Reducering af oversvømmelser ved stormhændelser i områder omkring Randers Fjord og Limfjorden

Aalborg Universitet
Vand og Miljø

Mette Hørby Gaardsted

Kandidatspeciale

10-06-2020

Vejleder:

Thomas Ruby Bentzen

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Speciale v/ Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet
Byggeri og Anlæg
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
http://www.byggeri.aau.dk/sektioner/vand/

Titel:

Sikring af fjorde mod stormflod

Projekt:

Kandidatspeciale

Projektperiode:

Februar 2020 - Juni 2020

Udarbejdet af:

Mette Høby Gaardsted

Vejledere:

Thomas Ruby Bentzen

Oplagstal: 3
Hovedrapport sidetal: 135
Bilag sider: 17
Total antal sider: 135
Afsluttet: 10-06-2020

Synopsis:

Dette speciale omhandler reducering af oversvømmelser som følge af stormflod og højvande ved Randers Fjord og Limfjorden. Gemmen projektet er der arbejdet ud fra hypotesen at: "Oversvømmelse af kystområderne ved Randers Fjord og den vestlige del af Limfjorden kan reduceres eller forhindres ved at etablere oversvømmelsesbeskyttende foranstaltninger"
Randers Fjord og Limfjorden er på baggrund af eksisterende risikovurderinger, områder med tidligere stormfloder og kystanalyser udvalgt, som særlig kritiske i forhold til oversvømmelse af kysten og de omkringliggende områder i forbindelse med stormflod og højvande.
Oversvømmelserne ved kystområderne er undersøgt ved forskellige scenarier nu og i år 2100 ved at tage højde for klimaændringernes påvirkning på vind og havvandstandene. Disse undersøgelser er fortaget ved at opstille en 2D-hydrodynamiskmodel af Randers Fjord og Limfjorden samt det omkringliggende terræn.
Forskellige metoder til oversvømmelsesbeskyttelse herunder diger/højvandsmur, sluse og stormflodsbarriere samt indsnævring af tværsnit er beskrevet, og derud fra er løsningsstrategier for Randers Fjord og Limfjorden opstillet. Løsningsstrategierne er implementeret i modellerne for, at undersøge deres virkning og for at afgøre, hvorvidt disse kan anvendes til at forhindre eller reducere oversvømmelserne ved Randers Fjord og Limfjorden.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, og kan frit offentliggøres (med kildeangivelse).

Forord

Dette kandidatspeciale er udarbejdet af Mette Hørby Gaardsted, som den afsluttende del af kandidatuddannelsen ved Vand og Miljø på Aalborg Universitet. Specialet er udarbejdet fra 02-02-2020 til 10-06-2020 og omhandler reduceringen af oversvømmelser ved de danske fjorde, som opstår i forbindelse med stormflod og ekstrem højvande.

Tak
Tak rettes til Thomas Ruby Bentzen for god vejledning gennem projektet, samt for hurtig respons på spørgsmål og tilsendt materiale. Ligeledes rettes tak til Andreas Kusk Hundahl og Dorte Hørby for hjælp i forbindelse med gennemlæsning af rapporten.

Læsevejledning

Denne specialerapport består af en hovedrapport med tilhørende appendiks. Foruden de appendiks, der er vedlagt rapporten, er der også en række elektroniske appendiks, som er vedlagt projektmappen.

Referencer til kilder er i rapporten angivet i kantede parenteser med angivelse af kildens forfatter og udgivelses år. Kilderne er i litteraturlisten angivet i alfabetisk orden. Ved kildehenvisning til forgående sætning er henvisningen til kilden inden punktum, og ved kildehenvisning til foregående afsnit er henvisningen efter punktum.

Figurer, der i rapporten fremstår uden kildehenvisninger, er udarbejdet af Mette Hørby Gaardsted. Er der til fremstilling af figurer og tabeller indhentet værdier eller kortlag, vil henvisningen til den respektive kilde fremgå af figur- eller tabelteksten. Medmindre andet er angivet, er kortlag indhentet fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2020] anvendt som baggrundskort.

Mette Hørby Gaardsted

Abstract

This master thesis project examines floodings of coastal areas due to storm surges and high water levels in the estuaries Randers Fjord and Limfjorden and possible solutions to reduce these floodings.

The estuaries of Randers Fjord and Limfjorden have been chosen as particularly vulnerable areas based on analysis of existing risk assesments, statistics from previous stormsurges and coastal analysis.

Using the 2D-hydrodynamic modelling tool Mike21 a model of both Randers Fjord and Limfjorden and the surrounding terrains are configured using water leves and wind measures. The models are run with data from multiple current storm scenarios and projected storm scenarios from year 2100, which take the effects of global climate change into account.

Using the models the floodings of the terrain around Randers Fjord and Limfjorden is simulated. Based on the simulations it is clear that flooding is happening in large parts of the terrain around the estuaries.

Different solution strategies to reduce the floodings can include dikes, sluices and storm surge barriers and reduction of channel cross section. The effects of these solutions are tested in different scenarios.

As a result it is seen that the floodings can be reduced but not prevented. The reduction of the floodings is dependent on the different solution strategies.

The biggest reduction in Randers Fjord is seen when dikes are combined with a barrier at Udbyhøj. However the reduction is only a few precentages higher than the solution where only the barrier is implemented.

The biggest reduction of floodings in Limfjorden is seen when a barrier is implemented at Thyborøn Kanal. It is attempeted to implement a reduction of the cross section at the opening of Limfjorden at Thyborøn. This solution yields a far smaller reduction of floodings.

Based on this project it is observed that future floodings around Randers Fjord and Limfjorden can be reduced but not prevented.

Indholdsfortegnelse

I Oversvømmelse ved de danske kyster **1**

Kapitel 1 Indledning **3**

Kapitel 2 Havstigninger, vindhastighed og stormflod **7**
2.1 Stigning i havniveauet 7
2.2 Ændringer i vindhastighed 9
2.3 Stormflod 9

Kapitel 3 Eksisterende kystbeskyttelse **13**

Kapitel 4 Risiko områder **15**
4.1 Vurdering af risiko for stormflod på baggrund af tidligere hændelser 15
4.2 Risiko i forhold til EU oversvømmelsesdirektiv 16
4.3 Oversvømmelses risiko kystanalyse 17
4.4 Arealanvendelse 18
4.4.1 Natura 2000 21
4.5 Oversvømmelse ved given havstigning 22
4.6 Udvælgelse af kritiske fjorde 27

Kapitel 5 Projektkonkretisering **29**

II Modellering af oversvømmelser **31**

Kapitel 6 Randers Fjord og Limfjorden **33**
6.1 Randers Fjord 33
6.2 Limfjorden 34

Kapitel 7 Opbygning af model **37**
7.1 Randers Fjord model 37
7.1.1 Randers Fjord model uden terræn 37
7.1.2 Randers Fjord model med terræn 42
7.2 Limfjords model 48
7.2.1 Limfjords model uden terræn 49
7.2.2 Limfjords modellen med terræn 55

Kapitel 8 Modellering af oversvømmelser **63**
8.1 Modellering af oversvømmelser ved Randers Fjord 63
8.1.1 Vind- og vandstandsdata tilpasset til de forskellige scenarier 63
8.1.2 Resultat af oversvømmelses modellering 66
8.2 Modellering af oversvømmelser ved Limfjorden 70
8.2.1 Vind- og vandstandsdata tilpasset til de forskellige scenarier 70

8.2.2 Resultat af oversvømmelses modellering 72

III Løsningsstrategier 75

Kapitel 9 Metoder til beskyttelse imod oversvømmelse 77
9.1 Diger og højvandsmure 77
9.2 Stormflodsbarierre og sluse 78
9.3 Reducering af tværsnit 79
9.4 Løsningsstrategier 79
9.4.1 Randers Fjord 80
9.4.2 Limfjorden 80

Kapitel 10 Modellering med forskellige løsningsstrategier 83
10.1 Randers Fjord 83
10.1.1 L1 Randers Fjord - Diger og højvandsmure 83
10.1.2 L2 Randers Fjord - Sluse eller stormflodsbarriere 87
10.1.3 L3 Randers Fjord - Kombinering 94
10.2 Limfjorden 96
10.2.1 L1 Limfjorden - Sluse eller stormflodsbarriere 96
10.2.2 L2 Limfjorden - Reducering af tværsnit 103
10.3 Sammenligning 106

Kapitel 11 Diskussion 109

Kapitel 12 Konklusion 111

Kapitel 13 Perspektivering 113

Litteratur 115

IV Appendiks 119

Appendiks A Indhentning af vandstands- og vinddata 121

Appendiks B Oversvømmelses modellering Randers Fjord 123

Appendiks C Oversvømmelses modellering Limfjorden 129

Appendiks D Elektronisk appendiks 135
D.1 Randers Fjord model 135
D.2 Limfjords model 135
D.3 Fremskrivning vind og vandstande Randers Fjord 135
D.4 Fremskrivning vind og vandstand ved Limfjorden 135
D.5 Randers Fjord model med implementering af løsningsstrategier 135
D.6 Limfjords model med implementering af løsningsstrategier 135

Del I

Oversvømmelse ved de danske kyster

Indledning 1

Gennem tiden og frem til i dag har der rundt om i verden været problemer med oversvømmelser fra havet. I det nordlige Europa ses flere eksempler på oversvømmelser fra havet, som følge af højvande og stormhændelser. Den tyske- og jyske vestkyst blev i 1634 ramt af en storm, som resulterede i kraftige oversvømmelser med en vandstand på op til 6 m. Oversvømmelsen er den kraftigste, som har ramt Danmark, og den resulterede i at 10.000-15.000 mennesker mistede livet. Den seneste oversvømmelse, som har ramt det nordlige Europa og resulteret i tab af menneskeliv var oversvømmelsen, der ramte Hamborg i 1962, hvor 350 mennesker omkom. Foruden disse eksempler er der ligeledes i de senere år set flere eksempler på oversvømmelser, der har ramt det nordlige Europa. [Jacob Woge Nielsen - Danmarks Meteorologiske Institut, 2007]

Oversvømmelser og erosion ved kysterne kan have betydelige menneskelige, økonomiske og miljømæssige konsekvenser. Foruden tab af menneskeliv, kan de menneskelige konsekvenser være enten fysiske eller psykiske skader, som opstår i forbindelse med eller efter en oversvømmelse. De økonomiske konsekvenser er typisk forbundet med udbedring af skader på boliger, industri og infrastruktur, men de kan også være forbundet med genhusning og tabt arbejdesfortjeneste. Ligeledes kan de økonomiske konsekvenser være forbundet med tabt eller reduceret udbytte på landbrugsarealer. Ved oversvømmelse eller som følge af erosion, kan der ydermere være risiko for, at naturområder bliver ødelagte eller forstyrrede, således plante og dyrelivet kan blive skadet eller helt gå tabt i de berørte områder. [Kystdirektoratet, 2018]

Oversvømmelser vil også fremadrettet ramme det nordlige Europa og med klimaændringerne forventes disse at blive kraftigere og hyppigere. Klimaforandringerne vil nogle steder resulterer i flere hedebølger, tørke og skovbrande, mens klimaforandringerne andre steder, vil resulterer i flere storme og flere kraftige regnskyl. Derudover medfører klimaforandringerne stigninger i havniveauet, da der sker smeltning af isen ved Grønland og Antarktisk. [Europa-Kommisionen: Energi, Klimaændringer og Miljø, 2020] Det forventes at lavtryksbanerne ved Danmark, som følge af klimaændringerne, vil ændres, hvorfor flere kraftige storme kan ramme Danmark i fremtiden. [Danmarks Meteorologiske Institut, 2018c]

Den danske kystlinje er omkring 7.300 kilometer lang, hvilket betyder, at kystlinjen i Danmark er en af verdens længste set i forhold til landets størrelse. Ydermere bor næsten én million af landets indbyggere mindre end én kilometer fra kysten, hvilket betyder at de økonomiske og menneskelige konsekvenserne, som følge af erosion og oversvømmelse ved kysterne og de omkringlæggende områder vil være betydelige. [Miljø- og Fødevareministeriet, 2016,s 4]

Store dele af den danske kystlinje er udgjort af fjorde, som det fremgår af figur 1.1, og ved kraftige storme kan vandet opstuve her og derved fører til erosion og oversvømmelser af fjordkysterne. Det er valgt at medtage Limfjorden som en del af de danske fjorde, selvom det reelt er et sund, da vandet ligeledes kan opstuve i Limfjorden og resulterer i erosion og oversvømmelser.

Figur 1.1. *Danske fjorde og Limfjorden. Kortdata er indhentet fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2020].*

Med tanke på fremtidens klimaændringer og kraftigere oversvømmelser, vil det være nødvendigt, at beskytte kysterne og de omkringliggende områder ved fjordene for på denne vis, at forhindre eller mindske oversvømmelserne.

I Holland ligger store dele af landet under havniveau og derudover har tre af Europas store vandløb deres udløb til Nordsøen ved den Hollandske kyst. Det betyder at landet har risiko for oversvømmelse ved stormflod og højvande. Dette problem er løst ved anvendelse af flere sluser og stormflodsbarierrer. Et eksempel på en sluse, der også fungerer som stormflodsbarrierer, er *Oosterscheldekering*, hvis placering fremgår af figur 1.2.
Slusen blev etableret i 1986 og er konstrueret med 62 vertikale porte, som hver har en brede på omkring 42 m og en højde på 6-12 m. Barrieren er etableret over en strækning på 3 km og beskytter kysten og oplandet ved estauariet Oosterschelde (Eastern Scheldt) mod oversvømmelse fra havet. Konstruktionen er dimensioneret efter en 4000 års gentagelsesperiode og har indtil januar 2018 været helt lukket ved 26 forskellige hændelser. [Deltares, 2018]

Figur 1.2. *Venstre del af figuren viser et kort over Holland med angivelse af Oosterscheldekering slusens placering, og til højer ses et billede af selve slusen. Billedet er fra Deltares [2018].*

Oosterscheldekering er en af de største stormflodssikringer, som er konstrueret i Holland. Den blev opført på baggrund af en oversvømmelse i 1953, som resulterede i, at de eksisterende diger brød sammen og de bagvedliggende områder blev oversvømmet. [Deltares, 2018]

I Danmark findes der mindre eksempler på anvendelse af sluser til regulering af vandstanden. For eksempel anvendes en sluse ved Thorsminde til at regulere vandstanden og saliniteten i Nissum Fjord. Derfor er det interessant, at undersøge hvorvidt sluser og stormflodsbarriere eller anden oversvømmelsesbeskyttelse på lidt større skala, kan anvendes til at beskytte de danske fjordkyster og de bagvedliggende arealer mod oversvømmelser fra havet. Specielt er det interessant at undersøge, om oversvømmelsesbeskyttelsen kan anvendes fremadrettet når klimaet ændres og oversvømmelsestruslerne bliver større, end de er i dag.

Havstigninger, vindhastighed og stormflod 2

Havstigninger og ændringer i vindhastigheden kan påvirke hyppigheden og omfanget af oversvømmelser, hvorfor ændringerne i disse er beskrevet i det følgende. Ligeledes er stormfloder defineret i forhold til vejrfænomenet stormflod og i forhold til lovgivningen. Ydermere er erstatningen, som kan udbetales ved stormfloder beskrevet.

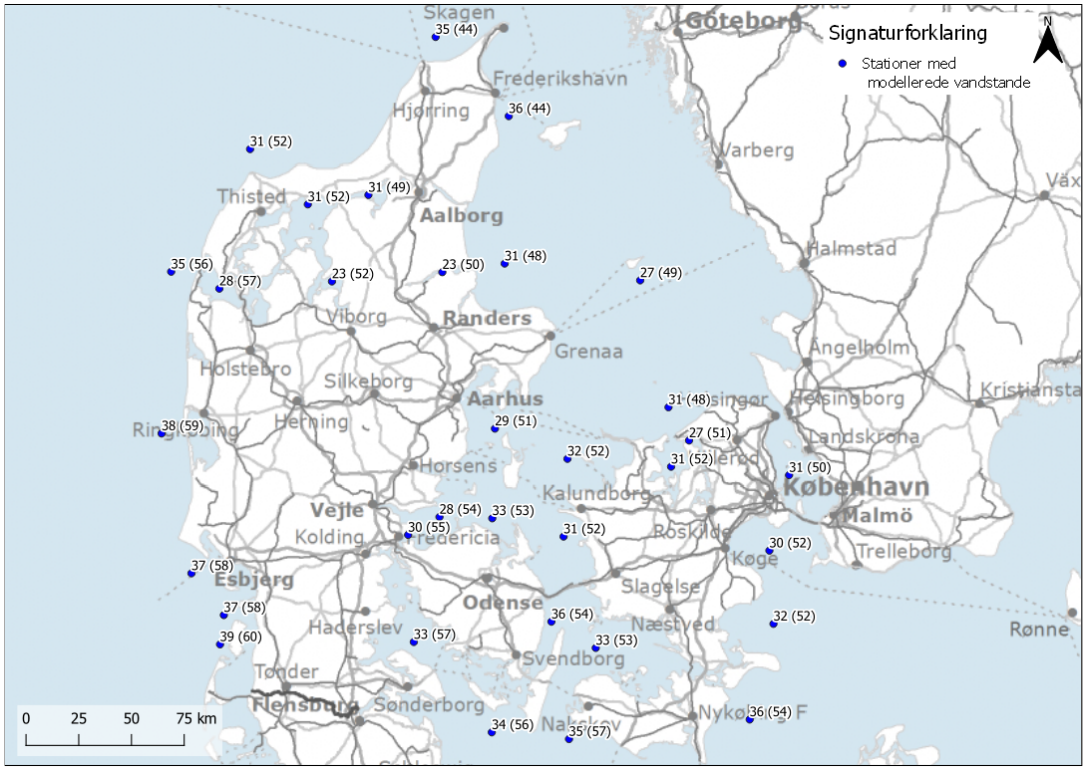
2.1 Stigning i havniveauet

Havniveauet, vil som nævnt tidligere, stige grundet klimaforandringerne. Det er dog svært at forudsige hvor meget, da det blandt andet afhænger af de anvendte modeller til forudsigelsen, samt mængden af drivhusgasser der i fremtiden vil udledes til atmosfæren.

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) har udarbejdet et klimaatlas, der har til formål at forudsige fremtidens nedbør, temperatur, vandstand og stormflod. Under udarbejdelse af dette har DMI benyttet sig af flere globale og regionalemodeller. Middelvandstanden, vandstanden ved en 20-års stormflodshændelse og vandstanden ved en 50-års stormflodshændelse for perioden 2041-2070 og 2071-2100 er bestemt flere steder ved kysterne, hvor effekten af landhævningerne fra sidste istid er inkluderet i beregningerne. [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019a]

Det nøjagtige indhold af drivhusgasser i atmosfæren i perioden 2041-2070 og 2071-2100 vides ikke med sikkerhed, derfor er der benyttet to forskellige udledningsscenarier til, at beskrive mængden af drivhusgasser i atmosfæren i forhold til øvrige bestanddele i atmosfæren. De to scenarier, der er benyttet, er RPC8,5 og RPC4,5, hvor RPC står for Representative Concentration Pathways. RCP8,5 angiver et højt udledningsscenarie, hvor koncentrationen af CO_2 i atmosfæren fortsat vil stige efter 2100, mens RCP4,5 angiver et scenarie, hvor den globale udledning reduceres, således klimaændringerne frem mod 2100 vil stabiliseres. [Danmarks Meteorologiske Institut i samarbejde med Miljøstyrelsen, 2018]

Middelvandstanden i år 2071-2100 og vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode i år 2071-2100 bestemt af Danmarks Meteorologiske Institut [2019b] ved udledningsscenarie RCP4,5 og RCP8,5 er angivet på henholdsvis figur 2.1 og 2.2. Vandstandene er bestemt ved en vis usikkerhed, da der ved fremtidsprognoserne er flere ukendte scenarier. Vandstandene, som er angivet på figurene, er median værdierne af de modelerede vandstande.



Figur 2.1. *Middelvandstanden i år 2071-2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 angivet i centimeter. Vandstanden ved RCP8,5 er angivet i parentes. Data er indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut [2019b].*

Figur 2.2. *Vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode i år 2071-2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 angivet i centimeter. Vandstanden ved RCP8.5 er angivet i parentes. Data er indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut [2019b].*

Af figur 2.1 ses det, at middel vandstanden frem til 2071-2100 vil stige omkring 30-35 cm, hvis udledningen følger RCP4,5. Følger udledningen RCP8,5 vil vandstanden stige til omkring 50-55 cm i år 2071-2100. Derudover fremgår det, at stigningen i middel vandstanden ikke vil være den samme på tværs af landet. Det fremgår af figur 2.2 at vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode ved RCP4,5 varierer mellem 150-460 cm og ved RCP8,5 varierer mellem 180-500 cm afhængig af om der ses på Vadehavet, Nordsøen eller de indre danske farvande.

2.2 Ændringer i vindhastighed

Vindhastigheden vil, som vandstanden, ændres på grund af klimaforandringerne. Vindens baner vil ændre sig, og derved vil vestenvinden, som rammer Danmark, øges i styrke. Det er vanskeligt at forudsige præcis, hvor meget vindens hastighed vil ændres frem mod år 2100. Ved anvendelse af modeller estimerer DMI, at den gennemsnitlige vindhastighed omkring år 2100 vil være 10% højere end den er i dag. [Danmarks Meteorologiske Institut, 2018d]

2.3 Stormflod

Stormflod er et vejrfænomen, hvor stormvejr resulterer i, at vandstanden ved kysten bliver kraftig forhøjet i forhold til normalen. Ved stormflod skal vindstyrken over havet være svarende til stormende kuling, hvilket er vindstyrke 9 på Beaufort-skalaen eller 21-25 m/s. I Danmark kan vandstanden ved stormflod stige 1,5-3 m i forhold til middel vandstanden.[Danmarks Meteorologiske Institut, 2018a]

I Danmark er der stor risiko for stormflod, da landet ligger mellem Nordsøen og Østersøen. Omkring 90 % af de storme, som rammer Danmark har vindretning fra vest, og det er også disse vestenvinds storme, som er de kraftigste storme. Storme med vindretning fra nord og øst varer ofte i længere tid, mens storme fra sydlig vindretning er sjældne.[Danmarks Meteorologiske Institut, 2018b]

Ved en stormflod vil det primært være kysten og havneanlægene, som vil oversvømmes, men hvis det bagved liggende land er lavt, kan oversvømmelsen fra en stormflod også få konsekvenser for disse arealer. Ligeledes kan stormfloden blokkere for udløb fra vandløbene, således der sker opstuvning, eller vandet kan trænge op i vandløbene. Derved kan flodbreder og arealer omkring disse oversvømmes. [Danmarks Meteorologiske Institut, 2018a]

Lovgivning om stormflod og erstatnings udbetaling

I Danmark er det ikke borgernes egne forsikringer, som dækker skader i forbindelse med stormflod, men derimod en offentlig finansieret forsikring. Denne offentlige finansiering dækker dog kun, hvis der af stormrådet er blevet erklæret stormflod. [Baltzer, 2019]

Stormrådet er et uafhængigt råd, der har til opgave er at administrere lovgivningen i forhold til stormflod og stormfald [Stormrådet, 2020]. Når det skal vurderes hvorvidt, der har været stormflod, benyttes følgende: *Ved stormflod forståes oversvømmelse som følge af en ekstremt høj vandstand i havet, der statistisk indtræffer sjældnere end hvert 20. år* fra Bekendtgørelse af lov om stormflod og stormfald Erhvervsministeriet [2018,Kap. 1 § 2].

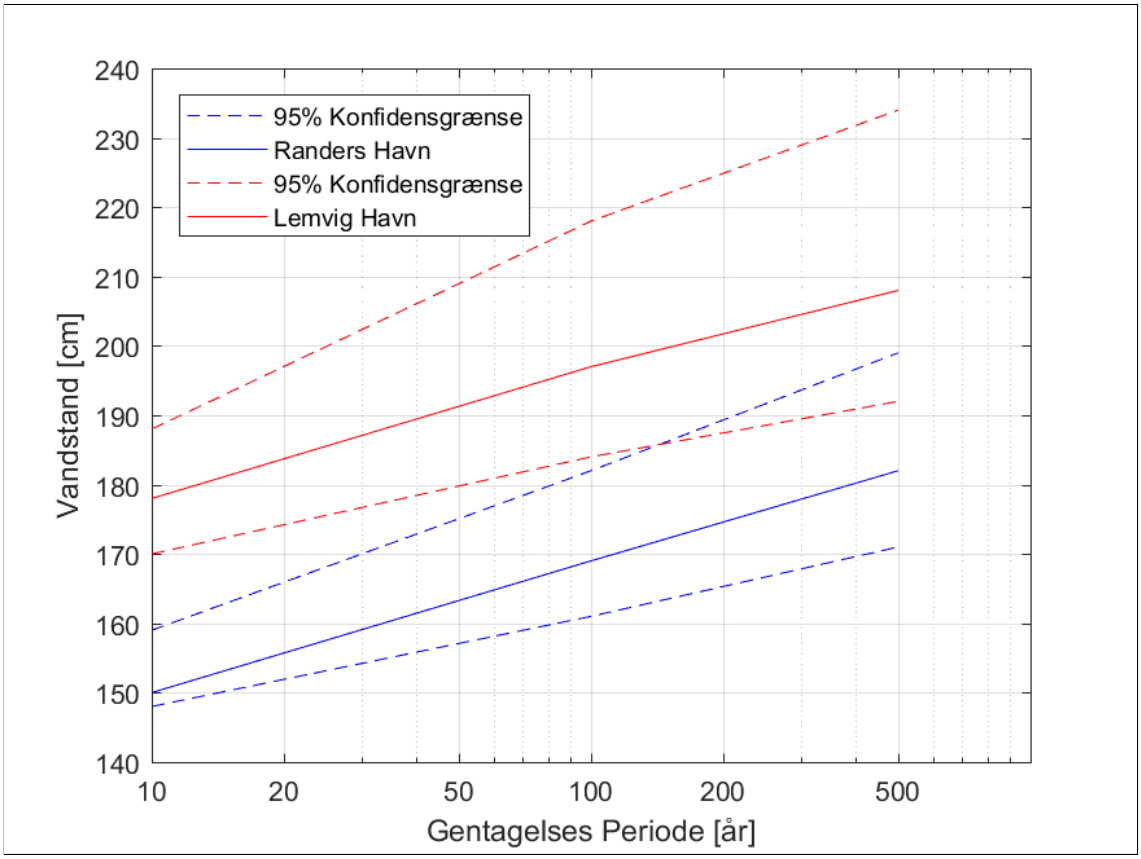
Ved vurderingen af, om der har været stormflod, som indtræffer sjældnere end hvert 20. år, anvendes et kort over vandstanden for en 20 års gentagelsesperiode. Dette kort er udarbejdet af kystdirektorartet på baggrund af en statistik over højvandsmålingerne. Hvert 5. år udarbejdes et nyt kort over vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode på baggrund af højvands statistikker fra de foregående år, hvorfra der er målinger. [Ditlevsen et al., 2018,s. 3 og 6] På figur 2.3 er vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode for henholdsvis 2012 og 2017 angivet.

Figur 2.3. *Vandstand ved en 20 års gentagelsesperiode bestemt på baggrund af højvandsstatistikken fra henholdsvis 2017 og 2012. Alle de angivne vandstande er centimeter i forhold til DVR90 og vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode i 2012 er angivet i parentes. Data er indhentet fra Ditlevsen et al. [2018,s. 6] og Sørensen et al. [2013,s. 3-4].*

Af figur 2.3 fremgår det, at der er forskel på vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode ved vestkysten og i de indre danske farvande.

Grundet opdateringen af højvandsstatistikken hvert 5. år, vil vandstanden ved en 20 års gentagelsesperiode ændre sig over tid, som det fremgår af figur 2.3. Med en stigende vandstand og kraftigere storme vil det betyde, at de hændelser, som i dag af stormrådet bliver bestemt til, at være en stormflod ikke vil blive det i fremtiden. Dette betyder at vandstanden hvorved, der vil blive udbetalt forsikring i fremtiden skal være højere.

Ditlevsen et al. [2018] har på baggrund af de målte vandstande til forskellige hændelser lavet en lognormalfordeling af vandstanden ved forskellige gentagelsesperioder. Til lognormalfordelingen over vandstanden er der opstillet et tilhørende 95% konfidensinterval. Lognormalfordelingen for vandstanden ved forskellige gentagelsesperioder i Lemvig Havn og Randers Havn basseret på højvandsstatistikken fra 2017 fremgår af figur 2.4.



Figur 2.4. *Lognormalfordelingen for vandstanden ved forskellige gentagelsesperioder med tilhørende 95% konfidensintervaller for Randers Havn og Lemvig Havn bestemt på baggrund af højvandsstatistikkerne fra 2017. Data er indhentet fra Ditlevsen et al. [2018,s. 6].*

Af figur 2.4 fremgår det, at der er usikkerheder på vandstandende med forskellige gentagelsesperioder, der er opstillet på baggrund af højvandsstatistikkerne. Det betyder, at der ligeledes er store usikkerheder for vandstanden ved stormflod og vandstanden ved den definerede stormflod.

Ved stormen 1. -2. november 2006 og stormen Bodil 6. december 2013 blev der af Stormrådet erklæret stormflod, og dermed blev der udbetalt erstatning til de områder, der blev ramt af oversvømmelser. Antallet af sager og erstatningssummen som blev udbetalt i 2006 og 2013, fremgår af tabel 2.1.

Tabel 2.1. *Antal skader og udbetalt erstatning på landsplan i forbindelse med stormflod i 2006 og 2013.[Erhvervsministeriet, 2017,s. 86]*

	Antal sager	Samlede erstatning [Mio. kr]
Hovedtal 2006	3.941	438
Hovedtal 2013	2.980	848

Af tabel 2.1 fremgår det, at der blev udbetalt ca. 440 mio. kr i erstatning for stormflodsskader i 2006 og ca. 850 mio. kr i erstatning til stormflodsskader i 2013. Årsagen til, at den samlede erstatning i 2013 var større i forhold til antallet af skader, kan skyldes en ændring der blev lavet i forsikringsdækningen, eller at nogle af skaderne fra 2013 var mere omfangsrige end skaderne i 2006. Generelt fortæller tabel 2.1, at der blev udbetalt en betydelig samlet erstatning

i forbindelse med de to stormfloder. Hvis stormfloderne i fremtiden skal være kraftigere før, der kan udbetales erstatning, vil det betyde en større udgift til kommuner og private til udbedring af skader i forbindelse med oversvømmelser. Derudover dækker erstatningen fra Stormrådet kun skader på bygninger, inventar og genhusning, hvorfor omkostningerne ved stormflod er højere end den udbetalte erstatningen. [Erhvervsministeriet, 2017]

På baggrund af dette er der yderligere en grund til, at etablere oversvømmelsesbeskyttelse ved fjordene, således at skaderne og udgifterne til udbedring kan reduceres.

Eksisterende kystbeskyttelse 3

Ved flere af de danske fjordkyster er der allerede etableret forskellige typer af kystbeskyttelse. Disse er etableret i områder, hvor der har været problemer med oversvømmelse og erosion af kysten og er beskrevet i det følgende.

Kystbeskyttelsen i Danmark er ejet af staten, kommunen eller private borgere, og er inddelt i to kategorier: Erosionsbeskyttelse og oversvømmelsesbeskyttelse.[Miljø- og Fødevareministeriet, 2016] Den eksisterende erosions- og oversvømmelsesbeskyttelse ved de indre kyster, herunder også fjordene, fremgår af tabel 3.1.

Tabel 3.1. *Eksisterende erosions- og oversvømmelsesbeskyttelse ved de indre kyster, herunder også fjordene. Data indhentet fra Miljø- og Fødevareministeriet [2016]*

		Indre kyster		
Erosionsbeskyttelse				
		Staten	Kommune	Privat
Høfder	stk	-	270	12.390
Bølgebrydere	stk	-	30	590
Sandfodring	1000 m^3	-	-	743
Skråningsbeskyttelse	Km	3	15	681
Oversvømmelsesbeskyttelse				
Diger/mure	Km	3	6	996

Det fremgår af tabel 3.1, at største delen af erosions og oversvømmelsesbeskyttelsen er ejet af private borgere. Dette kan skyldes, at det er de private borgeres eget ansvar, at beskytte deres bolig imod skader, som følge af erosion og oversvømmelse. Ved etablering af kystbeskyttelse som individuelle løsninger er der risiko for, at problemet med oversvømmelse og erosion flyttes til de omkringliggende områder. Derfor kan det være fordelagtigt, at staten, kommuner og private samarbejder i forbindelse med etablering af erosions og oversvømmelses beskyttelse. [Miljø- og Fødevareministeriet, 2016,s. 4]

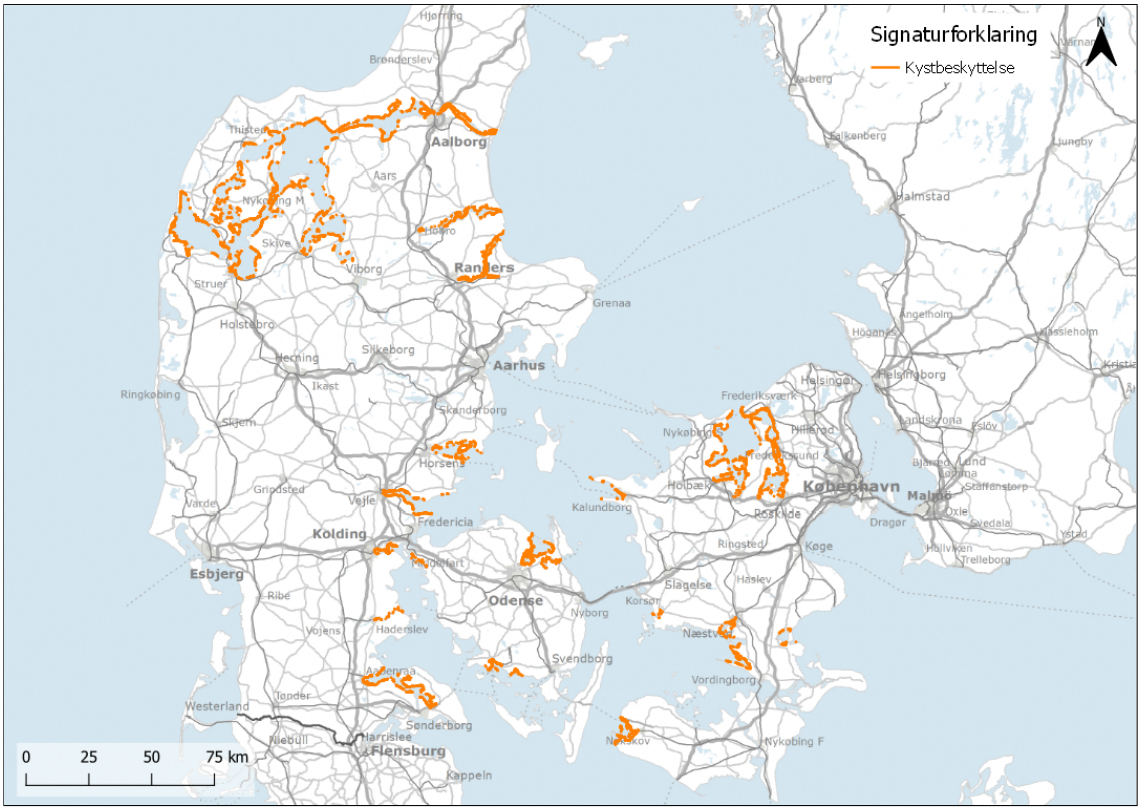
På grund af slitage og utilstrækkelig dimensionering er det ikke alle steder, at den nuværende kystbeskyttelse vil være tilstrækkelig i forhold til fremtidens vandstands- og stormflodsscenarie. Et eksempel på dette er højvandsmuren ved Lemvig Havn. Denne blev opført i 2012 og skal beskytte Lemvig Havn og lavtliggende dele af byen mod oversvømmelse. Muren er konstrueret i beton med seks alluminiumsporte, som skal lukkes manuelt ved varslig af forhøjet vandstand. [Ingeniøren - Christian Østergaard, 2015]

Højvandssikringen beskytter mod højvande op til 2,10 m [Ingeniøren - Christian Østergaard, 2015]. Ved betragtning af murens højde i forhold til de estimerede middel vandstande ved en 20 års stormflodshændelse i 2071-2100, som fremgår af figur 2.2, på henholdsvis 2,01 m og 2,42 cm ved henholdsvis middel og højt udlednings scenarie, ses det at murens højde sandsynligvis ikke vil være tilstrækkelig til sikring mod oversvømmelse. Ligeledes er murens højde ikke tilstrækkelig i forhold til anbefalinger til kote for højvandsbeskyttelse, som er eksponeret for bølger, som fremgår af tabel 3.2 [Hasløv og Kjærsgaard, 2015]. Det betyder, at muren for at kunne yde optimal sikring mod højvande skal udbygges, eller der må findes en anden løsning, hvis Lemvig også i fremtiden skal være beskyttet mod oversvømmelse.

Tabel 3.2. *Krav til kote for højvandsbeskyttende foranstaltninger. Hasløv og Kjærsgaard [2015,s.54]*

	Bølgehøjde [m]	Dimensionsgivende vandstand [m]	Topkote bølge eksponeret konstruktion [m]	Top kote dige [m]
Fjorde	1,0	2,0	3,0	2,8

Placeringen af den eksisterende kystbeskyttelse ved de danske fjorde er angivet på figur 3.1. På figuren er der ikke skelnet mellem de forskellige typer af kystsikring, og den omfatter derfor både erosions og oversvømmelses beskyttelse. I nogle områder anvendes mobil kystbeskyttelse, disse fremgår ikke af kortet.



Figur 3.1. *Eksisterende kystbeskyttelse ved de danske fjorde. Data er indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020]*

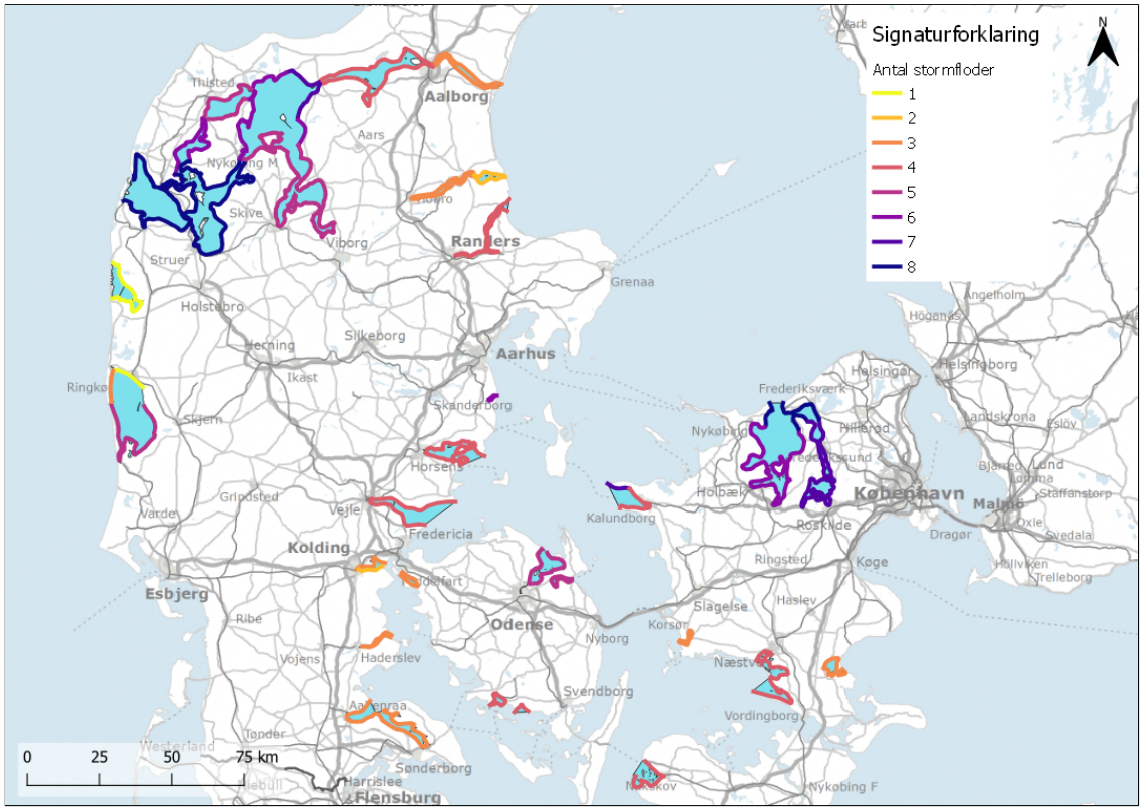
Af figur 3.1 fremgår det, at der flere steder ved de danske fjorde er etableret kystbeskyttelse. Hvis kystbeskyttelse ikke er tilstrækkeligt dimensioneret, som ved eksemplet med Lemvig Havn, skal denne fremadrettet udbygges, eller en anden løsning skal findes.

Risiko områder 4

På nuværende tidspunkt eksisterer flere oversvømmelsesanalyser og vurderinger af risiko områder for oversvømmelser. Disse analyser er sammen med arealanvendelsen anvendt til at udvælge 2 kritiske fjorde, der arbejdes videre med i projektet.

4.1 Vurdering af risiko for stormflod på baggrund af tidligere hændelser

I perioden fra 1991 til 2017 har 27 stormfloder med en gentagelsesperiode på 20 år eller mere ramt Danmark. Stormrådet har opgjort, hvor mange af disse stormfloder, der har ramt de forskellige kyststrækninger [Erhvervsministeriet, 2017,s.42-45]. Antallet af stormfloder med en gentagelsesperiode på 20 år eller mere, der har ramt fjordene fremgår af figur 4.1.



Figur 4.1. *Antallet af stormfloder med en gentagelses periode på 20 år eller mere, der har ramt de Danske fjordene i perioden 1991 til 2017. [Erhvervsministeriet, 2017,s.44]*

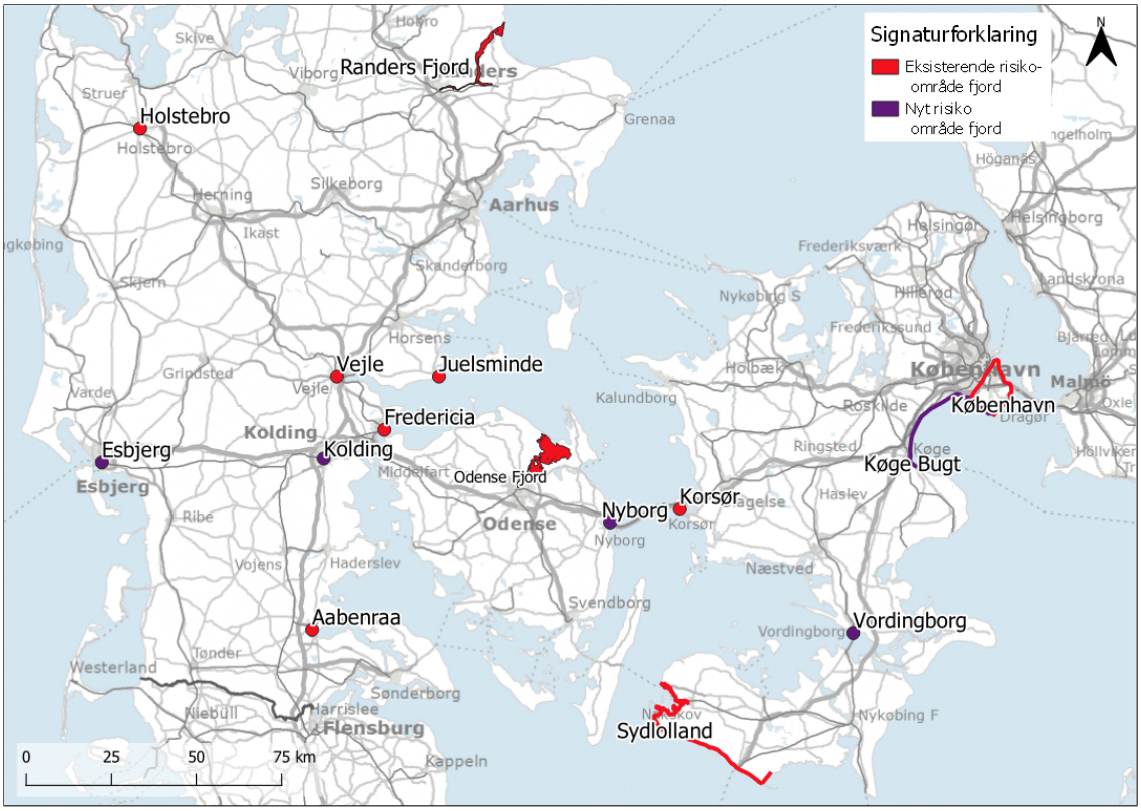
Det kan ses af figur 4.1, at den vestlige del af Limfjorden og Roskilde Fjord har været ramt, af stormflodshændelser med en gentagelses periode på 20 år eller mere, otte gange i perioden 1991 til 2017. Dette er svarende til at gentagelsesperioden for stormflod ved disse fjorde er omkring 3 år i denne periode. Derudover ses det, at det er forskelligt, hvor ofte fjordene har været ramt af stormflod i perioden. Generelt har Limfjorden, Isefjorden, Roskilde Fjord og Odense Fjord været ramt flest gange, hvorfor det må forventes, at disse også i fremtiden vil have stor risiko for at blive ramt af stormflod.

4.2 Risiko i forhold til EU oversvømmelsesdirektiv

På baggrund af oversvømmelses direktivet fra EU er områderne, som fremgår af figur 4.2, udpeget som risiko områder for oversvømmelse. Risikoen for oversvømmelse er defineret på baggrund af det følgende:

$$\text{Risiko} = \text{Fare} \cdot \text{Sårbarhed}$$

Med faren forståes sandsynligheden for oversvømmelse, mens sårbarheden dækker de menneskelige, økonomiske og miljømæssige konsekvenser, der er forbundet med oversvømmelserne. [Kystdirektoratet, 2018]



Figur 4.2. *Eksisterende og nuværende risikoområder vurderet ud fra EU's oversvømmelsesdirektiv. Kystdirektoratet [2018]*

I planperioden 2010-2015 blev der udpeget 10 områder med risiko for oversvømmelse. Disse er markeret med rød på figur 4.2, mens der i den efterfølgende planperiode er blevet udpeget 5 nye risiko områder markeret med lilla.

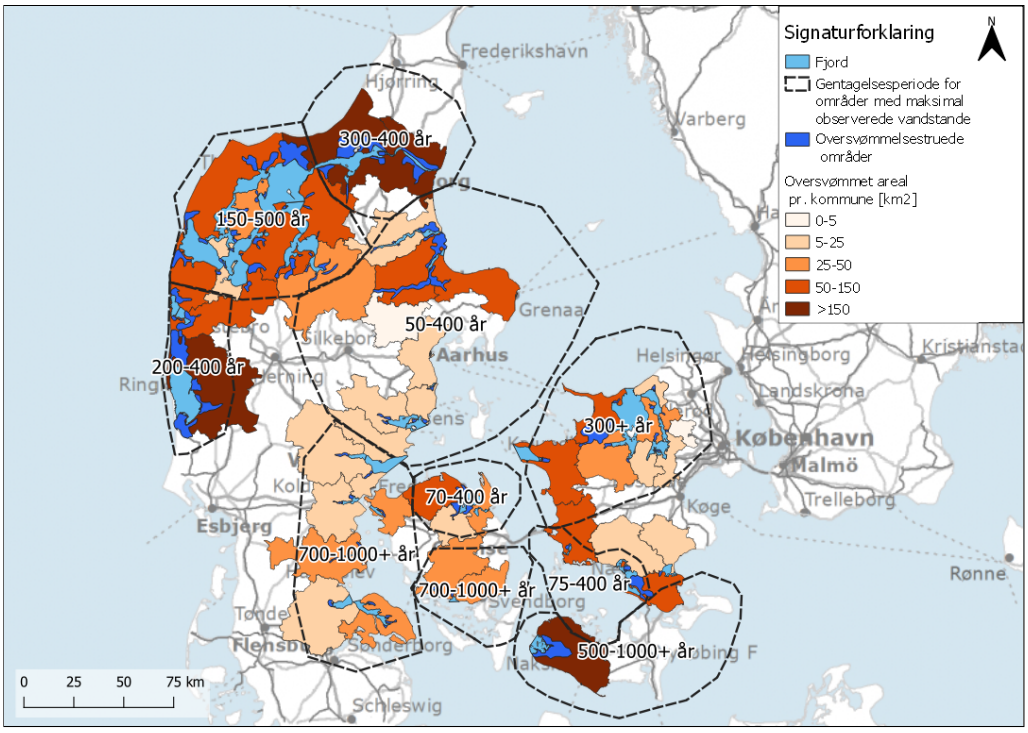
Områderne, der er udpeget til risiko områder, er vurderet, som værende områder, hvor konsekvenserne af en oversvømmelse ikke kun vil have betydning lokalt, men også nationalt. [Kystdirektoratet, 2018]

Det ses af figur 4.2, at to fjorde er udpeget til risiko områder i forhold til EU's oversvømmelses direktiv, dette er Randers Fjord og Odense fjord. Randers Fjord er dels truet af oversvømmelse fra havet men også oversvømmelser ved Gudenåen. Ved fjorden er der flere enheder, som er særligt sårbare. Det drejer sig blandt andet om forurenende virksomheder og rensningsanlæg. Ved Odense fjord er der ligeledes flere særligt sårbare områder, det er blandt andet fjernvarmeværk, rensningsanlæg og landbrugsarealer. Oversvømmelserne ved Odense Fjord vil primært være fra havet og vandløb vil kun udgøre en mindre trussel. Derudover er Vejle, Kolding og Aabenrå udpeget, som risiko områder. Det skyldes dels oversvømmelser fra fjorden og dels fra vandløb. Ved disse områder er det primært byerne, som har risiko for oversvømmelse og ikke hele fjordområdet. [Kystdirektoratet, 2018]

4.3 Oversvømmelses risiko kystanalyse

Miljø- og Fødevareministeriet [2016] har undersøgt den fremtidige erosion og oversvømmelse ved de Danske kyster. Ved denne undersøgelse er DMI's estimerede ændringer i vandstanden for år 2115 med reference perioden 1986-2005 benyttet. To forskellige udledningsscenarier er anvendt i forbindelse med analyse: RCP8.5 og et lavt udledningsscenarie med RCP2.6. [Miljø- og Fødevareministeriet, 2016,s.15-17]

På figur 4.3 fremgår resultaterne for en oversvømmelsesanalyse, som er lavet for år 2115, hvor RCP2,6 er benyttet. Oversvømmelserne ved kysterne er undersøgt med vandstande med forskellige gentagelsesperioder. [Miljø- og Fødevareministeriet, 2016,s.14-20]



Figur 4.3. *Oversvømmelsesanalyse for år 2115 ved anvendelse af det laveste udledningsscenarie. [Miljø- og Fødevareministeriet, 2016,s. 20]*

Ved oversvømmelser fra havet kan der, som tidligere nævnt, være risiko for tab af menneskeliv eller store økonomiske skader, hvorfor det kan være ønskværdigt at sikre truede områder mod oversvømmelser med returperioder, som er højere end flere af gentagelsesperioderne, som fremgår af figur 4.3. Blandt andet er digerne, som er etableret til kystbeskyttelse i Holland, dimensioneret i forhold til en returperiode på mere end 1000 år. [Hasløv og Kjærsgaard, 2015,s.23]

Med baggrund i gentagelsesperioderne, angivet på figur 4.3, vurderes det at Randers Fjord, Odense Fjord, Karrebæk Fjord og Limfjorden vest er mest truet i forhold til oversvømmelse. Medtages det oversvømmede areal i vurderingen, vurderes også den øvrige del af Limfjorden og Nakskov Fjord, som værende fjorde der er truede af oversvømmelse.

4.4 Arealanvendelse

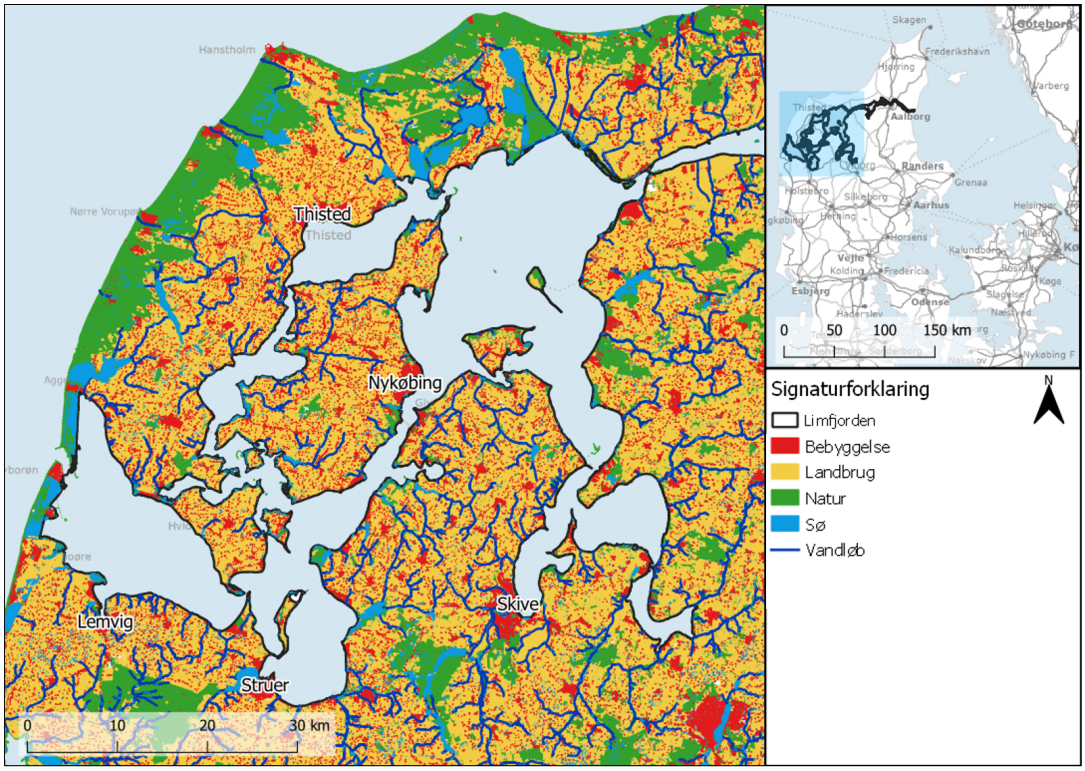
Arealanvendelse af områderne ved og i forbindelse med kysterne har betydning for, hvilke konsekvenser der er i forbindelse med en oversvømmelse.

Private boliger og andre bygværker risikerer skader ved oversvømmelse, og i nogle tilfælde må borgerne genhuses midlertidigt indtil skaderne er udbedret. Derudover er der i forbindelse med bebyggelse øget risiko for menneskers sikkerhed i forbindelse med oversvømmelse. Ved stormflodsvarsel og højvande, som udgør en særlig trussel for indbyggernes helbred, vil disse blive evakueret. Ved oversvømmelse er der ligeledes risiko for økonomisk tab ved oversvømmelse af landbrugsarealer, som kan fører til formindsket eller intet udbytte af afgrøderne fra disse områder. [Kystdirektoratet, 2018]

Naturområderne ved kysterne risikerer derudover ved stormflod og havspejlsstigninger, at blive væsentlig belastet eller forsvinde, som følger af oversvømmelse og erosion. Ved kyster, hvor der er etableret diger, er der risiko for at naturområderne kan blive "klemt"og der vil stå vand over længere tid på indersiden af diget, som vil påvirke naturen her.[Klimatilpasning - Miljø og fødevareministeriet/Miljøstyrelsen, 2019]

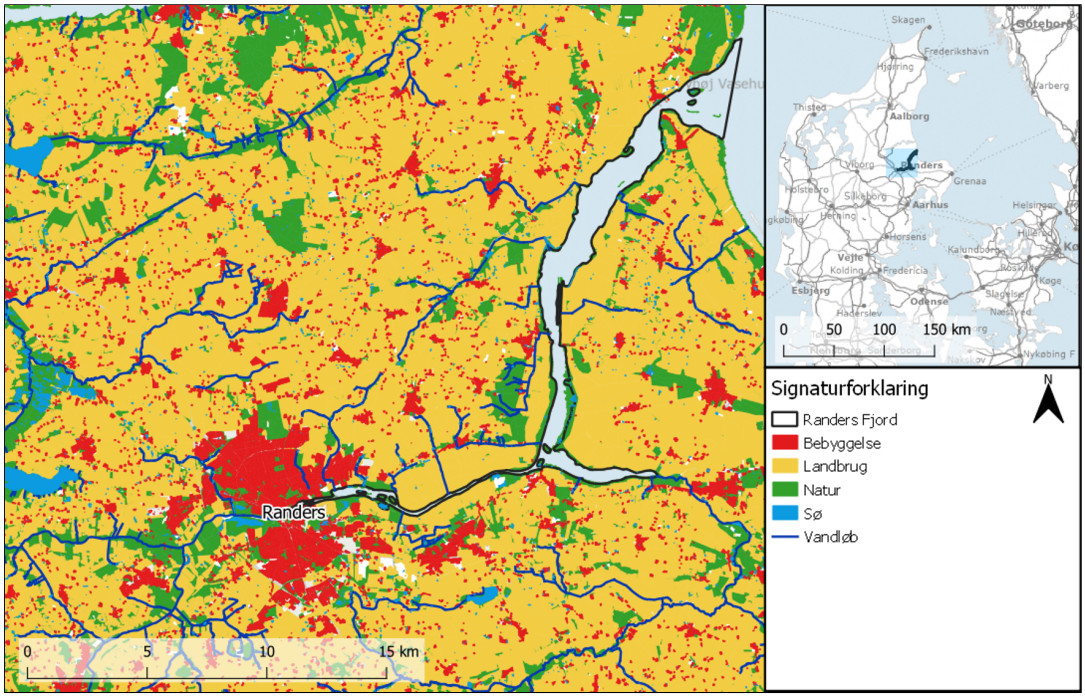
På baggrund af undersøgelserne i afsnit 4.1, 4.2 og 4.3 vurderes det, at der ved den vestlige del af Limfjorden, Randers Fjord, Odense Fjord, Roskilde Fjord og Nakskov Fjord er særlig risiko for oversvømmelse, hvorfor arealanvendelsen ved disse fjorde er vist i det følgende. Arealanvendelsen er inddelt i kategorierne bebyggelse, landbrug, natur, søer og vandløb.

