanvendelse i år 2040 samt oversvømmelser omkring Aalborg by. Oversvømmelserne er modelleret vha. cellular automata med rook's rule. Boligområder bygget i perioden 2000-2040 er markeret med sort, og erhvervsområder bygget i samme periode er markeret med rødt. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98, CORINE: European Environment Agency og Danmarks Miljøundersøgelser).



Figur 10.2 Scenarie A. Arealanvendelse i år 2040 samt oversvømmelser omkring Aalborg by. Oversvømmelserne er modelleret vha. cellular automata med queen's rule. Boligområder bygget i perioden 2000-2040 er markeret med sort, og erhvervsområder bygget i samme periode er markeret med rødt. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98, CORINE: European Environment Agency og Danmarks Miljøundersøgelser



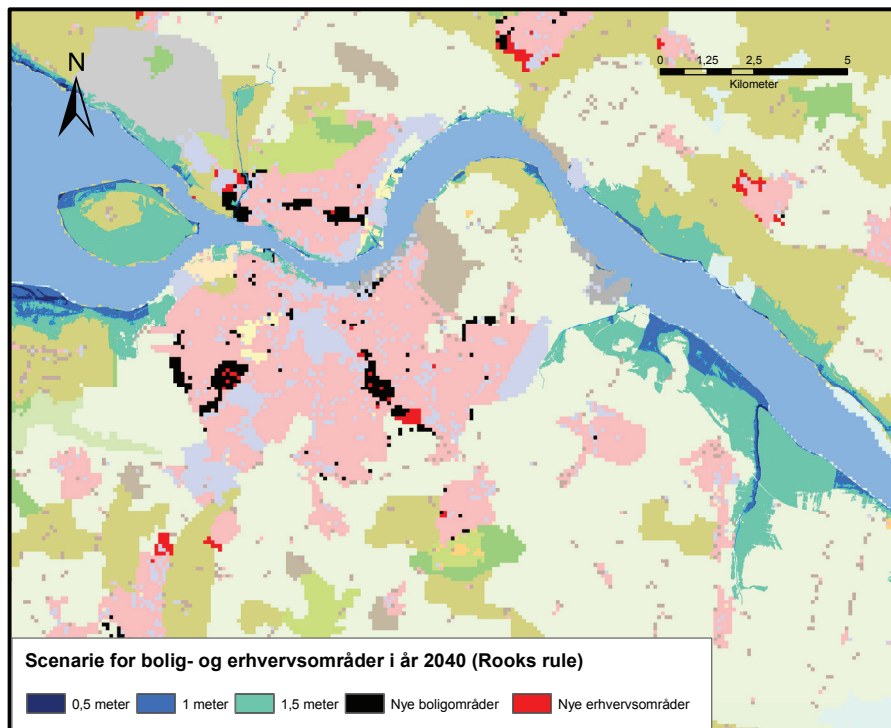
Figur 10.3 Scenarie A. Arealanvendelse i år 2040 samt oversvømmelser omkring Aalborg by. Oversvømmelserne er modelleret vha. cost distance. Boligområder bygget i perioden 2000-2040 er markeret med sort, og erhvervsområder bygget i samme periode er markeret med rødt. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98, CORINE: European Environment Agency og Danmarks Miljøundersøgelser

Tabel 10.4 Scenarie A. Oversigt over nye bolig- og erhvervsområder i potentielle oversvømmelsesområder. Bolig- og erhvervsområderne er udviklet i perioden 2000-2040.

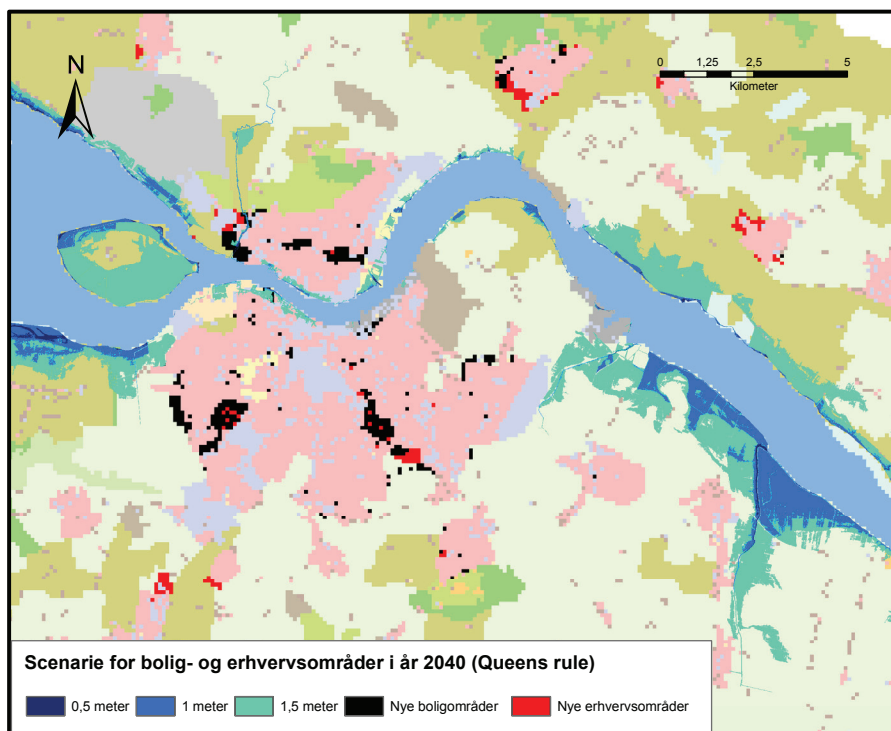
	<i>Antal oversvømmede ha boligområder</i>	<i>Antal oversvømmede ha erhvervsområder</i>
Rook's rule		
0,5 meter	0	0
1 meter	0	1
1,5 meter	7	2
Queen's rule		
0,5 meter	0	0
1 meter	0	1
1,5 meter	7	2
Cost distance		
0,5 meter	0	0
1 meter	0	2
1,5 meter	7	3

Tabel 10.4 viser arealet af de nye bolig- og erhvervsområder opført mellem år 2000 og 2040 på baggrund af scenarie A, som vil være i fare for oversvømmelse ved en vandstandsstigning på henholdsvis 0,5 m, 1,0 m samt 1,5 m. I scenarie A oversvømmes et begrænset antal ha bolig- og erhvervsområder, og de påvirkes først ved 1,5 m vandstandsstigning. Kun enkelte erhvervsområder påvirkes ved 1,0 m og 1,5 m vandstandsstigninger. Der er ikke stor forskel på størrelsen af nye bolig- og erhvervsområder, der oversvømmes i de tre oversvømmelsesmodeller.

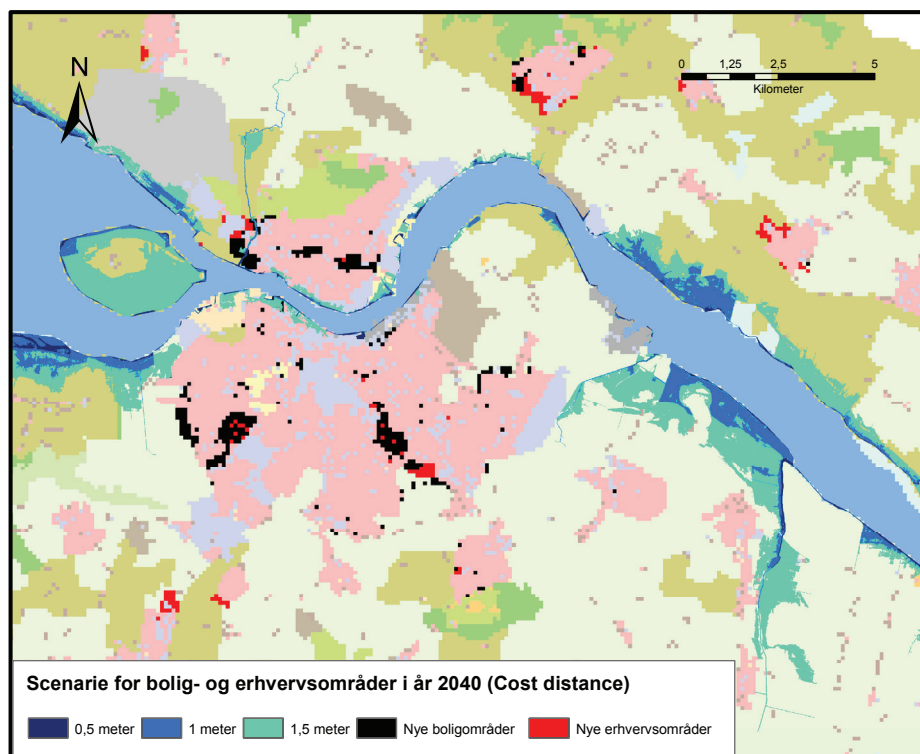
Figur 10.4, 10.5 og 10.6 er grafiske fremstillinger af scenarie B for arealanvendelsen i 2040 omkring



Figur 10.4 Scenarie B. Arealanvendelse i år 2040 samt oversvømmelser omkring Aalborg by. Oversvømmelserne er modelleret vha. cellular automata – rook's rule. Boligområder bygget i perioden 2000-2040 er markeret med sort, og erhvervsområder bygget i samme periode er markeret med rødt. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98, CORINE: European Environment Agency og Danmarks Miljøundersøgelser.



Figur 10.5 Scenarie B. Arealanvendelse i år 2040 samt oversvømmelser omkring Aalborg by. Oversvømmelserne er modelleret vha. cellular automata – queen's rule. Boligområder bygget i perioden 2000-2040 er markeret med sort, og erhvervsområder bygget i samme periode er markeret med rødt. (Copyright DTM og Kort10: Kort & Matrikelstyrelsen G 24-98, CORINE: European Environment Agency og Danmarks Miljøundersøgelser

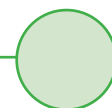


Figur 10.6 Scenarie B: Arealanvendelse i år 2040 samt oversvømmelser omkring Aalborg by. Oversvømmelserne er modelleret vha. cost distance. Boligområder bygget i perioden 2000-2040 er markeret med sort, og erhvervsområder bygget i samme periode er markeret med rødt.

Aalborg by samt de tre oversvømmelsesmodeller. På figurerne er nye bolig- og erhvervsområder, udviklet i perioden 2000-2040, markeret med hhv. sort og rødt.

I scenarie B påvirkes nye erhvervsområder fra perioden 2000-2040 ikke af potentielle oversvømmelser på op til 1,5 m (se tabel 10.5). Derimod påvirkes nye boligområder allerede ved 0,5 m vandstandsstigning i alle tre oversvømmelsesmodeller (dog kun 1 ha), og i takt med stigende vandstand forøges størrelsen af det påvirkede areal. De nye boligområder i scenarie B, som påvirkes af vandstandsstigninger på 1,5 m, ses af figur 10.7. Figuren inkluderer boligområder, som kan være i fare for oversvømmelse fra alle tre oversvømmelsesmodeller.