Arealanvendelsen ved den vestlige del af Limfjorden er angivet på figur 4.4. Af figuren fremgår det, at der ved den vestlige del af Limfjorden er flere områder med tæt bebyggelse blandt andet ved Thisted, Lemvig, Struer og Skive. Derudover fremgår det, at der ved kysterne er enkelte naturområder og flere landbrugsområder ned til kysten.



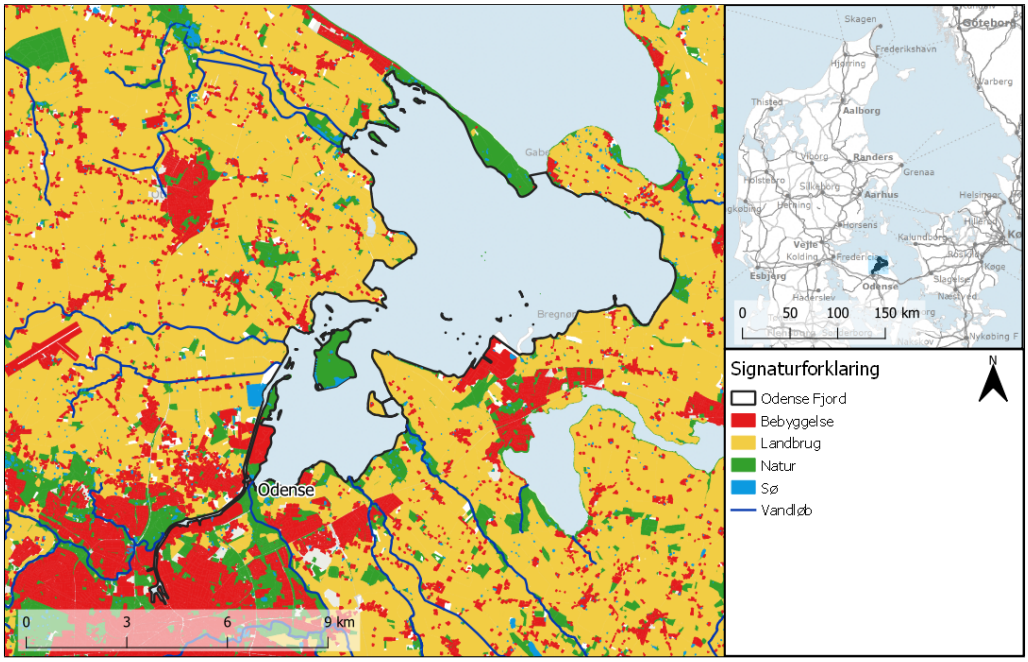
Figur 4.4. *Arealanvendelsen ved den vestlige del af Limfjorden inddelt i kategorierne bebyggelse, landbrug, søer og vandløb. Danmarks Miljøportal [2020]*

Ved Randers Fjord fremgår det af figur 4.5, at arealanvendelsen i områderne omkring den yderste del af fjorden primært består af landbrug, mens arealanvendelsen ved den inderste del af Randers Fjord består af bebyggelse ved Randers by.



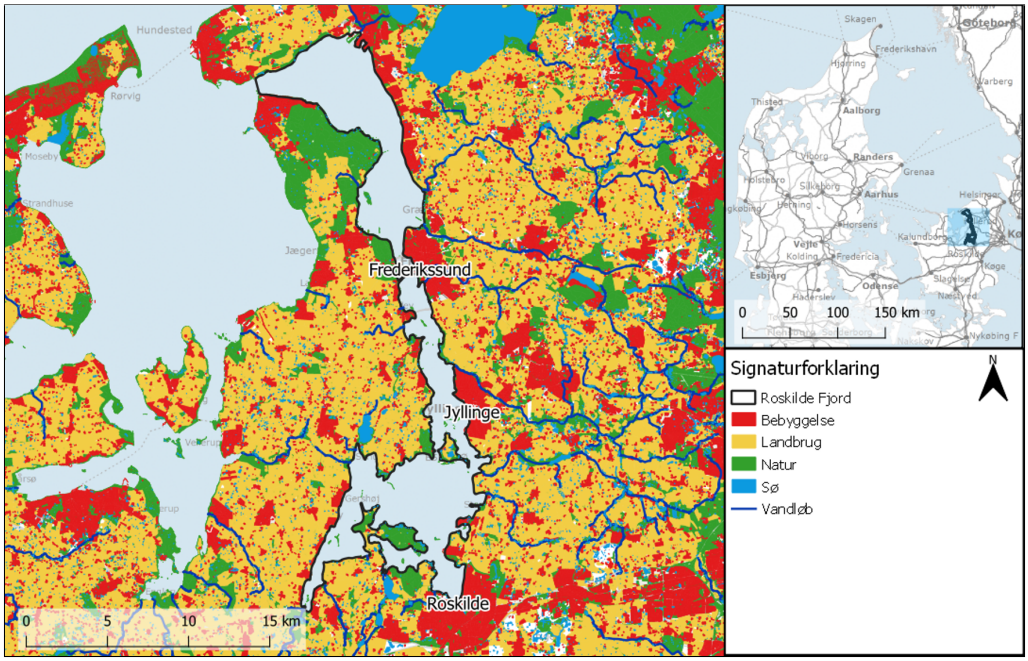
Figur 4.5. *Arealanvendelsen ved Randers Fjord inddelt i kategorierne bebyggelse, landbrug, søer og vandløb. Danmarks Miljøportal [2020]*

Arealanvendelsen ved Odense Fjord er angivet på figur 4.6. Af figuren fremgår det, at Odense by er beliggende i bunden af Fjorden. Derudover er der ved kystområderne ved Odense Fjord landbrug og naturområder.



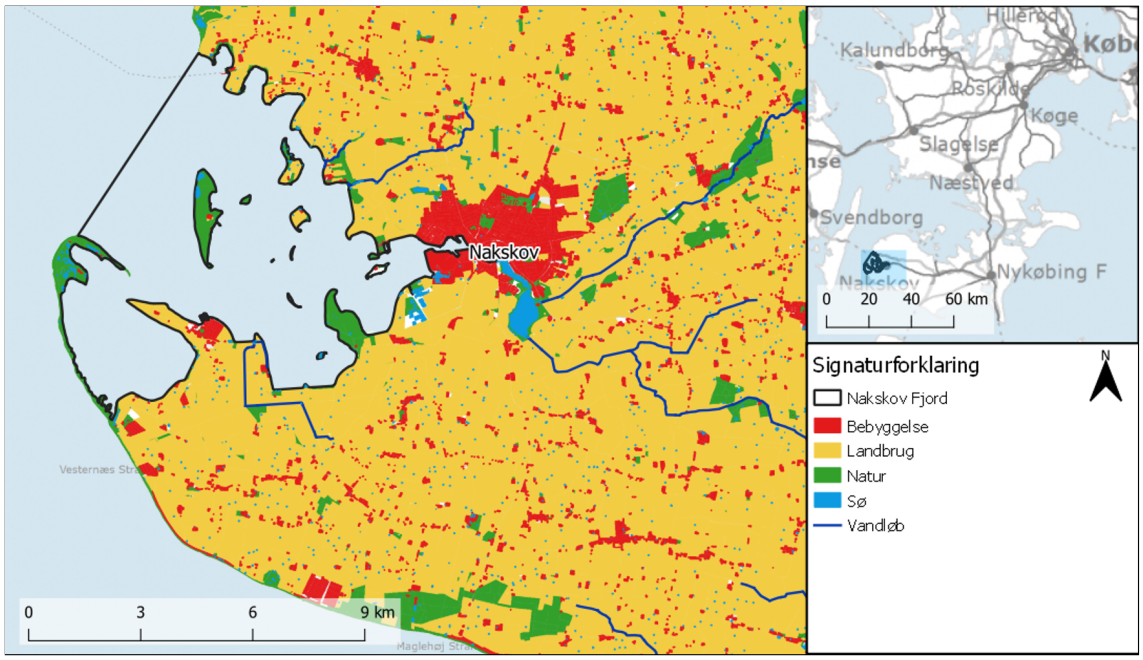
Figur 4.6. *Arealanvendelsen ved Odense Fjord inddelt i kategorierne bebyggelse, landbrug, søer og vandløb. Danmarks Miljøportal [2020]*

Ved Roskilde Fjord ligger der flere byområder herunder blandt andet Frederikssund, Jyllinge og Roskilde, som det fremgår af figur 4.7. Derudover fremgår det, at der langs kysten er flere naturområder og landbrugsarealer.



Figur 4.7. *Arealanvendelsen ved Roskilde Fjord inddelt i kategorierne bebyggelse, landbrug, søer og vandløb. Danmarks Miljøportal [2020]*

Arealanvendelsen ved Nakskov Fjord fremgår af figur 4.8. Det ses af figuren at Nakskov by er beliggende i bunden af fjorden. Derudover er området primært præget af landbrug og få naturområder.



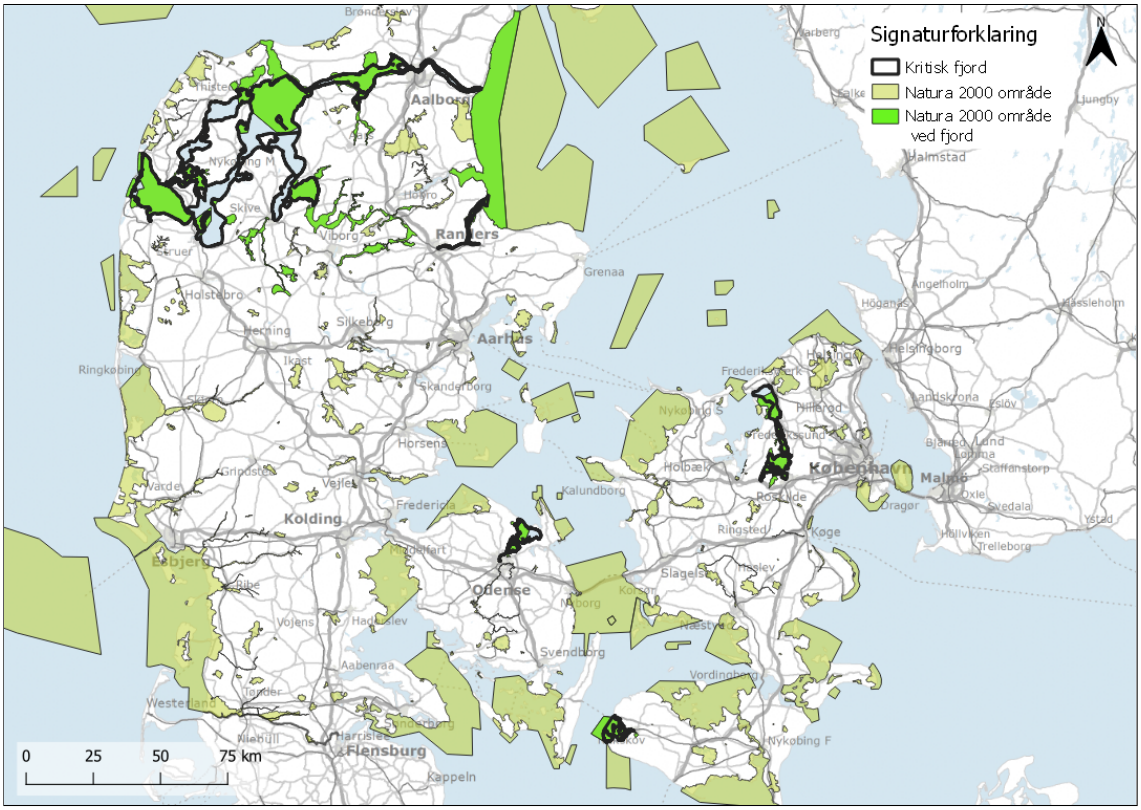
Figur 4.8. *Arealanvendelsen ved Nakskov Fjord inddelt i kategorierne bebyggelse, landbrug, søer og vandløb. Danmarks Miljøportal [2020]*

4.4.1 Natura 2000

Langs de danske kyster findes flere naturområder, og der findes naturmiljøer i vandet. Nogle af naturområderne er udpeget til natura 2000 områder, hvilket betyder, at der inden for disse områder er særlige krav til beskyttelse og overvågning af fauna og flora. [Miljø- og Fødevareministeriet, Miljøstyrelsen, 2018] På figur 4.9 fremgår de udpegede Natura 2000 områder, som er beliggende i eller ved fjordene. Natura 2000 områderne, som er beliggende i eller ved en af de fem fjorde, som er vurderet kritisk, er markeret med en kraftigere lysegrøn, ligeledes er de kritiske fjorde markeret med en sort ramme.

Af figur 4.9 fremgår det, at der ved kysterne og i vandet i de danske fjorde er flere Natura 2000 områder, som muligvis påvirkes af stormfloder og havspejlslstigninger. Derudover skal der tages hensyn til disse i forbindelse med etablering af oversvømmelsesbeskyttelse. Ydermere fremgår det, at der er udpegede Natura 2000 områder ved de fem kritiske fjorde. Ved Randers Fjord er Natura 2000 området, dog i forbindelse med fjordens udmunding til havet, hvorfor det vurderes knap, så kritisk som de øvrige Natura 2000 område, men det skal dog fortsat tages med i vurderingen i forbindelse med etableringen af oversvømmelsesbeskyttelse.

Generelt er det vanskeligt ud fra arealanvendelsen alene at vurdere, hvilke fjorde der er mest kritiske med tanke på, hvilke arealer der potentielt kan oversvømmes. Arealet i oplandet til fjordene er generelt udnyttet med byer og landbrug helt ned til kysterne.

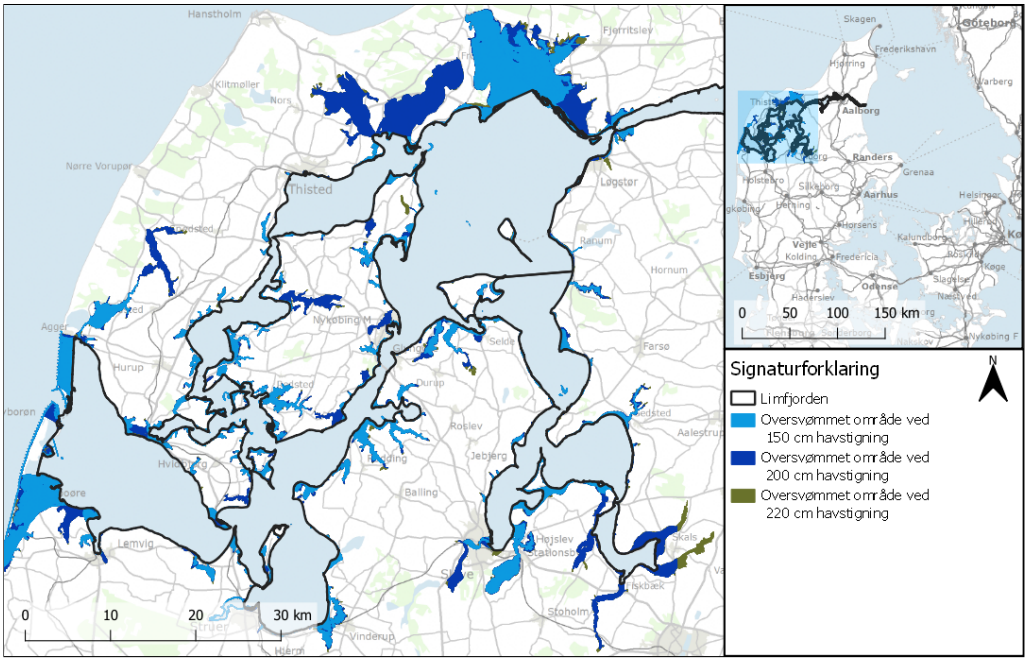


Figur 4.9. *Udpegede Natura 2000 områder på land og i havet omkring Danmark. De kritiske fjorde er vist med en sort ramme, og Natura 2000 områderne er markeret med en kraftigere lysegrøn farve. Data er indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020]*

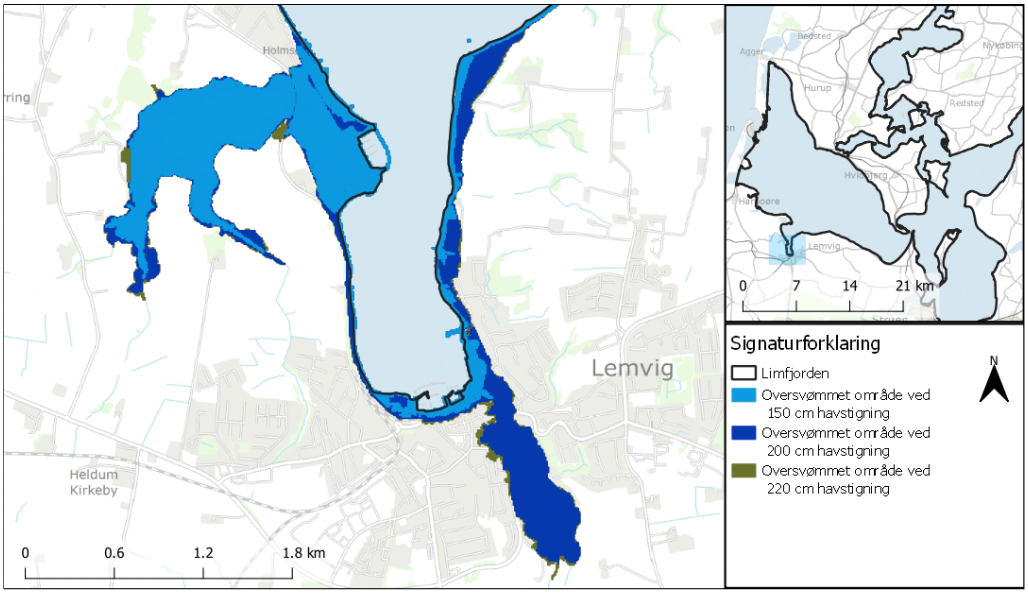
4.5 Oversvømmelse ved given havstigning

Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016] har udviklet et klimatilpasningsværktøj, til at estimerer hvilke områder, der vil rammes af oversvømmelse ved en given stigning i havniveauet. Værktøjet kan ikke anvendes alene, men kan benyttes til at give et overblik over, hvilke områder der kan blive ramt af oversvømmelser. Oversvømmelserne estimeret ved anvendelse af Klimaværktøjet for de fem kritiske fjorde Limfjorden Vest, Randers Fjord, Odense Fjord, Roskilde Fjord og Nakskov Fjord er angivet og vurderet i det følgende.

På figur 4.10 er de estimerede oversvømmelser i den vestlige del af Limfjorden ved en havstigning på henholdsvis 150 cm, 200 cm og 220 cm angivet. Af denne fremgår det, at flere områder langs kysten ved den vestlige del af Limfjorden vil oversvømmes i forbindelse med havstigningerne, blandt andet vil områder ved byerne Lemvig, Skive og Struer oversvømmes. De estimerede oversvømmelser ved Lemvig er medtaget i rapporten, som et eksempel på oversvømmelser ved byerne ved den vestlige del af Limfjorden og fremgår af figur 4.11. Det ses, at havnenarealet, kystarealet og et område nord vest for Lemvig vil oversvømmes ved en havstigning på 150 cm, og ved en stigning i havniveauet til 200 cm vil et område i selve Lemvig (syd for fjorden) ligeledes oversvømmes.

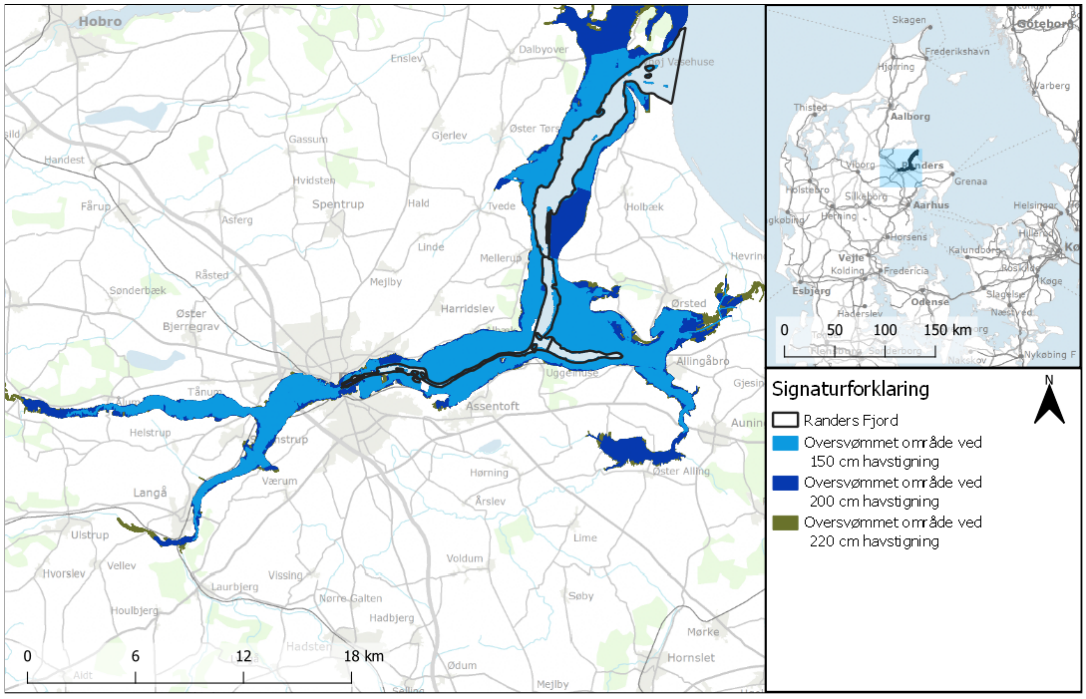


Figur 4.10. *Estimat for hvilke områder ved den vestlige del af Limfjorden, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*

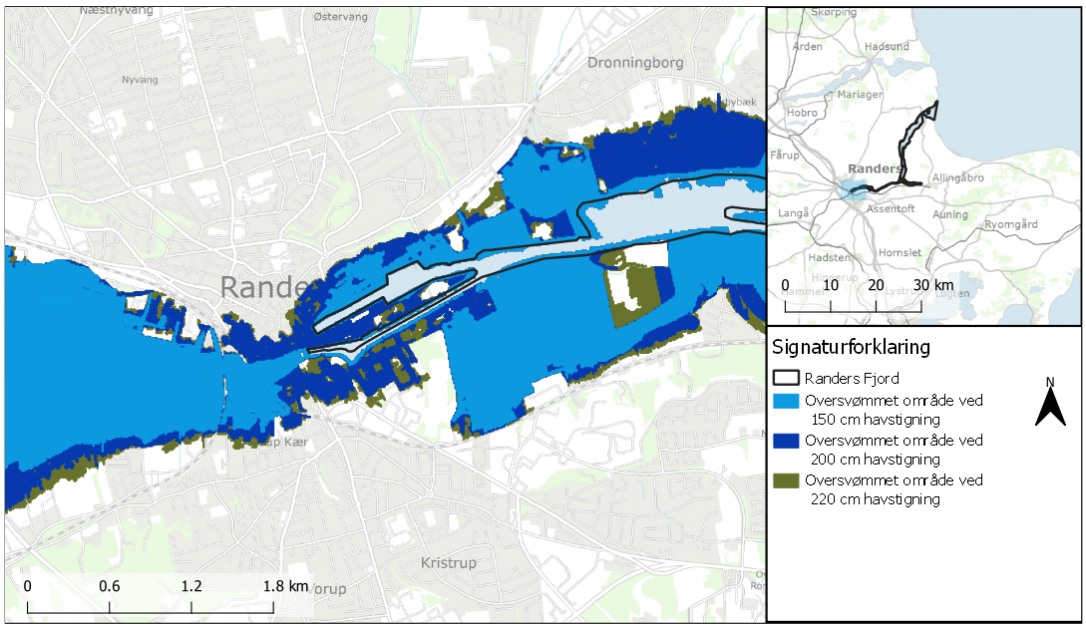


Figur 4.11. *Estimat for hvilke områder ved Lemvig, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*

De estimerede oversvømmelser ved en havstigning på henholdsvis 150 cm, 200 cm og 220 cm ved Randers Fjord fremgår af figur 4.12. Det ses at størstedelen af kyststrækningen ved Randers Fjord vil oversvømmes ved en stigning i havniveauet på 150 cm, og ved en havstigning på 200 cm vil den resterende ikke oversvømmede kyststrækning ved fjorden oversvømmes. Et mere detaljeret billede af oversvømmelserne ved Randers by er angivet på figur 4.13.



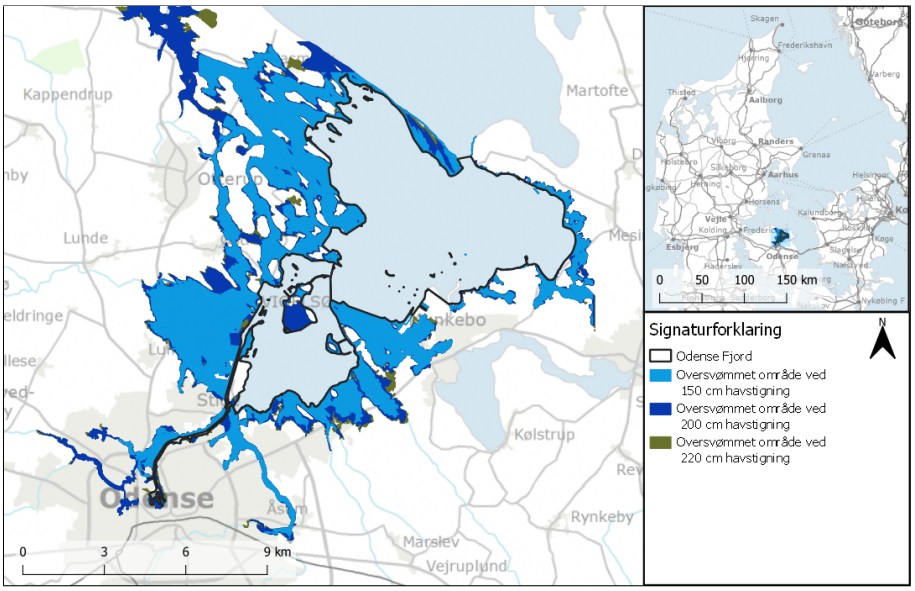
Figur 4.12. *Estimat for hvilke områder ved Randers Fjord, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*



Figur 4.13. *Estimat for hvilke områder ved Randers by, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*

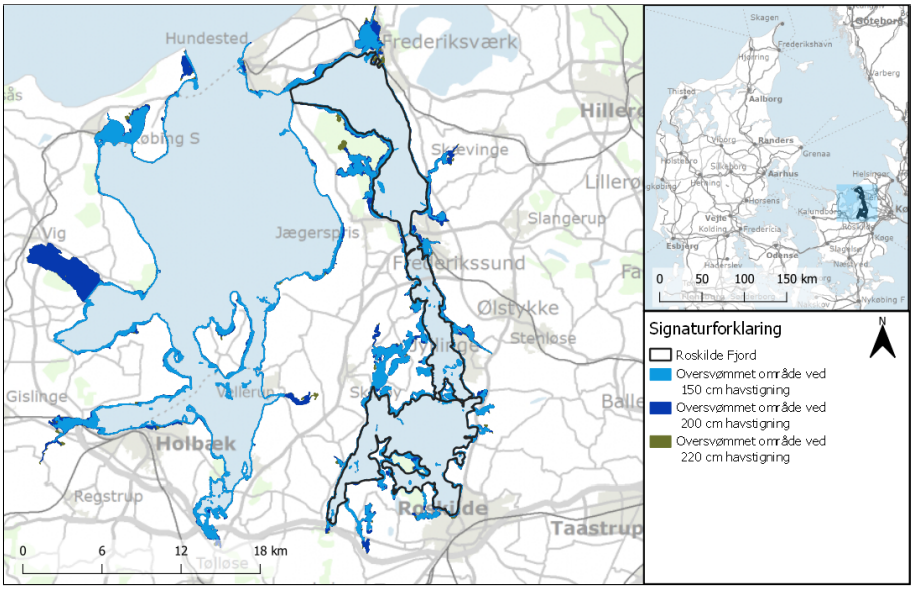
Det fremgår, at havnen og den centrale del af Randers estimeres at kunne modstå havstigninger på 150 cm, men at områderne længere fra bykernen vil oversvømmes ved en stigning i havniveauet på 150 cm.

Ved en stigning i havniveauet på henholdsvis 150 cm, 200 cm og 220 cm er det estimeret, at der vil forekomme oversvømmelser på flere dele af kyststrækningen i Odense fjord, se figur 4.14. Derudover fremgår det, at der vil ske oversvømmelser i Odense by, som følger af oversvømmelser ved Odense Å og Odense Kanal.

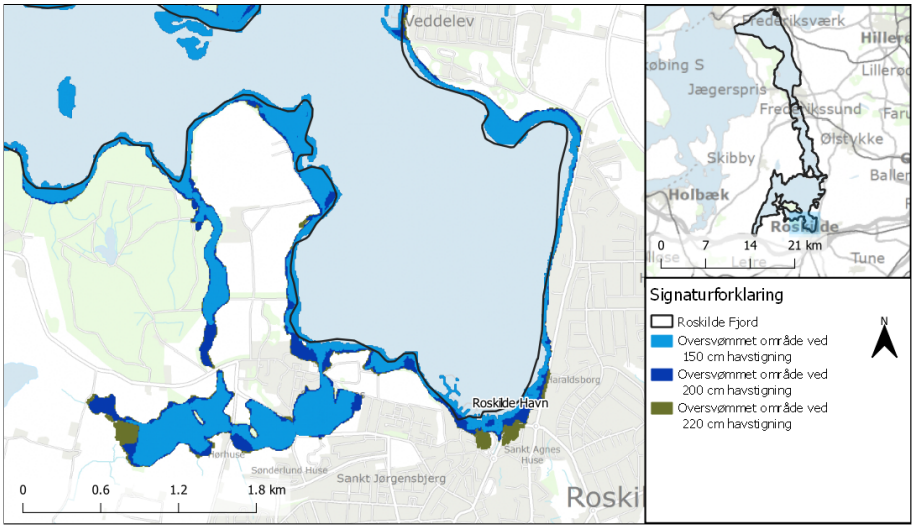


Figur 4.14. *Estimat for hvilke områder ved Odense Fjord, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*

På figur 4.15 er de estimerede oversvømmelser ved Roskilde Fjord ved en havstigning på henholdsvis 150 cm, 200 cm og 220 cm angivet, mens de estimerede oversvømmelserne ved Roskilde by ved tilsvarende stigninger i havniveauet fremgår af figur 4.15.



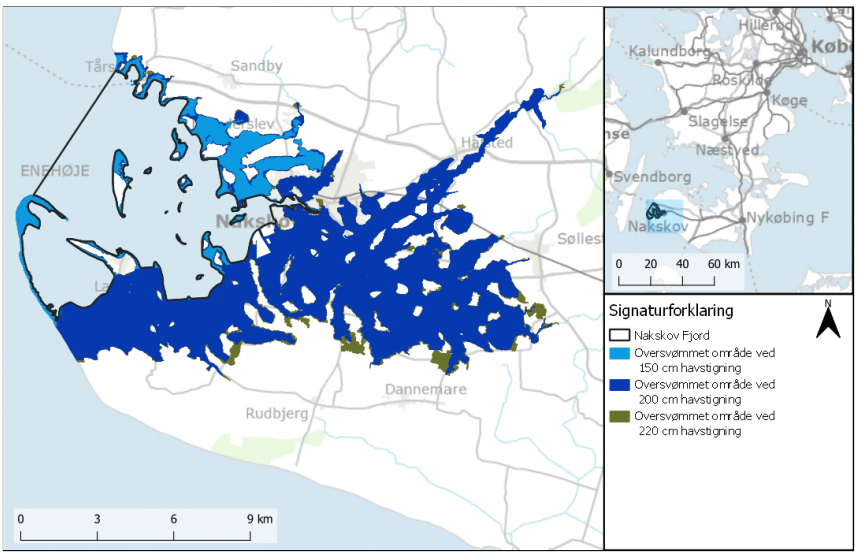
Figur 4.15. *Estimat for hvilke områder ved Roskilde Fjord, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*



Figur 4.16. *Estimat for hvilke områder ved Roskilde by, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*

Af figur 4.15 og 4.16 ses det, at kysterne ved Roskilde Fjord oversvømmes i forbindelse med stigningerne i havniveauet på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Ydermere fremgår det, at der vil ske oversvømmelser i oplandet til Roskilde Fjord blandt andet vil et område vest for Roskilde by oversvømmes, ligesom der vil ske oversvømmelser ved Roskilde Havn, hvor blandt andet Vikingeskibsmuseet er beliggende.

De estimerede oversvømmelser ved Nakskov Fjord er angivet på figur 4.17. Det kan ses af figuren, at dele af Nakskov Fjords nordlige kyst oversvømmes ved en havstigning på 150 cm, mens Nakskov Fjords sydlige kyst og bagland først oversvømmes ved en havstigning på 200 cm. Yderligere fremgår det, at dele af oversvømmelsen kan stamme direkte fra havet og ikke kun fra fjorden.



Figur 4.17. *Estimat for hvilke områder ved Nakskov Fjord, der vil blive ramt af oversvømmelse i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Data indhentet fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]*

Ud fra analysen af de estimerede oversvømmelser ved Limfjorden Vest, Randers Fjord, Odense Fjord, Roskilde Fjord og Nakskov Fjord fremgår det at kysterne og dele af baglandet ved de fem fjorde alle vil påvirkes af oversvømmelser ved en stigning i havniveauet på henholdsvis 150 cm, 200 cm og 220 cm. Generelt fremgår det, at forskellen på oversvømmelsesudbredelserne ved en havstigning på 200 cm og 220 cm er begrænset. På baggrund af de estimerede oversvømmelser, som fremgår af figurene, ses det at stort set hele kyststrækningen ved Randers Fjord og Odense Fjord oversvømmes ved en havstigning på 150 cm. Ved Limfjorden og ved Roskilde Fjord fremgår det, at havenområder og bebyggedeområder oversvømmes i forbindelse med havstigning. Ved Nakskov Fjord vil oversvømmelser ved hele fjorden og oplandet først opstå ved en havstigning på 200 cm, da kun den nordlige del af fjorden estimeres at oversvømme ved en havstigning på 150 cm.

4.6 Udvælgelse af kritiske fjorde

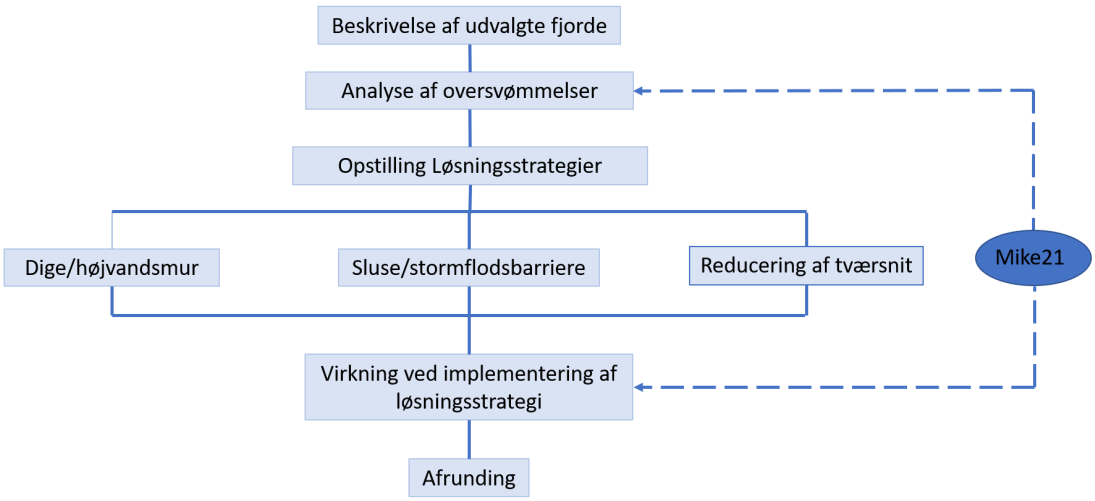
På baggrund af undersøgelserne i afsnit 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 og 4.5 er det valgt, at arbejde videre med Randers Fjord og Limfjorden. Randers Fjord er udvalgt, da denne som beskrevet i afsnit 4.2, på baggrund af EU's oversvømmelses direktiv er udpeget som et risiko område og i afsnit 4.4 er det beskrevet af Randers bykerne ligger ved enden af fjorden, ligsom der langs fjordkysterne er landbrugsarealer. Derudover fremgår det, som beskrevet i afsnit 4.5, at der langs kysten og i Randers by vil opstå oversvømmelser i forbindelse med havstigning på 150 cm, 200 cm og 220 cm. Ydermere er Randers Fjord valgt fremfor Odense Fjord trods flere af de samme problematikker, da Randers Fjord på baggrund af afsnit 4.5 vurderes mest kritisk af de to. Det skyldes, at det oversvømmede areal pr. kommune er større ved Randers Fjord og at gentagelsesperioden for oversvømmelse i Randers Fjord er lavere end i Odense Fjord. Det er valgt at arbejde videre med Limfjorden, da det på baggrund af afsnit 4.1 kan ses, at der ved den vestlige del af Limfjorden har været mange tidligere stormflodshændelser. Derudover er der ved Limfjorden flere byer og landbrugsområder, der vil blive ramt af oversvømmelse ved en havstigning på henholdsvis 150 cm, 200 cm og 220 cm. Limfjorden har ydermere udmunding i Vesterhavet samt i Kattegat, og af denne grund er det interessant, at arbejde videre med denne for at se, om det vil have nogen betydning for oversvømmelsen og den nødvendige indsats for at reducere disse.

Projektkonkretisering 5

Oversvømmelser ved de danske fjorde er, som belyst ovenfor, et problem og i forbindelse med klimaændringerne forventes det, at problemet med oversvømmelser øges. Det er derfor valgt, gennem dette projekt at undersøge, hvorvidt der kan etableres foranstaltninger ved de danske fjorde, som kan reducere eller forhindre oversvømmelser. Randers Fjord og Limfjorden er udvalgt som eksempel fjorde, da disse er vurderet særligt kritiske i forhold til oversvømmelse.

Følgende hypotese er opstillet og forsøgt bekræftet gennem arbejdet med projektet:
Oversvømmelse af kystområderne ved Randers Fjord og den vestlige del af Limfjorden kan reduceres eller forhindres ved at etablere oversvømmelsesbeskyttende foranstaltninger.

Gennem projektet er hypotesen forsøgt bekræftet, ved at opstille en model over Randers Fjord og Limfjorden i MIKE21 for at analyserer oversvømmelsernes udbredelsen og dernæst forsøge at forhindre disse ved implementering af forskellige løsningsstrategier. På figur 5.1 ses en principskitse over rapportstrukturen, som er anvendt i den kommende del af projektet.



Figur 5.1. *Rapportstrukturen som er anvendt i dette projekt.*

Del II

Modellering af oversvømmelser

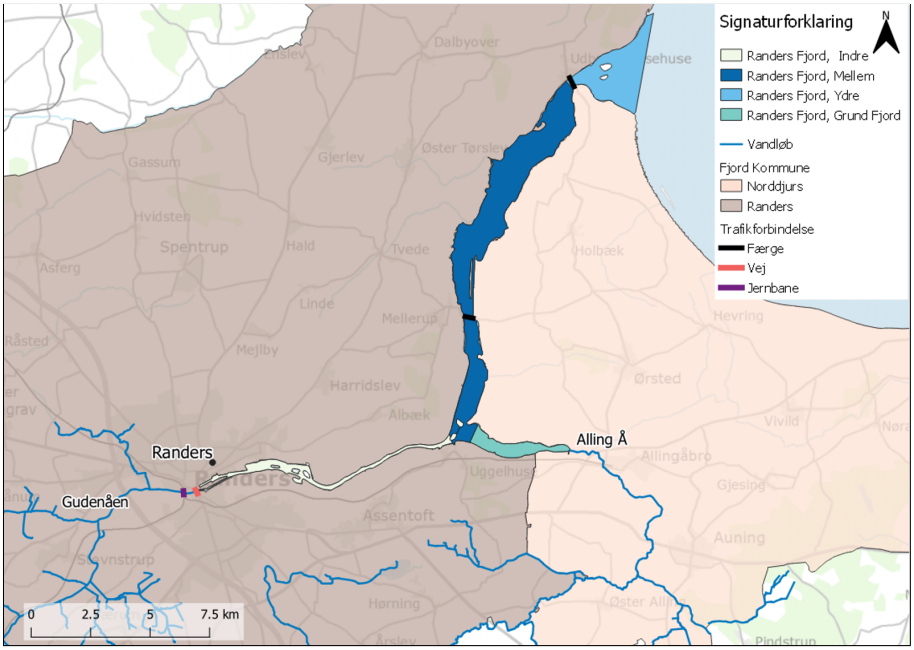
Randers Fjord og Limfjorden 6

Randers Fjord og Limfjorden er i det følgende kort beskrevet. I beskrivelsen er tilstrømmende vandløb, kommunerne omkring fjordene og de trafikale forbindelser på tværs af fjordene inkluderet.

6.1 Randers Fjord

Randers Fjord strækker sig fra udmundingen i Kattegat til Randers by og er sammenlignet med Limfjorden en meget smal fjord. Fjorden kan foruden Grund Fjord, inddeles i tre dele her defineret som indre fjord, mellem fjord og ydre fjord. Den indre del af fjorden ved Randers by er den smalleste, den mellemste del af fjorden er bredere, mens den yderste del af fjorden er tragt formet og udgør fjordens udmunding til Kattegat. I fjorden er der etableret en sejlrende med en dybde på omkring 7 m, der sikrer skibstrafik til Randers by. [Den Store Danske, Gyldendal, 2017]

Randers Fjord med tilhørende fjordkommuner, trafikale forbindelser og vandløb med en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret(oktober til marts) >1 m^3/s fremgår af figur 6.1.



Figur 6.1. *Randers Fjord med tilhørende fjordkommuner, trafikale forbindelser og vandløb med en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret >1 m^3/s. Data er indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020].*

Det fremgår af figur 6.1, at Randers Kommune grænser op til størstedelen af fjorden, mens Norddjurs Kommune grænser op til den østlige fjordkyst og en del af Grund Fjord. Trafikken på tværs af fjorden afvikles ved to færgeforbindelser og ved Randers en vej- og jernbaneforbindelse på tværs af Gudenåen. Flere vandløb har deres udløb til Randers Fjord, men det er valgt kun at medtage vandløb med en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret >1 m^3/s. Den gennemsnitlige vandføring i vinterhalvåret er anvendt, da den gennemsnitlige vandføringen i sommerhalvåret er lavere og da stormfloder typisk forekommer i vinterhalvåret. To vandløb med en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret >1 m^3/s har deres udløb i Randers Fjord. Dette er Gudenåen og Alling Å, hvis gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret er henholdsvis 35,0 m^3/s og 3,7 m^3/s. [Danmarks Miljøportal, 2020]

I tabel 6.1 er den tilførte vandmængde fra Gudenåen og Alling Å sammenlignet med Randers Fjords areal for at få et billede af, om vandtilførslen fra vandløbene vil have betydning for oversvømmelse ved fjorden.

Tabel 6.1. *Sammenligning af vandføringen fra Gudenåen og Alling Å med Randers Fjords Areal. Data er indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020].*

	Vandføring [m^3/s]	Areal Randers Fjord [km^2]	Tilføjet vand pr. areal [cm/dag]
Gudenåen	34,95	26,3	11,5
Alling Å	3,67	26,3	1,20

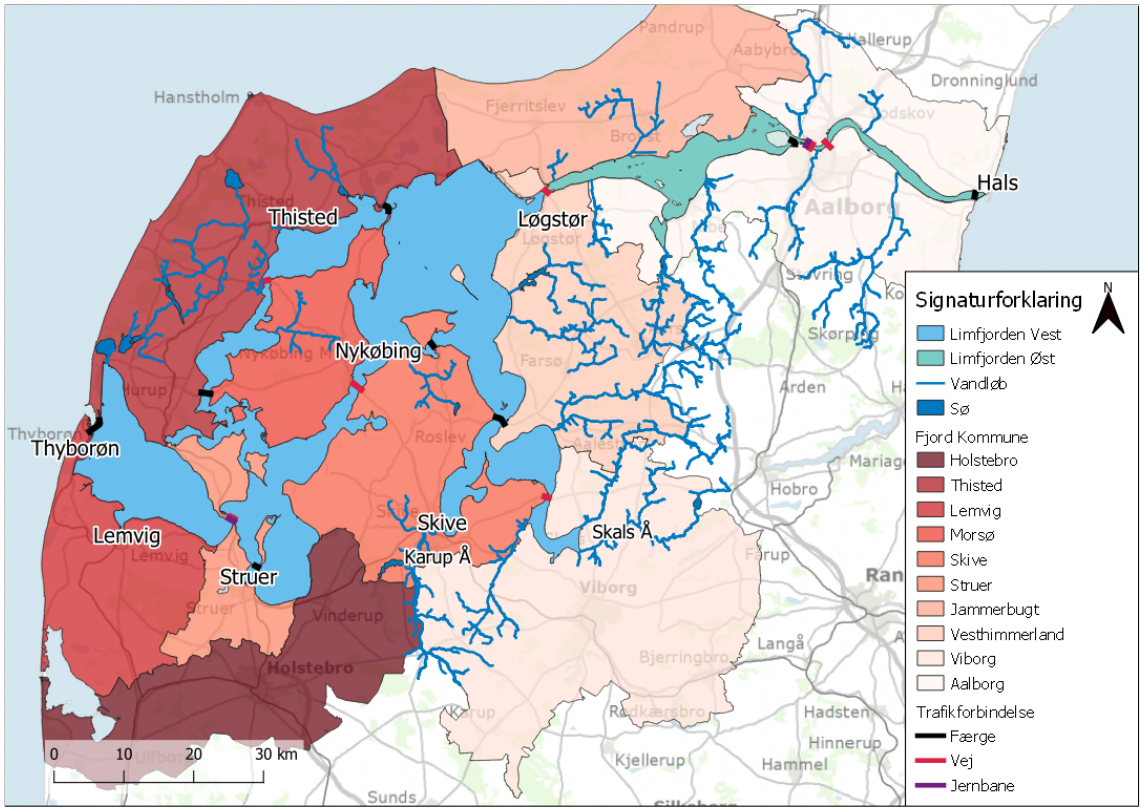
Af tabel 6.1 fremgår det, at Gudenåen bidrager med 11,5 cm vand pr. dag og Alling Å bidrager med 1,20 cm vand pr. dag til Randers Fjord. Det er vurderet, at vandtilførslen fra Gudenåen kan have betydning for oversvømmelserne i Randers Fjord. Dette er også blevet beskrevet i forbindelse med EU's oversvømmelses direktivs udpegning af Randers Fjord til et risiko område. På baggrund af dette er det valgt, at medtage en del af Gudenåen og dens vandføring i modellen over Randers Fjord.

6.2 Limfjorden

Trods navnet er Limfjorden et sund, der adskiller den Nørrejyske Ø fra det øvrige Jylland. Sundet har ved Thyborøn Kanal åbning til Vesterhavet og ved Hals åbning til Kattegat. Den østlige del af sundet fra Løgstør til Hals er meget smalt i modsætningen til den vestlige del fra Løgstør til Thyborøn, der er bredere med flere øer. I Limfjorden er der sejlrender med en dybde på optil 10 m, som sikrer den industrielle skibstrafik til de større havne som Aalborg Havn. Derudover sejles der i fjorden med mindre skibe og både. [Den Store Danske, 2017]

Limfjorden har ikke altid været et sund, da åbningen ved Thyborøn kanal ikke altid har eksisteret. Åbningen blev skabt af stormfloder i 1825 og i 1862. I slutningen af 1800'tallet blev der ved de to landtanger på hver sin side af Thyborøn Kanal konstrueret høfder til at beskytte tangerne mod erosion. [Miljø-og Fødevareministeriet, 2018] Med tiden vil åbningen ved Thyborøn Kanal øges som følge af havets erosion af kanalen. Det betyder, at der fremadrettet vil presses mere vand ind i Limfjorden, som vil resulterer i, at oversvømmelserne af kystområderne vil blive kraftigere. [Ingvardsen et al., 2012]

Limfjorden med tilhørende fjordkommuner, trafikale forbindelser og vandløb med en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret >1m^3/s er vist på figur 6.2.



Figur 6.2. *Den østlige og vestlige del af Limfjorden, fjordkommuner, trafikale forbindelser og vandløb med en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret >1 m^3/s. Data indhentet fra [Danmarks Miljøportal, 2020].*

Det fremgår af figur 6.2 at ti kommuner grænser op til Limfjorden og ni af disse kommuner grænser op til den vestlige del af Limfjorden, der i dette projekt er defineret fra Thyborøn Kanal til Løgstør. På tværs af Limfjorden er der flere trafikale forbindelser herunder færgeruter, veje og jernbaner, som forbinder dels den Nørrejyske Ø med det øvrige Jylland, men også forbinder flere af Limfjords øerne til fastlandet. Flere vandløb har deres udløb til Limfjorden, men ligesom det er tilfældet med Randers Fjord, er det valgt kun at medtage vandløb med en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret >1 m^3/s. Karup Å og Skals Å har en gennemsnitlig døgnvandføring i vinterhalvåret på henholdsvis 10,0 m^3/s og 5,9 m^3/s, hvilket betyder, at de målt på vandføringen er de største vandløb i Limfjordens opland [Danmarks Miljøportal, 2020].

I tabel 6.2 er den tilførte vandmængde fra Karup Å og Skals Å sammenlignet med Limfjordens areal.

Tabel 6.2. *Sammenligning af vandføringen fra Karup Å og Skals Å med Limfjordens areal. Data er indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020].*

	Vandføring [m^3/s]	Areal Limfjorden [km^2]	Tilført vand pr. areal [cm/dag]
Karup Å	9,98	1527	0,06
Skals Å	5,90	1527	0,03

Af tabel 6.2 fremgår det, at vandløbene Karup Å og Skals Å sammenlagt bidrager med 0,09 cm vand til Limfjorden pr. dag i vinterhalvåret. Dette er en lille vandmængde i forhold til fjordenes størrelse, hvorfor det er valgt ikke at medtage vandtilførslen fra vandløb i modellen over Limfjorden,

Opbygning af model 7

Oversvømmelserne, der vil forkomme i forbindelse med stormflod og kraftig højvande ved kystområderne i Randers Fjord og Limfjorden, er undersøgt ved at anvende det hydrodynamiske-modelleringsværktøj MIKE21. En 2D-model med fleksibelt beregningsnet er opstillet for de to fjorde og dele af det omkringliggende terræn. Modellernes opbygningen, kalibrering og validering er beskrevet i det følgende.

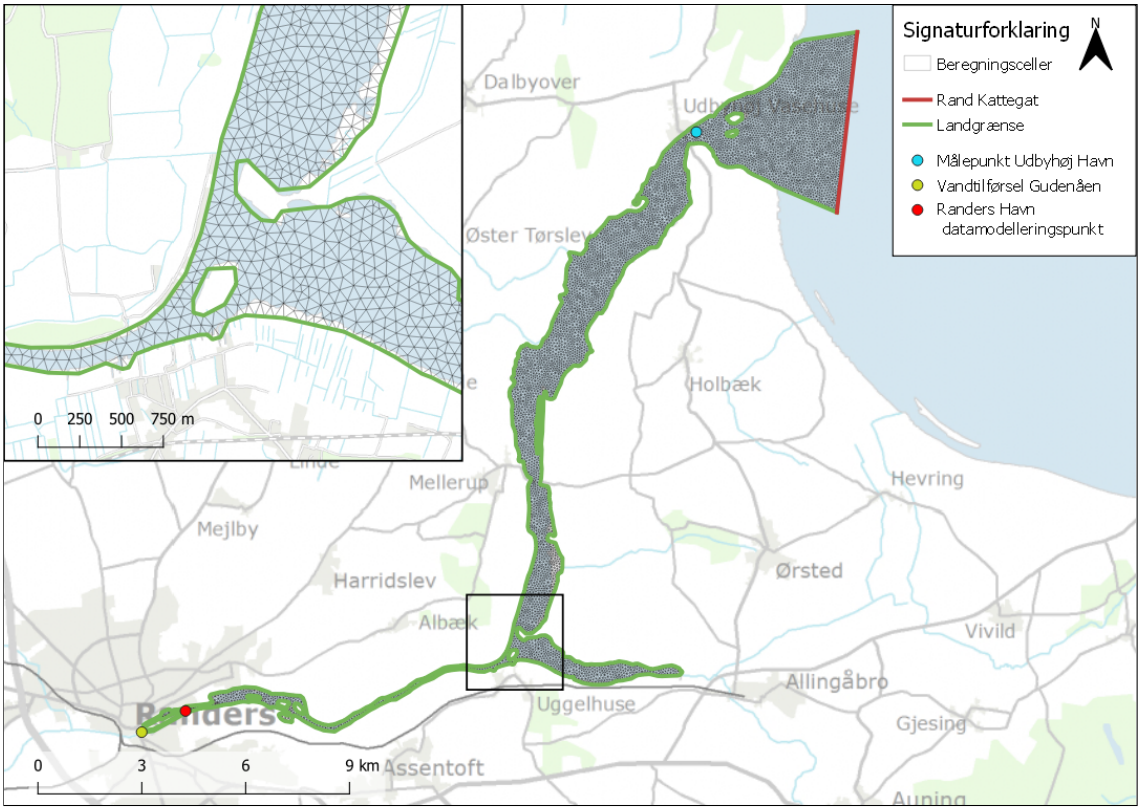
7.1 Randers Fjord model

En model over Randers Fjord og dele af det omkringliggende terræn er opstillet, således de mulige oversvømmelser i området fra fjorden kan modelleres. Modellen er opstillet over to omgange. Først er en model over Randers Fjord uden terræn opstillet og kalibreret, derefter er en model over Randers Fjord med terræn opstillet med udgangspunkt i modellen uden terræn. Dette er gjort for at lette kalibreringsprocessen, da modellen opstillet uden terræn er mindre beregningstung og dermed hurtigere at køre end modellen med terræn.

7.1.1 Randers Fjord model uden terræn

I forbindelse med opstilling af modellen er et beregningsnet over Randers Fjord opstillet. Beregningsnettet er opbygget med triangulære beregningsceller og en vandstandsrand i Kattegat, som det fremgår af figur 7.1

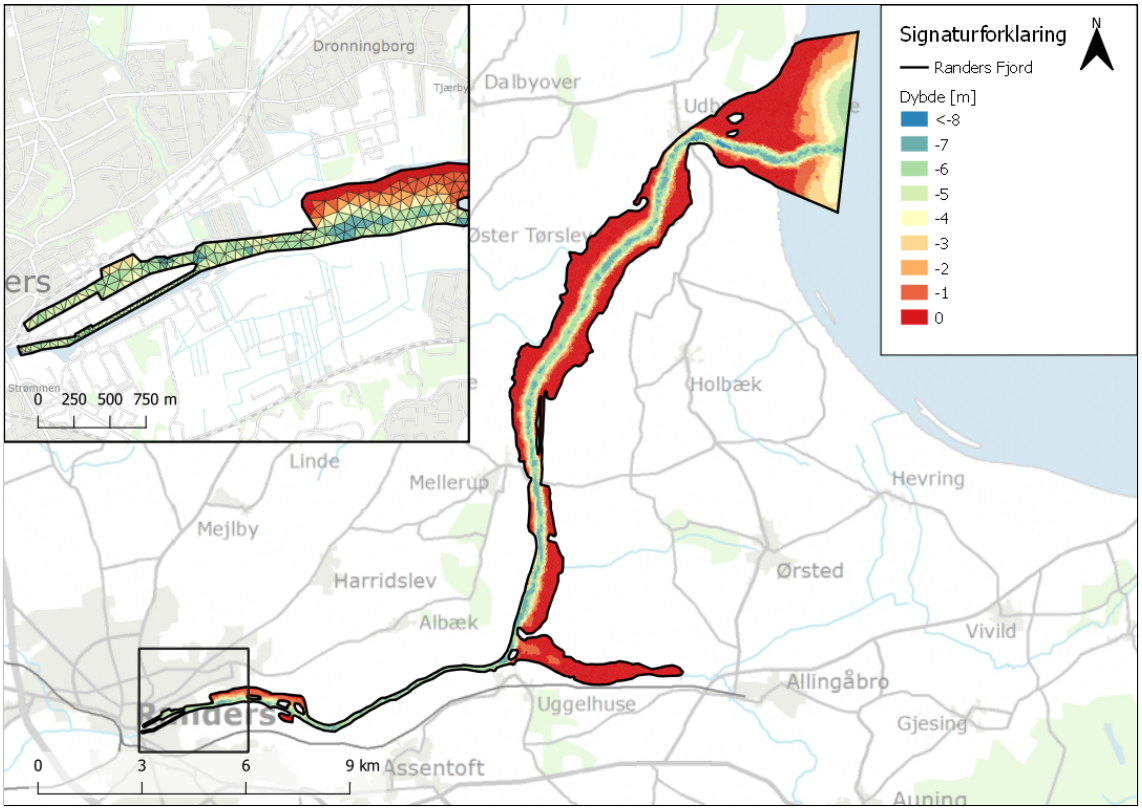
På vandstandsranden er anvendt vandstandsmålinger, som er konstante over hele randen, men varierende i tid. Det er valgt at anvende vandstandsmålinger fra Udbyhøj Havn, hvis placering fremgår af figur 7.1, da der ikke er tilgængelige vandstandmålinger i Kattegat udfor Randers Fjords udmunding. I forbindelse med modelleringen er det kontrolleret, at der kun er minimal afvigelse mellem de anvendt vandstande på randen, og de simulerede vandstande ved Udbyhøj Havn. Derfor er det antaget, at vandstandsmålingerne ved Udbyhøj Havn er repræsentative for vandstanden i Kattegat ved fjordens udmunding. Vandstandene er målt på 10 minutters basis i perioden december 2011 til 2020 og indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut [2020a].