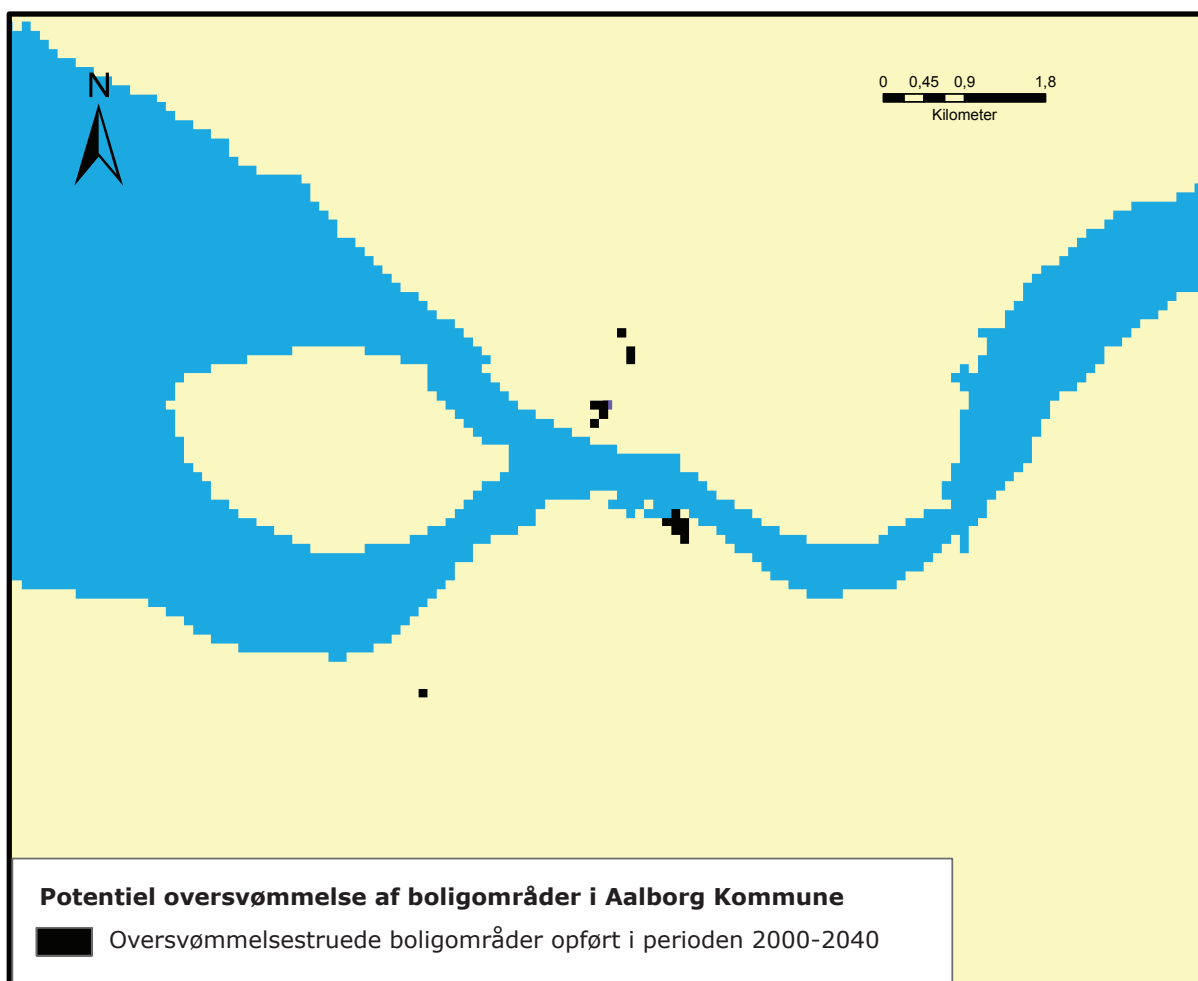
På baggrund af Aalborg Kommunes planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder og simulering af arealanvendelsen i år 2040 viser det sig, at kun et begrænset antal af de boligområder, som udvikles i perioden 2000-2040, vil blive påvirket af vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m. Det er dog vigtigt at holde for øje, at der i de tre oversvømmelsesmodeller ikke indgår et tidsperspektiv, og derfor vil der ikke nødvendigvis forekomme en vandstandsstigning på 0,5 m, 1,0 m eller 1,5 m i år 2040. Derfor berøres nye bolig- og erhvervsområder ikke nødvendigvis i år 2040, men i takt med at vandstandsstigningerne tiltager, vil områderne være i fare for oversvømmelse. Det er endvidere væsentligt at være opmærksom på, at denne model ikke er et perfekt billede af den fremtidige udvikling, men udelukkende en modellering af hvordan fremtiden muligvis vil kunne se ud (jf. kapitel 4).



Tabel 10.5. Scenarie B. Oversigt over nye bolig- og erhvervsområder i potentielle oversvømmelsesområder. Bolig- og erhvervsområderne er udviklet i perioden 2000-2040.

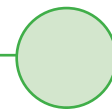
<i>Antal oversvømmede ha boligområder</i>		<i>Antal oversvømmede ha erhvervsområder</i>
Rook's rule		
0,5 meter	1	0
1 meter	2	0
1,5 meter	11	0
Queen's rule		
0,5 meter	1	0
1 meter	2	0
1,5 meter	11	0
Cost distance		
0,5 meter	1	0
1 meter	5	0
1,5 meter	14	0

Ud fra scenarie B kan Aalborg Kommunes planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder vurderes i forhold til fremtidige oversvømmelser. Ingen af oversvømmelsesmodellerne medfører oversvømmelser af store boligområder, og slet ingen erhvervsområder oversvømmes i nogen af modellerne. Flest oversvømmede boligområder forekommer ved anvendelse af cost distance ved en vandstandsstigning på 1,5 m, og i dette tilfælde er 14 ha nye boligområder i risiko for oversvømmelse. Ved rook's rule og queen's rule oversvømmes 11 ha boligområder ved 1,5 m vandstandsstigning, hvilket vil sige, at det i undersøgelsen af oversvømmede boligområder er cost distance, som skiller sig ud.



Figur 10.7 Boligområder i Aalborg Kommune, udviklet i perioden 2000-2040, som kan være i fare for oversvømmelse. Oversvømmelser er baseret på vandstandsstigninger på op til 1,5 m beregnet vha. cellular automata (rook's rule og queen's rule) samt cost distance. (CORINE: European Environment Agency og Danmarks Miljøundersøgelser).

Sammenlignes scenarie A (basisscenarie) og B, ses det, at Aalborg Kommunes planer medfører, at ingen erhvervsområder fra perioden 2000-2040 vil påvirkes af fremtidige vandstandsstigninger i modsætning til scenarie A, hvori 2-3 ha erhvervsområder kan påvirkes ved 1,5 m vandstandsstigning. Dog vil større boligområder påvirkes som følge af kommunes planer for fremtidige boligområder i forhold til basisscenariet. Til trods for at de potentielt oversvømmede boligområder udgør begrænsede arealer i scenarie B, kan det medføre store økonomiske omkostninger og planlægningsmæssige udfordringer, hvis der bygges boliger i områderne. Endvidere kan det som nævnt medføre store personlige omkostninger for de, som bor i områder, der oversvømmes. Det anbefales derfor Aalborg Kommune at undlade at inddrage de områder, som fremgår af figur 10.7, i planer for fremtidige boligområder, således ovenstående problemstillinger undgås. Aalborg Kommunes planer for fremtidige erhvervsområder er hensigtsmæssige i forhold til fremtidige vandstandsstigninger på op til 1,5 m.



10.2 Vurdering af planlægningsværktøjerne

LUCIA er således et anvendeligt værktøj i planlægningsprocesser og kan understøtte de beslutninger, som træffes i forbindelse med planlægning i kommuner. For at udføre en bæredygtig planlægning af en kommunes arealer er det afgørende, at der tages højde for mulige fremtidige klimaændringer og vandstandsstigninger, så store og unødvendige omkostninger undgås, fx i forbindelse med oversvømmede bebyggelser. Planlæggere må således udpege de områder, som er sårbare over for vandstandsstigninger, hvilket vil sige de områder, som på nuværende tidspunkt ligger under havniveau, og de områder som i fremtiden vil komme til at ligge under havniveau som følge af vandstandsstigninger. Hermed kan muligheden for at tilpasse områderne til vandstandsstigningerne vurderes, og det kan besluttet, i hvilke områder der skal indføres beskyttelsestiltag, i hvilke områder visse arealanvendelser skal forbydes, og i hvilke områder hyppigere oversvømmelser skal accepteres. LUCIA gør det lettere for planlæggere og beslutningstagere at inddrage fremtidsperspektivet i planlægningsprocesser. Dette kan mindske usikkerheden i beslutningstagningen, idet sådanne arealanvendelsesmodeller kan øge forståelsen af den fremtidige arealanvendelse (Hansen, 2010). På denne måde kan planlægningen forhindre uhensigtsmæssige byggeprojekter, og det bliver muligt at tage højde for vandstandsstigninger og heraf følgende oversvømmelser i planlægning.

Oversvømmelsesmodeller og arealanvendelsesscenarier kan endvidere være anvendelige værktøjer i interessentinddragelse, idet de kan give et fælles udgangspunkt for dialog. Det kan være fordelagtigt, at interessenter har en konkret model at diskutere en problemstilling som vandstandsstigninger ud fra. Det vil sige, at de udarbejdede modeller kan være anvendelige i en dialogpræget planlægningsproces. Modellerne kan give anledning til en dialog om, hvilke konsekvenser der kan forekomme i de områder, som interessenterne har interesse i, og hvilken arealanvendelse der kan være i områderne i fremtiden. Det kan endvidere være interessant at høre interessenternes bud på, hvilke områder der skal prioriteres højt i forhold til beskyttelse mod oversvømmelser, og hvilke tiltag der skal sættes på. Modellerne kan skabe en fælles forståelsesramme blandt interessenter i en planlægningssituation, hvilket kan være medvirkende til at skabe en forståelse for andre interessenter holdninger. Eksempelvis kan en model over oversvømmede arealanvendelser give en forståelse for, hvordan andre interessenter påvirkes af oversvømmelser, hvilket muligvis kan være medvirkende til, at de enkelte interessenter ønsker at medvirke til en kompromisløsning, som også tilgodeser andre interessenter. Det vurderes således, at både oversvømmelsesmodeller og arealanvendelsesscenarier er særdeles velegnede planlægningsværktøjer, og det kan være fordelagtigt at kombinere disse.

11. Konklusion

I forbindelse med en øget opmærksomhed om tilpasning til klimaændringer har den danske regering udarbejdet en *Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark*, hvori det tilskyndes, at klimaændringer, herunder vandstandsstigninger, integreres i planlægning og udvikling, og strategien lægger vægt på rettidig ad hoc tilpasning. Fra EU-niveau er den danske regering underlagt *EU's direktiv om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser*, hvorefter det fremgår, at medlemslande skal foretage en foreløbig vurdering af oversvømmelsesrisiko, udarbejde kort, som viser fare for oversvømmelser i oversvømmelsestruede områder samt udarbejde risikostyringsplaner for fremtidige oversvømmelser. Et sådan direktiv har ikke kun betydning for den danske regering, men er også vigtig for danske kommuner, idet der skal tages højde for potentielle oversvømmelser i den kommunale planlægning.

Som planlægningsværktøj til tilpasning til fremtidige vandstandsstigninger og oversvømmelser er der i denne rapport udviklet fire oversvømmelsesmodeller i GIS. Modellerne er baseret på hhv. bathtub, cellular automata med rook's rule og queen's rule samt cost distance. Disse modeller kan beregne og visualisere oversvømmelser ved vandstandsstigninger på 0,5 m, 1,0 m og 1,5 m i Aalborg Kommune. Ved anvendelse af oversvømmelsesmodellerne er det vigtigt at være bevidst om, at hver af modellerne er forbundet med forskellige styrker og svagheder. Bathtub er den mest simple af de undersøgte metoder, men også den metode, som er mindst anvendelig som planlægningsværktøj, idet metoden ikke inddrager kriteriet om "forbindelse til vand". Cellular automata ved rook's rule og queen's rule er de mest komplicerede metoder, idet det bl.a. er nødvendigt at anvende scripting i Python samt udarbejde og gennemskue komplicerede overgangsregler. Dog vurderes cellular automata-metoderne som værende de mest egnede som planlægningsværktøjer, idet metoderne forudsætter, at områder kun kan oversvømmes, hvis de ligger i forbindelse med hav, fjord eller i forvejen oversvømmede områder. Endvidere er det muligt vha. cellular automata at vælge hvilket naboområde (rook's og queen's rule), som skal indgå i modellen. Rook's rule underestimerer resultatet, og queen's rule overestimerer resultatet. Ved sammenligning af resultater modelleret vha. rook's rule og queen's rule kan det vurderes, hvilke områder som oversvømmes i begge modeller, og hvor der således er høj risiko for oversvømmelse. I de områder, som kun oversvømmes i den ene model, kan der være større usikkerhed om oversvømmelsesrisikoen, men det er værdifuld viden, som kan medvirke til at skabe opmærksomhed om disse områder. Der er foretaget en undersøgelse af betydningen af valget af naboområde (rook's rule og queen's rule) og cellestørrelse (2 m og 5 m). Undersøgelserne påviser, at valget af naboområde har større betydning for de udarbejdede modeller, end valget af cellestørrelsen. Cost distance er forholdsvis simpel at anvende og udvikle, men metoden muliggør ikke et valg af hvilket naboområde, som anvendes i modellen. På baggrund af de undersøgte og udviklede modeller anbefales det således at anvende oversvømmelsesmodeller baseret på cellular automata med rook's rule og queen's rule som planlægningsværktøjer til klimatilpasning.