Figur 7.1. *Udformning af beregningsnettet, som er anvendt i Randers Fjord modellen uden terræn, og angivelse af vandstandsranden i Kattegat samt måle- og modelpunkters placering.*

Foruden vandstandsvariationerne er vinden en drivende kraft for vandets bevægelse i fjorden. I modellen er vindretning og -styrke varierende over tid, men de er antaget ens i sted over hele modelområdet. Der er anvendt vindmålinger fra Randers Havn, som er antaget repræsentative for hele området. Disse er målt på timebasis i perioden 2009 til 2020 og indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut [2020b]

Dybdekortet af Randers Fjord, som er anvendt i modellen, er fastsat dels på baggrund af interpolation med udleveret dybdedata over fjorden og dels ved manuelle justeringer i forhold til søkort fra Krak og Eniro [2019], da den tilgængelige dybdedata kun dækkede dele af fjorden. Derudover er dybdekortet ligeledes korrigeret i forbindelse med kalibreringen. På figur 7.2 ses det endelige dybdekort over Randers Fjord. Af denne fremgår det, at den inderste del af Randers Fjord på dybdekortet er omkring -7 m næsten over det hele, hvilket ikke er tilfældet, da sejlrenden i virkeligheden er smallere. Denne afvigelse fra virkeligheden skyldes tilpasningen, der er foretaget i forbindelse med kalibreringen af modellen, og afvigelsen er vurderet acceptabel i forhold til modellens anvendelse.



Figur 7.2. *Dybdekort over Randers Fjord.*

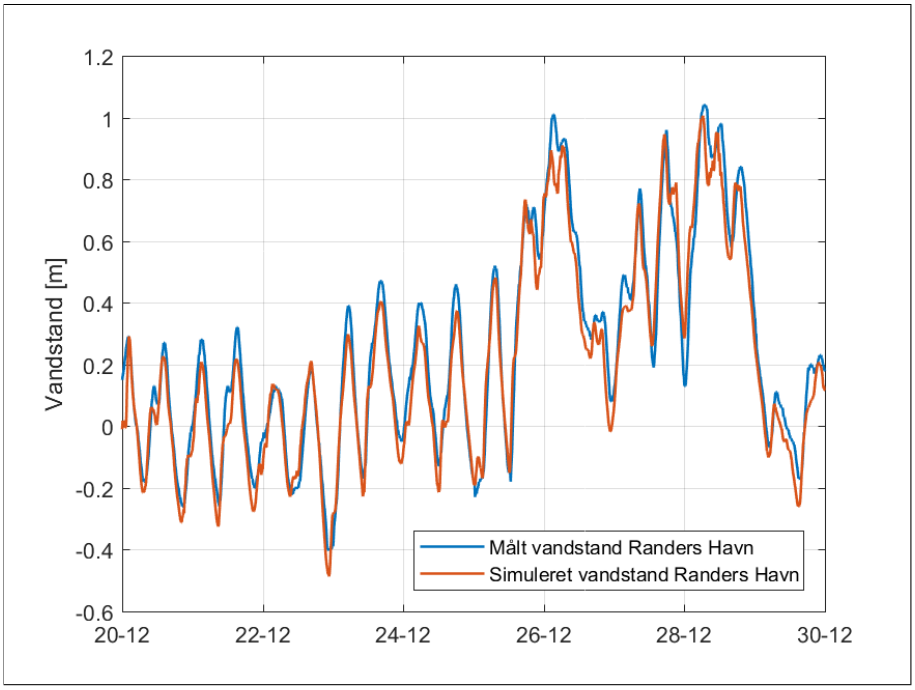
Vandføringen fra Gudenåen er medtaget i modellen, da det i afsnit 6.1 blev vurderet, at denne kan have betydning for vandstanden i Randers Fjord. Vandføringen fra Gudenåen er påsat i punktet 'Vandtilførsel Gudenåen', som fremgår af figur 7.1. Vandføringen er målt som døgnvandføringer i perioden 2007 til 2018 og indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020].

Kalibrering og validering

Modellen over Randers Fjord er anvendt til at analyserer oversvømmelser ved fjordens kyster, hvorfor det ønskes, at modellen repræsenterer virkeligheden bedst ved hændelser, hvor vandstanden er kraftigt forhøjet i forhold til middelvandstanden. Derfor er det valgt, at kalibrere modellen for perioden 20-12-2016 til den 30-12-2016, hvor vandstanden i Randers Havn når op på 1.04 m.

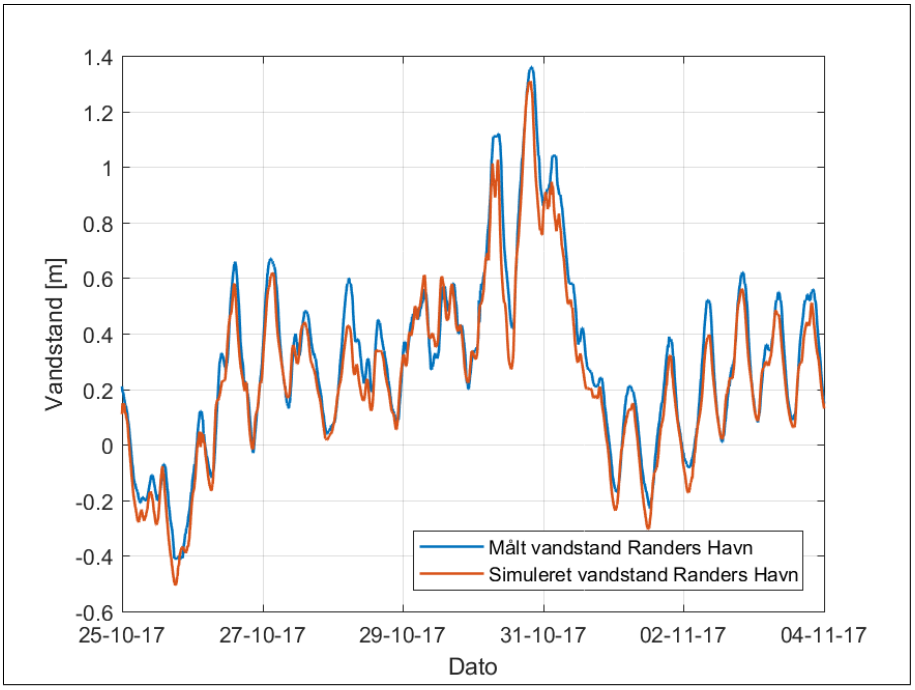
I forbindelse med kalibreringen er de målte vandstande i Randers Havn sammenlignet med de simulerede vandstande i punktet 'Randers Havn datamodelleringspunkt', hvis placering er angivet på figur 7.1.

Ved kalibrering af modellen er der ændret på bundmodstanden samt dybden af cellerne i modellen, som beskrevet tidligere. Bundmodstanden i modellen er beskrevet ved manningtallet, der ved endt kalibrering er fastsat til 28 $m^{1/3}/s$, mens dybden efter endt kalibrering er som vist på figur 7.2. Vandstanden i Randers Havn simuleret på 10 minutters basis i perioden 20-12-2016 til 30-12-2016 er på figur 7.3 sammenholdt med de målte vandstande på 10 minutters basis fra Randers havn fra samme periode.

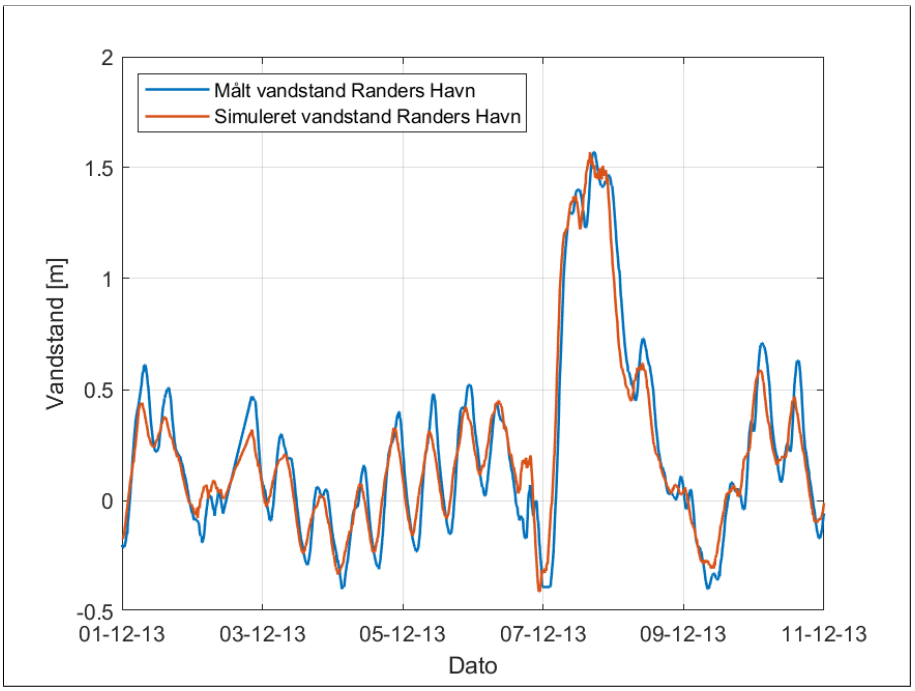


Figur 7.3. *Målt og simuleret vandstand i Randers Havn i perioden 20-12-2016 til 30-12-2016.*

Det fremgår af figur 7.3, at der er rimelig overensstemmelse mellem de målte og simulerede vandstande i Randers Havn. Forskellen mellem den maksimalt målte og maksimalt simulerede vandstand er 13 cm og R^2 = 0.96. På baggrund af dette er det vurderet, at kalibreringen af modellen kan accepteres. For at sikre, at modellen ligeledes kan anvendes til at modellere vandstande i Randers Fjord ved andre hændelser, hvor det er sandsynligt, at der vil forekomme oversvømmelser, er det valgt at validere modellen i forhold til to øvrige perioder. Perioderne, der er udvalgt til validering, er henholdsvis 25-10-2017 til 04-11-2017 og 01-12-2013 til 11-12-2013, hvor den maksimale vandstand i Randers Havn er målt til henholdsvis 1,36 m og 1,57 m [Danmarks Meteorologiske Institut, 2020a]. De simulerede og målte vandstand i Randers Havn for de to valideringsperioder er afbildet på figur 7.4 og 7.5.



Figur 7.4. *Målt og simuleret vandstand i Randers Havn i perioden 25-10-2017 til 04-11-2017.*



Figur 7.5. *Målt og simuleret vandstand i Randers Havn i perioden 01-12-2013 til 11-12-2013.*

Af figur 7.4 og 7.5 fremgår det, at der er rimelig overensstemmelse mellem de målte og simulerede vandstande i Randers Havn, når vandstanden er kraftig forhøjet i forhold til normalen, mens afvigelserne er større ved de lavere vandstande. Forskellen mellem de maksimalt og gennemsnitlig målte og simulerede vandstande samt R^2-værdien for de to valideringsperioder er angivet i tabel 7.1.

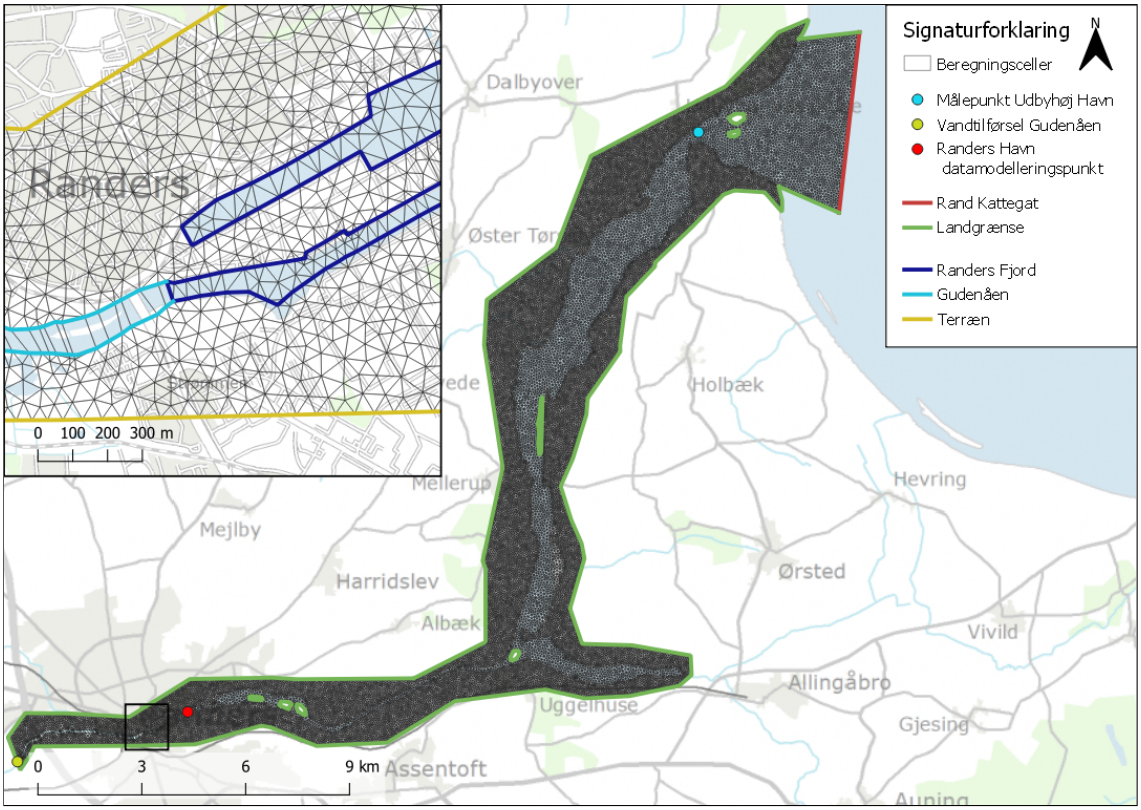
Tabel 7.1. *Forskellen mellem de maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande i Randers Havn og R^2-værdien for de to kalibreringsperioder.*

Periode	Forskel på maksimal vandstand [cm]	Forskel på gennemsnitlig vandstand [cm]	R^2
25-10-2017 til 04-11-2017	5,1	5,5	0,97
01-12-2013 til 11-12-2013	0,1	0,7	0,91

Det fremgår af tabel 7.1, at forskellen mellem den maksimalt målte og maksimalt simulerede vandstand i Randers Havn for de to valideringsperioder er indtil 5 cm, hvilket vurderes som værende acceptabelt. Ligeledes vurderes det på baggrund af R^2-værdierne, forskellen i de gennemsnitlige målte og modellerede vandstande samt figur 7.4 og 7.5 at modelresultaterne er acceptable, hvorfor modellen af Randers Fjord uden terræn kan accepteres og anvendes som et udgangspunkt for opstillingen af Randers Fjord modellen med terræn.

7.1.2 Randers Fjord model med terræn

En model af Randers Fjord med terræn er opstillet. Fjorden er beskrevet med et beregningsnet med de samme egenskaber, som er benyttet i Randers Fjord modellen uden terræn. Terræn omkring fjorden er beskrevet med et beregningsnet med triangulære beregningsceller. Foruden terrænet er 3 km af Gudenåen medtaget i modellen. Denne er beskrevet med rektangulære beregningsceller. Beregningsnettet, der er anvendt i Randers Fjord modellen med terræn, fremgår af figur 7.6.

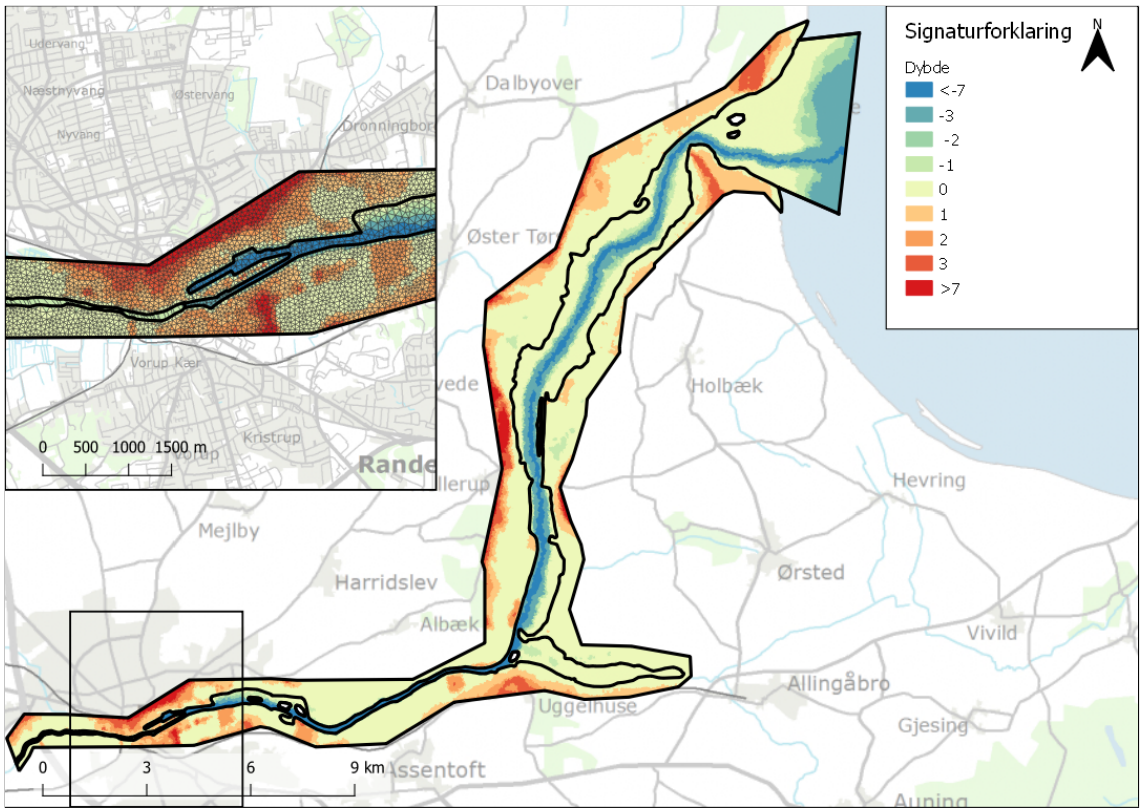


Figur 7.6. *Beregningsnettet der er benyttet i Randers Fjord model med terræn, samt angivelse af forskellige måle- og modelpunkter.*

Det ses af figur 7.6, at beregningsnettet der beskriver terrænet er finere, end beregningsnettet der beskriver fjorden. Det skyldes, at oversvømmelserne på terræn ønskes opløst højere end strømningerne i fjorden og Gudenåen. Ydermere fremgår det, at modellens vandstandsrand har samme placering som i Randers Fjord modellen uden terræn, og ligeledes er vandføringen fra Udbyhøj Havn anvendt på randen.

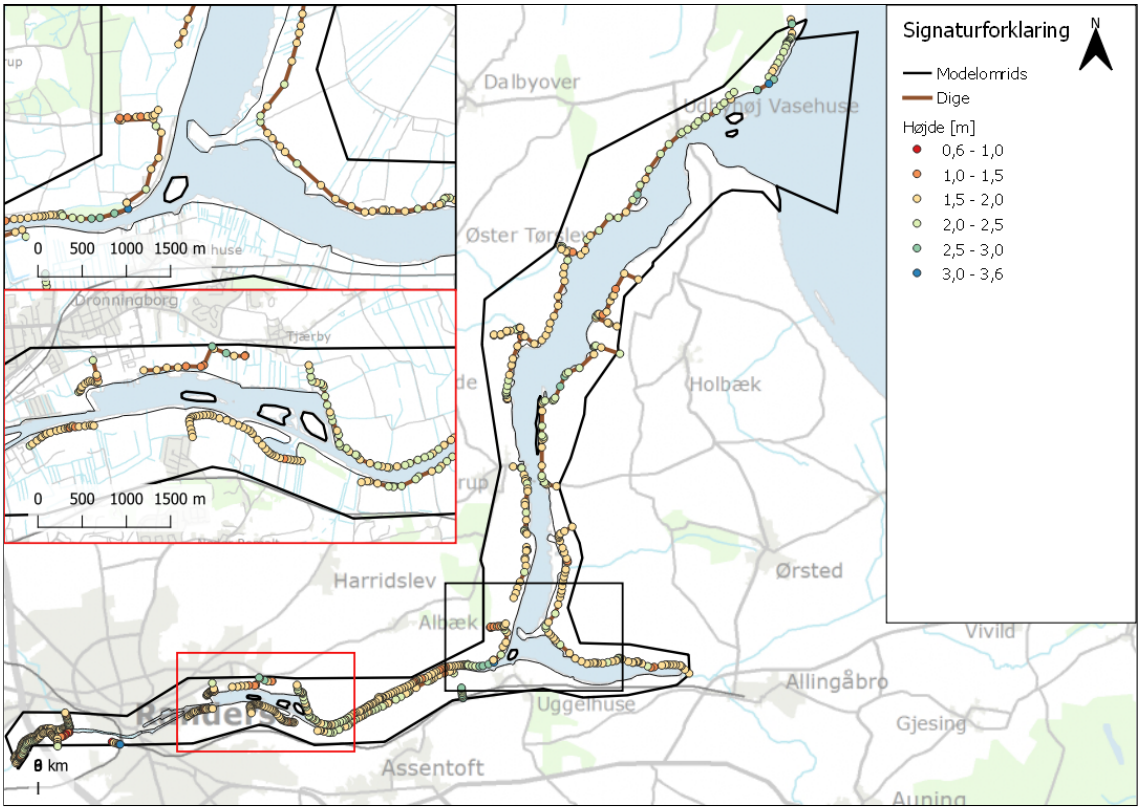
Fjordens bathymetri er fastsat på baggrund af det endelige dybdekort, som fremkom i forbindelse med kalibrering af Randers Fjord modellen uden terræn. Elevationen af terrænet er fastsat på baggrund af lineærinterpolation med data fra en hydrologisk tilpasset højdemodel, som er basseret på DHM/terræn data fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2020]. Disse data tager højde for vandets passage under broer, veje og igennem sluser. Dybden og bredden af Gudenåen er manuelt fastsat på baggrund af udleverede tværsnitsprofiler målt langs vandløbstracet. Dybden, der er anvendt i vandløbet, er en gennemsnitsdybde på 1,47 m. Denne er fastsat således, at den passer med den gennemsnitlige vandvolumen i vandløbet.

Det endelige dybde- og elevationskort af fjorden, Gudenåen og det omkringliggende terræn kan ses på figur 7.7.



Figur 7.7. *Dybde- og elevationskort som er anvendt i Randers Fjord med terræn modellen.*

Det fremgår af figur 7.7, at elevationen af terrænet omkring fjorden generelt er lavt, hvilket stemmer overens med virkeligheden. Der er etableret flere diger og forhøjninger omkring fjorden, som ikke er med på dybde-og elevationskortet, da det ville kræve et grid med en væsentlig finere opløsning. Digerne og forhøjningerne er i stedet medtaget som 'Dikes' i modellen. I modellen er der i alt indsat 24 diger, hvis placering fremgår af figur 7.8.



Figur 7.8. *Diger og forhøjninger, der er medtaget i modellen som 'Dikes'.*

Digernes højde er fastsat i forskellige punkter ud fra DHM/terræn data, og modellen har således interpoleret digehøjden imellem disse punkter. Ved store dele af fjordens kyster er der diger med en varierende højde, som det fremgår af figur 7.8. Størstedelen af digerne har en gennemsnitshøjde fra 1,6 m til 2,0 m.

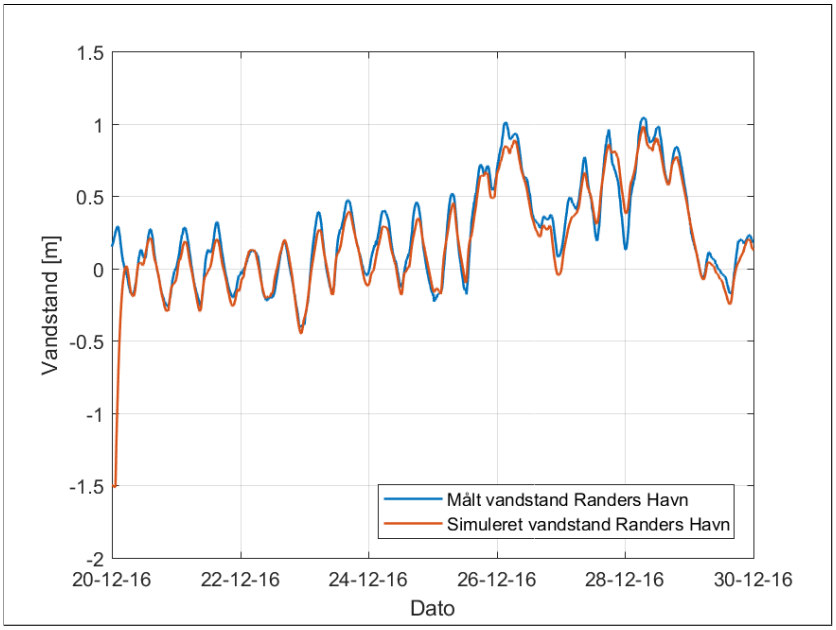
Modellen er opstillet på baggrund af den færdigkalibrerede model over Randers Fjord uden terræn. Dette betyder, at de samme parameter er benyttet og ligeledes er vinddata og vandføringsdata for Gudenåen den samme. Tilførslen af vand fra Gudenåen er i modellen blot flyttet, som det fremgår af figur 7.6.

Kalibrering og validering

Ligesom med Randers Fjord modellen uden terræn, er Randers Fjord modellen med terræn kalibreret i forhold til de målte vandstande i Randers Havn i perioden 20-12-2016 til 30-12-2016.

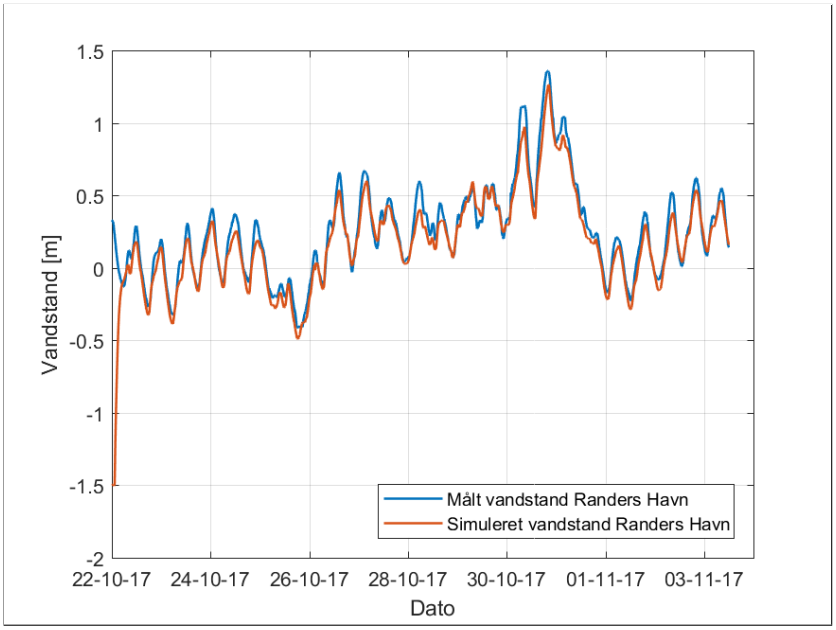
I forbindelse med kalibreringen er initialværdien for vand på overfladen i modellen ændret til -1,5 for at undgå, at der ved begyndelsen af modelleringen er vand på terræn, og 'Wetting depth' er ændret til 0,05. Derudover er dybden og bredden af fjorden ændret en smule i forbindelse med kalibreringen, da tilføjelsen af terrænelevationsdata viste, at fjorden ved Randers Havn var lidt for smal, samt at fjorden enkelte andre steder var lidt for bred. Dybdekortet og terrænelevationen efter endt kalibrering af modellen fremgår af figur 7.7.

Den målte og modellerede vandstand i Randers Havn efter endt kalibrering af Randers Fjord modellen med terræn fremgår af figur 7.9.

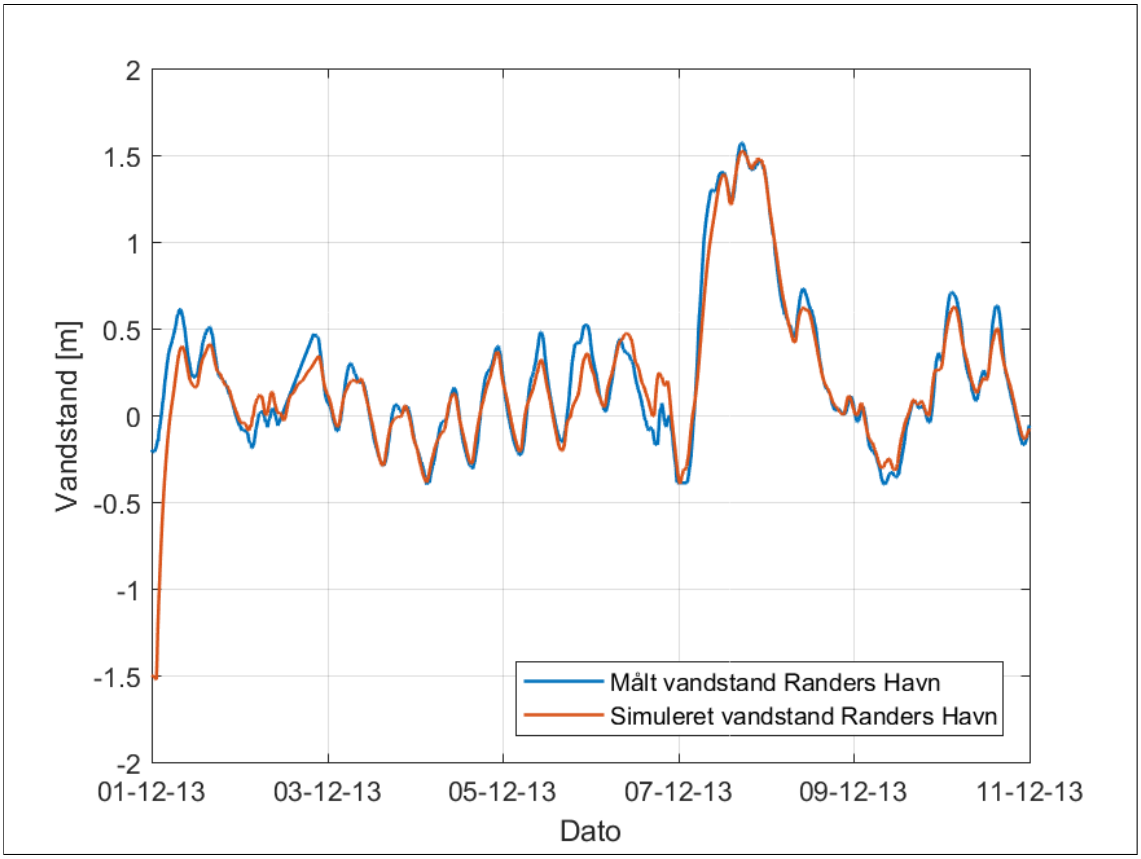


Figur 7.9. *Målt og simuleret vandstand i Randers Havn i perioden 20-12-2016 til 30-12-2016.*

Det kan ses på figur 7.9, at der er rimelig overensstemmelse mellem de målte og simulerede vandstande i Randers Havn. Forskellen mellem den maksimalt målte og maksimalt simulerede vandstand er 6 cm og $R^2 = 0,96$ når der ses bort fra de første 25 tidsskridt, som er den tid modellen grundet initialbetingelsen på -1,5 m benytter til at indstille sig. På baggrund af dette er det vurderet, at modellen kan accepteres for kalibreringsperioden. For at sikre, at modellen kan anvendes til at modellere vandstande i Randers Fjord ved andre hændelser, hvor det er sandsynligt, at der vil forekomme oversvømmelser, er det valgt at validere modellen i forhold til to øvrige perioder. De udvalgte valideringsperioder er de samme som for Randers Fjord modellen uden terræn. De simulerede og målte vandstande i Randers Havn for de to perioder er afbildet på graferne på figur 7.10 og 7.11.



Figur 7.10. *Målt og simuleret vandstand i Randers Havn i perioden 25-10-2017 til 04-11-2017.*



Figur 7.11. *Målt og simuleret vandstand i Randers Havn i perioden 01-12-2013 til 11-12-2013.*

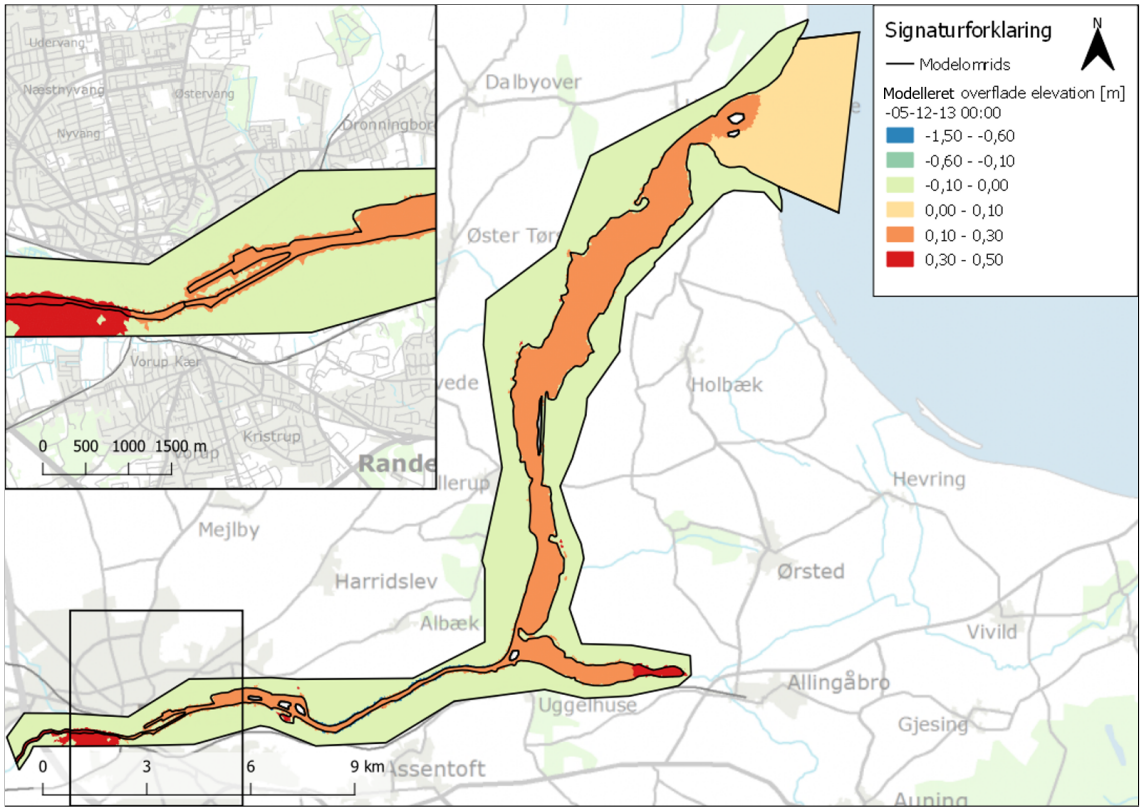
Af figur 7.10 og 7.11 fremgår det, at der ved høje vandstande er rimelig overensstemmelse mellem de målte og simulerede vandstande i Randers Havn, mens afvigelserne ved de lavere vandstande er større. Forskelen mellem de maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt R^2-værdien for de to perioder er angivet i tabel 7.2. Ved bestemmelse af R^2-værdierne er de første 25-tidskridt udeladt, da modellen benytter denne periode til at indstille sig.

Tabel 7.2. *Forskellen mellem den maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstand i Randers Havn og R^2-værdien for de to kalibreringsperioder.*

Periode	Forskel på maksimal vandstand [cm]	Forskel på gennemsnitlig vandstand [cm]	R^2
25-10-2017 til 04-11-2017	9,6	6,9	0,97
01-12-2013 til 11-12-2013	4,3	2,9	0,95

Det fremgår af tabel 7.2, at forskellen mellem den maksimalt målte og maksimalt simulerede vandstand i Randers Havn for de to valideringsperrioder er indtil 10 cm, hvilket er vurderet som værende acceptabelt. Ligeledes er det vurderet på baggrund af R^2-værdierne, forskellen mellem de gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt figur 7.10 og 7.11, at modelresultaterne er acceptable, hvorfor modellen af Randers Fjord på baggrund af den modellerede vandstand ved Randers Havn er accepteret.

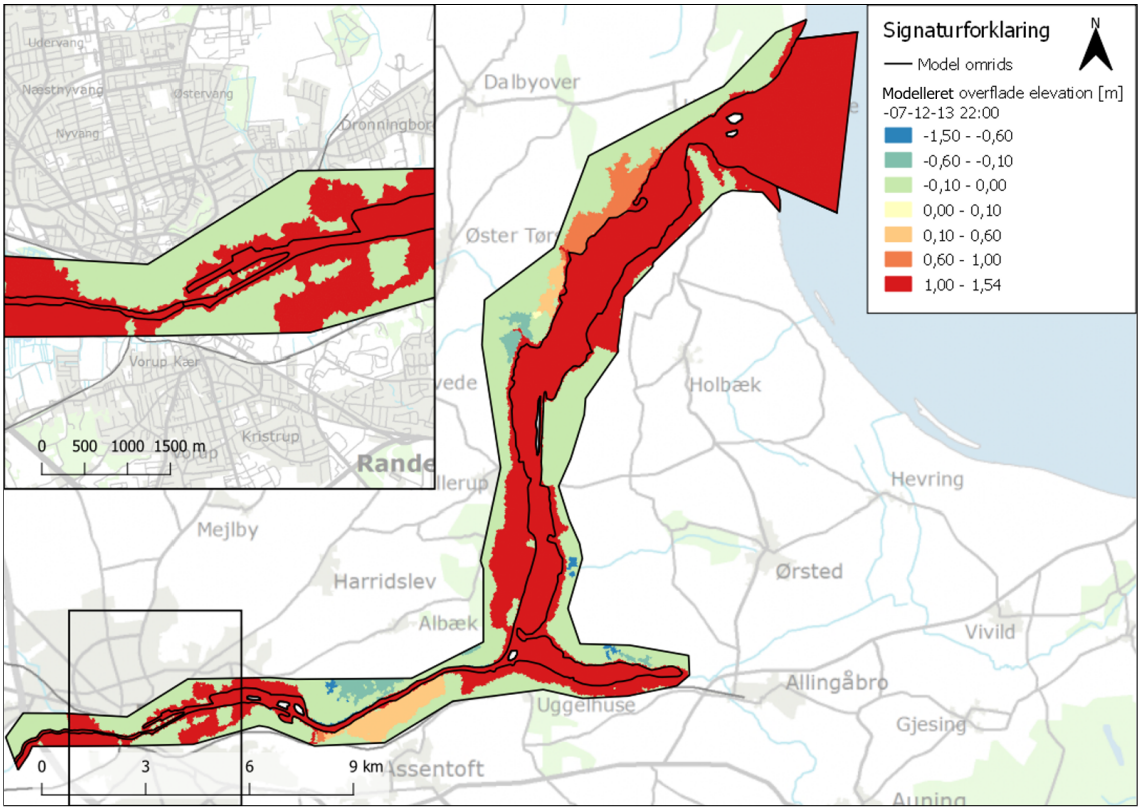
Til at vurderer, hvorvidt modellen kan anvendes til at analysere oversvømmelserne ved Randers Fjord, er det valgt også at kigge på de maksimale modellerede oversvømmelser i perioden 01-12-2013 til 11-12-2013, hvor den maksimale vandstand, som beskrevet tidligere er målt til 1,57 m i Randers Havn. Det modelerede vand på terræn den 05-12-2013 00:00 efter modellen har indstillet sig er vist på figur 7.12.



Figur 7.12. *Modelleret vand på terræn den 05-12-2013 00:00 efter modellen har indstillet sig.*

Efter modellen har indstillet sig, modelleres der vand på terræn enkelte steder ved Randers Fjord og Gudenåen, som det fremgår af figur 7.12. Dette er dels fordi terrænet er lavt, og dels fordi beregningscellerne lige ved grænsen til fjorden er dybere end de burde, da elevationen i disse er interpoleret mellem dybden på -7 m i fjorden og den oprindelige elevation af terrænet. Ved sammeligningerne af vandet på terræn modelleret af SCALGO Live [2015], ses ligeledes vand på terræn ved Gudenåen ved vandstande på 0,3 m. Analysen fra SCALGO Live [2015] kan ikke direkte sammenlignes med MIKE21 modellen over Randers Fjord, da model forudsætningerne er forskellige og ikke alle parametre anvendt ved SCALGO modellen er kendte. Modellen fra SCALGO kan dog give et billede af, om oversvømmelser modelleret med MIKE21 modellen virker rimelige. Det er vurderet at de modellerede oversvømmelser efter modellen har indstilet sig er valide, da modellen fra SCALGO ligeledes viser vand på terræn i de samme områder som Randers Fjord modellen ved mindre stigninger i vandstanden.

Det er vigtigt, at de modellerede oversvømmelser i forbindelse med kraftige vandstandsstigninger er vallide, hvorfor disse er vurderet på baggrund af figur 7.13.



Figur 7.13. *Modelleret vand på terræn den 07-12-2013 22:00 i forbindelse med en stormhændelse, hvor en maksimal vandstand i Randers Havn er modelleret til 1,53.*

I afsnit 4.5 på figur 4.12 fremgår et estimat af oversvømmelserne ved en havstigning på 1,5 m udarbejdet af Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]. Sammenlignes disse estimerede oversvømmelser med oversvømmelserne modelleret med Randers Fjord modellen den 07-12-2013 22:00, ses det, at de modellerede oversvømmelser ikke stemmer fuldstændig overens med de estimerede, da de estimerede oversvømmelser er kraftigere. Det kan skyldes, at parametre og data der er anvendt til at opstille Randers Fjord modellen afviger fra data og parametre benyttet i modellen fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016]. Derudover kan en generel havstigning på 1,5 m ikke sammenlignes fuldstændig med en hændelse, hvor vandstanden i en kort periode er steget med 1,5 m, men den kan anvendes til at give en idé om, hvorvidt de modellerede oversvømmelser er sandsynlige. Ud fra sammenligningen fremgår det, at der er en tendens til oversvømmelse i de samme områder omkring fjorden, hvorfor det er vurderet, at Randers Fjord modellen med terræn opstillet i MIKE21 kan anvendes til at modellere oversvømmelserne, der må forekomme ved forskellige storm-og højvandsscenarier ved Randers Fjord. Modellen fremgår af elektronisk appendiks D.1.

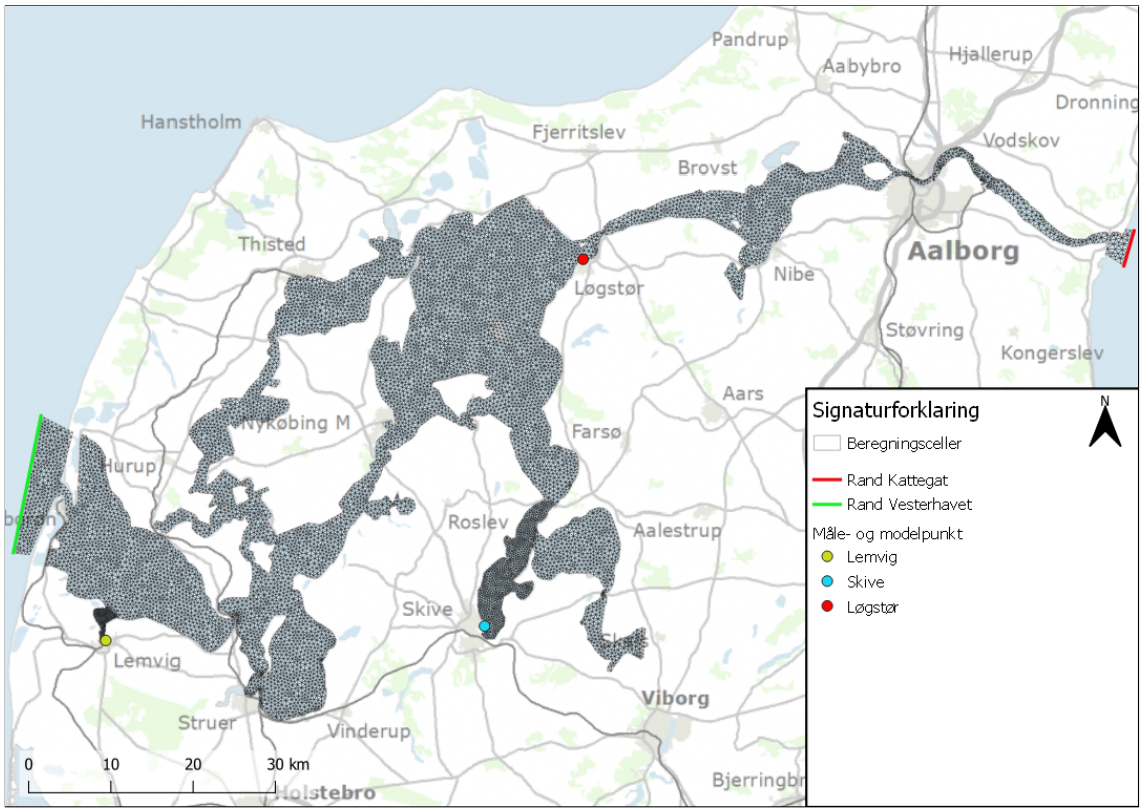
7.2 Limfjords model

Ligesom for Randers Fjord er en model over Limfjorden og dele af det omkringliggende terræn opstillet. Modellen for Limfjorden er ligeledes opstillet over to omgange for at lette kalibreringsprocessen.

7.2.1 Limfjords model uden terræn

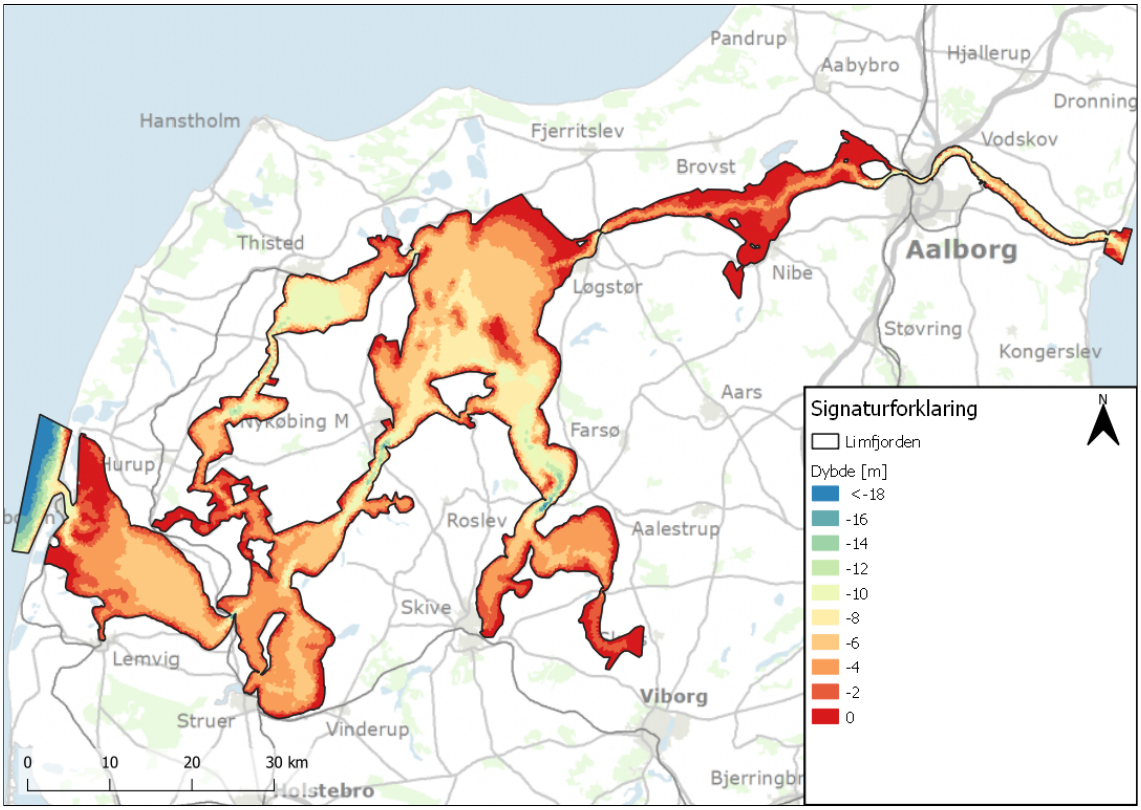
Beregningsnettet, som er anvendt til at beskrive bathymetrien i sundet, er opstillet med triangulære beregningsceller. Limfjorden har, som beskrevet, åbning til både Vesterhavet og Kattegat, hvorfor modellen er opstillet med en vandstandsrand i Vesterhavet udfor Thyborøn Kanal og i Kattegat udfor Hals. Beregningsnettet, vandstandsrande samt måle- og modelpunkter fremgår af figur 7.14.

På de to vandstandsrande er anvendt vandstandsmålinger, som er målt i havet i Thyborøn og ved Hals. Vandstandene er varierende i tid på 10 minutters basis og konstante over hele randen. Foruden vandstandsvariationerne er vinden, som beskrevet tidligere, en drivende kraft for vandets bevægelse, hvorfor en vindserie med vindretning- og styrke varierende over tid er anvendt. I Limfjorden er vindserier målt flere forskellige steder og tilgængelige for forskellige perioder. For simulering af data i modellen i år 2005 er det valgt, at benytte middelværdierne af vindstyrken og retningen, som er målt ved Thyborøn og Hals. Ved modellering i år 2015 og 2016 er den målte vindstyrke og vindretning i Thisted i stedet benyttet, da vinddata fra Hals og Thyborøn for denne periode ikke er tilgængelige.



Figur 7.14. *Udformning af beregningsnettet, som er anvendt i Limfjords modellen uden terræn, og angivelse af vandstandsrande samt måle- og modelpunkters placering.*

Af figur 7.15 ses dybdekortet af Limfjorden, som er anvendt i modellen. Dette er fastsat på baggrund af interpolation med udleveret dybde data og justeret manuelt i forbindelse med kalibreringen. I forbindelse med de manuelle justeringer er søkort over fjorden fra Krak og Eniro [2019] benyttet.



Figur 7.15. *Dybdekort over Limfjorden.*

Det fremgår af dybdekortet, at Limfjorden er dybest i sejlrenderne specielt ved de smalle passager i sundet og på strækningen fra Hals til Aalborg. Dybden i fjorden varierer fra 0 m til 22 m.

Kalibrering og validering

Det er valgt at undersøge oversvømmelserne og forhindringen af disse i den vestlige del af Limfjorden. For at mindske beregningstiden er det valgt, at undersøge oversvømmelserne ved Lemvig, Skive og Løgstør. Modellen er derfor kalibreret i forhold til de målte vandstande i disse områder. Placering af målepunkter og angivelse af stationsnumre, hvorfra der er indhentet vandstandsdata, fremgår af appendiks A.

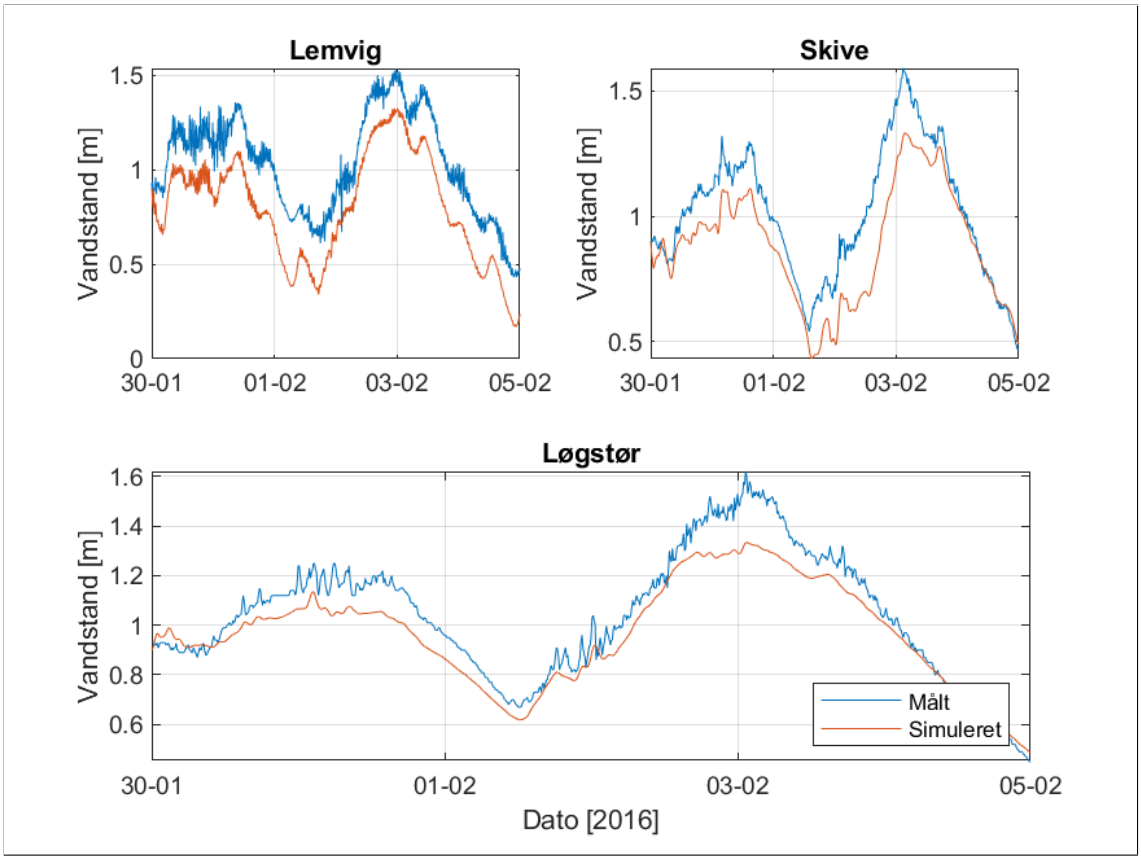
Oprindelig er det forsøgt, at kalibrere modellen i forhold til de målte vandstande i perioden 28-01-2016 til 05-02-2016, hvor vandstanden den 02-02-2016 og 03-02-2016 er kraftig forhøjet i forhold til middelvandstanden. Den maksimale vandstand i henholdsvis Lemvig, Skive og Løgstør er målt til henholdsvis 1,54 m, 1,59 m og 1,62 m [Danmarks Meteorologiske Institut, 2020a]. Kalibrerings processen har dog vist sig vanskelig, da der har været problemer med at få de målte og simulerede vandstande for perioden til at passe. I forbindelse med kalibreringen er følgende forsøgt:

- Justering af dybder i dybdekortet. Her er sejlrenderne uddybet specielt ved de smalle passager i modellen, men det er også forsøgt at begrænse dybden i nogle områder, for at se om det ville have end effekt.
- Forskellige størrelser på beregningecellerne er anvendt.
- Forskellige bundmodstande er anvendt.

- Vandstandsmålingerne på randene og i modellen er indhentet på ny. Derefter er tidsserierne i modellen opstillet på ny for at sikre, at der ikke var fejl i indhentningen og opstillingen af dataen.
- Vandstanden på randen ved Thyborøn er forsøgt for øget med 5 cm og med 10 cm.
- Vindfriktionen på modellen er ændret til varierende i styrke og med forskellige vindfriktionskonstanter.
- Modellen er kørt i en periode, hvor der er vindstille for at undersøge vindenes påvirkning på vandet. Afvigelserne mellem de målte og modellerede vandstande, fremkom også i de vindstille perioder, hvorfor det ikke er vinden der skaber afvigelsen.
- Det er forsøgt at køre modellen med vandstande målt to forskellige steder ved Hals og to forskellige steder ved Thyborøn. Modellen er kørt med følgende vandstands kombinationer på randene: Thyborøn havet og Halsbarre fyr, Thyborøn Havet og Hals Havn, Thyborøn Havn og Hals Barrefyr samt Thyborøn Havn og Hals Havn.

De bedste resultater er fremkommet med en forsøgelse af dybderne i sejlrenderne og vindfriktionen ændret til varierende i forhold til vindstyrken med en vindfriktionskonstant på 0,0012 ved 7 m/s og 0,0044 ved 25 m/s. Derudover er bundmodstanden ændret til M=34 $m^{1/3}/s$, der er lagt 5 cm til den målte vandstand i Thyborøn Havet, som der er anvendt på randen i Vesterhavet og på randen i Kattegat er anvendt vandstande målt i Hals Havn.