I forbindelse med udarbejdelse af Aalborg Kommunes klimastrategi, har COWI udarbejdet en oversvømmelsesscreening af kommunens arealer. Det er vanskeligt at foretage en vurdering af kvaliteten af denne screening, da der ikke er kendskab til, hvordan denne er udarbejdet mht. metode og data. Dog oversvømmer screeningen mindre arealer ved 1 m vandstandsstigning end cellular automata modellerne (rook's og queen's rule) samt cost distance-metoden. Den største lighed fremstår ved sammenligning med cost distance-metoden.

Planlægning er en fremadrettet proces og for at kunne anvende oversvømmelsesmodellerne til planlægning i Aalborg Kommune, sammenlignes de udviklede oversvømmelsesmodeller bl.a. med et scenarie for den fremtidige arealanvendelse i Aalborg Kommune i år 2040, som er modelleret på baggrund af kommunens planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder. Arealanvendelsesmodelleringen er udarbejdet vha. planlægningsværktøjet Land Use Change Impact Analysis (LUCIA). På baggrund af modelleringen af arealanvendelsen og de udviklede oversvømmelsesmodeller vil ingen erhvervsbygninger opført i perioden 2000-2040 berøres af potentielle oversvømmelser ved vandstandsstigninger på op til 1,5 m. Op mod 14 ha nye boligområder opført i perioden 2000-2040 kan berøres af fremtidige oversvømmelser ved brug af cost distance, mens rook's rule og queen's rule hver oversvømmer 11 ha nye boligområder. Det anbefales Aalborg Kommune at undlade at udvikle nye boligområder i disse oversvømmelsestruede områder, idet dette bl.a. vil kunne medføre økonomiske og planlægningsmæssige udfordringer.

12. Perspektivering

Gennem denne rapport er det blevet beskrevet, hvordan oversvømmelsesmodeller kan udarbejdes ved hjælp af GIS, og modellernes styrker og svagheder er blevet vurderet og analyseret. Derudover er resultaterne af oversvømmelsesmodelleringerne blevet analyseret i sammenhæng med en modellering af den fremtidige arealanvendelse udviklet på baggrund af Aalborg Kommunes planer for fremtidige bolig- og erhvervsområder. Men hvordan kan sådanne modeller og scenarier anvendes og implementeres i planlægningen i Aalborg Kommune? Den virkelige værdi af modeller og scenarier kommer først til udtryk i det øjeblik, de bliver inddraget i planlægningen. Som nævnt i afsnit 4.3 bringer scenariebrugeren relevans til scenarierne. Dette gælder også for modeller.

Oversvømmelsesmodellerne kan anvendes til planlægningen af, om der skal gøres nogle konkrete tiltag i tilpasningen til vandstandsstigninger i et geografisk område. På baggrund af områdets værdier og de fremtidige planer for området kan det vurderes, om området kan og bør beskyttes af diger, eller om det skal accepteres, at området kan blive præget af hyppigere eller konstant oversvømmelse. Aalborg Kommune afholdte den 23. maj 2011 et dialogmøde om et udkast til en klimastrategi, som skal godkendes af byrådet, hvor en række forskellige interessenter deltog. Diger var et af de emner, som blev diskuteret, og det fremgik af diskussionen, at en del af de medarbejdere fra Aalborg Kommune, som deltog på mødet, og som er involveret i udarbejdelsen af klimastrategien, ikke mente, at det vil være fordelagtigt at opføre flere diger end højst nødvendigt. En sådan holdning ses ligeledes hos Dragør Kommune. I Dragør Kommune vil man ikke "føre en ufølsom digepolitik" (Klimatilpasning.dk, 2009c). Dragør Kommune ligger meget lavt i terræn, ligesom det er tilfældet for Aalborg Kommune, og er derfor udsat i forbindelse med vandstandsstigninger. Særligt naturområder er udsatte i Dragør Kommune. I stedet for at opføre nye diger er det planen at lade naturen tilpasse sig klimaændringerne. Tanken er at lade den biodiversitet, som findes på de nuværende strandenge, vandre længere ind i landet som følge af vandstandsstigninger. Dette vil dog betyde, at nogle landmænd i området må opgive nogle af deres marker. En anden tanke er at opføre diger, som tager hensyn til strandengens natur, som er afhængig af, at der af og til forekommer oversvømmelser. Dette kan fx ske ved at opføre diger, som ved ekstremt højvande vil blive oversvømmet (Klimatilpasning.dk, 2009c). Aalborg Kommune er således også skeptiske over for at opføre en lang række diger. På dialogmødet for udkastet til Aalborg Kommunes klimastrategi blev det derfor diskuteret, om der kunne oprettes natur, som fx vådområder, i de områder, som jævnligt vil blive oversvømmede.

Vandstandsstigninger kan have en stor indflydelse på plante- og dyrelivet i kystzonen. Plantesamfundene langs kysterne kan være i risiko for at "drukne", når vandet stiger, hvilket kan ødelægge yngle- og rasteområder for nogle fuglearter. Vandstandsstigninger kan medføre en forsvinden af mange af de mest lavvandede havområder, som biologisk set hører til de mest produktive områder og er levested for fisk, skaldyr og vandfugle. Gennem planlægning er det dog muligt til trods for

vandstandsstigninger at bevare en stor del af de naturværdier, der findes langs de danske kyster. Dette kan eksempelvis ske gennem etablering af erstatningsbiotoper, hvilket fx kan ske gennem naturgenopretningsprojekter på nogle nærtliggende arealer. Disse arealer kan eksempelvis være landbrugsarealer uden væsentlig jordbrugsmæssig interesse og arealer uden bebyggelse, tekniske anlæg m.m. (Klimatilpasning.dk, 2011d). Etablering af naturområder vil således skulle ske på bekostning af andre arealanvendelser som eksempelvis landbrug. Det kan have konsekvenser for landbruget, som i forvejen indgår i kampen om arealerne i det åbne land, hvis eksisterende landbrugsområder skal omlægges til naturområder. Derudover kan landbrugsarealer blive udsat for oversvømmelse og vandlidende jorder som følge af vandstandsstigninger, hvilket kan betyde at nogle arealer ikke længere vil kunne anvendes til landbrug. Som følge af en sådan udvikling vil det i nogle områder kunne være hensigtsmæssigt at ekstensivere driften ved eksempelvis at undgå dræn eller at undgå at dæmme op for vandet (Klimatilpasning.dk, 2009d). En sådan løsning kan således svare til Aalborg Kommunes ide om at skabe natur i de områder, som kan blive udsat for jævnlige oversvømmelser. Under dialogmødet om Aalborg Kommunes udkast til en klimastrategi blev det diskuteret, hvordan landbrugets interesser kan tilgodeses ved de øgede vandstande. Det blev diskuteret, om jorder med den største bonitet kan og bør beskyttes mod vandstandsstigninger og ændret arealanvendelse. Men det kan diskuteres, om bonitet er den faktor, som har størst betydning for landbruget i dag, og en overvejelse kan bestå i, om det i stedet for jorder med den største bonitet kan være de områder, som er udpeget som særligt værdifulde landbrugsområder i kommuneplanen, som skal beskyttes (se Christiansen og Poulsen, 2010). Det må antages, at sådanne områder er udpeget på baggrund af de faktorer, som har betydning for landbruget. Ovenstående overvejelser viser et (lille) udsnit af de problemstillinger, som opstår i forbindelse med vandstandsstigninger og tilpasning hertil. Tilpasning til klimaændringer er en særdeles vigtig opgave, som giver anledning til nogle interessante og komplekse problemstillinger.

Litteraturliste

Arctic Council (2011). *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic - Executive summary*, Norway: AMAP secretariat

Bach, H., Gudmundsson, H., Schou, J. S., Münier, B., Illerup, J. B. (2005). *Miljøscenarier*, (1. udgave). Forlaget Hovedland.

Balstrøm, T., Jacobi, O., Bodum, L. (2006). *Bogen om GIS og geodata*, (1. udgave), København: Forlaget GIS & Geodata

Benenson, I. & Torrens, P. (2004). *Geosimulation – Automata-based modeling of urban phenomena*. England: John Wiley & Sons Ltd.

Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley and A. Unnikrishnan, 2007: Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Chakhar, S. & Martel, J-M. (2003). Enhancing Geographical Information Systems Capabilities with Multi-Criteria Evaluation Functions. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 7(2), 47-71

Chang, H., Li, F., Li, Z., Wang, R., Wang, Y. (2011). Urban landscape pattern design from the viewpoint of networks: A case study of Changzhou city in Southeast China. *Ecological Complexity* 8, 51-59

Christiansen, M. & Poulsen, H. (2010). *Særligt værdifulde landbrugsområder i Rebild Kommune*. Praktikprojekt udarbejdet ved Rebild Kommune. Rapporten findes på bilagsCD.

Danmarks Statistik (2011a). *Areal fordelt efter kommune/region*. Lokaliseret (19. maj 2011) på World Wide Web: <http://www.statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1280>

Danmarks Statistik (2011b). *Folketal 1. januar, 1. april, 1. juli og 1. oktober efter kommune/region, køn, alder, civilstand, herkomst, oprindelsesland og statsborgerskab*. Lokaliseret (22. marts 2011) på World Wide Web: <http://www.statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1280>

DMI (2010, 30. juni). *Ændringer i Danmark*. Lokaliseret (25. maj 2011) på World Wide Web: http://www.dmi.dk/dmi/index/klima/fremtidens_klima-2/aendringer_i_danmark.htm

Eastman, J.R., Jin, W., Kyem, P.A.K., Toledano, J. (1995). Raster procedures for multicriteria/multi-objective decisions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61, 539–547

Energistyrelsen (2008). *Strategi for tilpasning til klimaændringer i Danmark*. Lokaliseret (3. marts 2011) på World Wide Web: http://www.kemin.dk/da-DK/KlimaogEnergipolitik/DanskKlimaogEnergipolitik/Klimatilpasningsstrategien/Documents/klimatilpasningsstrategi_03032008.pdf

Europaparlamentet og Rådet (2007). *Europa-parlamentets og Rådets direktiv 2007/60/EF af 23. oktober 2007 om vurdering og styring af risikoen for oversvømmelser*

European Environment Agency (2007). *Spatial and temporal coverage of the Corine land cover 1990 and 2000 projects*. Lokaliseret (6. Juni 2011) på World Wide Web: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database>

European Environment Agency (2008). *Impacts of Europe's changing climate - EEA report no. 4*. Lokaliseret (24. februar 2011) på World Wide Web: http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_4

European Environment Agency (u.d.a). *Corine land cover 2000 (CLC2000) seamless vector database*. Lokaliseret (6. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-seamless-vector-database>

European Environment Agency (u.d.b). *Corine land cover 2000 (CLC2000) 100 m – version 9/2007*. Lokaliseret (7. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-clc2000-100-m-version-9-2007>

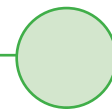
Giere, R. N. (2004). How Models Are Used to Represent Reality. *Philosophy of Science* 71(5), 742-752

Greenberg, J. A., Rueda, C., Hestir, E. L., Santos, M. J., Ustin S. L. (2011). Least cost distance analysis for spatial interpolation. *Computer & Geosciences* 37, 272-276

Gudmundsson, H. (2011). Analysing Models as a Knowledge Technology in Transport Planning, *Transport reviews* 31(2), 145-159

Hansen, H. S. (2005), GIS-based Multi-Criteria Analysis of Wind Farm Development, i Hauska, H. & Tveite, H. (red), *ScanGis (2005): Proceedings of the 10th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science*, Department of Planning and Environment, 75-87

Hansen, H. S. (2008a). The impact of climate change on future land-use in a coastal zone planning context, *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2008. Proceedings*. 1, Lecture Notes in Computer Science, nr. 5072, Springer, 245-257.