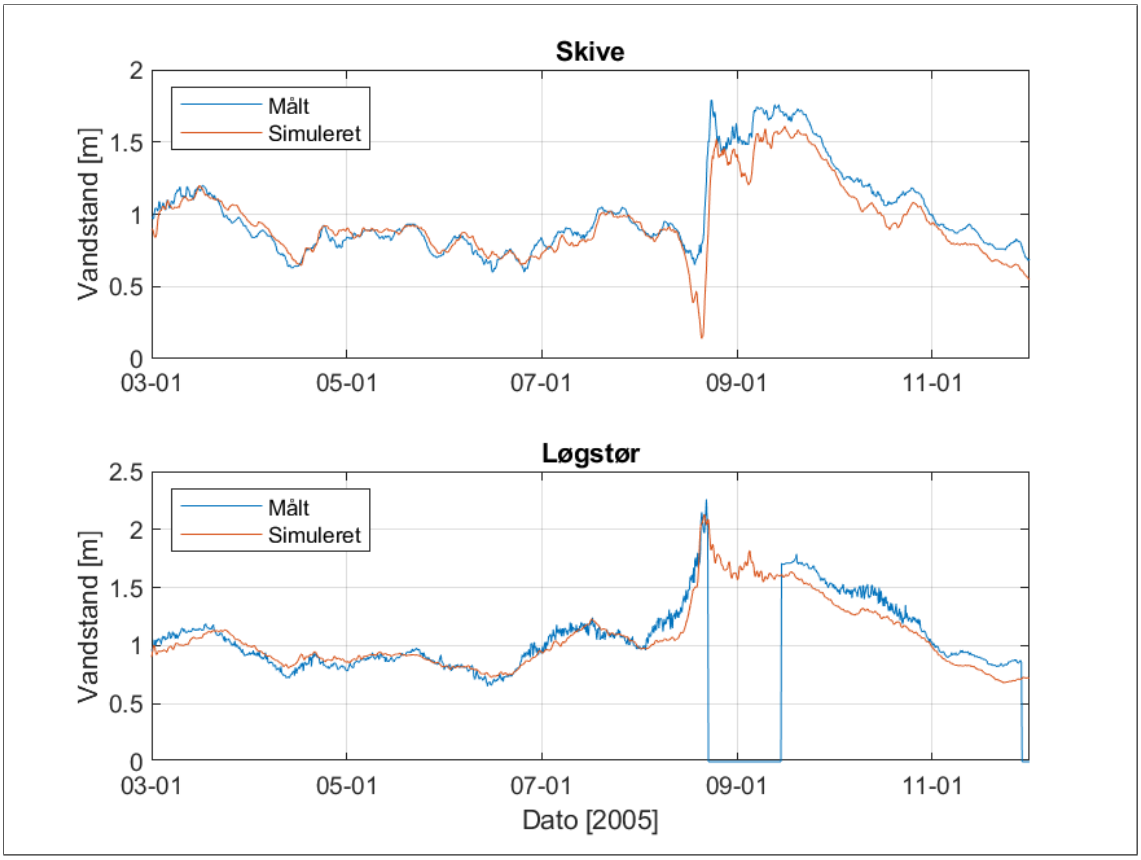
Det bedste resultat, som er fremkommet i forbindelse med kalibreringen i perioden 28-01-2016 til 05-02-2016 ved henholdsvis Lemvig, Skive og Løgstør ses på figur 7.16.



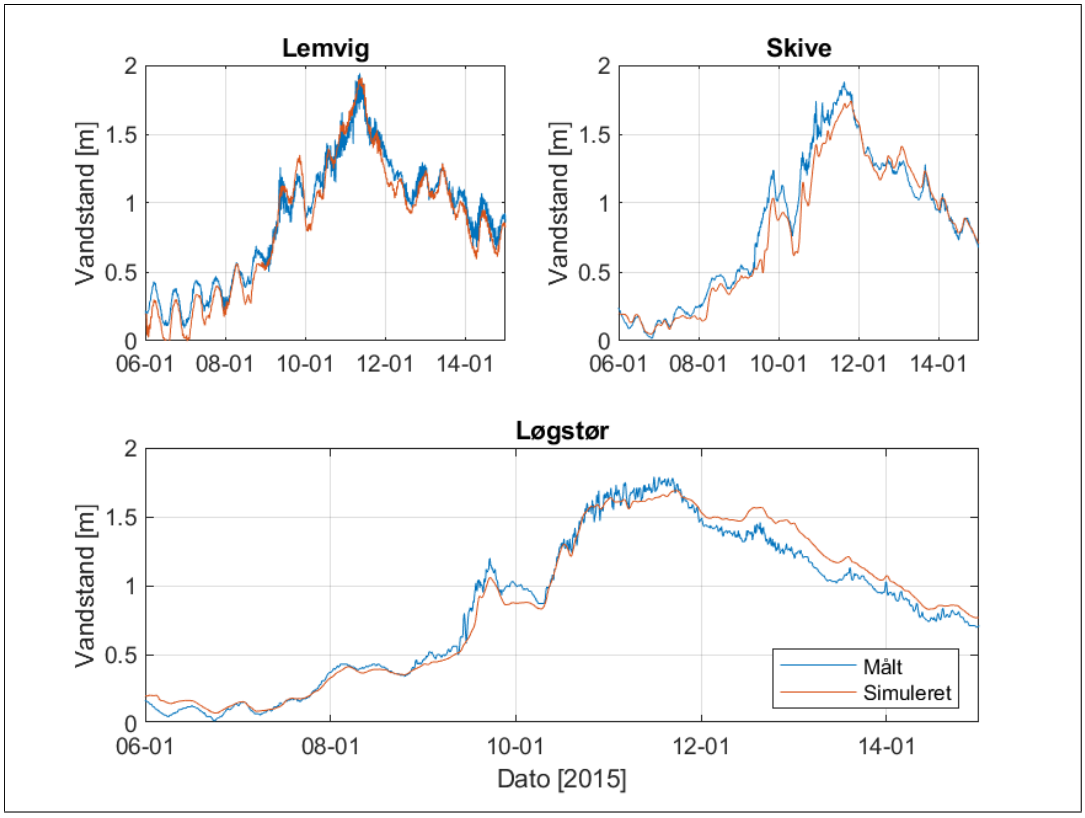
Figur 7.16. *Målt og simuleret vandstand i Lemvig, Skive og Løgstør i kalibreringsperioden 28-01-2016 til 05-02-2016.*

Det fremgår af figur 7.16, at modellen flere steder fanger trenden, men at de simulerede vandstande er for lave i forhold til de målte vandstande. Forskellen i de maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt R^2 ved Lemvig, Skive og Løgstør for de tre kalibreringsperioder fremgår af tabel 7.3. Disse viser ligeledes, at der er dårlig sammenhæng mellem de målte og simulerede vandstande i kalibreringsperioden.

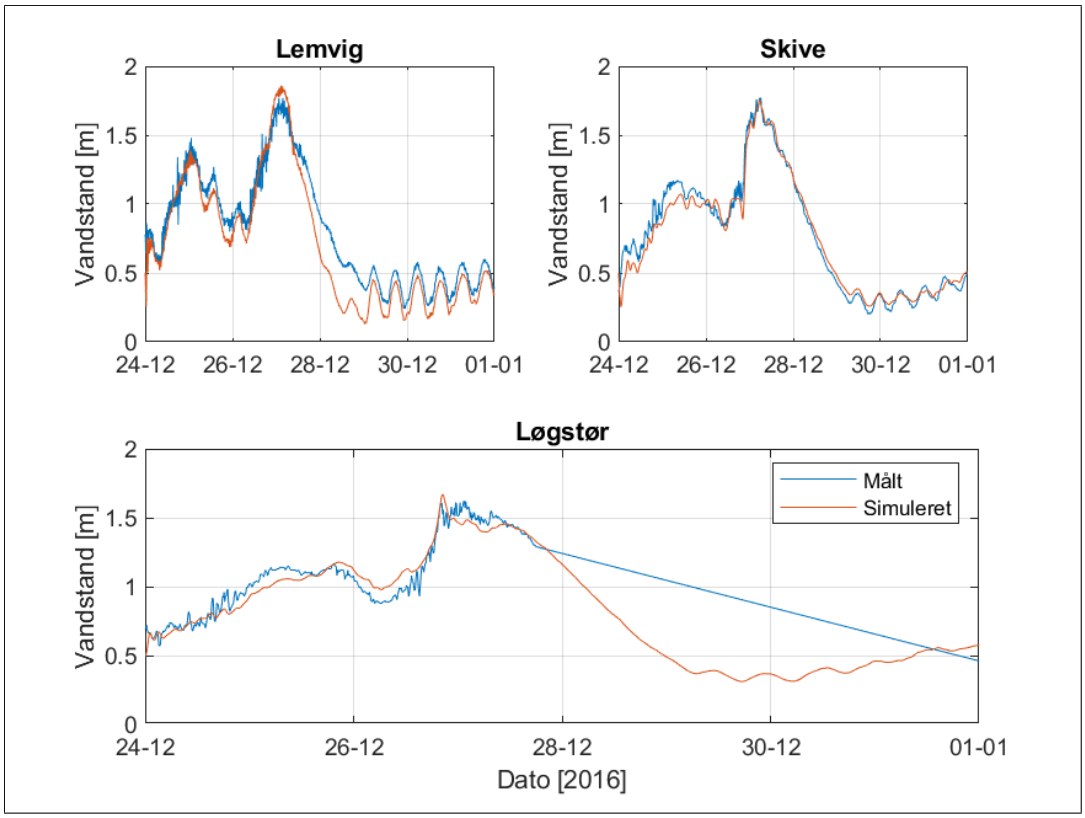
Grundet det dårlige fit mellem de simulerede og målte vandstande i perioden 28-01-2016 til 05-02-2016 er det valgt, at undersøge hvordan modellen simulere andre hændelser med kraftig højvande i Limfjorden. Det er valgt at kigge på perioderne 03-01-2005 til 12-01-2005, 06-01-2015 til 15-01-2015 og 24-12-2016 til 01-01-2017. De målte og simulerede vandstande i Lemvig, Skive og Løgstør for de tre perioder er afbildet på figur 7.17, 7.18 og 7.19. Fra år 2005 haves ikke vandstandsmålinger fra Lemvig, hvorfor de målte og simmulerede vandstande ved Lemvig ikke fremgår af figur 7.17.



Figur 7.17. *Målt og simuleret vandstand i Lemvig, Skive og Løgstør i perioden 03-01-2005 til 12-01-2005.*



Figur 7.18. *Målt og simuleret vandstand i Lemvig, Skive og Løgstør i perioden 06-01-2015 til 15-01-2015.*



Figur 7.19. *Målt og simuleret vandstand i Lemvig, Skive og Løgstør i kalibreringsperioden 24-12-2016 til 01-01-2017.*

Det fremgår af figur 7.17, 7.18 og 7.19, at der ikke er fuldstændig overensstemmelse mellem de målte og simulerede vandstande, dog er sammenhængen i mellem vandstandende bedre end for perioden 28-01-2016 til 05-02-2016. Ydermere ses det, at måleserierne for vandstandene i Løgstør i perioder er mangelfulde. Da peakene er med i dataserierne, er det vurderet, at perioderne 06-01-2015 til 15-01-2015 og 24-12-2016 til 01-01-2017 kan anvendes i forbindelse med kalibrering og validering af modellen.

I tabel 7.3 er forskellen mellem de maksimale og gennemsnitlige vandstande for de fire perioder angivet sammen med R^2. Grundet manglende vandstandsmålinger i Løgster er perioderne 08-01-2005 17:00 til 09-01-2005 10:00, 11-01-2005 22:10 til 12-01-2005 00:00 og 27-12-2016 18:10 til 01-01-2017 00:00 udeladt i forbindelse med i beregningen af R^2 og forskellen på maksimal og gennemsnitlig målt og simuleret vandstand ved Løgstør.

Tabel 7.3. *Forskellen mellem de maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt R^2-værdierne for Lemvig, Skive og Løgstør.*

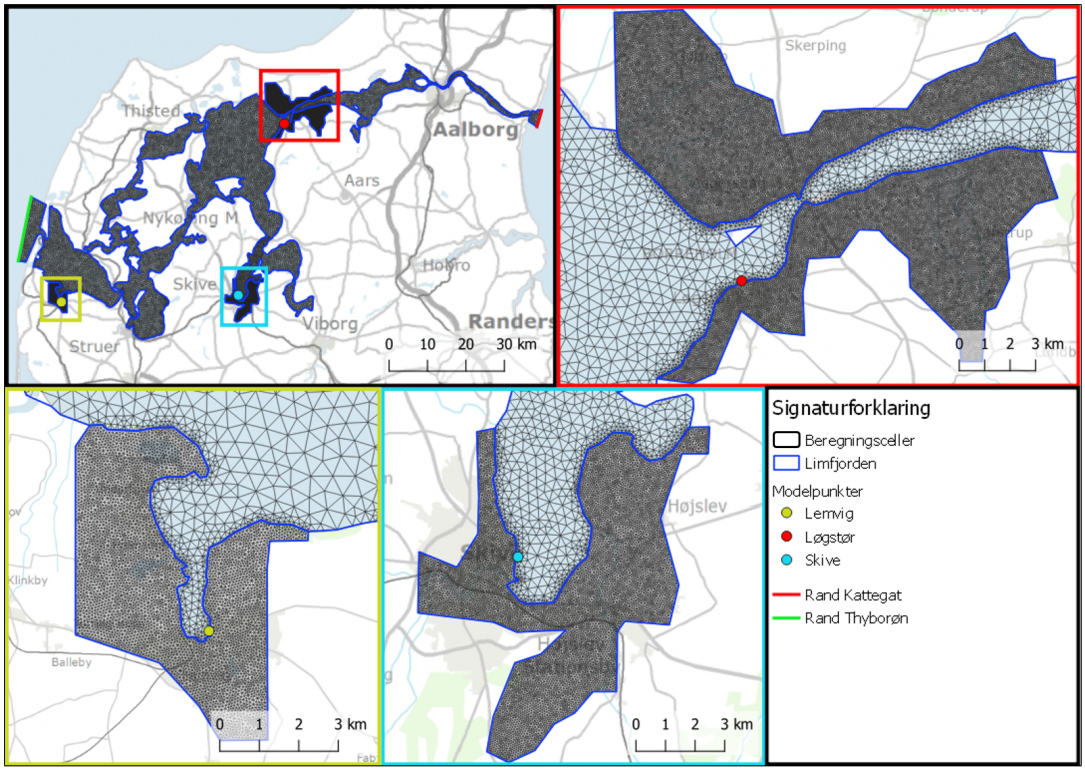
	Forskel på maksimal vandstand [cm]	Forskel på gennemsnitlig vandstand [cm]	R^2
30-01-2016 til 05-02-2016			
Lemvig	3,0	5,3	0,86
Skive	13,7	5,4	0,47
Løgstør	10,0	2,3	0,55
03-01-2005 til 12-01-2005			
Skive	18,2	12,8	0,87
Løgstør	5,4	10,5	0,93
06-01-2015 til 15-01-2015			
Lemvig	3,0	5,3	0,98
Skive	13,7	5,4	0,96
Løgstør	10,0	2,3	0,97
24-12-2016 til 01-01-2017			
Lemvig	9,0	9,9	0,95
Skive	1,6	0,5	0,96
Løgstør	4,9	0,6	0,92

Af tabel 7.3 fremgår det, at forskellen mellem den maksimalt målte og simulerede vandstand ved Lemvig, Skive og Løgstør er størst i perioderne 30-01-2016 til 05-02-2016 og 03-01-2005 til 12-01-2005. Ydermere fremgår det, at R^2-værdierne i perioderne 06-01-2015 til 15-01-2015 og 24-12-2016 til 01-01-2017 er relativt tæt på én, hvilket angiver en god sammenhæng mellem de målte og modellerede vandstande, dog med afvigelse på indtil 14 cm i middelværdien, hvilket betyder at modellen ikke repræsenterer virkeligheden fuldt ud. Til trods for, at der på baggrund af figur 7.16 og tabel 7.3 i perioden 30-01-2016 til 05-02-2016 ses ringe sammenhæng mellem de målte og simulerede vandstande, er det valgt at acceptere Limfjords modellen uden terræn. Modellen accepteres, da der i perioderne 03-01-2005 til 12-01-2005, 06-01-2015 til 15-01-2015 og 24-12-2016 til 01-01-2017 ses en nogenlunde sammenhæng mellem de målte og simulerede vandstande. Modellen kan således anvendes, som et udgangspunkt for opstilling af Limfjords modellen med terræn.

7.2.2 Limfjords modellen med terræn

Det er, som tidligere beskrevet, valgt at medtage dele af terrænet ved Lemvig, Skive og Løgstør i Limfjords modellen med terræn. Disse områder er udvalgt, da de på baggrund af de præsenterede analyser i kapitel 4 er vurderet som værende områder med særlig risiko for oversvømmelser.

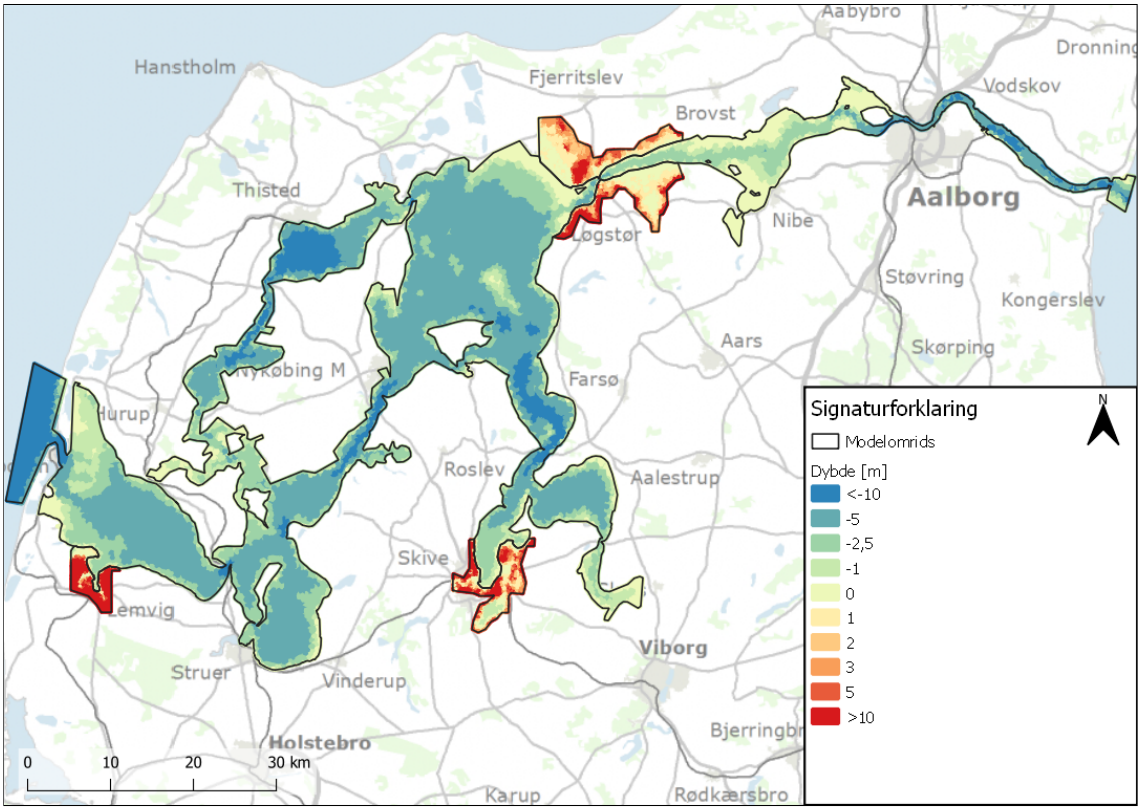
Selve sundet er beskrevet med et beregningsnet med de samme egenskaber, som er benyttet i Limfjords modellen uden terræn. Terræn omkring fjorden er beskrevet med et beregningsnet med triangulære beregningsceller. Vandstandsrandene ved Vesterhavet og Kattegat har samme placering som i Limfjords modellen uden terræn, og vandstandene fra henholdsvis Thyborøn Havet +5 cm og Hals Havn er ligeledes anvendt. Beregningsnettet med placering af vandstandsrandene fremgår af figur 7.20.



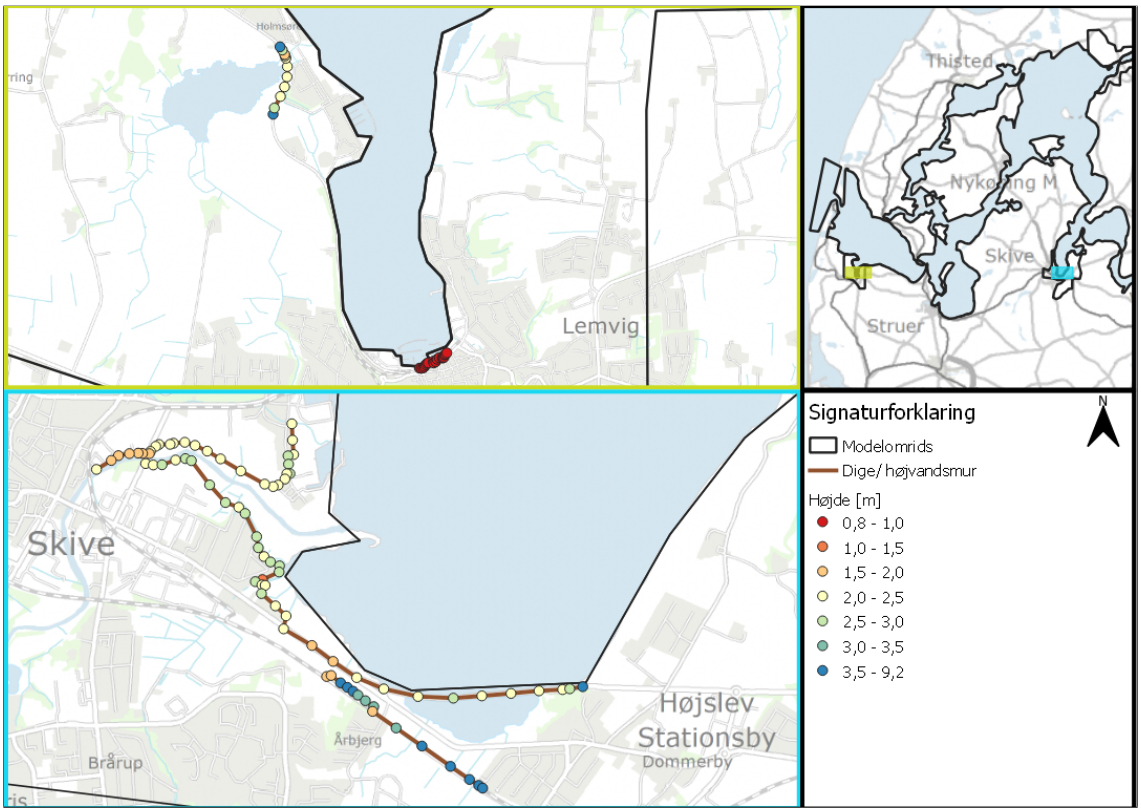
Figur 7.20. *Beregningsnettet som er anvendt i forbindelse med modellering af de mulige oversvømmeler ved Limfjorden.*

Ligesom med RandersFjord modellen er det valgt, at beskrive terrænet omkring med et finere beregningsnet end vandet, da oversvømmelserne på terræn ønskes bedre opløst end strømningerne i sundet.

Bathymetrien i sundet er fastsat på baggrund af dybdekortet, som fremkom i forbindelse med kalibreringen af Limfjords modellen uden terræn. Til beskrivelsen af terrænets elevation er anvendt samme type højdedata, som der er anvendt i modellen af Randers Fjord. Det endelige dybde- og elevationskort over Limfjorden og det omkringliggende terræn ved Lemvig, Skive og Løgstør fremgår af figur 7.21. Ved Lemvig og Skive er der nogle steder etableret diger og én højvandsmur. Disse er ligesom med digerne ved Randers Fjord defineret som 'Dikes' i modellen. Deres placering og højde i udvalgte punkter er angivet på figur 7.22.



Figur 7.21. *Dybde og elevationskort som er anvendt i Limfjords modellen med terræn.*



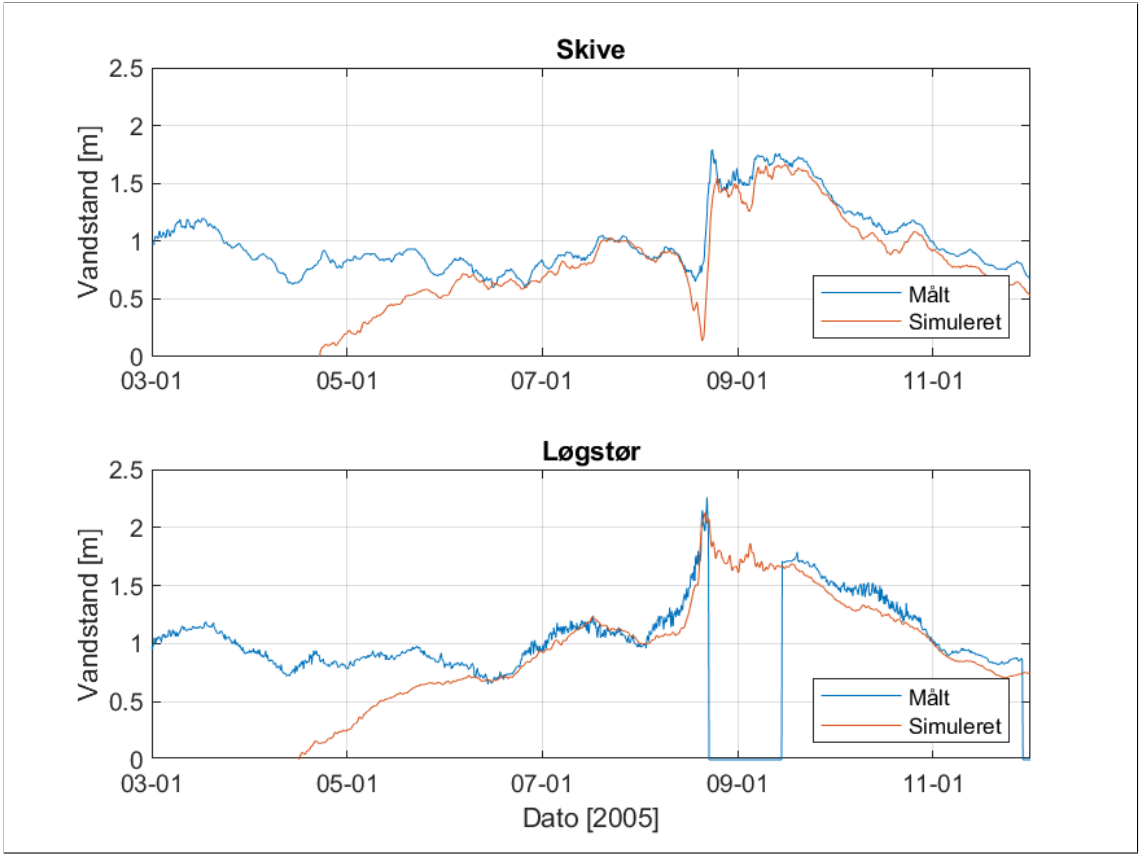
Figur 7.22. *Diger og højvandsmur ved Lemvig og Skive, der er medtaget i modellen som dikes.*

Digernes højde er fastsat i forskellige punkter ud fra DHM/terræn data, mellem punkterne har modellen interpoleret digehøjden. Højvandsmuren er i modellen angivet med en konstant højde på 0,8 m, hvilket er den laveste højde for muren, hvis højde varierer mellem 0,8 m og 1,2 m over en strækning på 350 m [Lemvig Kommune og Kystdirektorartet, 2015].

Limfjords modellen med terræn er derudover opbygget med de samme parametre, vind og vandstandsmålinger, som er anvendt i den kalibrerede Limfjords modellen uden terræn.

Kalibrering og validering

Limfjords modellen med terræn er kalibreret i forhold til perioden 03-01-2005 til 12-01-2005. I forbindelse med kalibreringen er initialværdien for vand på terræn ændret til -1.5 m for at mindske vand på terræn ved modelleringens start. Ydermere er dybden i sundet og elevationen af terrænet justeret manuelt. De målte og simulerede vandstande i Skive og Løgstør fremgår af figur 7.23, og forskellem mellem de maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt R^2-værdierne er angivet i tabel 7.4. Grundt initialbetingelsen på -1,5 m er modellen noget tid om at indstille sig, hvorfor de første 400 tidsskridt er udeladt i forbindelse med beregningen af forskellen mellem maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt R^2-værdierne.

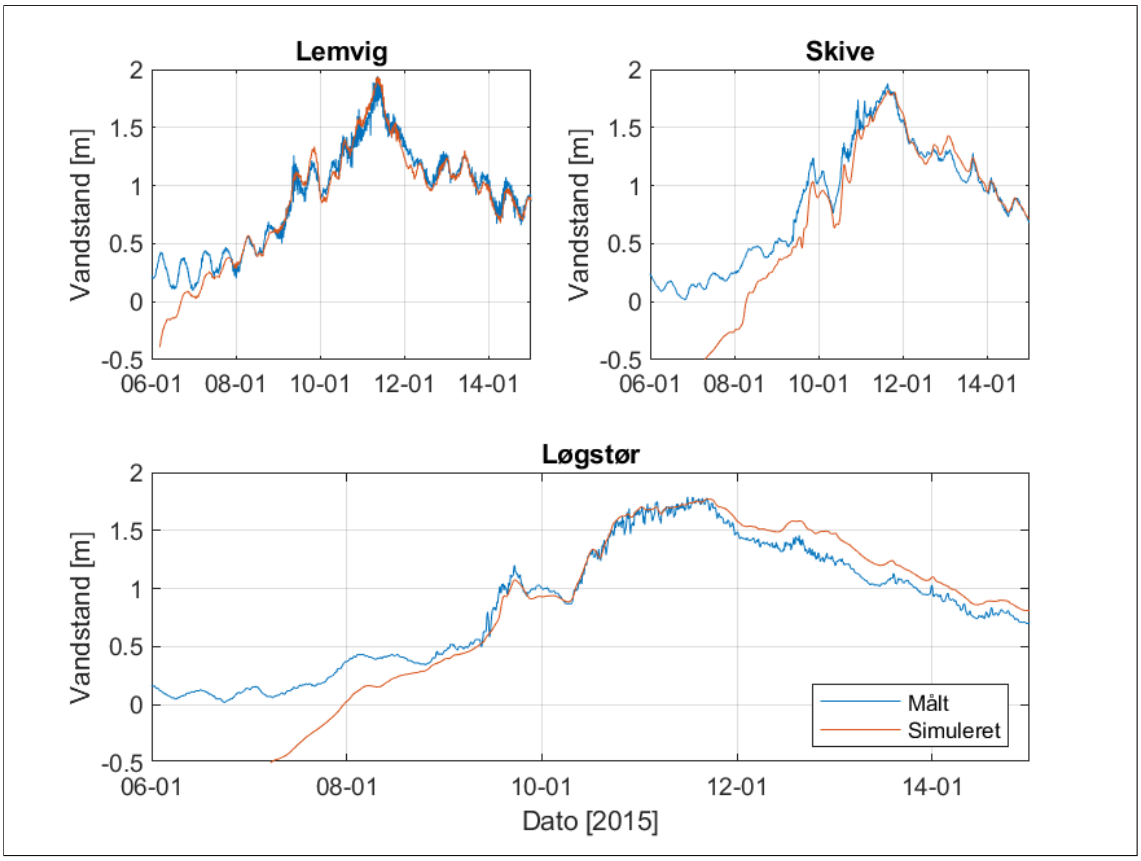


Figur 7.23. *Målt og simuleret vandstand i Skive og Løgstør i perioden 03-01-2005 til 12-01-2005.*

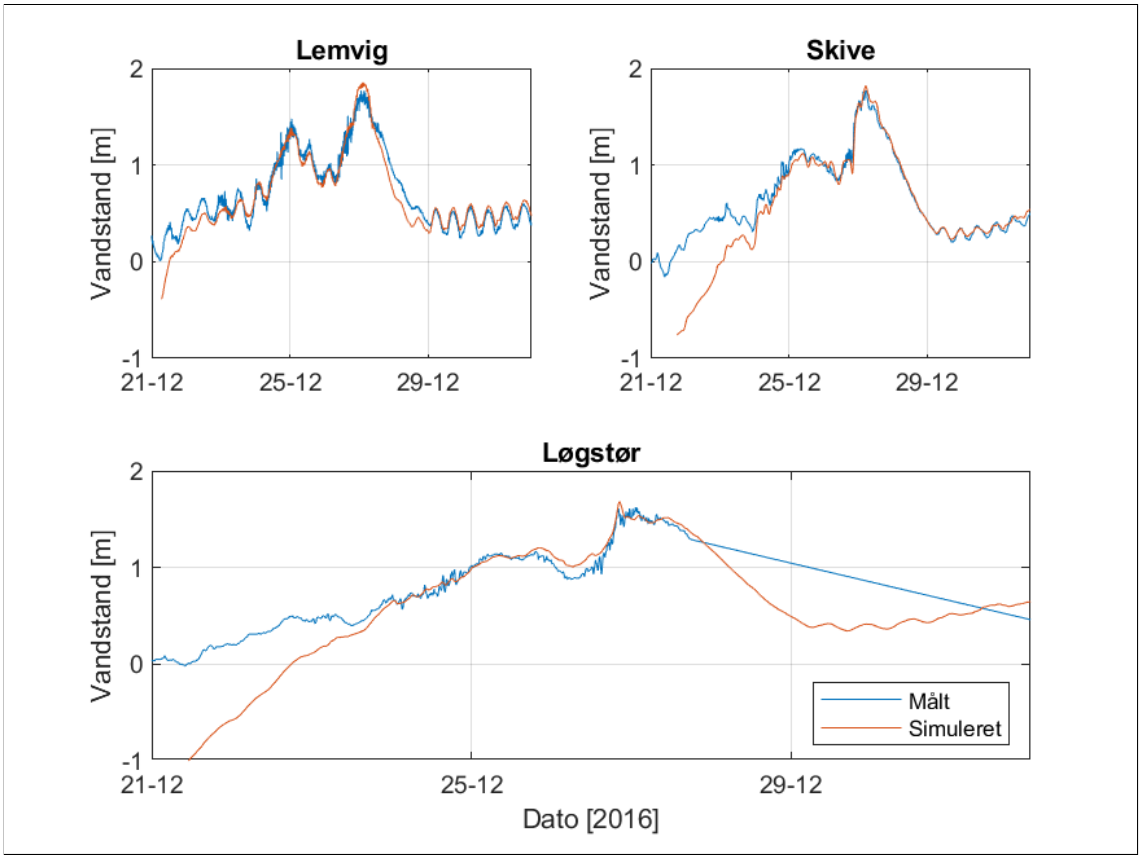
Tabel 7.4. *Forskellen mellem maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt R^2-værdierne for Skive og Løgstør i kalibreringsperioden 03-01-2005 til 12-01-2005*

	Forskel på maksimal vandstand [cm]	Forskel på gennemsnitlig vandstand [cm]	R^2
Skive	12,6	10,7	0,92
Løgstør	13,2	14,4	0,94

Af figur 7.23 og tabel 7.4 fremgår det, at der er rimelig sammenhæng mellem de målte og simulerede vandstande, dog med en afvigelse i den maksimale vandstand på indtil 13 cm og en afvigelse i den gennemsnitlige vandstand på indtil 14 cm. Modellen er valideret i forhold til perioderne 06-01-2015 til 15-01-2015 og 24-12-2016 til 01-01-2017. De målte og simulerede vandstande ved Lemvig, Skive og Løgstør i de to valideringsperioder fremgår af figur 7.24 og 7.25.



Figur 7.24. *Målt og simuleret vandstand i Lemvig, Skive og Løgstør i perioden 06-01-2015 til 15-01-2015.*



Figur 7.25. *Målt og simuleret vandstand i Lemvig, Skive og Løgstør i perioden 24-12-2016 til 01-01-2017.*

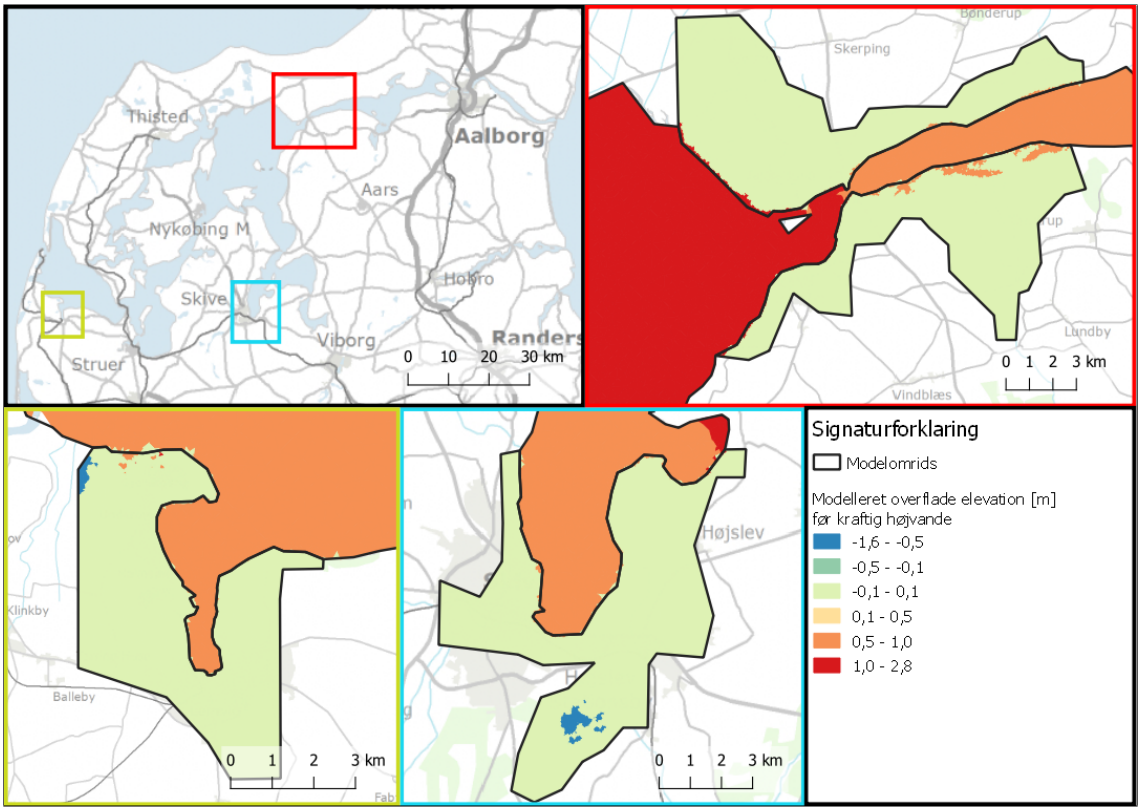
Af graferne på figur 7.24 og 7.25 ses det, at der er rimelig overensstemmelse mellem de målte og simulerede vandstande i de to valideringsperioder. Forskellen mellem de maksimalet og gennemsnitlige vandstande samt R^2-værdierne for de to valideringsperioder fremgår af tabel 7.5. Ved Lemvig er de første 48 tidsskridt udeladt i beregningerne, mens de første 400 tidsskridt er udeladt i beregningerne ved Skive og Løgstør for at tage højde for den tid, det tager modellen af indstille sig grundet begyndelsesbetingelsen.

Tabel 7.5. *Forskellen mellem de maksimalt og gennemsnitlige målte og simulerede vandstande samt R^2-værdierne for Lemvig, Skive og Løgstør i de to valideringsperioder.*

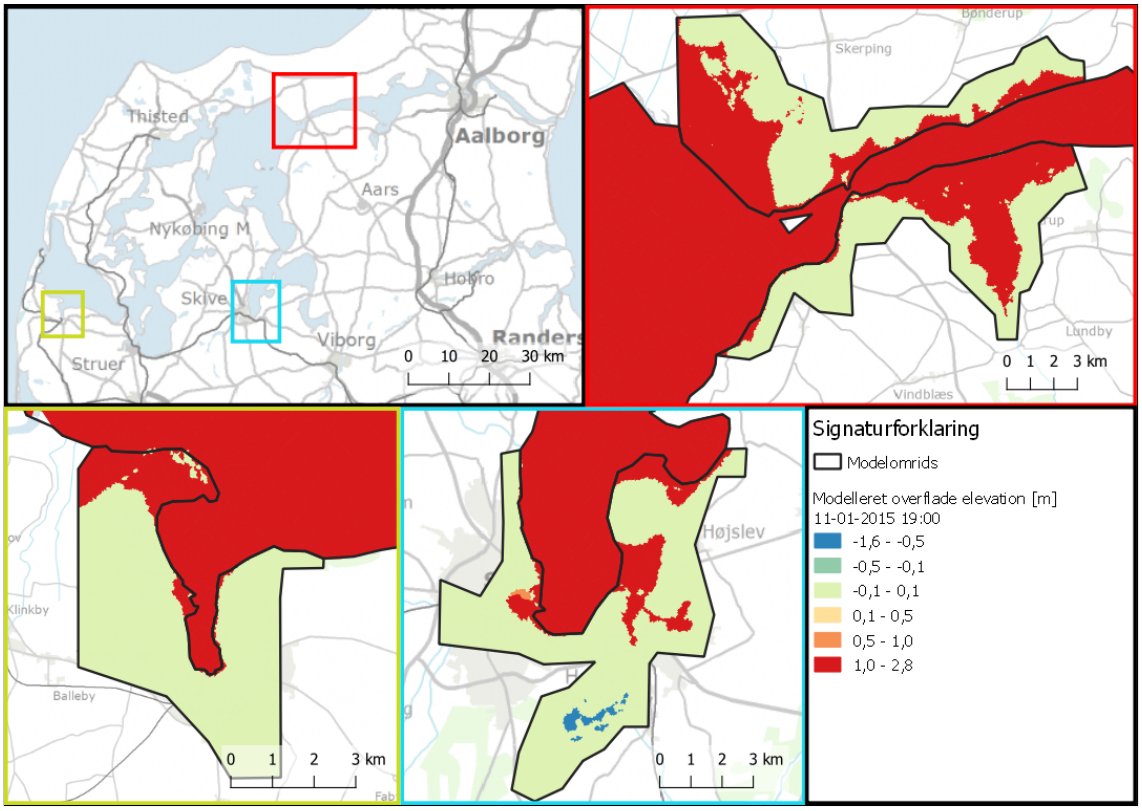
	Forskel på maksimal vandstand [cm]	Forskel på gennemsnitlig vandstand [cm]	R^2
06-01-2015 til 15-01-2015			
Lemvig	0,7	4,0	0,96
Skive	6,4	5,5	0,92
Løgstør	4,0	6,2	0,95
21-12-2016 til 01-01-2017			
Lemvig	8,6	3,6	0,92
Skive	4,8	1,4	0,97
Løgstør	6,3	2,7	0,95

Det fremgår af tabel 7.5, at der er god overensstemmelse mellem de målte og simulerede vandstand, såfremt der ses bort fra manglende måledata ved Løgstør og tiden det tager modellerne at indstille sig som følge af initialværdien på -1,5 m. Ydermere ses det at vandstanden ved Skive og Løgstør modelleres for lav ved peaket. På baggrund af dette samt figur 7.24 og 7.25 er det vurderet, at modelresultaterne er acceptable, hvorfor Limfjords modellen med terræn kan benyttes til at modellere vandstandene ved kraftig forhøjede vandstande i Limfjorden i perioden 06-01-2015 til 15-01-2015 og 24-12-2016 til 01-01-2017. Det er dog vurderet, at modellen bør kalibreres yderligere, hvis den skal benyttes i andre perioder, hvor der er kraftig forhøjet vandstand i Limfjorden.

Den bedste sammenhæng mellem de målte og modelerede vandstande ses i perioden 06-01-2015 til 15-01-2015, det er derfor undersøgt, hvorvidt modellen i denne periode kan anvendes til modellere oversvømmelserne ved Limfjorden. Det modellerede vand på terræn efter modellen har indstillet sig ved en vandstand på 0,45 m i Lemvig den 08-01-2015 og ved en vandstand på 0,47 m i Skive og 0,55 m i Løgstør den 09-01-2015 fremgår af figur 7.26. De maksimalt modellerede oversvømmelser i perioden ses 11-01-2015 19:00, og disse fremgår af figur 7.27.



Figur 7.26. *Modelleret vand på terræn ved Lemvig den 08-01-2015 14:00 samt ved Skive og Løgstør den 09-01-2015 kl 10:00 efter modellen har indstillet sig.*



Figur 7.27. *Modelleret vand på terræn den 11-01-2015 19:00 i forbindelse med stormhændelsen, hvor den maksimale vandstand i Lemvig, Skive og Løgstør er modelleret til henholdsvis 1,93 m, 1,82 m og 1,77 m*

Det fremgår af figur 7.26, at der er mindre områder ved Lemvig og Skive, hvor der er oversvømmet med en modelleret overflade elevation på -1,6 m til -0,5 m. Disse områder er oversvømmet fra start, da områdernes terræn elevation er laver end begyndelses betingelsen. Grundet områderne ikke har direkte forbindelse til kysten, er det valgt at acceptere dette for at mindske beregningstiden, da modellen ved en laver begyndelsesbetingelse skal bruge mere tid på at indstille sig. Derudover ses mindre arealer ved Lemvig og Løgstør, hvor der ved en vandstand på omkring 0,5 m er vand på terræn. Det stemmer overens med terrænets elevation umiddelbart ved kysten. I forbindelse med stormhændelsen den 11-01-2015 ses det af figur 7.27, at der sker oversvømmelse ved både Lemvig, Skive og Løgstør. Udbredelsen af disse oversvømmelser er sammenlignet med kort fra SCALGO Live [2015] over oversvømmelsesudbredelser ved en havstigning svarende til den modellerede vandstand i de tre områder. Ved sammenligningen, ses ikke fuldstændig overensstemmelse mellem oversvømmelserne modelleret af SCALGO Live [2015] og oversvømmelserne modelleret med Limfjords modellen med terræn opstillet i MIKE21, men der er modelleret vand på terræn i flere af de samme områder. Ved sammenligning af de modellerede oversvømmelser med MIKE21 modellen over Limfjorden og de modellerede oversvømmelser ved en havstigning på 1,5 m og 2,0 m præsenteret i afsnit 4.5, ses de samme tendenser i forhold til hvilke områder der oversvømmes men med afvigelser.

Ud fra Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016] analyser fremgår det, at området vest og syd for Lemvig oversvømmes i forbindelse med havstigningen på 1,5 m. Der er i disse områder dige/højvandsmur, og disse er muligvis ikke med i Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering [2016] model. Det kan også skyldes, at modellerne ikke er opstillet med de samme forudsætninger eller afvigelserne kan skyldes at en generel havstigning på 1,5 m til 2,0 m ikke direkte kan sammenlignes med en hændelse, hvor vandstanden i en kortere periode har været højere end 1,5 m. Ud fra sammenligningerne ses det, at der er en tendens til, at der vil ske oversvømmelse i de samme områder, hvorfor det er vurderet, at Limfjords modellen med terræn opstillet i MIKE21 kan anvendes til at modellere oversvømmelserne i de 3 udvalgte områder ved sundet. Limfjords modellen fremgår af elektronisk appendiks D.2.

Modellering af oversvømmelser 8

De opstillede modeller af Randers Fjord og Limfjorden er benyttet til at modellere oversvømmelserne ved forskellige scenarier i dag og i år 2100. I det følgende er dataene, som er anvendt i forbindelse med modelleringerne beskrevet og de modellerede oversvømmelser ved de to fjorde er præsenteret.

8.1 Modellering af oversvømmelser ved Randers Fjord

Randers Fjord modellen med terræn er anvendt til modellering af oversvømmelserne ved fjordkysterne og de omkringliggende områder. De anvendte vind- og vandstandsdata er tilpasset de forskellige scenarier, som er kørt med modellen. Vandføringen i Gudenåen er den samme for alle de modellerede scenarier, og svarende til den målte døgnvandføring indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020].

8.1.1 Vind- og vandstandsdata tilpasset til de forskellige scenarier

Tidligere er det beskrevet, at der ved Randers Fjord er tilgængelige vindmålinger i perioden 2009-2020, vandstandsmålinger i perioden december 2011-2020 og døgnvandføringer fra Gudenåen i perioden 2007-2018. Dette betyder, at oversvømmelserne i perioden december 2011-2018, hvor der er sammenfaldende data kan modelleres og data fra denne periode kan tilpasses således, at oversvømmelser i år 2100 ligeledes kan modelleres.

I følge Ditlevsen et al. [2018] er den højeste registrerede vandstand i Randers Havn i perioden hvorfra, der er tilgængelig data, målt til 1,53 m i forbindelse med stormen 'Bodil' den 06-12-2013. Sammenholdes denne vandstand med vandestande ved forskellige gentagelsesperioder i Randers Havn, som fremgår af tabel 8.1 og figur 2.4 i afsnit 2.3, ses det, at 'Bodil' i Randers Fjord i følge Ditlevsen et al. [2018] er svarende til en hændelse med en gentagelsesperiode på omkring 12 år.

Tabel 8.1. *Vandstande i Randers Havn ved forskellige gentagelses perioder. [Ditlevsen et al., 2018]*

Gentagelsesperiode [år]	Vandstand [m]
20	1,56
50	1,66
100	1,71

Det er relevant, at kunne modellere oversvømmelser ved en højere gentagelsesperiode, da også fremtidige oversvømmelser er interessante. Specielt i forbindelse med implementering af mulige løsningsstrategier, som kan reducere eller forhindre følgerne af disse.

Det er valgt, at fremskrive hændelsen 'Bodil' til en hændelse med 500 års gentagelsesperiode. Dette er gjort ved ekstrapolering mellem den højeste registrerede vandstand målt i Randers Havn i forbindelse med stormen 'Bodil' og vandstanden ved en 500 års gentagelsesperiode, som er aflæst af figur 2.4 i afsnit 2.3. Derudover er det valgt, at fremskrive vind og vandstanden på randen til år 2100 ved at tage højde for klimaændringernes påvirkning på disse. Vandstanden er fremskrevet ved at anvende de estimerede middelvandstande ved de to udledningsscenarier RCP4,5 og RCP8,5, som er beskrevet i afsnit 2.2. I afsnit 2.1 er det beskrevet, at den estimerede ændring i vinden om 100 år er 10%. Det er ikke yderligere præciseret hvilket udledningsscenarie, denne estimering er basseret på, hvorfor det er valgt at fremskrive vinden med 10% ved begge udledningsscenarier.

De forskellige scenarier, som er anvendt i forbindelse med modellering af oversvømmelserne ved Randers Fjord, er listet af det følgende og den fremskrevne data fremgår af det elektroniske appendiks D.3.

- **Hændelse med 500 års gentagelsesperioden i 2013.** Her er anvendt vindmålinger fra 2013 målt ved Randers Havn og vandstandmålinger fra 2013 målt ved Udbyhøj Havn. Vandstandende er korrigeret ved ekstrapolering mellem vandstanden på 1,53 m ved 'Bodil' og vandstanden på 1.82 m ved en 500 års gentagelsesperiode aflæst af figur 2.4.
- **Hændelse med 12 års gentagelsesperiode i år 2013 fremskrevet til år 2100 ved RCP4.5.** Her er anvendt vindmålinger fra 2013 i Randers Havn, som er forøget med 10%, hvilket er svarende til den estimerede ændring i vinden om 100 år grundet klimaændringer, som beskrevet ovenfor. Derudover er der lagt 0,31 m til den målte vandstand i Udbyhøj Havn, da det er svarende til den estimerede ændring i vandstanden i Kattegat udfor Randers Fjord i år 2071-2100 ved RCP4,5 [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019b].
- **Hændelse med 12 års gentagelses periode i år 2013 fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.** Her er ligeledes anvendt vindmålinger fra 2013 i Randers Havn, som er forøget med 10%. Derudover er der lagt 0,48 m til vandstandene målt i Udbyhøj Havn, da det er svarende til den estimerede ændring i middelvandstanden i Kattegat udfor Randers Fjord i år 2071-2100 ved RCP8,5 [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019b].
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode i år 2013 fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.** De anvendte vindmålinger fra Randers Havn er forøget med 10%. Mens vandstandsmålingerne, der ved ekstrapolering er tilpasset til en 500 års gentagelsesperiode, yderligere er fremskrevet til år 2100 ved at øge vandstanden med 0,31 m.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode i år 2013 fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5**. De anvendte vindmålinger fra Randers Havn er forøget med 10% for at tage højde for klimaændringerne. Mens vandstandsmålingerne, der ved ekstrapolering er tilpasset til en 500 års gentagelsesperiode, yderligere er fremskrevet til år 2100 ved at lægge 0,48 m til vandstanden.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den nedre grænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.** Her er anvendt vind og vandstandsmålinger fra 2013, som er fremskrevet med hensyn til klimaændringerne ved RCP4,5 på sammevis som beskrevet ovenfor. Inden fremskrivning af vandstandsmålingerne til år 2100, er disse korrigeret, så de er svarende til en 500 års gentagelsesperiode, når den nederste grænse i 95% konfidensintervallet følges.

Dette er gjort ved ekstrapolering mellem vandstanden på 1.53 m ved 'Bodil' og 1.69 m ved en 500 års gentagelsesperiode når den nedregrænse i konfidensintervallet følges. 95% konfidensintervallet for vandstande med forskellige gentagelsesperioder ved Randers Havn er fastsat af Ditlevsen et al. [2018] og fremgår af figur 2.4.

- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.** Vind og vandstandsmålinger fra 2013 er fremskrevet med hensyn til klimaændringerne ved RCP4,5 på sammevis, som beskrevet ovenfor. Inden fremskrivning af vandstandsmålingern til 2100 er disse korrigeret, så de er svarende til en 500 års gentagelsesperiode, når den øverste grænse i 95% konfidensintervallet følges. Dette er gjort ved ekstrapolering mellem vandstanden på 1,57 m ved 'Bodil' og 1,98 m ved en 500 års gentagelsesperiode, når den øvre grænse i 95% konfidensintervallet følges.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den nedregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.** Den anvendte vind er fremskrevet til år 2100, som beskrevet ovenfor. Ligeledes er vandstandsmålingerne først korrigeret til en 500 års gentagelsesperioden ved den nedregrænse af 95% konfidensintervallet, og dernæst er der taget højde for ændringerne i middelvandstanden, som følge af klimaændringerne ved RCP8,5.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.** Den anvendte vind er fremskrevet til år 2100, som beskrevet ovenfor. Ligeledes er vandstandsmålingerne først korrigeret til en 500 års gentagelsesperioden ved den øvregrænse af 95% konfidensintervallet, og dernæst er der taget højde for ændringerne i middelvandstanden, som følge af klimaændringerne ved RCP8,5.

I forbindelse med valideringen af Randers Fjord modellen med terræn, se kapitel 7, er oversvømmelserne i perioden 01-12-2013 til 11-12-2013, som stormen 'Bodil' er en del af, modeleret. Disse resultater er benyttet og sammenholdt med de modellerede oversvømmelser og vandstanden i Randers Havn ved de listede scenarier.

8.1.2 Resultat af oversvømmelses modellering

De simulerede vandstande ved de forskellige scenarier, der er kørt med modellen er afbildet på figur B.1, B.2, B.3 og B.4 i appendiks B. De maksimalt simulerede vandstande ved de forskellige scenarier fremgår af tabel 8.2.