- Hansen, H. S. (2008b). LUCIA - A Tool for Land Use Change Impact Analysis, *Kart og Plan* (1).
- Hansen, H. S. (2009). Geografiske analyser og modeller i klimatilpasningen, *Landinspektøren* (3a), 24-25
- Hansen, H.S. (2010) Modelling the future coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise. *Landscape Urban Plan*
- IPCC (2007). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ivner, J., Björklund, A. E., Dreborg, K-H., Johansson, J., Viklund, P., Wiklund, H. (2010). New tools in local energy planning: experimenting with scenarios, public participation and environmental assessment, *Local Environment* 15(2), 105-120
- Klima- og Energiministeriet (2011a, 23. marts). *Klimatilpasningsportalen*. Lokaliseret (24. maj 2011) på World Wide Web: <http://www.kemin.dk/da-DK/KlimaogEnergipolitik/danmark/klimatilpasning/klimatilpasningsportalen/Sider/Forside.aspx>
- Klima- og Energiministeriet (2011b). *Energistrategi 2050 – fra kul, olie og gas til grøn energi*. Lokaliseret (2. marts 2011) på World Wide Web: <http://www.kemin.dk/Documents/Klima-%20og%20Energipolitik/Energistrategi%202050%20-%20final.pdf>
- Klimatilpasning.dk (2009a, 9. september). *Klimascenarier for Danmark*. Lokaliseret (25. maj 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-dk/service/klima/sider/klimascenarierdanmark.aspx>
- Klimatilpasning.dk. (2009b, 19. november). *Fremtidens havniveau*. Lokaliseret (26. april 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-DK/service/Klima/KlimaaendringeriDanmark/vandstandihavet/Sider/Forside.aspx>
- Klimatilpasning.dk (2009c, 4. november). *Diger gør det ikke alene*. Lokaliseret (29. maj 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-dk/service/cases/sider/digergoerdetikkealene.aspx>
- Klimatilpasning.dk (2009d, 25. november). *Øget nedbør er en udfordring på lavtliggende arealer*. Lokaliseret (30. maj 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-DK/Landbrug/Arealanvendelse/Sider/Forside.aspx>

Klimatilpasning.dk (2011a, 21. februar). *Havspejlsstigninger skal tænkes ind i planlægningen af kystnære og lavtliggende områder*. Lokaliseret (23. maj 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-DK/Plan/Havstigning/Sider/Forside.aspx>

Klimatilpasning.dk (2011b, 15. april). *FNs klimascenarier*. Lokaliseret (2. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-dk/service/klima/klimascenarier/Sider/Forside.aspx>

Klimatilpasning.dk (2011c, 15. marts). *Danmarks fremtidige klima*. Lokaliseret (25. maj 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-dk/service/klima/klimaaendringeridanmark/Sider/Forside.aspx>

Klimatilpasning.dk (2011d, 15. april). *Stigende vandstand vil ændre kystnaturen*. Lokaliseret (30. Maj 2011) på World Wide Web: <http://klimatilpasning.dk/DA-DK/NATUR/KYSTNATUR/Sider/Forside.aspx>

Kommunernes Landsforening (2009a). *Kommunernes Klimaudspil – sammen tager vi udfordringen op – Del 1*. 1. udgave. Lokaliseret (28. marts 2011) på World Wide Web: http://www.kl.dk/ImageVault/Images/id_39226/ImageVaultHandler.aspx

Kommunernes Landsforening (2009b). *Kommunernes Klimaudspil – opgaverne fordeles – Del 2*. 1. udgave. Lokaliseret (28. marts 2011) på World Wide Web: http://www.kl.dk/ImageVault/Images/id_39227/ImageVaultHandler.aspx

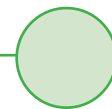
Kommunernes Landsforening (u.d). *Klimatilpasning*. Lokaliseret (28. marts 2011) på World Wide Web: <http://www.kl.dk/Fagomrader/Teknik-og-miljo/Klima/Klimatilpasning/>

Kommunernes Landsforening & Regeringen (2010). *Klimatilpasning, energibesparelser og kommunale energiplaner – Rapport fra arbejdsgruppe ml. KL og regeringen*. Lokaliseret (28. Marts 2011) på World Wide Web: http://www.kl.dk/ImageVault/Images/id_42476/ImageVaultHandler.aspx

Kort og Matrikelstyrelsen (2006). *Kort10 – en del af den geografiske infrastruktur*. Produktblad. Lokaliseret (6. april 2011) på World Wide Web: <http://www.kms.dk/NR/rdonlyres/4C2228EB-6D5D-46ED-9E58-52C89755B417/0/kort10.pdf>

Kort og Matrikelstyrelsen (2011). *Danmarks Højdemodel, DHM/Terræn: Data version 1.0 - December 2009*. Lokaliseret (31. marts 2011) på World Wide Web: http://www.kortforsyningen.dk/Omdata/pdf/DK_DHM_Terraen_Januar_2011.pdf

Langlois, P. (2010). Cellular Automata for Modeling Spatial Systems, in *The Modeling Process in Geography: From Determinism to Complexity* (ed Y. Guermond), ISTE, London, UK, John Wiley & Sons



Miljøministeriet (2006). *Oversigt over statslige interesser i kommuneplanlægningen – 2009*. Lokaliseret (15. april 2011) på world wide web: <http://www2.sns.dk/udgivelser/2006/87-7279-752-5/pdf/87-7279-752-5.pdf>

Miljøministeriet (2009, 3. november). *Bekendtgørelse af lov om planlægning*. Lokaliseret (20. maj 2011) på World Wide Web: <https://www.retsinformation.dk/forms/r0710.aspx?id=127131&exp=1>

Miljøministeriet (2011). *Oversigt over statslige interesser i kommuneplanlægningen 2013*. Lokaliseret (15. april 2011) på World Wide Web: <http://www.naturstyrelsen.dk/NR/rdonlyres/EF1D9E38-BDAF-4B78-9F54-4E49DD1D8B67/121225/Kommune15270211.pdf>

Rokkjær, M. H. (2011) Email-korrespondance med Morten Hauge Rokkjær fra Teknik- og Miljøforvaltningen i Aalborg Kommune