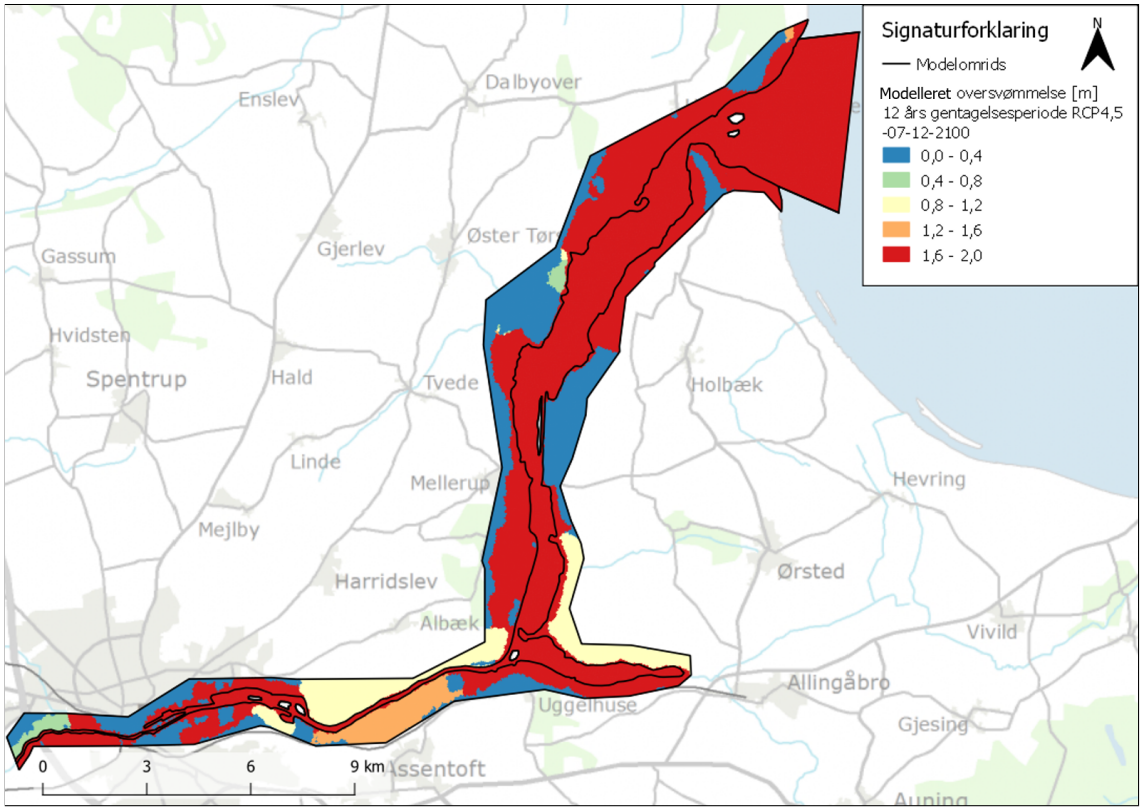
Tabel 8.2. *Maksimal simuleret vandstand i Randers Havn ved forskellige modellerede scenarier.*

Modelleret scenarie	Maksimal vandstand [m]
12 års gentagelsesperiode i år 2013	1,53
500 års gentagelsesperiode i år 2013	1,70
12 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5	1,72
12 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5	1,95
500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5	2,07
500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5	2,26
500 års gentagelsesperiode ved den nedregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5	1,91
500 års gentagelsesperiode ved den øvregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5	2,22
500 års gentagelsesperiode ved den nedregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5	2,11
500 års gentagelsesperiode ved den øvregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5	2,45

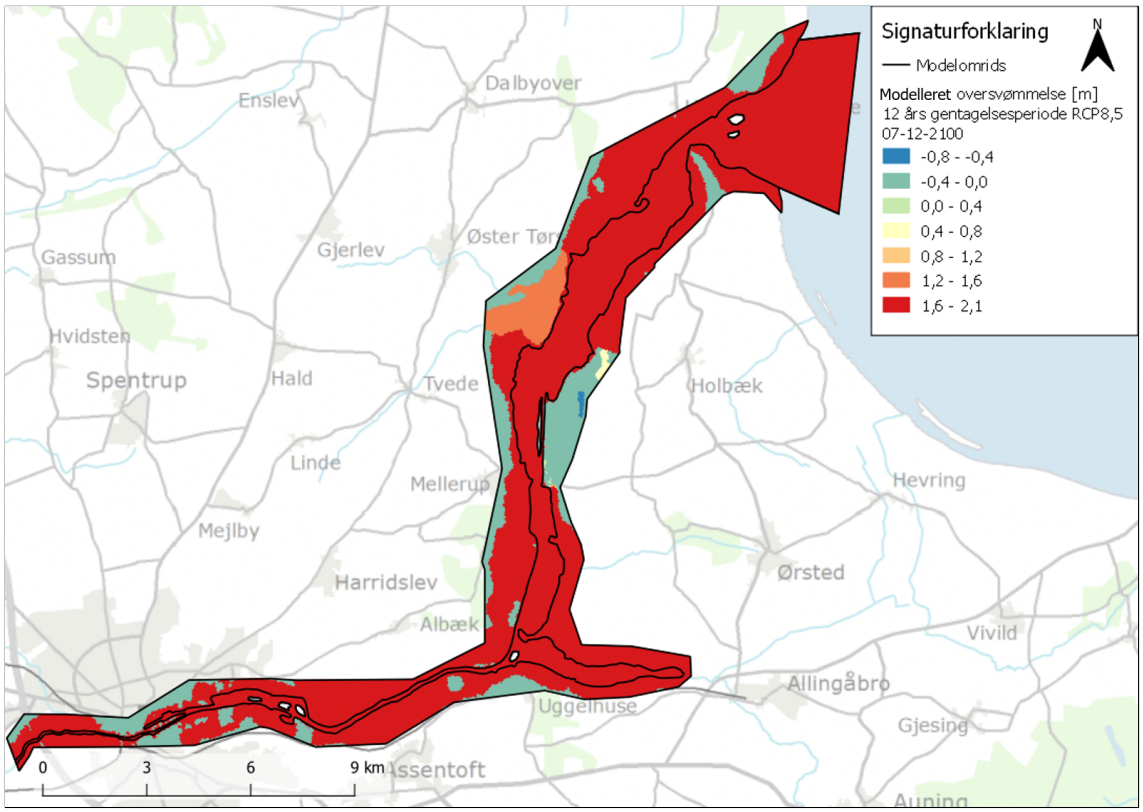
Af tabel 8.2 ses en forskel på 0,92 m mellem den laveste og højeste simulerede vandstand i Randers Havn ved de 8 modellerede scenarier. Ydermere fremgår det af de simulerede vandstande ved 95% konfidensintervaller for gentagelsesperioden på 500 år, at der er stor usikkerhed på vandstanden. Det betyder at vandstanden ved en 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 kan være et sted mellem 1,91 m og 2,22 m ved RCP4,5 eller et sted mellem 2,11 m og 2,44 m ved RCP8,5.

De modellerede oversvømmelser ved Randers fjord den 07-12-2100 ved en 12 års gentagelsesperiode ved RCP4,5 og RCP8,5 fremgår af figur 8.1 og 8.2.

Det fremgår af figur 8.1, at store dele af området oversvømmes ved en hændelse med en 12 års gentagelsesperiode, hvor vandstanden på randen er forhøjet i forhold til RCP4,5. Ved sammenligning af oversvømmelser ved en hændelse med en 12 års gentagelsesperiode, hvor vandstanden på randen er forhøjet i forhold til RCP8,5, som er vist på figur 8.2, ses det at både udbredelsen og dybden af de modellerede oversvømmelser ved RCP8,5 er større.

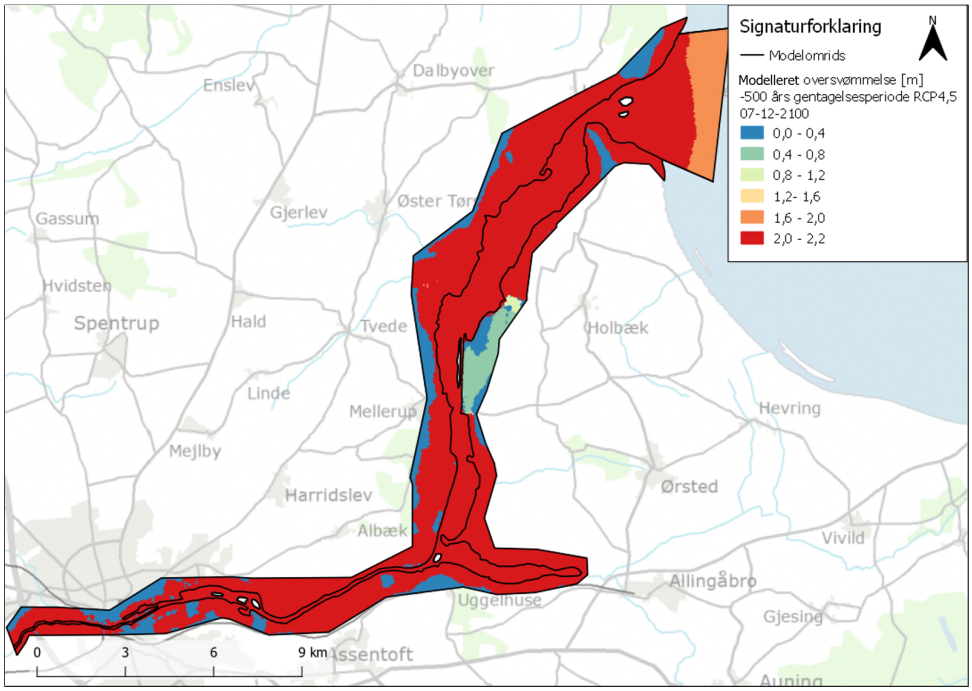


Figur 8.1. *Modeleret oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 ved en hændelse med en 12 års gentagelsesperiode, hvor vandstanden er forøget i forhold til RCP4,5.*

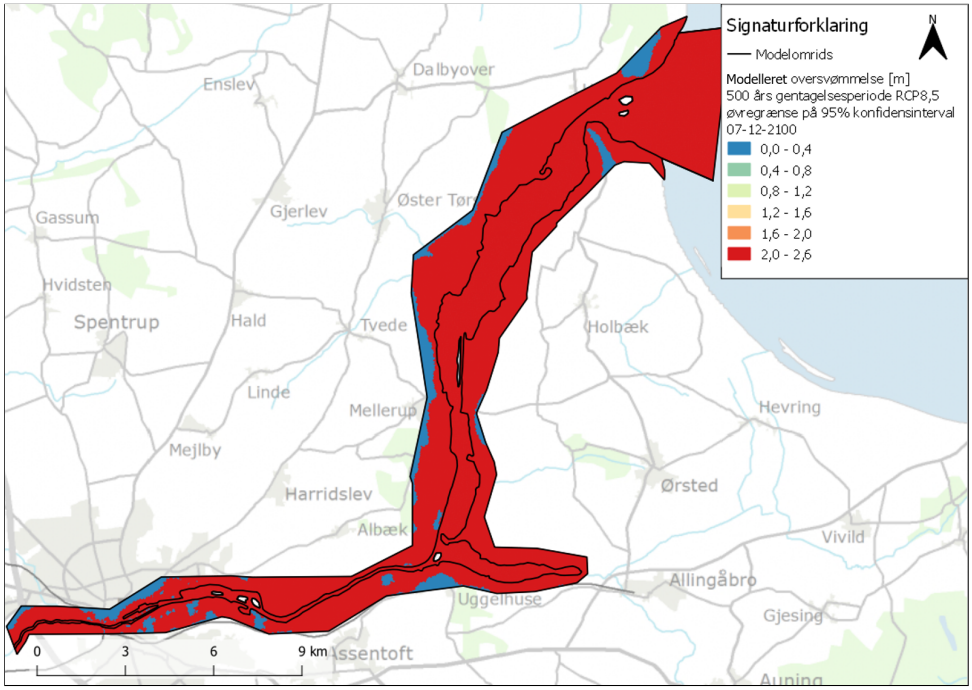


Figur 8.2. *Modeleret oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 ved en hændelse med en 12 års gentagelsesperiode, hvor vandstanden er forøget i forhold til RCP8,5.*

De modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord ved en hændelse med 500 års gentagelsesperioe fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 og ved en hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5 fremgår af henholdsvis figur 8.3 og 8.4.



Figur 8.3. *Modeleret oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 ved en hændelse med en 500 års gentagelsesperiode, hvor vandstanden er forøget i forhold til RCP4,5.*



Figur 8.4. *Modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 500 års hændelse ved den øvre grænse af 95% konfidensinterval i 2100 ved RCP8,5.*

Det fremgår af 8.3 og 8.4 at største dele af området ved Randers Fjord oversvømmes i forbindelse med hændelserne.

Oversvømmelserne modelleret ved de øvrige scenarier minder meget om hinanden og de allerede præsenterede oversvømmelser, hvorfor disse er præsenteret i appendiks B. Forskellen mellem de modellerede oversvømmelser ses primært i dybden.

Det fremgår at de modelerede oversvømmelser flere steder når modelområdets rand, hvorfor modelområdet er for lille til at kunne modellere den fulde udbredelsen af oversvømmelserne. Oversvømmelsernes udbredelse er derfor større end det ses på figur 8.1, 8.2, 8.3 og 8.4 samt figurene i appendiks B. For at fastsætte størrelsen på hele det oversvømmede areal, burde områderne omkring Randers Fjord med en terræn elevation lavere end 2,5 m være medtaget i modelområdet, da den maksimale vandstand i fjorden ved det værste af de modellerede scenarier er 2,4 m. Det er de ikke, hvorfor de oversvømmede minimums arealer i stedet er opgivet og sammenlignet med hinanden.

I resultatfilen er der genereret et billede af overfladeelevationen til hvert 10. minut i hele simuleringsperioden. Udbredelsen af oversvømmelserne og de beregnede oversvømmede arealer er fundet på baggrund af det billede, hvor udbredelsen af oversvømmelserne til den enkelte hændelse er vurderet størst. Vurderingen er lavet på baggrund af en visuel bedømmelse, hvorfor der er usikkerheder forbundet med udvælgelsen. Denne usikkerhed gør sig gældende for alle de viste oversvømmelser og beregnede oversvømmede arealer i dette projekt. På trods af disse usikkerheder er det vurderet, at de viste oversvømmelser og beregningerne af de oversvømmede minimums arealer kan benyttes og sammenlignes med hinanden igennem rapporten. Minimums arealerne af de oversvømmede områder ved Randers Fjord ved de forskellige modellerede scenarier er angivet i tabel 8.3.

Tabel 8.3. *Modellerede minimum oversvømmelser med en dybde større end 0,1 m ved Randers Fjord ved forskellige scenarier.*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]
12 års gentagelsesperiode 2013	25,31
500 års gentagelsesperiode 2013	39,05
12 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP4,5	39,95
12 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP8,5	43,50
500 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP4,5	46,17
500 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP8,5	47,84
500 års gentagelsesperiode lavkonfidens 2100 RCP4,5	42,71
500 års gentagelsesperiode højkonfidens 2100 RCP4,5	47,51
500 års gentagelsesperiode lavkonfidens 2100 RCP8,5	45,81
500 års gentagelsesperiode højkonfidens 2100 RCP8,5	48,89

Af tabel 8.3 fremgår det, at minimum udbredelsen af de modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord er mellem 25 km^2 og 49 km^2 afhængig af, hvilket scenarie der betragtes.

Generelt kan det på baggrund af modelleringen af oversvømmelserne ved de forskellige scenarier ses, at store dele af området ved Randers Fjord vil oversvømmes i forbindelse med stormhændelser i fremtiden, hvis ikke der implementeres oversvømmelsesbeskyttelse ved fjorden. Dybde og udbredelse af oversvømmelser vil afhænge af det enkelte scenarie, men ved alle de anvendte scenarier er der modeleret oversvømmelse.

8.2 Modellering af oversvømmelser ved Limfjorden

Modellen over Limfjorden med terræn er anvendt til modellering af oversvømmelserne ved fjordkysterne ved Lemvig, Skive og Løgstør. Den anvendte vind- og vandstandsdata er ligesom ved modelleringen af oversvømmelserne ved Randers Fjord tilpasset de forskellige scenarier, der er kørt med modellen.

8.2.1 Vind- og vandstandsdata tilpasset til de forskellige scenarier

I kapitel 7 er det beskrevet, at der har været problemer med kalibreringen af Limfjords modellen således denne ikke kan anvendes til at beskrive alle stormhændeler i perioden, hvorfra der er tilgængelig data. Modellen kan dog anvendes til at beskrive stormhændelsen den 11-01-2015 kaldet 'Egon' og stormhændelsen den 27-12-2016 kaldet 'Urd' [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019c]. I Ditlevsen et al. [2018] er de 20 hændelse med højest registrerede vandstande ved de enkelte målestationer opgivet. Vandstanden i forbindelse med stormen 'Egon' er ved Lemvig og Skive på 1. pladsen, mens den ved Løgstør er på 3.pladsen over de højeste registrerede vandstande. På baggrund af dette er det valgt, at anvende stormhændelsen 'Egon' til modellering af oversvømmelser ved Limfjorden ved forskellige scenarier i år 2015 og 2100. I tabel 8.4 er gentagelsesperioden og den højest registrerede vandstand for stormhændelsen 'Egon' ved Thyborøn Havet, Lemvig, Skive og Løgstør angivet. Gentagelsesperioderne for de enkelte hændelser er aflæst af grafer fra Ditlevsen et al. [2018]. Disse er forbundet med en vis usikkerhed dels som følge opstillingen af graferne og dels en usikkerhed i forbindelse med aflæsningen. På figur 2.4 i afsnit 2.1 er grafen for vandstande ved forskellige gentagelsesperioder ved Lemvig angivet sammen med 95% konfidensgrænserne for at illustrere usikkerheden ved bestemmelsen af gentagelsesperioden for forskellige vandstande. Vandstanden på 2,19 m ved Thyborøn Havet er ikke med på grafen over vandstande til en given gentagelsesperiode, da denne først starter ved en gentagelsesperiode på 10 år, hvilket er svarende til en vandstand på omkring 2,26 m. Derfor er gentagelsesperioden på omkring 2 år ved Thyborøn estimeret ved forlængelse af kurven.

Tabel 8.4. *Gentagelsesperiode og højest registrerede vandstand for hændelsen 11-01-2015 ved Thyborøn Havet, Lemvig, Skive og Løgstør. [Ditlevsen et al., 2018]*

	Højest registreret vandstand [m]	Gentagelsesperiode [år]
Thyborøn Havet	2,19	2
Lemvig	1,95	75
Skive	1,88	12
Løgstør	1,79	17

Det ses af tabel 8.4, at der er stor forskel på gentagelsesperioden for hændelsen i Vesterhavet og Limfjorden. 'Egon' var en vestenvinds storm, hvorfor vandstanden i Hals Havn ved denne hændelse ikke er opgivet i højvandsstatistikken, som en af de 20 største registrerede højvandshændelser. Den maksimal målte vandstand i Hals Havn den 11-01-2015 er 1,05 m [Danmarks Meteorologiske Institut, 2020a]. Det har ikke været muligt at aflæse den eksakte gentagelsesperioden for denne vandstand ud fra Ditlevsen et al. [2018], men den er lavere end 1 år.

Det er valgt at fremskrive hændelses den 11-01-2015 til en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet. Dette er gjort ved at forøge vandstanden på randen i Vesterhavet ved ekstrapolering mellem den højeste vandstand målt i Thyborøn Havet den 11-01-2015 og vandstanden ved en 500 års gentagelsesperiode. Vandstanden på randen ved Kattegat er forøget, således at forholdet mellem vandstandene på de to rande er det samme som inden korrigeringen. Derudover er det valgt, at fremskrive vind og vandsstandene på randene til år 2100 ved at medtage klimaændringernes påvirkning af disse. Ligesom ved Randers Fjord modellen er vandstandene fremskrevet ved at anvende de estimerede middelvandstande i år 2071-2100 ved udledningsscenarierne RCP4,5 og RCP8,5 og vinden er fremskrevet med 10% ved begge udledningsscenarier.
De forskellige scenarier, som er anvendt i forbindelse med modellering af oversvømmelserne ved Lemvig, Skive og Løgstør er listet i det følgende, og den fremskrevne data fremgår af det elektroniske appendiks D.4.

- **Hændelse med en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet i år 2015** Her er anvendt vindmålinger fra år 2015 målt ved Thisted. Vandstandene på randen i Vester Havet, er korrigeret ved ekstrapolering mellem vandstanden den 11-01-2015 på 2,19 m og vandstanden på 2,62 m ved en 500 års gentagelsesperiode [Ditlevsen et al., 2018,s. 35]. Vandstandene i Hals Havn, som er anvendt på vandstandsranden i Kattegat, er korrigeret ved at forøge vandstanden med ekstrapoleringsfaktoren fra Thyborøn Havet og derefter multiplicere med 44%. De 44% er forholdt mellem den maksimale målte vandstand ved Thyborøn Havet på 2,19 m og vandstanden målt på samme tidspunkt i Hals Havn til 0,97 m.
- **Hændelsen med en 2 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5** Her er anvendt vindmålinger fra år 2015 målt ved Thisted, som er forøget med 10 % for at tage højde for klimaændringerne, som beskrevet ovenfor. Derudover er vandstandene på randen i Vesterhavet forøget med 0.35 m og vandstanden på randen i Kattegat forøget med 0,34 m, hvilket er svarende til de estimerede ændringer i middelvandstanden ved henholdsvis Vesterhavet udfor Thyborøn og Kattegat udfor Hals i år 2071-2100 ved RCP4,5 [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019b].
- **Hændelsen med 2 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5** Her er ligeledes anvendt vindmålinger fra år 2015 målt ved Thisted, som er forøget med 10 %. Derudover er vandstandene på randen i Vesterhavet forøget med 0,56 m og vandstanden på randen i Kattegat forøget med 46 cm hvilket er svarende til de estimerede ændringer i middelvandstanden ved henholdsvis Vesterhavet udfor Thyborøn og Kattegat udfor Hals i år 2071-2100 ved RCP8,5 [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019b].
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.** De anvendte vindmålinger fra Thisted er forøget med 10%. Mens vandstandene på randene, der ved ekstrapolering er korrigeret til en 500 års hændelse, yderligere er fremskrevet til år 2100 ved at øge vandstanden på randen i Vesterhavet med 0,35 m og vandstanden på randen i Kattegat med 0,34 m.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.** De anvendte vindmålinger fra Thisted er forøget med 10%. Mens vandstandene på randene der ved ekstrapolering er korrigeret til en 500 års hændelse, yderligere er fremskrevet til år 2100 ved at øge vandstanden på randen i Vesterhavet med 0,56 m og vandstanden på randen i Kattegat med 0,46 m.

- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.** De anvendte vindmålinger fra Thisted er forøget med 10%. Inden fremskrivning af vandstandene til år 2100 er disse korrigeret til en hændelse med en 500 års gentagelsesperiode når den øvre grænse i 95% konfidensintervallet benyttes. Dette giver ekstrapolering mellem vandstanden på 2,19 m ved 2 års gentagelsesperiode og 2,90 m ved en 500 års gentagelsesperiode når den øvre grænse i 95% konfidensintervallet benyttes. Herefter er vandstanden fremskrevet til år 2100 ved at øge vandstanden på randen i Vesterhavet med 0,56 m og vandstanden på randen i Kattegat med 0,46 m.

I forbindelse med modellering af oversvømmelserne ved Limfjorden er det valgt kun at med tage det mest kritiske tilfælde, når der ses på 95% konfidensintervallet for fremskrivningen af stormhændelsen til 500 års gentagelses periode i Thyborøn Havet. Oversvømmelserne ved hændelsen den 11-01-2015 er modelleret i kapitel 7 i forbindelse med undersøgelen af, hvorvidt Limfjords modellen er valid. Disse resultater er sammenholdt med de modellerede vandstande og oversvømmelser ved Lemvig, Skive og Løgstør ved de øvrige scenarier.

8.2.2 Resultat af oversvømmelses modellering

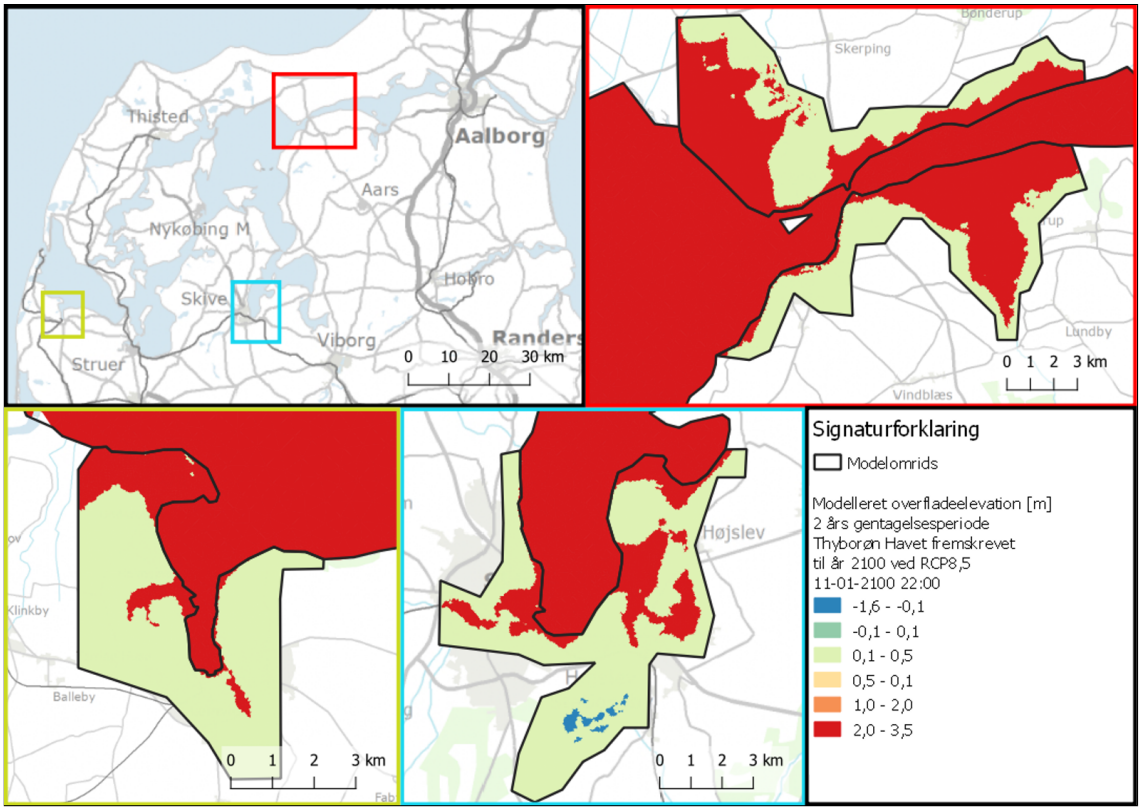
De modellerede vandstande ved de forskellige scenarier i Lemvig, Skive og Løgstør er afbildet på figur C.1 til C.6 i appendiks C, mens de maksimalt modellerede vandstande er opskrevet i tabel 8.5.

Tabel 8.5. *Maksimal simuleret vandstand i Limfjorden ved forskellige modellerede scenarier.*

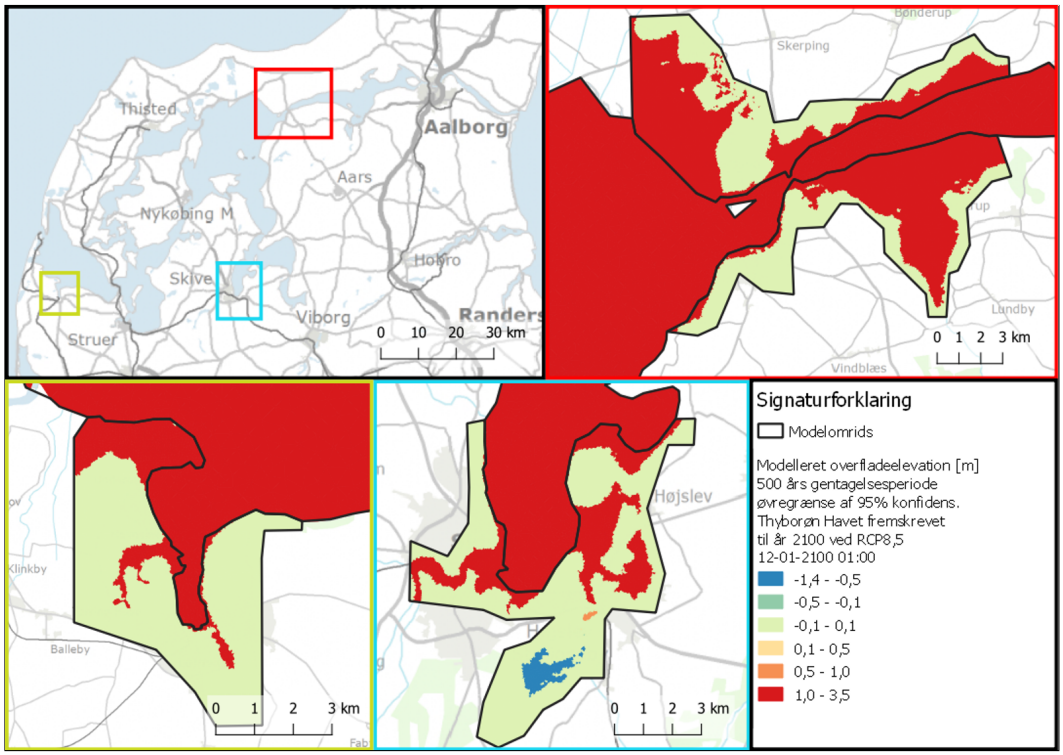
Modelleret scenarie	Maksimal vandstand [m]		
	Lemvig	Skive	Løgstør
2 års gentagelsesperiode i år 2015	1,94	1,82	1,77
500 års gentagelsesperiode i år 2015	2,29	2,05	2,01
2 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5	2,27	2,23	2,19
2 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5	2,49	2,42	2,39
500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5	2,64	2,47	2,43
500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5	2,87	2,66	2,63
500 års gentagelsesperiode ved den øvregrænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5	3,11	2,81	2,78

Det fremgår af tabel 8.5 at vandstanden i år 2015 ved det mest kritiske tilfælde når 2,29 m ved Lemvig, 2,05 m ved Skive og 2,01 m ved Løgstør, mens vandstanden i år 2100 ved det mest kritiske tilfælde når en højde på 3,11 m ved Lemvig, 2,81 m ved Skive og 2,78 m ved Løgstør.

De modellerede oversvømmelser ved Lemvig, Skive og Løgstør ved 2 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5 og ved 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensinterval ved RCP8,5 fremgår af figur 8.5 og 8.6. Mens oversvømmelserne ved de øvrige modellerede scenarier fremgår af appendiks C.



Figur 8.5. *De modellerede oversvømmelser i Lemvig, Skive og Løgstør ved hændelsen med 2 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.*



Figur 8.6. *De modellerede oversvømmelser i Lemvig, Skive og Løgstør ved en hændelse med 500 års gentagelsesperiode for den øvre grænse af 95% konfidensintervallet ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.*

På baggrund af figur 8.5 og 8.6 samt appendiks C ses det, at flere områder omkring Limfjorden ved Lemvig, Skive og Løgstør oversvømmes i forbindelse med de modellerede scenarier. Størrelsen på minimum arealerne af oversvømmelses er angivet i tabel 8.6.

Tabel 8.6. *Modellerede minimum oversvømmelser ved Limfjorden ved forskellige scenarier.*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]
2 års gentagelseperiode før oversvømmelse	5,04
2 års gentagelsesperiode oversvømmelse	58,19
500 års gentagelsesperiode 2015	62,85
2 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP4,5	67,75
2 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP8,5	72,40
500 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP4,5	72,25
500 års gentagelsesperiode 2100 ved RCP8,5	75,40
500 års gentagelsesperiode højkonfidens 2100 RCP8,5	78,61

Det fremgår af tabel 8.6, at arealet af det oversvømmede område ved Lemvig, Skive og Løgstør inden stormhændelsen indtræffer er 5,04 km^2 og at arealet af oversvømmelserne ved Limfjorden ved det værste tilfælde er omkring 79 km^2. Generelt kan det på baggrund af oversvømmelsesanalysen ved de forskellige senarier ses, at der er flere områder omkring Limfjorden ved Lemvig, Skive og Løgstør, der oversvømmes i forbindelse med stormhændelser nu og i fremtiden. Udbredelsen af oversvømmelserne vil afhænge af det enkelte scenarie, men ved alle de anvendte scenarier er der modelleret oversvømmelser ved sundet.

Del III

Løsningsstrategier

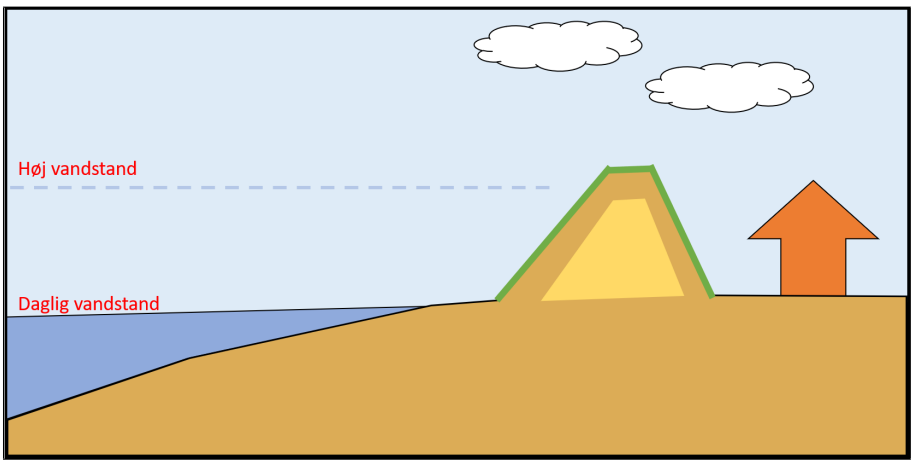
Metoder til beskyttelse imod oversvømmelse

9

På baggrund af vandstandsmodeleringerne i Randers Fjord og Limfjorden er det tydeligt, at der både ved kysterne i Randers Fjord og i Limfjorden sker oversvømmelse ved stormhændelser. Ligeledes er det tydeligt, at oversvømmelser på grund af klimaændringerne i fremtiden vil blive mere omfangsrige. Diger og højvandsmure, stormflodsbarrierer og sluser samt reducering af kanal tværsnit er mulige foranstaltninger, der kan etableres for at beskytte kysterne i mod oversvømmelser. Principperne bag disse er beskrevet i det følgende. Derudover er mulige løsningsstrategier til reducering eller forhindring af oversvømmelser ved Limfjorden og Randers Fjord beskrevet.

9.1 Diger og højvandsmure

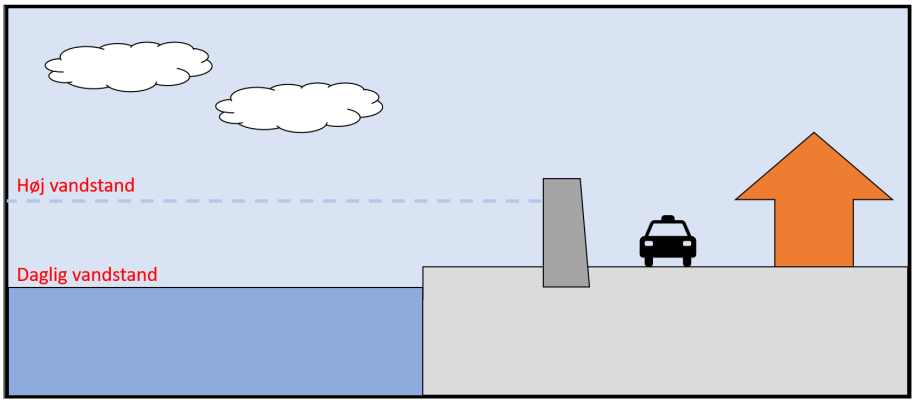
Et dige er en konstruktion, som har til formål at beskytte bagvedliggende arealer ved havet, indre kyster og vandløb i mod oversvømmelser. Ofte er digerne konstrueret af jord med en sandkerne, derefter et lerlag og yderst bevokset med græs, hvor græsset er stabiliserende for diget og beskytter imod erosion. Placeringen af digerne kan være umiddelbart ved vandkanten eller tilbagetrukket for at beskytte digerne imod erosion fra bølger. Ved tilbagetrækning af digerne vil forlandet medvirke til at reducere bølgernes energi og derved mindske erosionen. Større diger kan etableres med mulighed for færdsel af cyklister og gående på selve diget, men generelt vil trafik forringe styrken af digerne. [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014a] En principskitse af et dige ses på figur 9.1, skitsen er ikke målfast og illustrerer udelukkende princippet ved anvendelse af diger som beskyttelse imod oversvømmelse.



Figur 9.1. *Principskitse af dige som kan anvendes til at beskytte baglandet imod oversvømmelser.*

Af figur 9.1 fremgår det, at diget vil beskytte det bagvedlæggende areal og dermed også huset imod oversvømmelse. Ydermere fremgår det, at der fra den dimensionsgivende højvandstand til toppen af diget er en frihøjde. Dette skyldes blandt andet hensynet til bølger. Diger er pladskrævende, da de konstrueres med for- og bagskråninger, hvor bagskråningen vender væk fra vandet. Bagskråningen er sammenlignet med forskråningen stejl ofte med en hældning på 1:3, mens forskråningen er mere flad og ofte med en hældning på 1:10. [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014a]

Ligesom diget anvendes højvandsmure til at beskytte baglandet imod oversvømmelse, men til forskel fra diget konstrueres disse i beton, metal eller andre hårde materialer. De anvendes ofte i bymiljøer og ved havne, da de er mindre pladskrævende end diger. Ydermere kan en højvandsmur etableres med porte, hvor igennem der ved normale vandstande kan afvikles trafik. Portene kan lukkes manuelt ved varsling om stormflod eller kraftig forhøjet vandstand. [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014b] På figur 9.2 ses en principskitse med en højvandsmur. Det fremgår, at muren ikke er placeret direkte ved kajkanten, dette er for at beskytte murens fundament mod undergravning og erosion, som ellers ville forekomme med bølgeslag direkte på muren. Skitsen er ikke målfast og illustrere udelukkende princippet ved en højvandsmur.



Figur 9.2. *Principskitse af højvandsmur som kan anvendes til at beskytte de bagvedlæggende områder imod oversvømmelse.*

Fælles for diger og højvandsmure er at dimensionering sker på baggrund af højvandsstatistikker, vanddybder ved kysten, vindforhold, bølgeforhold, den tilladelige opskyldsmængde ved bølgeoverskyl og andre lokale forhold som for eksempel geologi. Omkostningerne ved etablering af diger er omkring 2000-3000 kr. pr. km afhængig af bølge eksponeringsgraden, mens det for højvandsmure er omkring 3000 kr pr. km, hvis de konstrueres i beton. [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014a] og [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014b].

9.2 Stormflodsbarierre og sluse

En stormflodsbarriere er en konstruktion, der anvendes til at beskytte oplandet til fjorde, vandløb og lignende i mod oversvømmelser forårsaget af forhøjede vandstande. Ved forhøjet vandstand lukker barrieren for vandindstrømning til det bagvedlæggende område.

Stormflodsbarrieren er normalt kun lukket ved forhøjet vandstand, hvilket betyder, at den normale skibstrafik ikke vil forstyrres af barrieren. Barrieren kan derfor med fordel anvendes i områder, hvor der ikke normalt er behov for regulering af vandstanden. Lukningen af barrieren kan ske enten manuelt eller automatisk, og styrringen kan være på baggrund af vejrvarslinger eller på baggrund af vandstanden. Sluser kan konstrueres, som enten afvandings- eller navigationssluser og de anvendes til at regulere naturlig forkommende vandstand. Derudover kan sluser konstrueres således, at de foruden regulering af vandstanden også kan avnendes som stormflodsbarriere. Sluser er opbygget med forskellige kamre og sluse porte, som kan være helt lukkede, delvis åbne eller åbne. Styringen kan ske manuel eller automatisk på baggrund af vejrvarsling eller forskellige kontrolbetingelser i forhold til vandstanden. I tilfælde hvor stormflodsbarriere og sluser ikke er tilstrækkelige til beskyttelse imod oversvømmelser, kan de anvendes i kombination med diger, højvandsmure og pumper. [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014c]

Trafikafvikling

I forbindelse med sluser og stormflodsbarrierer kan der etableres broer og veje til trafikafvikling [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014c]. Ved overvejelser om etablering af en sluse eller en stormflodsbarriere bør dette tages med i betragtningen, da den trafikale tilgængelighed på tværs af fjordene kan øges ved at forkorte afstanden mellem A og B.

Miljøhensyn

Ved etableringen af en stormflodsbarriere eller en sluse skal det undersøges, hvordan miljøet vil påvirkes, dels i forbindelse med konstruktionsarbejdet og dels efter konstruktionen står færdig. I denne forbindelse skal det undersøges, hvordan etableringen af en sådan konstruktion vil påvirke transporten af sediment, fiskebestanden, samt fauna og flora i vandet og det omkringliggende landområde. [Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014c]

9.3 Reducering af tværsnit

Ved Limfjorden arbejdes der på nuværende tidspunkt med en løsning ved reducering af tværsnittet ved Thyborøn Kanal, således mindre vand kan ledes ind i fjorden. I dette projekt er det derfor valgt at undersøge, hvordan en reducering af tværsnittet i Thyborøn Kanal vil påvirke oversvømmelserne ved Limfjorden. Med i planen er en uddybning af sejlrenden til 13 meter, således fjorden fortsat vil være tilgængelig for skibstrafik.[Rambøll, 2020]. Ligesom ved etableringen af stormflodsbarrierer og sluser, skal det undersøges, hvordan miljøet vil påvirkes, dels i forbindelse med konstruktionsarbejdet og dels efter konstruktionen står færdig, da konstruktionen kan påvirke transporten af sediment og strømningerne i vandet, og derved påvirke fisk, fauna og flora i fjorden. [Coast to coast Climate Challenge, 2020]

9.4 Løsningsstrategier

Forskellige mulige løsningsstrategier ved Randers Fjord og Limfjorden er opstillet. Disse er kort præsenteret i det følgend og i kapitel 10 er løsningsstrategierne implementeret i modellerne.

9.4.1 Randers Fjord

Ved Randers Fjord er der flere steder etableret diger og forhøjninger til beskyttelse i mod oversvømmelse fra fjorden. Den eksisterende oversvømmelsesbeskyttelse er ikke tilstrækkelig, hvorfor øvrige tiltag må etableres for at reducere oversvømmelserne. Derfor er tre løsningsstrategier opstillet ved Randers Fjord.

L1 Randers Fjord - Diger og Højvandsmure

En mulig løsningsstrategi er at udbygge de eksisterende diger, hvor den eksisterende højde ikke er tilstrækkelig, samt at etablere nye diger eller højvandsmure på de strækninger, hvor der er behov for det.
Ved denne løsning kan dele af de eksisterende foranstaltninger fortsat anvendes, hvorfor de materielle og økonomiske midler, som er anvendt på nuværende tidspunkt, ikke vil være spildte. Ved udbygningen og etablering af flere diger og højvandsmure vil udsynet og tilgangen til fjordene formindskes, hvorfor det for borgerne der benytter området kan være en negativ konsekvens.

L2 Randers Fjord - Sluse eller stormflodsbarriere

En anden mulig løsningsstrategi er etablering af en sluse eller en stormflodsbariere ved Randers Fjord. Ved denne løsning kan store områder beskyttes imod oversvømmelser ved etablering af én konstruktion, ligesom adgangen og udsynet til fjorden ikke vil forringes, som det er tilfældet med løsningsstrategi L1. Det skal dog undersøges, hvordan en sluse eller en stormflodsbarriere kan etableres således at miljøtilstanden i fjordene ikke vil forringes. En placering ved Udbyhøj er valgt, da det giver mulighed for at beskytte kysterne ved Grund Fjord, samt den mellemste og inderste del af Randers Fjord imod oversvømmelser. Ligeledes er der mulighed for, at etablerer en fast trafikforbindelse på tværs af fjorden i stedet for den nuværende færgenforbindelse. Ved at erstatte færgeforbindelsen med en vej kan trafikken afvikles på alle tider af døgnet uden at være afhængig af overfartsplaner eller færge kapacitet.

L3 Randers Fjord - Kombinering

Denne løsningsstrategi er en kombination af løsningsstrategi L1 og L2. Dette kan være en mulighed, hvis de to ovenstående løsninger ikke alene kan løse problemet med oversvømmelser ved Randers Fjord. En sådan løsning vil sandsynligvis blive dyrere end blot at etablere en sluse eller en stormflodsbarriere, men gentagende oversvømmelser ved fjordkysterne og de bagvedliggende arealer kan have store konsekvenser, hvilket er årsagen til, at denne løsningsstrategi er undersøgt.

9.4.2 Limfjorden

Ved den vestlige del af Limfjorden er der ved to af de tre fokus områder etableret diger og højvandsmur. Disse er dog ikke tilstrækkelige, hvorfor øvrige tiltag må etableres for at reducere eller forhindre oversvømmelserne ved kysterne. Fire løsningsstrategier er opstillet ved Limfjorden, og to af disse er undersøgt i dette projekt.

L1 Limfjorden - Sluse eller stormflodsbarriere

En mulig løsningsstrategi er af etablere en sluse eller stormflodsbarriere i Limfjorden. Denne kan etableres flere forskellige steder i sundet. I dette projekt er det valgt, at etablere denne ved åbningen i Thyborøn Kanal for på denne vis, at forsøge at reducere og forhindre oversvømmelser i den vestlige del af Limfjorden. Derudover vil en placering af en stormflodsbariere og sluse forhinder at mere vand med tiden bliver presset ind i Limfjorden, som følge af erosionen af Thyborøn Kanal. Ved etableringen af en sluse eller stormflodsbarrierer ved Thyborøn Kanal er der ligeledes mulighed for, at etablere en fast trafikforbindelse på tværs af fjorden i stedet for færgen, som på nuværende tidspunkt sikre trafikafviklingen mellem Thyborøn og Agger.

L2 Limfjorden - Reducering af tværsnit

Ovenfor blev det beskrevet, at der arbejdes på en plan med at reducere tværsnittet ved Thyborøn Kanal, for på denne vis at forhindre oversvømmelser i den vestlige del af Limfjorden. Det er derfor forsøgt at reducere tværsnittet ved Thyborøn Kanal.

L3 Limfjorden - Diger og højvandsmur

En tredje mulig løsning er at forhøje eksisterende diger og højvandsmuren, samt etablere nye de steder hvor dette er nødvendigt. Implementeringen af dette løsningsforslag er ikke undersøgt i forbindelse med dette projekt. Det er dog en mulighed, som kan undersøges, hvis ikke løsningsstrategi L1 og L2 ønskes etableret ved Limfjorden.

L4 Limfjorden - Kombination

En fjerde mulig løsning er at kombinere løsningsstrategi L1 og L2 med diger eller højvandsmure, såfremt disse løsningsstrategier ikke alene løser problemet med oversvømmelser af kysterne ved kraftig højvande eller stormflod. Implementeringen af dette løsningsforslag er ligeledes ikke undersøgt i forbindelse med dette projekt, men som med løsningsstrategi L3 er det en mulighed, som kan undersøges.

Modellering med forskellige løsningsstrategier 10

Det er blevet beskrevet, at der findes flere metoder til at beskytte kystområder imod oversvømmelse som følge af stormflod og kraftig højvande. I kapitel 9 er flere mulige løsningsstrategier ved Randers Fjord og Limfjorden opstillet. Løsningsstrategiernes påvirkning på oversvømmelserne er undersøgt ved at implementere disse i de to modeller over Randers Fjord og Limfjorden. Disse undersøgeler er beskrevet i det følgende.

10.1 Randers Fjord

Oversvømmelserne i Randers Fjord ved implementering af de tre løsningsstrategier er undersøgt ved de følgende fire scenarier.

- 12 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.
- 12 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.
- 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.
- 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.

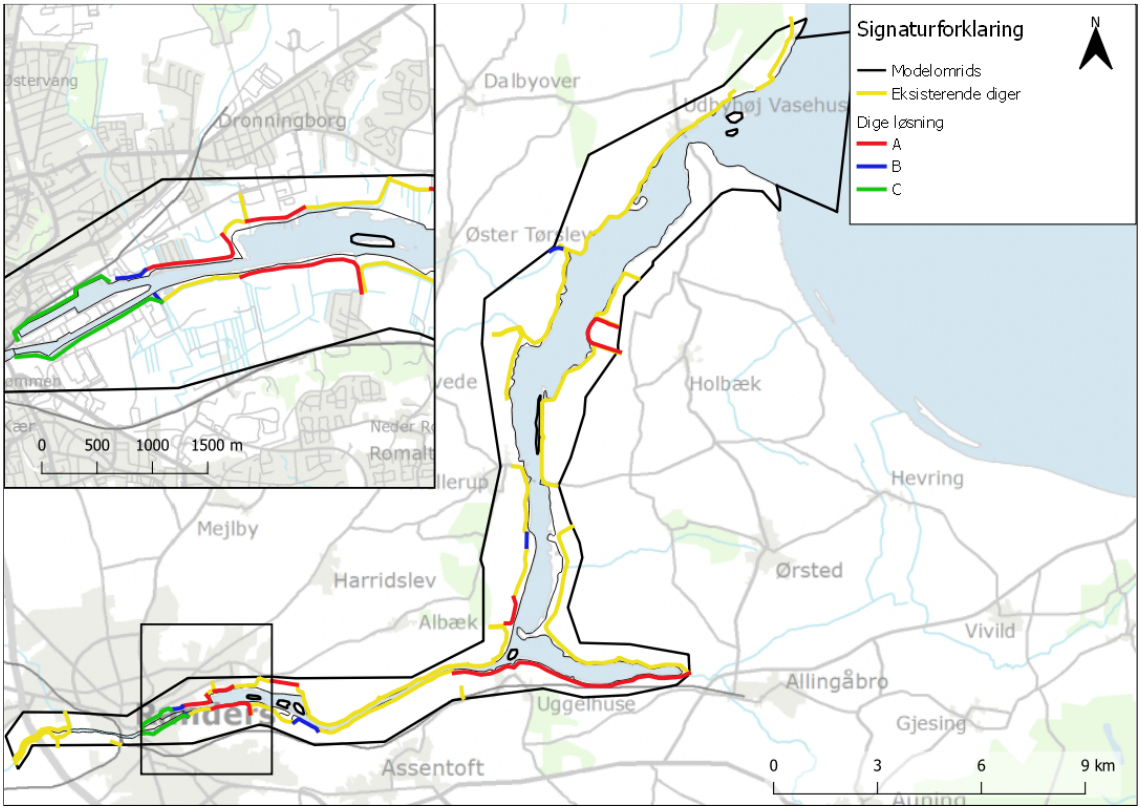
I de senere år, er der set flere eksempler på planer og aftaler på verdensplan om at reducere drivhusgasudledningen for at bremse klimaforanderingerne, blandt andet er der i FN's verdensmål fokus på at bekæmpe klimaforandringerne [UNPDs nordiske kontor, 2016]. På baggrund af dette, er det valgt at undersøge virkningen af løsningsstrategierne, hvor hændelsen med en 12 og 500 års gentagelsesperiode er fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5, da en reducering i drivhusgasudledningen frem mod år 2100 sandsynligvis vil føre til dette scenarie [Danmarks Meteorologiske Institut i samarbejde med Miljøstyrelsen, 2018]. Yderligere er det valgt, at undersøge virkningen af løsningsstrategierne i Randers Fjord ved de mest kritiske tilfælde ved en 12 og 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100.

10.1.1 L1 Randers Fjord - Diger og højvandsmure

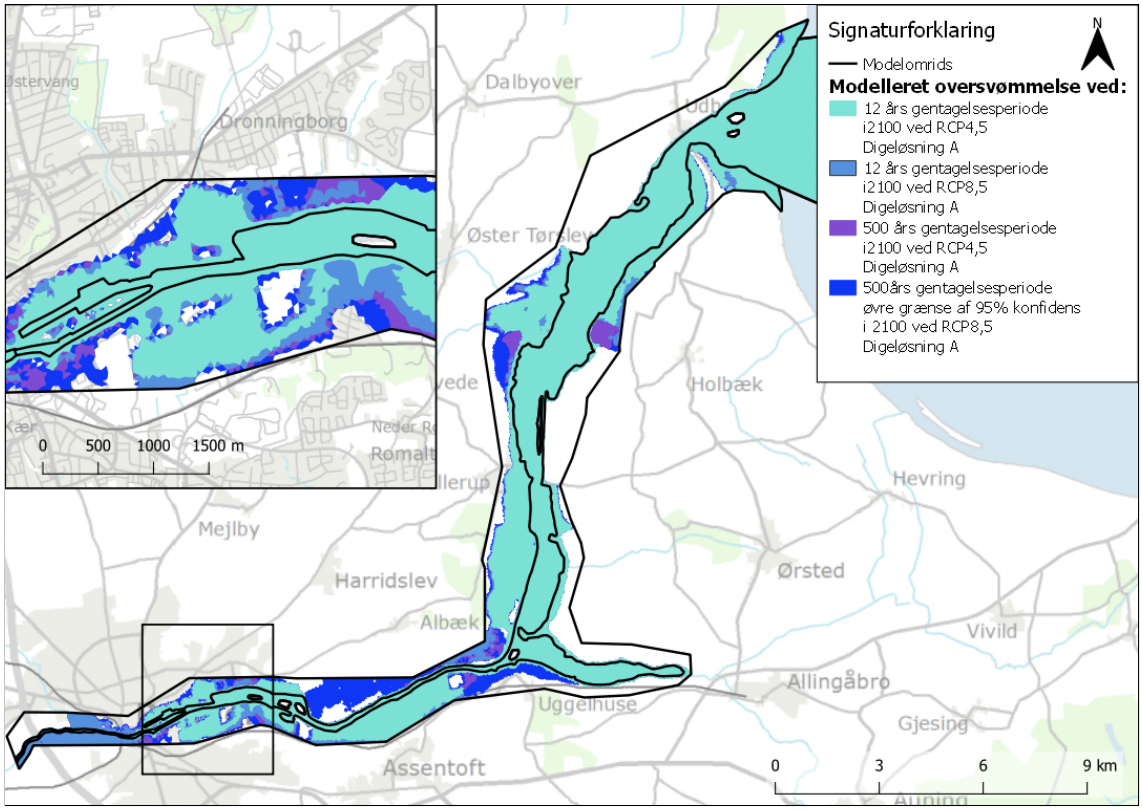
Det fremgår af oversvømmelsesundersøgelserne ved Randers Fjord, at højden på flere af de eksisterende diger ikke er tilstrækkelige til at forhindre oversvømmelser, hvorfor højden på disse diger er forøget til 2,5 m. Derudover er det forsøgt, at implementere nye diger i de områder, hvor terrænet er særligt udsat for oversvømmelser. Højden på disse er ligeledes fastsat på 2,5 m.

Dette skyldes at vandstanden i Randers Havn ved en hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5 stiger til 2,4 m.

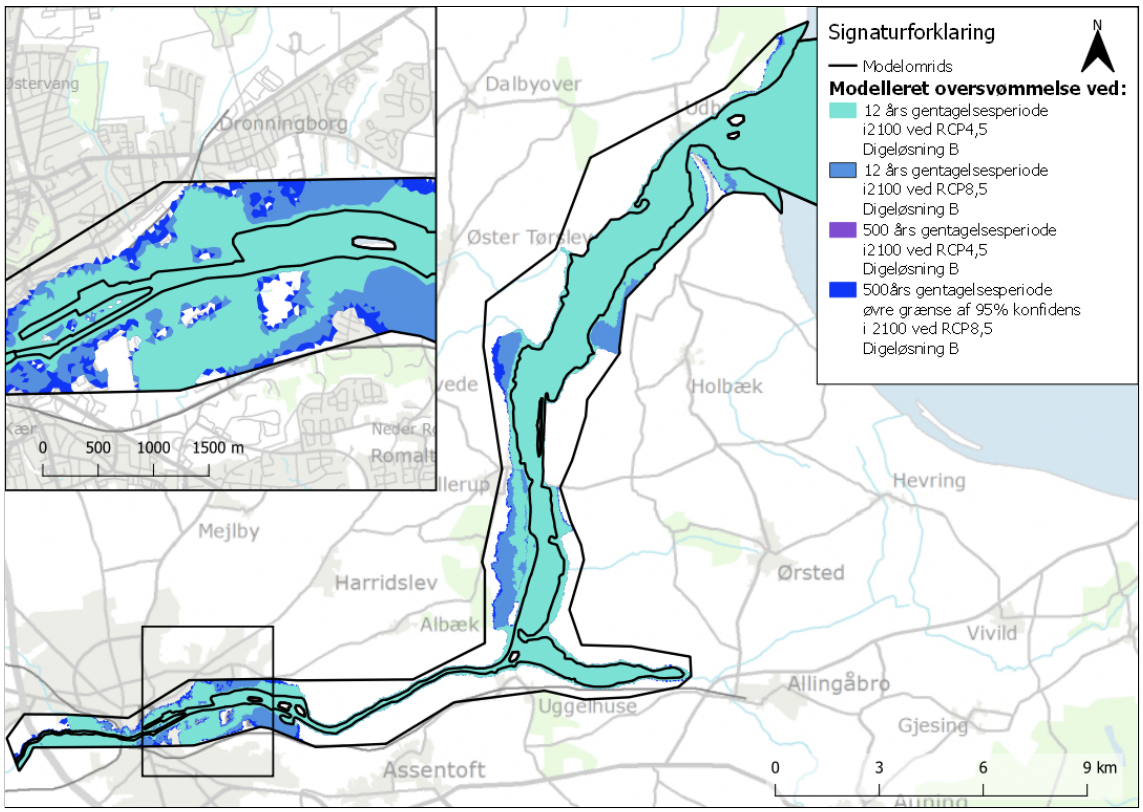
Tre forskellige løsninger med diger ved Randers Fjord er forsøgt implementeret i modellen: Digeløsning A, B og C. Ved løsning A er 7 diger forsøgt implementeret, ved løsning B er 5 nye diger forsøgt implementeret sammen med de 7 diger fra løsning A og ved løsning C er 2 nye diger ved Randers Haven forsøgt implementeret. Fælles for de tre løsninger er, at højden på de eksisterede diger forøges til 2,5 m og højden på de nye diger fastsættes 2,5 m. Placeringen af digerne er angivet på figur 10.1, og de modellerede oversvømmelser ved de tre forskellige digeløsniger fremgår af figur 10.2, 10.3 og 10.4.



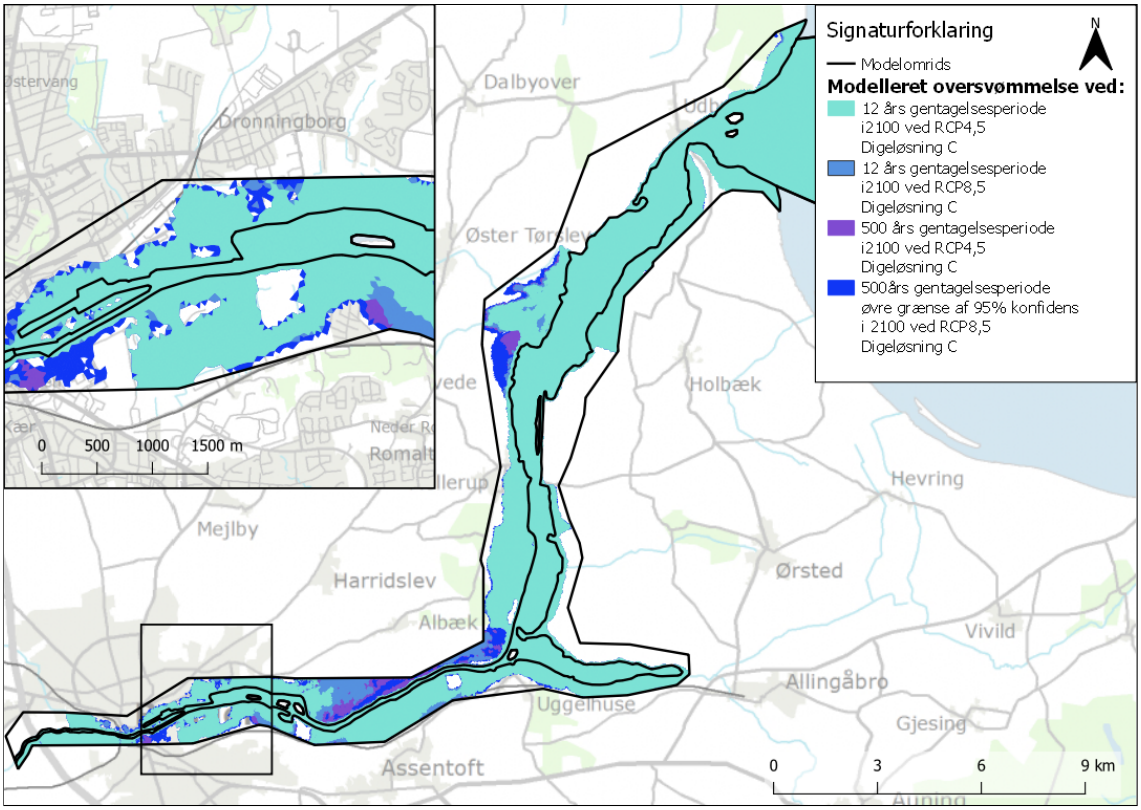
Figur 10.1. *Placering af digerne, der implementeres ved de tre digeløsninger.*



Figur 10.2. *Oversvømmelser modelleret ved de 4 undersøgte scenarier når digeløsning A implementeres ved Randers Fjord.*



Figur 10.3. *Oversvømmelser modelleret ved de 4 undersøgte scenarier når digeløsning B implementeres ved Randers Fjord.*



Figur 10.4. *Oversvømmelser modelleret ved de 4 undersøgte scenarier når digeløsning C implementeres ved Randers Fjord.*

Det fremgår af figur 10.2, at oversvømmelserne ved Randers Fjord ikke reduceres af betydning ved implementeringen af løsning A, mens det tydeligt fremgår af figur 10.3, at der ved denne løsning sker en reduktion i oversvømmelserne. Ved implementering af diger ved løsning A og B, ses ingen betydelig reduktion i oversvømmelserne ved Randers Havn og by, hvorfor det er valgt, at undersøge om løsning C kan reducere oversvømmelserne ved Randers Havn. Dette på bekostning af, at oversvømmelser i andre områder accepteres, da det er vurderet at oversvømmelserne ved Randers Havn og by kan have større konsekvenser end de øvrige kystarealer ved Randers Fjord. Oversvømmelserne ved Randers Havn og by reduceres dog kun i begrænset omfang ved implementering af løsning C, som det fremgår af figur 10.4.

Minimum arealet af oversvømmelserne ved Randers Fjord og reducering af oversvømmelserne efter etableringen af dige løsningerne A, B og C fremgår af tabel 10.1.

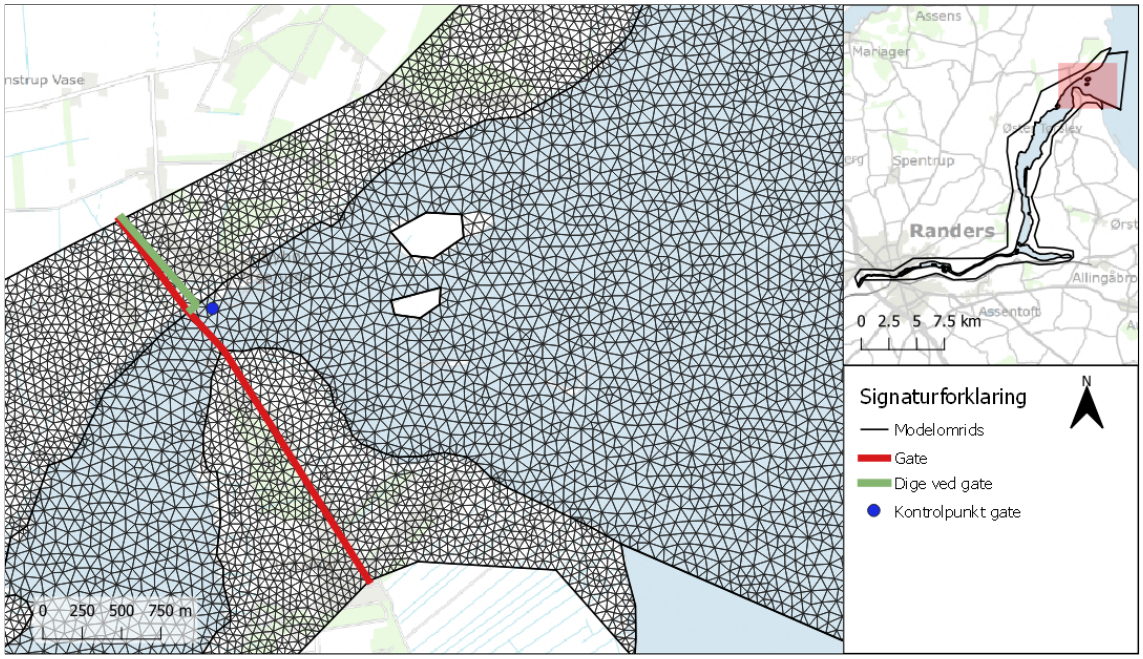
Tabel 10.1. *Minimum arealet af oversvømmelserne ved implementering af digeløsningerne ved Randers Fjord, samt den procentvise reduktion i minimum oversvømmelserne disse medfører.*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]			Reducering [%]		
	A	B	C	A	B	C
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	19,46	13.68	25,94	51	66	35
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP8,5	23,99	18,98	28,18	45	56	35
500 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	25,78	17,77	28,93	44	61	37
500 års gentagelsesperiode øvre grænse 95% 2100 RCP8,5	31,33	20,58	32,58	36	57	33

Ved sammenligning af oversvømmelserne ved de forskellige løsninger ses det, at løsning B reducerer oversvømmelserne ved Randers Fjord med 57-66% og dermed er den bedste af de tre digeløsninger. Ved denne løsning skal etableres 12 nye diger ved fjorden, og de 24 eksisterende diger skal forhøjes, således de har en minimum højde på 2,5 m. Det betyder at adgangen og udsynet til Randers Fjord vil reduceres betydeligt, samt at der skal udføres konstruktionsarbejde omkring det meste af fjorden. Derudover forhindre løsning B ikke oversvømmelserne ved Randers Havn og by, hvorfor løsningen for Randers Havn og by ikke er optimal. Det kan undersøges hvorvidt løsning B og C kan kombineres, som en løsning på problemet. Ved en sådan løsning vil der dog skulle etableres endnu flere diger langs fjordkysterne.

10.1.2 L2 Randers Fjord - Sluse eller stormflodsbarriere

Ved denne løsningsstrategi er en barriere indsat på tværs af Randers Fjord ved Udbyhøj. Barrieren er defineret i hele vandsøjlen og indsat på tværs af hele modellen for at sikre, at der ikke kan strømme vand rundt om barrieren, når den er lukket. Placeringen af barrieren, der i modellen er defineret som en gate, fremgår af figur 10.5.



Figur 10.5. *Placering af gate, dige ved gate og kontrolpunkt i Randers Fjord.*

To forskellige styringsmuligheder for gaten er forsøgt anvendt. Ved den ene styringsmulighed anvendes et kontrolpunkt, hvis placering fremgår af figur 10.5. I kontrolpunktet registreres vandstanden på ydersiden af barrieren. Når vandstanden i punktet når et givet niveau, lukkes gaten indtil vandstanden igen når under et givet niveau, hvorefter gaten åbnes. Ved den anden styringsmulighed anvendes en kontrolserie til at styre gaten, hvori det angives ved hvilke tidsskridt gaten skal være lukket og åben.

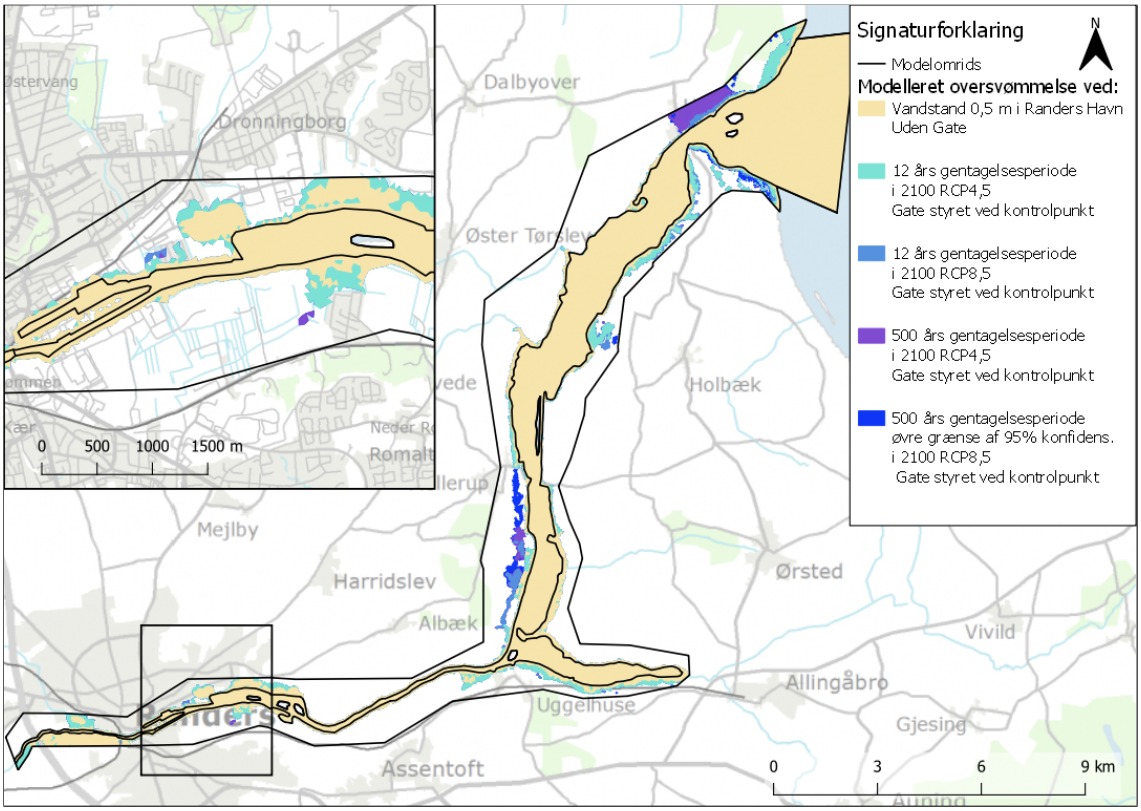
Resultat ved implementering af gate styret med kontrolpunkt

Det er undersøgt, om oversvømmelserne ved Randers Fjord kan forhindres eller reduceres ved implementering af en gate ved Udbyhøj, der er styret ud fra vandstanden i et kontrolpunkt. Kriteriet for gaten er opsat således, at gaten vil lukke når vandstanden i kontrolpunktet når 1 m og åbne igen når vandstanden i kontrolpunktet når 0,95 m. 2 minutter er fastsat, fra vandstanden er registreret, til gaten er helt lukket eller åben.

Kriteriet for vandstanden ved lukke/åbne i kontrolpunktet er opstillet ved at analyserer, til hvilke vandstande der forekommer oversvømmelser i Randers Fjord. Lukke/åbne ved flere forskellige kontrolpunkter er forsøgt, og det er vurderet at lukke ved 1 m og åbne ved 0,95 m er den bedste løsning. Ved at lukke ved en lavere vandstand kan flere oversvømmelser forhindres, men omvendt bidrager Gudenåen med vand til Randers Fjord, hvorfor en lukning af barrieren i lange perioder ligeledes kan medføre oversvømmelser.

I forbindelse med modelleringen af oversvømmelserne blev det observeret, at vandet ved Randers Fjords udmunding vil oversvømme kysten, da elevationen af terrænet her er lav. Ved scenarier hvor gaten er åben, kan vandet herfra strømme rundt om gaten og oversvømme kysten bagved denne, hvorfor et dige med en højde på 2,5 m er indsat ved barrieren nord for fjorden.

På figur 10.6 fremgår de maksimalt modellerede oversvømmelser ved forskellige scenarier når en barriere, der lukkes ved en vandstand i kontrolpunktet på 1 m og åbnes igen ved en vandstand på 0,95 m, implementeres ved Udbyhøj.



Figur 10.6. *Oversvømmelse ved Randers Fjord ved forskellige modelleringsscenarier med en barriere der er lukket ved en vandstand på 1 m i kontrolpunktet.*

Det ses af figur 10.6, at der ved implementering af en barriere styret ved vandstanden i kontrolpunktet, fortsat vil være nogle områder ved Randers Fjord der oversvømmes, dog reduceres udbredelsen af oversvømmelserne kraftigt i forhold til de modellerede oversvømmelser, som ses i afsnit 8. Ydermere ses det, at flere områder ved Randers Fjord oversvømmes ved en vandstand på 0.5 m, da elevationen af terrænet flere steder er lav. Arealet og reduceringen af oversvømmelserne er angivet i tabel 10.2.

Tabel 10.2. *Arealet og reduceringen af oversvømmelserne ved implementeringen af en barriere, der lukkes ved en vandstand i kontrolpunktet på 1 m.*

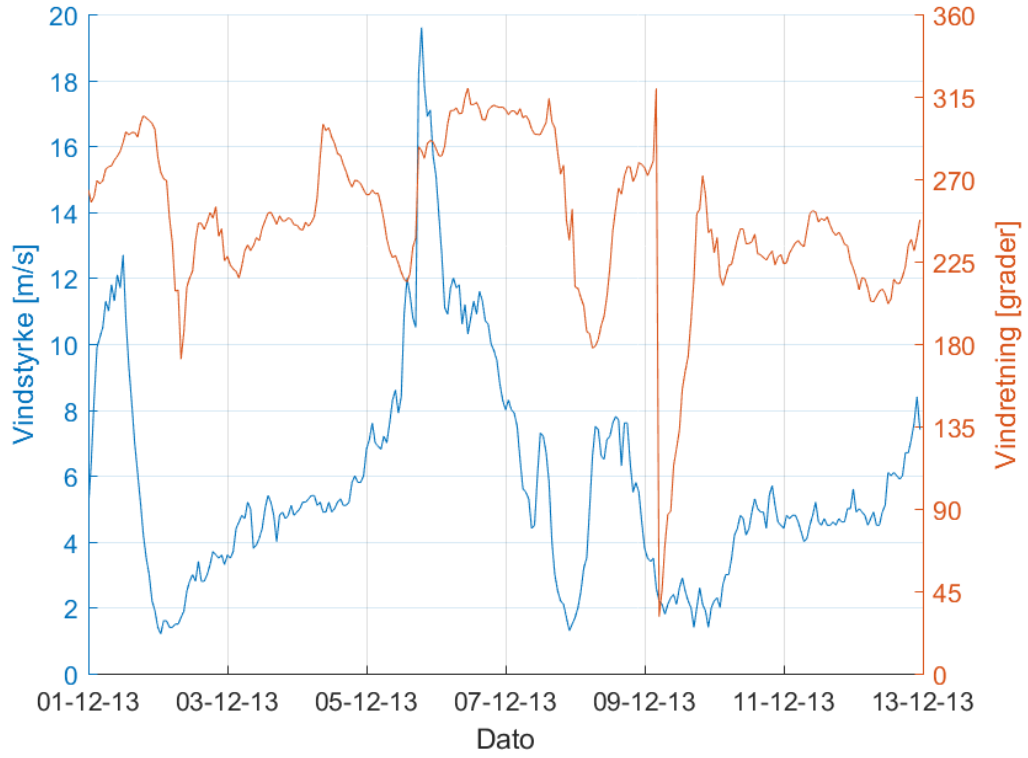
Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]	Reducering [%]
Før gate lukker		
Vandstand 0,5 m i Randers Havn	6,15	-
Med gate styret ved kontrolpunkt		
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	10,16	75
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP8,5	10,91	75
500 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	10,82	77
500 års gentagelsesperiode øvre grænse 95% 2100 RCP8,5	12,43	75

De modellerede minimum oversvømmelser ved Randers Fjord reduceres, som det fremgår af tabel 10.2, med 75-77% ved implementeringen af en barriere styret ved vandstanden i kontrolpunktet. Ydermere ses det, at omkring 6,15 km^2 oversvømmes ved en vandstand på 0,5 m i Randers Havn, hvorfor det er vanskeligt at forhindre oversvømmelserne ved fjorden fuldstændigt. Det vil kræve at barrieren holdes lukket store dele af tiden, da de estimerede middelvandstande i år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 er henholdvis 0,31 m og 0,48 m.

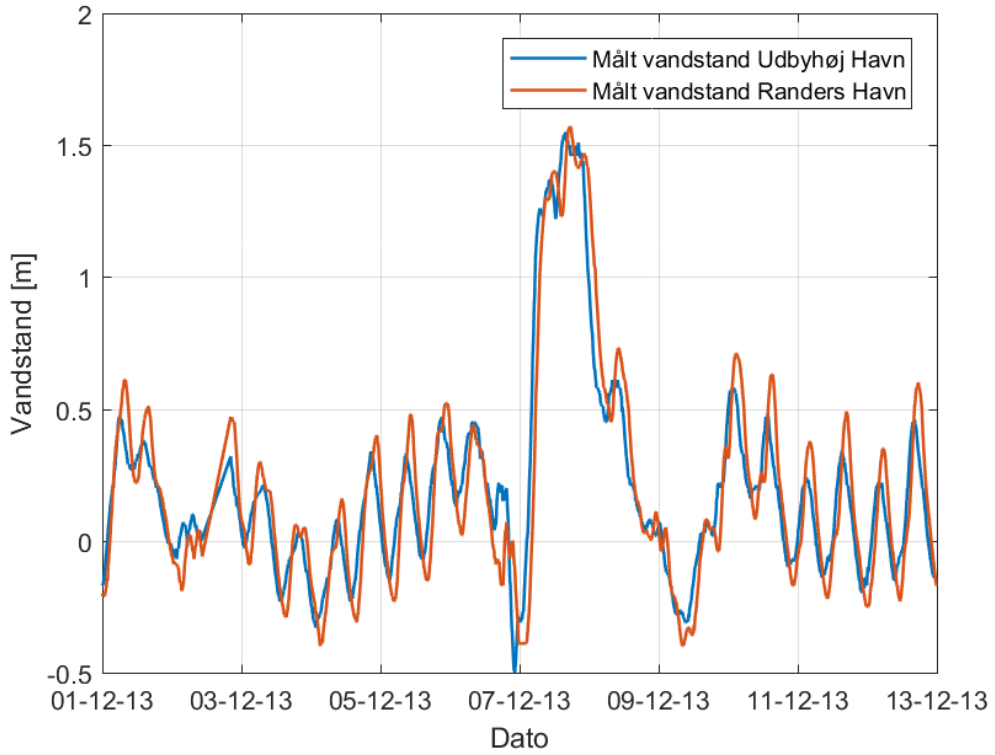
Resultat ved implementering af gate styret med kontrolserie

Foruden registrerede vandstande i et kontrolpunkt, kan barrieren lukkes eller åbnes i forhold til vejrvarslinger. Dette kan i modellen gøres ved, at opstille en tidsserie der kontrollerer hvornår gaten skal være åben eller lukket. Kontrolserien er opstillet ved at analyserer vindstyrke- og vindretning målt i Randers Havn og vandstande målt i Randers Havn og Udbyhøj Havn i perioden 01-12-2013 til 13-12-2013. Derudover er vindstuvning og vandtilførslen fra Gudenåen ligeledes taget med i betragtning.

Vindstyrke og vindretning målt ved Randers Havn og vandstandene målt i Udbyhøj Havn og Randers Havn i perioden 01-12-13 til 13-12-13 fremgår af henholdsvis figur 10.7 og figur 10.8.



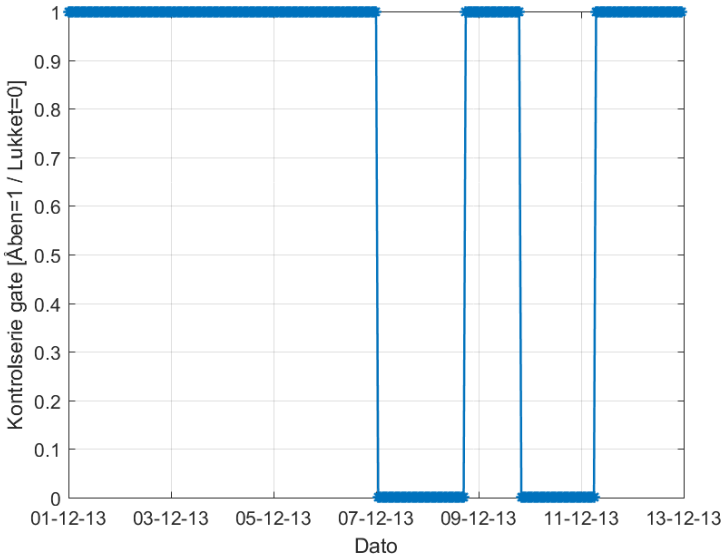
Figur 10.7. *Styrke og retning af vinden som er målt i Randers Havn i perioden 01-12-13 til 13-12-13.*



Figur 10.8. *Målte vandstande i Udbyhøj Havn og Randers Havn i perioden 01-12-13 til 13-12-13.*

Det fremgår af figur 10.7, at vinden primært er fra vestlig retning. I perioderne med vind fra østlig eller sydlig retning ses en lav vindstyrke på omkring 2 m/s. Den 06-12-2013 hvor 'Bodil' indtræffer, ses et tydelig peak i vindstyrken. De målte vandstande i Randers Havn og ved Udbyhøj Havn er generelt lig hinanden, som det fremgår af figur 10.8, men udsvingene på vandstandene er i Randers Havn større, og målingerne er en smule forskudt i tid. Derudover fremgår det, at der er et tydelig peak i de målte vandstande den 08-12-2013 som følge af 'Bodil'.

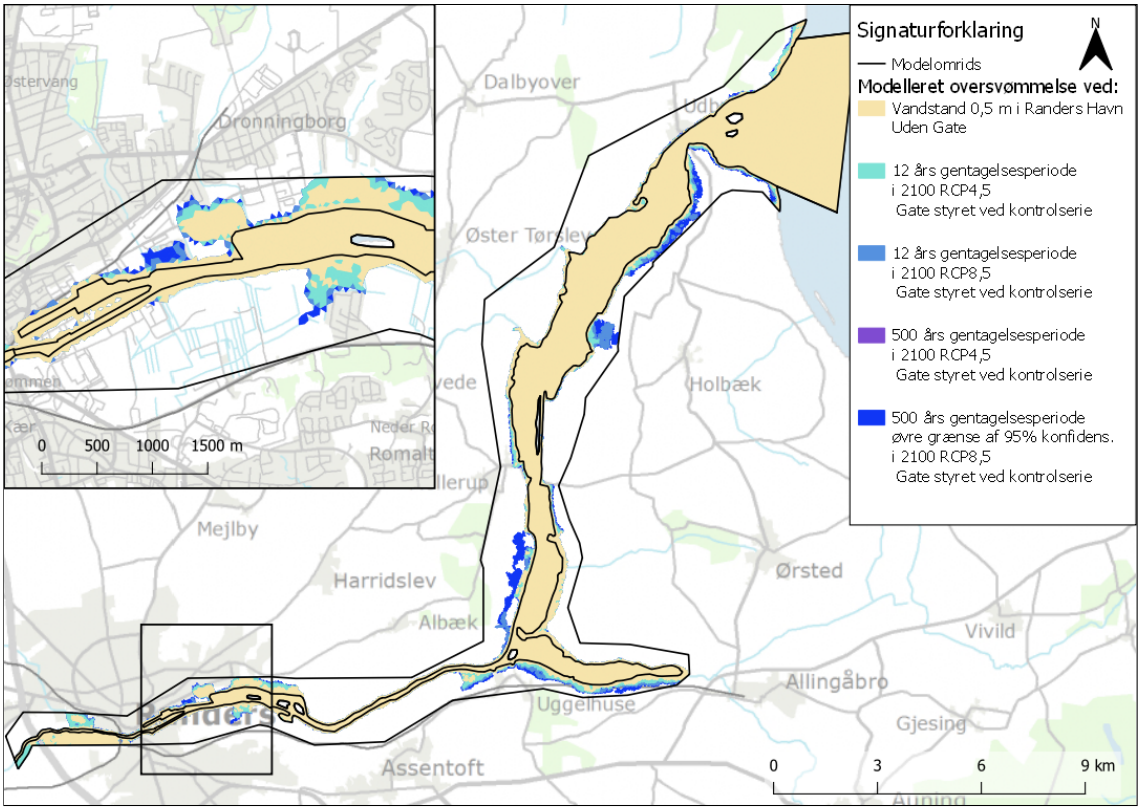
På baggrund af den målte vind og vandstandene, er forskellige kontrolserier opstillet og afprøvet i modellen. Ved anvendelse af kontrolserien, som fremgår af figur 10.9, til styrring af barrieren ved Udbyhøj, ses færrest oversvømmelser af terrænet omkring fjorden. Barrieren er åben i forbindelse med stormen den 06-12-2013, da det viste sig, at vandet ellers vil stuve op på indersiden af barrieren på grund af den kraftige vestenvind. Det er forsøgt, at lukke barrieren i hele perioden fra den 07-12-2013 til 11-12-2013, men det viste sig, at der ville opstå oversvømmelser i fjorden, grundet for meget vand på indersiden af barrieren. Derfor er barrieren åben den 09-12-2013, hvor vindretningen er fra øst og vindstyrken er lav, og derefter lukket igen den 10-12-2013 for at forhindre oversvømmelser, som ellers ville opstå her.



Figur 10.9. *Kontrolserie som er benyttet til at styre gaten i Randers Fjord. Ved værdien 1 er gaten åben, og ved værdien 0 er gaten lukket.*

I virkeligheden vil gaten ikke være styret af en forudbestemt tidsserie, men i stedet på baggrund vejr varsling. Ud fra denne opstillede kontrolserie kan en varsling til lukning af barrieren være: At den skal lukke umiddelbart efter en varslet storm, samt efter en periode med østenvind, hvor der varsles om ændring i vindretningen og styrken.

De modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord ved forskellige modelleringsscenarier, hvor gaten er styret ved den præsenterede kontrolserie, fremgår af figur 10.10.



Figur 10.10. *Oversvømmelse ved Randers Fjord ved forskellige modelleringsscenarier ved implementering af barrieren, der er styret af den opstillede kontrolserie.*

Det fremgår af figur 10.10, at nogle områder ved Randers Fjord fortsat oversvømmes, ligesom det var tilfældet med barrieren styret ved kontrolpunktet. Udbredelsen af oversvømmelserne reduceres dog kraftigt i forhold til de modellerede oversvømmelser uden barrieren. Ydermere ses det, at flere områder ved Randers Fjord oversvømmes ved en vandstand på 0.5 m, da elevationen af terrænet flere steder er lav. Disse oversvømmelser kan sandsynligvis forhindres, såfremt barrieren er lukket selv ved lave vandstande ved kysten ud for Randers Fjord, og der etableres en sluse, således vand svarende til bidraget fra Gudenåen kan ledes ud af fjorden. En løsning som denne vil dog have indflydelse på miljøet i fjorden, hvorfor det ikke nødvendigvis er en optimal løsning.

Arealet af de modellerede oversvømmelser ved implementeringen af barrieren styret med kontrolserien og reduceringen af oversvømmelserne er angivet i tabel 10.3.

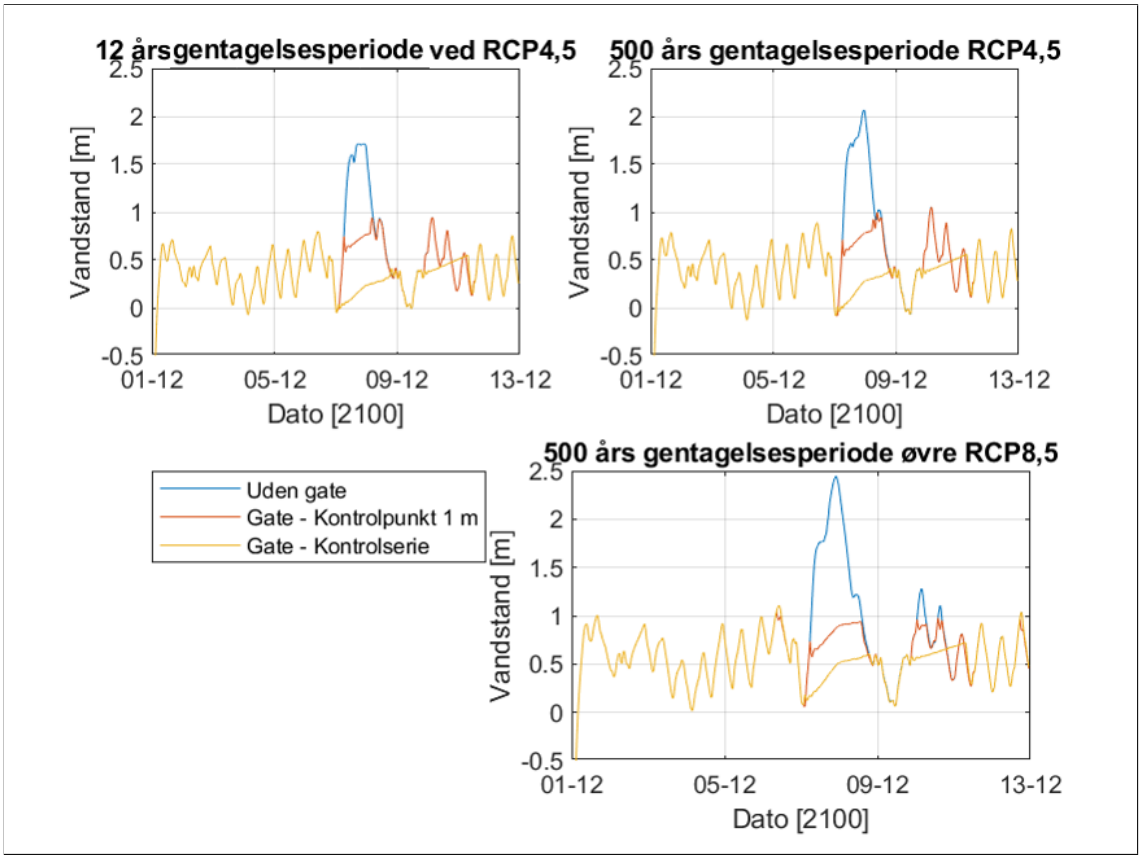
Tabel 10.3. *Minimum arealet og reduceringen af de modellerede oversvømmelser omkring Randers Fjord ved implementering af gaten styret ved kontrolserien.*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]	Reducering [%]
Før gate lukker		
Vandstand 0,5 m i Randers Havn	6,15	-
Med gate styret ved kontrolserie		
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	8,50	79
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP8,5	9,77	78
500 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	9,22	80
500 års gentagelsesperiode øvre grænse 95% 2100 RCP8,5	11,76	76

Minimum oversvømmelserne ved Randers Fjord reduceres, som det fremgår af tabel 10.3, med 76-80% i forhold til oversvømmelserne inden gaten implementeres.

Sammenligning af barriere styret med de to forskellige styringsmuligheder

De modellerede vandstande i Randers Havn ved implementering af en gate styrret ved kontrolpunkt og en gate styret ved en kontrolserie fremgår af figur 10.11.



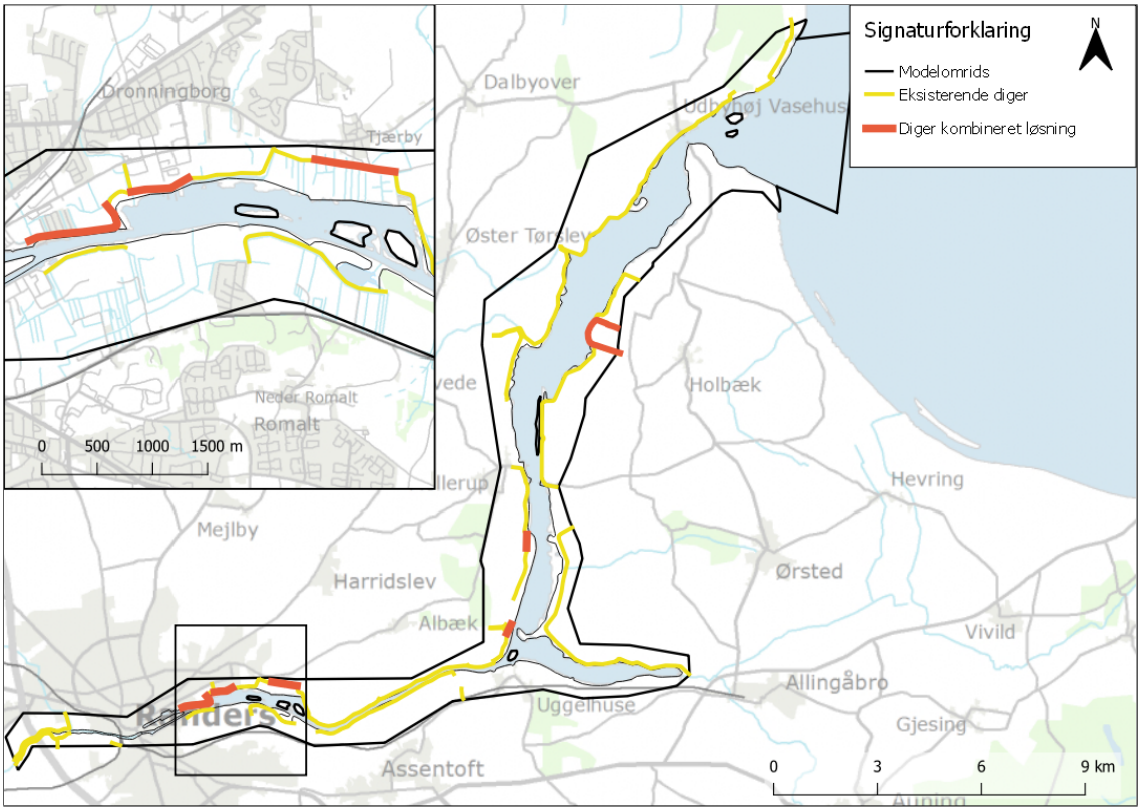
Figur 10.11. *Modelleret vandstand i Randers Havn ved en 12 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5, 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 samt ved en 500 års gentagelsesperiode når den øvre grænse af 95% konfidensintervallet følges fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5 uden og med barrieren styrret ved kontrolpunkt og kontrolserie.*

Ved sammenligning af de modellerede vandstande i Randers Havn med de to forskellige styringer af barrieren, fremgår det at vandstanden ved barrieren styret ved kontrolserien er lavere end barrieren styrret ved vandstanden i kontrolpunktet. Det skyldes at gaten styret ved vandstanden i kontrolpunktet lukker senere og ved en højere vandstand end gaten styret ved kontrolserien. De maksimale modellerede oversvømmelser ved gaten, der er styret af kontrol punktet opstår den 10-12-2100, mens de maksimale oversvømmelser ved gaten, der lukker på baggrund af tidsserien opstår den 06-12-2100. Ydermere fremgår det, at vandstanden modelleret i Randers Havn, langsomt stiger når barrieren er lukket. Det skyldes at Gudenåen gennemsnitlig bidrager med 11 cm vand/dag i vinterhalvåret til Randers Fjord. I forbindelse med etableringen af en barriere skal der tages hensyn til dette, således der ikke vil opstå oversvømmeler på grund af for store vandmængder på indersiden af barrieren.

De modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord reduceres med 75-77% ved implementeringen af en barriere styret ved et kontrolpunkt og med 76-80% ved etableringen af en barriere styret af en tidsserie. Barrieren styret ved kontrolserien er derfor den bedste af de 2 barriereløsninger, da denne reducere oversvømmelserne mest.

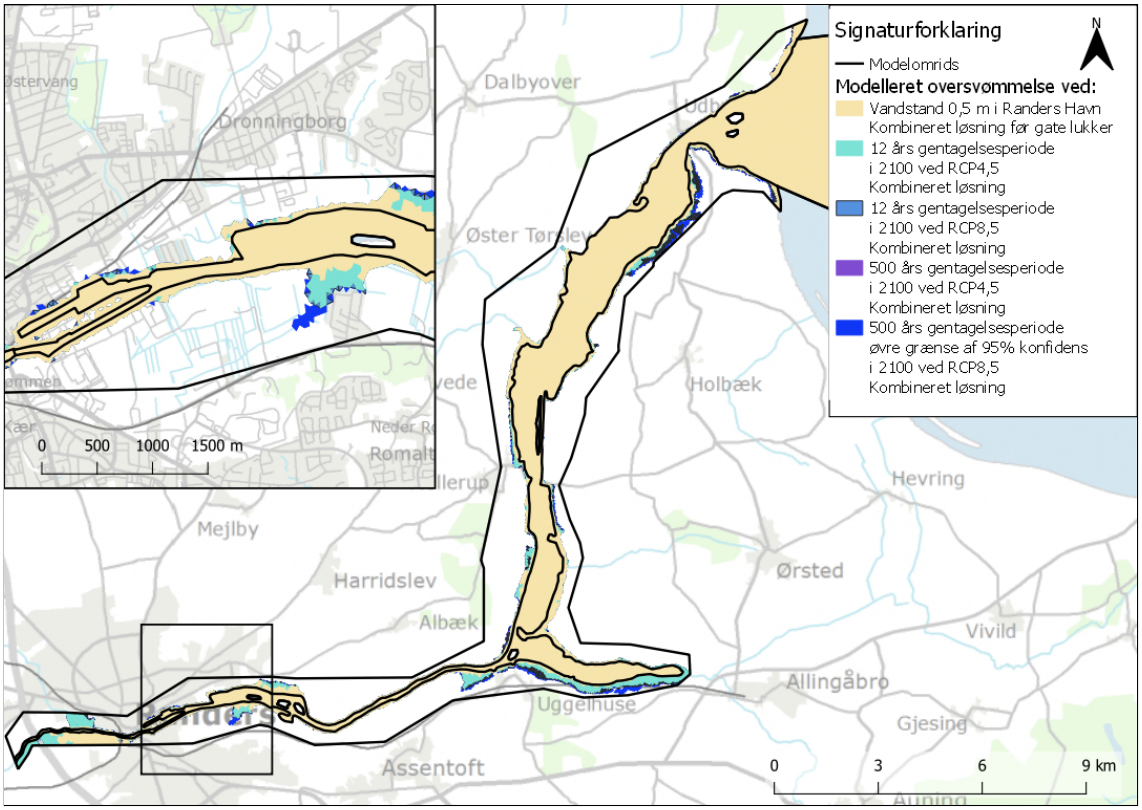
10.1.3 L3 Randers Fjord - Kombinering

Af løsningsstrategi L2 Randers Fjord fremkom det, at oversvømmelserne ved Randers Fjord ved implementeringen af stormflodsbarrierer reduceres betydeligt men ikke forhindres fuldstændigt. Det er derfor undersøgt, hvorvidt en sluse eller stormflodsbarriere kombineret med diger kan forhindre oversvømmelserne ved fjorden. Ved den kombinerede løsning er 6 diger med en højde på 1,5 m, hvis placering er angivet på figur 10.12, forsøgt implementeret ved Randers Fjord sammen med barrieren ved Udbyhøj, der er styrret med den opstillede kontrolserie.



Figur 10.12. *Placering af de eksisterende og ny diger der er implementeret ved den kombinerede løsning med barriere ved Udbyhøj og diger omkring Randers Fjord.*

Det fremgår af figur 10.12 at flere af digerne er placeret i forlængelse af de allerede eksisterene diger, da der trods implementering af barrieren i Udbyhøj fortsat forekommer oversvømmelser i disse områder. De modelerede oversvømmelser ved de fire modellerede stormscenarier er vist på figur 10.13 og størrelsen på minimum oversvømmelserne samt reduceringen denne løsningsstrategi medfører ses i tabel 10.4.



Figur 10.13. *Modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord ved implementering af den kombinerede løsning med barriere ved Udbyhøj og diger 6 øvrige steder ved fjorden.*

Tabel 10.4. *Minimum arealet af oversvømmelserne ved implementering af den kombinerede løsning ved Randers Fjord, samt den procentvise reduktion i minimum oversvømmelserne disse medfører.*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]	Reducering [%]
Før gate lukker		
Vandstand 0,5 m i Randers Havn	5,78	-
Kombineret løsning - gate styret ved kontrolserie		
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	8,14	80
12 års gentagelsesperiode 2100 RCP8,5	9,50	78
500 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	8,83	81
500 års gentagelsesperiode øvre grænse 95% 2100 RCP8,5	10,35	78

Det fremgår af figur 10.13 og tabel 10.4, at oversvømmelserne ved Randers Fjord fortsat ikke forhindres fuldstændigt ved nogen af scenerierne, men de reduceres med 78-81%, hvilket i forhold til udgangspunktet er en stor reduktion.

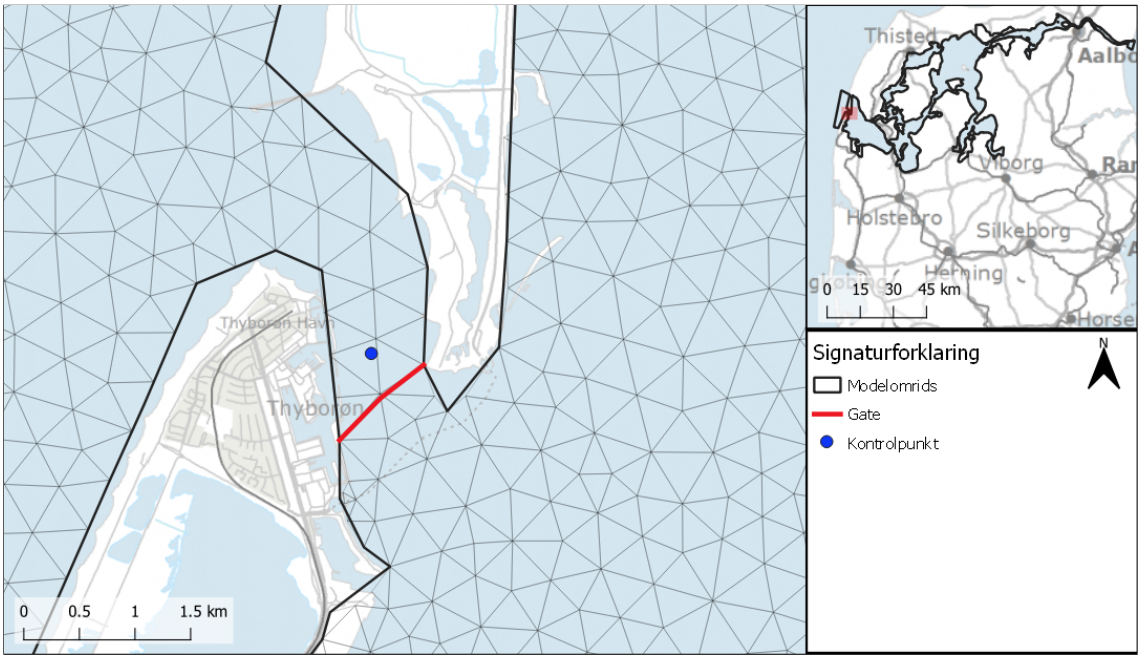
10.2 Limfjorden

Oversvømmelserne af kysterne i den vestlige del af Limfjorden ved Lemvig, Skive og Løgstør ved implementering af de 2 løsningsstrategier L1 Limfjorden og L2 Limfjorden er undersøgt ved de følgende fire scenarier.

- 2 års gentagelsesperiode i Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.
- 2 års gentagelsesperiode i Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.
- 500 års gentagelsesperiode i Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.
- 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet i Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.

10.2.1 L1 Limfjorden - Sluse eller stormflodsbarriere

Ved denne løsning er en barriere indsat på tværs af Thyborøn Kanal. Barrieren der defineret i hele vandsøjlen og dens placering fremgår af figur 10.14.



Figur 10.14. *Placering af gate og kontrolpunkt i Thyborøn Kanal.*

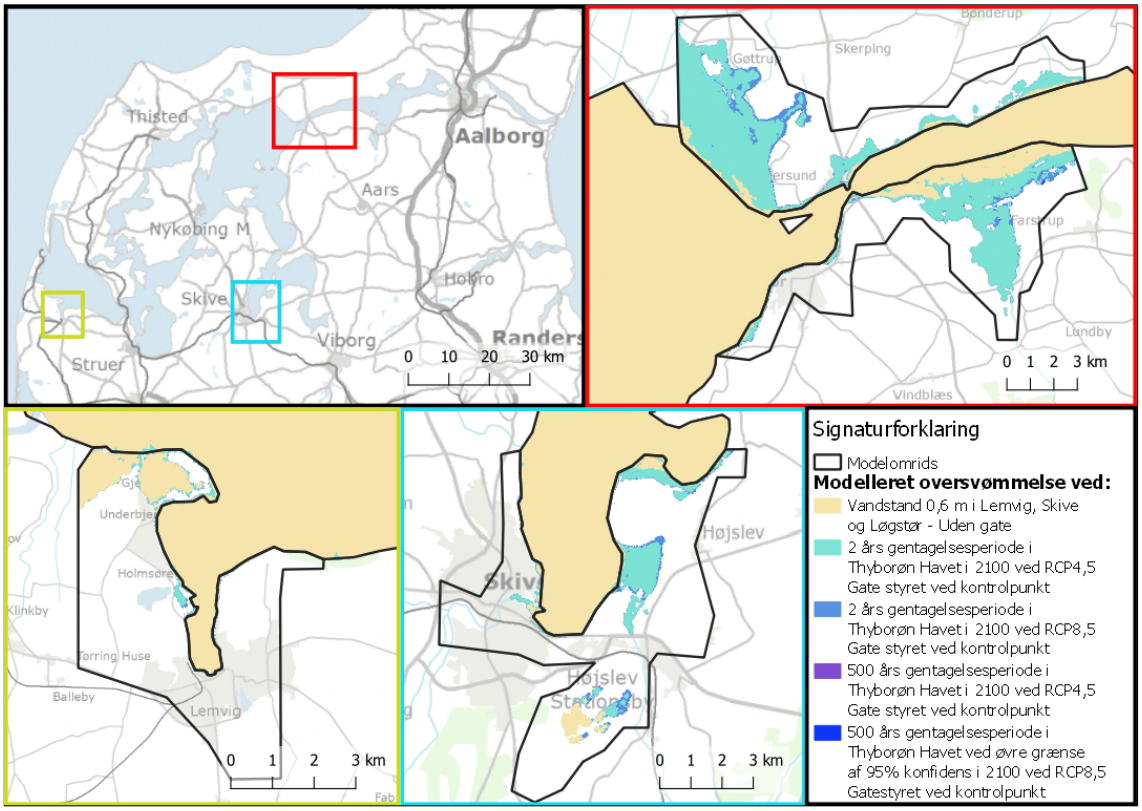
Ligesom det var tilfældet med Randers Fjord er gaten styret ud fra vandstanden i et kontrolpunkt og med en kontrolserie. Kontrolpunktets placering er angivet på figur 10.14.

Resultat ved implementering af gate styret med kontrolpunkt

Det er undersøgt, om oversvømmelser i den vestlige del af Limfjorden kan forhindres eller reduceres ved implementeringen af en barriere i Thyborøn Kanal, der lukkes når vandstanden i kontrolpunktet er 1,1 m og åbnes igen når vandstanden er 1,0 m. 2 minutter er fastsat, som den tid det tager gaten i modellen at åbne eller lukke.

De maksimalt modellerede oversvømmelser ved de fire stormscenarier når gaten lukker ved 1.1 m vandstand registreret i kontrolpunktet fremgår af figur 10.15.

Vandstanden på 1,1 m er fundet på baggrund af analyser af vandstandene der er påsat randen og modelleret i Lemvig, Skive og Løgstør, samt på baggrund af modelkørsler med forskellige kriterier for den registrerede vandstand i kontrolpunktet.



Figur 10.15. *Oversvømmelse ved Limfjorden ved de forskellige modelleringsscenarier med en barriere der lukker ved vandstand på 1.1 m i kontrolpunktet.*

På figur 10.15 ses det, at der fortsat er oversvømmede områder ved Limfjorden efter implementeringen af barrieren i Thyborøn Kanal styrret ved den registrerede vandstand i kontrolpunktet. Ved sammenligning af figur 10.15 med de modellerede oversvømmelser inden implementering af løsningen er det dog tydeligt, at der sker en reducering i oversvømmelserne. Minimum arealet af oversvømmelserne ved Lemvig, Skive og Løgstør er angivet i tabel 10.5 sammen med den procentvise reducering af oversvømmede areal efter implementeringen af barrieren styret ved vandstanden i kontrolpunktet.

Tabel 10.5. *Arealet og reduceringen af oversvømmelserne ved implementeringen af en barriere, der lukkes ved en vandstand i kontrolpunktet på 1.1 m.*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]	Reducering [%]
Før gate lukker		
Vandstand 0,6 m i Lemvig, Skive og Løgstør	10,28	-
Med gate styret ved kontrolpunkt		
2 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	49,08	28
2 års gentagelsesperiode 2100 RCP8,5	47,77	34
500 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	49,09	35
500 års gentagelsesperiode øvre grænse 95% 2100 RCP8,5	46,11	41

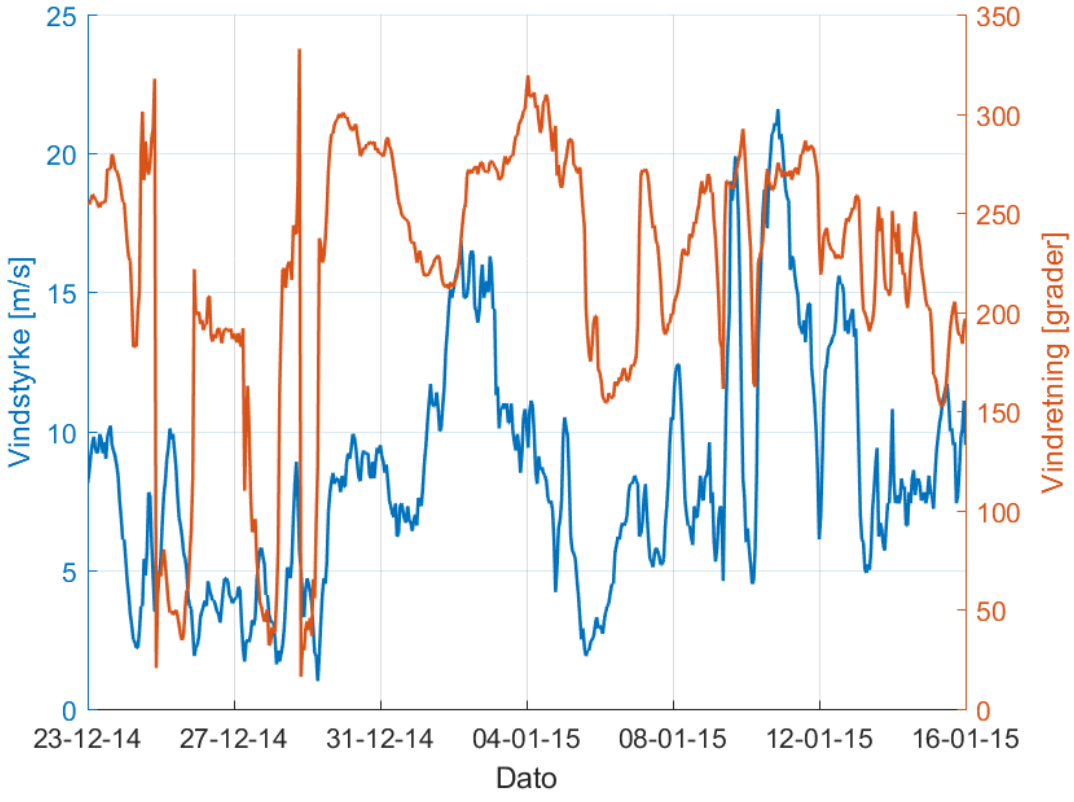
De modellerede minimum oversvømmelser ved Limfjorden reduceres med 28-35%, som det fremgår af tabel 10.5, ved implementeringen af en barriere i Thyborøn kanal, der er styret ved et kontrolpunkt.

Ydermere fremgår det, at omkring 10 km^2 at terrænnet oversvømmes ved vandstand på 0,6 m i Lemvig, Skive og Løgstør. Disse oversvømmelser er vanskelige at forhindre ved implementeringen af en barriere medmindre denne i år 2100 skal være lukket størstedelen af tiden, da middelvandstande i sundet i år 2071-2100 ved RCP4,5 er estimeret til 28-31 cm og ved RCP8,5 er estimeret til er 49-52 cm [Danmarks Meteorologiske Institut, 2019b].

Resultat ved implementering af gate styret med tidsserie

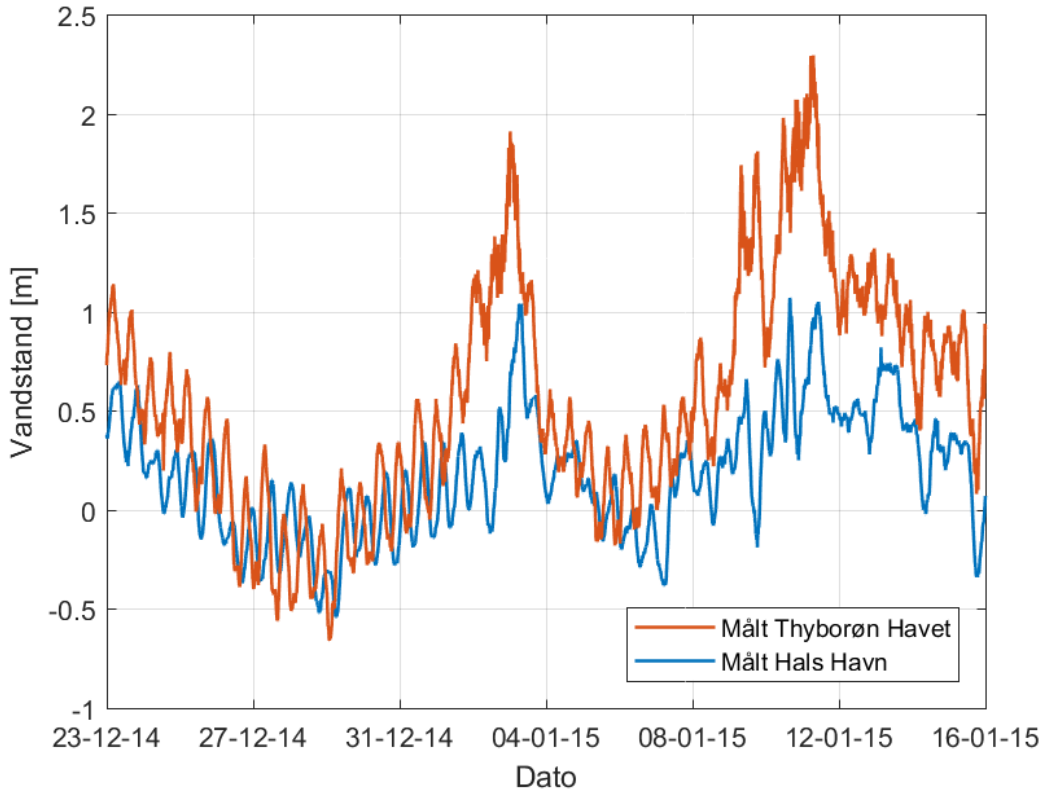
En tidsserie for hvornår barrieren ved Thyborøn Kanal skal lukke og åbne er opstillet. I forbindelse med opstilling af denne tidsserie er vandstanden, vindstyrken, vindretningen og vindstuvning taget med i betragtning.

Vindstyrke og vindretning målt ved Thisted i perioden 23-12-14 til 16-01-15 fremgår af figur 10.16 og vandstanden målt i Thyborøn Havet og Hals Havn for samme periode fremgår af figur 10.17.



Figur 10.16. *Styrke og retning af vinden som er målt i Thisted i perioden 23-12-14 til 16-01-15.*

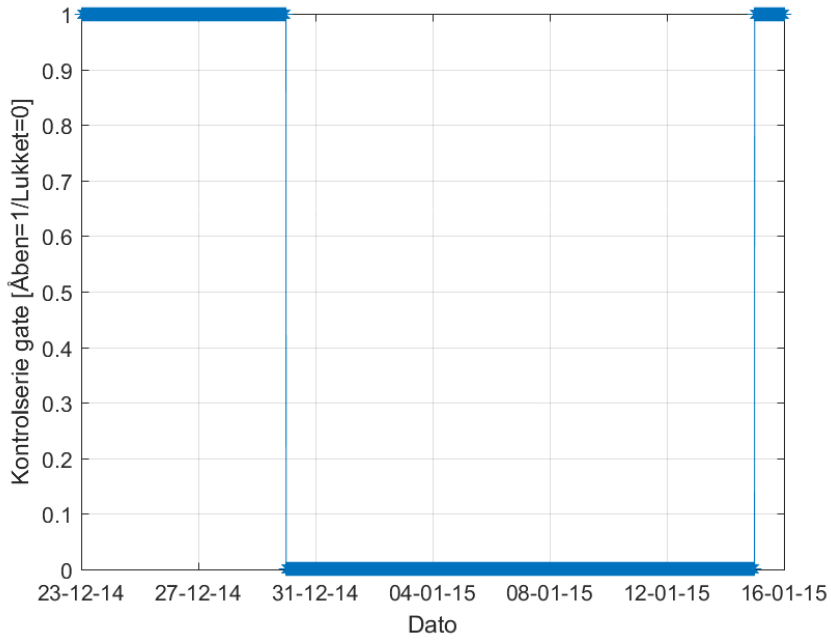
Vindstyrken ved Thisted når i forbindelse med hændelsen den 11-01-2015 op på 21 m/s. Derudover ses det, at vindenstyrken den 03-01-2015 i en periode er omkring 17 m/s. Vindretningen i den afbildede periode er varierende. Primært er vindstyrken høj ved vind fra vestlig og nordlig retning, mens vindstyrken er lavere ved vind fra nordøstlig og østlig retning.