Nakicenovic, N. et al. (2000). *Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, U.K. Lokaliseret (5. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>

Tress, B. & Tress, G. (2003). Scenario visualisation for participatory landscape planning – a study from Denmark, *Landscape and Urban Planning* 64, 161-178

Olsson, J. A. & Andersson, L. (2007). Possibilities and problems with the use of models as a communication tool in water ressource management. *Water Resources Management* 21(1), 97-110

Poulter, B. & Halpin, P. N. (2007). Raster modeling of coastal flooding from sea-level rise. *International Journal of Geographic Information Sciences* 22(2), 167-182

Smith, M. J. D, Goodchild, M. F, Longley, P. A. (2007). *Geospatial Analysis: A Comprehensive Guide to Principles, Techniques and Software Tools*, (2. udgave), London: Troubador

Stjernholm, M. (2009). *CORINE Land Cover 2006. Final report on interpretation of CLC2006 in Denmark*. National Environmental Research Institute, Aarhus University.

Videncenter for Klimatilpasning (u.d.). *Ringe i vandet – Kommunikationsstrategi for Klimatilpasning.dk 2009-2010*. Lokaliseret (6. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-dk/info/omportalen/kommunikationsstrategi/documents/kommunikationsstrategi%20for%20klimatilpasningsportalen.pdf>

White, R. & Engelen, G. (1997). Use of constrained cellular automata for high-resolution of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(3), 323-343.

Xiang, W-N. & Clarke, K.C. (2003). The use of scenarios in land-use planning. *Environment and Planning B: Planning and Design* 30, 885-909

Aalborg Kommune (2009, 23. november). *Byomdannelse – byudvikling*. Lokaliseret (14. maj 2011) på World Wide Web: http://aakwww.aalborgkommune.dk/Kommuneplan/Hovedstruktur/0-02_Byomdannelse+-+byudvikling.htm

Aalborg Kommune (2011a). Klimastrategi 2011-2015 – Forebyggelse, Udkast, bilag 1. Aalborg Kommune.

Aalborg Kommune (2011b). Klimastrategi 2011- 2015 – Tilpasning, Udkast, bilag 2. Aalborg Kommune.

Figurliste

Figur 1.1 Egen produktion

Figur 2.1 Egen produktion – Copyright Kort- og Matrikelstyrelsen G 24-98

Figur 2.2 Egen produktion – Copyright European Environment Agency & Danmarks Miljøundersøgelser

Figur 2.3 Udarbejdet af COWI for Aalborg Kommune

Figur 4.1 Nakicenovic, N. et al. (2000). *Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, U.K. Lokaliseret (5. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm>

Figur 6.1 Egen produktion

Figur 6.2 Efter ESRI (2009, 24. april) *Reclass by individual values*. Lokaliseret (7. juni 2011) på World Wide Web: http://webhelp.esri.com/arcgisDEsktop/9.3/index.cfm?TopicName=Reclass_by_individual_values

Figur 6.3 Egen produktion

Figur 6.4 Christiansen, M. & Poulsen, H. (2010a). *Projektfremlæggelse – Problemløsning i planlægningen af skovrejsning*. Slides findes på bilagsCD.

Figur 6.5 Egen produktion

Figur 6.6 Egen produktion

Figur 6.7 Christiansen, M. & Poulsen, H. (2010b). *Særligt værdifulde landbrugsområder i Rebild Kommune*. Praktikprojekt udarbejdet ved Rebild Kommune

Figur 6.8 Egen produktion

Figur 7.1 Egen produktion

Figur 7.2 Egen produktion

Figur 7.3 Egen produktion

Figur 7.4: Egen produktion

Figur 8.1 Egen produktion

Figur 8.2 Egen produktion

Figur 8.3 Egen produktion

Figur 8.4 Egen produktion

Figur 8.5 Egen produktion

Figur 8.6 Egen produktion

Figur 8.7 Egen produktion

Figur 8.8 Egen produktion

Figur 8.9 Egen produktion

Figur 8.10 Egen produktion

Figur 8.11 Egen produktion

Figur 8.12 Egen produktion. Oversvømmelsesscreening udarbejdet af COWI

Figur 8.13 Egen produktion. Oversvømmelsesscreening udarbejdet af COWI

Figur 8.14 Egen produktion. Oversvømmelsesscreening udarbejdet af COWI

Figur 9.1 Hansen, H.S. (2010) Modelling the future coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise. *Landscape Urban Plan*

Figur 9.2 Hansen, H.S. (2010) Modelling the future coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise. *Landscape Urban Plan*

Figur 10.1 Egen produktion

Figur 10.2 Egen produktion

Figur 10.3 Egen produktion

Figur 10.4 Egen produktion

Figur 10.5 Egen produktion

Figur 10.6 Egen produktion

Figur 10.7 Egen produktion

Tabelliste

Tabel 3.1 IPCC (2007). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Tabel 4.1 Klimatilpasning.dk (2011, 7. juni) *Danmarks fremtidige klima*. Lokaliseret (7. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-DK/service/Klima/KlimaaendringeriDanmark/Sider/Forside.aspx>

Tabel 4.2: Klimatilpasning.dk (2011, 7. juni) *Danmarks fremtidige klima*. Lokaliseret (7. juni 2011) på World Wide Web: <http://www.klimatilpasning.dk/da-DK/service/Klima/KlimaaendringeriDanmark/Sider/Forside.aspx>

Tabel 7.1 Egen produktion

Tabel 7.2 Egen produktion

Tabel 7.3 Egen produktion

Tabel 7.4: Egen produktion

Tabel 8.1 Egen produktion

Tabel 8.2 Egen produktion

Tabel 8.3 Egen produktion

Tabel 8.4 Egen produktion

Tabel 8.5 Egen produktion

Tabel 9.1 Hansen, H.S. (2010) Modelling the future coastal zone urban development as implied by the IPCC SRES and assessing the impact from sea level rise. *Landscape Urban Plan*

Tabel 10.1 Egen produktion

Tabel 10.2 Egen produktion

Tabel 10.3 Egen produktion

Tabel 10.4 Egen produktion

Tabel 10.5 Egen produktion