Figur 10.17. *Målte vandstande i Thyborøn Havet og Hals Havn i perioden 23-12-14 til 16-01-15.*

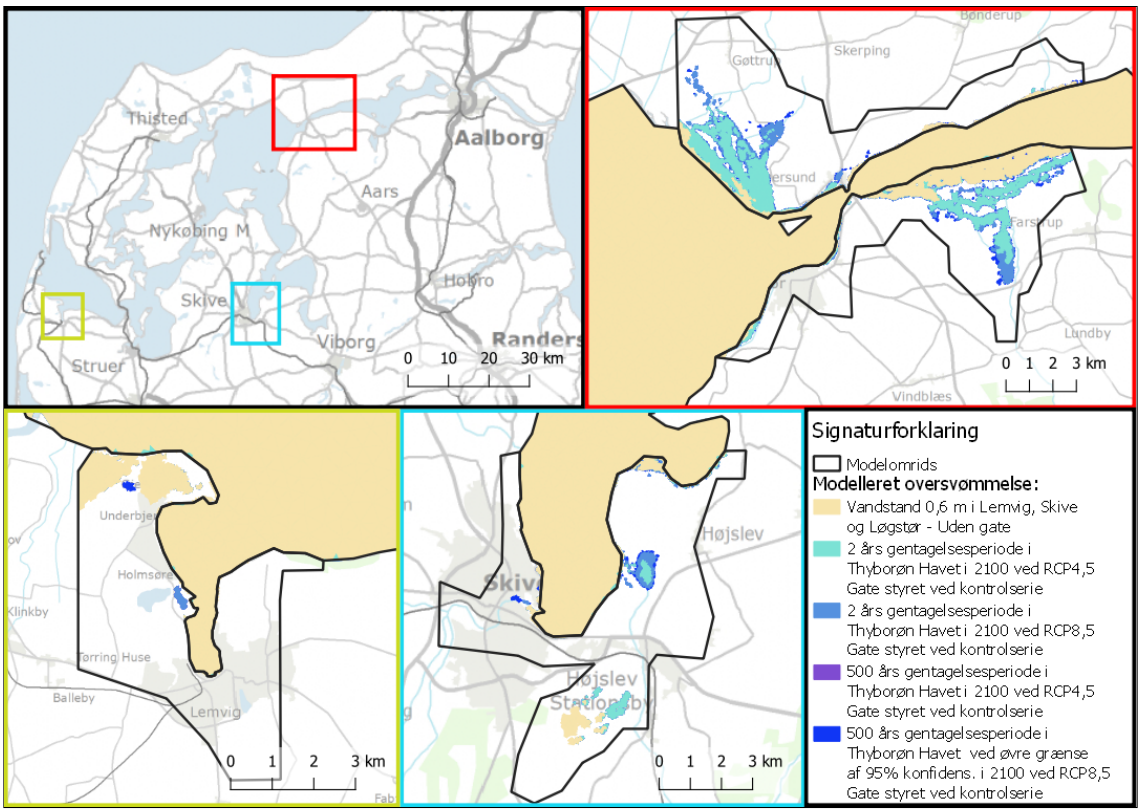
Af figur 10.17 fremgår det, at der er to peak i vandstandene. Et den 03-01-2015 og et den 11-01-2015. Det er derfor valgt at udvide modelleringsperioden i forbindelse med undersøgelse af løsningsstrategierne L1 limfjorden og L2 Limfjorden. Den nye modellerings periode er 23-12-14 til 16-01-15, så det sikres at begge peak i vandstanden er med i modelleringsperioden, og modellen kan indstille sig inden det første peak. I forbindelse med opstilling af kontrolserie, som fremgår af figur 10.18, er der kigget dels på vandstanden, vinden og vindstuvning i den vestlige del af Limfjorden. Ligesom med Randers Fjord modellen er det forsøgt med flere forskellige kontrolserier, og kontrolserien som fremgår af figur 10.18 gav bedste resultat. Det viste sig, at for at få mindst mulige oversvømmelser ved Løgstør er det nødvendigt, at gaten er lukket mere end 7 dage inden den 11-01-2015. På grund af den høje vandstand på randen den 03-01-2015 er det ligeledes nødvendigt at lukke gaten her. Det betyder at gaten ved kontrolserien, der passer bedst er lukket fra den 30-12-2014 00:00 til den 15-01-2015 00:00. På trods af dette har det ikke været muligt helt at undgå peak i vandstanden ved Løgstør i forbindelse med hændelsen den 11-01-2015, som det også fremgår af figur 10.20.

I virkeligheden må barrieren lukke på baggrund af vejrvarslinger. For barrieren i Thyborøn Kanal kunne en sådan varsling være: At gaten skal lukkes en uge før der varsles om en vindstyrke i Thyborøn Havet på mere end 20 m/s med vind fra vestlig retning, samt tre dage før der varsles om en vindstyrke højere end 15 m/s med vind fra vestlig retning og forhøjet vandstand.



Figur 10.18. *Kontrolserie som er benyttet til at styre gaten ved Thyborøn Kanal i Limfjorden.*

De modellerede oversvømmelser ved Lemvig, Skive og Løgstør ved de 4 forskellige modelleringsscenarier, hvor gaten er styret ved kontrolserien fremgår af figur 10.19.



Figur 10.19. *Oversvømmelse ved Limfjorden ved forskellige modelleringsscenarier ved implementering af en barriere i Thyborøn Kanal, der er styret ved en kontrolserien.*

Af figur 10.19 fremgår det, at der fortsat er områder ved Lemvig, Skive og Løgstør der er oversvømmede efter implementeringen af barrieren i Thyborøn Kanal styrret ved kontrolserien. Ved sammenligning med de modellerede oversvømmelser inden implementering af løsningen, er det dog tydeligt, at der sker en reducering i oversvømmelserne. Arealet af de modellerede oversvømmelser efter implementeringen af barrieren styret ved kontrolserien er angivet i tabel 10.6 sammen med den procentvise reducering i oversvømmelserne.

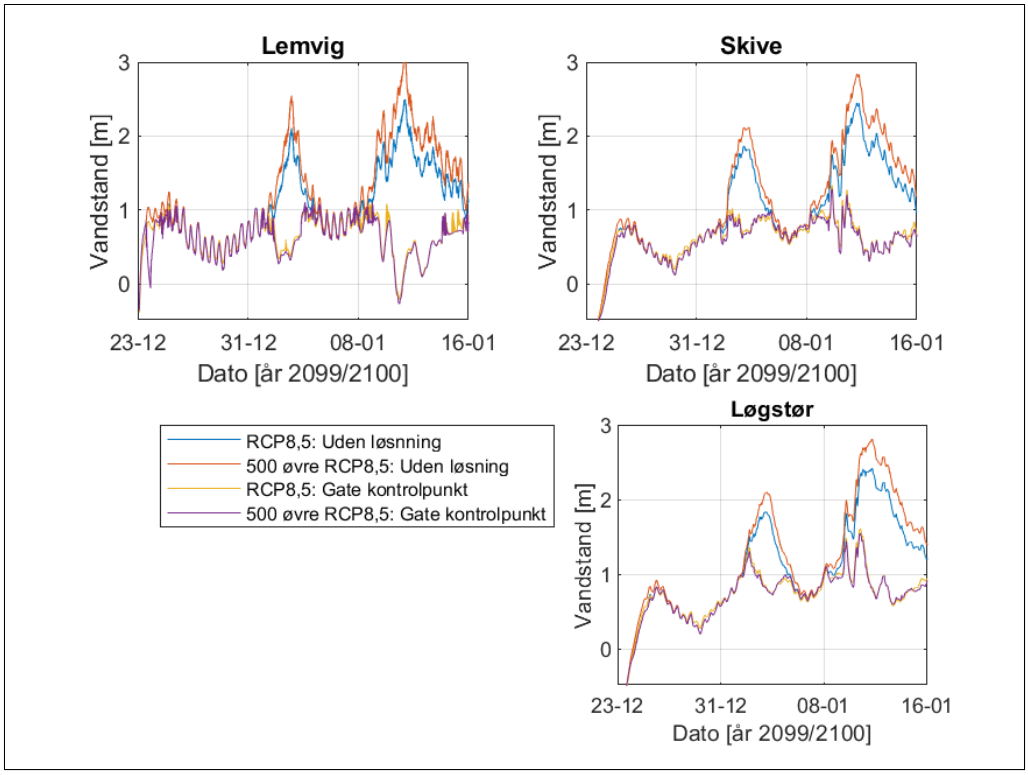
Tabel 10.6. *Arealet og reduceringen af oversvømmelserne ved implementeringen af en barriere, der er styret af den opstillede kontrolserie.*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]	Reducering [%]
Før gate lukker		
Vandstand 0,6 m i Lemvig, Skive og Løgstør	10,28	-
Med gate styret ved kontrolserie		
2 års hændelse 2100 RCP4,5	20,48	70
2 års hændelse 2100 RCP8,5	26,46	63
500 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	21,05	72
500 års gentagelsesperiode øvre grænse 95% 2100 RCP8,5	27,78	65

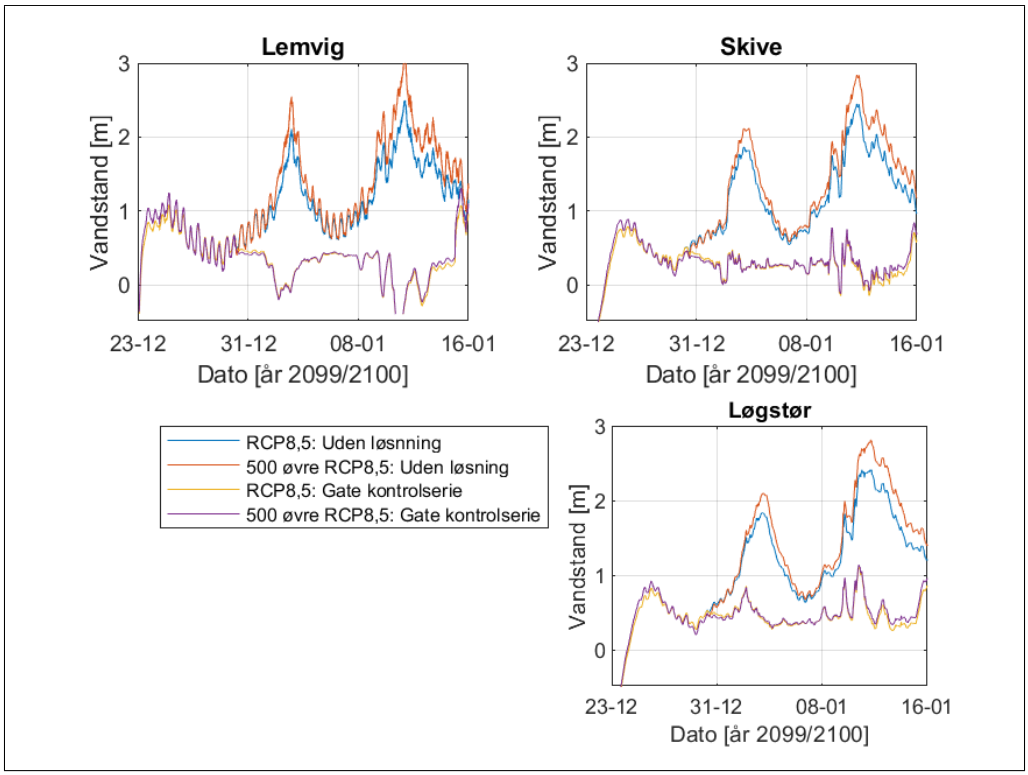
Minimum oversvømmelserne i den vestlige del af Limfjorden ved Lemvig, Skive og Løgstør reduceres med 63-72% efter implementering af gaten styret med kontrolserien afhængig af, hvilket scenarie der kigges på.

Sammenligning af barriere styret med de to forskellige styringsmuligheder

De modellerede vandstande i Lemvig, Skive og Løgstør ved en hændelse med 2 års gentagelsesperiode i Thyborøn fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5 og ved en hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5 før og efter implementering af en gate styrret ved kontrolpunkt samt før og efter implementeringen af en gate styret ved en kontrolserien fremgår af henholdsvis figur 10.20 og 10.21.



Figur 10.20. *Modellerede vandstande før og efter implementeringen af en gaten styrret ved 1,1 m vand i kontrolpunktet ved 2 års gentagelsesperiode og 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.*

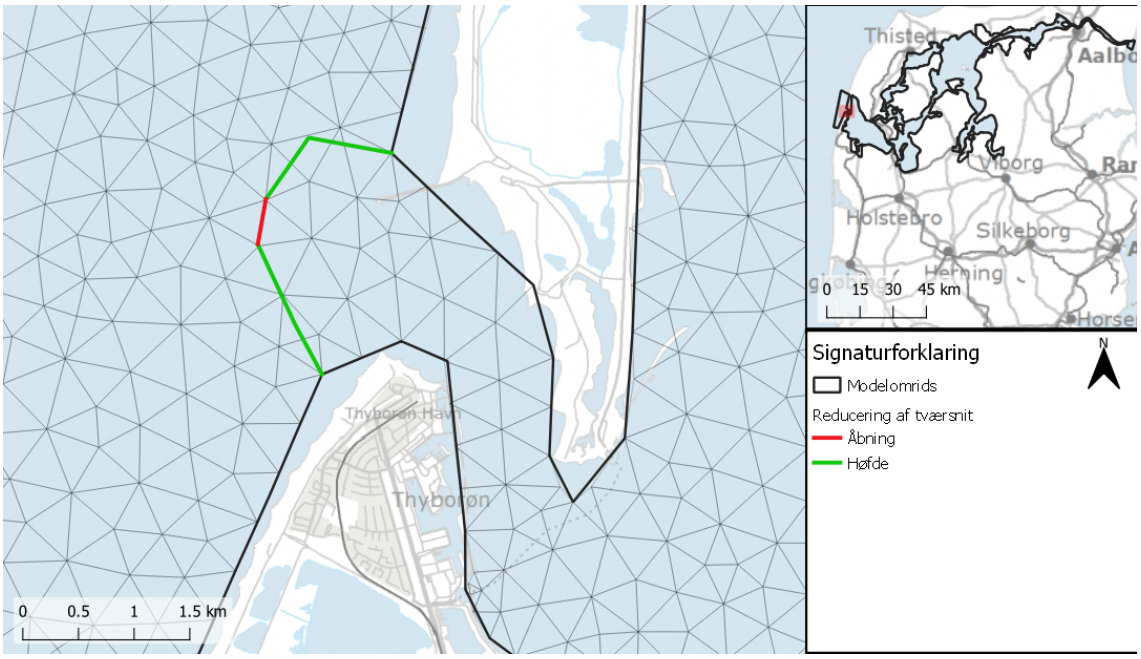


Figur 10.21. *Modellerede vandstande før og efter implementeringen af en gaten styrret ved den opstillede kontrolserie ved 2 års gentagelsesperiode og 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.*

Det fremgår af figur 10.20, at vandstanden i Lemvig reduceres i forbindelse med lukning af gaten, mens vandstanden ved Skive og Løgstør også reduceres en smule, men vandstanden når dog fortsat omkring 1,5 m i peakene, hvorfor der fortsat sker oversvømmelser ved Skive og Løgstør ved implementering af en barriere i Thyborøn Kanal der lukker ved 1,1 m vandstand i kontrolpunktet. Ved implementeringen af barrieren der lukker ved kontrolserien, ses ligeledes en reducering af de modellerede vandstande, dog er der fortsat et peak i vandstandene i Skive og Løgstør. I Løgstør når vandstanden i peaket over 1 m.

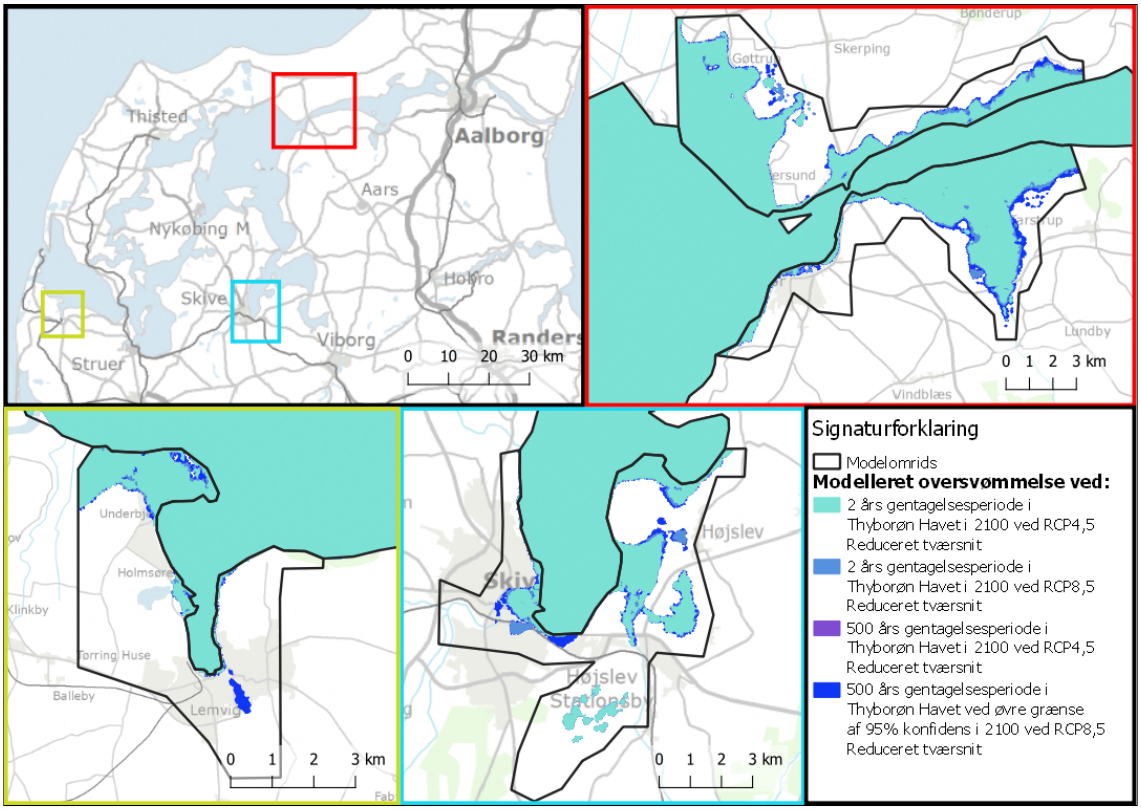
10.2.2 L2 Limfjorden - Reducering af tværsnit

Det er undersøgt, om oversvømmelser i den vestlige del af Limfjorden kan forhindres eller reduceres ved reducering af tværsnittet ved Thyborøn Kanal. I planen for reducering af tværsnittet ved Thyborøn Kanal, som er opstillet af Rambøll [2020], skal de to høfder på hver sin side af kanalen udbygges, således tværsnittet af kanalen bliver smallere. Det er valgt at opbygge reduceringen på samme vis i modellen, dog er længden og placeringen af høfderne ikke den samme, som i projektet fra Rambøll [2020]. Høfderne er i modellen opbygget med Culverts, men hvor intet flow på tværs af disse er tilladt. Mellem høfderne er lavet en åbning, som det fremgår af figur 10.22, denne er i modellen opbygget med en rektangulær Culvert med en bredde på 250 m. Denne bredde er svarende til bredden på det reducerede tværsnit, som det af Rambøll [2020] er planlagt at opføre.



Figur 10.22. *Placering af høfder og åbning ved det reducerede tværsnit ved Thyborøn Kanal i Limfjords modellen.*

De modellerede oversvømmelser ved de fire forskellige scenarier, som der er undersøgt, kan ses på figur 10.23 og arealerne af minimum oversvømmelserne fremgår af tabel 10.7.

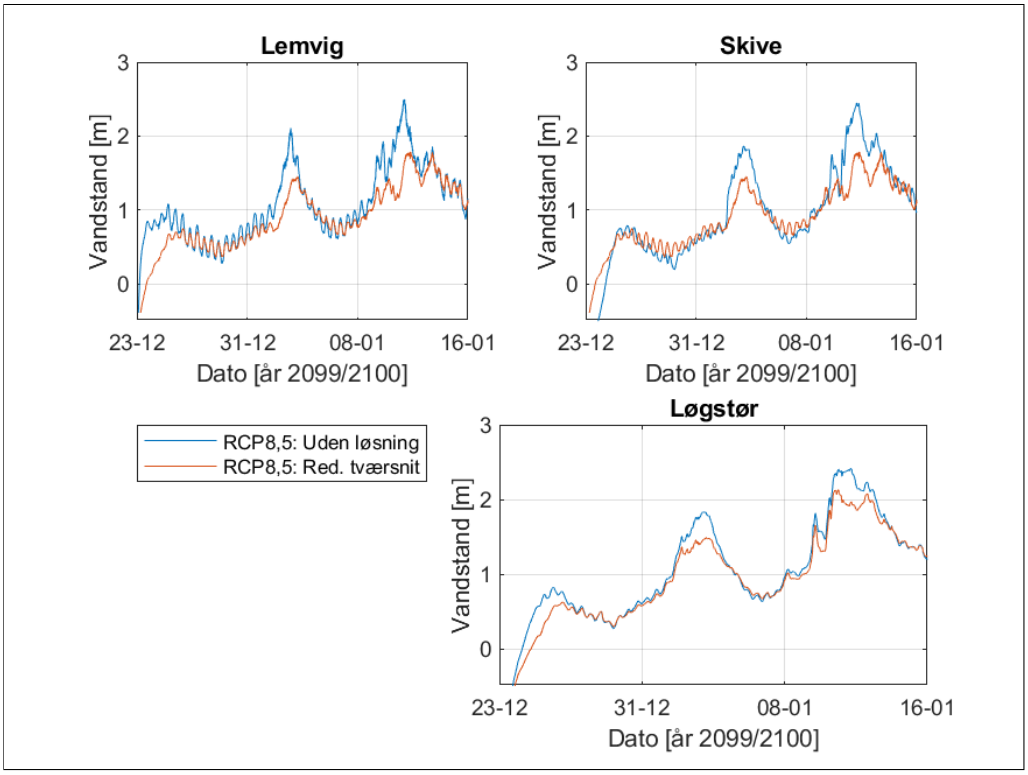


Figur 10.23. *Oversvømmelse ved Lemvig, Skive og Løgstør ved de forskellige modelleringsscenarier når tværsnittet af Thyborøn Kanal er reduceret.*

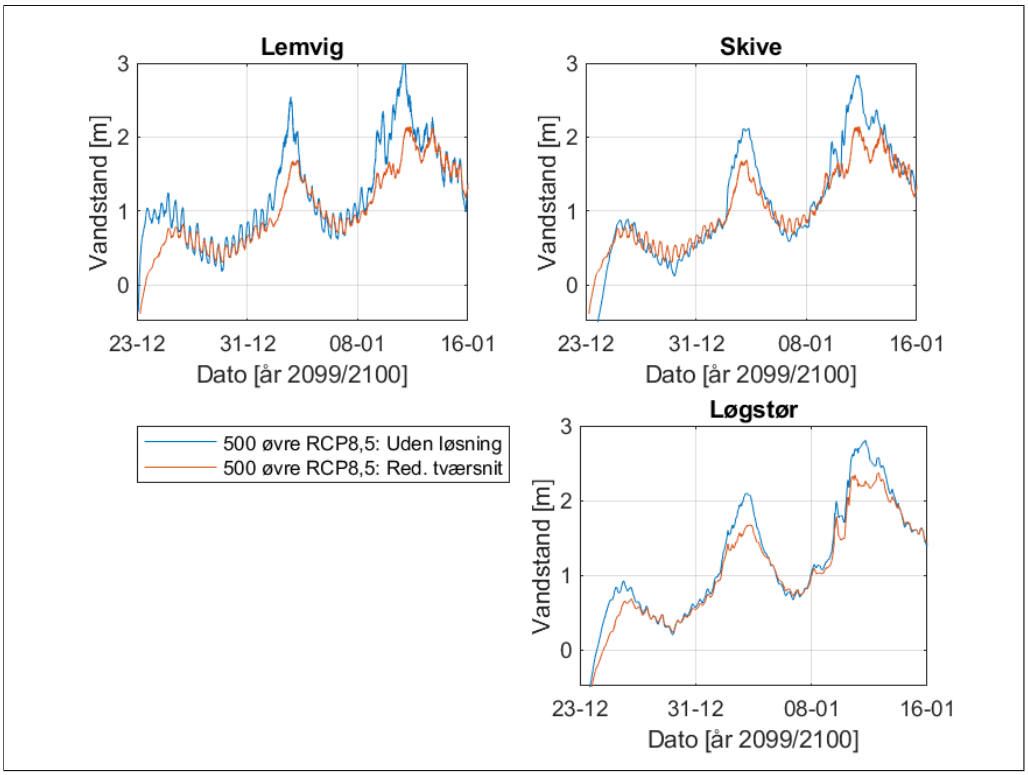
Tabel 10.7. *Arealet af minimum oversvømmelser og reduceringen ved reducering af tværsnittet ved Thyborøn Kanal*

Scenarie	Minimum oversvømmelse [km^2]	Reducering [%]
2 års hændelse 2100 RCP4,5	59,66	12
2 års hændelse 2100 RCP8,5	64,10	12
500 års gentagelsesperiode 2100 RCP4,5	63,95	15
500 års gentagelsesperiode øvre grænse 95% 2100 RCP8,5	73,31	11

Det fremgår af figur 10.23 og tabel 10.7, at oversvømmelserne ved Limfjorden reduceres en smule ved ændringen af tværsnittet ved Thyborøn Kanal, men der er stadig oversvømmelser i områderne ved Lemvig, Skive og Løgstør. I forbindelse med implementeringen af denne løsning, er det forsøgt at ændre på modstanden i Culverten, men uden resultatet blev bedre. Foruden denne ændring er der ikke foretaget yderligere tilpasning af Culverten. Den simulerede vandstand før og efter reducering af tværsnittet ved 2 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet i år 2100 ved RCP8,5 og 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet i år 2100 ved RCP8,5 ses på henholdsvis figur 10.24 og 10.25.



Figur 10.24. *Modellerede vandstande inden og efter reducering af tværsnittet ved Thyborøn Kanal ved en 2 års hændelse ved Thyborøn Havet fremskrevet til 2100 ved RCP8,5.*



Figur 10.25. *Modellerede vandstande inden og efter reducering af tværsnittet ved Thyborøn Kanal ved en 500 års hændelse ved ThyborønHavet ved den øvre grænse af 95% konfidensintervallet fremskrevet til 2100 ved RCP8,5.*

Det fremgår af figur10.24 og 10.25, at der ved reducering af tværsnittet ved Thyborøn Kanal sker en mindskning af de modellerede vandstande, så reduceringen har virkning på vandstanden i fjorden, og den maksimale vandstand i forbindelse med stormhændelserne kan reduceres ved implementering af denne løsningsstrategi.

10.3 Sammenligning

Ved sammenligning af de modellerede oversvømmelser, efter implementeringen af løsningsstrategierne ved Randers Fjord, ses det, at den største reducering opnåes ved løsningsstrategi L3, hvor barrieren ved Udbyhøj kombineres med 6 nye diger med en højde på 1,5 m. Denne løsning reducerer dog kun oversvømmelserne med et par procent mere end løsningsstrategi L2. Dette er en minimal ekstra reducering i forhold til omfanget af opbygning af 6 nye diger, hvorfor det er vurderet, at løsningsstrategi L2 er den bedste af de opstillede løsningsstrategier ved Randers Fjord.

Af afsnit 10.1.2 fremgår det, at oversvømmelserne ved fjorden reduceres med 76-80% ved styring af barrieren med den opstillede kontrolserie, og 75-77% ved styring i forhold til en vandstand på 1 m i kontrolpunktet. Derved er forskellen fra at anvende den ene eller anden styringsmulighed minimal, når der ses på reduceringen af oversvømmelserne ved de modellerede scenarier.

Det er også forsøgt at reducere oversvømmelserne ved Randers Fjord udelukkende ved etablering af diger. Ved den bedste af digeløsningerne, løsning B reduceres oversvømmelserne med 57-66%. Denne løsning kræver, at højden på de 24 eksisterende diger forøges til 2,5 m og der etableres 12 nye diger ved fjorden. Det er vurderet, at denne løsning vil reducere udsynet og adgangen til fjorden betydeligt. Derudover skal der etableres flere nye diger, hvis det ønskes at reducere oversvømmelserne yderligere.

Ved Limfjorden er det forsøgt at reducere tværsnittet af Thyborøn Kanal. Ved denne løsning ses en minimering af de modellerede vandstande ved peakene i Lemvig, Skive og Løgstør, men der ses kun en minimal reduktion i oversvømmelserne ved fjorden. Den største reduktion i vandstanden ses ved Lemvig, og det er ligeledes her, der ses størst reduktion i oversvømmelserne. Løsningsstrategi L1, som indbefatter etablering af en sluse eller stormflodsbariere ved fjorden er derfor, den bedste af de undersøgte løsninger ved Limfjorden. Ved denne implementering ses størst reduktion i vandstanden, når barrieren styres ved den opstillede kontrolserie. Barrieren skal have været lukket i mindst en uge, for at opnå mindst mulig oversvømmelse ved Løgstør, da passagen her er meget smal og fungerer som en flaskehals. Dette er kun muligt, ved at styre barrieren ved en kontrolserie, da det ikke kan garanteres, at en barriere styret ved et kontrolpunkt, vil være lukket i mere end en uge inden en stormhændelse indtræffer.

Den opnåede reduktion i oversvømmelserne ved Lemvig, Skive og Løgstør ved implementeringen af barrieren styret ved en kontrolserie er 63-72% afhængig af hvilket scenarie der kigges på. Ved sammenligning af denne med sluse og stormflodsbarriere løsningen ved Randers Fjord, fremgår det at reduktionen af oversvømmelserne her, er større end reduktionen i Limfjorden. Det kan skyldes fjordenes forskellige opbygning, da Randers Fjord ikke er åben i begge ender og derved opstår ikke samme flaskehals, som ses i Limfjorden ved Løgstør. Ydermere er de maksimal modellerede vandstande ved de forskellige scenarier i Randers Havn lavere end de modellerede vandstande i Limfjorden.

Vandstande ved det mest kritiske scenarie er i Randers Havn modelleret til 2,45 m, mens det i Lemvig, Skive og Løgstør er modelleret til henholdsvis 3,11 m, 2,81 m og 2,78 m.

Dele af terrænet ved Randers Fjord og Limfjorden oversvømmes ved mindre stigninger i vandstanden inde stormhændelserne indtræffer. I Randers Fjord oversvømmes omkring 6 Km^2 ved en vandstand på cirka 0,5 m i Randers Havn inden barrieren lukkes, og ved Limfjorden oversvømmer omkring 10 Km^2 ved en vandstand på cirka 0,6 m i Lemvig, Skive og Løgstør inden barrieren lukkes. Disse oversvømmelser er vanskelige at forhindre ved implementeringen af en barriere, da det vil kræve at denne var lukket største delen af tiden. Hvorfor barrieren må kombineres med anden kystbeskyttelse, hvis der ikke ønskes oversvømmelser ved en vandstand på 0,5 m i Randers Havn og 0,6 m i Lemvig, Skive og Løgstør.

I modellerne er de to løsningsstrategier *L2 Randers Fjord - sluse og stormflodsbarriere* og *L1 Limfjorden - sluse og stormflodsbariere* undersøgt ved at indsætte en barriere, der åbner og lukker til forskellige tidspunkter og vandstande. Ønskes en sluse med en anderledes styrring og udformning, skal dette undersøges ydereliger. Ligesom højde dimensionerne på en stormflodsbarriere ligeledes skal undersøges, da gaten i de modellerede scenarier er defineret i hele vandsøjlen.

På baggrund af undersøgelserne af oversvømmelserne ved implementering af de forskellige løsningsstrategier ved Randers Fjord og Limfjorden ses det, at oversvømmelserne kan reduceres men ikke forhindres. De undersøgte løsninger kan derfor ikke alene løse problematikken med oversvømmelse af kystområderne ved Randers Fjord og den vestlige del af Limfjorden, men de kan hjælpe til at reducere problematikken.

Randers Fjord modellen med de implementerede løsningsstrategier fremgår af det elektroniske appendiks D.5, mens Limfjords modellen med de implementerede løsningsstrategier fremgår af det elektroniske appendiks D.6.

Diskussion 11

Fremskrivning af vindstyrke og vandstande
Stigningen i vindenstyrken i år 2100 er estimeret til 10% af Danmarks Meteorologiske Institut [2020b]. Denne stigning er anvendt ved fremskrivning af vindene ved Randers Fjord og Limfjorden. Ved begge udledningsscenarier er vindstyrken forøget med 10%. Derved er der ikke taget hensyn til, at ændringen i vindenstyrken ved RCP8,5 sandsynligvis er højere end ved RCP4,5.

Ved fremskrivning af vandstandene til år 2100 er anvendt median af de estimerede middelvandstande i år 2071-2100 ved de to udledningsscnarier. Det kan diskuteres hvorvidt, den maksimalt bestemte middelvandstand i år 2071-2100 burde være benyttet i stedet for median, da det ville give en højere vandstand og sandsynligt en større udbredelse af oversvømmelserne. Omvendt er det lige så sandsynligt, at vandstandene 2071-2100 bliver lavere end medianværdien.

Kalibrering af Limfjords model
I forbindelse med kalibreringen af Limfjords modellen viste det sig vanskeligt, at få de modellerede vandstande til at stemme overens med de målte vandstande i Lemvig, Skive og Løgstør. Det tyder på en fejl i modellens beregningsnet eller på randene. Modellen er anvendt til at modellere oversvømmelserne før og efter implementering af løsningsstrategierne ved hændelsen 'Egon'. Ved denne hændelse ses rimelig overensstemmelse mellem de modellerede og målte vandstande. Ønskes det, at modellere stormhændelser ved andre scenarier end dette, bør modellen kalibreres yderligere.

Størrelsen på modelområderne
Ved modellering af oversvømmelserne ved Randers Fjord, ses det tydeligt at oversvømmelserne når kanten af modelområdet, hvorfor dette er for lille til at beskrive den totale udbredelse af oversvømmelserne. For at få et billede af den fulde udbredelse, burde terræn med en elevation lavere end 2,5 m omkring fjorden være inkluderet i modelområdet, fordi den maksimale vandstand i Randers Havn ved det mest kritiske scenarie er cirka 2,4 m.

Ved Limfjorden er det valgt, at afgrænse modelområdet til kun at kigge på oversvømmelserne ved Lemvig, Skive og Løgstør. Det giver en usikkerhed i forhold til udbredelsen af oversvømmelserne, da det ikke er muligt fuldstændigt at afgøre, om oversvømmelserne i hele den vestlige del af Limfjorden kan reduceres ved implementering af løsningsstrategierne. Derudover kan det diskuteres, om ikke Aalborg burde medtages i analysen af oversvømmelserne og reduktionen af disse, da det er den største by ved Limfjorden og byen er placeret umiddelbart ved kysten.

Vandløbene
Karup Å, der har udløb til Limfjorden ved Skive, er ikke medtaget i modellen over Limfjorden, da vandføringen sammenlignet med hele Limfjordens areal er vurderet ubetydelig. Der er dog

en risiko for, at vandføring fra Karup Å har betydning lokalt i forhold til oversvømmelserne. Det kan derfor diskuteres, om vandføringen og dele af Karup Å brude være medtaget i Limfjords modellen på samme vis, som Gudenåen er medtaget i Randers Fjord modellen.

Bestemmelse af oversvømmelseudbredelse og areal
Det er beskrevet, at udbredelsen og arealet af oversvømmelserne ved de enkelte scenarier med og uden løsningsstrategier, er bestemt på baggrund af en visuel bedømmelse af billeder af overfladeelevationen til de enkelte tidsskridt i modelleringsperioden. Det betyder, at der er usikkerheder forbundet med denne bedømmelse, da det er vanskeligt visuelt at afgøre til præcis hvilket tidskridt, oversvømmelserne har størst udbredelse. Derudover kan den maksimale oversvømmelse et sted ved fjorden opstå, før den maksimale oversvømmelse opstår et andet sted ved fjorden. Bestemmelsen af det oversvømmede areal kunne være mere præcis, hvis arealet var bestemt på baggrund af billeder af overfladeelevationen til flere tidsskridt, end det er tilfældet i dette projekt. Men det kan diskuteres, om denne er væsentlig modellens generelle usikkerheder taget i betragtning.

Undersøgte scenarier
Oversvømmelserne er modelleret på baggrund af stormhændelsen 'Bodil' i Randers Fjord og 'Egon' i Limfjorden. Disse storme er korrigeret således, at de afspejler vandstanden ved en 500 års gentagelsesperiode, samt fremskrevet således de kan modellere oversvømmelser i år 2100 ved udledningsscenarierne RCP4,5 og RCP8,5. Begge storme er præget af vind fra vestlig retning, hvilket er vindretningen, hvorfra der hyppigst forekommer storme i Danmark. Storme med andre vindretninger forekommer dog også, hvorfor et andet billede af oversvømmelserne og virkning af løsningsstrategierne muligvis ses, såfremt en stormhændelse med en anden vindretning undersøges.

Diger og Højvandsmure
Ved Randers Fjord er der, i forbindelse med etablering af nye diger ved løsningsstrategierne L1 og L3, ikke taget hensyn til udløb af eksisterende grøfter og mindre vandløb til fjorden. Dette burde tages med i overvejelserne omkring digernes placering og opførsel, da det nødvendigvis må løses således, at vandet ikke opstuver på indersiden af digerne.

Sluser og stormflodsbarriere
I projektet er implementeringen af en sluse eller stormflodsbarriere undersøgt ved at indsætte en gate styret ved vandstanden i et kontrolpunkt eller ved en opstillet kontrolserie. Det betyder at kun barrierefunktionen er undersøgt, da gaten er implementeret over hele det gennemstrømmede tværsnit ved Udbyhøj og Thyborøn Kanal, således at tværsnittet, når gaten er åben, er det samme, som inden implementeringen af gaten. På baggrund af dette er det derfor usikkert, hvordan en sluse opbygget med sluseporte, med et mindre gennemstrømningsareal, vil påvirke oversvømmelserne ved Randers Fjord og Limfjorden.

Reducering af tværsnit
Ved reducering af tværsnittet ved Thyborøn-Kanal ses en reduktion i oversvømmelserne på omkring 12%, hvilket er en del mindre end reduceringen fra det andet løsningsforslag, som er opstillet ved Limfjorden. Det er usikkert hvorvidt, dette skyldes at reduktionen ved denne løsning blot er meget mindre, eller om Culverten, som er indsat i forbindelse med implementeringen af løsningsstrategien, bør tilpasse yderligere. For eksempel om modstanden eller opbygningen af denne burde være anderledes.

Konklusion 12

Gennem dette projekt er der arbejdet ud fra følgende hypotese: Oversvømmelserne af kystområderne ved Randers Fjord og den vestlige del af Limfjorden kan reduceres eller forhindres ved at etablerer oversvømmelsesbeskyttende foranstaltninger.

På baggrund af en hydrodynamisk model opstillet i MIKE21 er oversvømmelserne ved de to fjorde ved forskellige scenarier undersøgt nu og i år 2100. Af disse undersøgelser fremkommer, at der vil opstå oversvømmelser ved kystområderne ved Randers Fjord og Limfjorden både nu og i fremtiden.

Forskellige løsningsstrategier er opstillet og undersøgt med modellen. Disse indbefatter etablering af diger og højvandsmure, sluser og stormflodsbarrierer samt reducering af kanal tværsnit ved Thyborøn.

Det er vurderet, at den bedste af de opstillede løsningsstrategier er etableringen af sluse og stormflodsbarriere ved Randers Fjord og Limfjorden. Ved denne løsning er en barriere, som kan styres på baggrund af vandstanden eller på baggrund af vejrvarslinger indsat i Randers Fjord ved Udbyhøj. Denne reducere oversvømmelserne ved fjorden med 75-80%. I Limfjorden er en barriere etableret på tværs af Thyborøn Kanal. Denne reducere oversvømmelserne ved Lemvig, Skive og Løgster med 63-70%, hvis den styres på baggrund af vejrvarslinger, således barrieren er lukket i minimum en uge inden stormhændelsen indtræffer.

En reducering af oversvømmelserne i Randers Fjord på omkring 60% kan opnåes ved en digeløsning, hvor de eksisterende diger forhøjes, og der etableres nye diger langs store dele af kysten. Foruden denne er en kombinationsløsning undersøgt. Ved denne ses det, at der foruden barrieren, skal etableres en del diger omkring kysten, for at reducere oversvømmelserne yderligere.

Ved Limfjorden er det ikke forsøgt at etablere nye diger, men i stedet er tværsnitsarealet i Thyborøn Kanal forsøgt reduceret. Ved denne løsning ses en reduktion i peaket i vandstanden. Ligeledes ses en mindre reduktion i oversvømmelserne, hvorfor denne ikke virker som en optimal løsning, såfremt det ønskes at reducere oversvømmelserne betydeligt.

På baggrund af arbejdet med projektet kan det konkluderes, at den opstillede hypotese kun delvis kan accepteres. Dette skyldes, at oversvømmelserne ved Randers Fjord og den vestlige del af Limfjorden, ved de opstillede løsningsstrategier kan reduceres, men ikke forhindres.

Perspektivering 13

På baggrund af arbejdet med dette projekt, er det fremkommet, at oversvømmelserne i forbindelse med stormhændelser ved Randers Fjord og Limfjorden kan reduceres, men ikke forhindres ved etablering af de undersøgte løsningerstrategier. Løsningsstrategien, der er vurderet, som den bedste ved de to fjorde, er etableringen af en barriere ved henholdsvis Udbyhøj og Thyborøn Kanal. Det kunne være interessant at undersøge, om løsningen kan forbedres således oversvømmelserne af fjordkysterne kan reduceres ydereliger.

Ved Randers Fjord kunne det for eksempel undersøges, om der i kombination med en sluse eller stormflodsbarriere kan etableres en pumpe, der pumper vand ud af fjorden i perioderne, hvor der ellers er lukket for strømning af vand ud af fjorden. På denne vis undgås oversvømmelser, som følge af vandtilførslen fra Gudenåen og vindstuvning på indersiden af barrieren.

Det kunne ved Limfjorden, være interessant at undersøge, om løsningen med en barriere i Thyborøn Kanal kan kombineres med de øvrige opstillede løsningsstrategier. For eksempel en kombination med barrieren og reducering af det gennemstrømmede tværsnit, eller en kombination med barrieren og diger ved Løgstør.

I projektet er de miljømæssige perspektiver, ved etablering af de enkelte løsningsforlag ikke belyst. En analyse af disse må foretages forud for udvælgelse og etablering af de enkelte løsninger. Da det er nødvendigt, at vide hvordan miljøet i og omkring fjordene vil påvirkes i forbindelse med og efter opførslen af disse.

Det kan i forbindelse med overvejelserne, om etablering af de enkelte løsningsstrategier, ligeledes være interessant at undersøge, hvilke arealer der oversvømmes før og efter implementeringen af løsningerne. Det er blandt andet interessant, for at finde ud af, om nogle af arealerne omkring fjordene i fremtiden kan udnyttes bedre, hvis det kan garanteres, at disse ikke oversvømmes. Det kan for eksempel være, at landmanden kan få større udbytte på sine marker, hvis de ikke oversvømmes eller, at der kan etableres naturområder på disse arealer, således udvaskning af næringssalte fra landbruget til fjordene kan reduceres. Derudover kan det undersøges, om de 20-30% af arealerne der fortsat vil oversvømme ved Randers Fjord og Limfjorden efter implementeringen af barrieren er arealer, der på nuværende tidspunkt er uudnyttet, og det derfor kan tillades, at der sker oversvømmelse på disse arealer i forbindelse med stormhændelser.

De økonomiske udgifter forbundet med etablering af de enkelte løsninger bør også undersøges. I forbindelse med dette kan det undersøges, om fjordkommunerne kan gå sammen om én løsning, for eksempel en stormflodsbarriere, der reducere problemet med oversvømmelser ved flere af kystområderne, således at der ikke i alle kommunerne skal etableres særskilte løsninger.

Litteratur

Baltzer, **2019**. Ulrik Baltzer. *Dækker din forsikring skader efter stormflod*, Videncenteret Bolius, 2019.

Coast to coast Climate Challenge, **2020**. Coast to coast Climate Challenge. *Rambøll vinder opgave: Hvordan undgår vi mere vand i Limfjorden?* https://www.c2ccc.eu/nyheder/ramboll-vinder-opgave/, 2020. Set: 01-06-2020.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2018a**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Stormflod - Temaforside*. https://www.dmi.dk/hav-og-is/temaforside-stormflod/, 2018. Set: 03-02-2020.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2018b**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Stormflod: Danske farvande og kyster*. https://www.dmi.dk/hav-og-is/temaforside-stormflod/danske-farvande-og-kyster/, 2018. Set: 03-02-2020.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2020a**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Vandstand*. https://www.dmi.dk/dmis-vejrprodukter/vandstand/, 2020. Vandstande er indhentet på stations nummer fra DMI's server.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2020b**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Vind*. https://www.dmi.dk/vejrarkiv/, 2020. Vind er indhentet på lokationsnavn fra DMI's server.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2018c**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Fremtidens klima: Hvor kommer fremtidens ekstreme vejr fra?* https://www.dmi.dk/klima/temaforside-fremtidens-klima/hvor-kommer-fremtidens-ekstreme-vejr-fra/, 2018. Set: 04-02-2020.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2019a**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Sådan bruger du klimaatlas*. https://www.dmi.dk/klima-atlas/saadanbrugerduklimaatlas/?L=, 2019. Set: 03-02-2020.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2019b**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Data Klimaatlas*. https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klimaatlas/?L=&paramtype=sea&maptype=kyst, 2019. Set: 03-02-2020.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2019c**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Stormes in Denmark since 1891*, Danmarks Meteorologiske Institut, 2019c.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2018d**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Bringer fremtiden flere december orkaner?*, Danmarks Meteorologiske Institut, 2018d.

Danmarks Meteorologiske Institut i samarbejde med Miljøstyrelsen, **2018**. Danmarks Meteorologiske Institut i samarbejde med Miljøstyrelsen. *Vejledning i anvendelse af*

udledningsscenarier. https://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/Bruger_upload/Raadgivning/Vejledning_i_anvendelse_af_udledningsscenarier.pdf, 2018. Set: 03-02-2020.

Danmarks Miljøportal, **2020**. Danmarks Miljøportal. *Danmarks Arealinformation - Data om miljøet i Danmark*, Kommuner, Regioner og Miljø- og Fødevareministeriet, 2020.

Deltares, **2018**. Deltares. *Overview storm surge barriers*, Rijkswaterstaat - Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2018.

Den Store Danske, **2017**. Gyldendal Den Store Danske. *Limfjorden*. http://denstoredanske.dk/Danmarks_geografi_og_historie/Danmarks_geografi/Indre_danske_farvande/Limfjorden, 2017. Set: 23-03-2020.

Den Store Danske, Gyldendal, **2017**. Den Store Danske, Gyldendal. *Randers Fjord*. http://denstoredanske.dk/Danmarks_geografi_og_historie/Danmarks_geografi/Indre_danske_farvande/Randers_Fjord, 2017. Set: 25-02-2020.

Ditlevsen et al., **2018**. Charlotte Ditlevsen, Marta Merino Ramos, Carlo Sørensen, Ulf Radu Ciocan og Thorsten Piontkowitz. *Højvandsstatistikker 2017*. ISBN: 978-87-7120-997-6, Pdf. Kystdirektorartet, Miljø og Fødevare Ministeriet, 2018. Februar 2018.

Erhvervsministeriet, **2018**. Erhvervsministeriet. *Bekendtgørelse af lov om stormflod og stormfald*. https://www.retsinformation.dk/pdfPrint.aspx?id=199926, 2018. Note: LBK nr 281 af 16/04/2018.

Erhvervsministeriet, **2017**. Erhvervsministeriet. *DE FREMTIDIGE STORMFLODS-, OVERSVØMMELSES- OG STORMFALDSORDNINGER*. https://em.dk/media/9719/03-29-rapport-om-stormflodsordning.pdf, 2017. Statistikker om stormflodssager og udbetalte erstatninger fra Stormrådet.

Europa-Kommisionen: Energi, Klimaændringer og Miljø, **2020**. Europa-Kommisionen: Energi, Klimaændringer og Miljø. *Konsekvenser af klimaforandringerne*. https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_da, 2020. Set: 03-02-2020.

Hasløv og Kjærsgaard, **2015**. DHI Hasløv og Kjærsgaard. *Kystdynamik og kystbeskyttelse, Naturlige erosions- og oversvømmelsesprocesser – beskyttelsesmetoders virkning og økonomi*. ISBN: 978-87-92124-04-3, pdf. Miljø og Fødevareministeriet - Kystdirektorartet, 2015.

Ingeniøren - Christian Østergaard, **2015**. Ingeniøren - Christian Østergaard. *Betonmur holdt rekord vandstand ude af Lemvig*. https://ing.dk/artikel/betonmur-holdt-rekordhoej-vandstand-ude-af-lemvig-173429, 2015. Set: 06-02-2020.

Ingvardsen et al., **2012**. Signe Marie Ingvardsen, Søren Bjerre Knudsen, Holger Toxvig, Carlo Sass Sørensen og Carl Bisgaard. *Thyborøn Kanal og Vestlige Limfjord*. https://kyst.dk/media/79973/thyboroenkanalogdenvestligelimfjord.pdf, 2012. Udgivet af Kystdirektorartet.

Jacob Woge Nielsen - Danmarks Meteorologiske Institut, **2007**. Jacob Woge Nielsen - Danmarks Meteorologiske Institut. *Stormflod*. http://ocean.dmi.dk/subjects/stormflod/, 2007. Set: 20-02-2020.

Klimatilpasning - Miljø og fødevareministeriet/Miljøstyrelsen, 2019. Klimatilpasning - Miljø og fødevareministeriet/Miljøstyrelsen. *Havspejlsstigningers påvirkning på kystnaturen – en metodebeskrivelse*. https://www.klimatilpasning.dk/sektorer/natur/kystnatur/havspejlsstigningers-paavirkning-paa-kystnaturen-en-metodebeskrivelse/, 2019. Set: 12-02-2020.

Krak og Eniro, 2019. Krak og Eniro. *Krak til søs*. https://tilsos.krak.dk, 2019. Set: 28-05-2020.

Kystdirektoratet, 2018. Kystdirektoratet. *Metode til national risikovurdering af oversvømmelse fra hav og vandløb samt ajourføring af risikoområder, Oversvømmelsesdirektivet Anden planperiode*. ISBN: 978-87-93593-84-8, pdf. Kystdirektoratet, 2018.

Lemvig Kommune og Kystdirektorartet, 2015. Lemvig Kommune og Kystdirektorartet. *Klimatilpasset nytænkning på Lemvig Havn*. https://www.klimatilpasning.dk/cases-overview/klimatilpasset-nytaenkning-paa-lemvig-havn/#category-lning, 2015. Set: 28-05-2020.

Miljø- og Fødevareministeriet, 2016. Miljø- og Fødevareministeriet. *Kystanalyse*, Miljø- og Fødevareministeriet, Finansministeriet, Erhvervs- og Vækstministeriet, Social- og Indenrigsministeriet, Energi- Forsynings og klimaministeriet, 2016.

Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014a. Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet. *Dige*. https://kyst.dk/media/80420/dige.pdf, 2014. Set: 31-03-2020.

Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014b. Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet. *Højvandsmur*. https://kyst.dk/media/80414/hoejvandsmur.pdf, 2014. Set: 31-03-2020.

Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet, 2014c. Miljø- og Fødevareministeriet, Kystdirektorartet. *Stormflodsbarrierer og sluser*. https://kyst.dk/media/80418/stormflodsbarrierer-og-sluser.pdf, 2014. Set: 05-02-2020.

Miljø- og Fødevareministeriet, Miljøstyrelsen, 2018. Miljø- og Fødevareministeriet, Miljøstyrelsen. *Fakta om Natura 2000 områderne*. https://mst.dk/natur-vand/natur/natura-2000/natura-2000-omraaderne/fakta-om-omraaderne/, 2018. Set: 24-02-2020.

Miljø-og Fødevareministeriet, 2018. Miljøstyrelsen Miljø-og Fødevareministeriet. *Historie - Harboøre Tange*. https://naturstyrelsen.dk/naturoplevelser/naturguider/harbooere-tange/historie/, 2018. Set: 26-02-2020.

Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering, 2016. Miljøstyrelsen og Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering. *Klimatilpasningsplaner*. http://miljoegis.mim.dk/spatialmap?profile=miljoegis-klimatilpasningsplaner, 2016. Set: 19-02-2020.

Rambøll, **2020**. Martin Zoffmann Rambøll. *Indsnævring af Thyborøn Kanal kan reducere stormflodsvandstand i Limfjorden*. `https://dk.ramboll.com/medier/rdk/indsnaevring-af-thyboron-kanal-kan-reducere-stormflodsvandstand-i-limfjorden`, 2020. Set: 01-06-2020.

SCALGO Live, **2015**. SCALGO Live. *SCALGO Live - DK + Flood Risk*. `https://scalgo.com/live/livedenmarkfloodrisk`, 2015. Set: 13-02-2020.

Stormrådet, **2020**. Stormrådet. *Om Stormrådet*. `https://www.stormraadet.dk/om-stormraadet/`, 2020. Set: 03-02-2020.

Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering, **2020**. Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering. *Kortforsyningen*, 2020.

Sørensen et al., **2013**. Carlo Sørensen, Holger Toxvig Madsen og Søren Bjerre Knudsen. *Højvandsstatistikker 2012*, Kystdirektorartet, Transportministeriet, 2013.

UNPDs nordiske kontor, **2016**. UNPDs nordiske kontor. *FN's verdensmål - for bæredygtig udvikling*. `https://www.verdensmaalene.dk/fakta/verdensmaalene`, 2016. Set: 13-05-2020.

Del IV

Appendiks

Indhentning af vandstands- og vinddata A

I dette afsnit præsenteres hvor de målte vandstande og vinde, som er benyttet i forbindelse med opstilling og kalibrering af MIKE21 modellerne, er målt og indhentet fra.

Vind- og vandstandsdataerne, som er anvendt i forbindelse med opstillingen og kalibreringen af Randers Fjord modellen og Limfjords modellen, er målt i målepunkterne, som er angivet på figur A.1 og A.2. Den eksakte placering hvorfra vandstands- og vinddataen er målt er ikke kendt, men ud fra stationsnavnet er den omtrentlige placering estimeret. Det er den estimerede placering der fremgår af figurerne. Det ses, at vandstandene, der er benyttet i forbindelse med opstilling og kalibrering af Randers Fjord modellen, er målt 2 forskellige steder, mens vandstandene, der er benyttet i forbindelse med opstilling og kalibrering af Limfjords modellen, er målt 5 forskellige steder. Vindstyrken og vindretningen er, som det fremgår af figur A.2, målt 1 sted i Randers Fjord og 3 forskellige steder i Limfjorden.

Figur A.1. *Placering af punkter, hvor vandstande der er anvendt i forbindelse med opstilling og kalibrering af Randers Fjord modellen og Limfjords modellen, er målt. Data indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020].*

Figur A.2. *Placering af punkter, hvor vindstyrke og vindretning der er anvendt i forbindelse med opstilling og kalibrering af Randers Fjord modellen og Limfjords modellen, er målt. Data indhentet fra Danmarks Miljøportal [2020].*

Vandstandene fra Thyborøn og Hals i perioden 01-01-2005 til 31-12-2006 er udleveret af vejleder, mens de øvrige vandstande, som er anvendt, er indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut [2020a] på baggrund af stationsnummer. Stationsnumrene er angivet i tabel A.1 sammen med vandstandenes anvendelse. Måling af vandstandene er på 10 minutters basis, dog er der perioder, hvor der er mindre huller i serierne eller perioder hvor dataen helt mangler. I forbindelse med opstilling af MIKS21 modellen er det vigtigt for at få det bedste resultat, at de anvende tidsserier er kontinuert uden huller, derfor er de manglende vandstande lineærinterpoleret ved anvendelse af interpoleringsværktøj fra MIKE ZERO.

Tabel A.1. *Stationsnumre for målepunkterne hvorfra der er indhentet vandstandsdata.*

	Stations nr.	Anvendelse
Thyborøn Havet	24006	Vandstandsrand
Hals Havn	20262	Vandstandsrand
Lemvig Havn	24032	Kalibrering/Validering
Skive Havn	21191	Kalibrering/Validering
Løgstør	20423	Kalibrering/Validering
Udbyhøj Havn	22009	Vandstandsrand
Randers Havn	22059	Kalibrering/Validering

Vindstyrken og vindretningen målt i Thyborøn og Hals for perioden 01-01-2005 til 31-12-2005 er udleveret af vejleder, sammen med en middel vind for de to målestationer, som er anvendt i Limfjords modellen kørt for perioden 03-01-2005 til 12-01-2005. Vinden, som er anvendt i de to modeller i de øvrige modellerings perioder, er målt i Randers Havn og Thisted og indhentet fra Danmarks Meteorologiske Institut [2020b]. Vindserien fra år 2005 er målt på 10 minutters basis, mens de øvrige anvendte vindserier er målt på time basis.

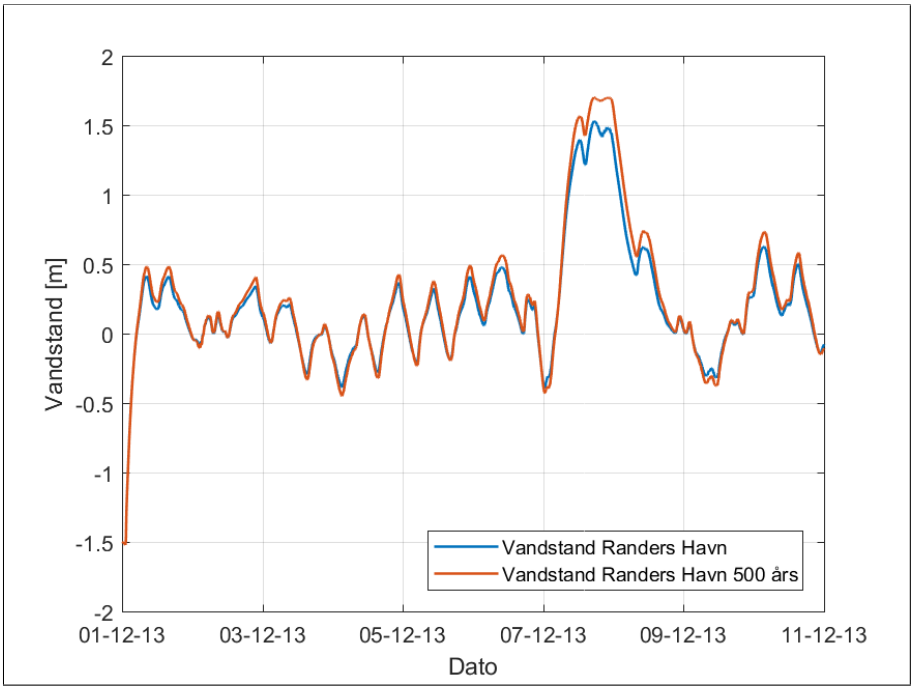
Oversvømmelses modellering Randers Fjord

B

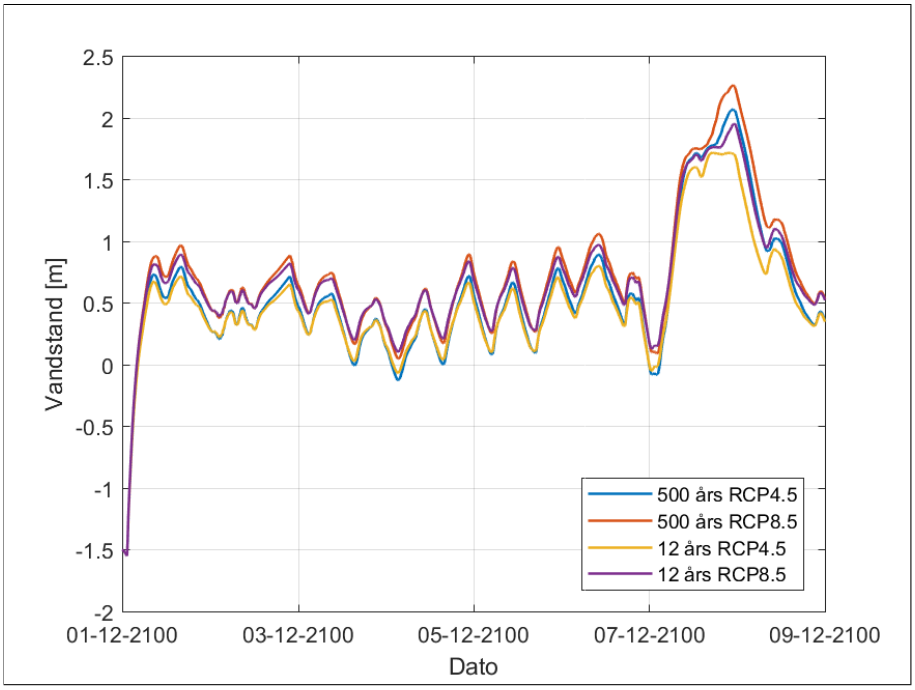
I dette appendiks fremgår de modellerede vandstande og oversvømmelser ved Randers Fjord ved de forskellige modellerede scenarier. I kapitel 8 er den anvendte data beskrevet og opbygningen af de forskellige scenarier defineret.

Den simulerede vandstand i Randers havn ved en hændelse med en 12 års gentagelsesperioden og en hændelse med en 500 års gentagelsesperiode i perioden 2013 fremgår af figur B.1. Mens de simulerede vandstanden i Randers Havn 2100 for en 12 og 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 er afbildet på figur B.2.

Af figur B.1 ses det, at forskellen mellem den maksimalt simulerede vandstand i perioden 01-12-2013 til 11-12-2013 ved en 12 og 500 års gentagelsesperioden er omkring 0,2 m. Sammenlignes de simulerede vandstande ved en 12 og 500 års gentagelsesperioden i år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 ses det af figur B.2, at der er en forskel på omkring 0,5 m mellem de maksimale vandstande. Ydermere fremgår det, at forskellen mellem den maksimalt simulerede vandstand ved en hændelse med en 12 års gentagelsesperioden ved RCP8,5 og 500 års gentagelsesperiode RCP4,5 er omkring 0,1 m.

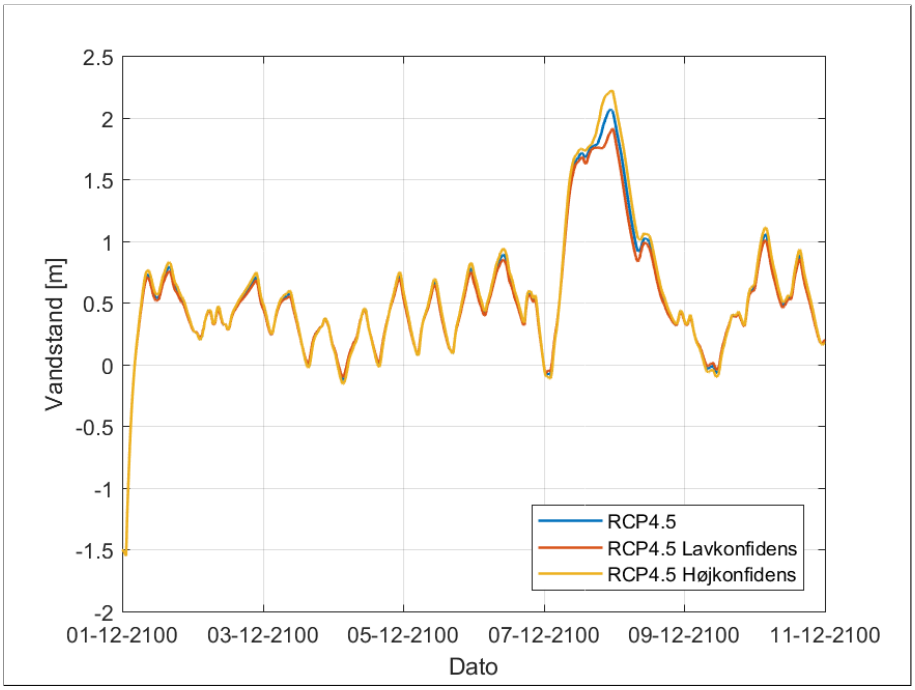


Figur B.1. *Simuleret vandstand i Randers Havn ved 12 og 500 års gentagelsesperioden i perioden 01-12-2013 til 11-12-2013.*

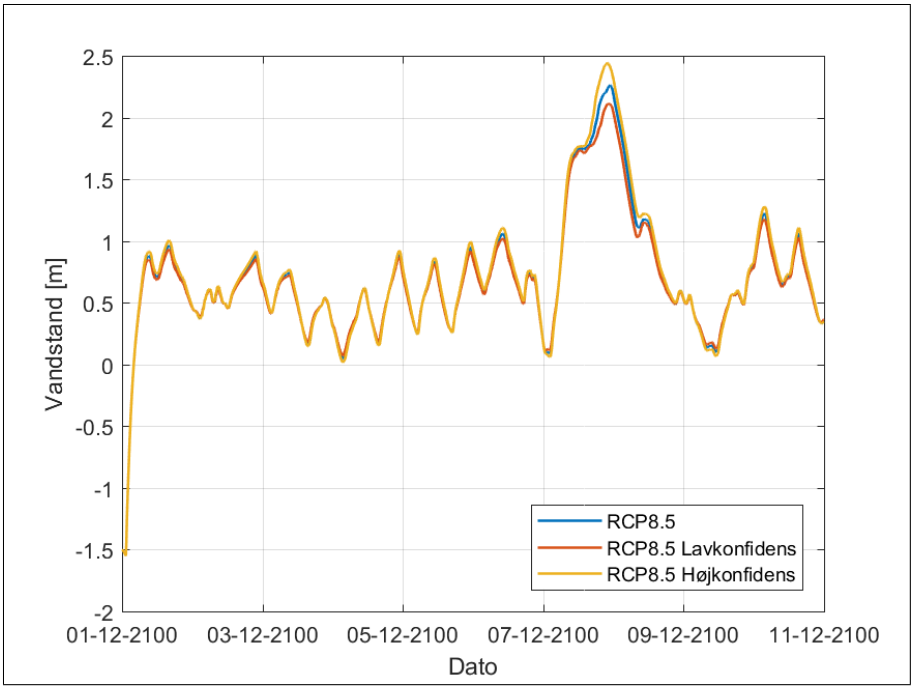


Figur B.2. *Simuleret vandstand i Randers Havn ved 12 og 500 års gentagelsesperioden fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5.*

De simulerede vandstande i perioden 01-12-2100 til 11-12-2100 ved en hændelse med 500 års gentagelses periode samt 95% konfidensinterval for hændelsen ved RCP4,5 og RCP8,5 fremgår af henholdsvis figur B.3 og B.4.



Figur B.3. *Simuleret vandstand i Randers Havn ved en 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5. Angivet er ligeledes den simulerede vandstand ved det høje og lave 95% konfidensinterval for 500 års hændelsen.*

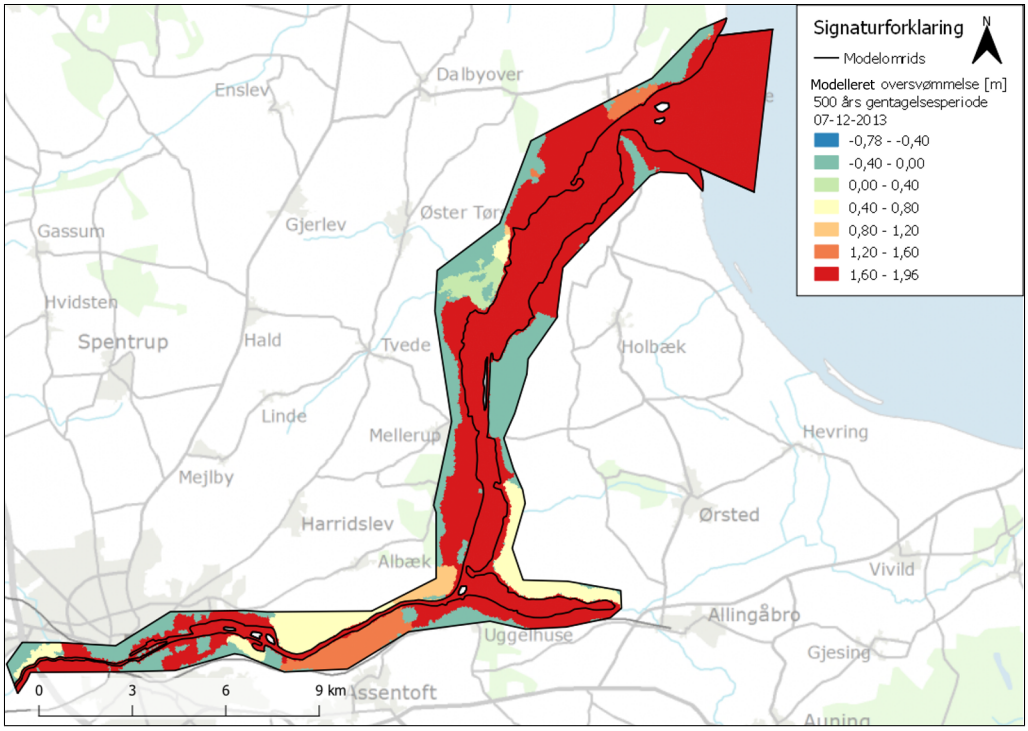


Figur B.4. *Simuleret vandstand i Randers Havn ved en 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5. Angivet er ligeledes den simulerede vandstand ved det høje og lave 95% konfidensinterval for 500 års hændelsen.*

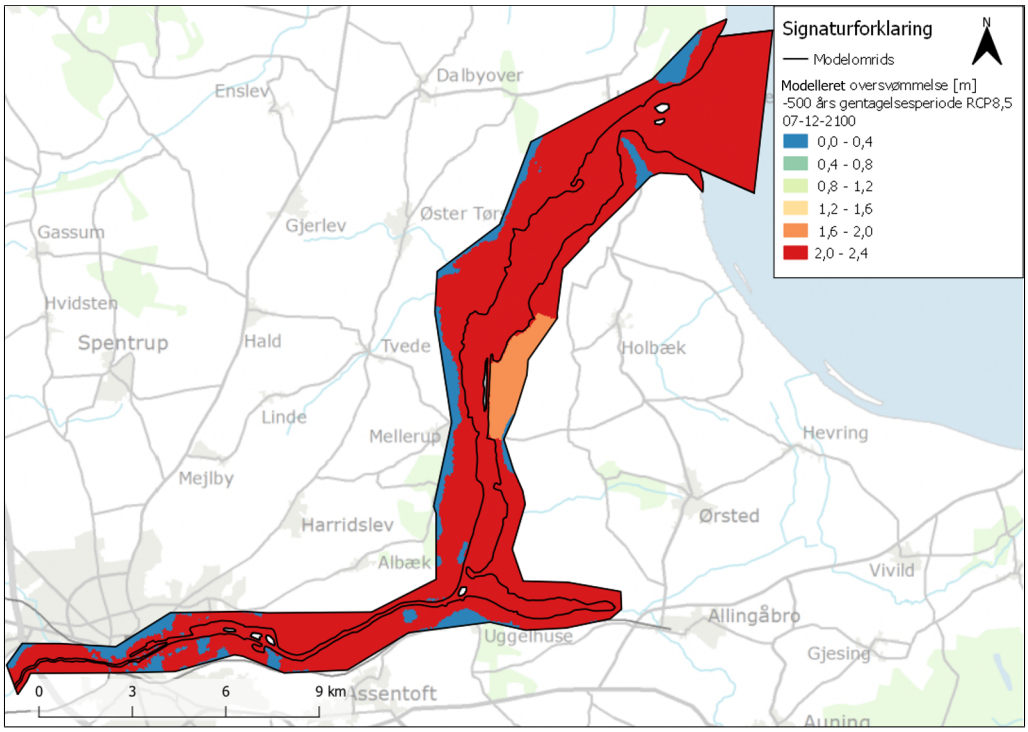
Fra Ditlevsen et al. [2018] er opstillet et 95% konfidensinterval for vandstande med en bestemt gentagelsesperiode, se figur 2.4. Dette skyldes, at der er usikkerheder forbundet med de beregnede vandstande ved en given gentagelsesperiode, som er fundet på baggrund af de målte vandstande i Randers Havn i måleperioden fra 1909 til 2017. Af graferne der afbilder de simulerede vandstande i Randers Havn i perioden 01-12-2100 til 11-12-2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 som ses på figur B.3 og B.4 fremgår det, at der mellem højeste og laveste grænse i konfidensintervallet for de to udledningsscenarier er omkring 0,3 m forskel. Det betyder at vandstanden ved en 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 kan være et sted mellem 1,91 m og 2,22 m ved RCP4,5 eller et sted mellem 2,11 m og 2,44 ved RCP8,5.

Oversvømmelserne ved følgende modellere scenarier er præsenteret nedenfor:

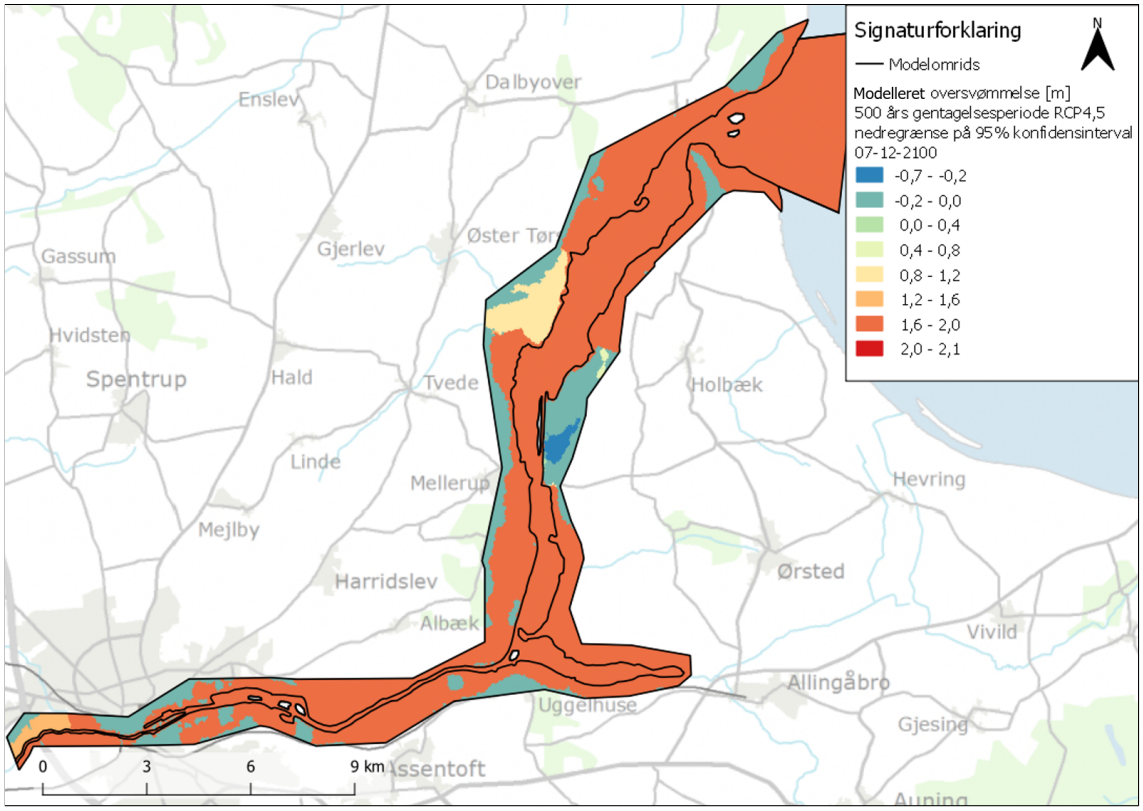
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode i år 2013** fremgår af figur B.5.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5** fremgår af figur B.6.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den nedre grænse af 95% konfidensinterval fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5** fremgår af figur B.7.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensinterval fremskrævet til år 2100 RCP 4.5** fremgår af figur B.8.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den nedre grænse af 95% konfidensinterval fremskrevet til år 2100 RCP 8.5** fremgår af figur B.9.
- **Hændelse med 500 års gentagelsesperiode ved den øvre grænse af 95% konfidensinterval fremskrevet til år 2100 RCP 8.5** fremgår af figur 8.4.



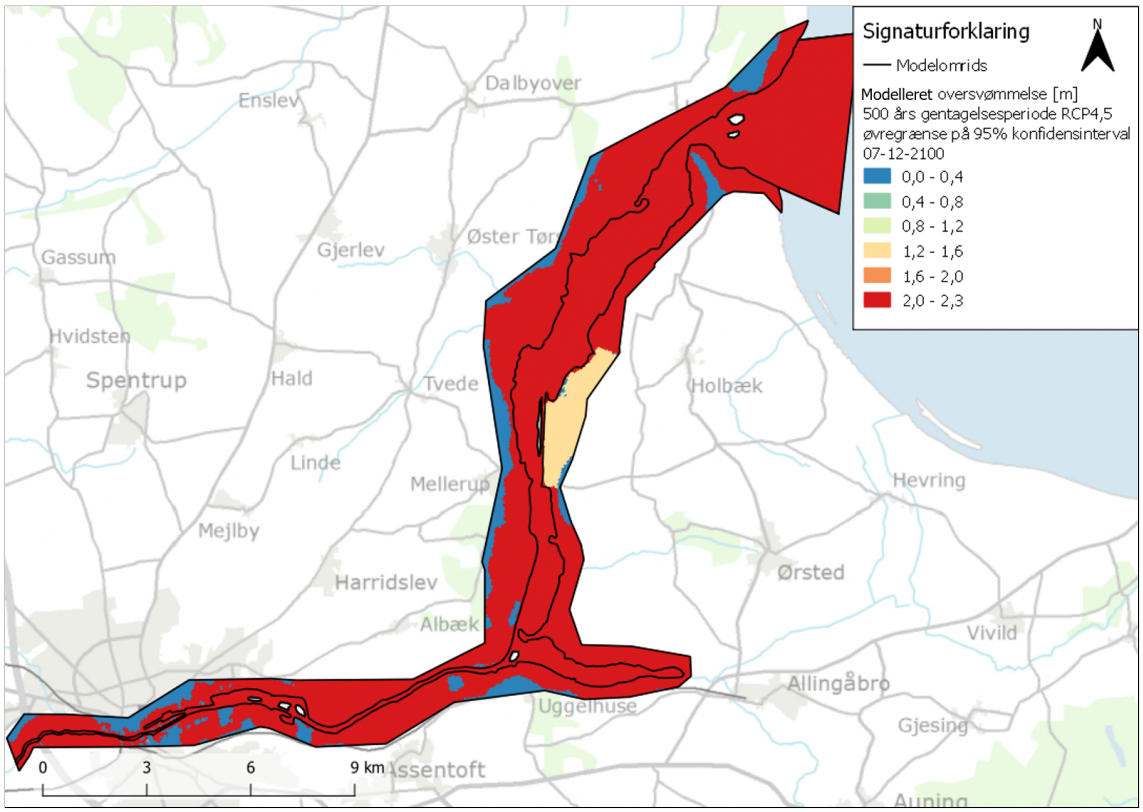
Figur B.5. *Modeleret oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2013 ved en hændelse med en 500 års gentagelsesperiode.*



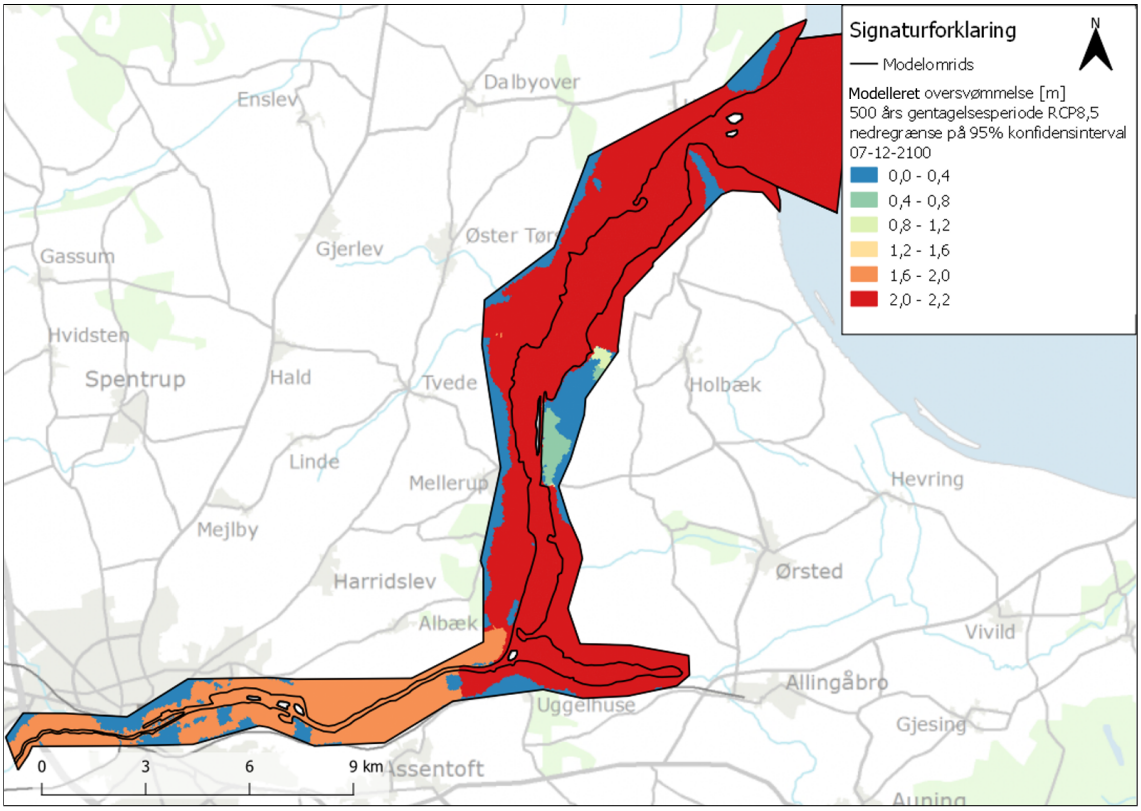
Figur B.6. *Modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 ved en hændelse med en 500 års gentagelsesperiode, hvor vandstanden er forøget i forhold til RCP8,5.*



Figur B.7. *Modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 500 års hændelse ved den nedre grænse af 95% konfidensinterval i 2100 ved RCP4,5.*



Figur B.8. *Modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 500 års hændelse ved den øvre grænse af 95% konfidensinterval i 2100 ved RCP4,5.*



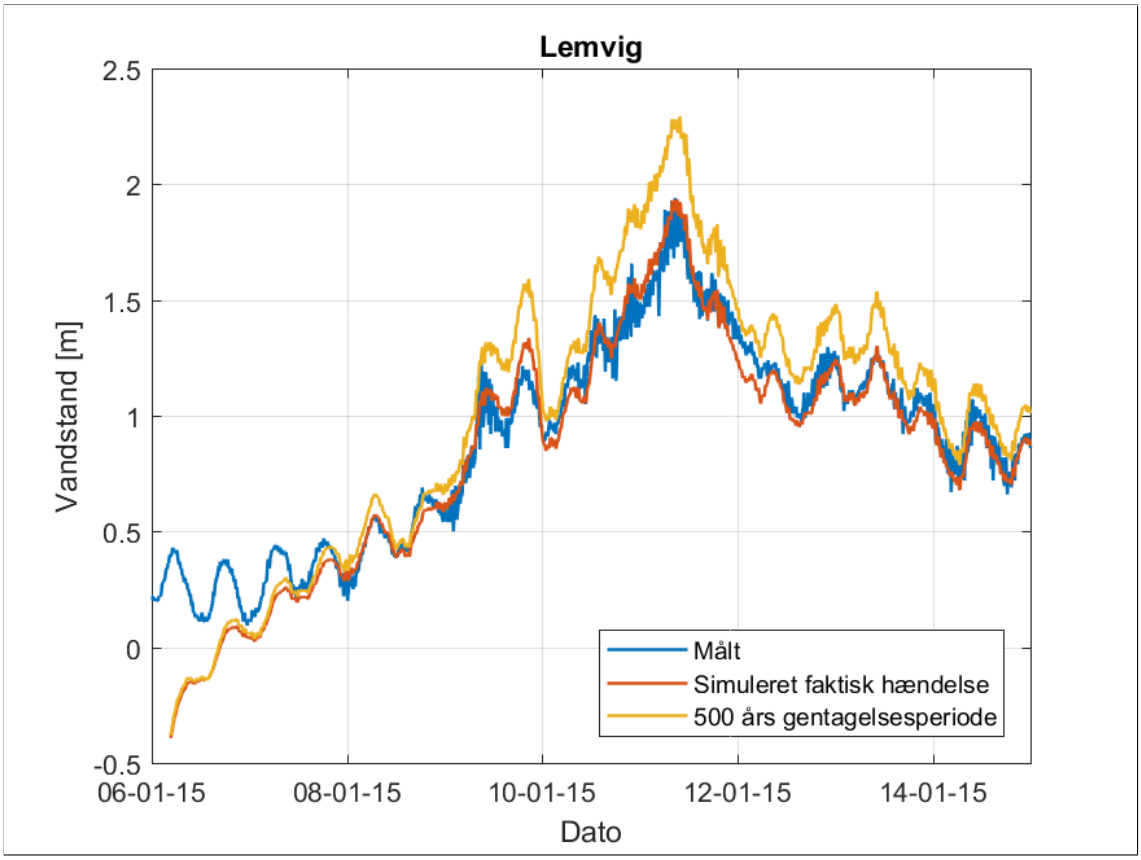
Figur B.9. *Modellerede oversvømmelser ved Randers Fjord den 07-12-2100 500 års hændelse ved den nedre grænse af 95% konfidensinterval i 2100 ved RCP8,5.*

Oversvømmelserne ved en hændelse med en 500 års gentagelsesperiode i år 2013, dækker flere dele af området omkring Randers Fjord, som det fremgår af figur B.5, men de er både i dybde og udbredelse mindre end de modellerede oversvømmelser som fremgår af figur B.6, B.7, B.8 og B.9. Oversvømmelserne ved 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 dækker største delen af terrænet ved Randers Fjord, og forskellen på oversvømmelserne her ses primært dybden.

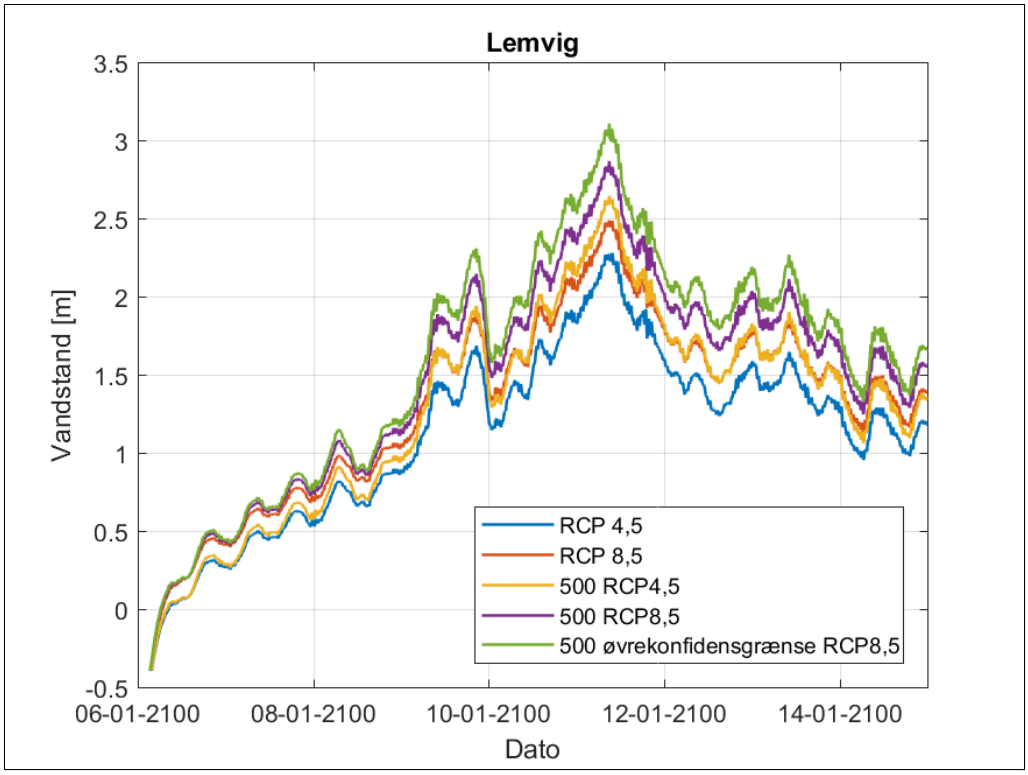
Oversvømmelses modellering Limfjorden C

I dette appendiks ses de simulerede vandstande i Lemvig, Skive og Løgstør ved de forskellige scenarier, som er kørt med modellen. Derudover fremgår de modellerede oversvømmelser, som ikke er vist i kapitel 8.

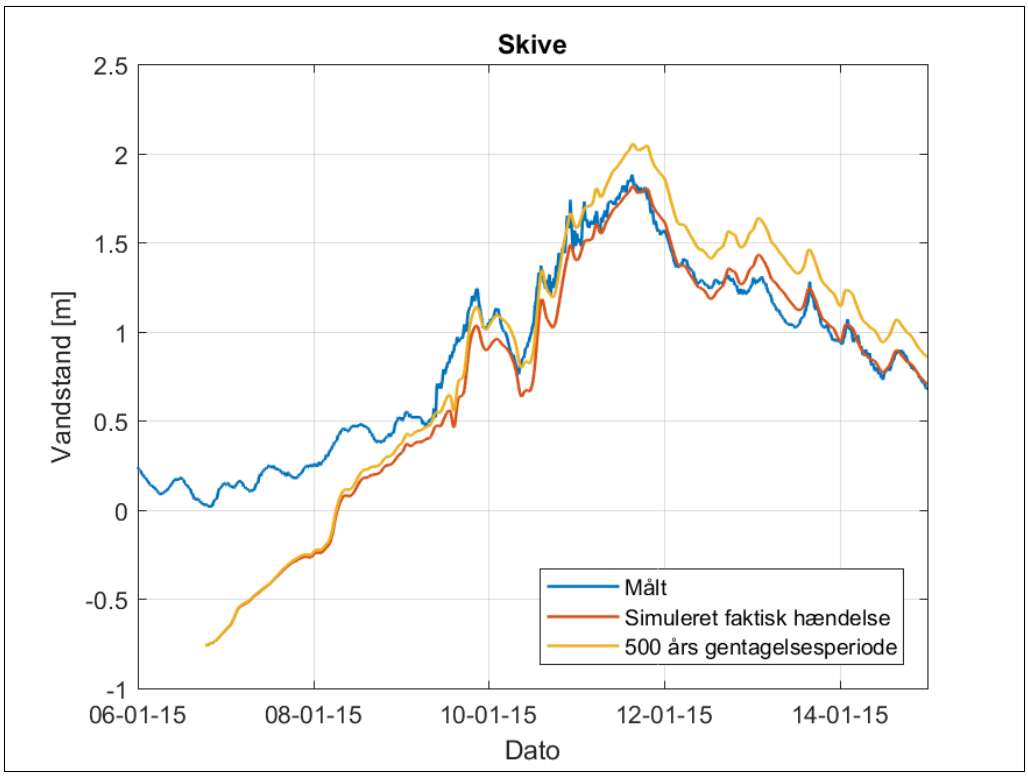
De modellerede vandstande ved Lemvig, Skive og Løgstør ved en 2 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet og en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet samt de modellerede vandstande ved 2 års gentagelsesperiode og en 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 fremgår af figur C.2 til C.6.



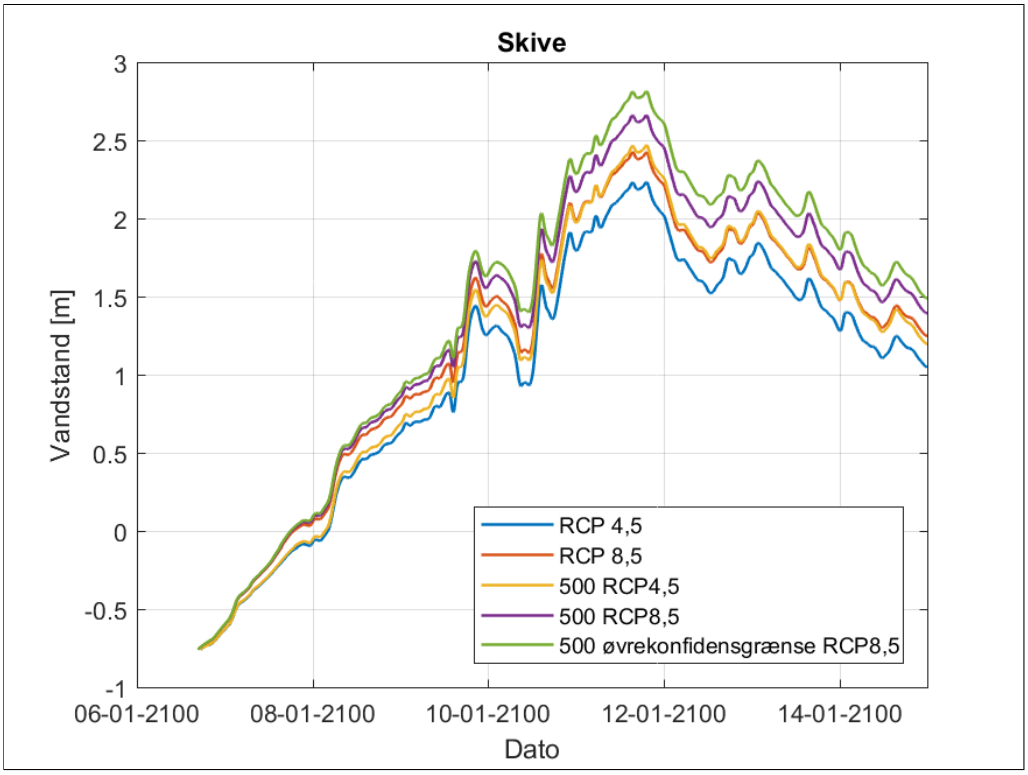
Figur C.1. *Målte samt simulerede vandstande i Lemvig ved hændelsen 11-01-2015 og 500 års hændelsen i Thyborøn Havet.*



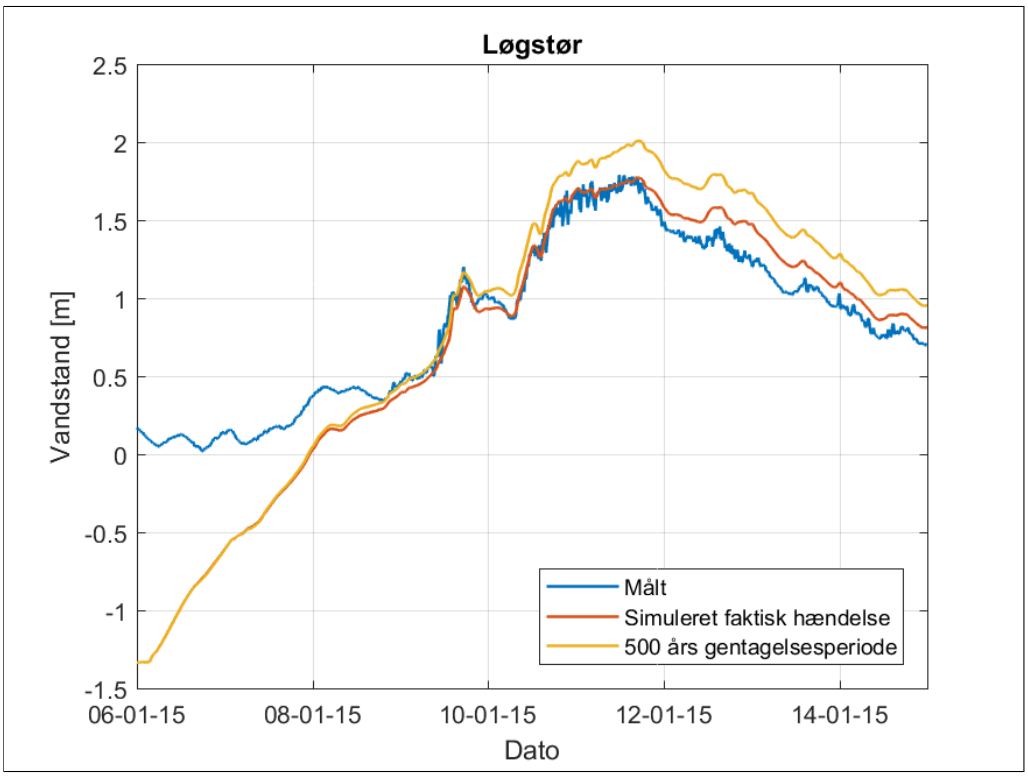
Figur C.2. *Simulerede vandstande i Lemvig ved hændelsen 11-01-2015 fremskrevet til 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 og ved hændelsen ved 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5.*



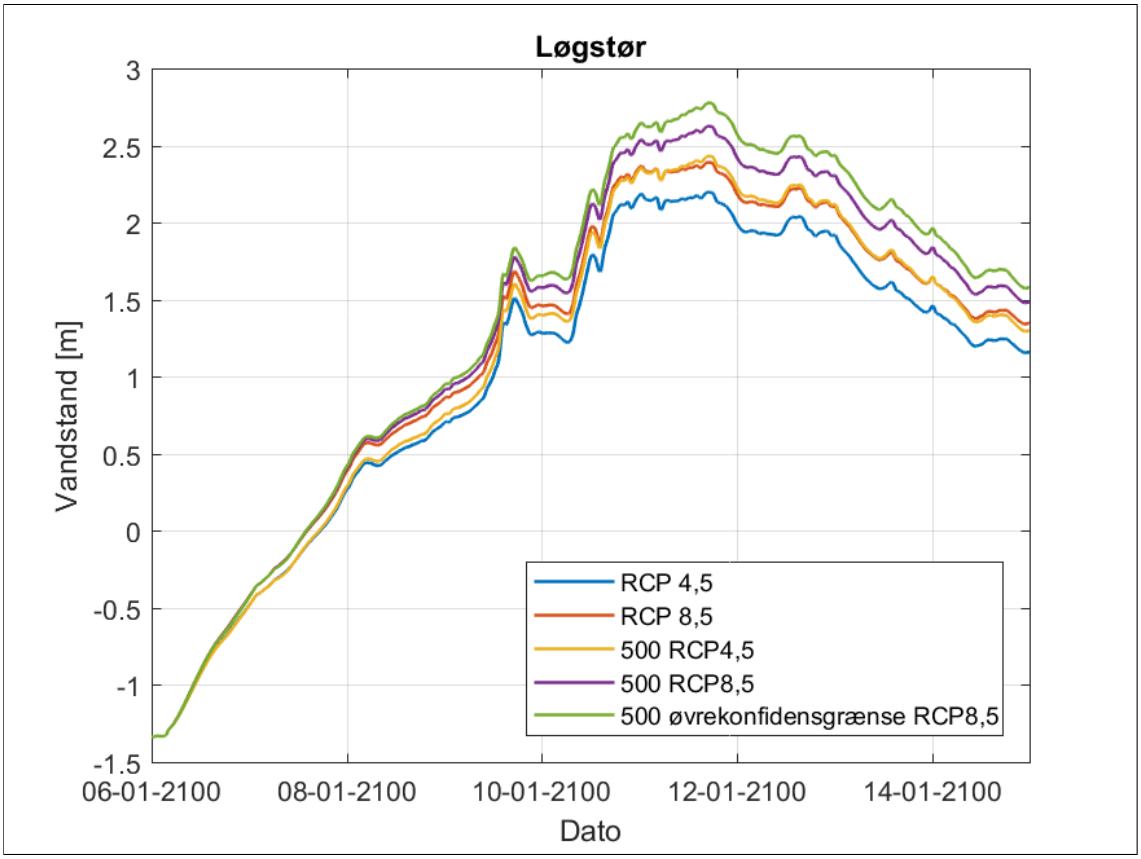
Figur C.3. *Målte samt simulerede vandstande i Skive ved hændelsen 11-01-2015 og 500 års hændelsen i Thyborøn Havet.*



Figur C.4. *Simulerede vandstande i Skive ved hændelsen 11-01-2015 fremskrevet til 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 og ved hændelsen ved 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5.*



Figur C.5. *Målte samt simulerede vandstande i Løgstør ved hændelsen 11-01-2015 og 500 års hændelsen i Thyborøn Havet.*



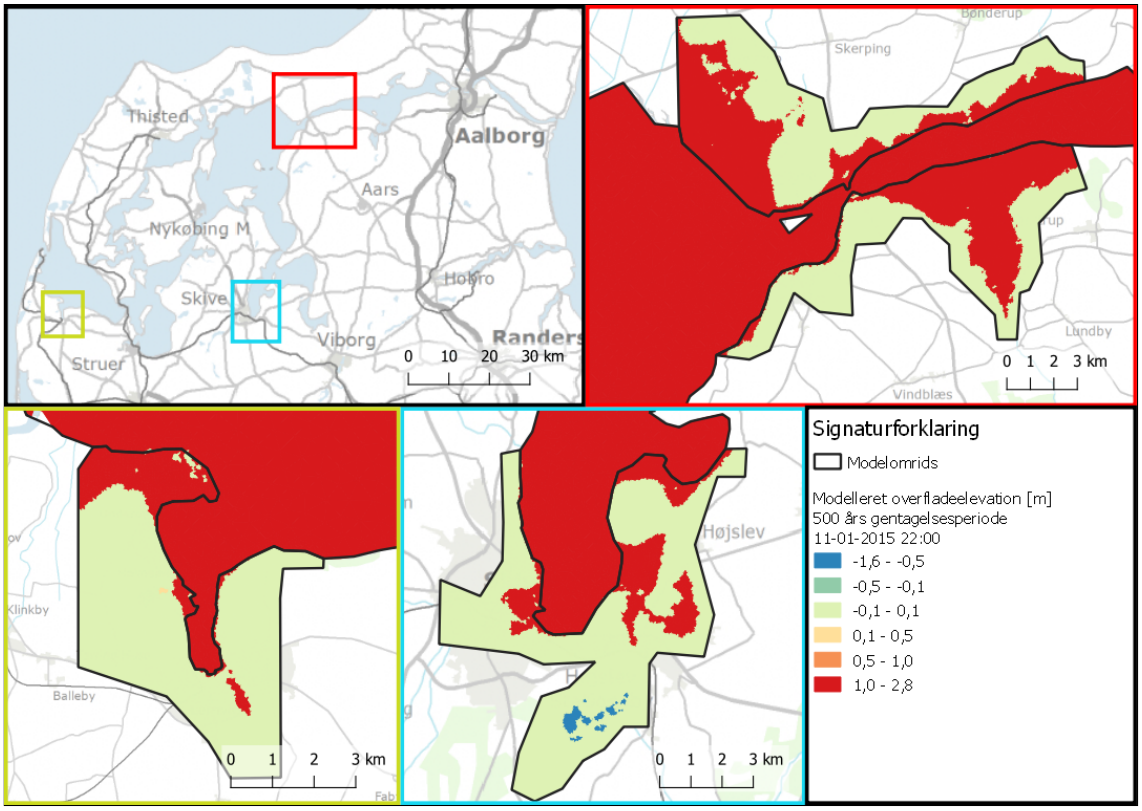
Figur C.6. *Simulerede vandstande i Løgstør ved hændelsen 11-01-2015 fremskrevet til 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5 og ved hændelsen ved 500 års gentagelsesperiode fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5 og RCP8,5.*

Det fremgår at vandstanden ved det mest kritiske scenarie i Lemvig er over 3 m, i Skive er over 2,7m og i Løgstør er 2,5 m.

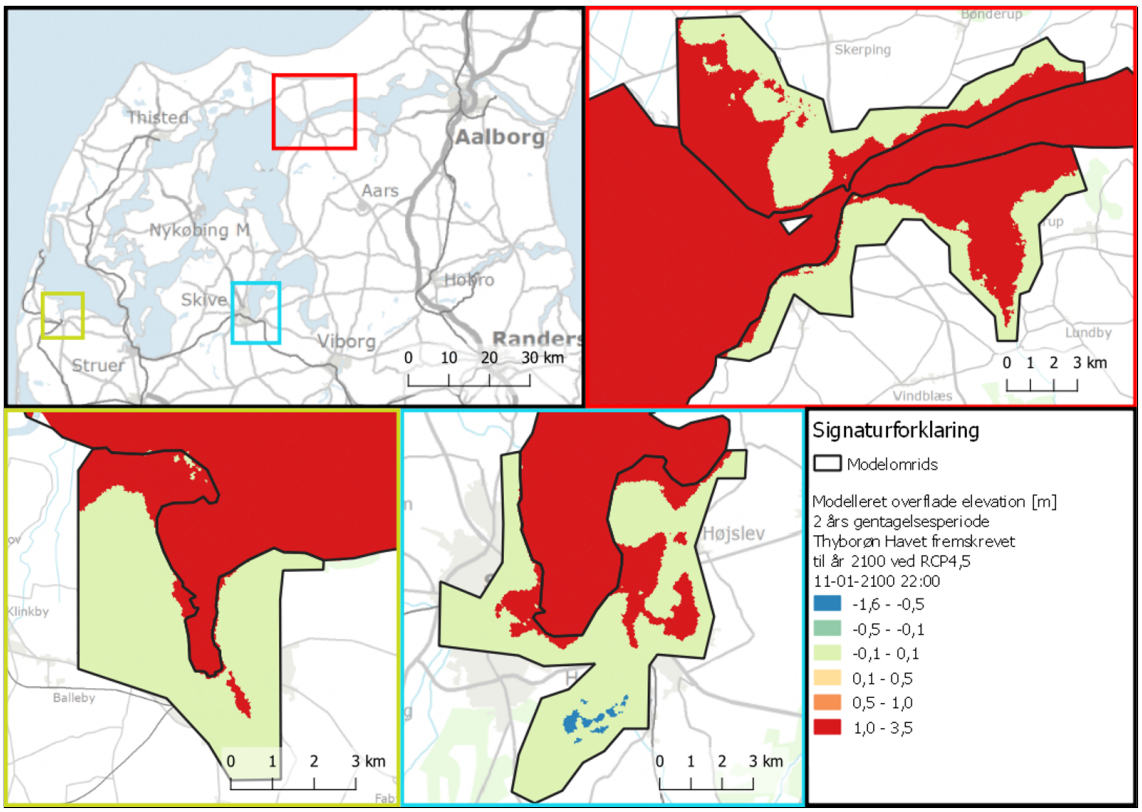
Oversvømmelser ved følgende modellerede scenarier er præsenteret nedenfor:

- **En hændelse med en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet i år 2015.** fremgår af figur C.7
- **Hændelse ved en 2 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.** fremgår af figur C.8
- **Hændelse ved en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.** fremgår af figur C.9
- **Hændelse ved en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.** fremgår af figur C.10

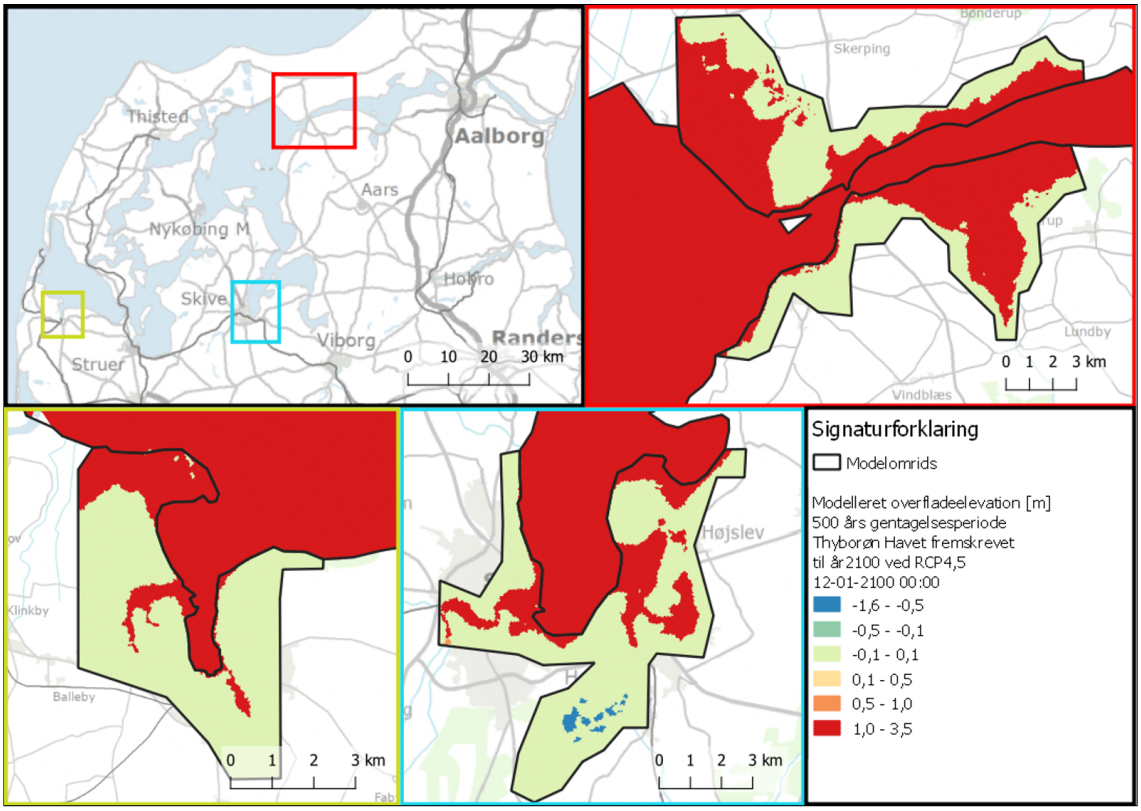
Af figur C.7 til C.10 fremgår det, at flere områder ved Limfjorden oversvømmes i forbindelse med modellerigen af de forskellige stormhændelser. Ved nogle af scenarierne er det vanskeligt, ud fra figurene at afgøre om, der er forskel i udbredelsen af oversvømmelserne.



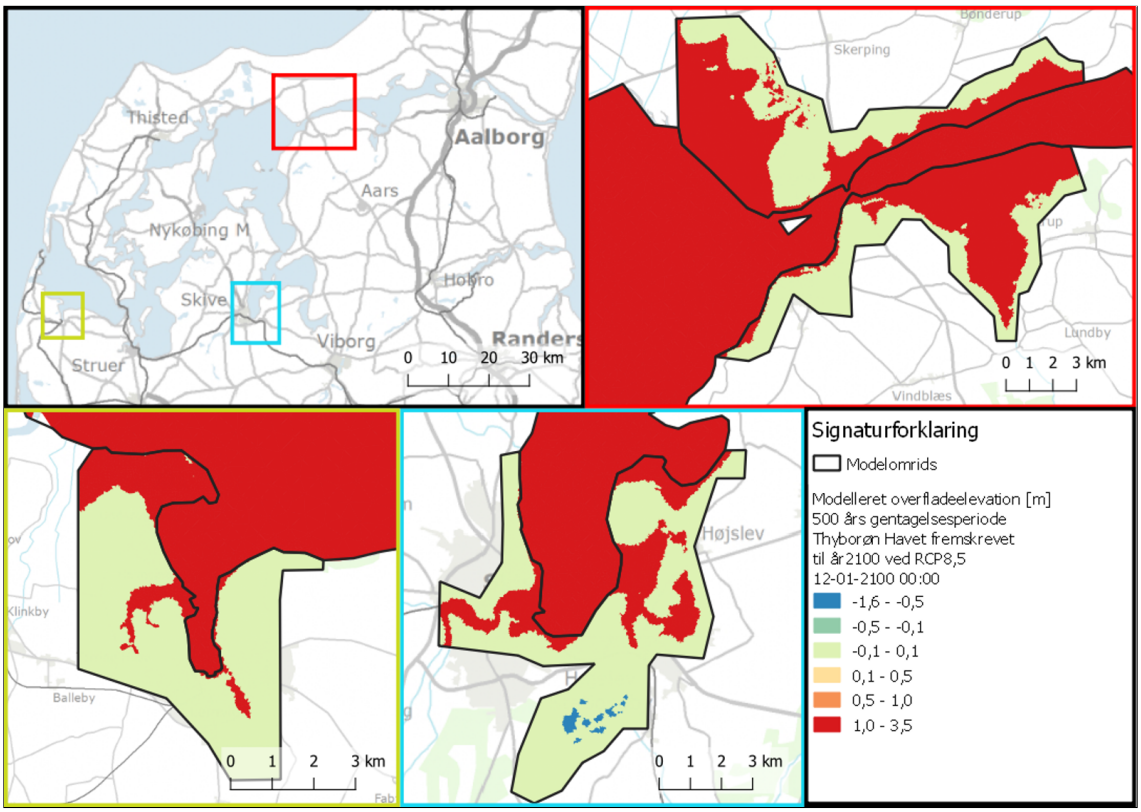
Figur C.7. *De modellerede oversvømmelser i Lemvig, Skive og Løgstør ved en hændelse med en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet i år 2015.*



Figur C.8. *De modellerede oversvømmelser i Lemvig, Skive og Løgstør ved en hændelse med 2 års gentagelsesperiode ved Thyborøn Havet fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.*



Figur C.9. *De modellerede oversvømmelser i Lemvig, Skive og Løgstør ved en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn fremskrevet til år 2100 ved RCP4,5.*



Figur C.10. *De modellerede oversvømmelser i Lemvig, Skive og Løgstør ved en 500 års gentagelsesperiode ved Thyborøn fremskrevet til år 2100 ved RCP8,5.*

Elektronisk appendiks D

Dette appendiks er en oversigt over de elektroniske appendiks, der er vedlagt i projektmappen.

D.1 Randers Fjord model

Dette elektroniske appendiks indeholder den færdigkalibrerede Randers Fjord model med terræn, der er anvendt til at modellere oversvømmelserne ved Randers Fjord.

D.2 Limfjords model

Dette elektroniske appendiks indeholder den færdigkalibrerede model af Limfjorden med terræn, der er anvendt til at modellere oversvømmelserne ved Lemvig, Skive og Løgstør.

D.3 Fremskrivning vind og vandstande Randers Fjord

Dette elektroniske appendiks indeholder vinddata fra Randers Havn og vandstandsdata fra Udbyhøj Havn tilpasset de forskellige scenarier, hvortil der er modelleret oversvømmelser ved Randers Fjord.

D.4 Fremskrivning vind og vandstand ved Limfjorden

Dette elektroniske appendiks indeholder vinddata fra Thyborøn Havet og Hals Havn tilpasset de forskellige scenarier, hvortil der er modelleret oversvømmelser ved Limfjorden i Lemvig, Skive og Løgstør.

D.5 Randers Fjord model med implementering af løsningsstrategier

Dette elektroniske appendiks indeholder Randers Fjord model med de implementerede løsningsstrategier.

D.6 Limfjords model med implementering af løsningsstrategier

Dette elektroniske appendiks indeholder Limfjords modelen med de implementerede løsningsstrategier.